

อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบ
เทอร์โมอีลาสโตไฮดรอดนามิกส์

EFFECT OF SOLID ADDITIVES ON THERMO-ELASTO-HYDRODYNAMICS
LUBRICATION

เกษม ธรรมโกศล
KASAME THAMMAKOSOL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-893-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบ
เทอร์โมอีลาสโตไฮดรอดนามิกส์

EFFECT OF SOLID ADDITIVES ON THERMO-ELASTOHYDRODYNAMICS
LUBRICATION



เกษม ธรรมโกศล

KASAME THAMMAKOSOL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...49586
วัน, เดือน, ปี 24 ก.พ. 2547



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-893-5

**EFFECT OF SOLID ADDITIVES ON THERMO-ELASTOHYDRODYNAMICS
LUBRICATION**

KASAME THAMMAKOSOL

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

2003

ISBN 974-324-893-5

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮดรอดนามิกส์
EFFECT OF SOLID ADDITIVES ON THERMO-ELASTOHYDRODYNAMICS
LUBRICATION

ชื่อนักศึกษา นายเกษม ธรรมโกศล

รหัสประจำตัว 42062030

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.จำลอง	ปราบแก้ว	
ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	
ผศ.สมยศ	จันเกษม	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 28 ตุลาคม 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่... ๑๘เดือน... พ.ย. ๒๕๔๖ พ.ศ. ๒๕๔๖

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โม อิตาสโตไฮดรอลิกไดนามิกส์
นักศึกษา	นาย เกษม ธรรมโกศล
รหัสนักศึกษา	42062030
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นของแข็งในแบบเทอร์โมอิตาสโตไฮดรอลิกไดนามิกส์ของทรงกระบอกบนแผ่นราบ โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้คือ SAE40 และ SAE90 ที่ผสม กราไฟต์, โมลิตินัมไดซันไฟต์ และ โพลีเตตาฟูโอโลเอทีลีน ในปริมาณ 0% 1% 3% และ 5% โดยน้ำหนักตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า น้ำมันหล่อลื่นที่เติมของแข็งลงไปจะมีบทบาทอย่างมากต่ออุณหภูมิ และพฤติกรรมการหล่อลื่นของทรงกระบอกบนแผ่นราบ

Thesis	Effect of solid Additives on Thermo-elastohydrodynamics Lubrication
Student	Mr.Kasame Thammakosol
Student ID.	42062030
Degree	Master of engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

In this paper, to study the lubricating of solid-liquid lubricants for cylinders on plane in thermoelastohydrodynamic lubrication (EHL) regime line contact. The pure oils, SAE 40 and SAE 90, are mixed with solid additives such as graphite, MoS₂ and polytetrafluoroethylene (PTFE) in concentration of 0 % ,1% , 3% and 5% by weight, respectively. From the theoretical results show that the effect of solid additives play an important role on temperature and performance characteristic of cylinder on plane.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้บรรลุถึงได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบุคคลที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

คุณพ่อประสาธน์ และคุณแม่สุณี. ธรรมโกศล ที่ให้ชีวิต ให้โอกาสทางการศึกษาและให้กำลังใจเมื่อเกิดความท้อแท้

รศ.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและให้ข้อคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

คุณประภัทร อรุณเมตตา ที่กรุณาช่วยค้นหาแนะนำข้อมูลและแหล่งในการค้นหาข้อมูล
คุณสุรัชย์ จึงจตุพรชัยและคุณอมรชัย ฉัตรสง่า ที่กรุณาให้ยืมเครื่องคอมพิวเตอร์ในการแก้สมการและให้ข้อมูลทางเทคนิค

คุณชนิษฐา วงษ์สีดาแก้วและคุณวสิพรรณ กันเนื่อง ที่กรุณาช่วยพิมพ์และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นรวมทั้งเพื่อนๆ เป็นอย่างยิ่งที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เกษม ธรรมโกศล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XX
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
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	4
2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	7
2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น.....	9
2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น.....	10
2.4 สารหล่อลื่นของแข็ง.....	11
2.4.1 กราไฟต์.....	12
2.4.2 โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน.....	12
2.4.3 โมลิดินัมไดไซไฟด์.....	13
บทที่ 3 รีโอโลยี.....	15
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด.....	15
3.1.1 ของไหลแบบนิวโตเนียน.....	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน.....	15
3.2 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี.....	17
3.3 คุณสมบัติทางรีโอโลยีของน้ำมันหล่อลื่น.....	17
บทที่ 4 ทฤษฎีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮดรอดนามิกส์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสม	
สารหล่อลื่นของแข็ง.....	28
4.1 สมการเรย์โนลด์.....	28
4.2 ทฤษฎีอิลาสโตไฮดรอดนามิกส์.....	32
4.2.1 สมมุติฐานของ Hertz.....	32
4.2.2 สมการความหนาของฟิล์มน้ำมัน.....	33
4.3 สมการความหนาแน่นและความหนืด.....	38
4.4 สมการพลังงาน.....	39
4.5 ภาวะที่รับ.....	43
บทที่ 5 วิธีการเชิงตัวเลข.....	46
5.1 การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง.....	46
5.2 การแก้สมการพลังงานโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง.....	48
5.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข.....	50
5.3.1 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	50
5.3.2 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎของซิมสัน 1/3.....	51
5.4 การคำนวณหาค่าความหนาฟิล์ม.....	52
5.5 วิธีมัลติกริด.....	56
5.5.1 วิธีเกาส์ไซเดล.....	56
5.5.2 การกำหนดจำนวนของโนดที่ระดับหยาบ.....	57
5.5.2.1 ตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายใน.....	57
5.5.2.2 ตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด.....	58
5.5.3 วัฏจักรของมัลติกริด.....	59
5.5.4 การทำมัลติกริดแบบเต็ม.....	60

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.5.5 วิธีการประมาณแบบเต็ม.....	61
5.5.6 มัลติกริดแบบ adaptive.....	62
บทที่ 6 ผลการคำนวณ.....	65
6.1 ผลเนื่องจากความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง.....	65
6.2 ผลเนื่องจากขนาดของอนุภาค.....	126
6.3 ผลเนื่องจากความแข็งของอนุภาค.....	137
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	138
7.1 บทสรุป.....	138
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
เอกสารอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	142
ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางกายภาพของสาร.....	142
ภาคผนวก ข Flow chat ที่ใช้ในการคำนวณ.....	144
ภาคผนวก ค ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	168

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าที่ใช้ในการหาดัชนีความหนืด.....	8
3.1 ค่า m_0 และ n ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง.....	27
5.1 แสดงจำนวนจุดโนดในระดับต่างๆ.....	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของกราฟไฟต์.....	12
2.2 ลักษณะโครงสร้าง PTFE.....	13
2.3 ลักษณะด้านข้างและส่วนปลายของโมเลกุล.....	13
2.4 แสดงโครงสร้างของโมลิตินัมไดไซไฟต์.....	14
3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน.....	16
3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสมบูรณ์และอัตราความเครียดเฉือน.....	16
3.3 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน.....	17
3.4 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C ...	18
3.5 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C .	18
3.6 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสม โมลิตินัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C	19
3.7 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสม โมลิตินัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C	19
3.8 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอคเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C	20
3.9 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอคเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C	20
3.10 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C	21
3.11 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C	21
3.12 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสม โมลิตินัม ไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C	22
3.13 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสม โมลิตินัม ไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C	22
3.14 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอคเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C	23
3.16 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และกราไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C	24
3.17 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และกราไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C	24
3.18 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โมลิคินัม ไคโซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C	25
3.19 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โมลิคินัม ไคโซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C	25
3.20 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C	26
3.21 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C	26
4.1 แสดงระบบพิกัดและเงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์.....	29
4.2 แสดงรูปร่างทางเรขาคณิตของฟิล์มน้ำมัน.....	33
4.3 แสดงพิกัดเชิงขั้วที่ใช้สำหรับภาวะแบบเส้น w'_y ที่กระทำบนแกน y ในระนาบ $x = 0$	34
4.4 แสดงการเสีรูปร่างของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัส.....	43
5.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด.....	46
5.2 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	50
5.3 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบแบ่งหลายจุด.....	51
5.4 แสดงการอินทิเกรตโดยใช้กฎของซิมสัน 1/3.....	51
5.5 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎของซิมสัน 1/3 แบบหลายช่วง.....	52
5.6 แสดงวิธีการคำนวณหาการเปลี่ยนรูปในระหว่างที่มีความดันมากกระทำ $d\delta_{i,j}$ ที่โนด i ในช่วง $[X_{j-1}, X_{j+1}]$	53
5.7 แสดงการคำนวณหาตัวดำเนินการประมาณค่าภายใน.....	57
5.8 แสดงวัฏจักรของมัลติกริดแบบต่างๆ.....	60
5.9 แสดงกระบวนการทำ FMG.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 แสดงการหาค่าที่โกสต์โนค.....	63
6.1 แสดงเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ.....	66
6.2 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1.....	66
6.3 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3.....	67
6.4 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5.....	67
6.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1.....	68
6.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3.....	68
6.7 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5.....	69
6.8 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1.....	69
6.9 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3.....	70
6.10 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5.....	70
6.11 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1.....	71
6.12 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3.....	71
6.13 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5.....	72
6.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1.....	72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.43 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 5.....	87
6.44 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 1.....	88
6.45 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 3.....	88
6.46 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 5.....	89
6.47 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 1.....	89
6.48 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 3.....	90
6.49 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 5.....	90
6.50 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 1.....	91
6.51 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 3.....	91
6.52 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 5.....	92
6.53 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 1.....	92
6.54 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 3.....	93
6.55 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 5.....	93
6.56 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 1.....	94

สารบัญรูปรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.71 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โมลิตินั้ม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 1.....	102
6.72 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสม โมลิตินั้ม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 3.....	102
6.73 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสม โมลิตินั้ม ไคโซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 5.....	103
6.74 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 1.....	103
6.75 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 3.....	104
6.76 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 5.....	104
6.77 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 1.....	105
6.78 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 3.....	105
6.79 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 5.....	106
6.80 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 1.....	106
6.81 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 3.....	107
6.82 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตคาฟูโอโลเอตเทลินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 5.....	107
6.83 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุล.....	108
6.84 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุล.....	108

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.85 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	109
6.86 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	109
6.87 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	110
6.88 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	110
6.89 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	111
6.90 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	111
6.91 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	112
6.90 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	112
6.93 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	113
6.94 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	113
6.95 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	114
6.96 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	114
6.97 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิตินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	115
6.98 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	115

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.99 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	116
6.100 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	116
6.101 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสมกราไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆที่สภาวะสมดุลย์.....	117
6.102 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสมกราไฟต์ใน ความเข้มข้นต่างๆที่สภาวะสมดุลย์.....	117
6.103 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆที่สภาวะสมดุลย์.....	118
6.104 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสม โมลิบดีนัม ได โซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	118
6.105 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสม โมลิบดีนัม ได โซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	119
6.106 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสม โมลิบดีนัม ได โซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	119
6.107 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	120
6.108 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	120
6.109 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% เมื่อผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์.....	121
6.110 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งกิ้งที่ใช้้ำมัน SAE 40 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$	121
6.111 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โมลิบดีนัม ได โซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	122
6.112 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	122

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.113 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$	123
6.114 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิดินัม ไคไบไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	123
6.115 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโโอลอเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	124
6.116 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$	124
6.117 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสม โมลิดินัม ไคไบไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	125
6.118 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสม โพลีเตตาฟูโโอลอเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	125
6.119 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสมกราไฟต์ที่มีขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$	126
6.120 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โมลิดินัม ไคไบไฟต์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	126
6.121 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโโอลอเอตเทลิน ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	127
6.122 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ที่มีขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$	127
6.123 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิดินัม ไคไบไฟต์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	128
6.124 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โพลีเตตาฟูโโอลอเอตเทลิน ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	128
6.125 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% ที่ผสมกราไฟต์ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	129
6.126 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% ที่ผสม โมลิดินัม ไคไบไฟต์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	129

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.127 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% ที่ผสมโพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลินที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$	130
6.128 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 40 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ.....	130
6.129 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆ.....	131
6.130 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 40 ที่ผสมโพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆ.....	131
6.131 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ.....	132
6.132 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆ.....	132
6.133 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสมโพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆ.....	133
6.134 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ.....	133
6.135 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ที่ผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ.....	134
6.136 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ที่ผสมโพลีเตตาฟูโอ โลเอตเทลินในอัตราส่วนต่างๆ.....	134
6.137 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมัน SAE 40.....	135
6.138 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมัน SAE 90.....	135
6.139 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมันปาล์ม ที่ผสม ZDPT 1 %.....	136
6.140 แสดงภาวะที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 5% ของน้ำมัน SAE 40.....	136
6.141 แสดงภาวะที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 5% ของน้ำมัน SAE 90.....	137
6.142 แสดงภาวะที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 5% ของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %.....	137

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันรัฐบาลได้หันมาส่งเสริมการลงทุนทางด้านอุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการพัฒนาทางการเกษตรและวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีในด้านต่างๆ ทำให้ประเทศไทยมีอุตสาหกรรม การเกษตรมีการเจริญเติบโตมากขึ้น และทำให้มีความต้องการในด้านพลังงานทุกชนิดมากขึ้นตามไปด้วย ได้แก่ พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน เป็นต้น จึงได้มีแนวความคิดเพื่อหาวิธีการประหยัดพลังงานเพราะพลังงานนั้นเป็นต้นทุนในการผลิตชนิดหนึ่ง แต่สิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็น นอกจากพลังงานแล้วยังมีการบำรุงรักษาเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมก็มีความจำเป็นด้วย เนื่องจากเครื่องจักรเครื่องหนึ่งนั้นมีราคาที่สูง

การบำรุงรักษาที่มีความจำเป็นมากอย่างหนึ่งคือ การหล่อลื่นเครื่องจักร เนื่องจากเครื่องจักร จะสามารถทำงานได้ก็อาศัยการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่าง ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หากทำการหล่อลื่นไม่ถูกวิธี เช่น ใช้น้ำมันหล่อลื่นไม่ถูกต้องอาจจะทำให้ เครื่องจักรเครื่องนั้นเสียหายได้ ดังนั้นจึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าหาการเพิ่มคุณภาพสารหล่อลื่น โดยวิธีการต่างๆ เช่น การเติมสารโพลีไอโซบิวทีลีนลงไป ในน้ำมันหล่อลื่นเพื่อเพิ่มค่าดัชนี ความหนืดให้กับน้ำมันหล่อลื่น การเติมสารหล่อลื่นของแข็งก็เป็นการเพิ่มคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นอีก วิธีหนึ่ง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการหล่อลื่นเมื่อทำการเติมสารหล่อลื่น ของแข็งลงไป ในน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้น้ำมันหล่อลื่น 3 ชนิด เป็นน้ำมันหล่อลื่นคือ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40, SAE 90 และน้ำมันปาล์ม และทำการเติมสารหล่อลื่นของแข็ง 3 ชนิด ได้แก่ กราไฟต์, โมลลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิน ในอัตราส่วนต่างๆ

1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา

ในปี ค.ศ.1786 Reynold [1] ได้นำเสนอสมการเรย์โนลด์ สำหรับของไหลที่แบบ นิวโตเนียนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์

ต่อมาในปี ค.ศ.1896 Hertz [2] ได้ทำการพิจารณาความเค้นและการเสียดรูปของรูปทรงวงรี สองอันสัมผัสกัน โดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเพื่อกำหนดรูปแบบของ ปัญหาสำหรับทำการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แบริ่งทรงกลม แบริ่งลูกกลิ้ง เฟืองและ ลูกเบี้ยว และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสมการเรย์โนลด์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นในจุดที่มีการสัมผัสกันของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

ในปี ค.ศ.1893 Barus ได้แนะนำสูตรสำหรับการหาความหนืดของของไหลที่ขึ้นอยู่กับความดัน และในปี ค.ศ.1966 Roelands [3] ได้ทำการทดลองและพัฒนาสมการที่ใช้ในการหาความหนืดของไหลที่ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ และในปีเดียวกัน Dowson และ Higginson [4] ได้ทำการศึกษาหาความหนาแน่นของของไหลที่ความดันสูงและได้แนะนำสมการที่ใช้ในการหาความหนาแน่นของของไหลที่ระดับความดันสูง

ในปีค.ศ.1987 Conry ได้นำใช้แบบจำลองของ Eyring เพื่อประยุกต์กับการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์สำหรับหล่อลื่นกับสารหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียนกับปัญหาแบบสัมผัสเป็นเส้น (line contact) ในปี 1989 Najji, Bou-Said และ Berthe [5] ได้ทำการนำเสนอสมการเรย์โนลด์ที่ใช้ได้กับสารหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียนซึ่งใช้ได้กับแบบจำลองได้ทุกชนิด

เนื่องจากการหล่อลื่นโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวทำให้ในบางครั้งมีการกระแทกกันระหว่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงได้มีการศึกษาโดยนำของแข็งที่เป็นสารหล่อลื่นมาช่วยในการลดการกระแทกของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยในปี ค.ศ. 1966 Rylander [6] ได้ทำการศึกษากการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งบนกาวรองพื้นพลาสติกสำหรับรับภาระสถิตและในปี ค.ศ.1968 Rylander และ Tolle [7] ได้ทำการศึกษากับน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งบนกาวรองพื้นพลาสติกสำหรับรับภาระพลวัต ในปี 1988 Khonsari และ Esfahanian [8] ทำการวิเคราะห์การหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์บนกาวรองพื้นพลาสติกโดยใช้โพลีเตตาฟูโอโลเอเตทลินผสมในน้ำมันหล่อลื่นและ โมลิตินัม ไคซันไฟด์ผสมในน้ำมันหล่อลื่นโดยมีความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง 1% โดยน้ำหนัก

ในปี ค.ศ.1989 และ 1990 Khonsari ,Wang และ Qi [9,10] ได้ทำการศึกษากการหล่อลื่นสองสถานะโดยใช้การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ และเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ ตามลำดับโดยมีความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งต่ำ

ในปี ค.ศ.1994 Hua และ Khonsari [11] ได้ทำการศึกษากการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยใช้โมลิตินัม ไคซันไฟด์ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40, SAE 90 และน้ำมันปาล์ม ที่เติมสารหล่อลื่นของแข็ง อันได้แก่ กราไฟต์, โมลิตินัม ไคซันไฟด์ และ โพลีเตตาฟูโอโลเอเตทลิน
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Shear strain rate ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40, SAE 90 และน้ำมันปาล์ม ที่เติมสารหล่อลื่นของแข็งได้แก่ กราไฟต์, โมลิตินัม ไคซันไฟด์ และ โพลีเตตาฟูโอโลเอเตทลิน

3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการกระจายความดัน, อุณหภูมิ และขนาดของความหนาฟิล์ม น้ำมัน ของลูกกลิ้งบนแผ่นเรียบเลื่อน ทั้งทางสถิตย์และทางพลวัต

4. เพื่อศึกษาผลกระทบของอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็ง ได้แก่ กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และ โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน ที่ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40, SAE 90 และน้ำมันปาล์ม ทั้งทางสถิตย์และทางพลวัต และทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40, SAE 90 และ น้ำมันปาล์มที่ไม่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาน้ำมัน 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ SAE 40, SAE 90 และน้ำมันปาล์ม ที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งได้แก่ กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และ โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน เพื่อเพิ่มความหนืด และช่วยให้สามารถรับภาระได้มากขึ้น

2. ทำการทดสอบน้ำมันทั้ง 3 ชนิด ที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ แกนหมุน (Rotational Viscometer) ในห้อง Lubrication Lab. ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแก้สมการเรย์โนลด์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของลูกกลิ้งบนแผ่นเลื่อนด้วยน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคูสมบัติของน้ำมัน 3 ชนิดที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง 3 ชนิดซึ่งคาดว่าจะมีประโยชน์คือช่วยในการศึกษาพฤติกรรมทางสถิตย์และพลวัตที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งซึ่งแต่ก่อนจะศึกษาแต่พฤติกรรมทางสถิตย์เพียงอย่างเดียวและช่วยให้เป็นแนวทางในการเลือกใช้สารหล่อลื่นของแข็งไปใช้ในการหล่อลื่นต่อไป

บทที่ 2

สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น(lubrication) เป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้ อย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี เป็นต้น [12]

2.1 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น(lubricating oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิต น้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับ เครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปโดยการเติม สารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่น

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีไออยู่นั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมัน แร่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีพอและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือ น้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ๆ บางอย่าง เท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้คือ

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (vegetable or animal base oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้งานหลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้ไต่อย่าง เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีต่ำเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะที่ใช้งาน เมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมาก ความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ บางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมัน ปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้น และความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของ น้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา เป็นต้น

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (mineral base oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกกลั่น ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซแก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตา ไขและยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่กันหอกกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สูญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิกมักจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้ สูญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดีพอ

น้ำมันพื้นฐานหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมนั้นสามารถแยกคุณสมบัติได้ 3 พื้นฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับฐานของน้ำมันปิโตรเลียมที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานพาราฟินิก (paraffinic base oil) น้ำมันดิบพาราฟินิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไฟสูง
- มีการระเหยตัวต่ำ
- รักษาคุณสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี
- จุดไหลเทสูง
- มีความถ่วงจำเพาะต่ำ
- มีคุณสมบัติหล่อลื่น ได้ดี
- เกิดไขได้ดี
- มีค่าดัชนีความหนืดสูง
- ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าแข็ง แต่หุ่คร่อนำได้ง่าย
- โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยากมาก
- มีความต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี
- ฟิล์มน้ำมันเหนียวและแข็งแรง

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานแนพทิก (naphthenic base oil) น้ำมันดิบฐานแนพทิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไปต่ำ
- มีการระเหยตัวต่ำ
- รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร
- มีจุดไหลเทต่ำ
- มีความถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี
- มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ
- มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ
- เมื่อเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว
- การยึดเกาะโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดีเป็นบางส่วน
- มีความต้องการการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบอะโรมาติก (aromatic base oil) มีคุณสมบัติดังนี้

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

4. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (synthetic base oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยตัว เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมาอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้คือ

- พวกโพลีแอลฟาโอเลฟิน (polyalphaolefin; PAO) เป็นสารที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดี ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นเพราะราคาถูกและสามารถผลิตได้ง่าย

- พวกเอสเทอร์(ester) ไดเอสเทอร์ (diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (complex ester) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ของ

เครื่องบินไอพ่น นอกจากนี้พวก ฟอสเฟตเอสเทอร์(phosphate ester) ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

- พวกโพลีไกลคอล(polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ เป็นต้น
- พวกซิลิโคน(silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ
- พวกฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน(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

1. ความหนืด หมายถึงความใสและความข้นของน้ำมัน โดยวัสดุที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่เมื่อหล่อลื่นก็จะบางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความหนืดสูงย่อมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มน้ำมันหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่ด้วยกันหลายระบบแต่นิยมใช้คือเซนติสโตกส์ (centistokes, cSt)

2. ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

3. จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

4. จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวน สำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นจะต้องเลือกใช้ใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

5. ดัชนีความหนืด (Viscosity index, VI) ตามธรรมดาแล้วน้ำมันจะมีความหนืดสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำและจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดเพื่อเป็นการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยถ้าค่าดัชนีความหนืดมีค่าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้าค่าดัชนีความหนืดต่ำอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ \bar{L} คือความหนืดเซย์โบลท์สากล (Saybolt universal viscosity, SUV) ของน้ำมันมาตรฐาน ที่มีค่า $VI = 0$

\bar{H} คือความหนืดเซย์โบลท์สากลของน้ำมันมาตรฐาน ที่มีค่า $VI = 100$

\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
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	481	100	1189	2546	140	2084	5202

ตารางที่ 2.1(ต่อ)

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 ฟิล์มหรือเยื่อบาง ๆ ของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิว โลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกัน โดยตรง หรือเพื่อเป็นลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มน้ำมัน ให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ก็จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง
2. ช่วยระบายความร้อน คุณสมบัติข้อนี้เป็นสิ่งสำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และ

ระบายความร้อนอันเนื่องจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ระบบเกียร์ หรือ เพื่อง่าย เป็นต้น

3. ช่วยรักษาความสะอาด ขณะที่ทำงานที่หล่อลื่นก็จะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงาน นั้นไปด้วย ก็จะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่าง ๆ จากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4. ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้ เช่น ก๊าซ ไอเสีย ละอองน้ำ หรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลง และไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5. ช่วยกระจายความสกปรก น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายความ สกปรกต่าง ๆ ที่มีปนในน้ำมันหล่อลื่นอันเนื่องจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้ สิ่งสกปรกต่าง ๆ เหล่านั้นรวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัว กันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นอย่างเหนียว

6. มีสารป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน(antioxidant) สารนี้จะช่วยให้ปฏิกิริยา ระหว่างน้ำมันเครื่องกับออกซิเจนในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันเครื่องจะทำปฏิกิริยา ดังกล่าวได้ง่ายและจะทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่เป็น ผลดีต่อเครื่องยนต์

7. มีสารป้องกันการสึกหรอ สารนี้จะช่วยให้ฟิล์มของน้ำมันคงทนต่อแรงเฉือนได้ดี

8. มีสารป้องกันการเกิดฟอง การเกิดฟองของน้ำมันเครื่องภายในห้องเพลาช้อเหวี่ยงจะ เกิดขึ้นมากเนื่องจากความเร็วสูงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบการ หล่อลื่นลดลง สารป้องกันการเกิดฟองจะช่วยทำให้ฟองอากาศละลายตัวได้ง่าย

9. มีสารป้องกันสนิม สารนี้จะช่วยให้น้ำมันเครื่องเป็นตัวเคลือบไม่ให้ชิ้นส่วนของ เครื่องยนต์ที่ทำได้ด้วยเหล็กเป็นสนิมขณะที่เครื่องยนต์หยุดทำงานเป็นเวลานาน ๆ

10. มีการระเหยตัวต่ำ (low volatility) น้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องมีจุดวาบไฟสูง ทำให้เกิดการ ระเหยตัวต่ำและทนต่อความร้อนสูง ๆ ได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความ สิ้นเปลืองน้ำมันเครื่องขณะเครื่องยนต์ทำงาน

11. มีจุดไหลเทต่ำ (low pour point) เพื่อที่จะนำน้ำมันเครื่องไปใช้งานในที่ที่อุณหภูมิต่ำได้

2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดเกรดเดียวกับชนิดเกรดรวม ซึ่งแต่ละ ชนิดก็เหมาะสมกับสภาพของงานแต่ละอย่าง ลักษณะที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดมีดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว (single viscosity หรือ single grade) SAE ได้เป็นผู้วางมาตรฐานเกี่ยวกับการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิด 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 แสดงว่า น้ำมันเครื่องชนิด 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 และคราบไคที่น้ำมันหล่อลื่นมีอุณหภูมิลดลง โมเลกุลที่เป็นสายยาวนี้จะคลายตัวออกไปปนกับโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นอีก โมเลกุลนี้ก็ยิ่งคลายออก ความหนืดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว

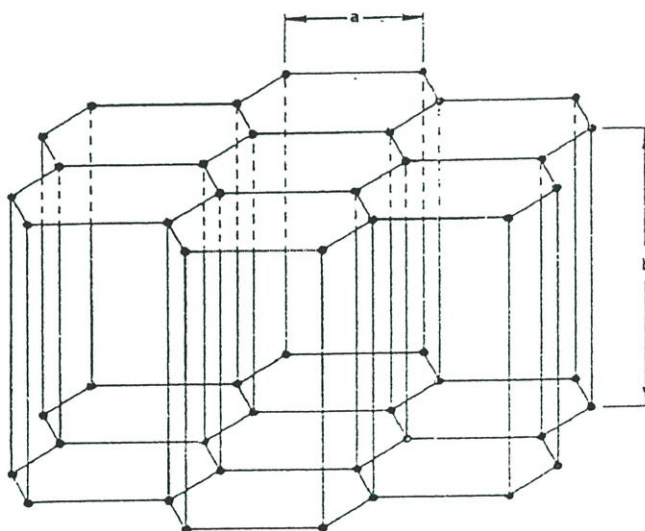
2.4 สารหล่อลื่นของแข็ง [14]

สารหล่อลื่นของแข็งมักจะใช้กับงานอุตสาหกรรมที่น้ำมันหล่อลื่นไม่สามารถทำได้เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไปหรืองานที่มีความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงาน เป็นต้น

สารหล่อลื่นของแข็งจำพวกผงยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น จาระบีและก๊าสเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นของแข็งทำมาจากวัสดุอนินทรีย์ อาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นของแข็งขั้นระหว่างชั้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจจะใช้ผงสารหล่อลื่นของแข็งผสมลงในน้ำมันหล่อลื่น สารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

2.4.1 กราไฟต์ (Graphite)

กราไฟต์เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไม่เกิด ออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นตามรูปที่ 1 ทำให้ค่าความเค้นเฉือนต่ำ หรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำเนื่องจากอะตอมที่จับตัวกันอย่างไม่ถูกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดแรงพันธะหรือแรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ำเกินไปจึงทำให้กราไฟต์มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย กราไฟต์จะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของชั้นกราไฟต์สูงขึ้น เป็นผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่นและกราไฟต์ยังมีโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกันทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีประสิทธิภาพเสียดทานต่ำ



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของกราไฟต์

2.4.2 โพลีเตตาฟลูออโรเอทเทลิน (Polytetra Fluoroethylen, PTFE)

PTFE เป็นสารที่มี ความเสียดทานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นของแข็งชนิดอื่น PTFE เป็น Fluoroethylen (C_2F_4)_n โดยมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 2 ซึ่งโครงสร้างจะมีรูปร่างซิกแซก สลับกันเป็นรูปหกเหลี่ยม ด้วยระยะห่างคงที่ 0.562 nm โดยมีคาร์บอนจำนวน 13 อะตอมใน 180° สาเหตุที่ทำให้ PTFE มีความเสียดทานต่ำ คือมีการยึดเกาะของหน้าสัมผัสต่ำและจะมีแรงยึดเกาะในอีกด้านสูง คือถ้าหากจะใช้พลังงานแยกสลาย (dissociation energy) ต้องใช้พลังงานสูงถึง 460 kJ/mol และ PTFE ยังเป็นสารที่ไม่ละลายในสารใดๆ เนื่องจาก PTFE มีสายโซ่คาร์บอนที่เกือบ

ถูกอะตอมของ Fluoroethylen ป้องกันเกือบทั้งหมด จึงมีสภาพเป็นเกราะเคลือบของสายโซ่คาร์บอน จึงทำให้สามารถทนต่อสารเคมีได้



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้าง PTFE

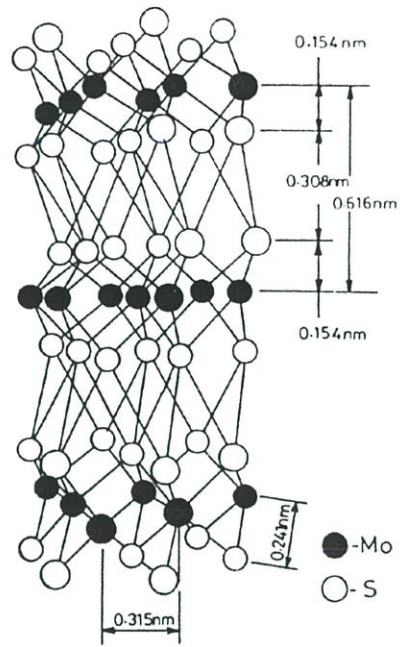


รูปที่ 2.3 ลักษณะด้านข้างและส่วนปลายของโมเลกุล

2.4.3 โมลิบดีนัมไดไซไฟต์ (Molybdenum disulfide, MoS_2)

MoS_2 มีลักษณะโครงสร้างแบบเหมือนกันกับกราฟไฟต์ โดยมีอะตอมของ โมลิบดีนัม ประกอบกับอะตอมของกำมะถัน ประกอบกันเป็นลำดับ คือ $\text{S}:\text{Mo}:\text{S}:\text{S}:\text{Mo}:\text{S}:\dots$ ดังรูปที่ 2.3 การจัดวางของอะตอมมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม แต่ละอะตอมของ โมลิบดีนัมจะมีปริซึมรูปสามเหลี่ยมของอะตอมของกำมะถันเรียงโคจรอบเป็นระยะ 0.241 nm ระนาบที่อยู่ใกล้กันจะมีระยะห่างของอะตอมของกำมะถันคือ 0.308 nm MoS_2 มีคุณสมบัติใช้เป็นตัวหล่อลื่นได้ดีมีอุณหภูมิระเหิดที่ 450°C และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 400°C จะเห็นได้ว่า MoS_2 ไม่เหมาะกับการใช้งานที่

อุณหภูมิสูงและไม่เหมาะกับการนำไปใช้เป็นส่วนหล่อลื่นร่วมกับออกซิเจนและไม่ควรใช้ MoS_2 เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของ โมลิคินัม ไดไซไฟต์

บทที่ 3

รีโอโลยี (Rheology)

รีโอโลยีเป็นวิชาที่เกี่ยวกับการไหล โดยมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องได้แก่ความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด เป็นต้น[15]

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด

เมื่อพิจารณาดังความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนแล้ว เราสามารถแบ่งของไหลออกได้ 2 ประเภทคือ

3.1.1 ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid)

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงหรือเป็นเชิงเส้น เราจะเรียกว่าของไหลแบบนิวโตเนียนซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.1)$$

สมการที่ (3.1) เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's law of viscosity) โดย τ คือความเค้นเฉือน (shear stress), $\frac{du}{dy}$ คืออัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate) และ μ คือความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity)

3.1.2 ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian fluid)

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนไม่เป็นเชิงเส้น เราจะเรียกว่าของไหลแบบนอนนิวโตเนียนซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

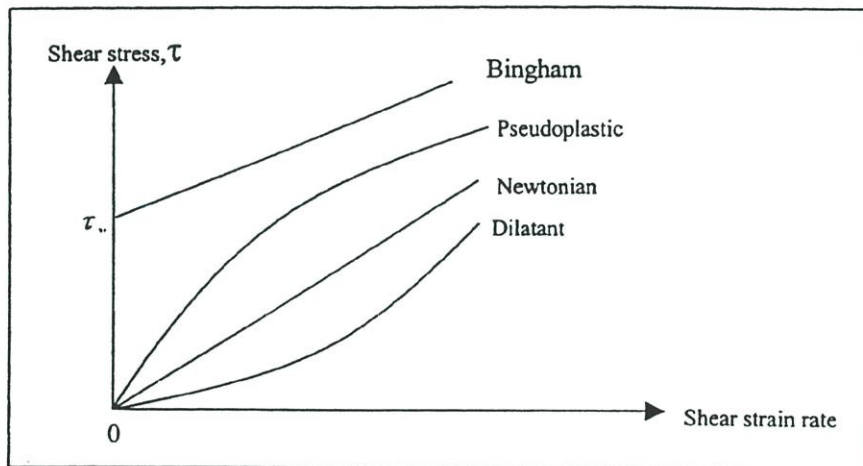
$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (3.2)$$

$$\tau + k\tau^3 = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.3)$$

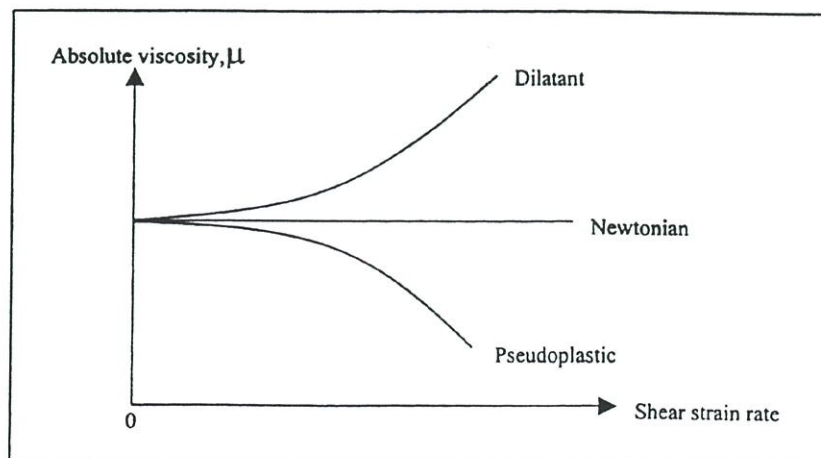
$$\tau = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (3.4)$$

ในสมการที่ (4.3) ถ้า $n = 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และถ้า $n > 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์(dilatant) หรือ ถ้า $n < 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก(pseudoplastic) ส่วนในสมการที่ (3.3) ถ้า $k = 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และ ถ้า $k > 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติกหรือ ถ้า $k < 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์

สำหรับสมการที่ (3.4) เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าของไหลชนิดพลาสติกบิงแฮม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราการความเครียดเฉือนเป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับของไหลนิวโตเนียน แต่จะต่างกับสารหล่อลื่นนิวโตเนียนตรงที่ค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นของของไหลไม่เริ่มต้นที่ศูนย์ ซึ่ง เราเรียกค่าความเค้นเฉือนที่จุดเริ่มต้นนี้ว่า ความเค้นเฉือนที่จุดคราก(yield point) τ_y โดย ถ้า $\tau_y = 0$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นแบบนิวโตเนียน



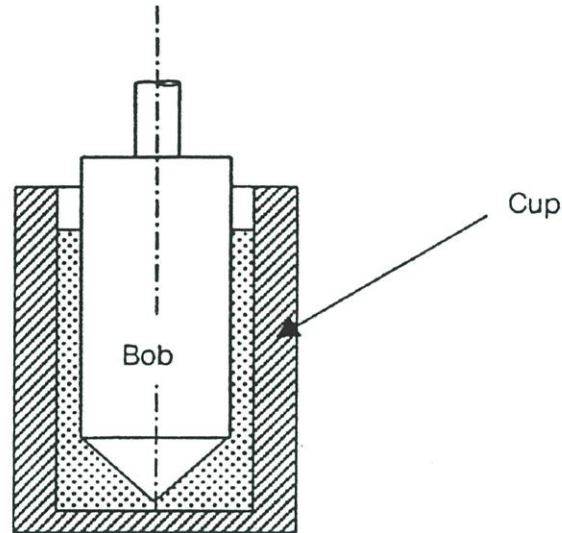
รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการความเครียดเฉือน



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสมบูรณ์และอัตราการความเครียดเฉือน

3.2 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี

เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่มาหลายชนิด ซึ่งในการเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงได้แก่ชนิดของของไหลที่จะนำมาทดสอบ ด้วยยกตัวอย่างเช่น หากต้องการใช้เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีกับจาระบี ควรที่จะใช้กับเครื่องวัดความหนืดแบบกรวยบนแผ่นระนาบ(cone and plate viscometer)เป็นต้น เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่ เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน(Rotational viscometer)

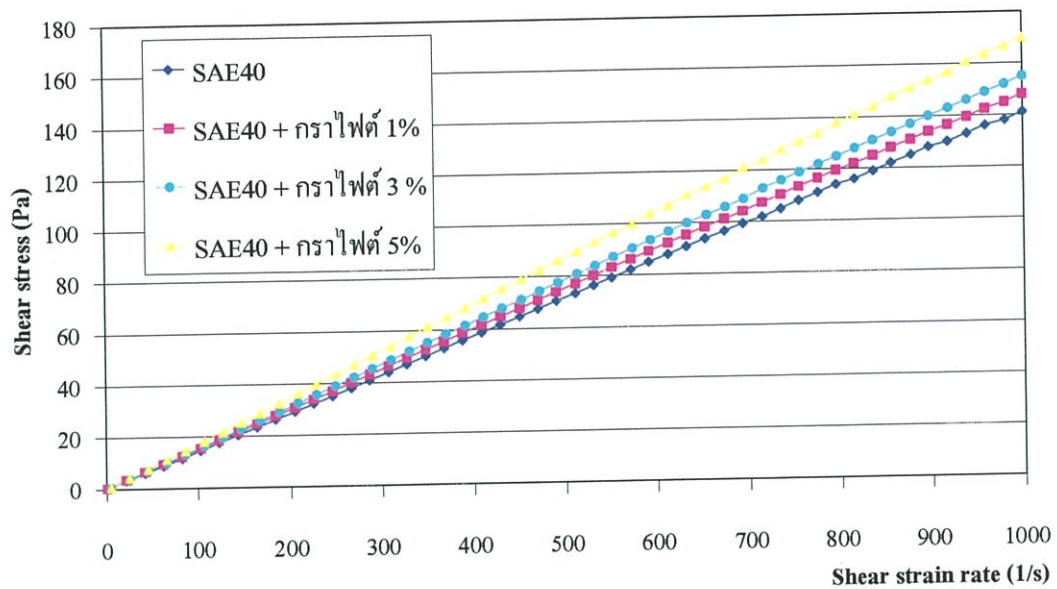


รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

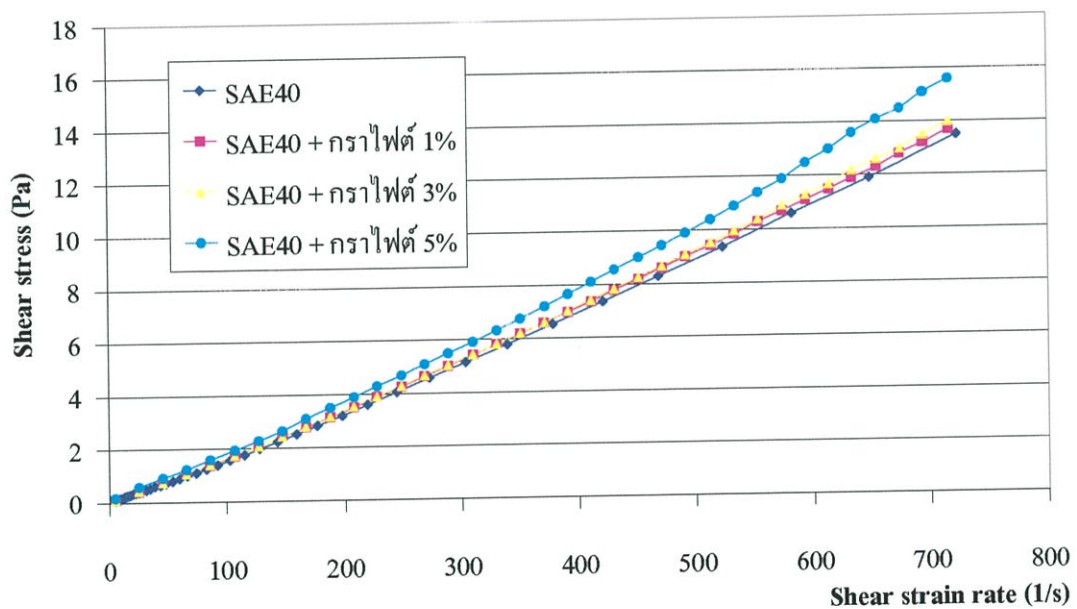
เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational viscometer) นี้ จะประกอบไปด้วยทรงกระบอกสองอัน ที่มีรัศมีต่างกัน โดยทรงกระบอกอันในจะเป็นทรงกระบอกตันที่หมุนอยู่ภายในทรงกระบอกกลางซึ่งอยู่กับที่ ในการใช้งานจะใส่ของเหลวลงไประหว่างช่องว่างของทรงกระบอกทั้งสอง เมื่อท่อทรงกระบอกอันในหมุนจะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ภายใต้ความเค้นเฉือน ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของทรงกระบอกอันในและเกิดอัตราความเครียดเฉือนเกิดขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือน สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นกราฟแสดงการไหล(flow curve) ได้

3.3 คุณสมบัติทางรีโอโลยีของน้ำมันหล่อลื่น

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมการไหลของน้ำมันที่ผสมกราฟไฟต์ยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนียนมากยิ่งขึ้น

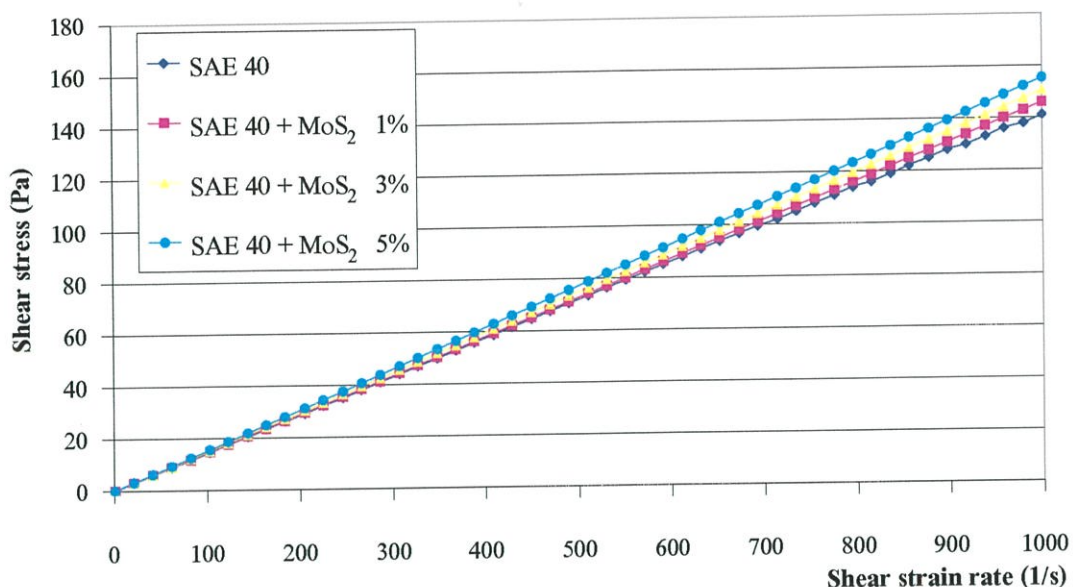


รูปที่ 3.4 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C

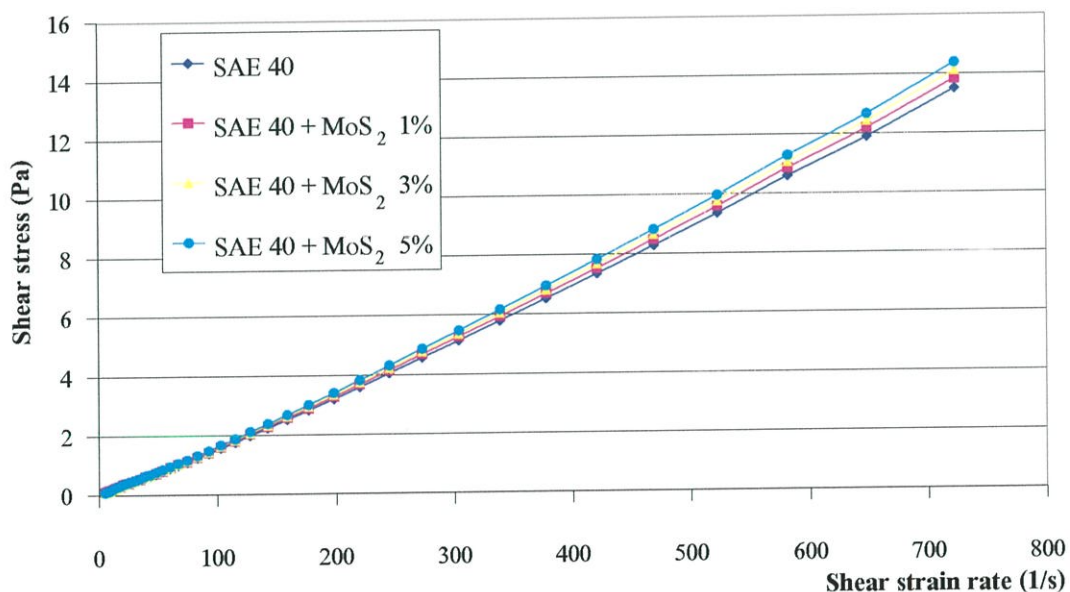


รูปที่ 3.5 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันที่ผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนียนมากยิ่งขึ้น

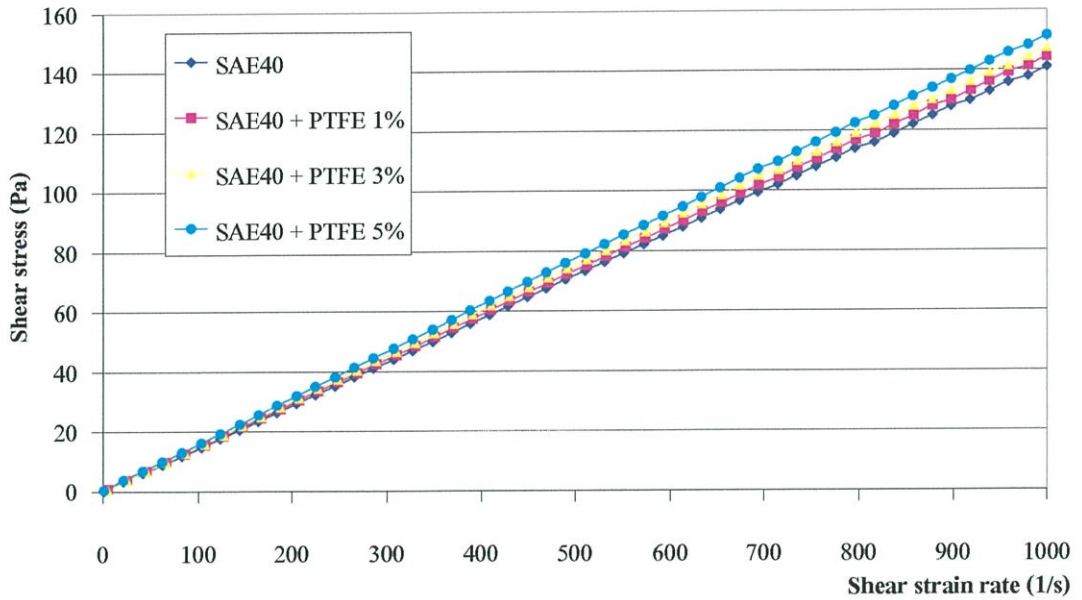


รูปที่ 3.6 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโมลิดินัมไดไซไฟด์ในอัตราส่วนต่างๆที่ อุณหภูมิ 40 °C

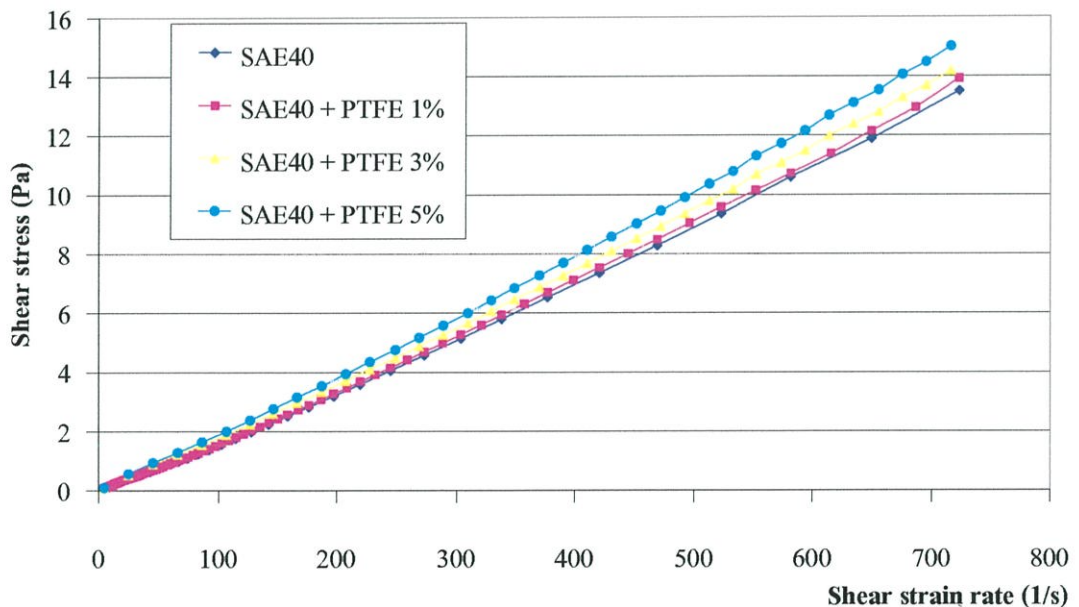


รูปที่ 3.7 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโมลิดินัมไดไซไฟด์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโพลิตเตตาฟูลออโรเตทลินในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมการไหลของน้ำมันที่ผสมโพลิตเตตาฟูลออโรเตทลินยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเพิ่มขึ้น มากยิ่งขึ้น

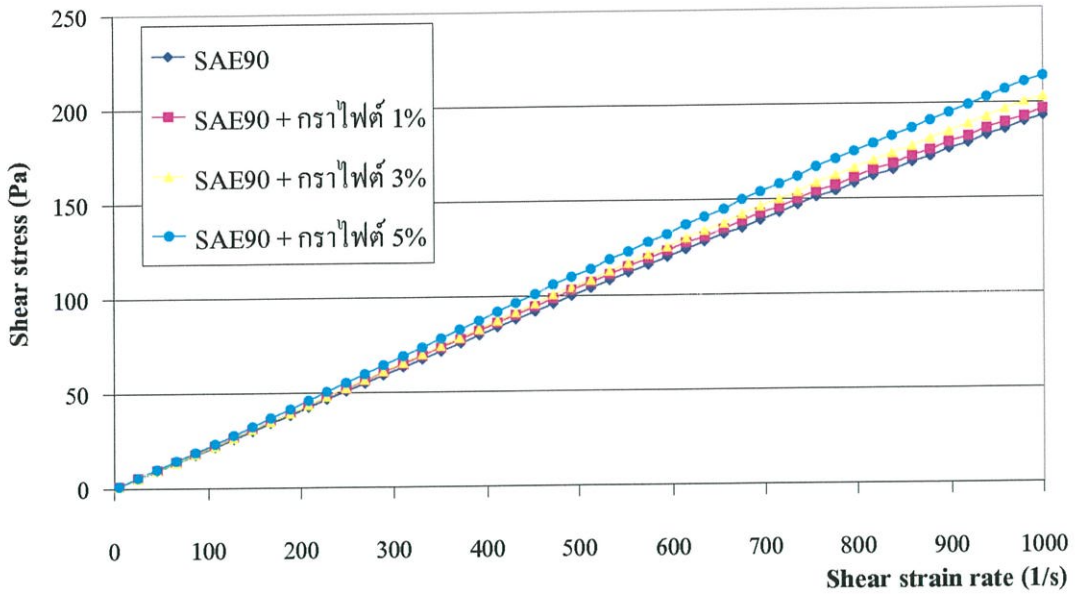


รูปที่ 3.8 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C

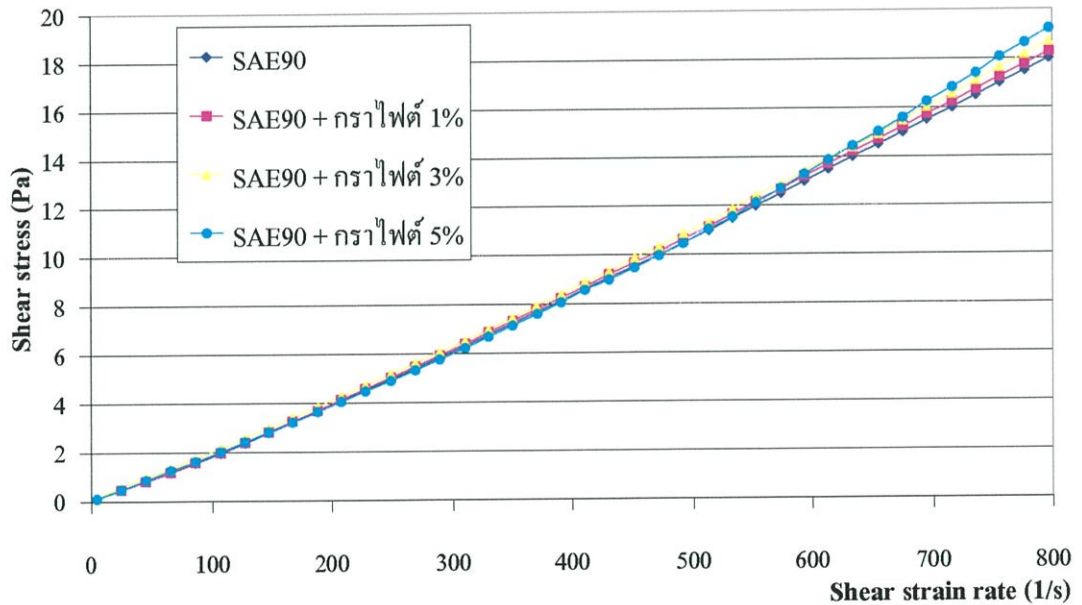


รูปที่ 3.9 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันที่ผสมกราฟไฟต์ยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนียน มากยิ่งขึ้น

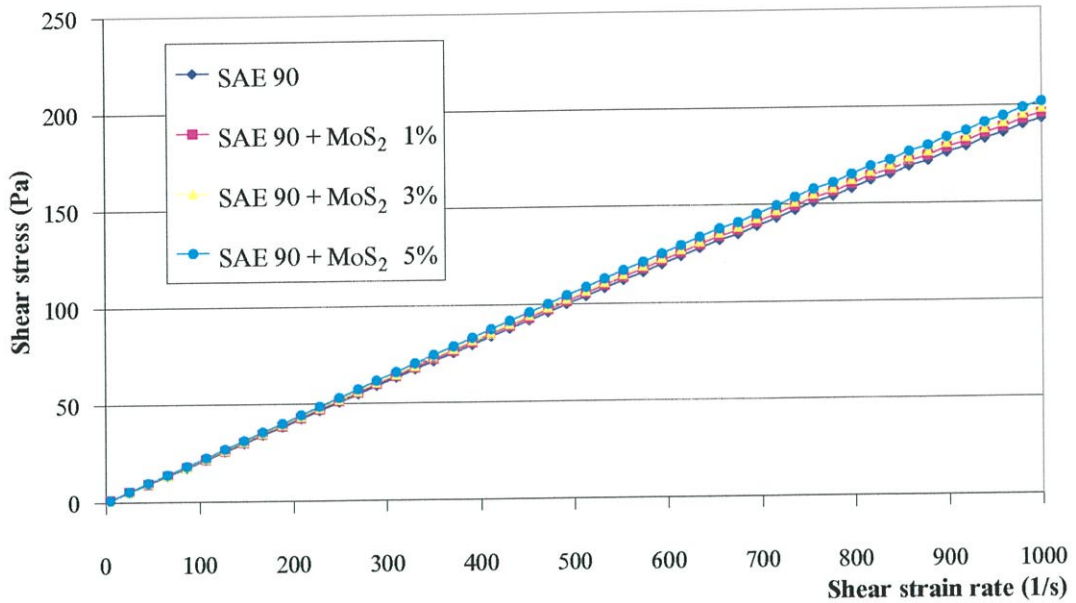


รูปที่ 3.10 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมกราฟิต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C

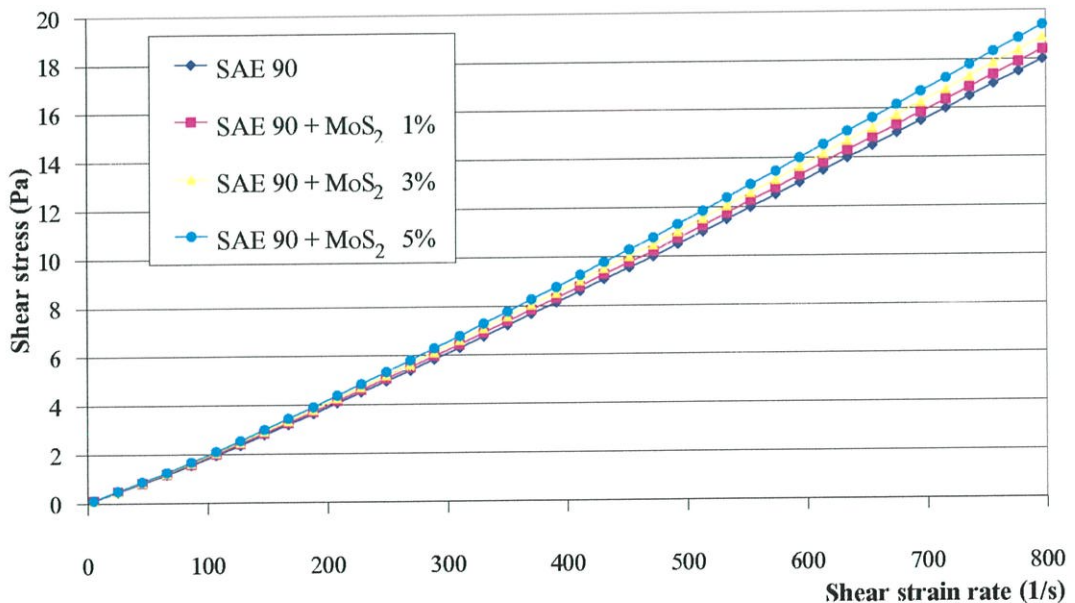


รูปที่ 3.11 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมกราฟิต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมโมลิตินัมโคไฮไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันที่ผสมโมลิตินัมโคไฮไฟต์ยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนียนมากยิ่งขึ้น

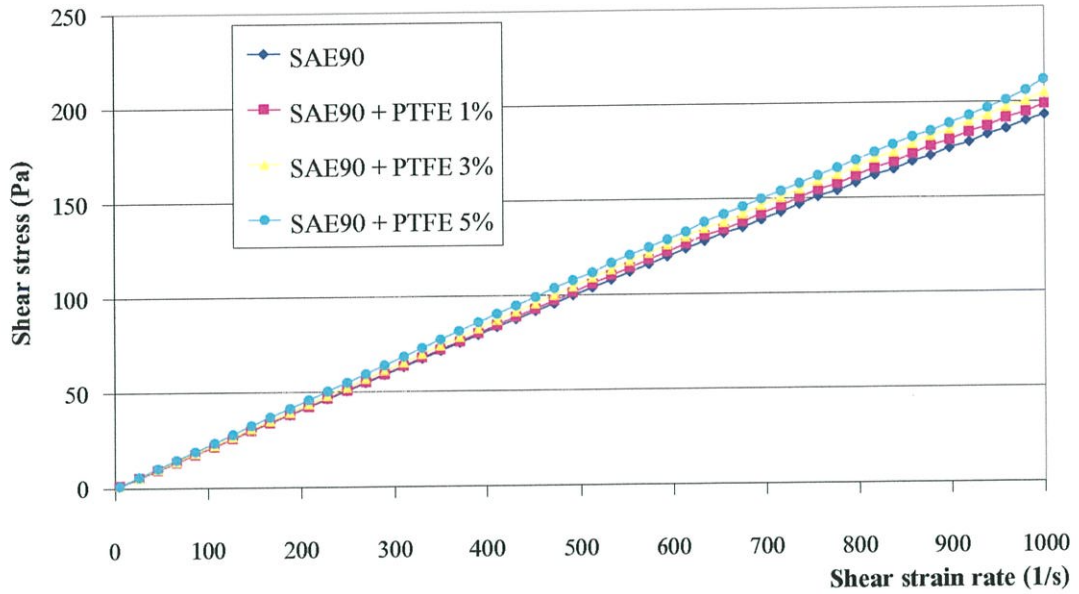


รูปที่ 3.12 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C

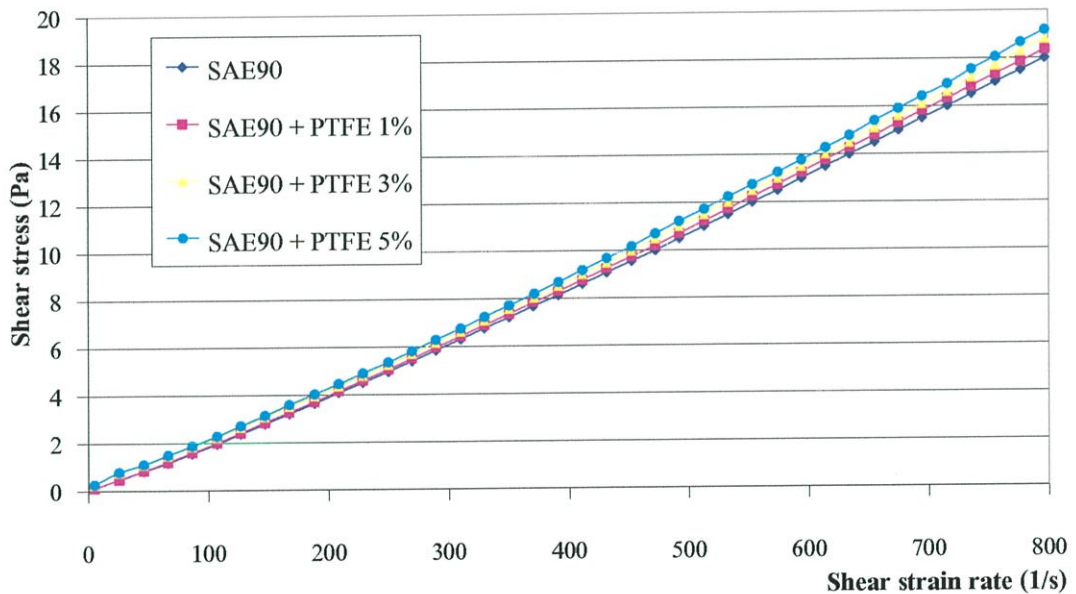


รูปที่ 3.13 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE40 ที่ผสมโพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลินในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันที่ผสมโพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลินยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเพิ่มขึ้น มากยิ่งขึ้น

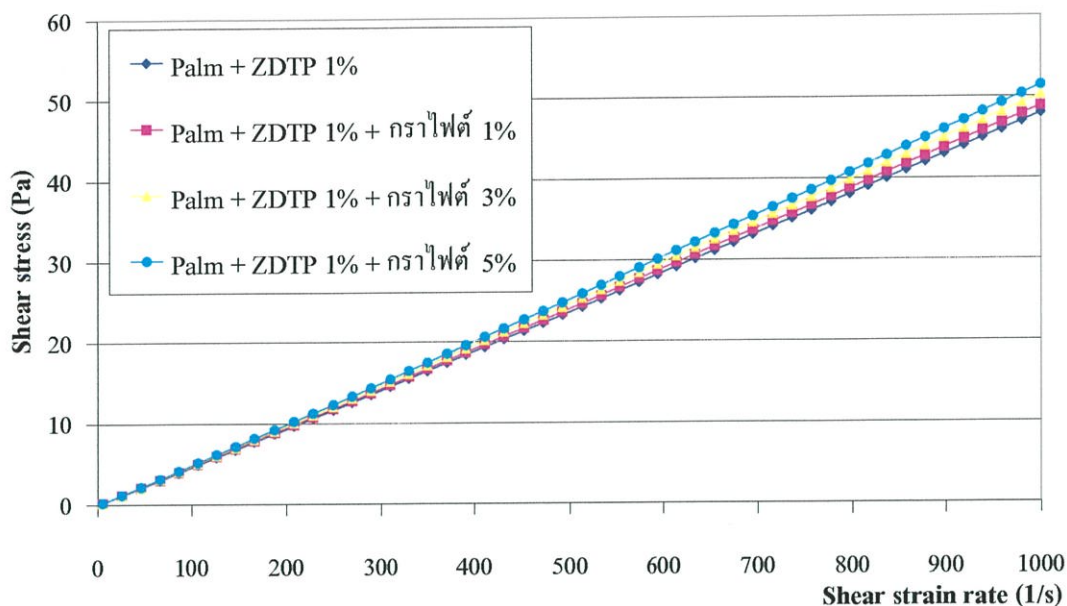


รูปที่ 3.14 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C

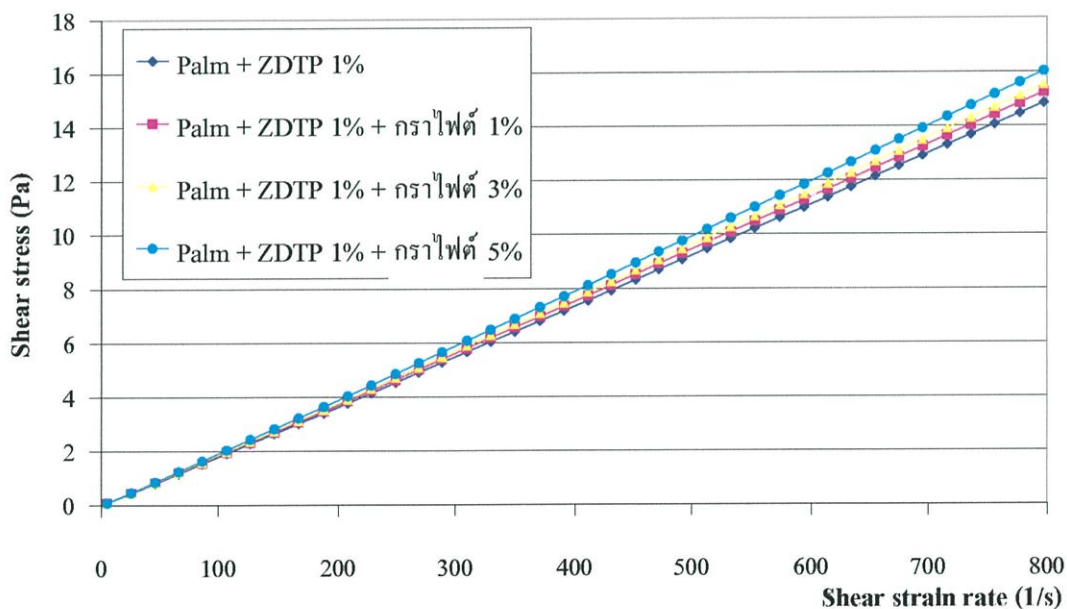


รูปที่ 3.15 แสดงกราฟการไหลของน้ำมัน SAE90 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมกรไหลของน้ำมันที่ผสมกราฟไฟต์ยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนียน มากยิ่งขึ้น

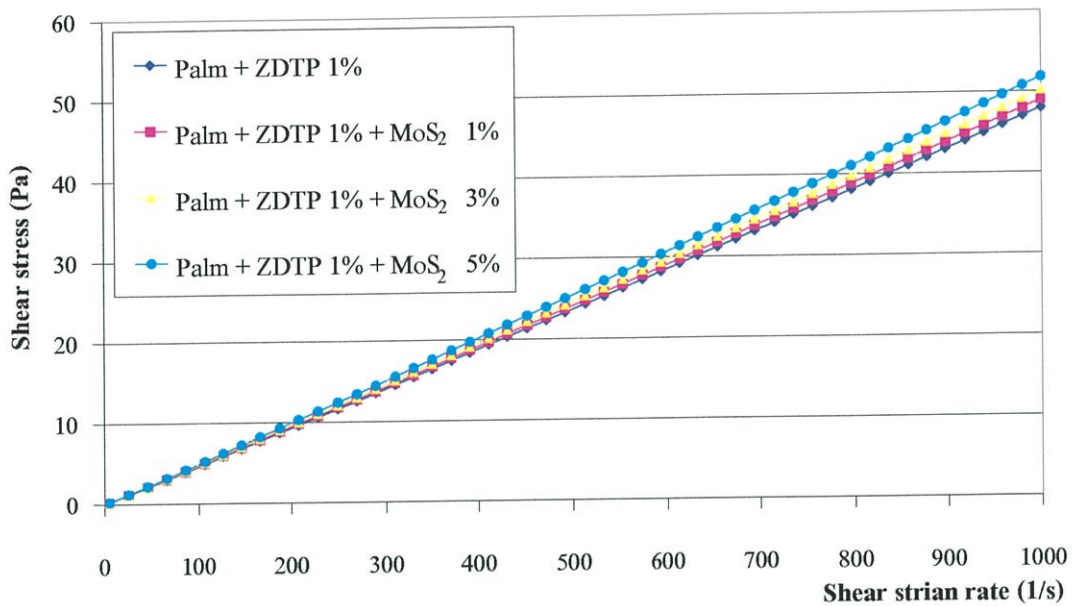


รูปที่ 3.16 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C

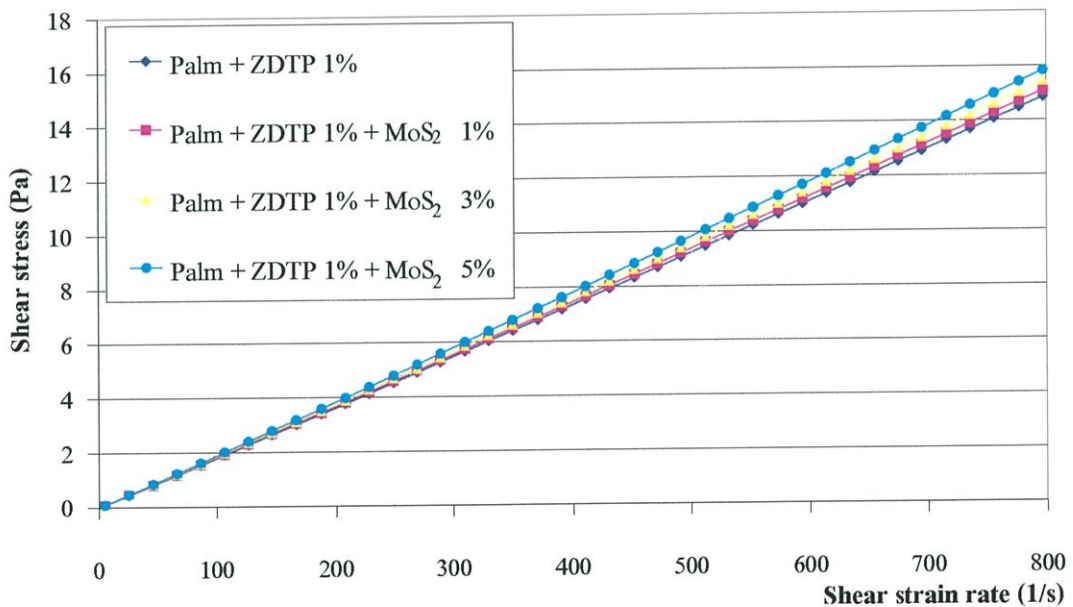


รูปที่ 3.17 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.18 และ 3.19 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โมลิตินัม ไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมการไหลของน้ำมันที่ผสมโมลิตินัม ไดไซไฟต์ยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนี่ยน มากยิ่งขึ้น

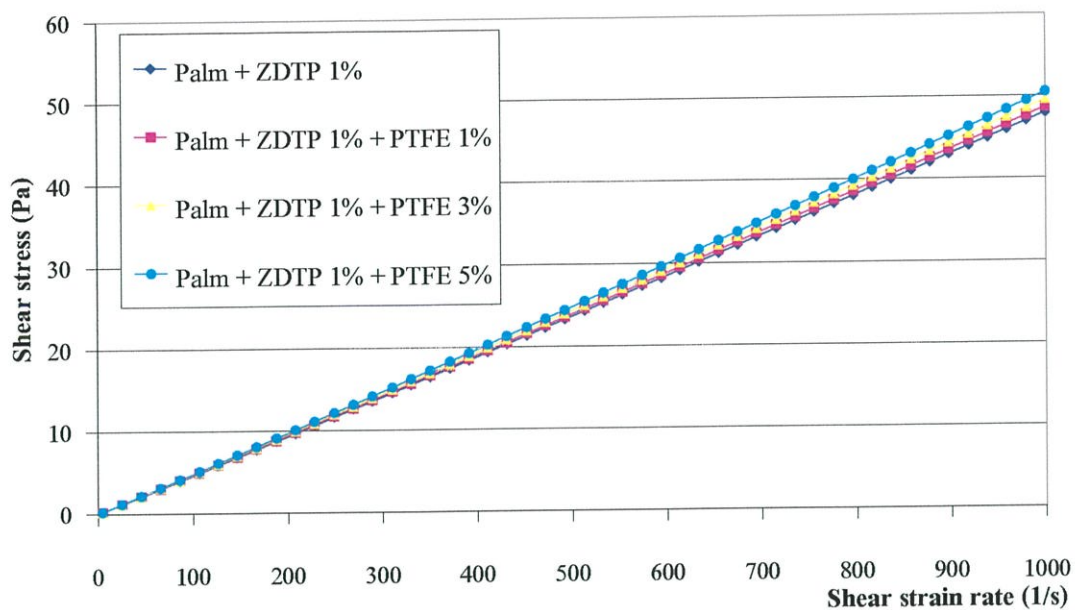


รูปที่ 3.18 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C

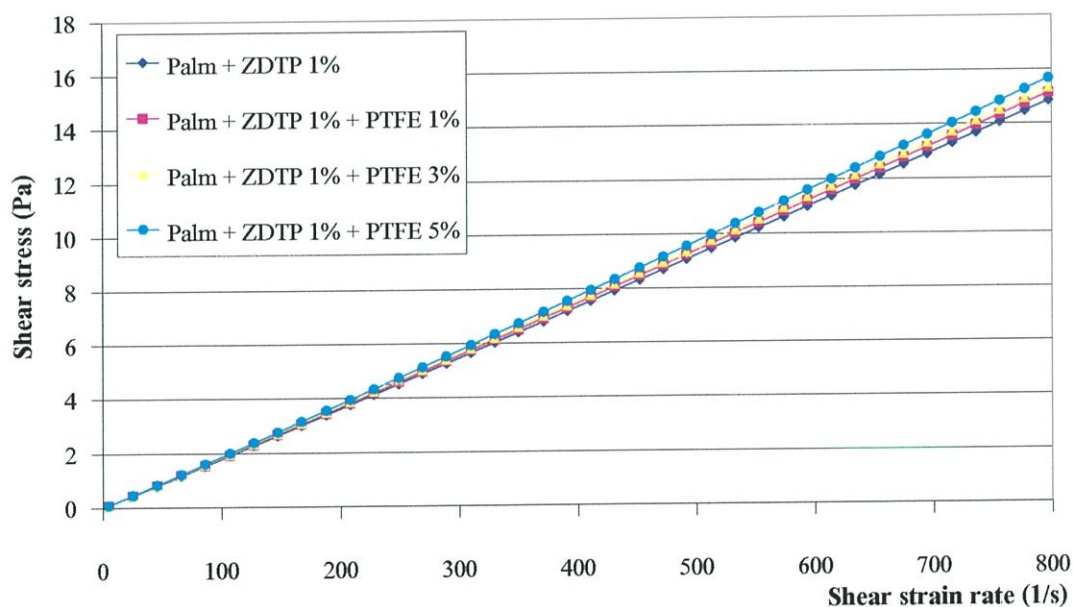


รูปที่ 3.19 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.20 และ 3.21 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โพลีเตตาฟูโโอลิเอตเทสทินในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C จะพบว่าพฤติกรรมการไหลของน้ำมันที่ผสมโพลีเตตาฟูโโอลิเอตเทสทินยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งทำให้มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวตอนเนี่ยน มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.20 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 3.21 แสดงกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% และ โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 3.4 ถึง 3.21 เมื่อทำการ Fitting curve โดยใช้แบบจำลองเพนเวอรัลลอว์ในสมการที่ 3.2 แล้ว จำได้ค่า m_0 และ n ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่า m_0 และ n ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง

	m_0	n
SAE 40	0.1140574	1
SAE 40 + กราไฟต์ 1 %	0.114756	1.0107
SAE 40 + กราไฟต์ 3 %	0.118015	1.0188
SAE 40 + กราไฟต์ 5 %	0.12015	1.02462
SAE 40 + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 1 %	0.11515	1.01122
SAE 40 + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 3 %	0.11942	1.01535
SAE 40 + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 5 %	0.12158	1.0225
SAE 40 + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 1 %	0.11575	1.011
SAE 40 + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 3 %	0.11975	1.0162
SAE 40 + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 5 %	0.122153	1.0232
SAE 90	0.1946304	1
SAE 90 + กราไฟต์ 1 %	0.19598	1.012
SAE 90 + กราไฟต์ 3 %	0.20052	1.0175
SAE 90 + กราไฟต์ 5 %	0.20452	1.0245
SAE 90 + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 1 %	0.19652	1.0132
SAE 90 + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 3 %	0.200982	1.021
SAE 90 + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 5 %	0.20498	1.0262
SAE 90 + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 1 %	0.19621	1.0142
SAE 90 + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 3 %	0.2005	1.0204
SAE 90 + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 5 %	0.2051	1.0284
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 %	0.0416	1.02
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + กราไฟต์ 1 %	0.042	1.027
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + กราไฟต์ 3 %	0.0432	1.038
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + กราไฟต์ 5 %	0.0445	1.05
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 1 %	0.04193	1.0265
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 3 %	0.04307	1.0354
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + โมลิตินัมไดไซไฟต์ 5 %	0.04425	1.0484
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 1 %	0.0423	1.0286
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 3 %	0.0433	1.0402
น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 % + โพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลิน 5 %	0.04471	1.053

บทที่ 4

ทฤษฎีการหล่อขึ้นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮดรอดินามิกส์ ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง

4.1 สมการเรย์โนลด์[5]

สมการเรย์โนลด์เป็นสมการที่ใช้ในการหาการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

1. การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ
2. ของไหลที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นซึ่งผสมสารหล่อลื่นของแข็งแล้วจะมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียน
3. ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลและแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล
4. ไม่มีการลื่นไถลของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน
5. ความหนาของฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย
6. ไม่คิดถึงผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก
7. แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่างของความดันรวมทั้งไม่คิดความเร่งของของไหล
8. อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของไหลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่มีการชนกันระหว่างอนุภาค
9. อนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

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

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.2)$$

จากสมการการไหลของสารแบบนอนนิวโตเนียนคือ

$$\tau_{xy} = \mu^* \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.3)$$

$$\tau_{zy} = \mu^* \frac{\partial w}{\partial y} \quad (4.4)$$

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

$$I_2 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (4.5)$$

แทนค่าสมการ (4.3) ลงในสมการ (4.1) แล้วทำการอินทิเกรตสมการ (4.1)

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial x} y + \frac{c_1}{\mu^*} \quad (4.6)$$

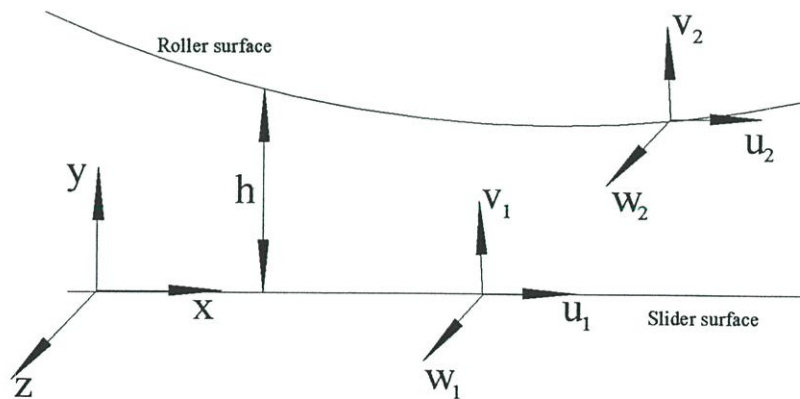
และทำการอินทิเกรตสมการ (4.6) อีกครั้งจะได้

$$u = \frac{\partial p}{\partial x} \int \frac{y}{\mu^*} dy + c_1 \int \frac{dy}{\mu^*} + c_2 \quad (4.7)$$

และในทำนองเดียวกันแทนค่าสมการ (4.4) ลงในสมการ (4.2) แล้วทำการอินทิเกรตสมการ (4.2)

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial z} y + \frac{c_3}{\mu^*} \quad (4.8)$$

$$w = \frac{\partial p}{\partial z} \int \frac{y}{\mu^*} dy + c_3 \int \frac{dy}{\mu^*} + c_4 \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.1 แสดงระบบพิกัดและเงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์

จากรูปที่ 4.1 เงื่อนไขขอบคือ

$$y = 0 \quad u = u_1, v = 0, w = 0 \quad (4.10ก)$$

$$y = h \quad u = u_2, v = V_2, w = 0 \quad (4.10ข)$$

แทนค่าเงื่อนไขขอบของสมการ (4.10ก) และ (4.10ข) ลงในสมการ (4.7) และ (4.9) ดังนั้น

$$u = \left(\int \frac{y}{\mu^*} dy - h \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \int \frac{dy}{\mu^*} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_2 - u_1}{h} \mu_{e0} \int \frac{dy}{\mu^*} + u_1 \quad (4.11)$$

$$w = \left(\int \frac{y}{\mu^*} dy - h \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \int \frac{dy}{\mu^*} \right) \frac{dp}{dz} \quad (4.12)$$

โดยที่อัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate) คือ

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{y}{\mu^*} - \frac{h}{\mu^*} \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_2 - u_1}{h} \frac{\mu_{e0}}{\mu^*} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \left(\frac{y}{\mu^*} - \frac{h}{\mu^*} \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.14)$$

โดยที่

$$\frac{1}{\mu_{e,i}} = \frac{1}{h^{i+1}} \int_0^h \frac{y^i}{\mu^*} dy \quad \text{เมื่อ } i = 0, 1, 2 \quad (4.15)$$

สำหรับการไหลในสองมิติเราสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (4.16)$$

อินทิเกรตสมการ (4.16) เทียบกับ y ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง h ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^h u dy \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \int_0^h w dy \right) = - \int_0^{\rho V_2} d(\rho v) \quad (4.17)$$

เทอมทางขวามือของสมการ (4.17) เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของลูกกิ้งในแนวตั้งฉากเป็นผลทำให้ความหนาฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาหาได้จาก

$$\rho V_2 = \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) \quad (4.18)$$

Najji [5] ได้ทำการหาสมการเรย์โนลด์สำหรับแบบจำลองใดๆ โดยอินทิเกรตสมการ (4.11) และ (4.12) ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง h ได้

$$\int_0^h u dy = - \left(\frac{h^3}{\mu_{e2}} - h^3 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{dp}{dx} + h(u_2 - u_1) \left(1 - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) + u_1 h \quad (4.19)$$

$$\int_0^h w dy = - \left(\frac{h^3}{\mu_{e2}} - h^3 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{dp}{dz} \quad (4.20)$$

แทนค่าสมการ (4.19),(4.20) และ (4.18) ลงในสมการ (4.17) จะได้สมการเรย์โนลด์สำหรับของไหลแบบนอนนิวโตเนียนคือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h^3 \left(\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho h^3 \left(\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \right] = \left(\frac{u_2 + u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + \left(\frac{u_2 - u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h \left(1 - 2 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (4.21)$$

สำหรับปัญหาแบบลูกกิ้งและแผ่นเลื่อน เนื่องจากความยาวของลูกกิ้งจะยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างของการสัมผัสดังนั้นการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกนของแกน z จะมีการไหลน้อยกว่าในแนวแกน x สมการ (4.21) จึงลดรูปเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h^3 \left(\frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \left(\frac{u_2 + u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + \left(\frac{u_2 - u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h \left(1 - 2 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (4.22)$$

ในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์นั้นนิยมทำให้สมการมีรูปแบบไร้มิติโดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} p &= p_H P & p_H &= E' \left(\frac{W'}{2\pi} \right)^{0.5} & \frac{1}{E'} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \\ h &= \frac{8RW'}{\pi} H & w &= E'RW' \\ x &= bX & b &= R \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{0.5} \\ y &= hY & y &= \frac{8RW'}{\pi} HY \\ T^* &= T_0 T \\ \mu &= \mu_0 \bar{\mu} & \rho &= \rho_0 \bar{\rho} \\ u &= \bar{u} u^* & S &= 2 \left(\frac{u_2 - u_1}{u_2 + u_1} \right) \\ t &= \frac{R}{\bar{u}} t^* & \bar{u} &= \left(\frac{u_2 + u_1}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.23)$$

แทนค่าสมการ (4.23) ลงในสมการ (4.11),(4.13),(4.15) และ (4.22) จะได้สมการความเร็วไร้มิติในแนวแกน X คือ

$$u^* = \frac{16}{U} \left(\frac{W'H^2}{\pi} \right) \left[\int \frac{Y}{\bar{\mu}^*} dY - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \int \frac{dY}{\bar{\mu}^*} \right] \frac{dP}{dX} + S \bar{\mu}_{e0} \int \frac{dY}{\bar{\mu}^*} + \left(1 - \frac{S}{2} \right) \quad (4.24)$$

สมการอัตราความเครียดเฉือนไร้มิติคือ

$$\frac{\partial u^*}{\partial Y} = \frac{16}{U} \left(\frac{W'H^2}{\pi} \right) \left[\frac{Y}{\bar{\mu}^*} - \frac{1}{\bar{\mu}^*} \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right] \frac{dP}{dX} + S \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}^*} \quad (4.25)$$

เมื่อ U คือพารามิเตอร์ความเร็วไร้มิติ (dimensionless speed parameter) = $\frac{\mu_0 \bar{u}}{E'R}$

สมการ (4.15) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{\bar{\mu}_{e,i}} = \int_0^1 \frac{Y^i}{\bar{\mu}^*} dY \quad \text{เมื่อ } i = 0,1,2 \quad (4.26)$$

และสมการเรย์โนลด์ไร้มิติคือ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + K \frac{S}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho} H) \quad (4.27)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่ = $\frac{\pi^2 U}{16(W')^2}$

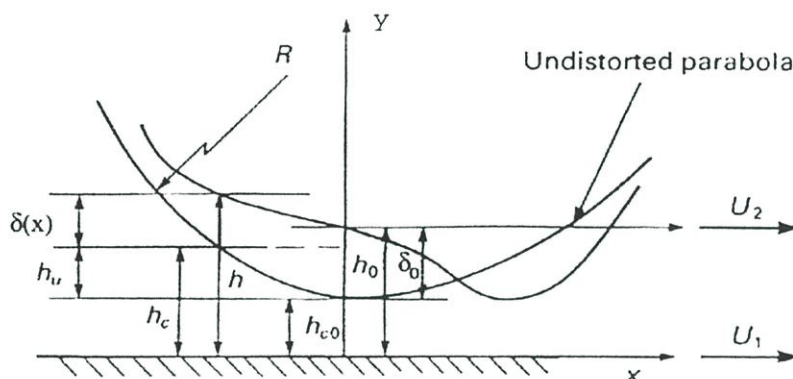
4.2 ทฤษฎีอีลาสโตไฮดรอดนามิกส์

4.2.1 สมมุติฐานของ Hertz

Hertz [2] ได้ทำการพิจารณาความเค้นและการเสีรูปร่างของรูปทรงวงรี (Ellipsoidal) สองอันสัมผัสกัน โดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเพื่อกำหนดรูปแบบของปัญหาสำหรับการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แบริ่งทรงกลม แบริ่งลูกกลิ้ง เฟืองและลูกเบี้ยว โดยมีสมมุติฐานดังนี้

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

4.2.2 สมการความหนาของฟิล์มน้ำมัน



รูปที่ 4.2 แสดงรูปร่างทางเรขาคณิตของฟิล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 4.2 สมมติว่าส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงรูปสามารถประมาณว่ามีรูปร่างเป็นพาราโบลา ดังนั้นความหนาของฟิล์มน้ำมันสำหรับปัญหาไฮดรอดൈนามิกส์สามารถเขียนได้ดังนี้ [16]

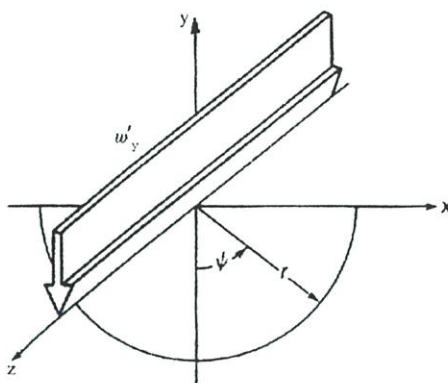
$$h(x) = h_{c0} + h_u(x) + \delta(x) \quad (4.28)$$

เมื่อ h_{c0} เป็นความหนาของฟิล์มน้ำมันที่จุดกำเนิดเมื่อผิวสัมผัสไม่เปลี่ยนแปลง h_u เป็นช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่มีรูปร่างไม่เสีขรูปและแผ่นเรียบ ถ้ากำหนดให้ h_u มีรูปร่างเป็นพาราโบลาคือ

$$h_u = \frac{x^2}{2R} \quad (4.29)$$

เมื่อ R คือรัศมีของผิวสัมผัส ดังนั้นสมการ (4.28)

$$h(x) = h_{c0} + \frac{x^2}{2R} + \delta(x) \quad (4.30)$$



รูปที่ 4.3 แสดงฟังก์ชันเชิงขั้วที่ใช้สำหรับภาระแบบเส้น w'_y ที่กระทำบนแกน y ในระนาบ $x = 0$

จากรูปที่ 4.3 เงื่อนไขของภาระแบบเส้น (line load) ในปัญหาสองมิติและเงื่อนไขความสมดุลคือ [13]

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (4.32)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = 0 \quad (4.33)$$

จากสมการ (4.31) ถึง (4.33) อาจแก้ปัญหานี้ได้โดยฟังก์ชันการประมาณค่าความเค้น คือ ϕ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ x และ y และแสดงเทอมของความเค้นคือ

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (4.34)$$

พารามิเตอร์ ϕ เป็นค่าของฟังก์ชัน Airy ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการ (4.31) และ (4.32) ในขณะที่สมการ (4.33) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (4.35)$$

ในปัญหาส่วนใหญ่ของภาวะแบบเส้นจะพิจารณาในระบบพิกัดเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 4.3 ดังนั้นสมการ (4.31) และ (4.32) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\psi}}{\partial \psi} + \frac{\sigma_r - \sigma_\psi}{r} = 0 \quad (4.36)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\psi}{\partial \psi} + \frac{\partial \tau_{r\psi}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\psi}}{r} = 0 \quad (4.37)$$

ความเค้นในสมการ (4.34) สามารถเขียนอยู่ในรูปของพิกัดเชิงขั้วคือ

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi^2} \quad \sigma_\psi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \quad \tau_{r\psi} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \right) \quad (4.38)$$

สมการ (4.35) สำหรับพิกัดเชิงขั้ว

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \psi^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi^2} \right) = 0 \quad (4.39)$$

ปัญหาแบบมีภาวะแบบเส้นดังรูปที่ 4.3 จะแก้ได้โดยใช้ฟังก์ชัน ความเค้น Boussinesq ให้โดย

$$\phi_b = -\frac{w'_y r \psi}{\pi} \sin \psi \quad (4.40)$$

แทนสมการ (4.40) ลงใน (4.38) ได้

$$\sigma_r = -\frac{2w'_y}{\pi r} \cos \psi \quad \sigma_\psi = 0 \quad \tau_{r\psi} = 0 \quad (4.41)$$

สมการ (4.40) สามารถเขียนให้อยู่ในพิกัดฉากจะได้

$$\phi_b = -\frac{w'_y x}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (4.42)$$

ความเค้นในพิกัดฉากคือ

$$\sigma_x = -\frac{2w'_y x^2 y}{\pi(x^2 + y^2)^2} \quad (4.43)$$

$$\sigma_y = -\frac{2w'_y y^3}{\pi(x^2 + y^2)^2} \quad (4.44)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2w'_y xy^2}{\pi(x^2 + y^2)^2} \quad (4.45)$$

จาก กฎของ Hook องค์ประกอบของความเค้นเฉือนของของแข็งคือ

$$\tilde{e}_x = \frac{\partial \delta_x}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4.46)$$

$$\tilde{e}_y = \frac{\partial \delta_y}{\partial y} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4.47)$$

$$\tilde{e}_z = \frac{\partial \delta_z}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0 \quad (4.48)$$

$$\tilde{e}_{xy} = \frac{\partial \delta_x}{\partial y} + \frac{\partial \delta_y}{\partial x} = \frac{\tau_{xy}}{G_s} = \frac{2(1-\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (4.49)$$

เมื่อ G_s คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่นเนื่องจากการบิด (4.49) เงื่อนไขระนาบความเค้นเฉือนคือ

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (4.50)$$

แทนค่าลงในสมการ (4.46) และ (4.47) ได้

$$\tilde{e}_x = \frac{\partial \delta_x}{\partial x} = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_x - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \sigma_y \quad (4.51)$$

$$\tilde{e}_y = \frac{\partial \delta_y}{\partial y} = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_y - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \sigma_x \quad (4.52)$$

อินทิเกรตสมการ (4.51) และ (4.52) โดยใช้สมการ (4.43) และ (4.44) ได้

$$\delta_x = -\frac{w'_y}{\pi} \left[\frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{E} \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right) - \frac{(1+\nu)xy}{E(x^2+y^2)} \right] + C_1(y) \quad (4.53)$$

$$\delta_y = -\frac{w'_y}{\pi} \left\{ \frac{1-\nu^2}{E} \left[\ln(x^2+y^2) - \frac{y^2}{x^2+y^2} \right] + \frac{\nu(1+\nu)x^2}{E(x^2+y^2)} \right\} + C_2(x) \quad (4.54)$$

โดยสมมาตรแล้ว $-\delta(-x) = \delta(x)$ ดังนั้น $C_1(y) = 0$ สมการ (4.49) นั้นอาจจะใช้ในการหาค่าของ $C_2(x)$ โดยการแทนค่าสมการ (4.45), (4.53) และ (4.54) เข้าไปในสมการ (4.49) แล้วให้

$$\frac{\partial C_2(x)}{\partial x} = 0$$

ในที่นี้หมายความว่า C_2 เป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับจุด x แต่จะขึ้นอยู่กับจุดซอร์ส \bar{r} ในกรณีนี้จะเลือกที่จุดกำหนดค่าของ C_2 จะทำการหาได้โดยความสัมพันธ์ของตำแหน่งของซอร์สและตำแหน่งของจุดข้อมูล ในปัญหาเบร็งถูกกลิ้งบนสไลเดอร์จะพิจารณาว่าเบร็งถูกกลิ้งมีความขามาก ดังนั้นจะมีการเปลี่ยนรูปตามทิศทางของภาระเพียงแนวเดียวนั้นคือ $\delta = \delta_y$ จากสมการ (4.54) ให้การเปลี่ยนรูปในช่วงยึดหยุนที่จุด x ใดๆบนพื้นผิว ($y = 0$) ดังนั้น

$$\delta(x) = -\frac{2}{\pi E'} \int_{x_{in}}^{x_{out}} p \ln(x-x')^2 dx' + C \quad (4.55)$$

แทนค่าสมการ (4.55) ลงในสมการ (4.30) จะได้สมการความหนาของฟิล์มน้ำมันคือ

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2R} - \frac{2}{\pi E'} \int_{x_{in}}^{x_{out}} p \ln(x-x')^2 dx' \quad (4.56)$$

เมื่อ h_0 คือ $h_{c0} + C$ แทนสมการ (4.23) ลงในสมการ (4.56) จะได้สมการความหนาฟิล์มในรูปไร้มิติคือ

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} P \ln(X-X') dX' \quad (4.57)$$

4.3 สมการความหนาแน่นและความหนืด

พฤติกรรมของน้ำมันหล่อลื่นในการวิเคราะห์แบบเทอร์โมอิลาสโตไฮดรอดนามิกสั่น ความหนืดและความหนาแน่นจะได้รับผลกระทบของความดันและอุณหภูมิ โดย Dowson และ Higginson (1966) [4] ได้ทำการทดลองและกำหนดความสัมพันธ์ของความหนาแน่นโดย

$$\rho = \rho_f \left[1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right] [1 - \beta(T - T_0)] \quad (4.58)$$

โดยที่ [8]

$$\rho_f = \frac{\rho_0}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_p} \right)} \quad (4.59)$$

เมื่อ ρ_f คือความหนาแน่นของผสม (mixture substance) ρ_0 คือความหนาแน่นของ น้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง และ λ คือเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ สารหล่อลื่นของแข็งโดยน้ำหนัก แทนสมการ (4.59) และ (4.23) ลงในสมการ (4.58) จะได้สมการ ความหนาแน่นไว้มีดีคือ

$$\bar{\rho} = \frac{\left[1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P} \right] [1 - \beta T_0 (T^* - 1)]}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_p} \right)} \quad (4.60)$$

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น Roeland (1966) [3] ได้ทำการกำหนดโดย

$$\bar{\mu}_R^* = \exp \left\{ [\ln(\mu_0) + 9.67] \left[1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^2 \right] - \gamma(T - T_0) \right\} \quad (4.61)$$

จากทฤษฎีสารแขวนลอยของ Einstein ได้ตั้งสมมุติฐานว่าสารแขวนลอยทุกชนิดจะพฤติกรรมการ ไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนและความหนืดเป็นไปตามสมการ

$$\bar{\mu}_s^* = (1 + 2.5N) \quad (4.62)$$

เมื่อ N คือเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่พุ่งกระจายในสารทำลายโดยปริมาตร โดย Rylander [7] ได้กำหนดค่า N ไว้ดังนี้

$$N = \frac{\lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \quad (4.63)$$

นำสมการ (4.63) แทนค่าลงในสมการ (4.62) และเนื่องจากสมการ (4.61) และ (4.62) อยู่ในรูปแบบไร้มิติหรือเรียกว่าแฟกเตอร์แก้ไขไร้มิติ (dimensionless correction factor) [13] ดังนั้นสมการความหนืดจึงอยู่ในรูป

$$\mu^* = \mu_0 \bar{\mu}_R^* \bar{\mu}_S^* \quad (4.64)$$

และเนื่องจากสารแขวนลอยมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนจึงใช้แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ (power law model) มาประยุกต์กับสมการความหนืด ดังนั้นสมการ (4.64) จะเปลี่ยนเป็น

$$\mu^* = m_0 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(1 + 2.5 \frac{\lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \right) \exp \left\{ [\ln(\mu_0) + 9.67] \left[1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^2 \right] - \gamma (T - T_0) \right\} \quad (4.65)$$

แทนสมการ (4.23) ลงในสมการ (4.62) จะได้สมการความหนืดไร้มิติคือ

$$\bar{\mu}^* = \frac{m_0}{\mu_0} \left| \frac{\bar{u} \pi}{8RWH} \right|^{n-1} \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{n-1} \left(1 + 2.5 \frac{\lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \right) \exp \left\{ [\ln(\mu_0) + 9.67] \left[1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P)^2 \right] - \gamma T_0 (T^* - 1) \right\} \quad (4.66)$$

4.4 สมการพลังงาน

การหาการกระจายอุณหภูมิของปัญหาทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไหลสามารถหาได้จากสมการพลังงาน (Rohsenow W.M. (1985) [18] และ Khonsari M.M., Hua D.Y. (1994) [11]) คือ

$$\rho \frac{D\zeta}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot k \nabla T + \Phi - \nabla \cdot \left(\sum_i j_i \zeta_i \right) + q \quad (4.67)$$

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

$$\zeta = e + \frac{p}{\rho} \quad (4.68)$$

เมื่อ e คือพลังงานภายในต่อหน่วยมวล สมมติว่าไม่มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งกับน้ำมันหล่อลื่นดังนั้น พจน์ $\nabla \cdot \left(\sum_i j_i e_i \right)$ จึงสามารถตัดทิ้งได้ เราสามารถเขียนสมการ (4.68) ได้ในเทอมของอุณหภูมิได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{1}{\rho} \left[1 + \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right] \frac{Dp}{Dt} + c_p \frac{DT}{Dt} \quad (4.69)$$

แทนสมการ (4.69) ลงในสมการ (4.67) และจากสมมติฐานของสมการเรย์โนลด์สมการพลังงานจะลดรูปเป็น

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{dx} - \mu^* \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - q \quad (4.70)$$

เนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดบางจึงทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่างผิวสัมผัสกับเม็ดสารหล่อลื่นของแข็งดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นคือ

$$q = \frac{f_p w_p (|u_1 - \bar{u}| + |u_2 - \bar{u}|)}{A_h} \quad (4.71)$$

เมื่อ f_p คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างสารหล่อลื่นของแข็งและผิวสัมผัส w_p คือภาระที่สารหล่อลื่นของแข็งรับในช่วงสัมผัสมีหน่วยเป็น N/m และ A_h คือพื้นที่ของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสมีหน่วยเป็น m^2 หาได้จาก

$$A_h = \int_{-b}^b h dx \quad (4.72)$$

เมื่อ b คือครึ่งหนึ่งของความกว้างในช่วงสัมผัสฮอร์ทเซียน (half width of hertzian contact) มีหน่วยเป็น m

โดยที่เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังทั้งสองข้างคือ

$$T_1(x,0) = T_0 + \frac{1}{\sqrt{\pi\rho_1 c_{p,1} k_1 u_1}} \int_{x_{in}}^x k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \frac{dx'}{\sqrt{x-x'}} \quad (4.73)$$

$$T_2(x,h) = T_0 - \frac{1}{\sqrt{\pi\rho_2 c_{p,2} k_2 u_2}} \int_{x_{in}}^x k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} \frac{dx'}{\sqrt{x-x'}} \quad (4.74)$$

กำหนดให้ \bar{A}_h คือพื้นที่ของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสไร้มิติ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ A_h ดังนี้

$$A_h = R^2 \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{1.5} \bar{A}_h \quad (4.75)$$

เมื่อ

$$\bar{A}_h = \int_{-1}^1 H dX \quad (4.76)$$

แทนสมการ (4.23) และ (4.75) ลงในสมการ (4.70) จะได้สมการพลังงานไร้มิติคือ

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^2} = -N_{VD} \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 - N_{vw} T^* H^2 u^* \frac{dP}{dX} + N_{IE} \bar{\rho} H^2 u^* \frac{\partial T^*}{\partial X} - N_{HG} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) \quad (4.77)$$

โดยที่ $\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ มีค่าประมาณ $-\beta$

เมื่อ

$$N_{VD} = \frac{(E'R)U}{T_0 \mu_0 k} \quad N_{vw} = \frac{\beta U (E'R)^2 \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^2}{4 \mu_0 k}$$

$$N_{IE} = \frac{c_p \rho_0 E' U R^2 \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{1.5}}{\mu_0 k} \quad N_{HG} = \frac{E' R \bar{u} \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{0.5}}{2 T_0 k}$$

แทนสมการ (4.23) ลงในสมการ (4.73) และ (4.74) จะได้

$$T_{S1} = 1 + D_1 \int_{x_m}^x \frac{1}{H} \frac{\partial T^*}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \frac{dX'}{\sqrt{X-X'}} \quad (4.78)$$

$$T_{S2} = 1 - D_2 \int_{x_m}^x \frac{1}{H} \frac{\partial T^*}{\partial Y} \Big|_{Y=1} \frac{dX'}{\sqrt{X-X'}} \quad (4.79)$$

โดยที่

$$D_{1/2} = \frac{k}{\sqrt{\pi \bar{u} \rho_{1/2} c_{p,1/2} k_{1/2} R(1 \mp S/2)}} \left(\frac{\pi}{8W'} \right)^{0.75}$$

เนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดบางมากเมื่อเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นอุณหภูมิที่กระจายตลอดความหนาฟิล์มจึงมีขนาดเปลี่ยนแปลงไม่มากแต่ทางด้านอื่นจะมีเปลี่ยนแปลงมาก เพื่อให้การคำนวณไม่ซับซ้อนมากจึงใช้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยแทนอุณหภูมิที่กระจายตลอดความหนาฟิล์ม ซึ่งหาได้จาก

$$T_m = \frac{1}{h} \int_0^h T dy$$

เมื่อแทนสมการ (4.23) ลงไปจะทำให้ได้

$$T_m^* = \int_0^1 T^* dY \quad (4.80)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (4.77) เทียบกับ Y สองครั้งและแทนค่าเงื่อนไข (4.78) และ (4.79) จะได้

$$\begin{aligned} T_m^* = & -N_{VD} \left[\int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^1 \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \\ & - N_{VW} T_m^* H^2 \frac{dP}{dX} \left[\int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY \right] \\ & + N_{IE} \bar{\rho} H^2 \frac{\partial T_m^*}{\partial X} \left[\int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY \right] + \frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p' S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \end{aligned} \quad (4.81)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \frac{\partial T^*}{\partial Y} \Big|_{Y=0} = & N_{VD} \int_0^1 \int_0^1 \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY + N_{VW} T_m^* H^2 \frac{dP}{dX} \int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY \\ & - N_{IE} \bar{\rho} H^2 \frac{\partial T_m^*}{\partial X} \int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY + T_{S2} - T_{S1} + \frac{N_{HG}}{2} H^2 \left(\frac{f_p W_p' S}{A_h} \right) \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T^*}{\partial Y} \right|_{Y=1} &= N_{VD} \left[\int_0^1 \int_0^1 \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY - \int_0^1 \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \\ &+ N_{VW} T_m^* H^2 \frac{dP}{dX} \left[\int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY - \int_0^1 u^* dY dY \right] \\ &- N_{IE} \bar{\rho} H^2 \frac{\partial T_m^*}{\partial X} \left[\int_0^1 \int_0^1 u^* dY dY - \int_0^1 u^* dY dY \right] + T_{S2} - T_{S1} + \frac{N_{HG}}{2} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) \end{aligned} \quad (4.83)$$

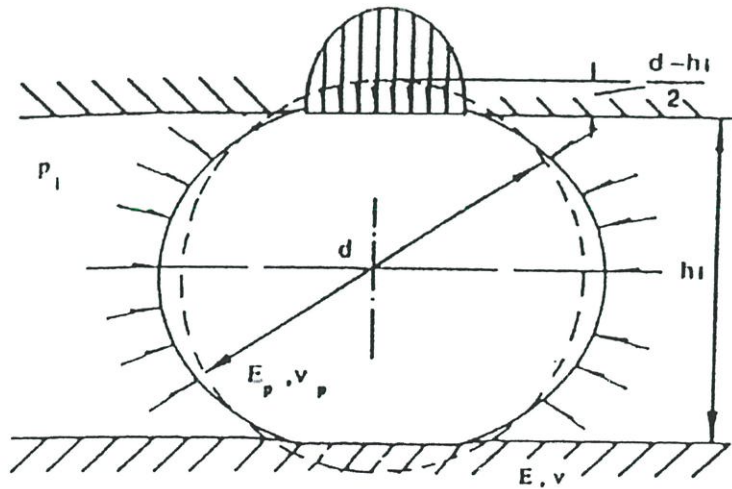
4.5 ภาระที่รับ (Load carrying capacity) [11]

ภาระที่น้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่นของแฉ่งรับสามารถแบ่งออกได้สองส่วนคือ ส่วนที่น้ำมันหล่อลื่นรับและส่วนที่สารหล่อลื่นของแฉ่งรับสามารถเขียนได้ดังนี้

$$w_T = w_f + w_p \quad (4.84)$$

เมื่อ w_T คือภาระรวมที่รับ w_f คือภาระที่น้ำมันหล่อลื่นรับและ w_p ภาระที่สารหล่อลื่นของแฉ่งรับ โดยภาระที่น้ำมันหล่อลื่นได้รับคือ

$$w_f = \int_{x_{in}}^{x_{out}} p dx \quad (4.85)$$



รูปที่ 4.4 แสดงการเสีชรูปของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัส

โดยที่ภาระที่สารหล่อลื่นของแฉ่งได้รับจะรับเป็นภาระในแนวตั้งฉาก (normal load) ดังรูปที่ 4.4 สารหล่อลื่นของแฉ่งอาจจะมีการเสีชรูปที่อยู่ในช่วงยึดหยุ่นหรือในช่วงเสีชรูปอย่างถาวรและก็ได้โดยที่ภาระของอนุภาคได้รับในช่วงยึดหยุ่นของอนุภาคแต่ละอนุภาคคือ

$$w_{i,el} = \frac{1}{6} [d_p - h(x)]^{1.5} d_p^{0.5} E_{ps} + p(x) v_p A_{i,el} \quad (4.86)$$

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

$$\frac{1}{E_{ps}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} - \frac{1 - \nu^2}{E} \right] \quad (4.87)$$

เมื่อการเสียดรูปของอนุภาคอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ความดันที่สัมผัสเฉลี่ยคือ

$$p_m = \frac{w_{i,el}}{\pi a^2} \quad (4.88)$$

เมื่อ a คือรัศมีของวงกลมของพื้นที่สัมผัสที่ถูกกระทำสามารถหาได้จาก

$$a = \left[\frac{3 w_{i,el} d_p}{4 E_{ps}} \right]^{1/3} \quad (4.89)$$

โดยทั่วไปขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสดังนั้นอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัสจะอยู่ในช่วงเสียดรูปอย่างถาวร การพิจารณาการเสียดรูปอย่างถาวรจะพิจารณาได้ยาก ดังนั้นในที่นี้จะใช้วิธีการประมาณค่าอย่างง่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ของเสียดรูปอย่างถาวรกับความแข็งของวัสดุความสัมพันธ์นี้คือ

$$w_{i,pl} = \pi a^2 H_d \quad (4.90)$$

เมื่อ H_d คือค่าความแข็งของอนุภาคและ a คือรัศมีของวงกลมของพื้นที่สัมผัสที่ถูกกระทำซึ่งจะสมมุติว่ามีขนาดเท่ากับสมการ (4.88)

การรวมที่ทุกอนุภาครับคือ

$$w_p = \sum_i \sum_x^{N_x} w_i \quad (4.91)$$

เมื่อ N_x และ N_z คือจำนวนของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัสในทิศทางในแนวแกน x และ z ตามลำดับสมมติว่าอนุภาคมีการกระจายอยู่ทั่วและไม่มีการซ้อนกันในช่วงสัมผัสจำนวนของอนุภาคคือ

$$N_j = l_j \sqrt{\left(\frac{V_f}{l_x l_z}\right) \frac{6\lambda}{\pi d_p^3} \frac{\rho_0/\rho_p}{(1-\lambda[1-\rho_0/\rho_p])}} \quad j=1,2 \quad (4.92)$$

เมื่อ V_f คือปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่นของแข็งในช่วงสัมผัส l_j คือความยาวในช่วงที่อนุภาคเสียดรูปและตัวห้อย $j=1,2$ แทนทิศทางในแนวแกน x และ z ตามลำดับ สำหรับปัญหาแบบการสัมผัสเป็นเส้น l_z จะมีค่าเป็น 1 คือใช้หน่วยของ w_p เป็นหน่วยต่อความยาว

บทที่ 5

วิธีการเชิงตัวเลข

ในบทที่แล้วได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาจะเห็นได้ว่าสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานนั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการแก้สมการโดยวิธีการหาผลเฉลยแบบแม่นยำจะยังทำการหาค่าไม่ได้ แต่เมื่อเทียบกับวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขแล้วไม่ยากเท่ากับวิธีการหาผลเฉลยแบบแม่นยำ

5.1 การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

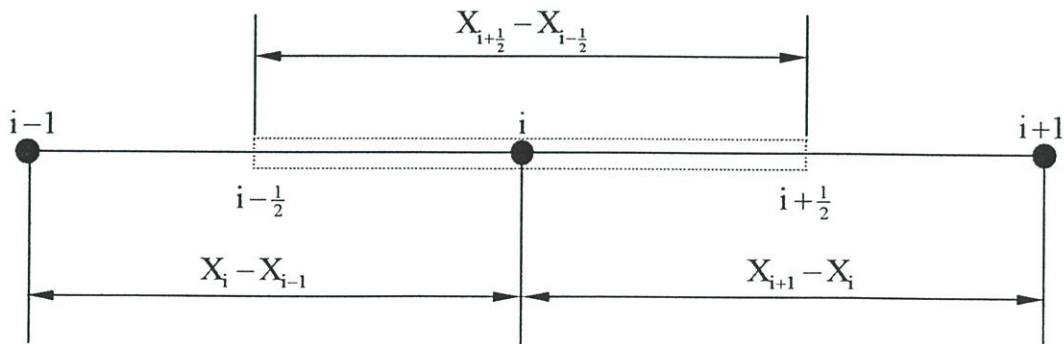
จากสมการเรย์โนลด์แบบไร้มิติในสมการที่ (4.27) คือ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + K \frac{S}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho} H) \quad (5.1)$$

เมื่อ

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

การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) [18] สามารถแก้ได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนด

ที่ตำแหน่ง i พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (5.1) จะแทนค่าด้วยผลต่างแบบกึ่งกลาง (central difference) และพจน์ทางขวามือจะแทนค่าด้วยผลต่างแบบถอยหลัง (backward difference) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon \frac{dP}{dX} \Big|_{i+\frac{1}{2}} - \varepsilon \frac{dP}{dX} \Big|_{i-\frac{1}{2}}}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} &= K \left(\frac{\rho_i H_i - \rho_{i-1} H_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right) \\ &+ K \frac{S}{2} \left(\frac{\bar{\rho}_i H_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{el}} \right)_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{el}} \right)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right) + K \left(\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0}{\Delta t^*} \right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

เมื่อตัวอักษรยก 0 ในพจน์สุดท้ายแทนค่าที่เวลาเก่า ทำการคูณตลอดด้วย $X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}$ และแทนค่าผลต่างแบบกึ่งกลางของ $\frac{dP}{dX}$ ที่ตำแหน่ง $i + \frac{1}{2}$ และ $i - \frac{1}{2}$ จะได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{X_{i+1} - X_i} \right) - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_i - P_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right) &= K (X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}) \left(\frac{\rho_i H_i - \rho_{i-1} H_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right) \\ &+ K \frac{S}{2} (X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}) \left(\frac{\bar{\rho}_i H_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{el}} \right)_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{el}} \right)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right) \\ &+ K (X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}) \left(\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0}{\Delta t^*} \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

โดยที่

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

คูณตลอดด้วย $(X_{i+1} - X_i)(X_i - X_{i-1})$ และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned} -\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} (X_i - X_{i-1}) P_{i+1} + \left[\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} (X_i - X_{i-1}) + \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} (X_{i+1} - X_i) \right] P_i - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}} (X_{i+1} - X_i) P_{i-1} \\ = K (X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}) (X_{i+1} - X_i) (\rho_{i-1} H_{i-1} - \rho_i H_i) \\ + K \frac{S}{2} (X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}) (X_{i+1} - X_i) \left[\bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{el}} \right)_{i-1} - \bar{\rho}_i H_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{el}} \right)_i \right] \\ + K (X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}) (X_{i+1} - X_i) (X_i - X_{i-1}) \left(\frac{\bar{\rho}_i^0 H_i^0 - \bar{\rho}_i H_i}{\Delta t^*} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

โดยที่เงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์คือ

$$\begin{aligned} X = X_{in} & & P = 0 \\ X = X_{out} & & P = 0, \frac{dP}{dX} = 0 \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า i เป็นค่าหมายเลขโนดต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง n และแทนค่าเงื่อนไขขอบลงไปจะได้ระบบสมการไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[A]\{P\} = \{B\} \quad (5.5)$$

5.2 การแก้สมการพลังงานโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

จากสมการพลังงานที่ทำการปรับปรุงในบทที่แล้วคือ

$$\begin{aligned} T_m^* = & -N_{VD} \left[\int_0^1 \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \\ & -N_{VW} T_m^* H^2 \frac{dP}{dX} \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] \\ & +N_{IE} \bar{\rho} H^2 \frac{\partial T_m^*}{\partial X} \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] + \frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \end{aligned} \quad (4.81)$$

แทนค่าผลต่างแบบถอยหลังลงใน $\frac{\partial T_m^*}{\partial X}$ และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned} & \left[(X_i - X_{i-1}) + \left\{ (X_i - X_{i-1}) N_{VW} H^2 \frac{dP}{dX} - N_{IE} \bar{\rho} H^2 \right\} \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] \right] T_{m,i}^* \\ & + N_{IE} \bar{\rho} H^2 \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] T_{m,i-1}^* = \\ & -N_{VD} (X_i - X_{i-1}) \left[\int_0^1 \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \\ & + (X_i - X_{i-1}) \left(\frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \right) \end{aligned} \quad (5.6)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

$$X = X_{in} \quad T_m^* = 1$$

จากสมการสมการที่ (5.6) จะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ $T_{m,i}^*$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ $T_{m,i-1}^*$ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ผลเฉลยของสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานไม่ถูกรบกวนที่ถูกต้องดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมการที่ (5.6) ใหม่โดยให้นำค่าทางด้านขวาของสมการที่ (5.6) หารทั้งหมดด้วย $T_{m,i}^*$ และคูณด้วยตัวเลขจำนวนหนึ่งและนำไปบวกกับค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ $T_{m,i}^*$ แล้วทำให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ $T_{m,i-1}^*$ คือ

$$\begin{aligned}
& \left((X_i - X_{i-1}) + \left\{ (X_i - X_{i-1}) N_{vw} H^2 \frac{dP}{dX} - N_{IE} \bar{\rho} H^2 \right\} \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] \right. \\
& \quad + \frac{KM}{T_{m,i}} \left\{ -N_{VD} (X_i - X_{i-1}) \left[\int_0^1 \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \right. \\
& \quad \left. \left. + (X_i - X_{i-1}) \left(\frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \right) \right\} \right) T_{m,i}^* \\
& \quad + N_{IE} \bar{\rho} H^2 \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] T_{m,i-1} = \\
& \quad (1 + KM) \left\{ -N_{VD} (X_i - X_{i-1}) \left[\int_0^1 \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \right. \\
& \quad \left. + (X_i - X_{i-1}) \left(\frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{5.7}$$

เมื่อ KM สามารถหาได้จาก

$$KM = \max_{i=1}^n \left[\frac{|a_{T,i}| + |a_{T,i-1}|}{|b_{T,i}|} \right] \tag{5.8}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
a_{T,i} &= (X_i - X_{i-1}) + \left\{ (X_i - X_{i-1}) N_{vw} H^2 \frac{dP}{dX} - N_{IE} \bar{\rho} H^2 \right\} \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] \\
a_{T,i-1} &= N_{IE} \bar{\rho} H^2 \left[\int_0^1 \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int u^* dY dY \right] \\
b_{T,i} &= -N_{VD} (X_i - X_{i-1}) \left[\int_0^1 \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int_0^1 \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \\
& \quad + (X_i - X_{i-1}) \left(\frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2} \right)
\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า i เป็นค่าหมายเลขโนดต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง n และแทนค่าเงื่อนไขลงไปจะได้
จะได้ระบบสมการไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

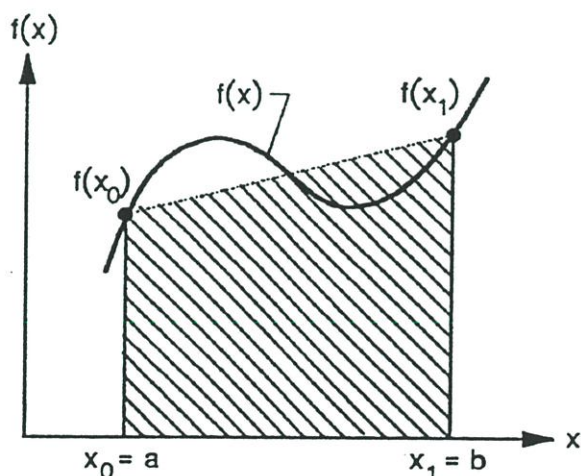
$$[A_T]\{T_m^*\} = \{B_T\} \quad (5.9)$$

5.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข [19]

จากสมการที่ (5.4) และ (5.6) จะเห็นว่าในสมการมีการอินทิเกรตจำกัดเขตอยู่ในสมการ
ซึ่งการอินทิเกรตโดยวิธีการธรรมดาจะไม่สามารถทำได้เนื่องสมการเหล่านั้นมีความซับซ้อนและ
ความยุ่งยากในการอินทิเกรตหรือไม่ก็ไม่สามารถอินทิเกรตได้ จึงจำเป็นต้องมีการอินทิเกรตเชิง
ตัวเลขขึ้นมา โดยการอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหาในที่นี้มีอยู่ 2 วิธีคือ

5.3.1 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Numerical intigation by Trapezoidal rule)

วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถหาได้จากสูตรการหาพื้นที่สี่เหลี่ยม
คางหมูทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการอินทิเกรตสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.2 คือ

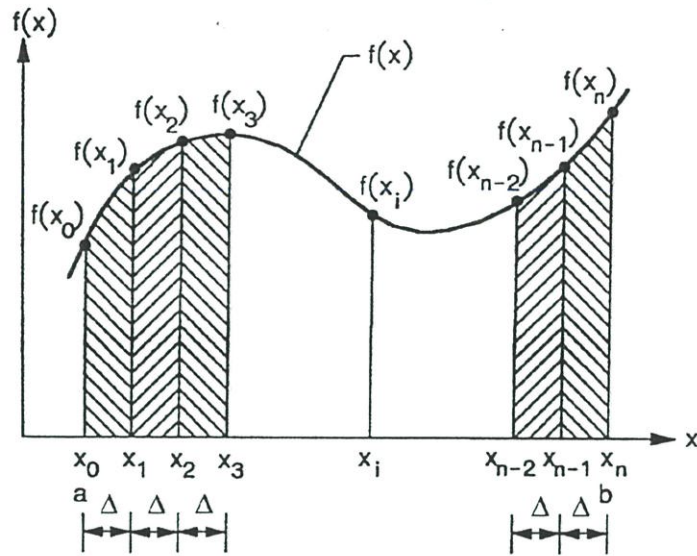


รูปที่ 5.2 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 5.2 สามารถเขียนสูตรการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูได้โดย

$$I = \left(\frac{b-a}{2}\right)(f(x_1) + f(x_2)) \quad (5.10)$$

เนื่องจากการแบ่งจุดโนดบนขอบเขตของปัญหาจะมีการแบ่งออกเป็นจำนวนมากจึงนำสมการที่ (5.10) มาทำการบวกไปเรื่อยๆจนครบจำนวนช่องของการแบ่งจุดโนดโดยสามารถดูได้จากรูปที่ 5.3



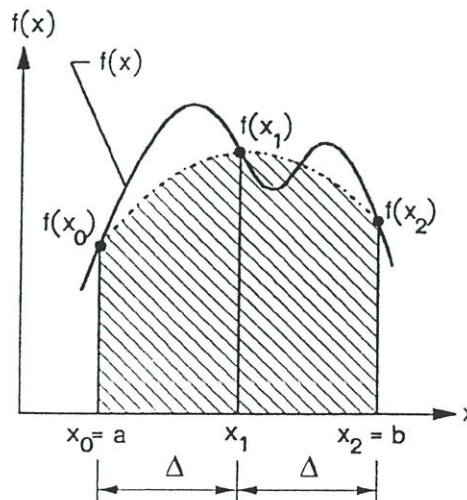
รูปที่ 5.3 แสดงการอินทิเกรต โดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบแบ่งหลายจุด

ดังนั้นสูตรการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบแบ่งหลายจุดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = \frac{\Delta}{2} \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right) \quad (5.11)$$

5.3.2 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎของซิมสัน 1/3 (Numerical integration by Simpson's 1/3 rule)

วิธีการอินทิเกรตโดยกฎของซิมสัน 1/3 เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าิยมใช้เนื่องจากมีความแม่นยำสูงกว่ากฎสี่เหลี่ยมคางหมู โดยพิจารณาจากรูปที่ 5.4

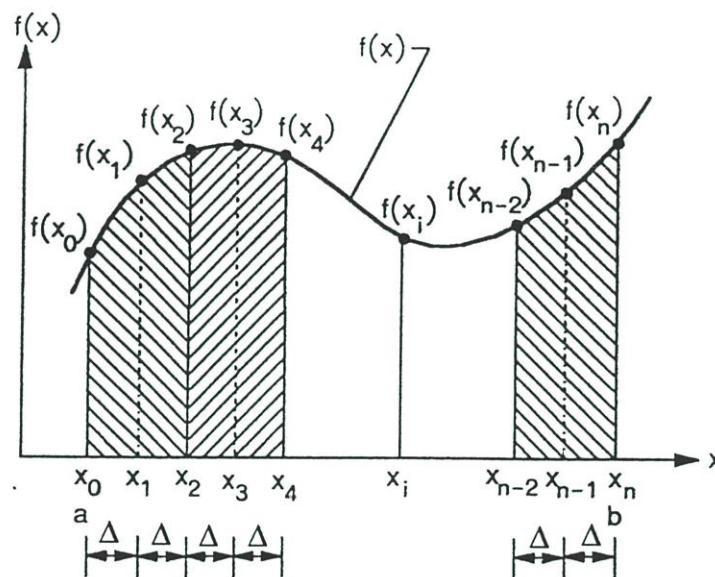


รูปที่ 5.4 แสดงการอินทิเกรต โดยใช้กฎของซิมสัน 1/3

จากรูปที่ 5.4 แสดงลักษณะการกระจายของฟังก์ชัน $f(x)$ ในช่วง $a \leq x \leq b$ และจากรูปที่ 5.4 เรา จะประมาณค่าฟังก์ชัน $f(x)$ ที่แท้จริงด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับสองที่แสดงด้วยเส้นประ โดยอาศัย ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของลากรองจ์ (second order Lagrange polynomial) แล้วทำการอินทิเกรต ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของลากรองจ์ จะได้

$$I = \frac{\Delta}{3}(f(x_1) + 4f(x_2) + f(x_3)) \quad (5.12)$$

ในการทำงานเดียวกันถ้าแบ่งจำนวนจุดโนดหลายจุดโนดก็จะได้กฎของซิมสัน 1/3 สามารถพิจารณาได้ จากรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการอินทิเกรต โดยกฎของซิมสัน 1/3 แบบหลายช่วง ดังนั้นสูตรการอินทิเกรตโดยกฎของซิมสัน 1/3 แบบหลายช่วงคือ

$$I = \frac{\Delta}{3} \left(f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n) \right) \quad (5.13)$$

5.4 การคำนวณหาค่าความหนาฟิล์ม [13]

จากสมการความหนาฟิล์มรูปแบบไว้มิตคือ

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} P \ln(X - X') dX' \quad (4.57)$$

จากสมการที่ (4.57) จะสังเกตเห็นได้ว่าพจน์สุดท้ายของทางขวานั้น เราจะทำการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูหรือกฎของซิมสัน 1/3 ไม่ได้ Hamlock [13] ได้ทำการนำเสนอวิธีการประมาณค่าพจน์นี้โดยกำหนดให้

$$\delta = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} P \ln(X - X') dX' \tag{5.14}$$

ทำการอินทิเกรตที่ละส่วนสมการที่ (5.14) จะทำให้

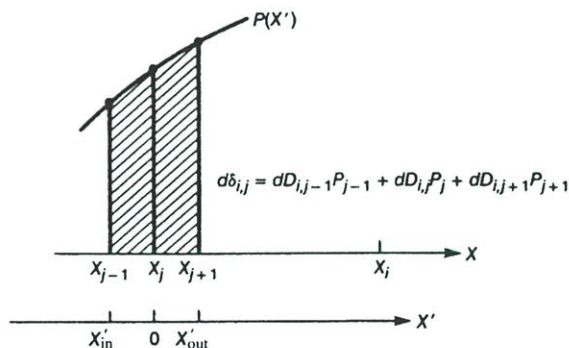
$$\delta = -\frac{1}{2\pi} \left[P I_1 \Big|_{X_{in}}^{X_{out}} + \frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} \frac{dP}{dX'} I_1 dX' \right] \tag{5.15}$$

เมื่อ

$$I_1 = -(X - X')^2 [\ln(X - X')^2 - 2]$$

ทำการตัดพจน์แรกทางด้านขวาของสมการที่ (5.15) ออกเนื่องจากเงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์ ทำให้มีค่าเป็น 0 ดังนั้นสมการที่ (5.15) จะกลายเป็น

$$\delta = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} \frac{dP}{dX'} (X - X')^2 [\ln(X - X')^2 - 2] dX' \tag{5.16}$$



รูปที่ 5.6 แสดงวิธีการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงรูปในระหว่างที่มีความดันมากกระทำ $d\delta_{i,j}$ ที่โนด i ในช่วง $[X_{j-1}, X_{j+1}]$

จากสมการที่ (5.16) ช่วงของขอบเขต $[X_{in}, X_{out}]$ สามารถแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆคือ $[X_{j-1}, X_{j+1}]$ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง δ_i จึงเป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงรูปในช่วงย่อยๆ $d\delta_{i,j}$ ที่โนด i ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วง $[X_{j-1}, X_{j+1}]$

$$\delta_i = \sum_{j=1,3,5,\dots}^{n-1} d\delta_{i,j} \tag{5.17}$$

ในช่วงย่อยๆ เหล่านี้ค่าของ dP/dX' จะสมมุติว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับ X' และ X' จะถูกเปลี่ยนแปลงระหว่าง X'_{j-1} และ X'_j และระหว่าง X'_j และ X'_{j+1} ดังรูปที่ 5.6 เมื่อช่วงย่อยๆ เหล่านี้อยู่ในระยะ X_i ถึง X_j เพื่อให้ง่ายขึ้นจะให้อยู่ในรูป

$$d\delta_{i,j} = -\frac{1}{2\pi} \int_{X'_{j-1} \rightarrow X'_j}^{X'_{j+1} \rightarrow X'_j} \frac{dP}{dX'} (X_i - X_j - X') [\ln(X_i - X_j - X')^2 - 2] dX' \quad (5.18)$$

การกระจายเชิงเส้นของ dP/dX' คือ

$$\frac{dP}{dX'} = (a_1 X' + a_2) P_{j-1} + (a_3 X' + a_4) P_j + (a_5 X' + a_6) P_{j+1} \quad (5.19)$$

เมื่อ

$$a_1 = \frac{2}{(X_{j-1} - X_j)(X_{j-1} - X_{j+1})} \quad (5.20ก)$$

$$a_2 = -\frac{(X_j + X_{j+1})}{(X_{j-1} - X_j)(X_{j-1} - X_{j+1})} + a_1 X_j \quad (5.20ข)$$

$$a_3 = \frac{2}{(X_j - X_{j-1})(X_j - X_{j+1})} \quad (5.20ค)$$

$$a_4 = -\frac{(X_{j+1} + X_{j-1})}{(X_j - X_{j-1})(X_j - X_{j+1})} + a_3 X_j \quad (5.20ง)$$

$$a_5 = \frac{2}{(X_{j+1} - X_{j-1})(X_{j+1} - X_j)} \quad (5.20จ)$$

$$a_6 = -\frac{(X_j + X_{j-1})}{(X_{j+1} - X_{j-1})(X_{j+1} - X_j)} + a_5 X_j \quad (5.20ฉ)$$

จากการกระจาย dP/dX' ในทำนองเดียวกันก็สามารถกระจาย $d\delta_{i,j}$ ได้คือ

$$d\delta_{i,j} = dD_{i,j-1} P_{j-1} + dD_{i,j} P_j + dD_{i,j+1} P_{j+1} \quad (5.21)$$

เมื่อ dD สามารถคำนวณได้จาก

$$dD_{i,j-1} = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{j-1} \rightarrow X_j}^{X_{j+1} \rightarrow X_j} (a_1 X + a_2)(X_i - X_j - X') [\ln(X_i - X_j - X')^2 - 2] dX' \quad (5.22)$$

ทำการแปลงโคออร์ดิเนตโดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} Z &= X_i - X_j - X' & Z_{\min} &= X_i - X_{j-1} & Z_{\max} &= X_i - X_{j+1} \\ b_2 &= a_1(X_i - X_j) + a_2 & dZ &= -dX' \end{aligned} \quad (5.23)$$

ดังนั้น $dD_{i,j-1}$ สามารถคำนวณได้ด้วย

$$\begin{aligned} dD_{i,j-1} &= -\frac{1}{2\pi} \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} -(a_1 Z + b_2) Z (\ln Z^2 - 2) dZ \\ &= -\frac{1}{2\pi} \left(-2b_2 \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z \ln Z dZ + a_1 \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z^2 \ln Z^2 dZ + 2b_2 \left[\frac{Z^2}{2} \right]_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} - 2a_1 \left[\frac{Z^3}{3} \right]_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \right) \\ &= -\frac{1}{2\pi} \left[-2b_2 \frac{Z^2}{4} (\ln Z^2 - 1) + 2a_1 \frac{Z^3}{9} (\ln |Z|^3 - 1) + 2b_2 \frac{Z^2}{2} - 2a_1 \frac{Z^3}{3} \right]_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \end{aligned} \quad (5.24)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $dD_{i,j}$ และ $dD_{i,j+1}$ มีความสัมพันธ์คล้ายกันกับ $dD_{i,j-1}$ จึงสามารถใช้สมการ (5.26) เพื่อแปลงโคออดิเนตและใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันดังนี้

$$dD_{i,j-1} = -\frac{1}{2\pi} \left(a_1 K_1 + a_2 \frac{K_2}{2} \right) \quad (5.25)$$

$$dD_{i,j} = -\frac{1}{2\pi} \left(a_3 K_1 + a_4 \frac{K_2}{2} \right) \quad (5.26)$$

$$dD_{i,j+1} = -\frac{1}{2\pi} \left(a_5 K_1 + a_6 \frac{K_2}{2} \right) \quad (5.27)$$

เมื่อ

$$K_1 = K_2 \frac{X_i - X_j}{2} + \frac{2K_3}{9} \quad (5.28)$$

$$K_2 = Z_{\min}^2 (\ln Z_{\min}^2 - 3) - Z_{\max}^2 (\ln Z_{\max}^2 - 3) \quad (5.29)$$

$$K_3 = Z_{\max}^3 (\ln |Z_{\max}^3| - 4) - Z_{\min}^3 (\ln |Z_{\min}^3| - 4) \quad (5.30)$$

แทนค่าสมการ (5.21) ลงในสมการ (5.17) ทำให้ได้สมการการเปลี่ยนรูปเมื่อมีความดันกระทำคือ

$$\delta_i = \sum_{j=1,3,5,\dots}^{n-1} (dD_{i,j-1}P_{j-1} + dD_{i,j}P_j + dD_{i,j+1}P_{j+1}) \quad (5.31)$$

ดังนั้นสมการความหนาพิสัยที่โนดต่างๆคือ

$$H_i = H_0 + \frac{X_i^2}{2} + \sum_{j=1,3,5,\dots}^{n-1} (dD_{i,j-1}P_{j-1} + dD_{i,j}P_j + dD_{i,j+1}P_{j+1}) \quad (5.32)$$

5.5 วิธีมัลติกริด [20,21]

วิธีมัลติกริด (multigrid method) เป็นวิธีที่ใช้ในการช่วยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ชนิดต่างๆ โดยจะต้องจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการไม่ต่อเนื่อง (discretise equation) โดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม หรือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) หรือวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) ฯลฯ เป็นต้น แล้วทำการแบ่งจุดโนดต่างๆ ออกเป็นระดับๆ โดยในแต่ละระดับจะมีจำนวนโนดไม่เท่ากัน โดยให้มีจำนวนโนดน้อยลงเรื่อยๆ แล้วเริ่มคำนวณจากระดับที่มีความละเอียดของโนดมากที่สุดแล้วส่งค่าลงไปยังระดับที่หยาบลงเรื่อยๆ จนถึงระดับที่หยาบที่สุดแล้วจึงส่งค่าที่คำนวณได้กลับไปที่ระดับละเอียดที่สุดอีกครั้งทำอย่างนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าผลเฉลยจะเข้าสู่ผลเฉลยที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

จากสมการ (5.5) และ (5.9) เป็นเมทริกซ์ที่ได้จากการแก้สมการด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เมื่อนำสมการทั้งสองมาประกอบจะได้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{T}_m^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}_T \end{Bmatrix} \quad (5.33)$$

5.5.1 วิธีเกาส์ไชเดล (Guess-Seidel method)

การทำซ้ำโดยวิธีมัลติกริดในแต่ละระดับจะถูกเรียกว่า Smoother โดยที่ใช้มีอยู่หลายวิธี เช่น เกาส์จาโคบี เกาส์ไชเดล เป็นต้น แต่วิธีที่ทำให้ผลเฉลยเข้าสู่ได้เร็วที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือวิธีเกาส์ไชเดล [20] วิธีเกาส์ไชเดลมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$P_i^m = \frac{(b_i - a_{i,i-1}P_{i-1}^m - a_{i,i+1}P_{i+1}^{m-1})}{a_{i,i}} \quad (5.34)$$

และ

$$T_{m,i}^* = \frac{(b_{T,i} - a_{T,i,i-1}T_{m,i-1}^*)}{a_{T,i,i}} \quad (5.35)$$

เมื่อตัวอักษรยกคือค่าของผลเฉลยครั้งที่ m และ ครั้งที่ $m-1$ ตามลำดับ และในแต่ละรอบของการคำนวณให้ทำการถ่วงน้ำหนักค่าของผลเฉลยโดย

$$P_i^m = \omega P_i^m + (1-\omega)P_i^{m-1} \quad (5.36)$$

$$T_{m,i}^k = \omega T_{m,i}^{*m} + (1-\omega)T_{m,i}^{*m-1} \quad (5.37)$$

เมื่อ ω คือค่าถ่วงน้ำหนักแบบต่ำ (under-relaxation) มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

5.5.2 การกำหนดจำนวนของโนดที่ระดับหยาบ

ในการกำหนดจำนวนของโนดที่ระดับหยาบมีการกำหนดได้หลายแบบแต่ส่วนใหญ่แล้วนั้นนิยมกำหนดโนดในระดับหยาบไว้ครึ่งหนึ่งของระดับละเอียดคือ

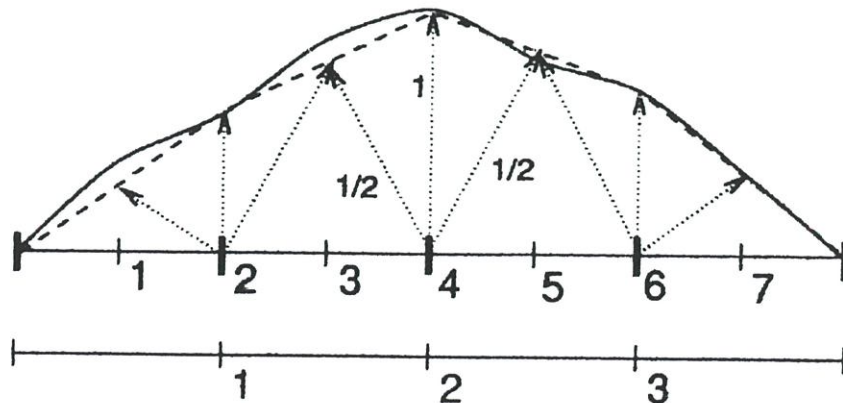
$$\Omega_H = \frac{1}{2}\Omega_h$$

เมื่อ Ω_H คือพิสัยของระดับหยาบ และ Ω_h คือพิสัยของระดับละเอียด

จากที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นวิธีการมัลติกริดจะมีการส่งค่าให้กับโนดในระดับต่างๆ จากละเอียดสู่หยาบดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสร้างตัวดำเนินการถ่ายโอนเพื่อส่งค่าให้แต่ละระดับ

5.5.2.1 ตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายใน (Prolongation transfer operator or Interpolation transfer operator) [22]

การเลือกการประมาณค่าภายในที่ใช้ในที่นี้จะใช้การประมาณค่าภายในเชิงเส้นโดยพิจารณาจากรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงการคำนวณหาตัวดำเนินการประมาณค่าภายใน

จากรูปที่ 5.7 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u_{h,1} &= \frac{1}{2}u_{H,1} \\
 u_{h,i} &= \begin{cases} \frac{1}{2}\left(u_{H,\frac{i-1}{2}} + u_{H,\frac{i+1}{2}}\right) & i = 3,5,\dots,n-2 \\ u_{H,\frac{i}{2}} & i = 2,4,\dots,n-1 \end{cases} \\
 u_{h,n_h} &= \frac{1}{2}u_{H,n_H}
 \end{aligned} \tag{5.38}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} u_{h,1} \\ u_{h,2} \\ u_{h,3} \\ u_{h,4} \\ u_{h,5} \\ u_{h,6} \\ u_{h,7} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{H,1} \\ u_{H,2} \\ u_{H,3} \end{Bmatrix}$$

หรือ

$$\mathbf{u}_h = \mathbf{I}_H^h \mathbf{u}_H$$

โดยที่ \mathbf{I}_H^h คือตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายใน

5.5.2.2 ตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด (Restriction transfer operator) [22]

ตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัดเป็นตัวดำเนินการที่ใช้ถ่ายโอนค่าจากโนดในระดับละเอียดสู่โนดระดับหยาบตัวดำเนินการนี้สามารถหาได้จาก

$$\mathbf{I}_h^H = \frac{1}{2}[\mathbf{I}_H^h]^T$$

$$\mathbf{I}_h^H = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \end{bmatrix}$$

โดยที่ \mathbf{I}_h^H คือตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$u_{h,i} = 0.25u_{h,2i-1} + 0.5u_{h,2i} + 0.25u_{h,2i+1} \quad (5.39)$$

ข้อจำกัดของตัวดำเนินการถ่ายโอนคืออันดับของตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายในและตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัดจะต้องมีอันดับที่ขึ้นอยู่กับอันดับของสมการเชิงอนุพันธ์ [20,22]

เนื่องจากตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายในมีรูปสมการเป็นสมการพหุนาม ดังนั้นอันดับของตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายในคือ $k+1$ โดยที่ k คือกำลังสูงสุดของสมการพหุนาม อันดับของตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัดขึ้นอยู่กับอันดับของการทรานส์โพส (Transpose)

ให้ m_p คืออันดับของตัวดำเนินการถ่ายโอนประมาณค่าภายใน m_R คืออันดับของตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด และ m_{PDE} คืออันดับของสมการเชิงอนุพันธ์โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$m_p + m_R > m_{PDE}$$

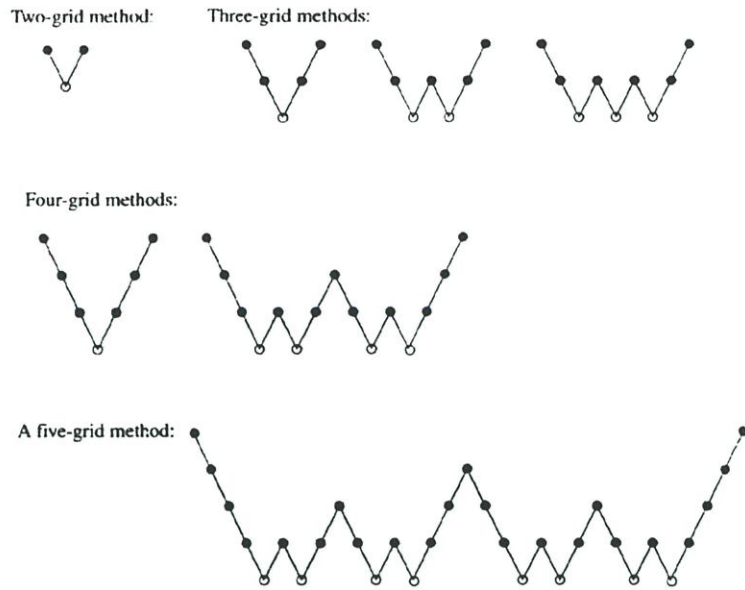
5.5.3 วัฏจักรของมัลติกริด (Multigrid cycle)

วัฏจักรของมัลติกริดคือรอบในการทำซ้ำโดยวิธีมัลติกริด ที่นิยมใช้อยู่สามวัฏจักรคือ

1. วัฏจักรสองระดับ (Two grid cycle) เป็นวัฏจักรที่ง่ายที่สุด เนื่องจากมีการทำอยู่สองระดับคือ ที่ระดับละเอียดและหยาบ เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีจุด โคนน้อยและปัญหามีความไม่ซับซ้อนมากนัก

2. วัฏจักรวี (V-cycle) เป็นวัฏจักรที่พัฒนาต่อมาจากวัฏจักรสองระดับ สามารถทำได้หลายระดับและมีความแม่นยำสูงกว่าวัฏจักรสองระดับ

3. วัฏจักรดับเบิลยู (W-cycle) เป็นวัฏจักรที่มีความแม่นยำสูงที่สุด เนื่องจากจะเหลือเศษตกค้างของสมการน้อยและใช้จำนวนในการทำซ้ำน้อยกว่าแบบวี แต่ในแต่ละรอบจะใช้เวลานานกว่า



รูปที่ 5.8 แสดงวัฏจักรของมัลติกริดแบบต่างๆ

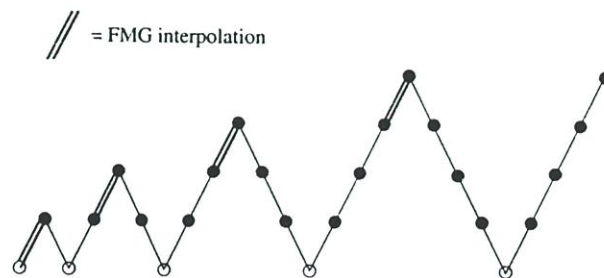
จากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าจะมี ● โดยจุดนี้แสดงถึงกระบวนการการทำ Smoother ○ แสดงถึงกระบวนการการแก้สมการ โดยให้แก่งานได้ผลเฉลยโดยประมาณที่ถูกต้อง \ แสดงการทำ presmoother และ / แสดงการทำ postsmoother โดยที่จำนวนครั้งในการทำ presmoother และ postsmoother จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$m_{v_1} + m_{v_2} \leq 3$$

เมื่อ m_{v_1} คือจำนวนครั้งในการทำ presmoother และ m_{v_2} จำนวนครั้งในการทำ postsmoother

5.5.4 การทำมัลติกริดแบบเต็ม (Full multigrid, FMG)

การทำหาผลเฉลยในตอนเริ่มต้นถ้าเริ่มต้นที่ระดับที่มีโนดละเอียดมากๆ แล้วทำวัฏจักรวีหรือวัฏจักรดับเบิ้ลยูเลยนั้นจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก Venner [23] จึงได้แนะนำให้ใช้ FMG เพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยกระบวนการ FMG มีกระบวนการดังรูปที่ 5.9 [20]



รูปที่ 5.9 แสดงกระบวนการทำ FMG

จากรูปจะเห็นว่าในการประมาณค่าในช่วงแรกจะทำการหาผลเฉลยที่ถูกต้องในระดับหยาบสุดก่อนแล้วทำการส่งค่าให้กับระดับต่อไปโดย // คือกระบวนการทำการประมาณค่าภายในให้กับผลเฉลยเพื่อส่งค่าให้กับระดับต่อไป เมื่อทำการส่งค่าให้กับระดับสูงสุดแล้วจึงทำทำวัฏจักรวีหรือวัฏจักรดับเบิ้ลยูต่อไป

5.5.5 วิธีการประมาณแบบเต็ม (Full Approximation Scheme, FAS) [20]

วิธี FAS เป็นวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นโดยมีกระบวนการทำดังนี้

1. การทำ presmooth คือการหาค่าของเวกเตอร์ \mathbf{P} และ \mathbf{T}_m^* ของสมการ (5.36) โดยการทำเกาส์ไซเคิล เป็นจำนวน m_{v_1} ครั้ง

2. การหาค่าปรับแก้ที่ระดับหยาบ

ทำการหาค่าเศษตกค้างโดย

$$\{\mathbf{d}_r\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}_T \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{T}_m^* \end{Bmatrix}$$

เมื่อเวกเตอร์ \mathbf{d}_r คือเวกเตอร์ของส่วนตกค้าง ทำการส่งค่าต่างๆ ของระดับละเอียดให้กับระดับหยาบโดยใช้ตัวดำเนินการจำกัดคือ

$$\mathbf{P}_{k-1} = \mathbf{I}_k^{k-1} \mathbf{P}_k$$

$$\mathbf{T}_{m,k-1}^* = \mathbf{I}_k^{k-1} \mathbf{T}_{m,k}^*$$

$$\mathbf{d}_{r,k-1} = \mathbf{I}_k^{k-1} \mathbf{d}_{r,k}$$

เมื่อตัวยกและตัวห้อย k คือระดับของโนดละเอียดและ $k-1$ คือระดับของโนดหยาบ ทำการหาค่าของ \mathbf{A}_{k-1} และ $\mathbf{A}_{T,k-1}$ โดยใช้สมการ (5.4) และ (5.7) และทำการคำนวณหาค่าของเวกเตอร์ \mathbf{B}_{k-1} โดย

$$\{\mathbf{B}\}_{k-1} = \{\mathbf{d}_r\}_{k-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_T \end{bmatrix}_{k-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{T}_m^* \end{Bmatrix}_{k-1}$$

ทำการคำนวณหาค่า χ_{k-1} ซึ่งเป็นค่าที่ระดับหยาบจาก

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_T \end{bmatrix}_{k-1} \{\chi\}_{k-1} = \{B\}_{k-1} \quad (5.40)$$

ถ้าค่าของตัวห้อย $k=1$ ให้ทำการแก้สมการ (5.40) จนกระทั่งได้ผลเฉลยโดยประมาณ χ_{k-1} ที่ถูกต้อง แต่ถ้า $k > 1$ ให้ทำการ smooth หาค่า χ_{k-1} โดยใช้ค่า P_{k-1} และ $T_{m,k-1}^*$ เป็นค่าเริ่มต้นในการประมาณค่าและให้ทำการส่งค่าไปให้ระดับต่อไปจนกระทั่ง $k=1$

3. เมื่อทำการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณที่ถูกต้องในระดับหยาบที่สุดแล้วให้ทำการหาค่าปรับแก้โดย

$$\{Cr\}_k = \{\chi\}_k - \begin{Bmatrix} P \\ T_m^* \end{Bmatrix}_k$$

ทำการประมาณค่าภายในค่าปรับแก้โดย

$$Cr_{k+1} = I_k^{k+1} Cr_k$$

ทำการปรับค่าในระดับละเอียดดังนี้

$$\chi_{k+1} = \chi_{k+1} + Cr_{k+1}$$

และทำการ postsmooth ที่ระดับ $k+1$ เป็นจำนวน m_{v2} ครั้ง

4. ทำข้อ 3. ไปจนกว่าจะถึงระดับละเอียดสุดแล้วจึงนำค่า P และ T_m^* มาทำการเปรียบเทียบกับค่าในครั้งเก่าโดย

$$\left| \frac{P^m - P^{m-1}}{P^m} \right| \times 100 \geq 0.0001 \quad \text{และ} \quad \left| \frac{T_m^{*m} - T_m^{*(m-1)}}{T_m^{*m}} \right| \times 100 \geq 0.0001 \quad (5.41)$$

ถ้าเงื่อนไขตามสมการ (5.41) ยังคงเป็นจริงให้กลับไปทำตั้งแต่ข้อ 1. ใหม่

5.5.6 มัลติกริดแบบ adaptive (Adaptive multigrid) [20]

จากวิธีมัลติกริดที่ได้อธิบายไปแล้วนั้นจะทำการคำนวณตลอดโดเมนของปัญหาและเนื่องจากปัญหาในที่นี่มีการเปลี่ยนแปลงสูงในช่วงที่มีการสัมผัส ดังนั้นถ้ามีการแบ่งจุดโนดในระดับละเอียดมากมายจะเสียเวลาในการคิดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมากจึงใช้วิธีมัลติกริดแบบ adaptive มาช่วยเพื่อทำให้สามารถคำนวณได้เร็วขึ้น

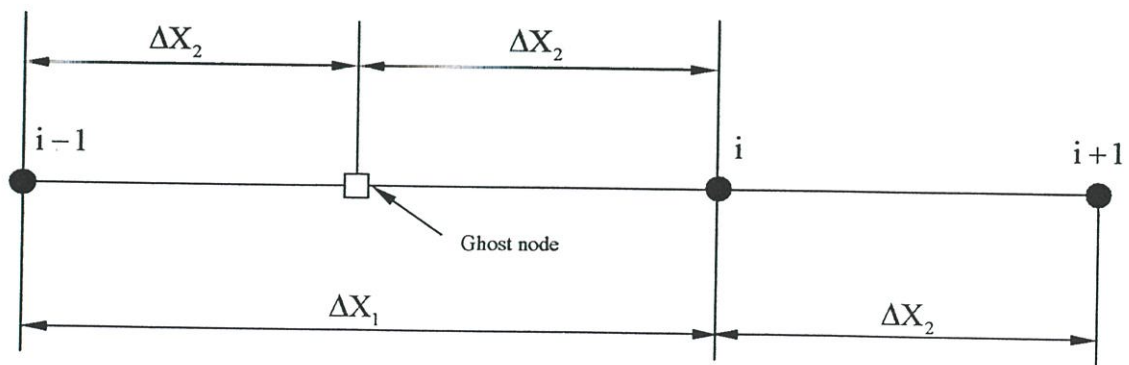
เนื่องจากปัญหาในที่นี้อยู่ในช่วงของ $X_{in} = -4.5$ และ $X_{out} = 1.5$ ช่วงที่มีการสัมผัสกันของลูกกลิ้งกับแผ่นเลื่อนจะอยู่ในช่วงประมาณ -1 ถึง 1 โดยจะแบ่งจุดโนดเป็นระดับๆ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนจุดโนดในระดับต่างๆ

ระดับ	จำนวนโนดในช่วง $[-4.5, -1.5]$	จำนวนโนดในช่วง $[-1.5, 1.5]$
0	4	4
1	8	8
2	16	16
3	32	32
4	64	64
4+1	64	128
4+2	64	256

จากตารางที่ 5.1 ในระดับที่ 0-4 จะใช้วิธี FAS ขรรคมาในการแก้ แต่ในระดับ 4+1 และ 4+2 จะใช้วิธี FAS และมัดติกริดแบบ adaptive ในการแก้โดยในช่วง $[-4.5, -1.5]$ ของระดับ 4+1 และ 4+2 จะใช้ค่าที่ระดับที่ 5 และทำการแก้สมการเฉพาะในช่วง $[-1.5, 1.5]$ เท่านั้น

จะสังเกตเห็นว่าในระดับ 4+1 และ 4+2 นั้นจะทำการคำนวณเฉพาะในช่วง $[-1.5, 1.5]$ เท่านั้น ดังนั้นค่าที่จะต่อระหว่างช่วง $[-4.5, -1.5]$ และ $[-1.5, 1.5]$ จะเป็นจุดที่ต้องการใช้ค่าที่โนด $i-1$ จึงต้องมีการกำหนดโนดเฉพาะขึ้นมาโนดหนึ่งซึ่งเรียกว่าโกสต์โนด (Ghost node) โดยพิจารณาจากรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงการหาค่าที่โกสต์โนด

จากรูปที่ 5.10 จะพบว่าค่าที่โกสต์โนดคือค่าเฉลี่ยระหว่างโนด i และ $i-1$ คือ

$$P_{GN} = \frac{P_i + P_{i-1}}{2}$$

และ

$$T_{m,GN}^* = \frac{T_{m,i}^* + T_{m,i-1}^*}{2}$$

เมื่อ P_{GN} คือค่าของความดันที่โกสต์โนด และ $T_{m,GN}^*$ คือค่าอุณหภูมิที่โกสต์โนด

บทที่ 6

ผลการคำนวณ

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของลูกกลิ้งกับแผ่นเลื่อนโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นผสมกับสารหล่อลื่นของแข็ง ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้คือ น้ำมัน SAE 40 ,SAE 90 และ น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1 % โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะทำการผสมกราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟด์ และโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน (PTFE) ในอัตราส่วน 0%,1%,3% และ 5% ตามลำดับ โดยลูกกลิ้งมีรัศมีขนาด 50 มิลลิเมตร รองรับภาระ 345,000 N/m และมีพารามิเตอร์ความเร็วไร้มิติ 1×10^{-11} โดยมีผลการคำนวณดังนี้

6.1 ผลเนื่องจากความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง

สารหล่อลื่นของแข็งที่ใส่ลงไปใ้น้ำมันหล่อลื่น โดยที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันจะมีผลต่อคุณลักษณะการหล่อลื่นคือ จะทำให้การกระจายความดันของน้ำมันมีขนาดลดลงเนื่องจากอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งจะเข้าไปช่วยรับภาระในช่วงของการสัมผัสและเนื่องจากขนาดของอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งมีขนาดใหญ่กว่าความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นล้วนๆ จึงทำให้อนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปช่วยในการเพิ่มความหนาฟิล์มน้ำมัน แต่ในทางตรงข้ามอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งกลับทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากยังเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปยิ่งมากจะยิ่งทำให้พฤติกรรมการไหลของสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นไคลาแดนท์มากยิ่งขึ้นและยังทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีความเสียด(Friction) มากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิของระบบโดยรวมจึงเพิ่มมากขึ้น

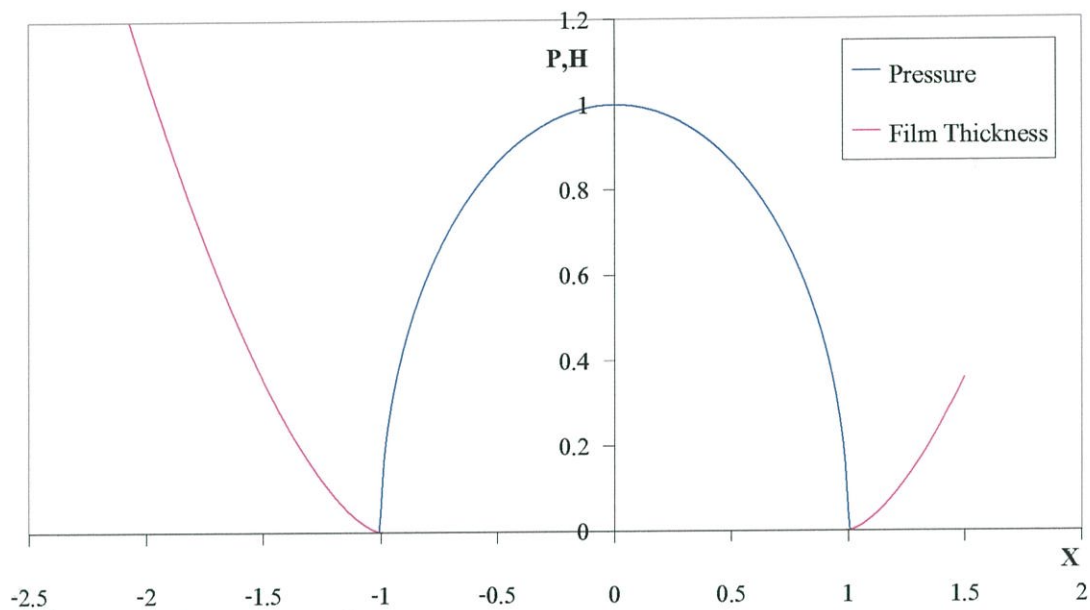
ในการคำนวณภาระทางพลวัตจะใช้เงื่อนไขเริ่มต้นที่ตำแหน่งสัมผัสซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 6.1 จากรูปที่ 6.2 ถึง 6.82 แสดงถึงการกระจายความดัน,อุณหภูมิและความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40, SAE 90 และน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1 % ที่ทำการผสมสารหล่อลื่นของแข็งในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยอนุภาคที่มีขนาด 4 μm

จากรูปที่ 6.2 ถึง 6.4, 6.11 ถึง 6.13 และ 6.20 ถึง 6.22 จะเห็นว่า การกระจายความดันของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีการกระจายความดันที่ต่ำกว่าที่ 1 % ,3% และที่น้ำมัน SAE 40 ล้วนๆ จะมีการกระจายความดันมากที่สุดเนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งจะเข้าไปช่วยรับภาระจึงทำให้การกระจายความดันที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดที่น้อยลง

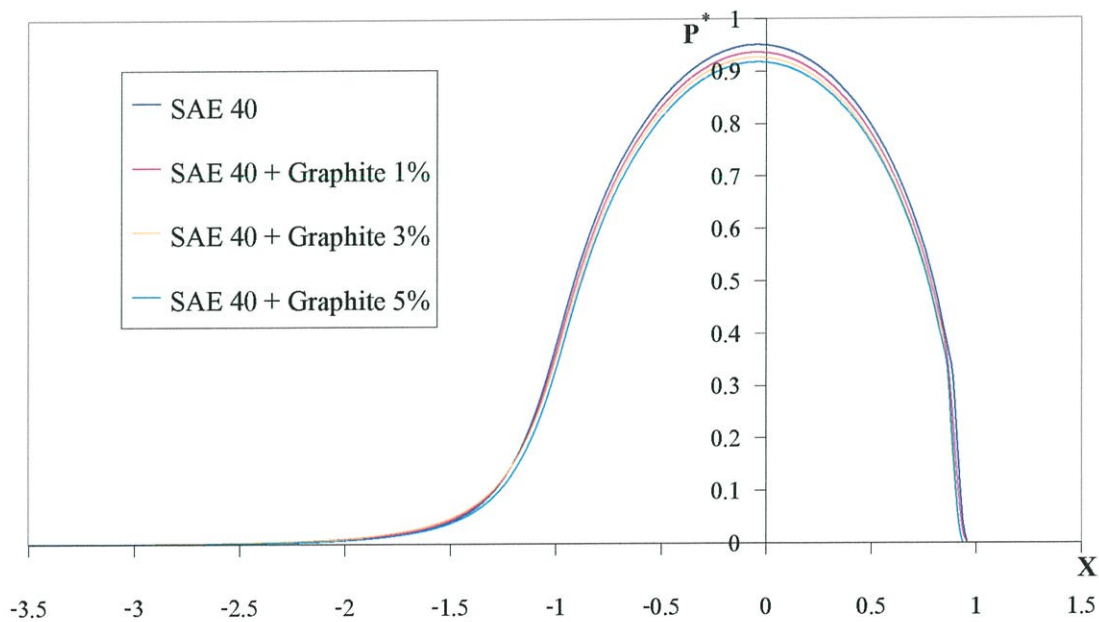
จากรูปที่ 6.5 ถึง 6.7,6.14 ถึง 6.16 และ 6.23 ถึง 6.25 จะเห็นว่า การกระจายอุณหภูมิของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีการกระจายอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ 1 % ,3%

และที่น้ำมัน SAE 40 ล้วนๆ เนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปจะไปเสียดสีกับผิวของลูกกลิ้ง และแผ่นเลื่อนจึงทำให้การกระจายอุณหภูมิจึงสูงขึ้น

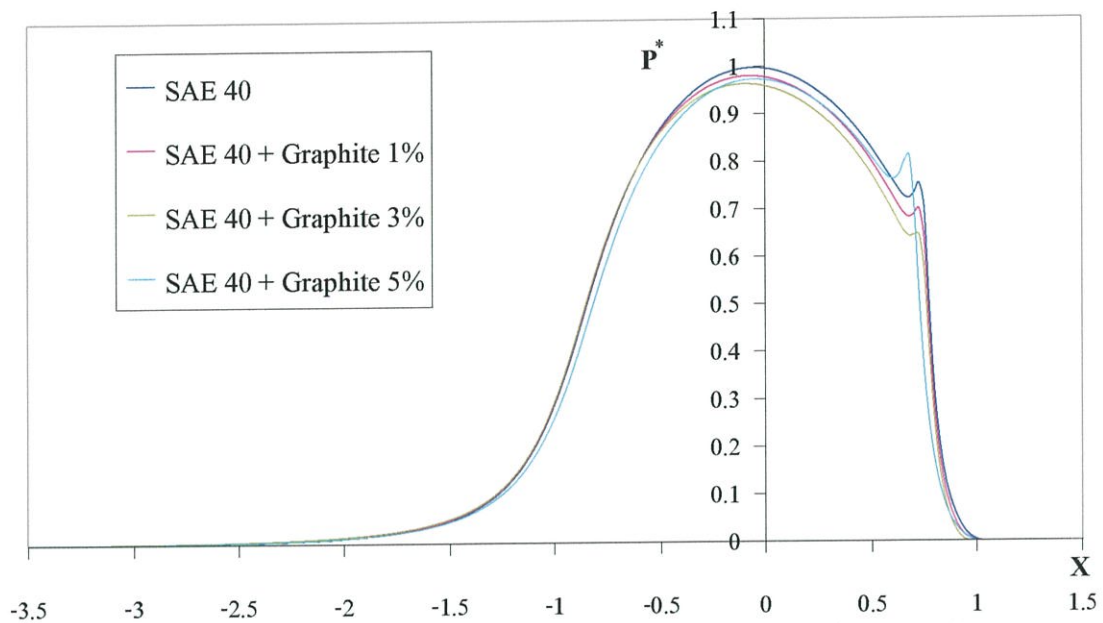
จากรูปที่ 6.8 ถึง 6.10, 6.17 ถึง 6.19 และ 6.26 ถึง 6.28 จะเห็นว่าความหนาฟิล์มของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีความหนาฟิล์มสูงกว่าที่ 1 % ,3% และที่น้ำมัน SAE 40 ล้วนๆ เนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปจะเข้าไปชั้นกลางอยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง



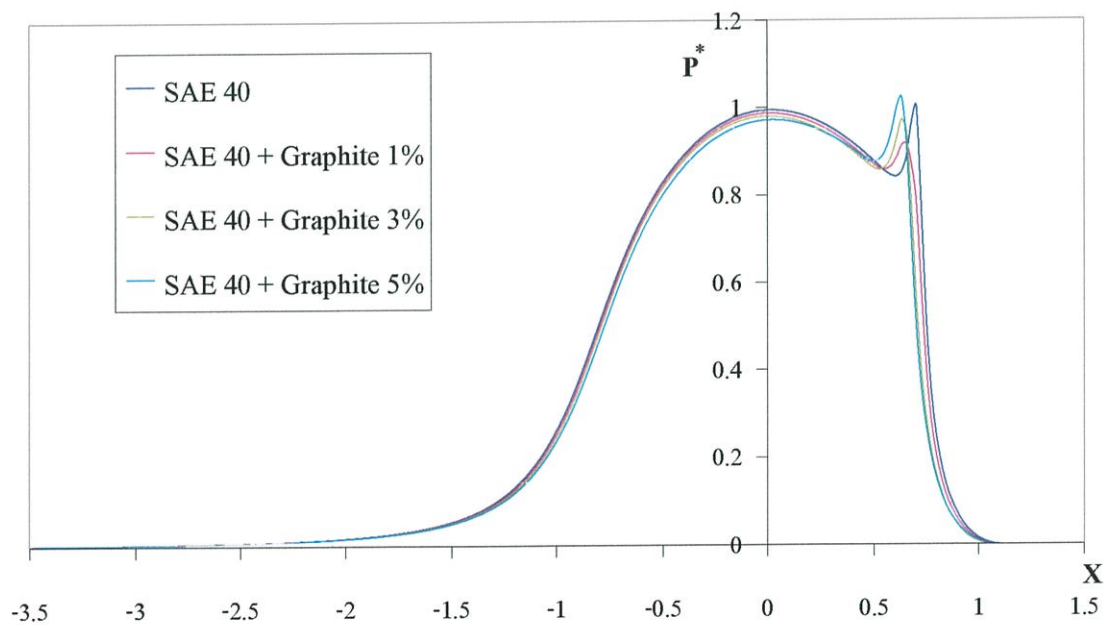
รูปที่ 6.1 แสดงเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ



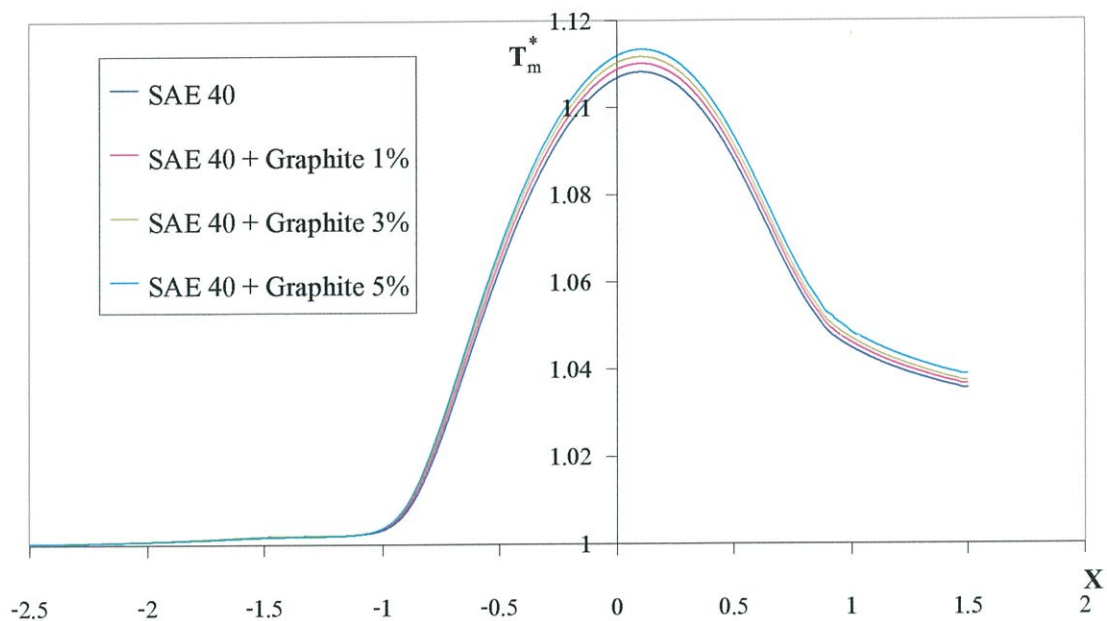
รูปที่ 6.2 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิตที่ 1



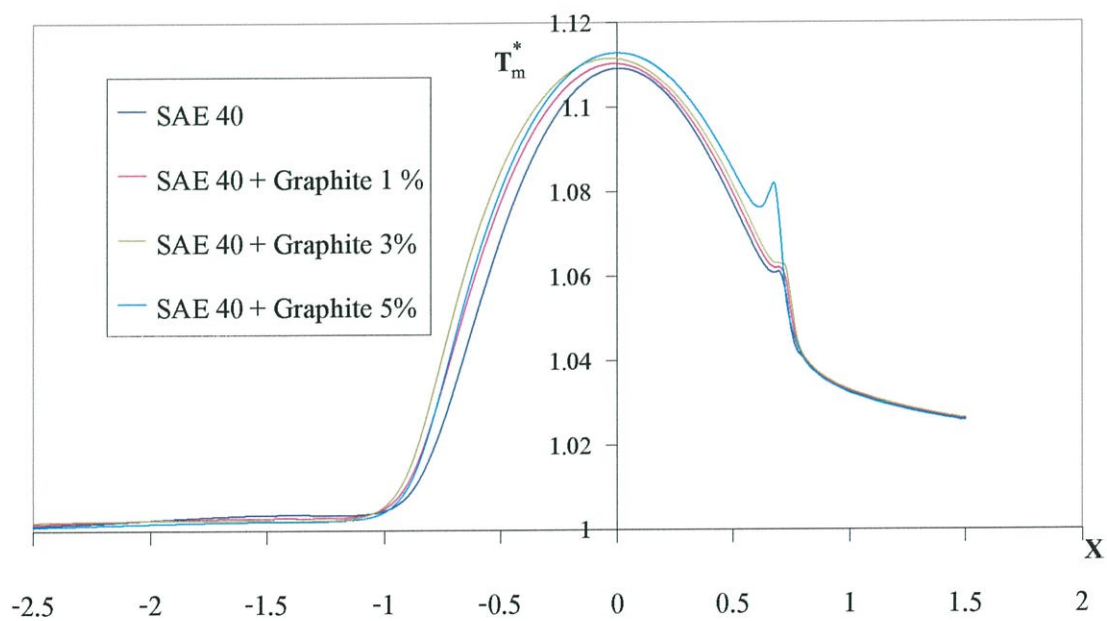
รูปที่ 6.3 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



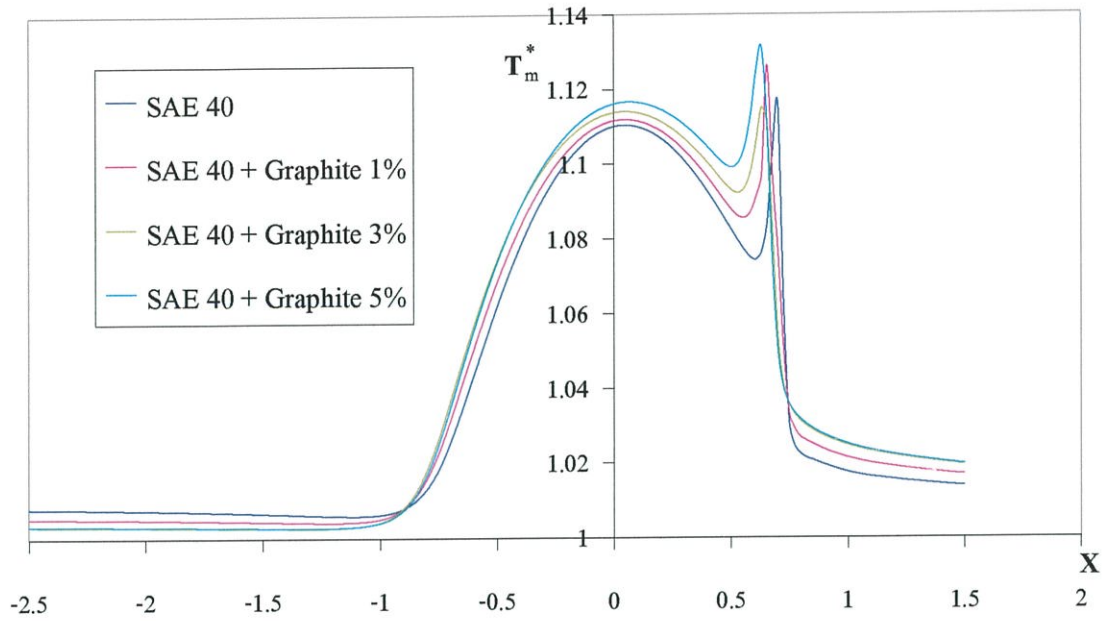
รูปที่ 6.4 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



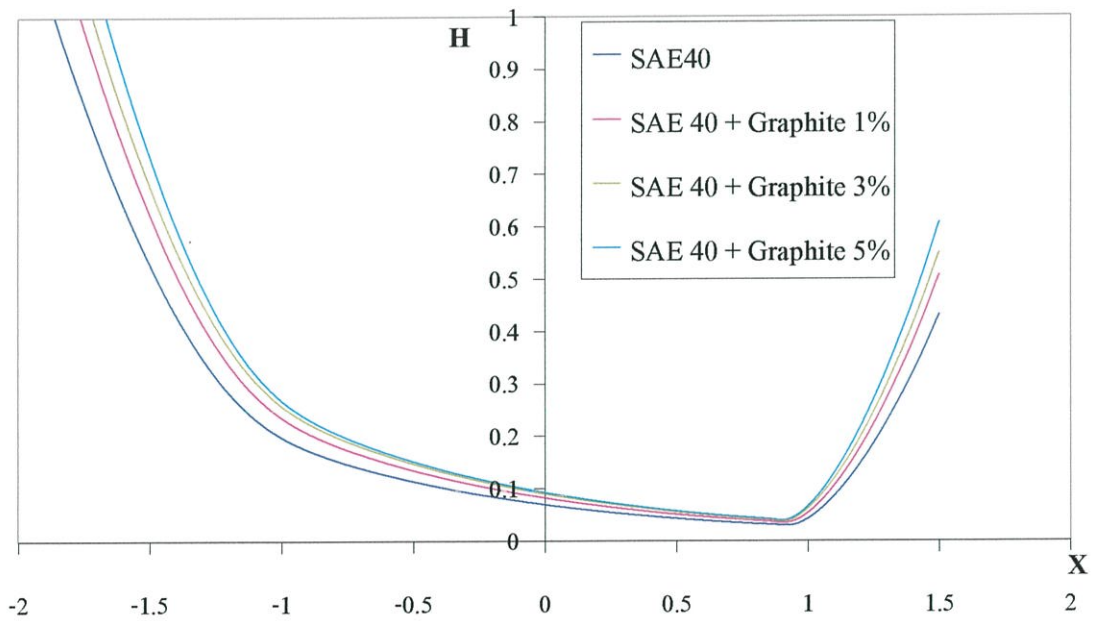
รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



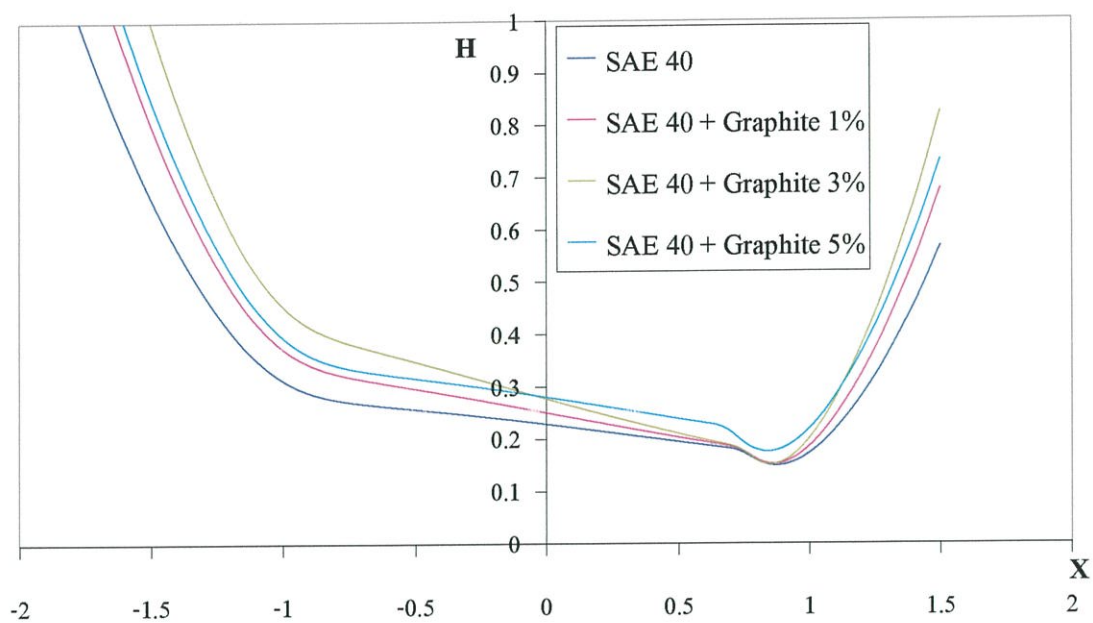
รูปที่ 6.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



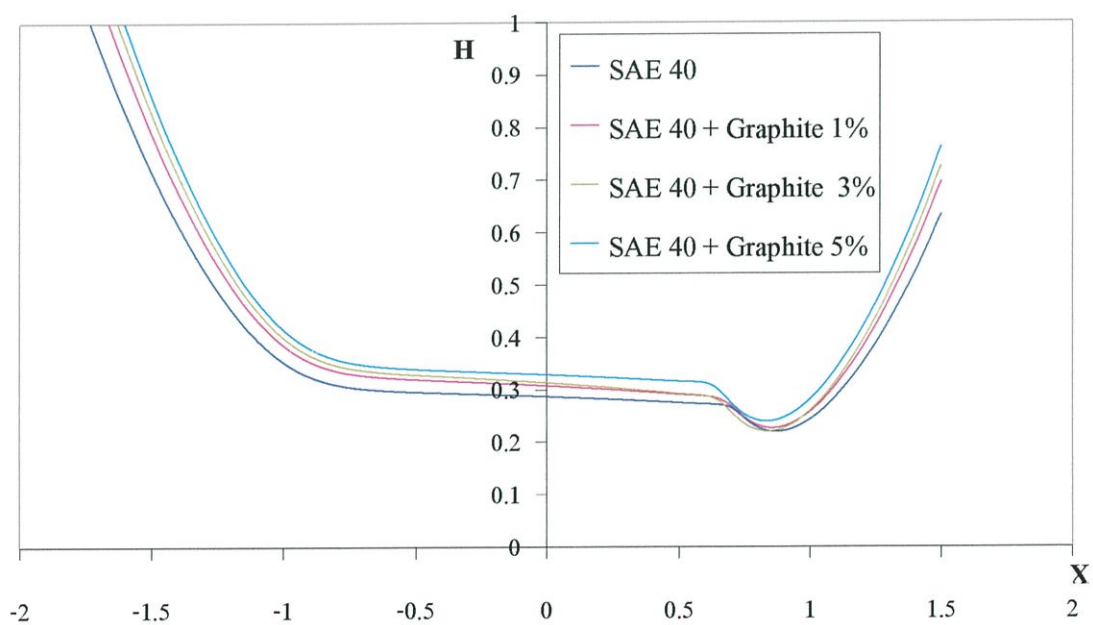
รูปที่ 6.7 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



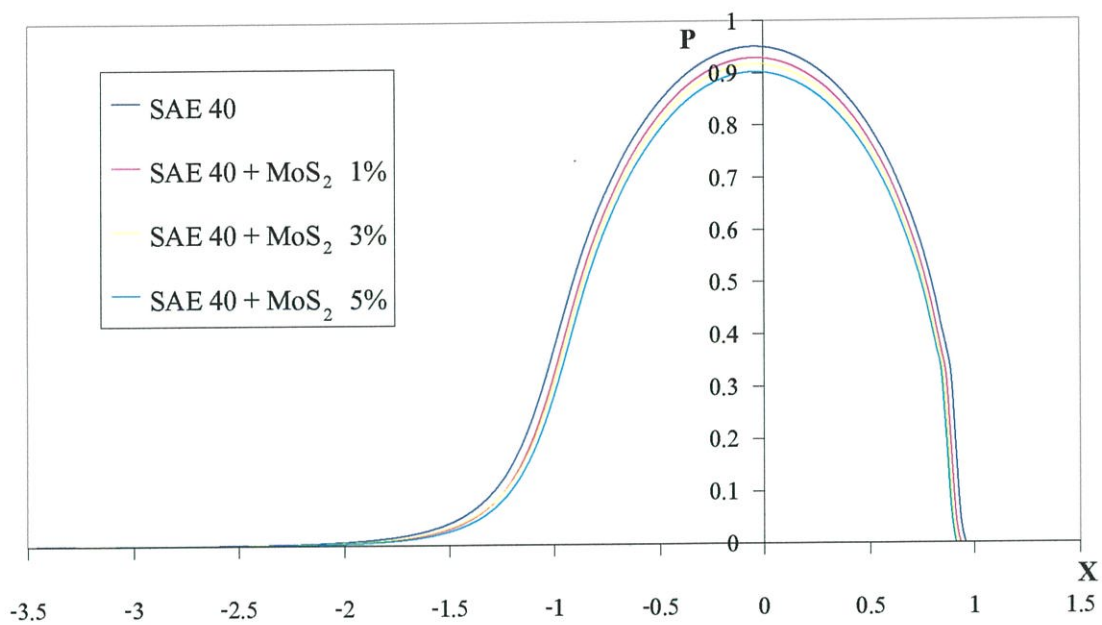
รูปที่ 6.8 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



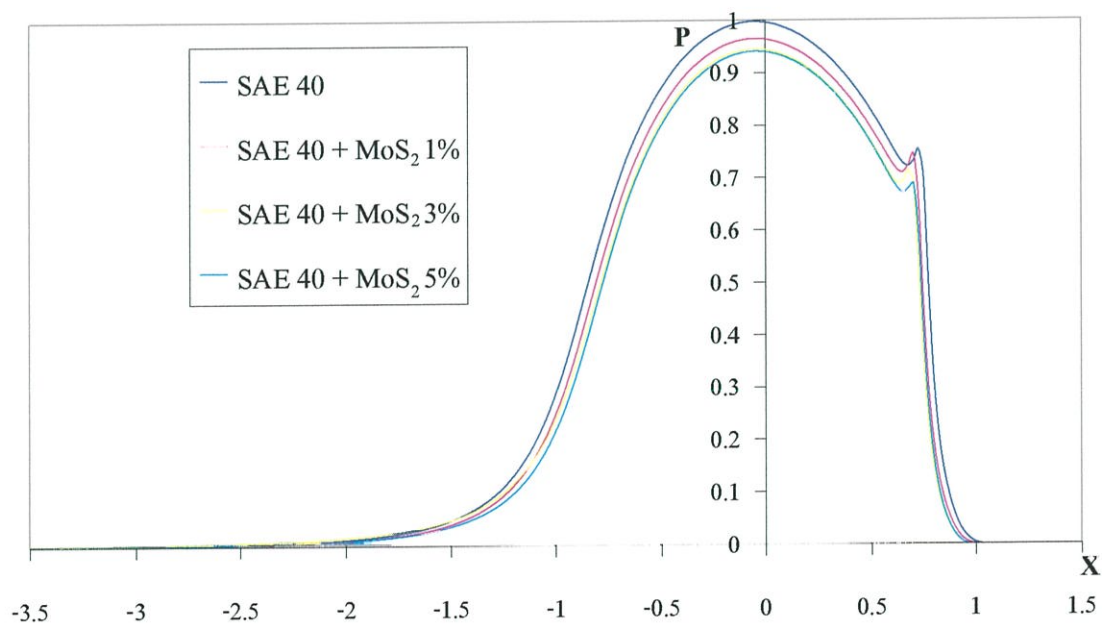
รูปที่ 6.9 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



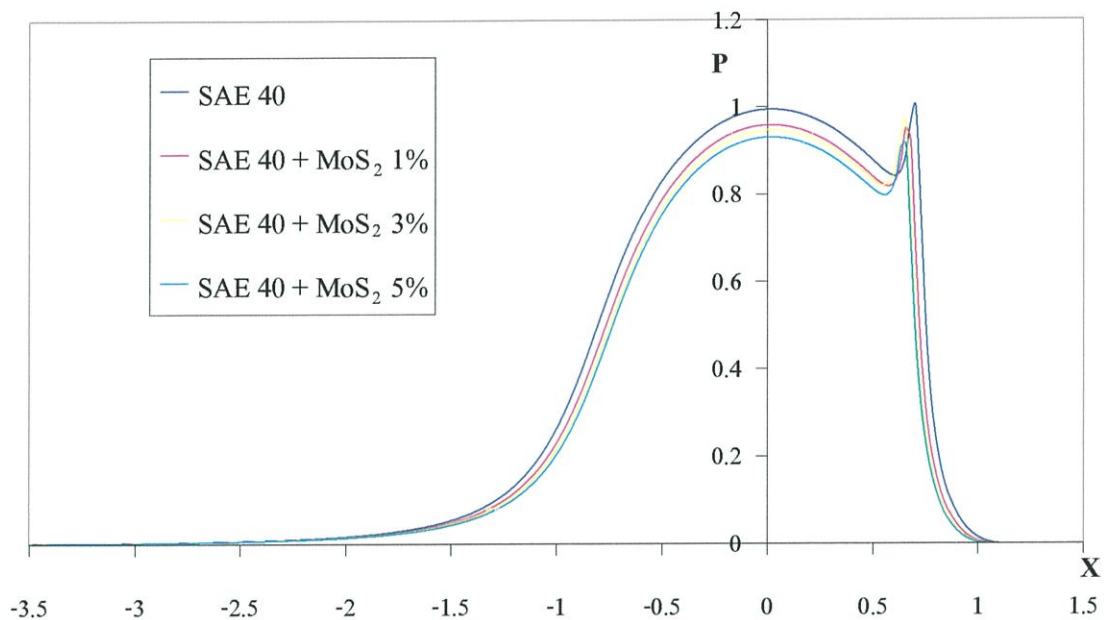
รูปที่ 6.10 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



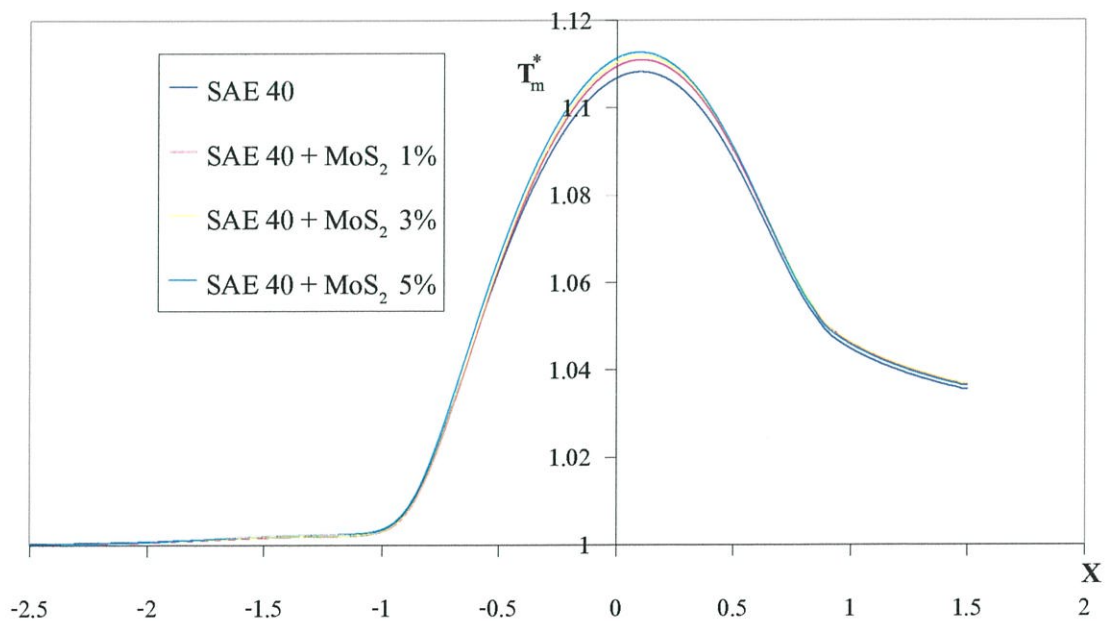
รูปที่ 6.11 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



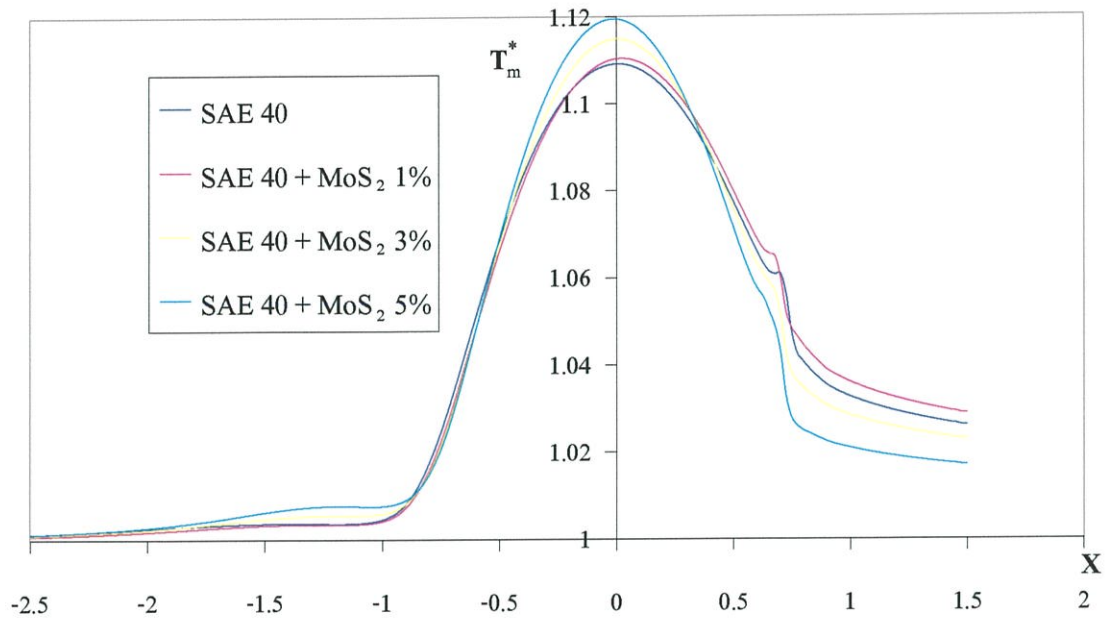
รูปที่ 6.12 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



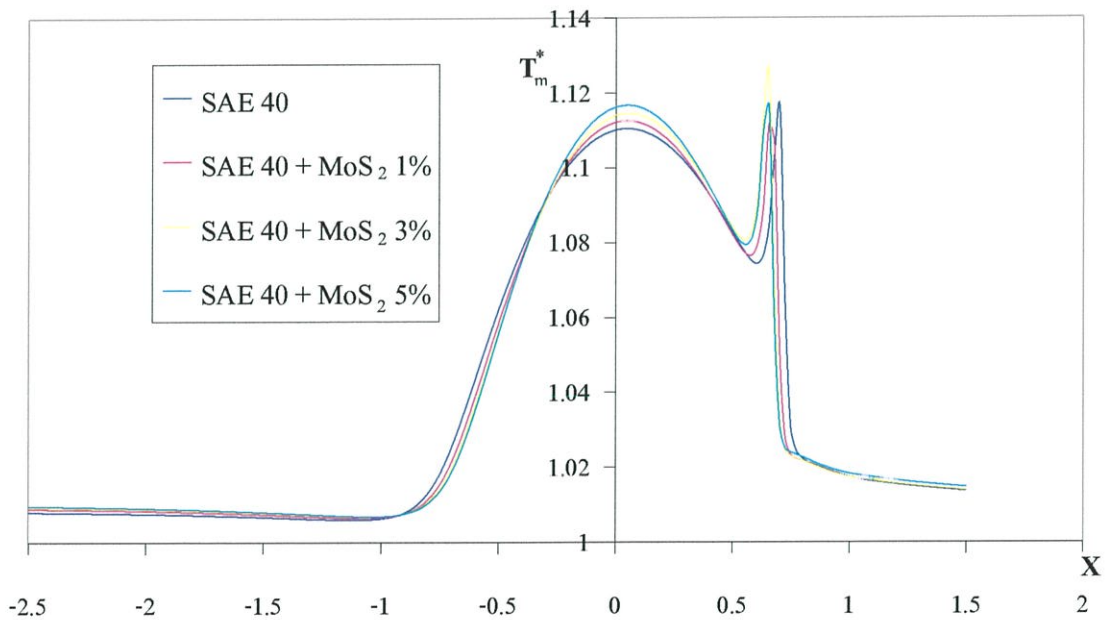
รูปที่ 6.13 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิดินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



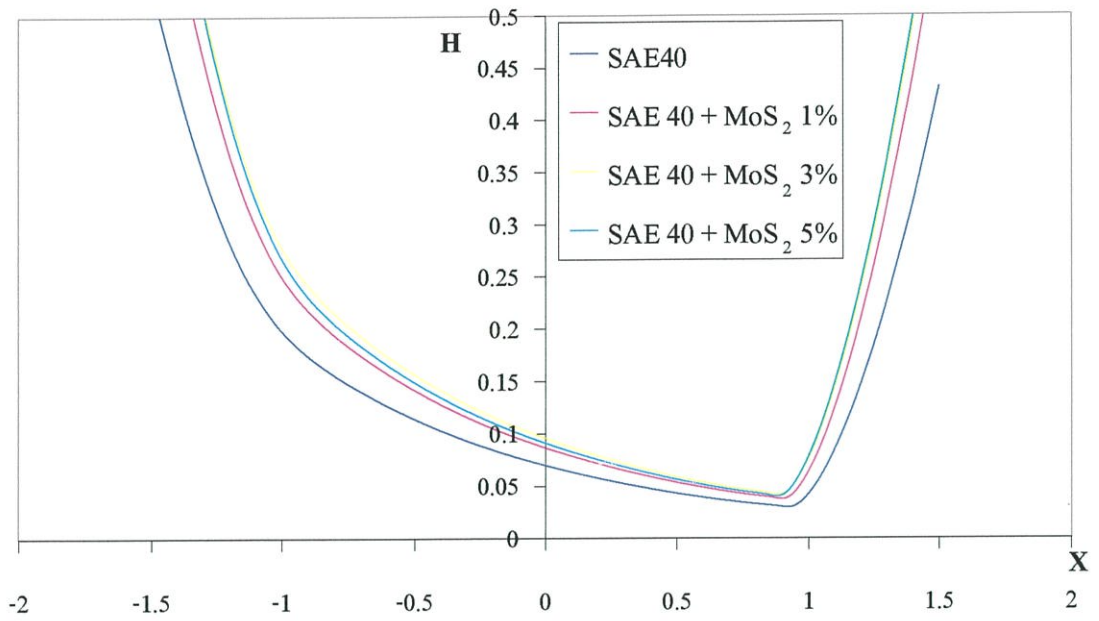
รูปที่ 6.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิดินัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



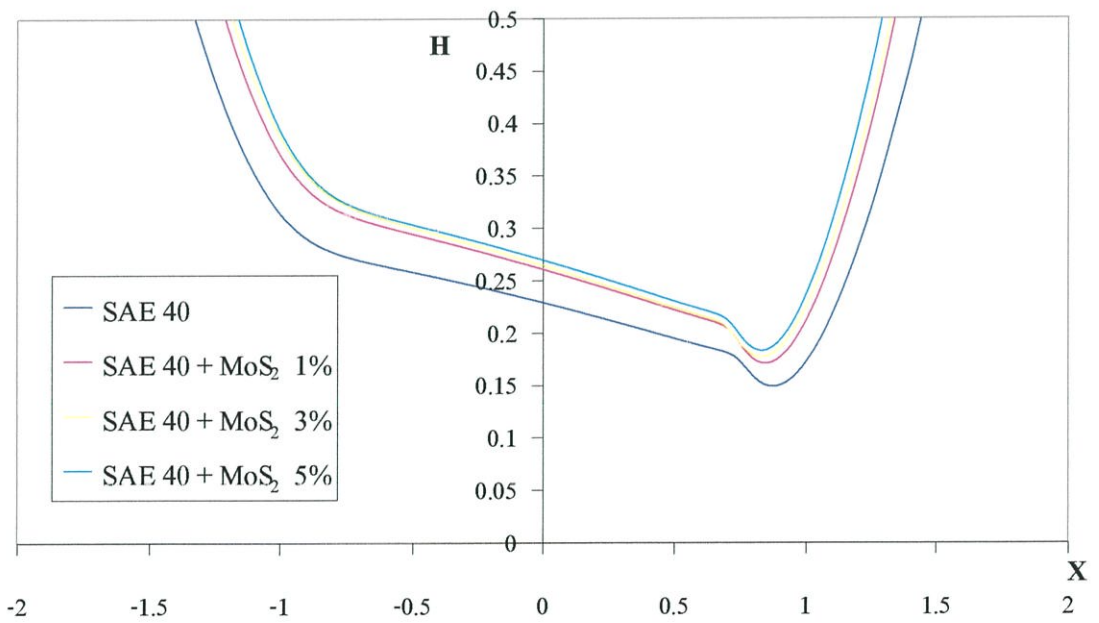
รูปที่ 6.15 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



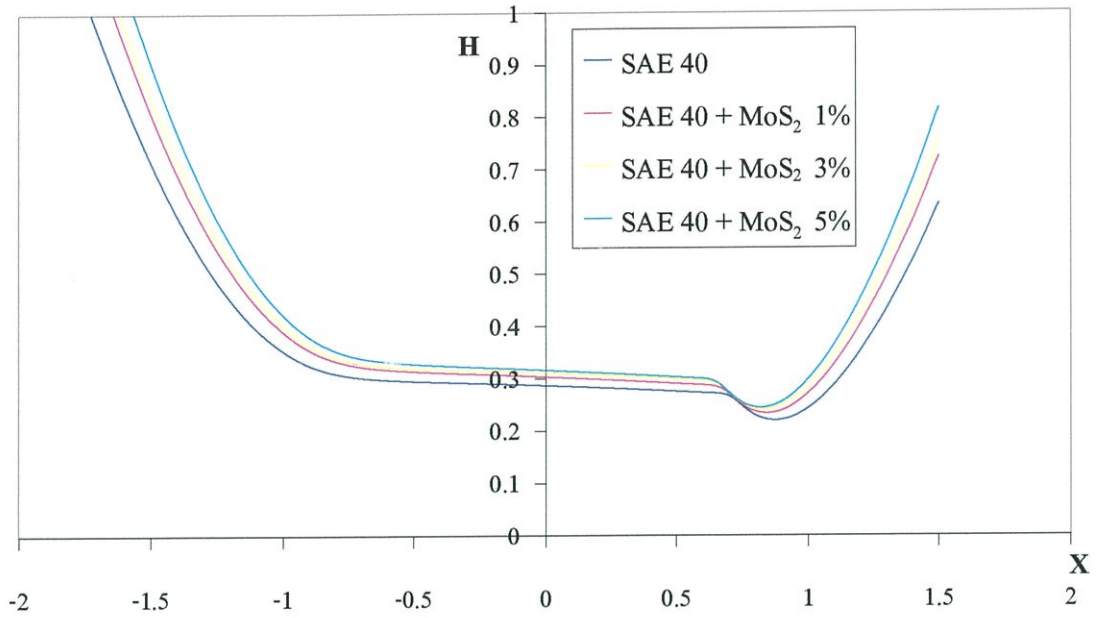
รูปที่ 6.16 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



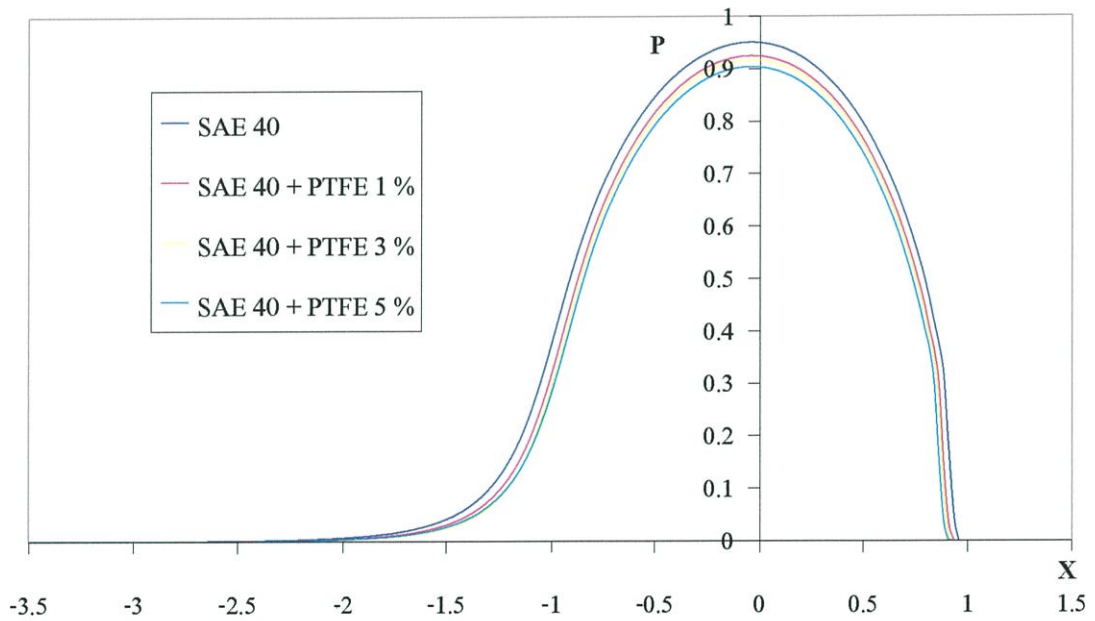
รูปที่ 6.17 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



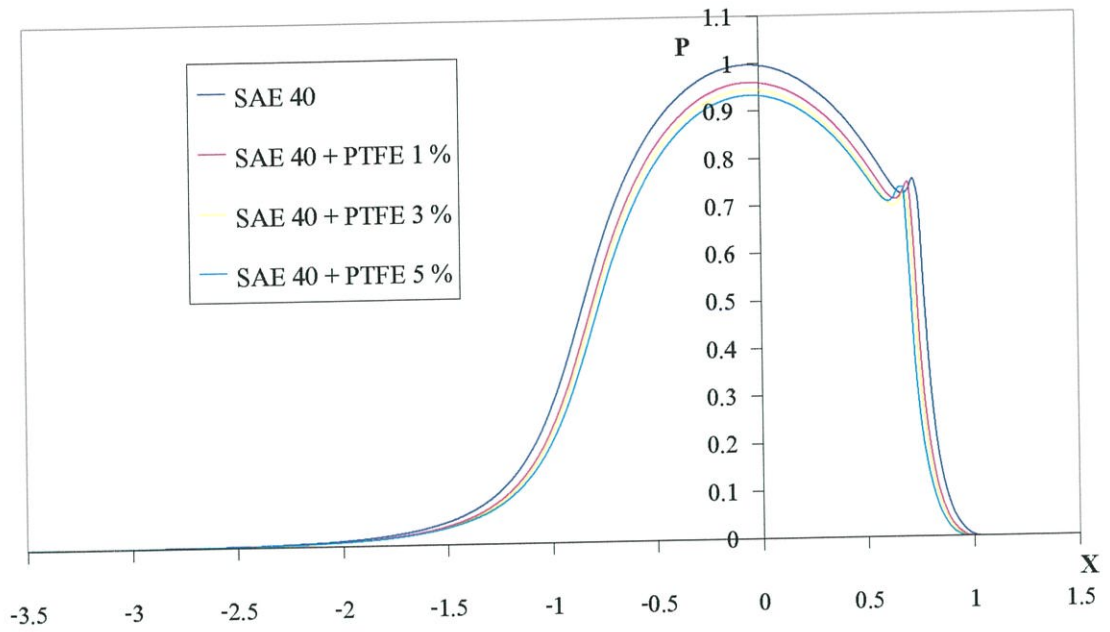
รูปที่ 6.18 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



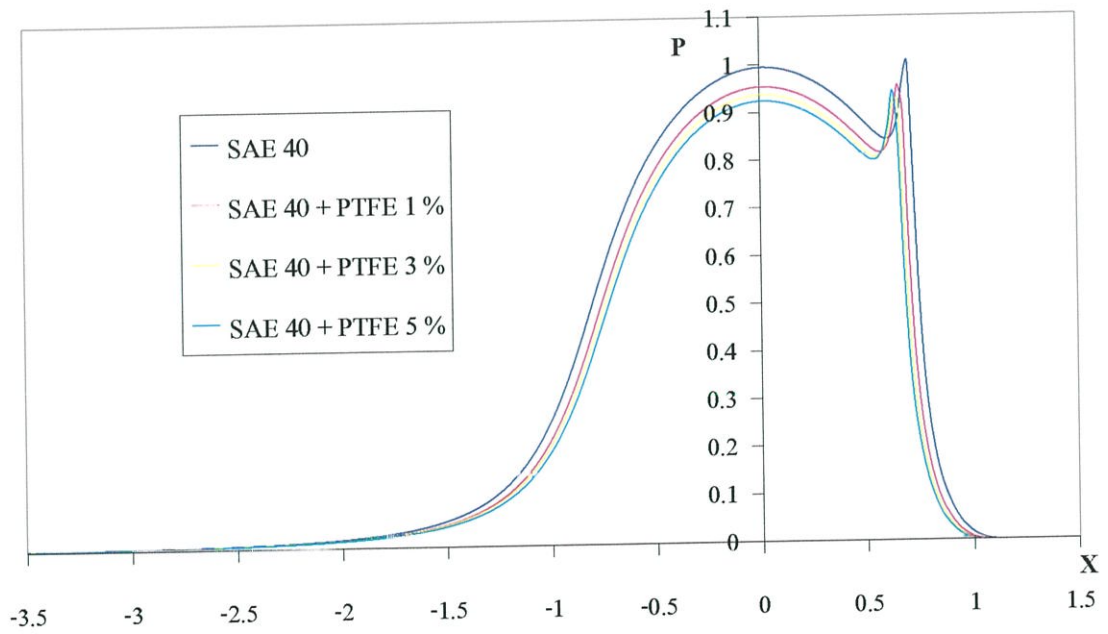
รูปที่ 6.19 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



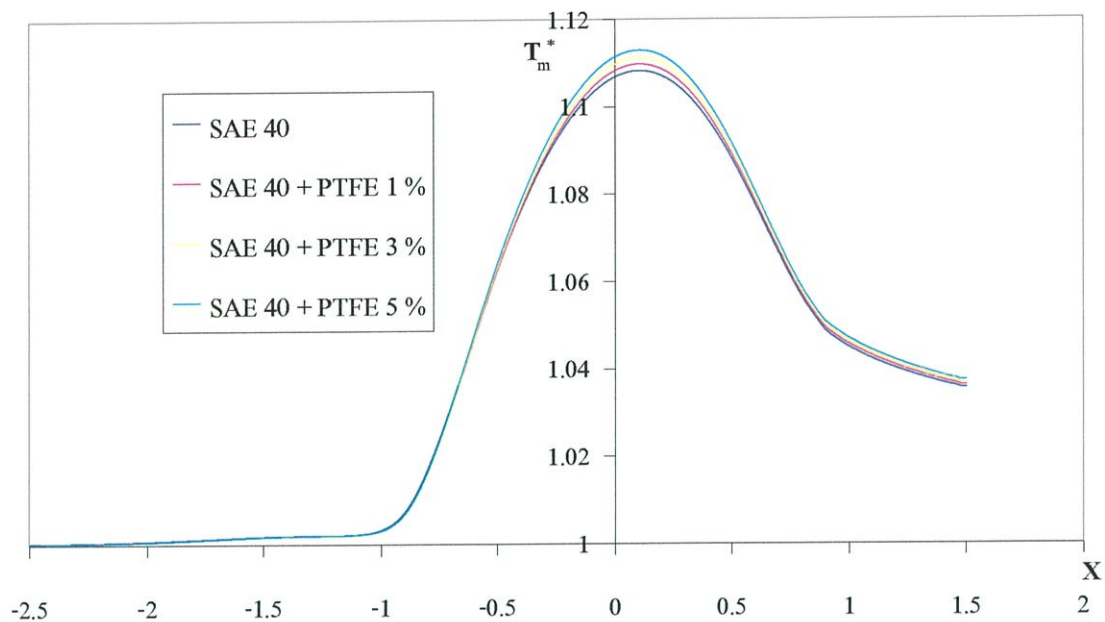
รูปที่ 6.20 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูออโรเอทเทอรีน
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



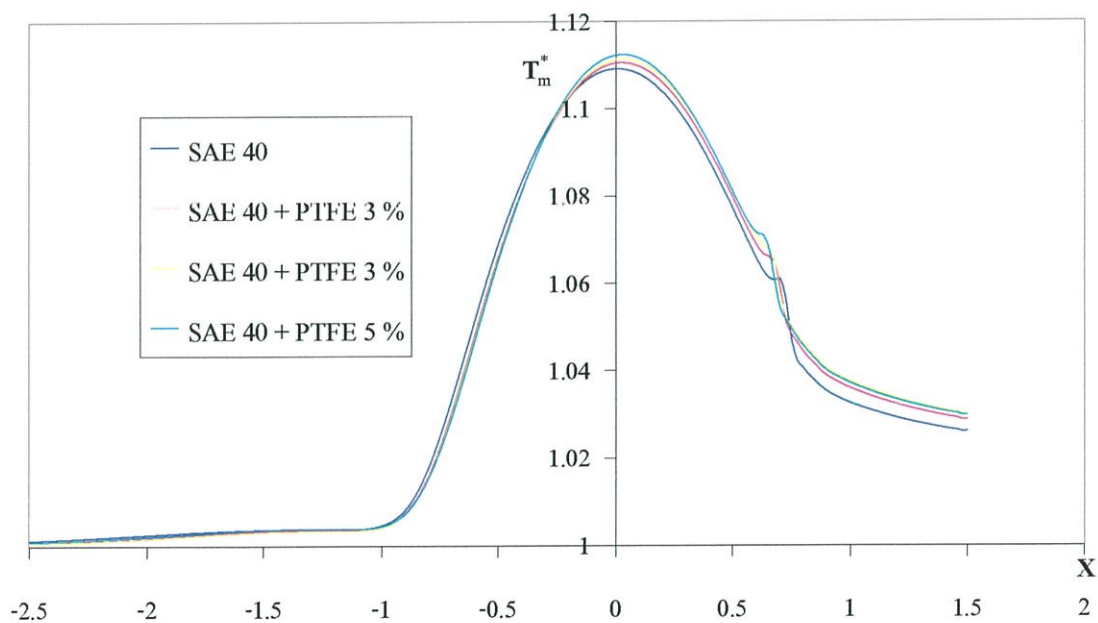
รูปที่ 6.21 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลใน ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



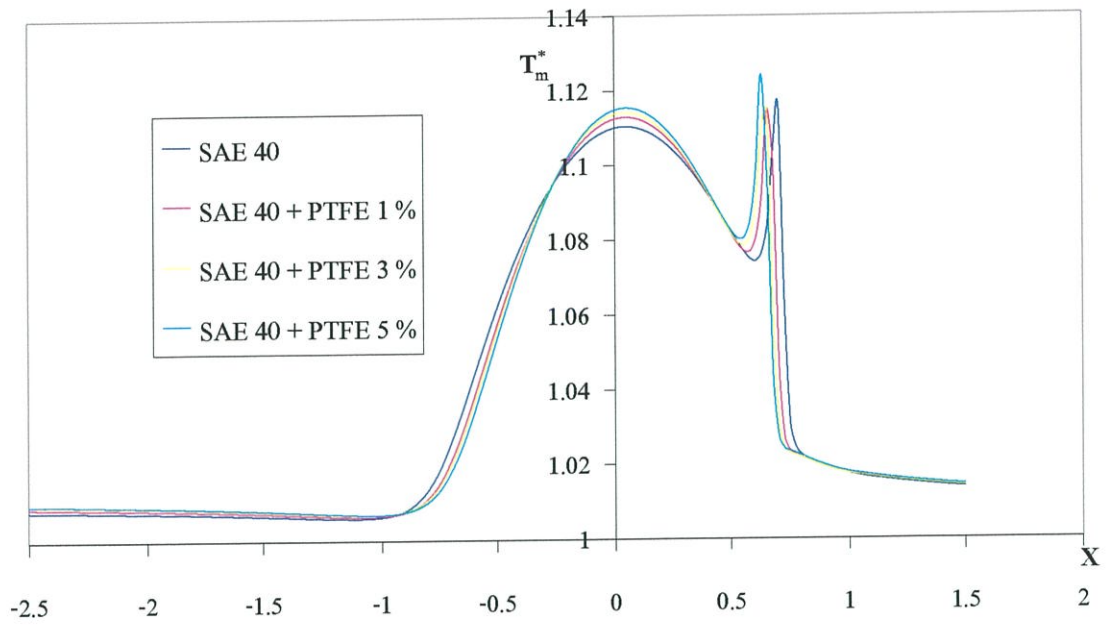
รูปที่ 6.22 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลใน ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



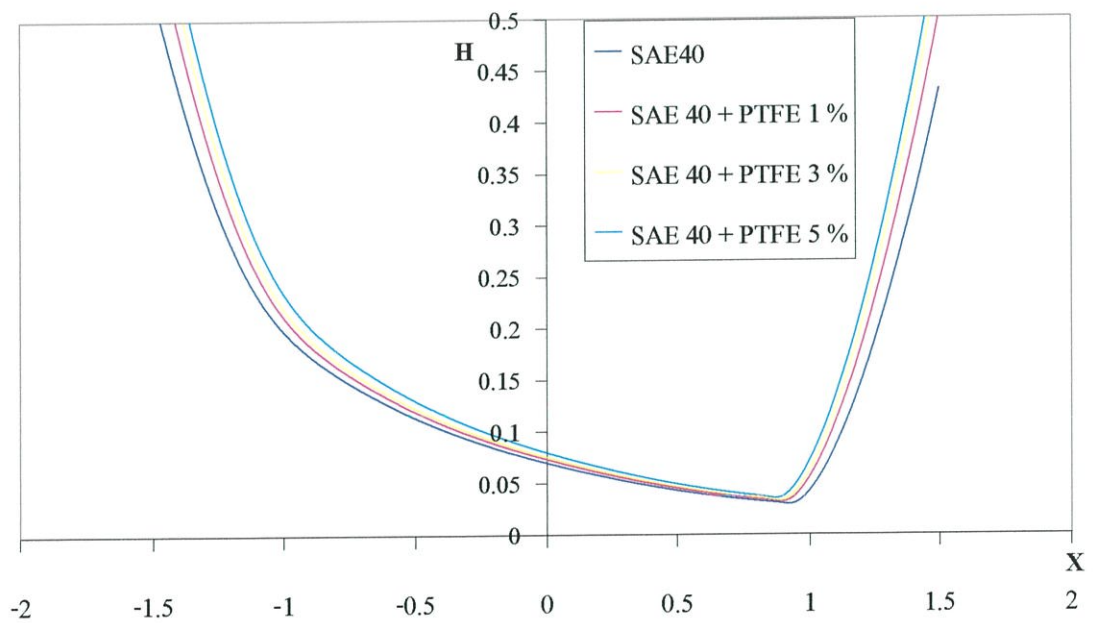
รูปที่ 6.23 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



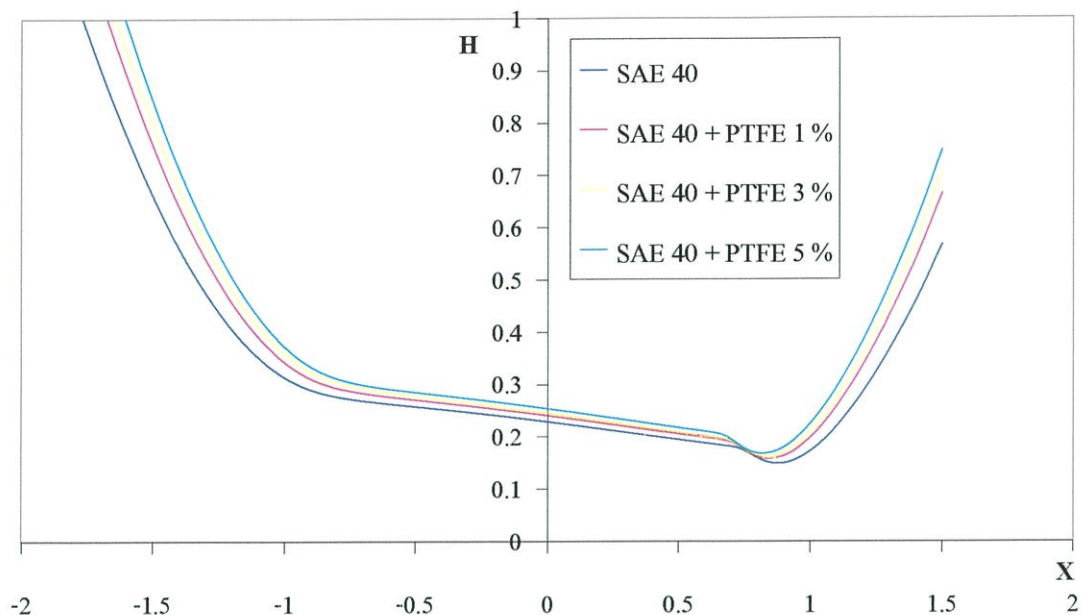
รูปที่ 6.24 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



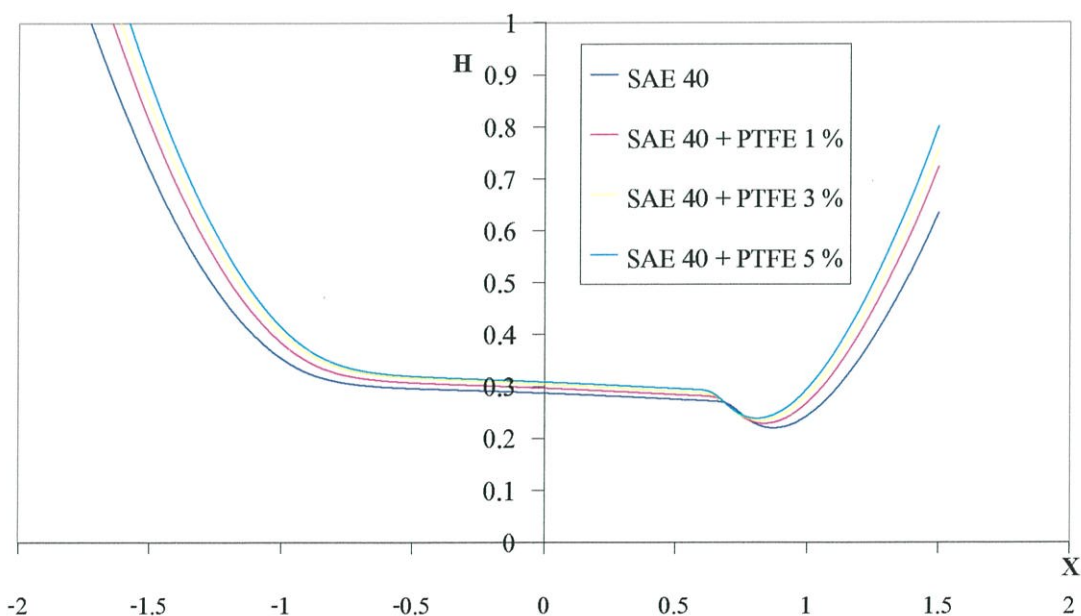
รูปที่ 6.25 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



รูปที่ 6.26 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



รูปที่ 6.27 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตที่ 3

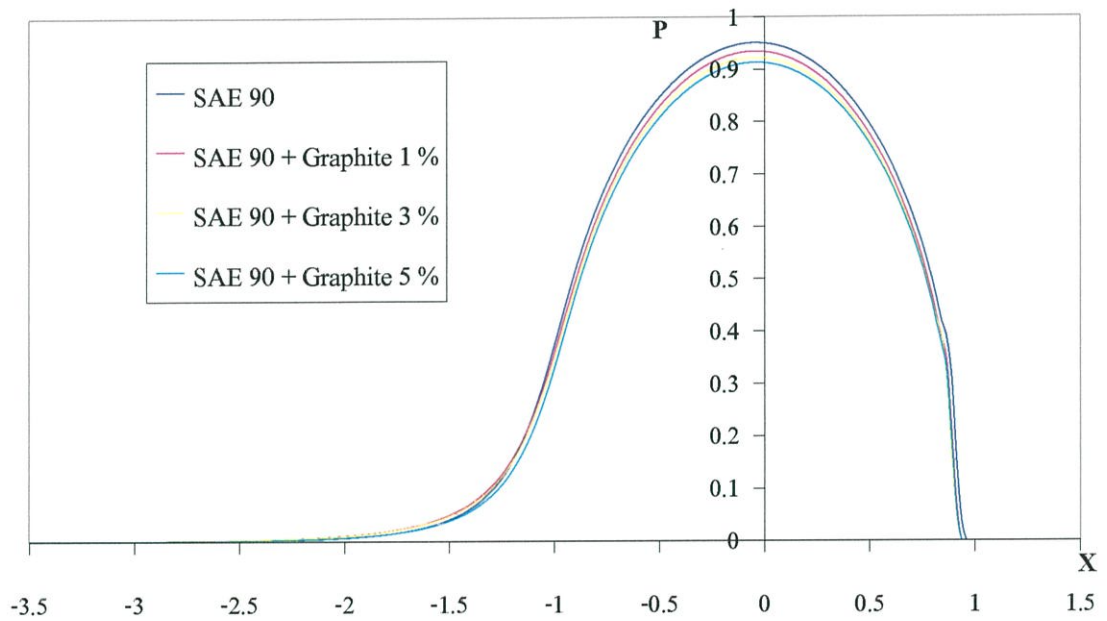


รูปที่ 6.28 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตที่ 5

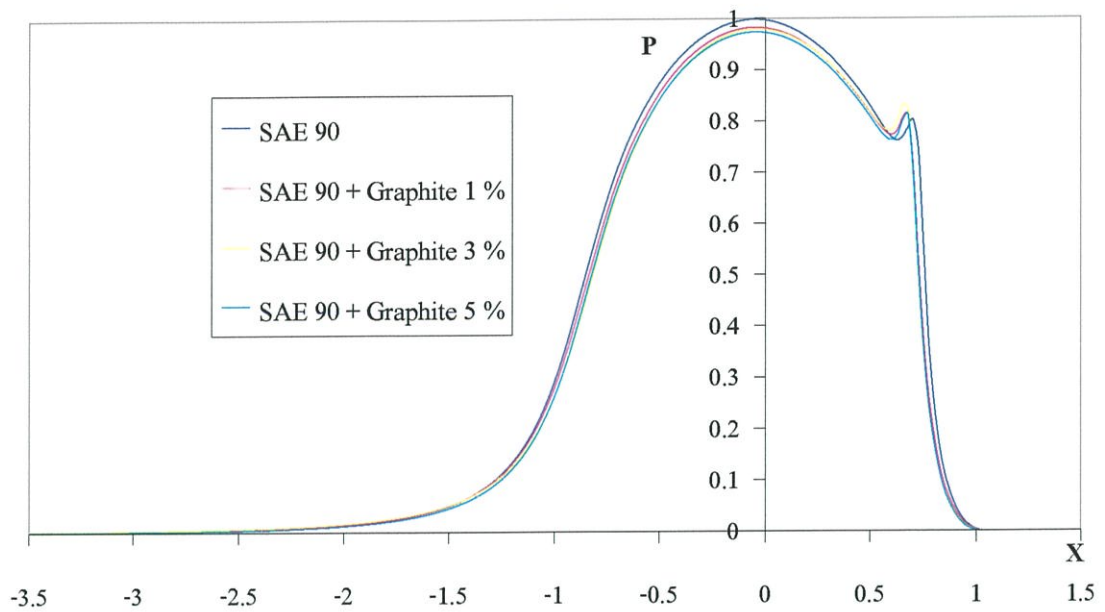
จากรูปที่ 6.29 ถึง 6.31, 6.38 ถึง 6.40 และ 6.47 ถึง 6.49 จะเห็นว่า การกระจายความดันของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีการกระจายความดันที่ต่ำกว่าที่ 1 % ,3% และที่น้ำมัน SAE 90 ล้วนๆ จะมีการกระจายความดันมากที่สุดเนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งจะเข้าไปช่วยรับภาระจึงทำให้การกระจายความดันที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดที่น้อยลง

จากรูปที่ 6.32 ถึง 6.34, 6.41 ถึง 6.43 และ 6.50 ถึง 6.52 จะเห็นว่าการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่าที่ 1 % , 3% และที่น้ำมัน SAE 90 ล้วนๆ เนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปจะไปเสียดสีกับผิวของลูกกลิ้งและแผ่นเลื่อนจึงทำให้การกระจายอุณหภูมิจึงสูงขึ้น

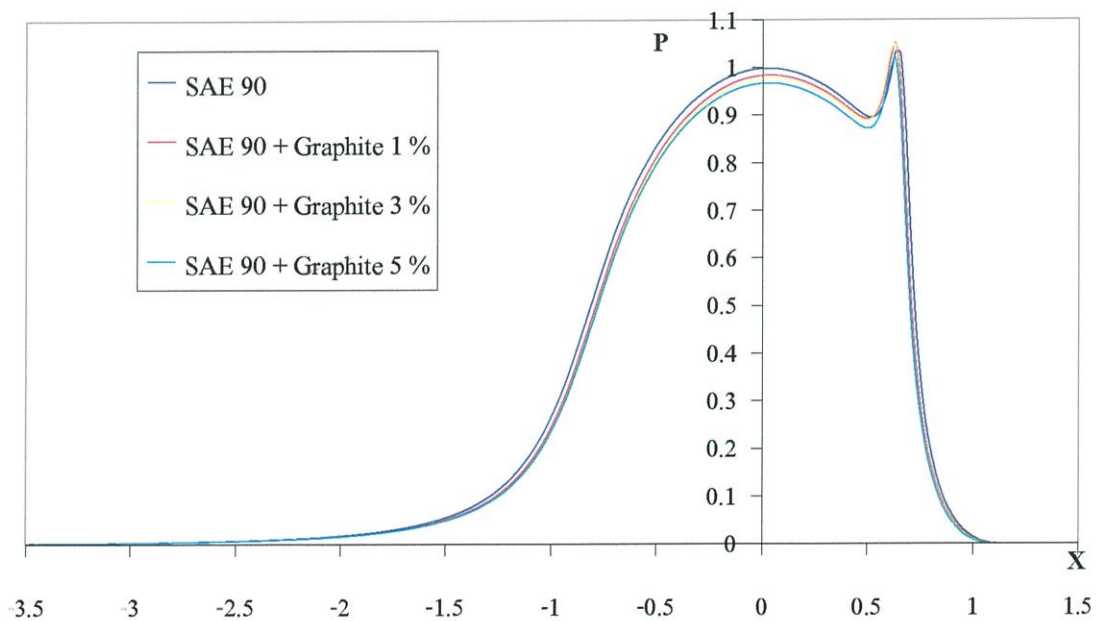
จากรูปที่ 6.35 ถึง 6.37, 6.44 ถึง 6.46 และ 6.53 ถึง 6.55 จะเห็นว่าความหนาฟิล์มของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีความหนาฟิล์มสูงกว่าที่ 1 % , 3% และที่น้ำมัน SAE 90 ล้วนๆ เนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปจะเข้าไปชั้นกลางอยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง



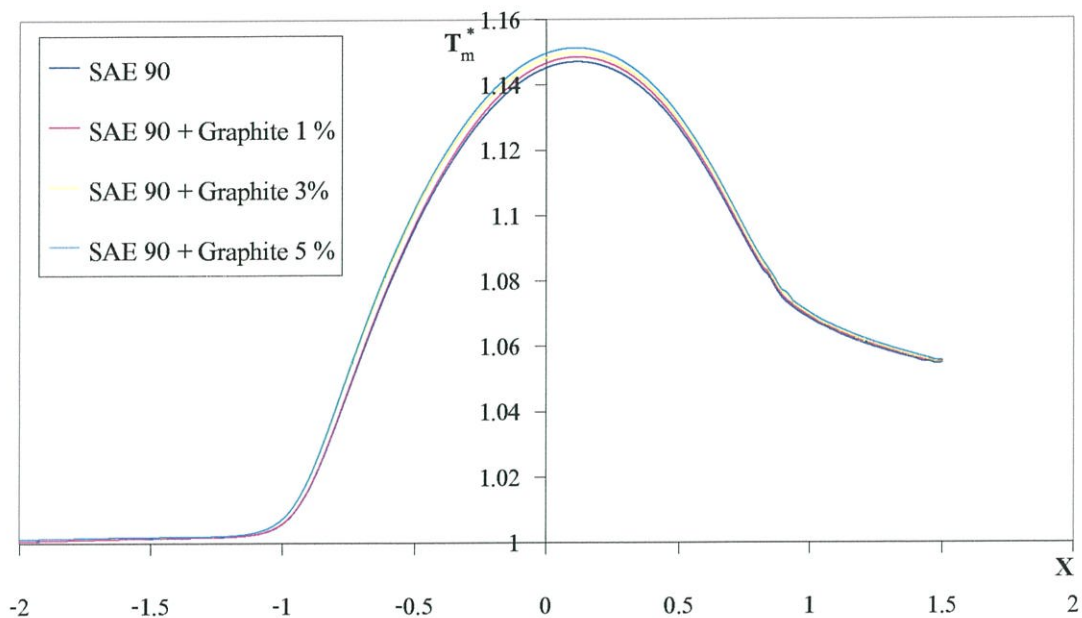
รูปที่ 6.29 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราฟไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตที่ 1



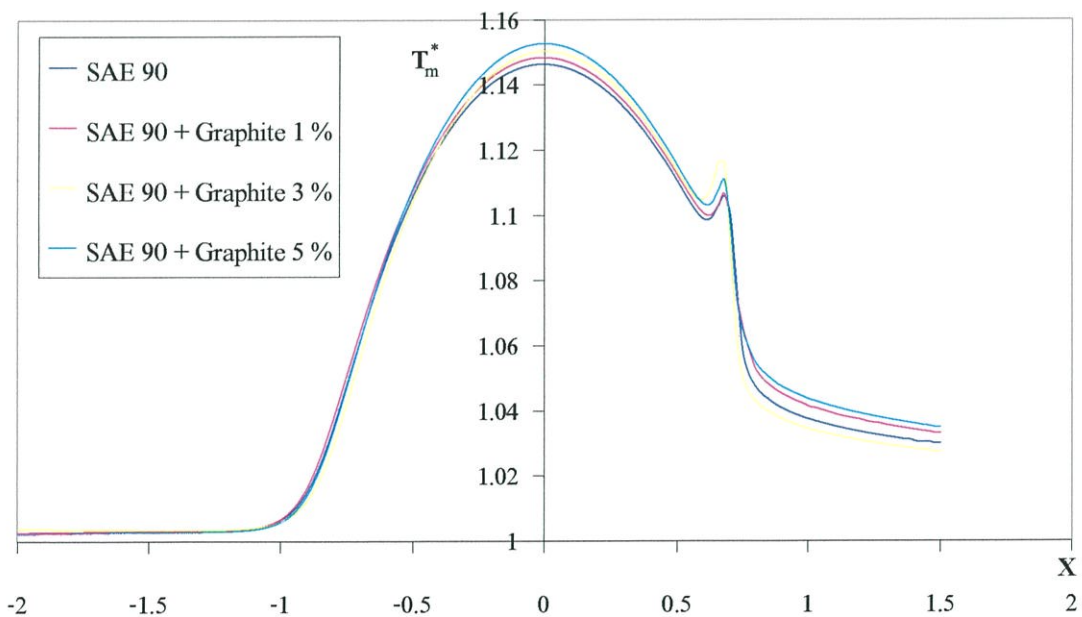
รูปที่ 6.30 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



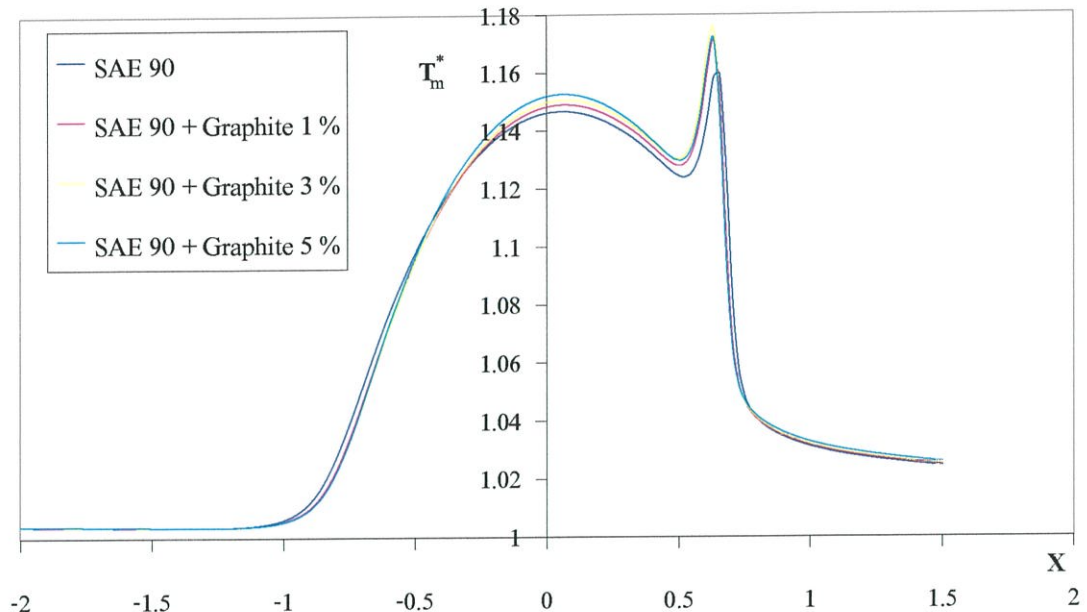
รูปที่ 6.31 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



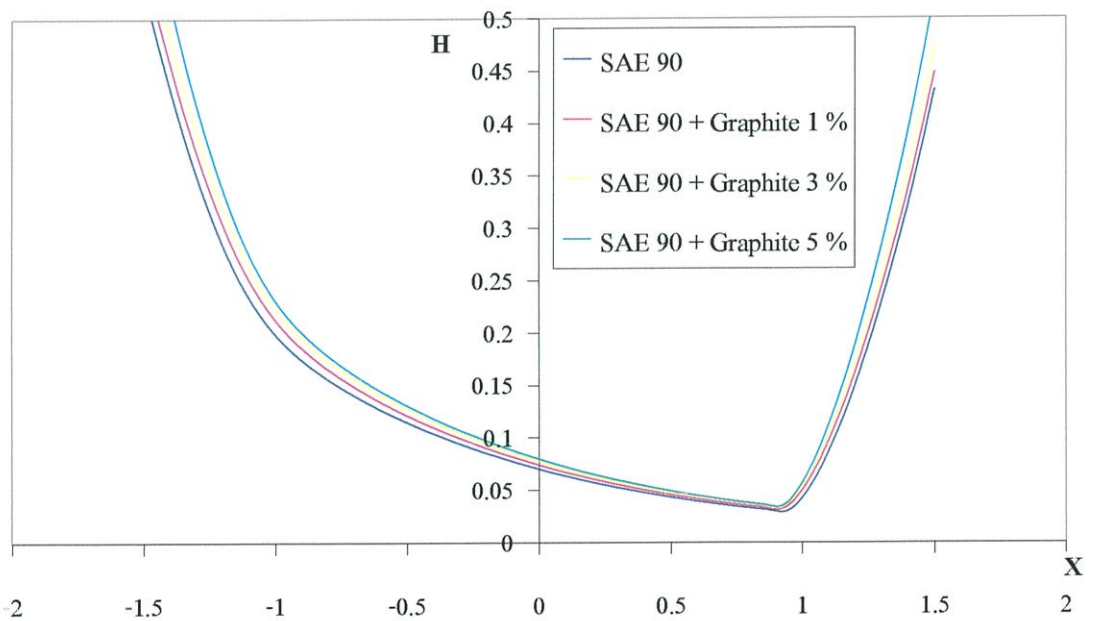
รูปที่ 6.32 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตที่ 1



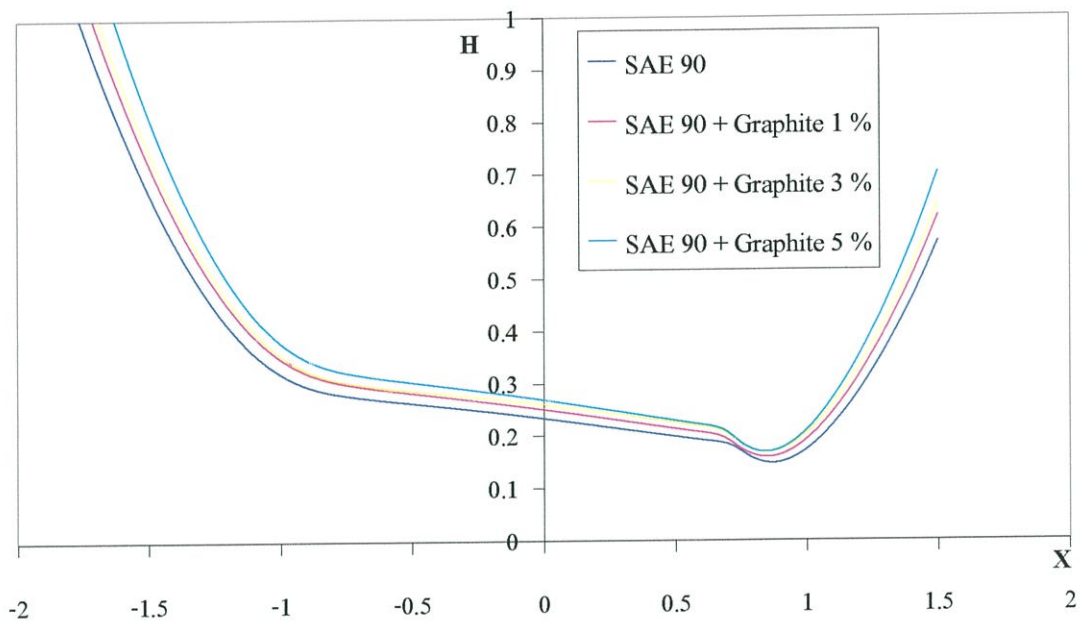
รูปที่ 6.33 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราฟิต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตที่ 3



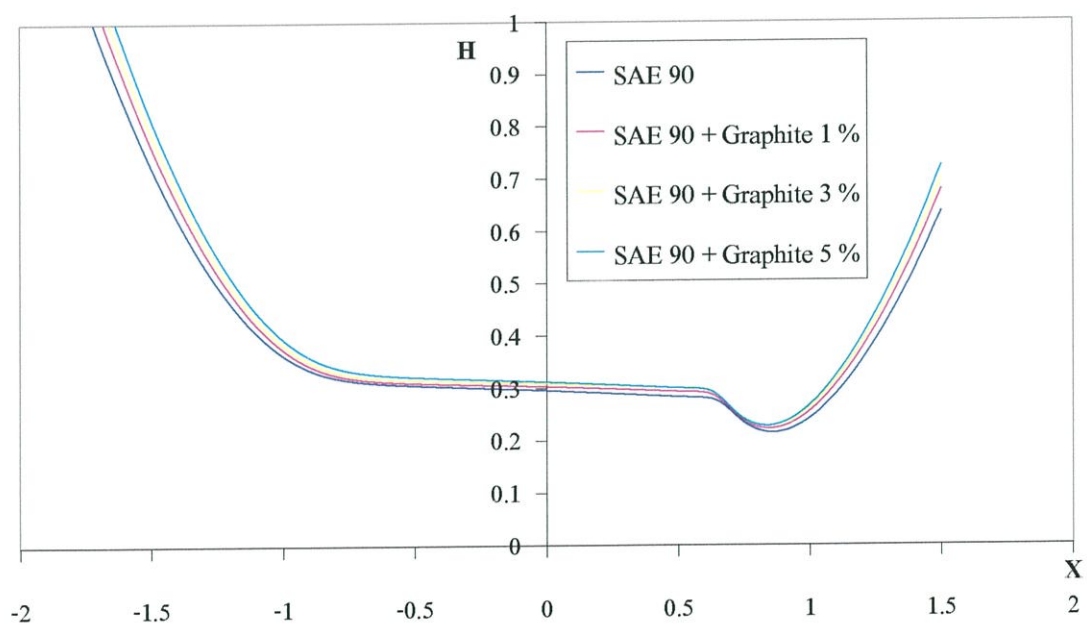
รูปที่ 6.34 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



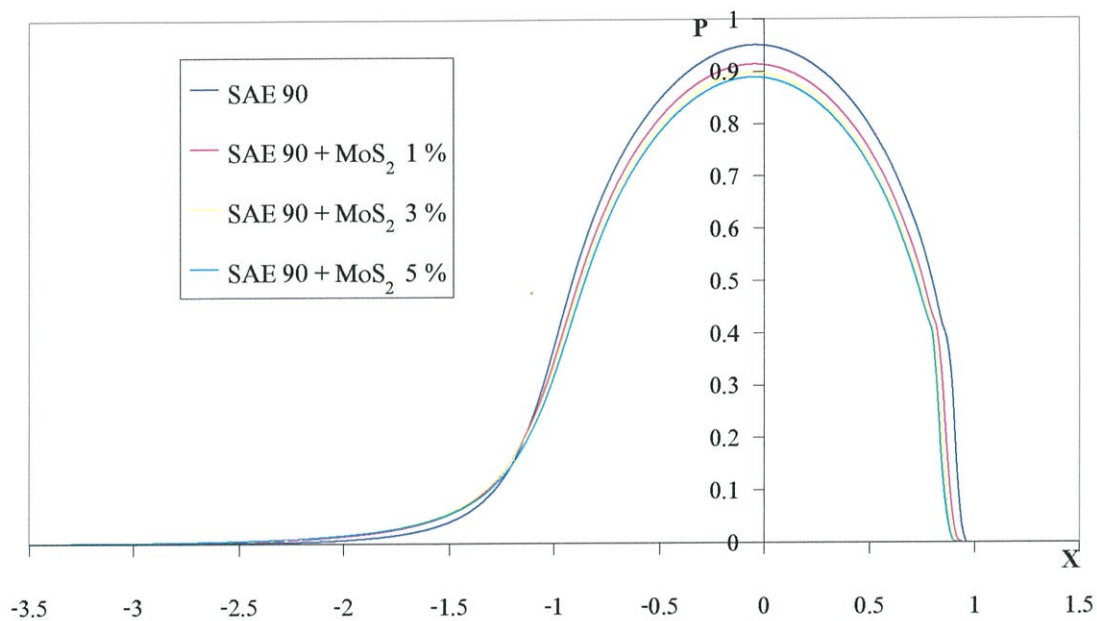
รูปที่ 6.35 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



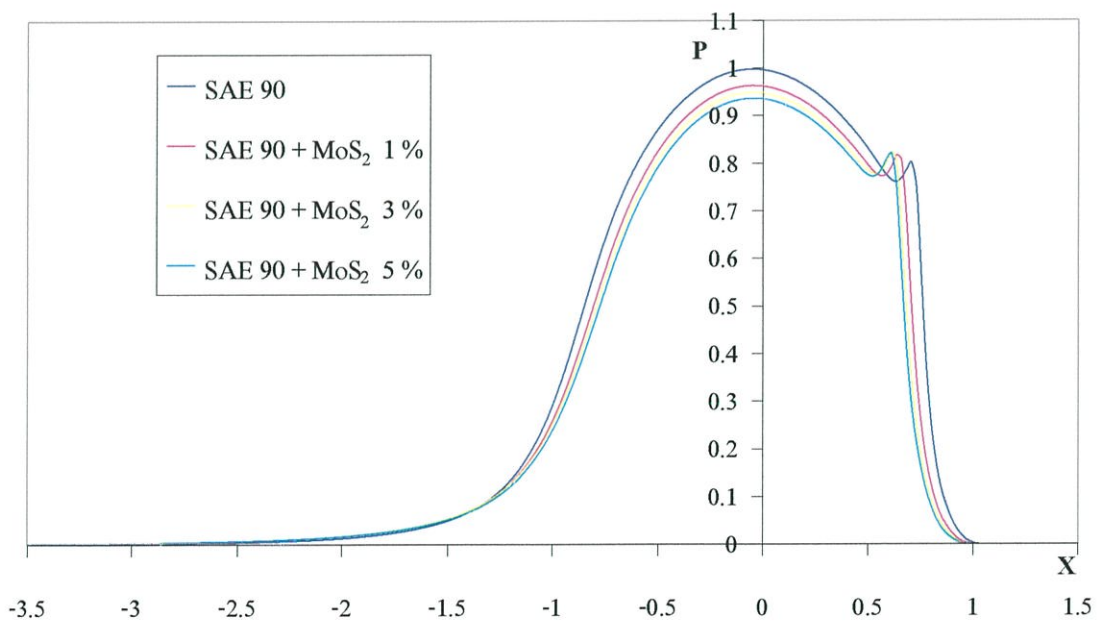
รูปที่ 6.36 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิตที่ 3



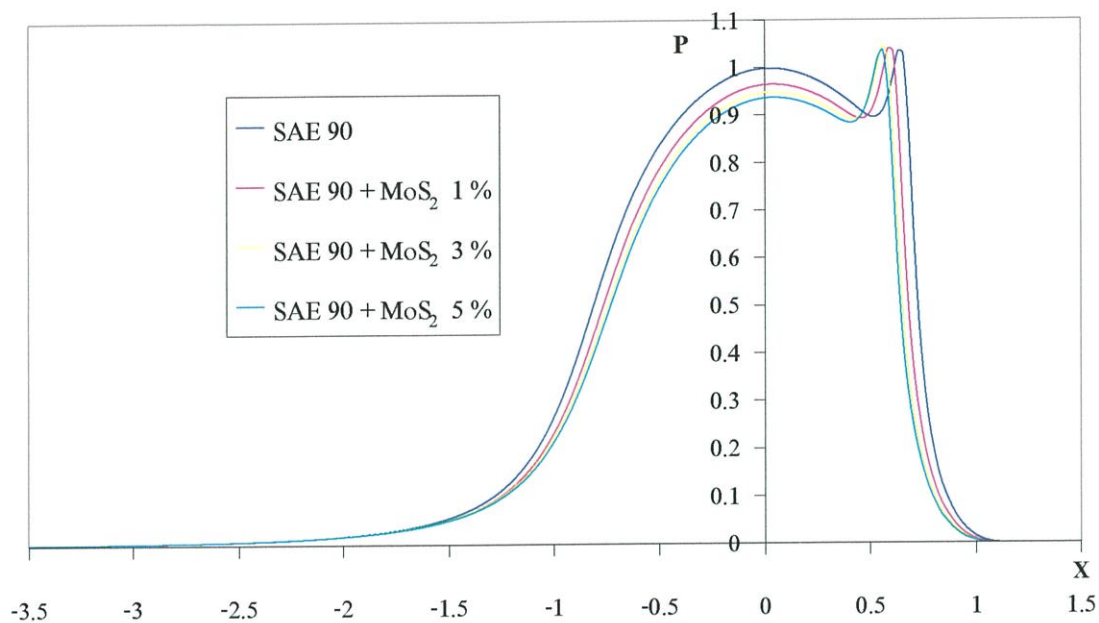
รูปที่ 6.37 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิตที่ 5



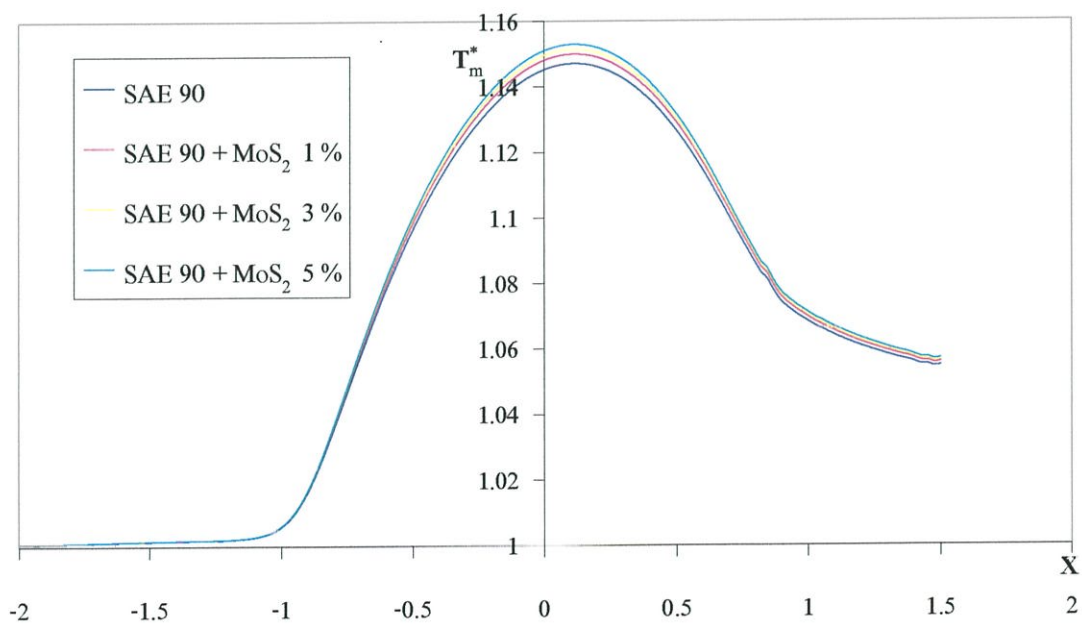
รูปที่ 6.38 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



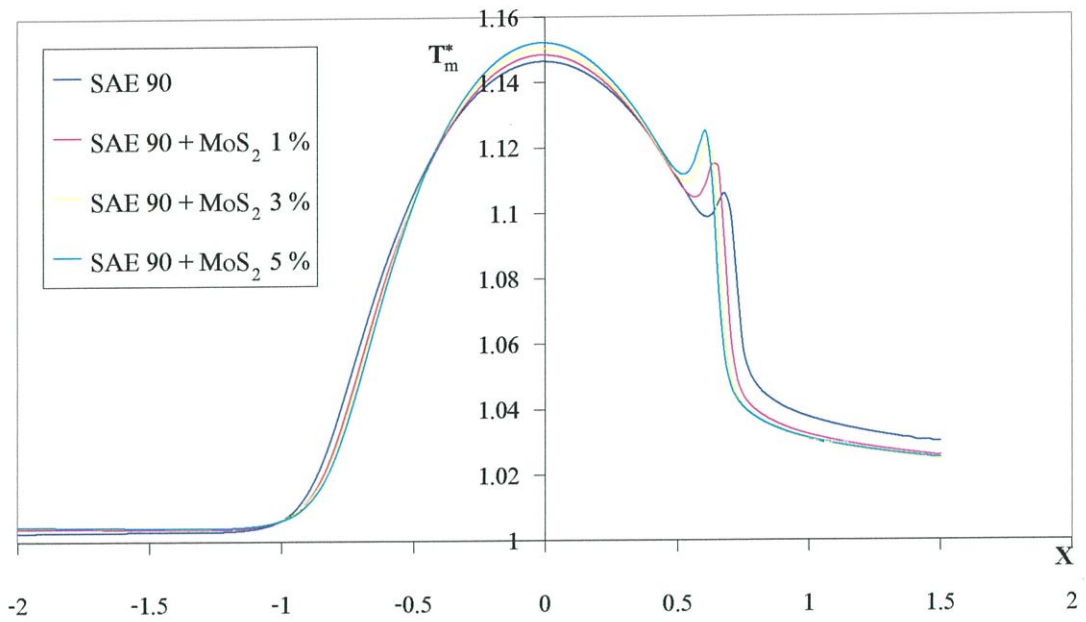
รูปที่ 6.39 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



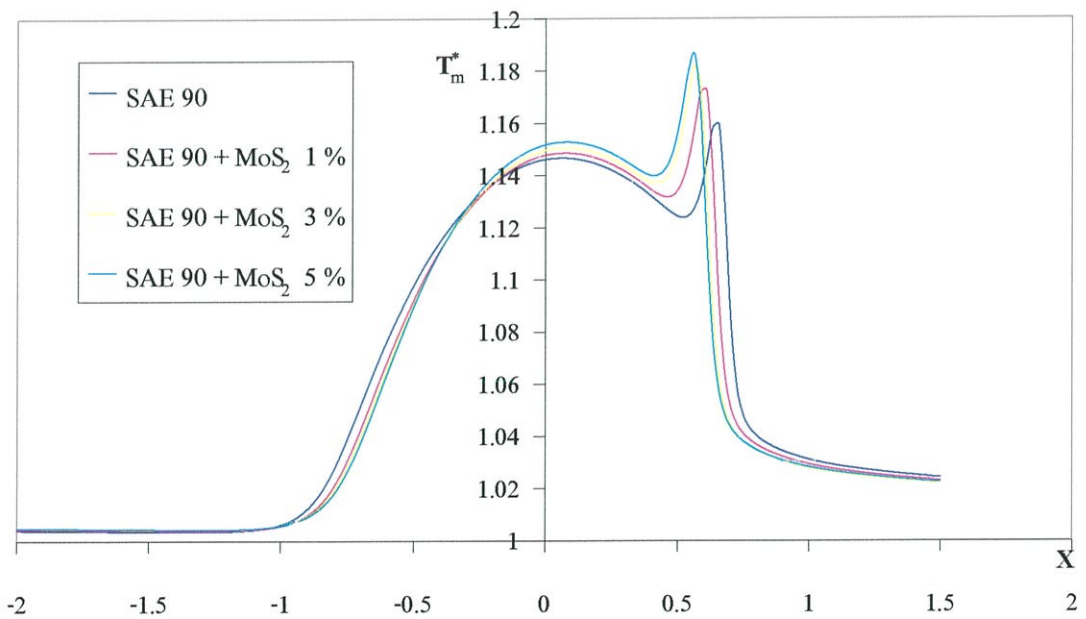
รูปที่ 6.40 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



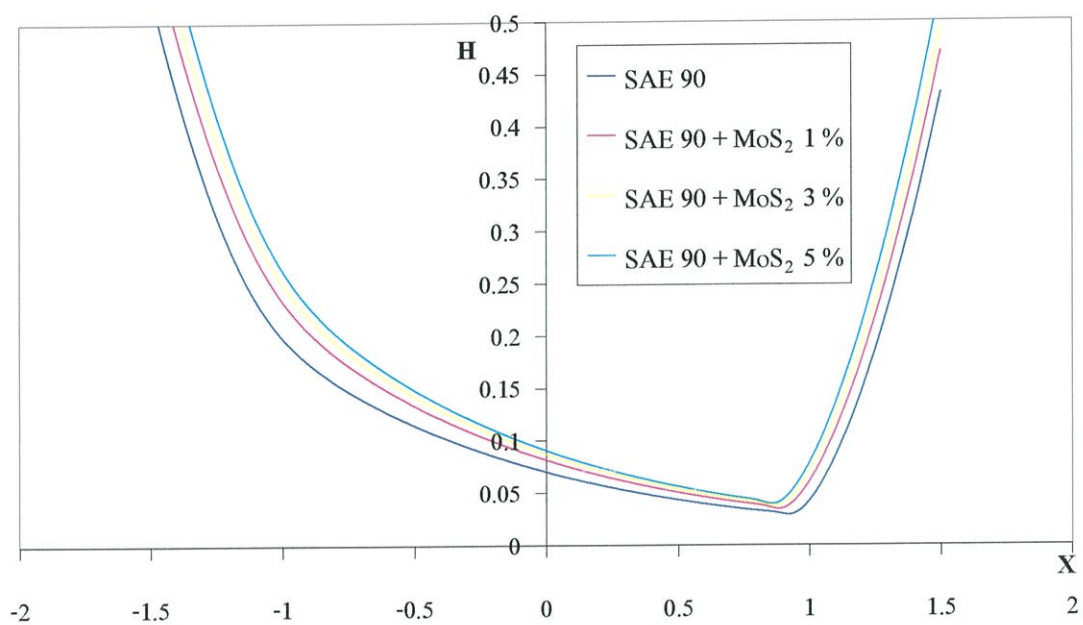
รูปที่ 6.41 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



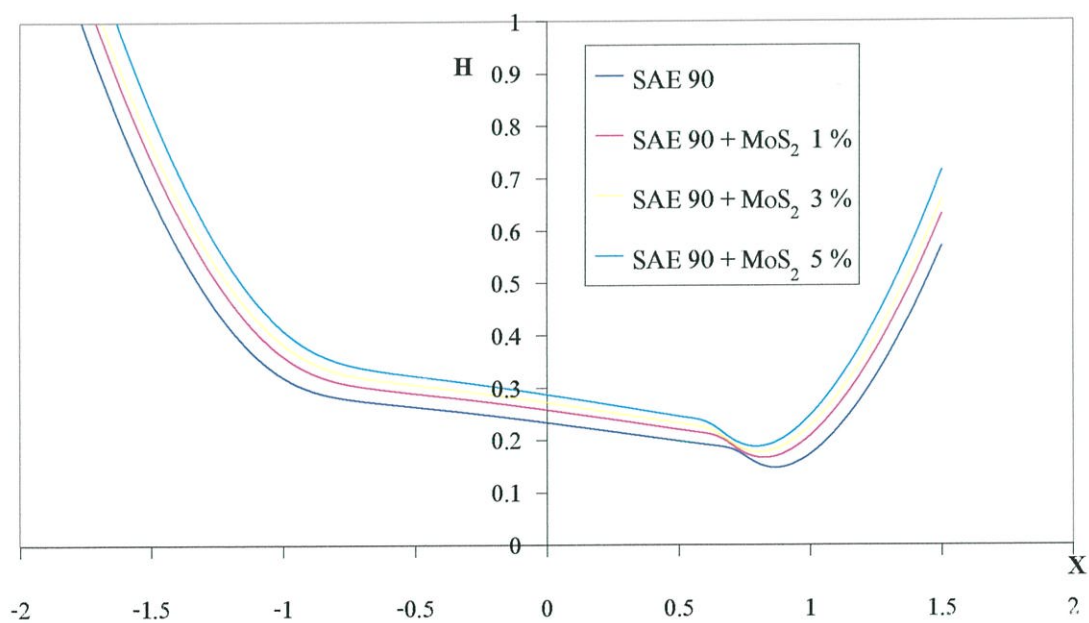
รูปที่ 6.42 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



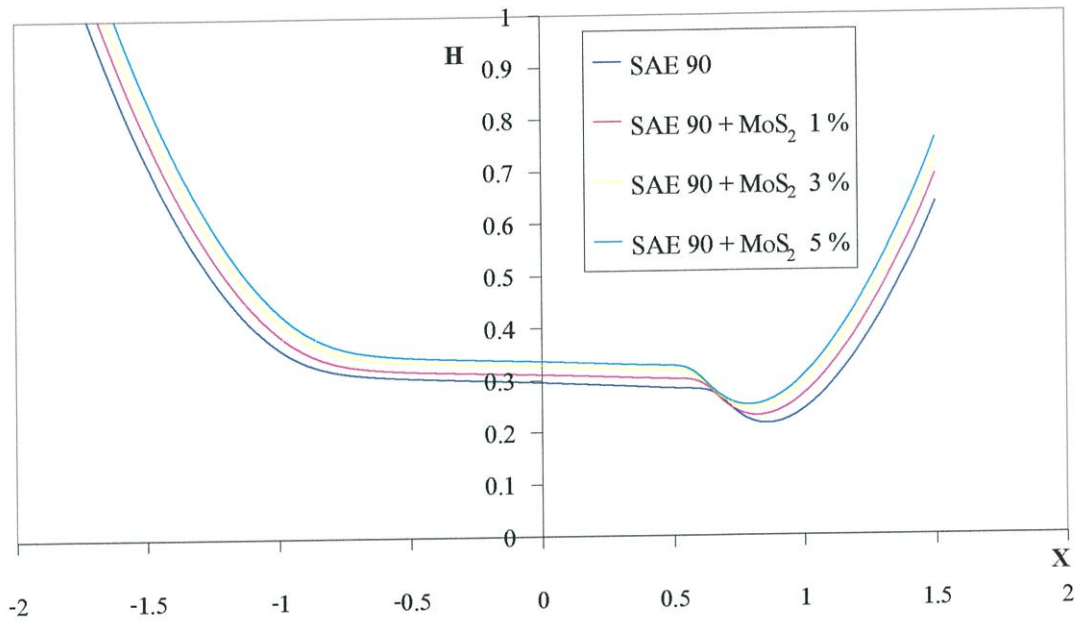
รูปที่ 6.43 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



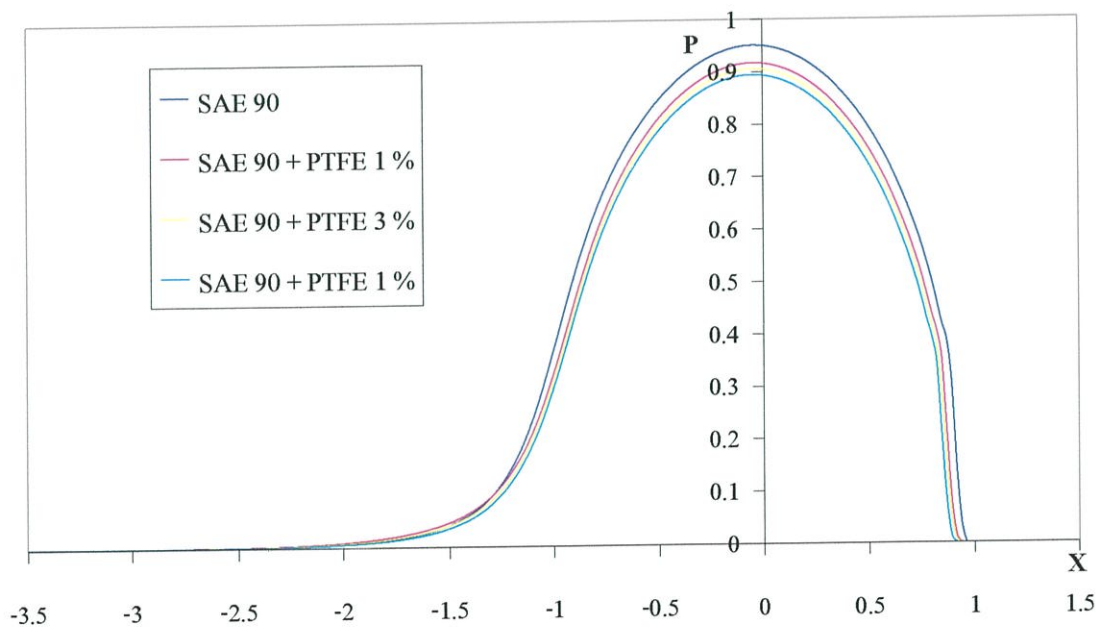
รูปที่ 6.44 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



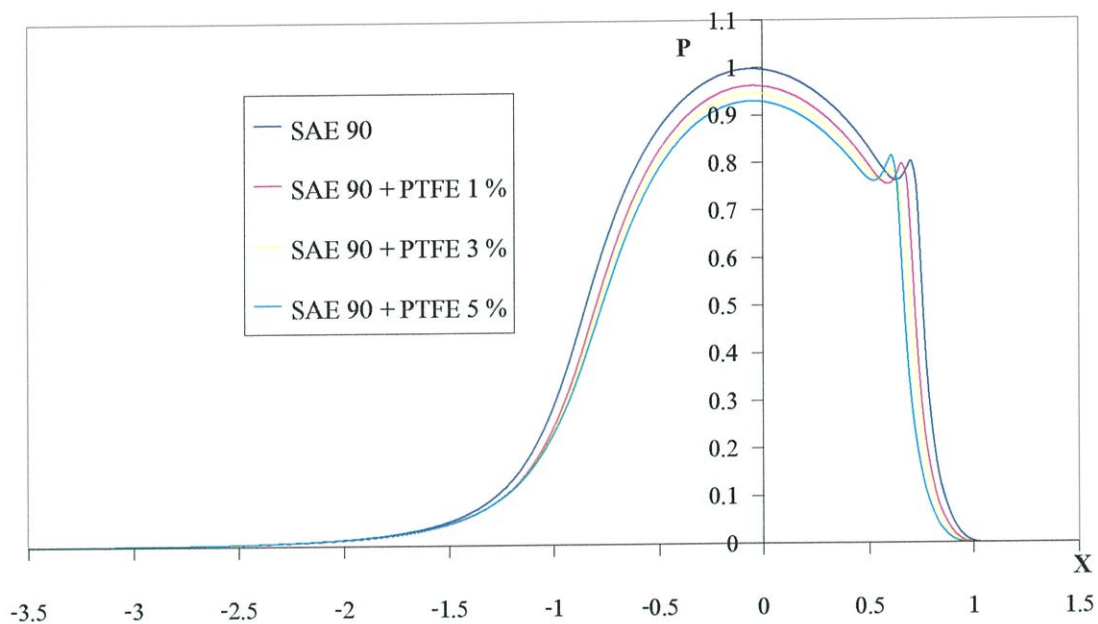
รูปที่ 6.45 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



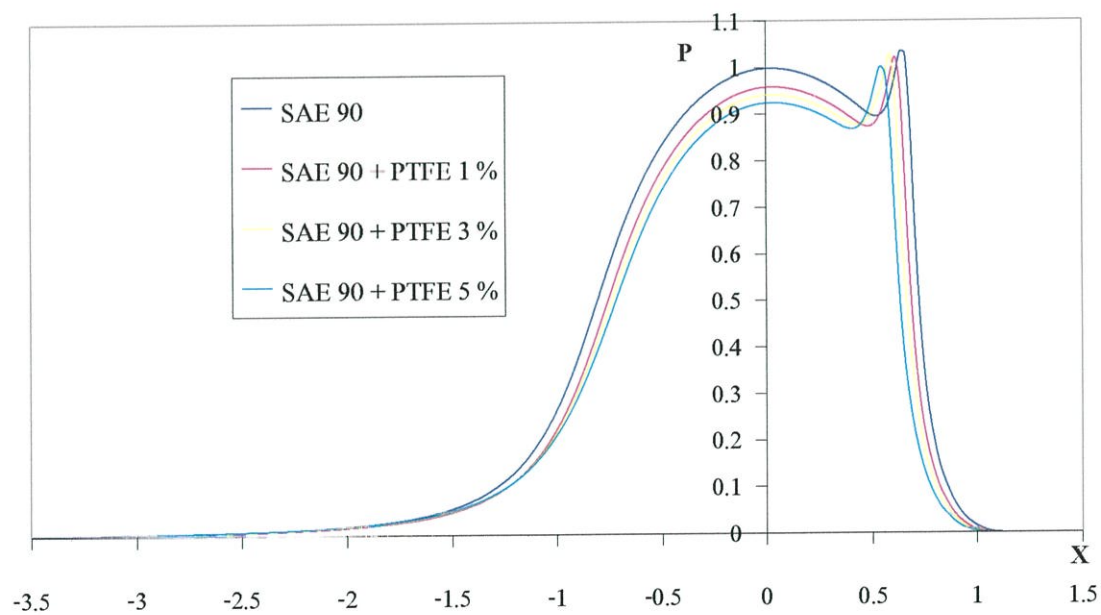
รูปที่ 6.46 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดซไฟด์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



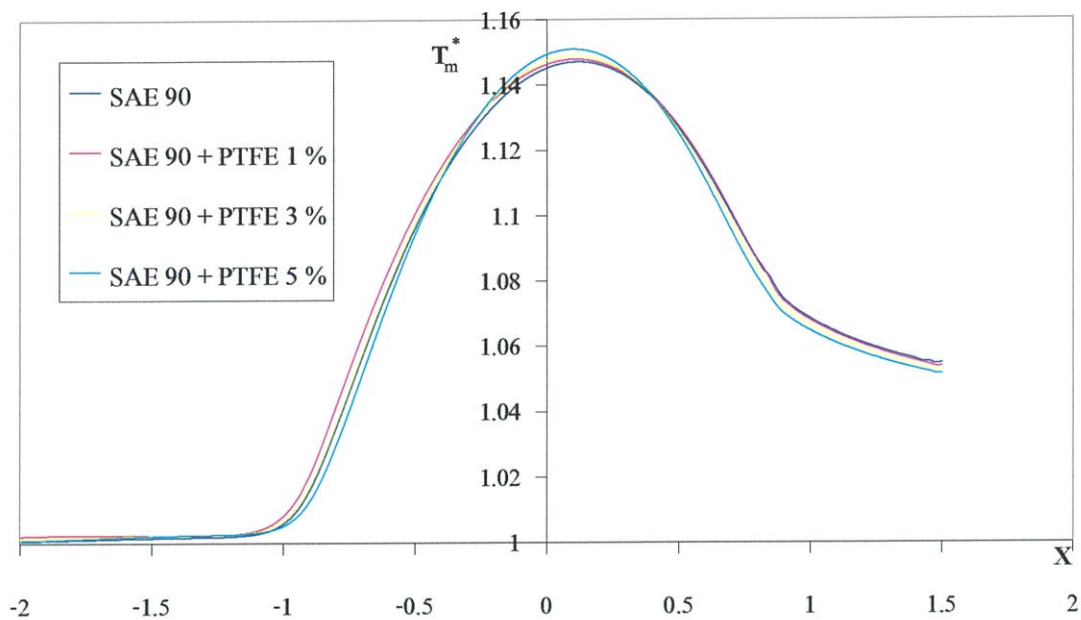
รูปที่ 6.47 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



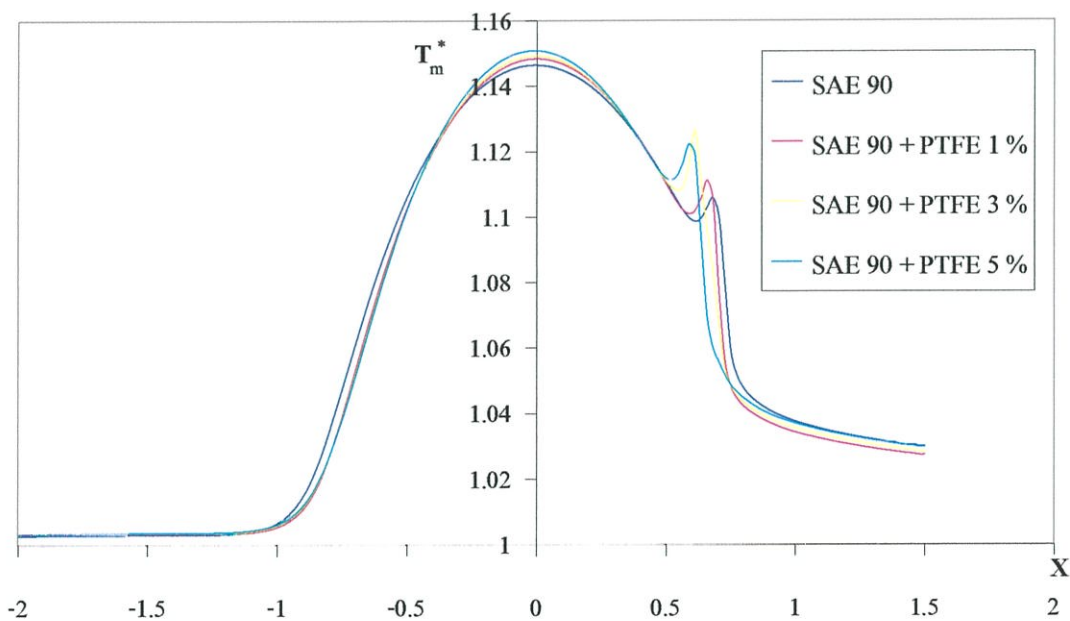
รูปที่ 6.48 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลใน ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



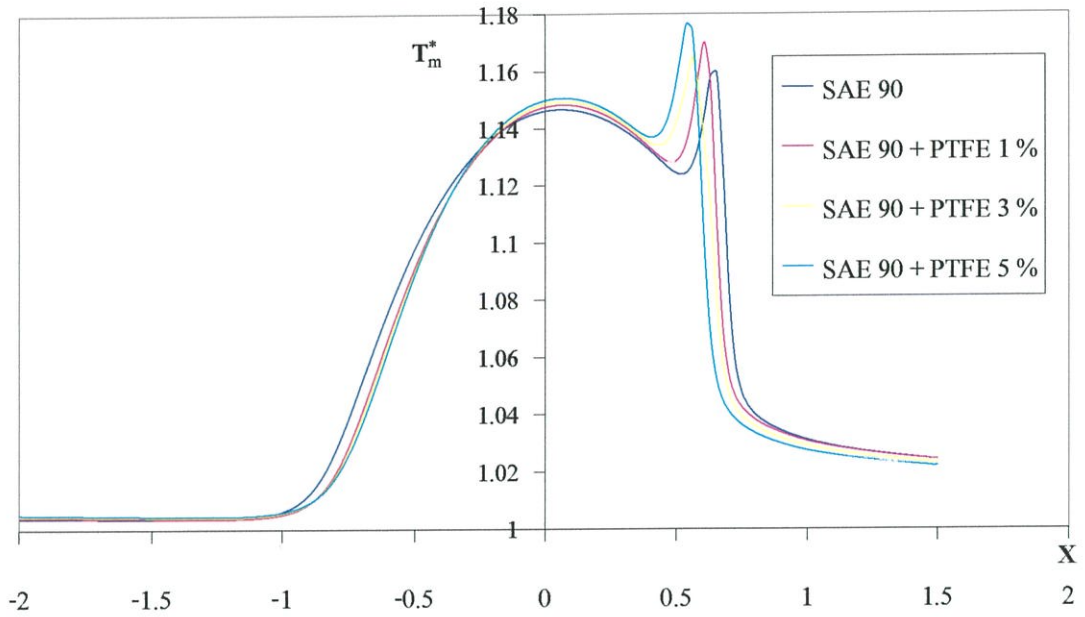
รูปที่ 6.49 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลใน ความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



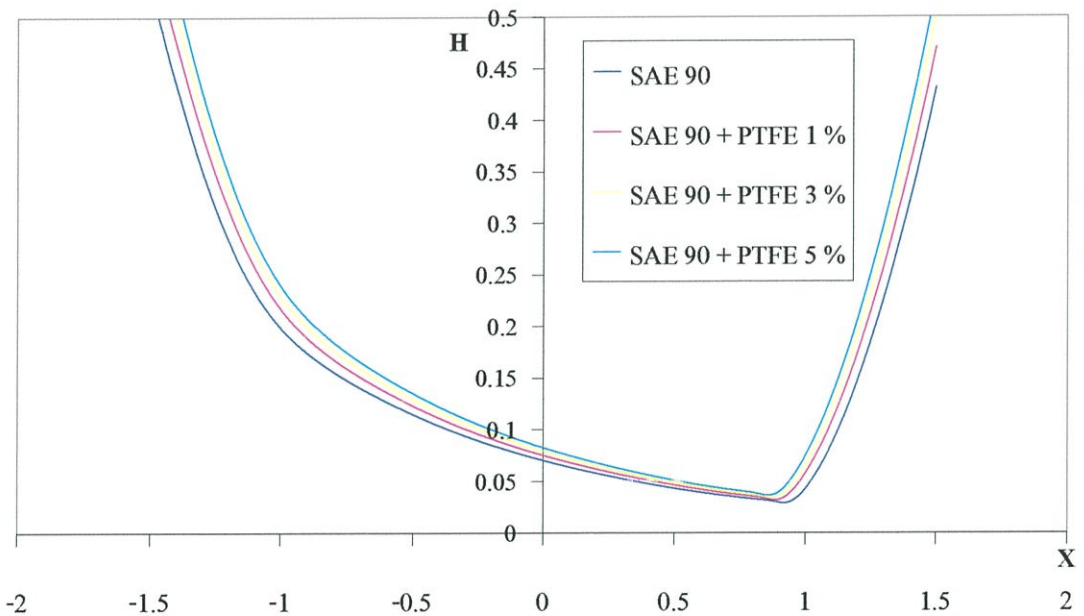
รูปที่ 6.50 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมพอลิเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



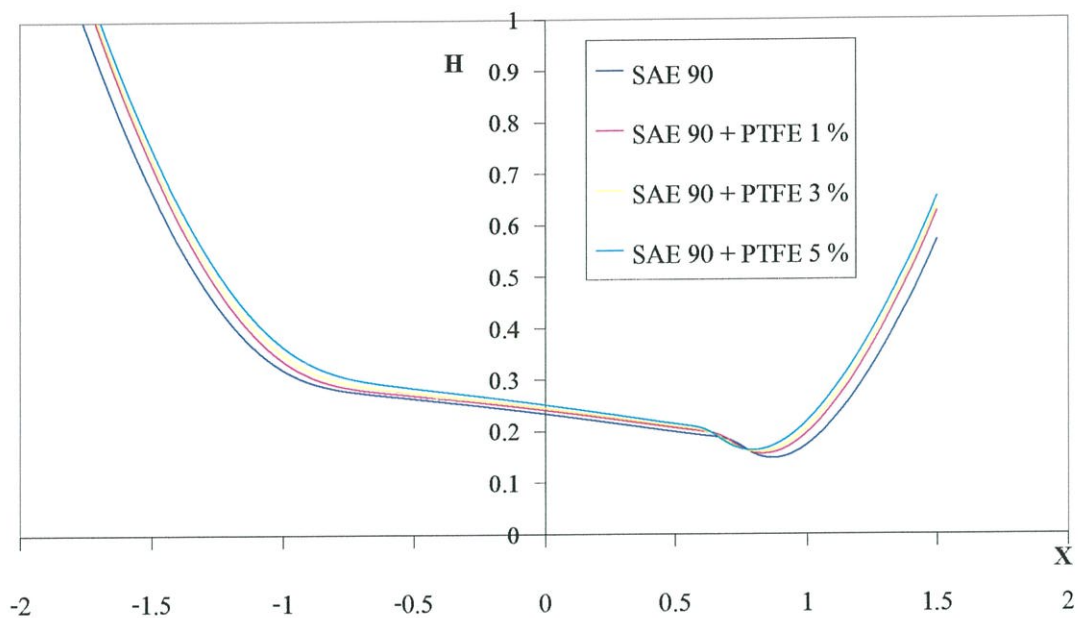
รูปที่ 6.51 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมพอลิเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



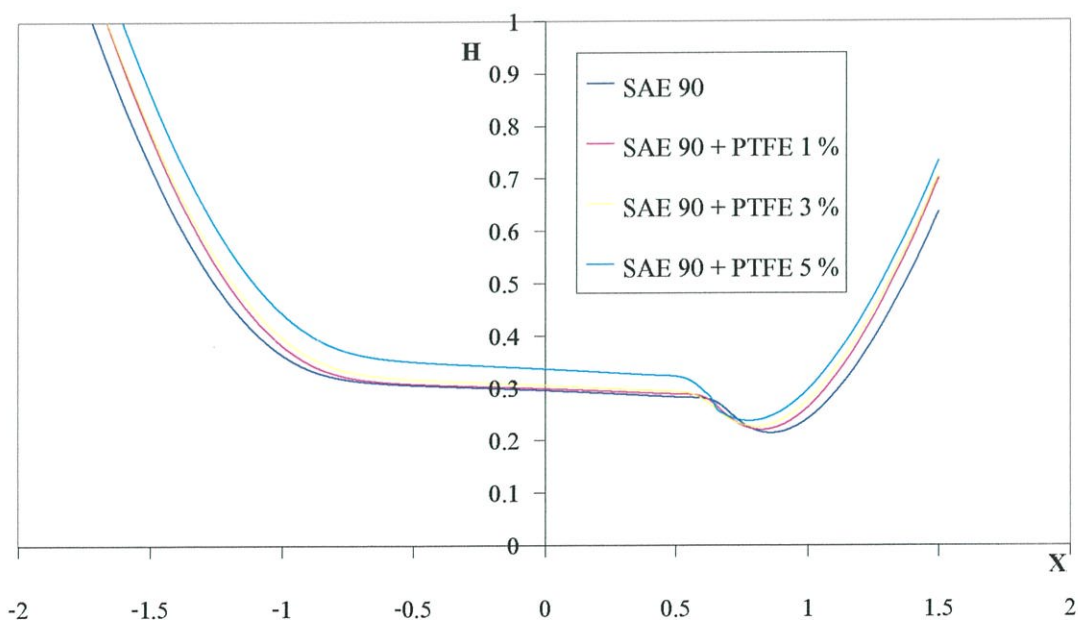
รูปที่ 6.52 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



รูปที่ 6.53 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



รูปที่ 6.54 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตราฟลูออโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



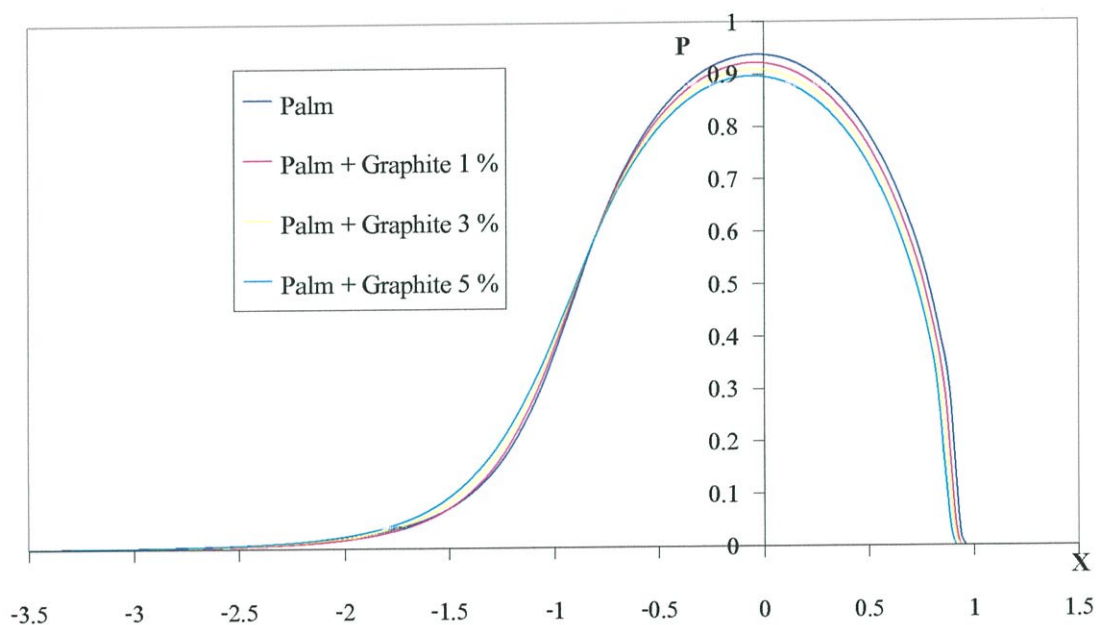
รูปที่ 6.55 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตราฟลูออโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5

จากรูปที่ 6.56 ถึง 6.58, 6.65 ถึง 6.67 และ 6.74 ถึง 6.76 จะเห็นว่า การกระจายความดันของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5% จะมีการกระจายความดันที่ต่ำกว่าที่ 1%, 3%

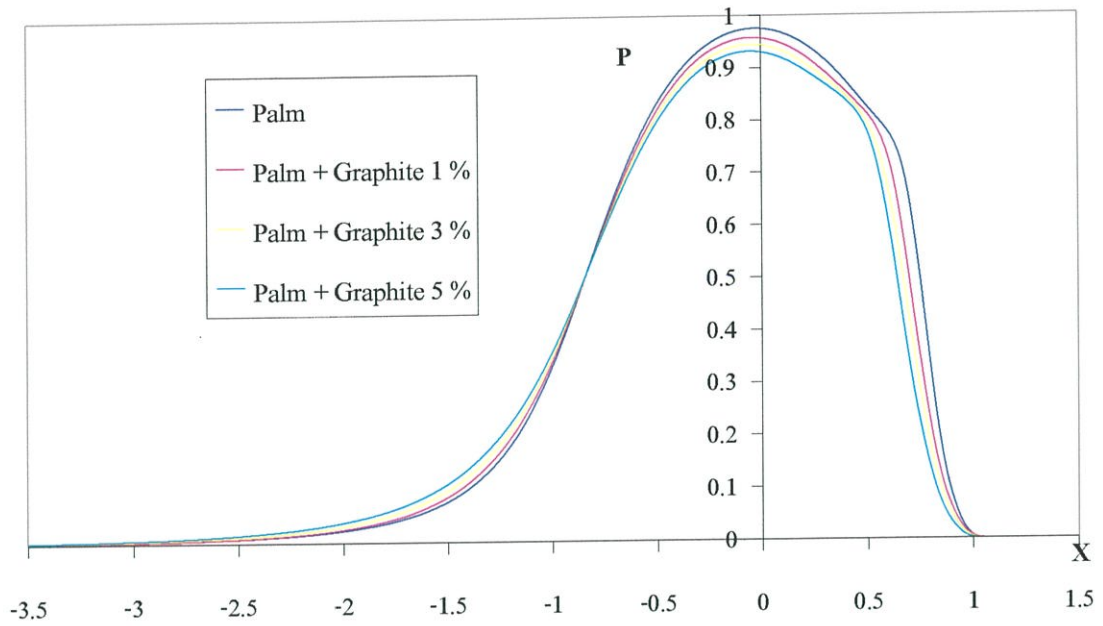
และที่น้ำมันน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ล้วนๆ จะมีการกระจายความดันมากที่สุดเนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งจะเข้าไปช่วยรับภาระจึงทำให้การกระจายความดันที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดที่น้อยลง

จากรูปที่ 6.59 ถึง 6.61, 6.68 ถึง 6.70 และ 6.77 ถึง 6.79 จะเห็นว่า การกระจายอุณหภูมิของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีการกระจายอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ 1 % , 3% และที่น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ล้วนๆ เนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปจะไปเสียดสีกับผิวของลูกกลิ้งและแผ่นเลื่อนจึงทำให้การกระจายอุณหภูมิจึงสูงขึ้น

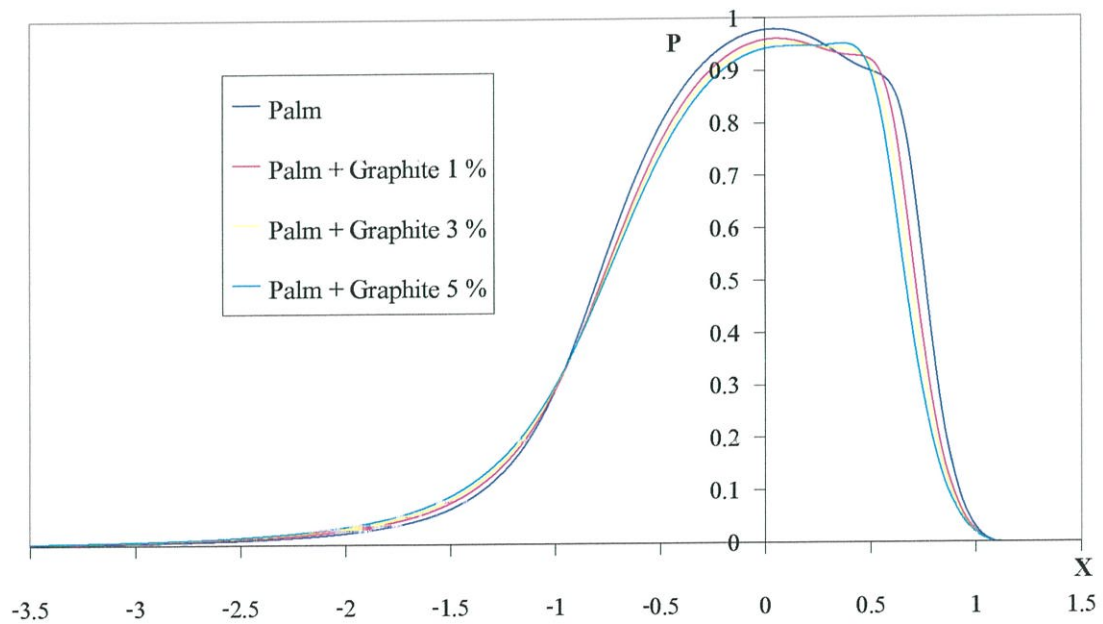
จากรูปที่ 6.62 ถึง 6.64, 6.71 ถึง 6.73 และ 6.80 ถึง 6.82 จะเห็นว่า ความหนาฟิล์มของน้ำมันที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งที่อัตราส่วน 5 % จะมีความหนาฟิล์มสูงกว่าที่ 1 % , 3% และที่น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ล้วนๆ เนื่องจากสารหล่อลื่นของแข็งที่เข้าไปจะเข้าไปชั้นกลางอยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง



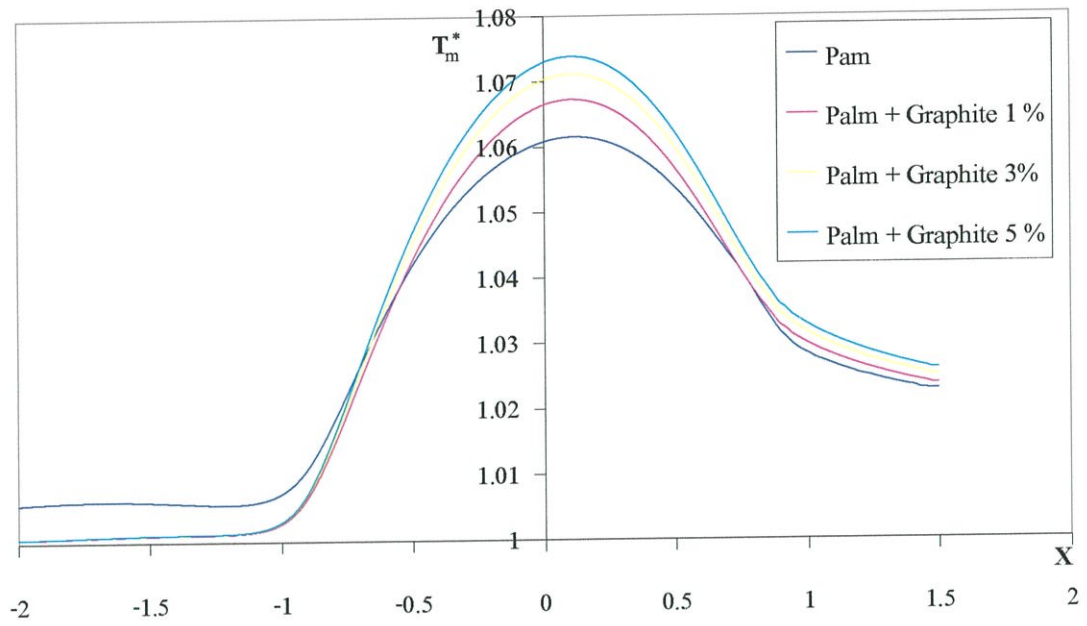
รูปที่ 6.56 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% เมื่อผสมกราฟไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตที่ 1



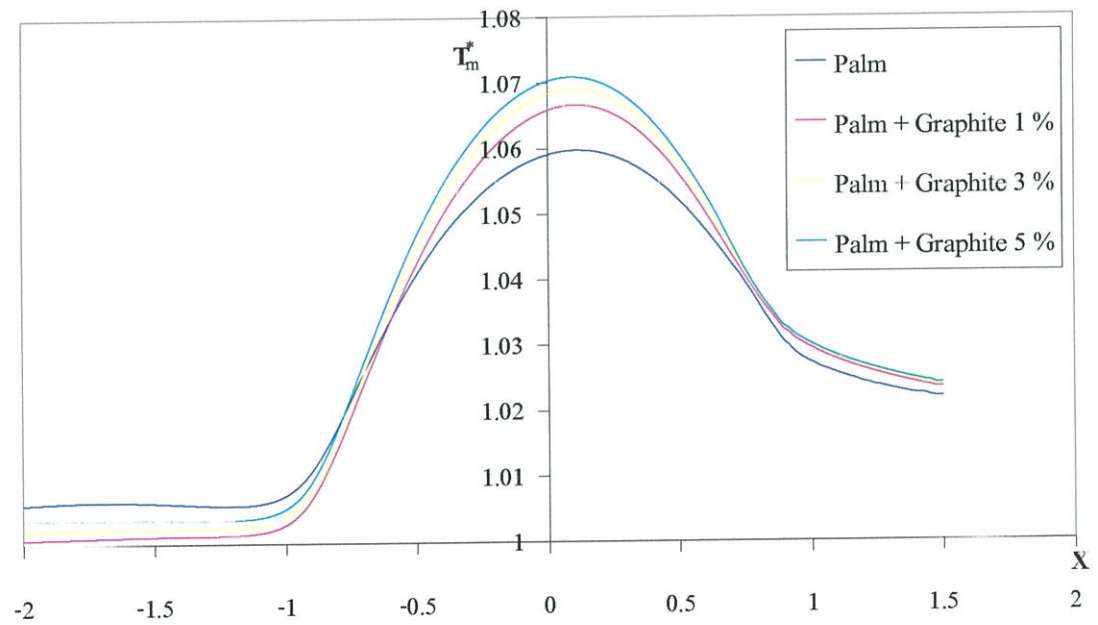
รูปที่ 6.57 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราฟไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



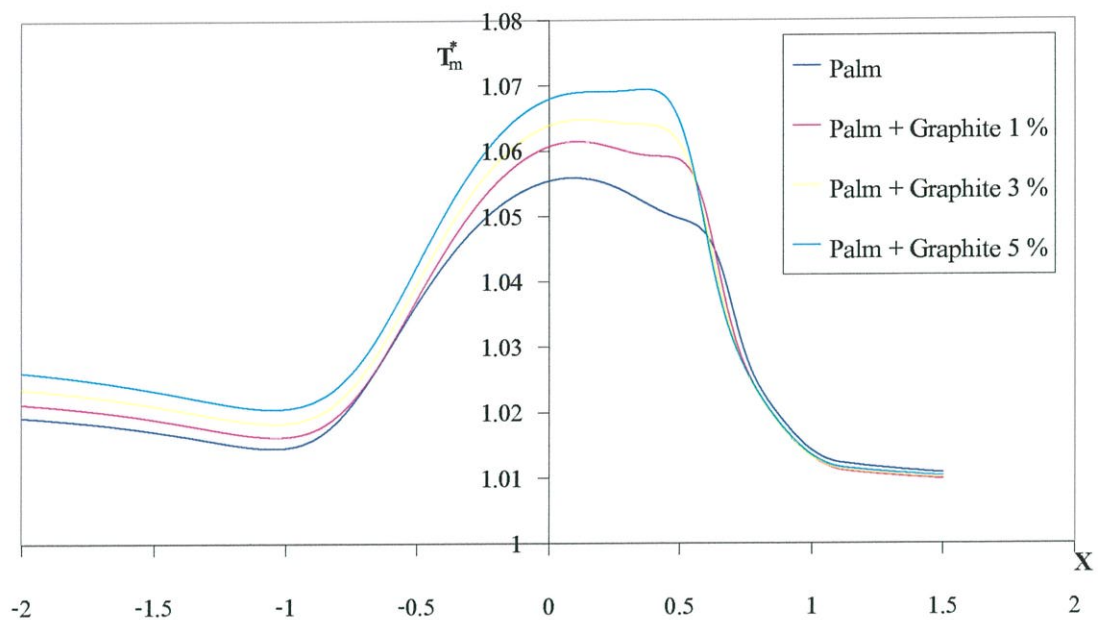
รูปที่ 6.58 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราฟไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



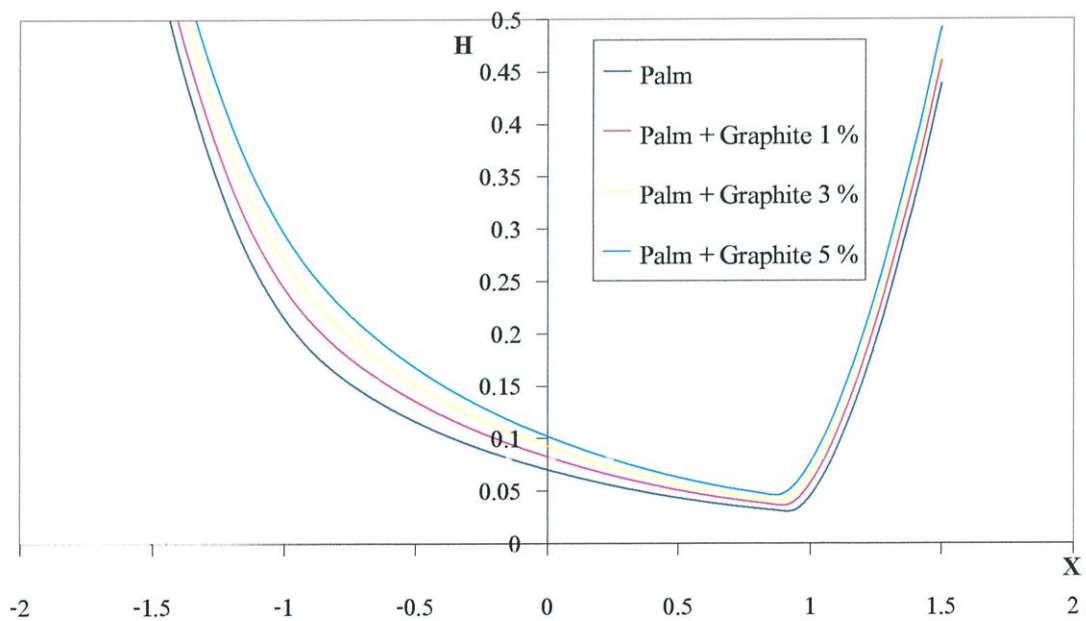
รูปที่ 6.59 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสมกราฟไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



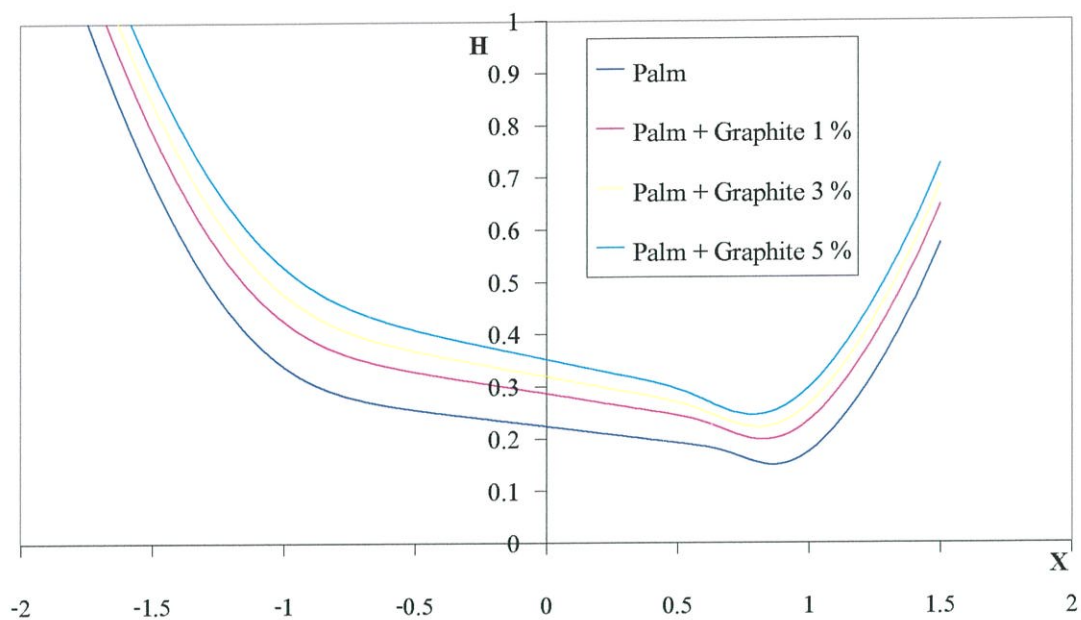
รูปที่ 6.60 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสมกราฟไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



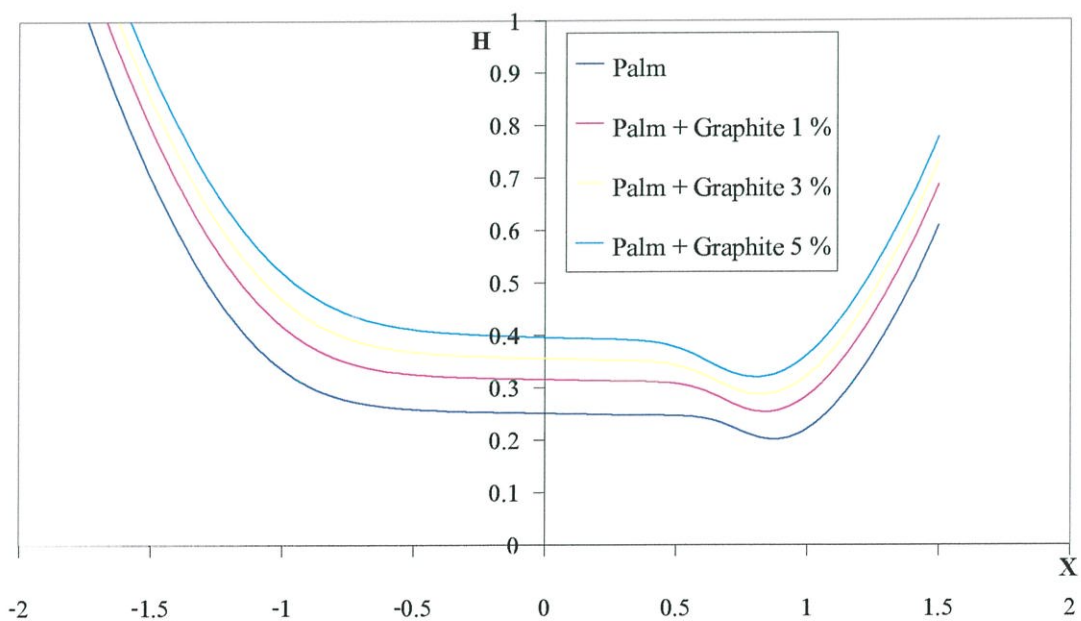
รูปที่ 6.61 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



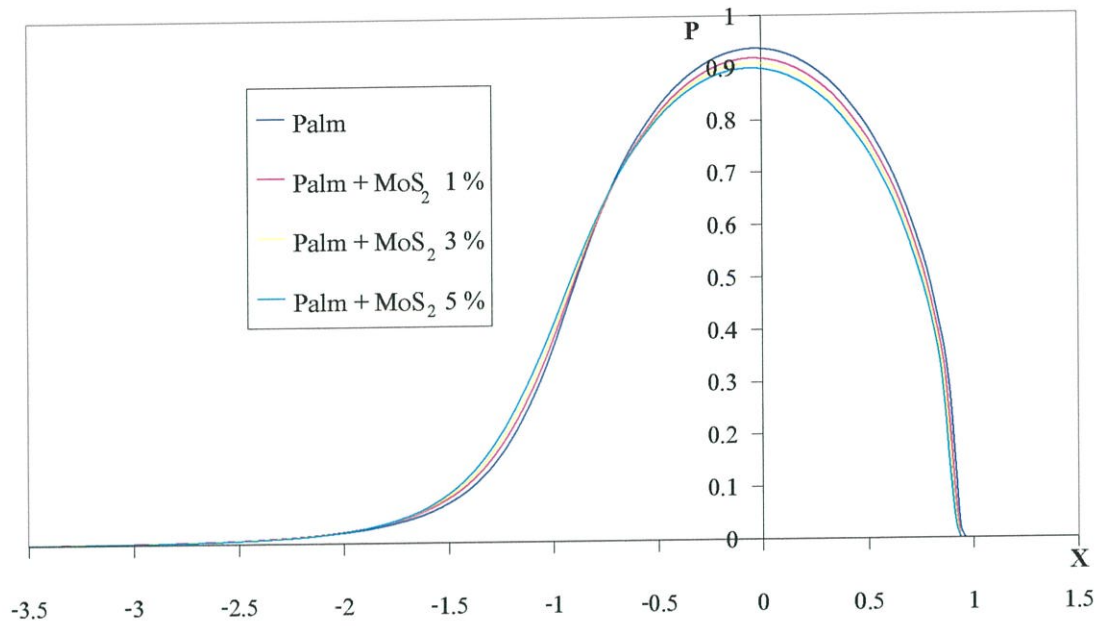
รูปที่ 6.62 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



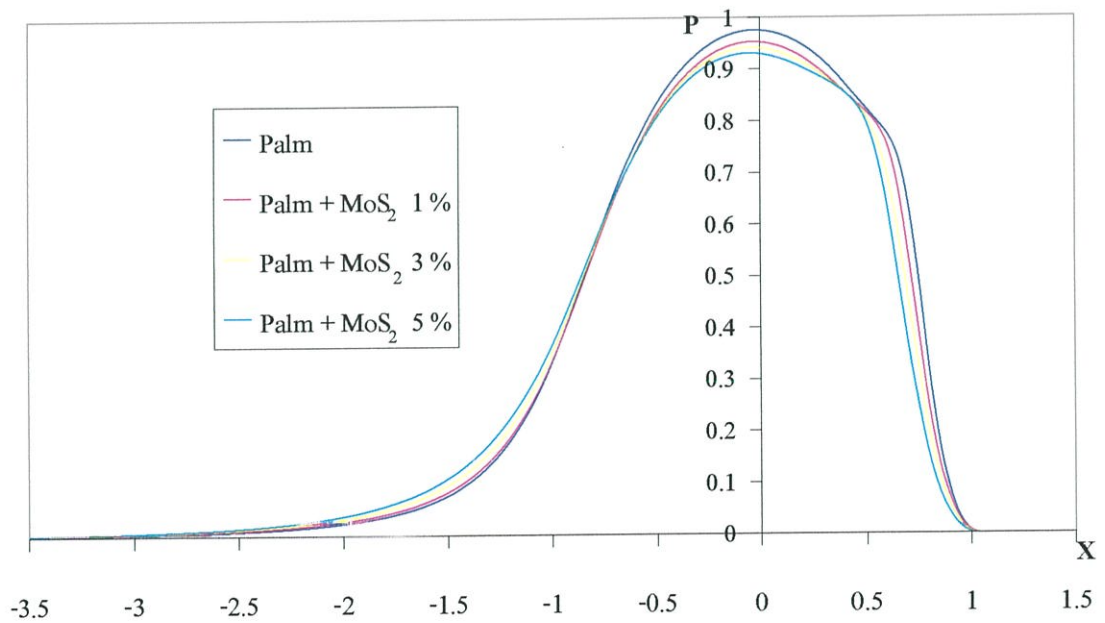
รูปที่ 6.63 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 3



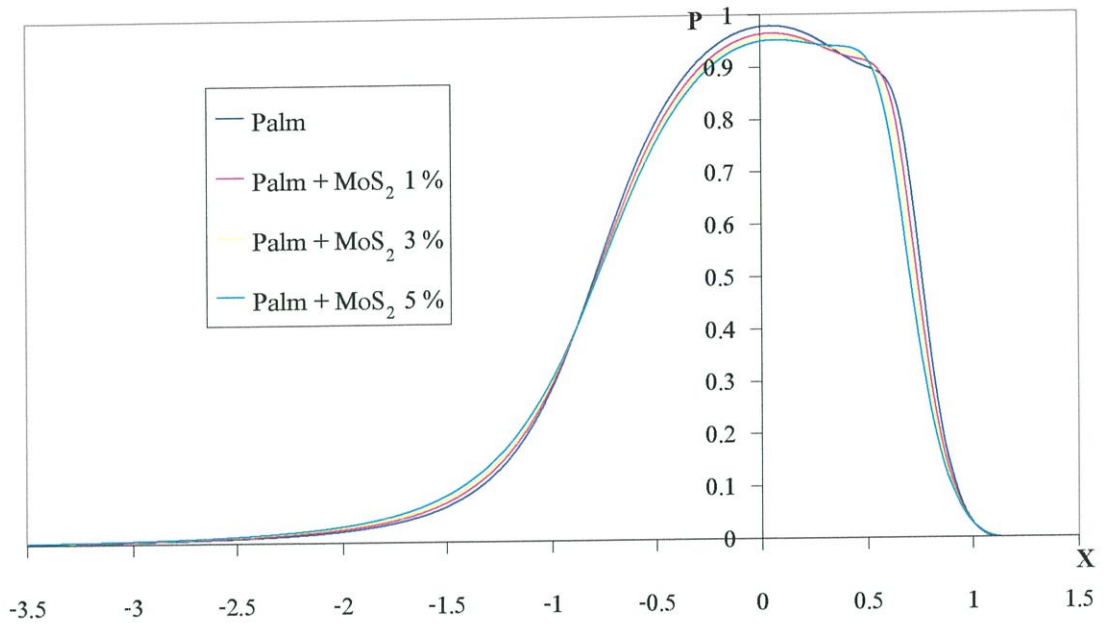
รูปที่ 6.64 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสมกราไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไรมิตีที่ 5



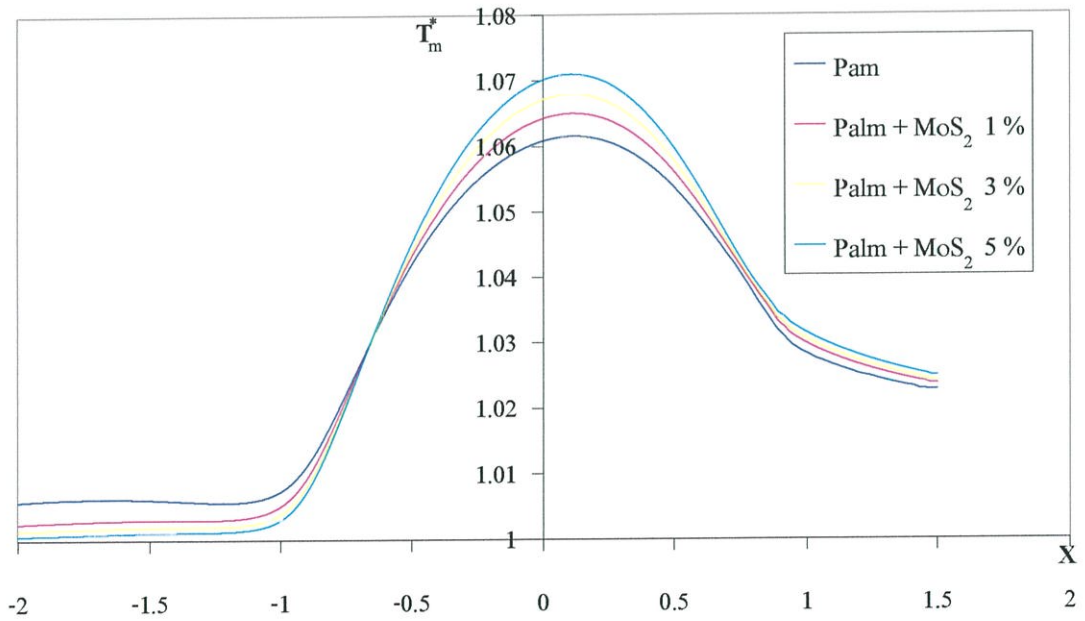
รูปที่ 6.65 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



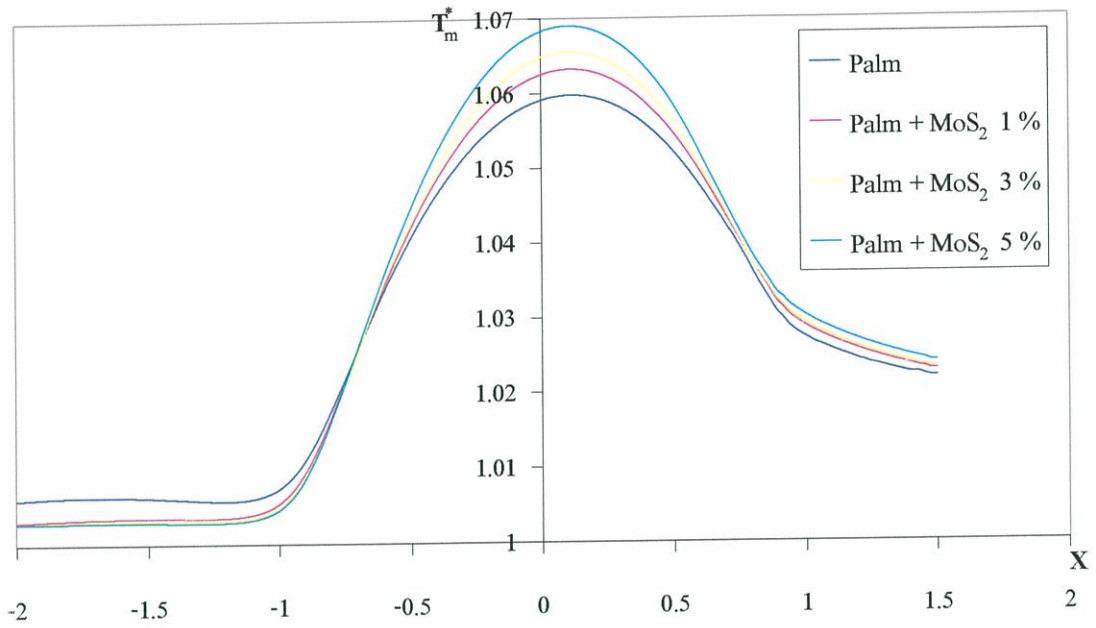
รูปที่ 6.66 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



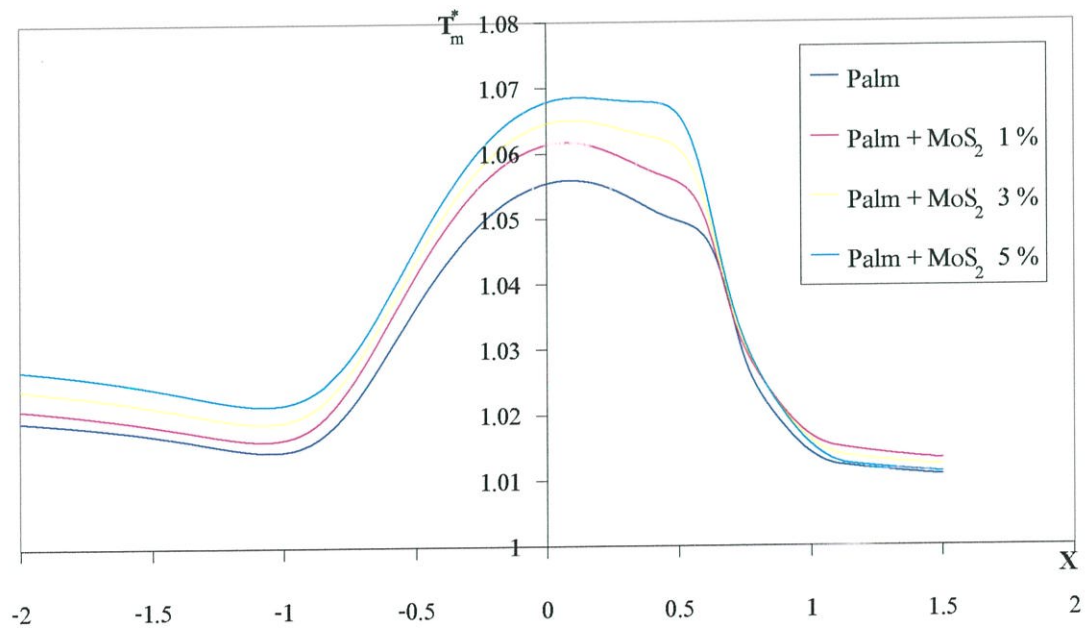
รูปที่ 6.67 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



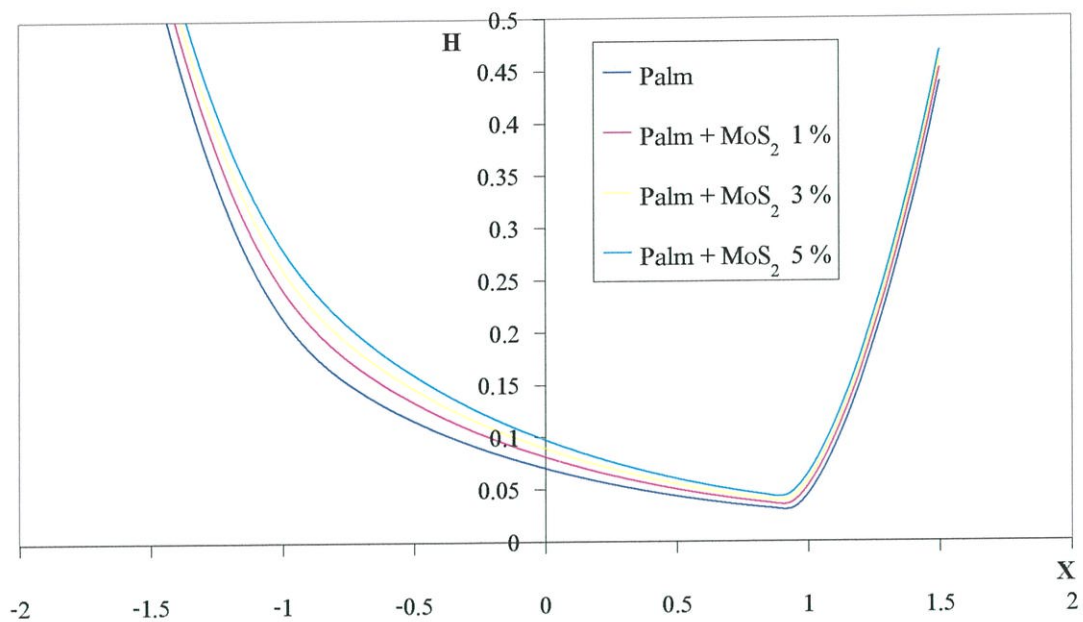
รูปที่ 6.68 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



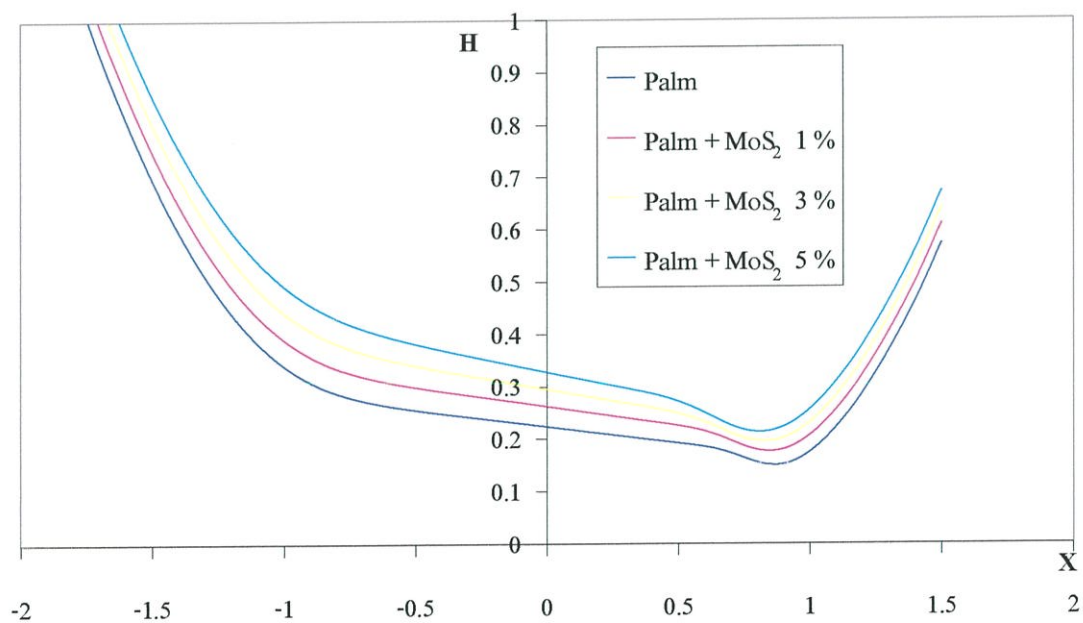
รูปที่ 6.69 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโมลิดินัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



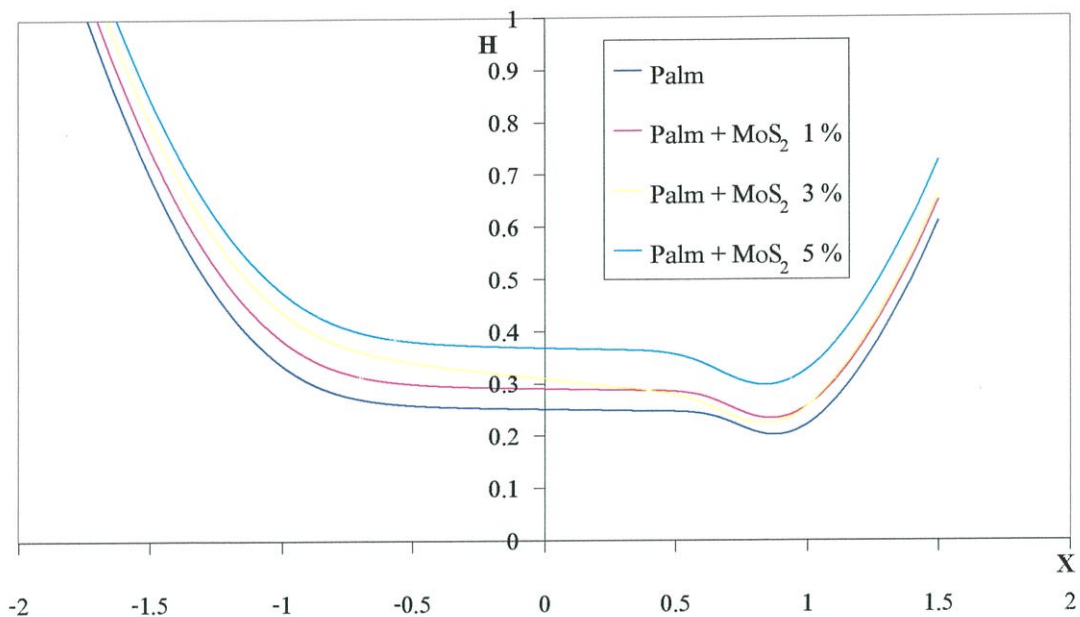
รูปที่ 6.70 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโมลิดินัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5



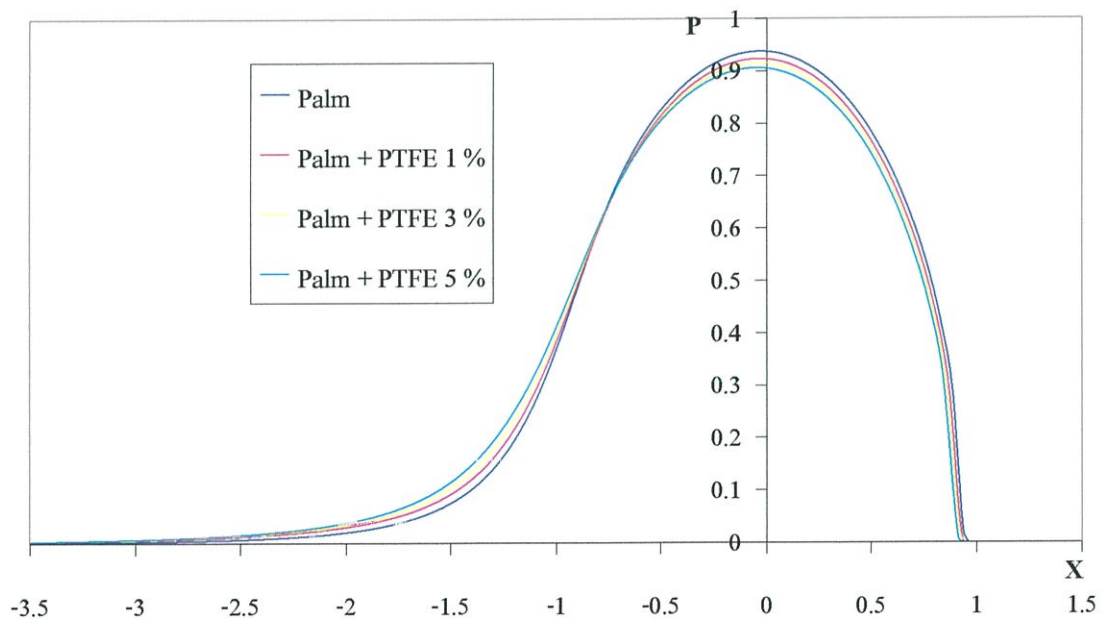
รูปที่ 6.71 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโมลิดินัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1



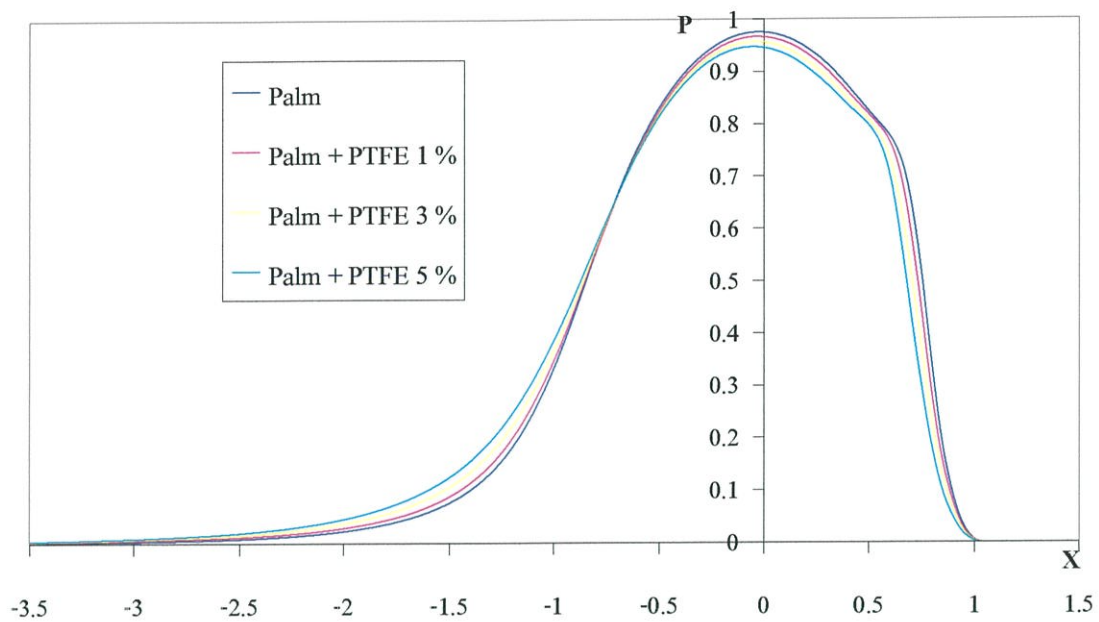
รูปที่ 6.72 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสม โมลิดินัมไดไซไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



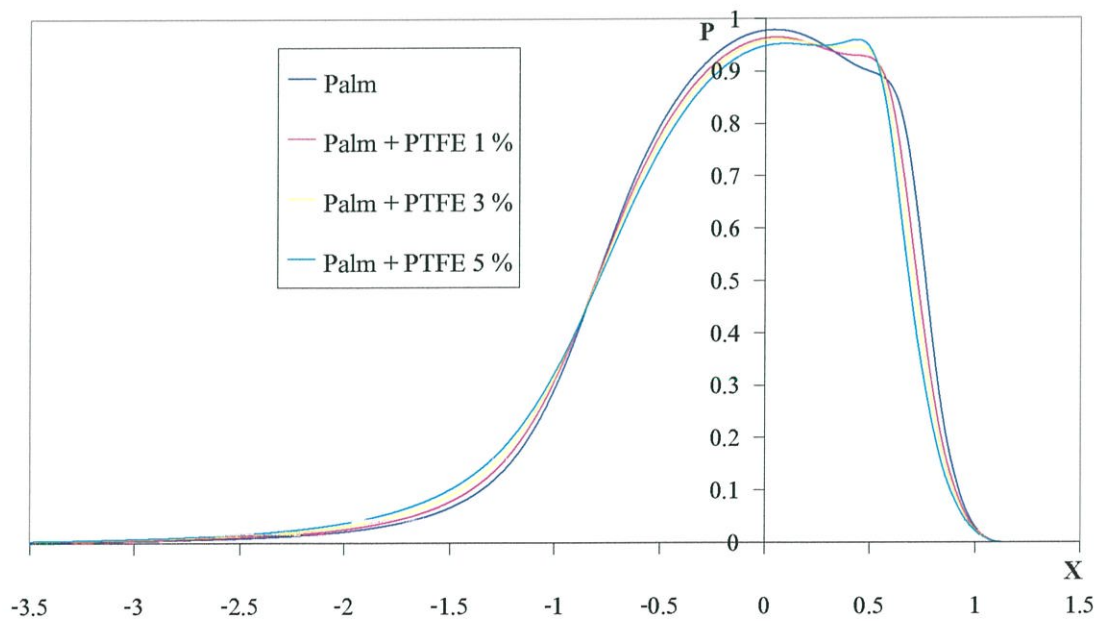
รูปที่ 6.73 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %เมื่อผสม โมลิดินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิตที่ 5



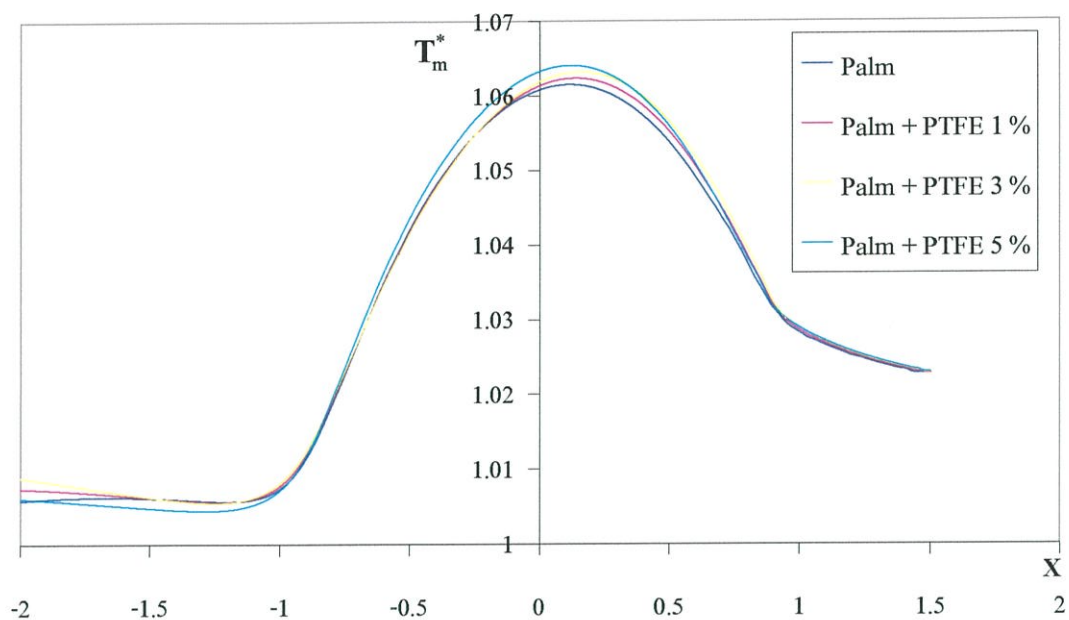
รูปที่ 6.74 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิตที่ 1



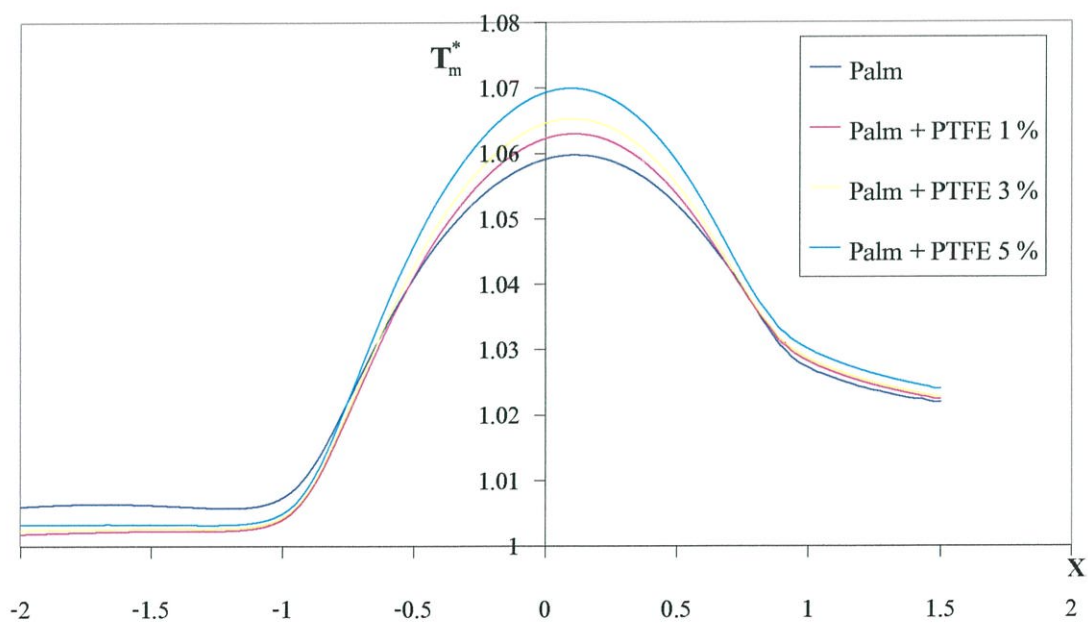
รูปที่ 6.75 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 3



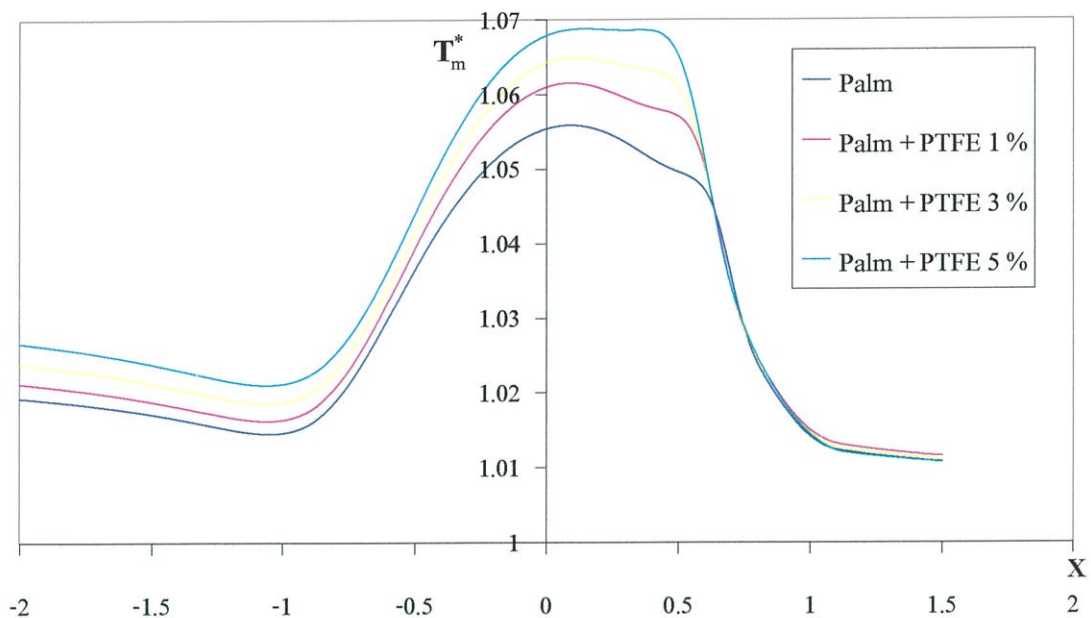
รูปที่ 6.76 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร่มีดที่ 5



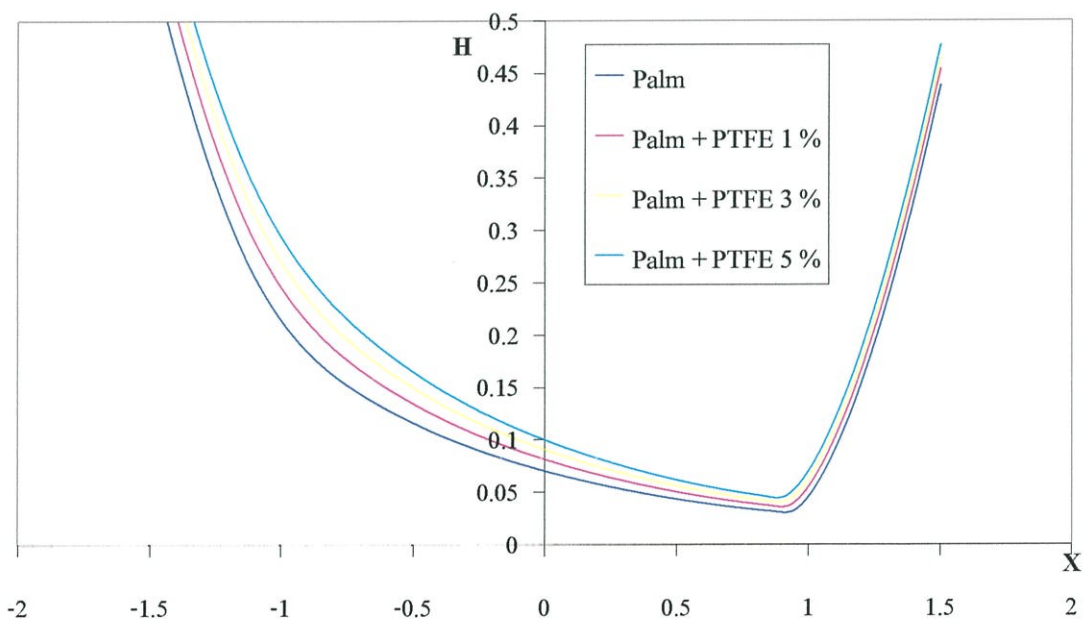
รูปที่ 6.77 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไว้มิติที่ 1



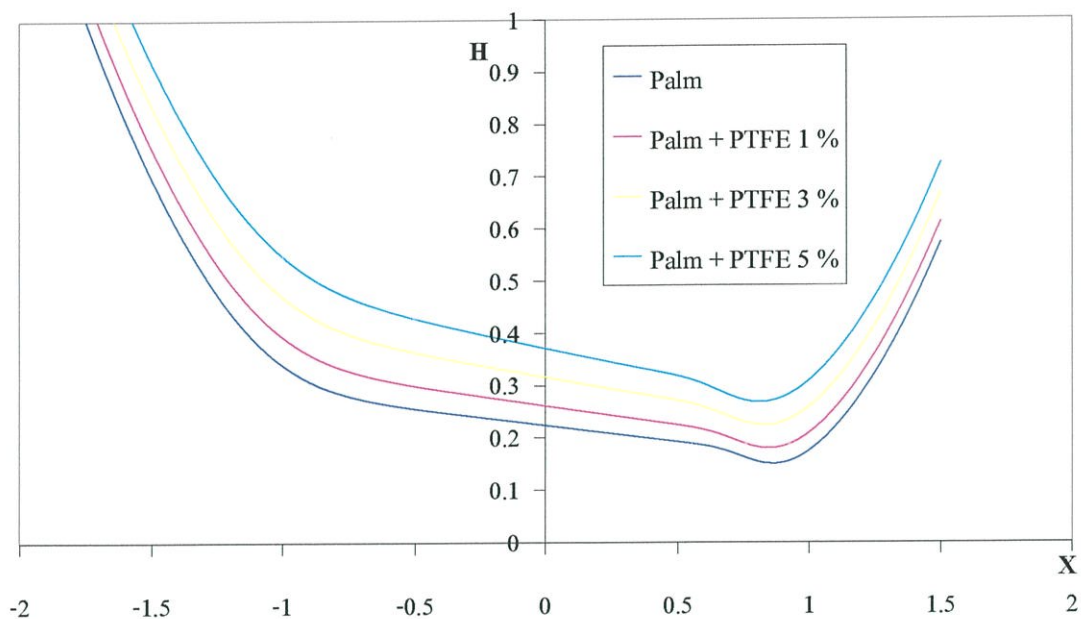
รูปที่ 6.78 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไว้มิติที่ 3



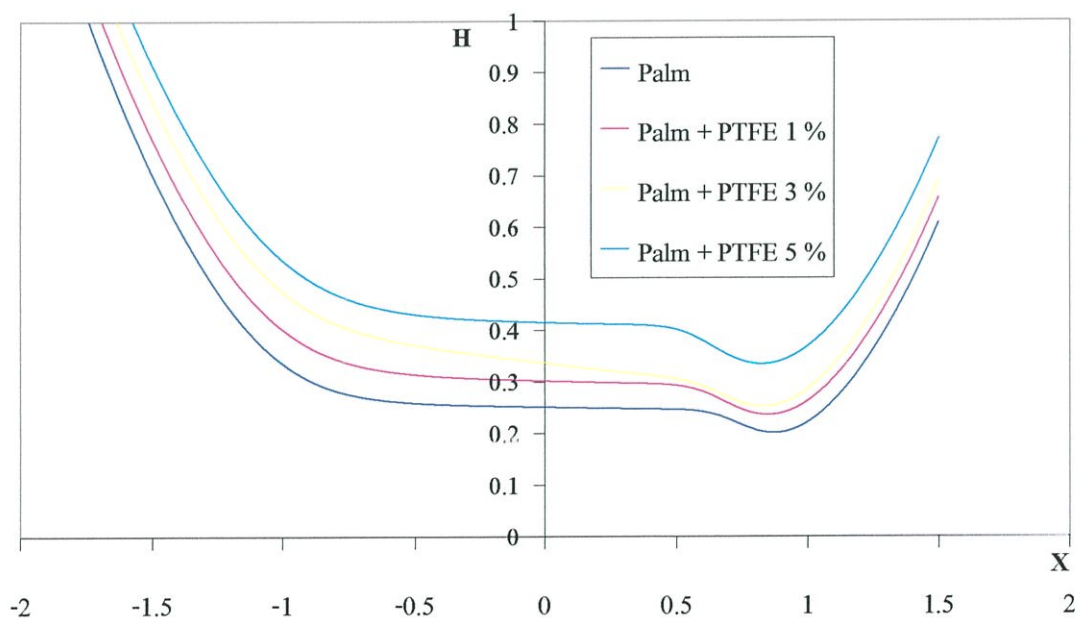
รูปที่ 6.79 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไว้มิติที่ 5



รูปที่ 6.80 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทินในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไว้มิติที่ 1

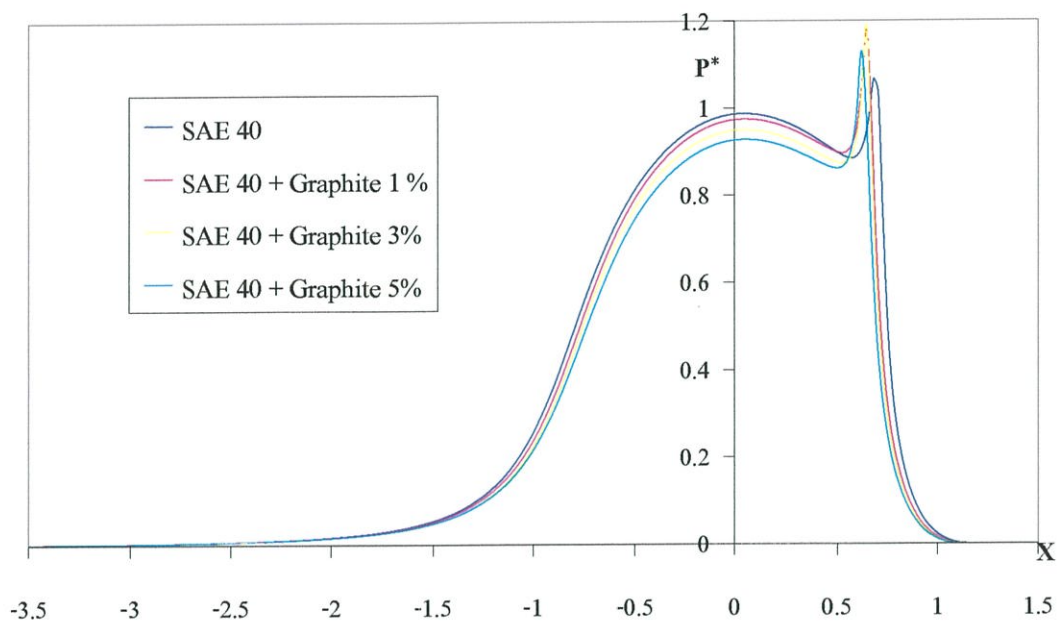


รูปที่ 6.81 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

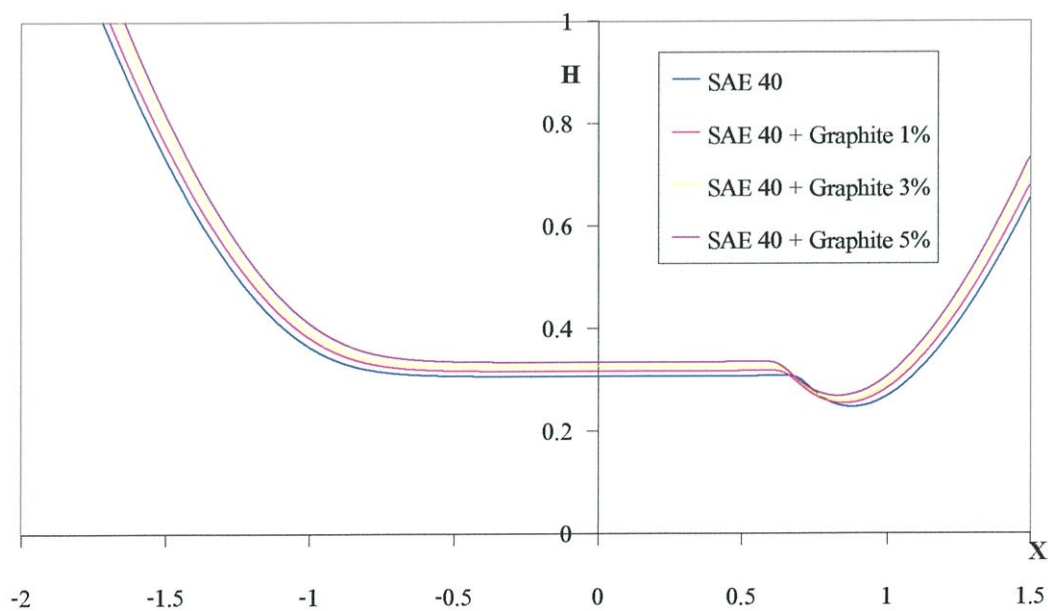


รูปที่ 6.82 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 5

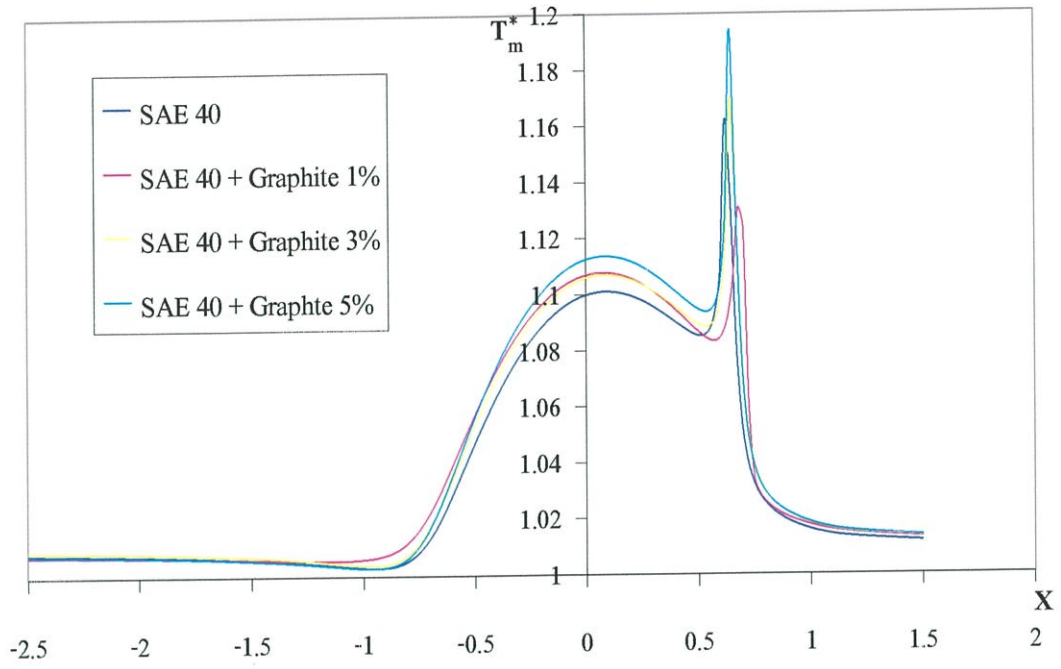
จากรูปที่ 6.83 ถึง 6.109 แสดงผลของความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งที่มีต่อคุณลักษณะการหล่อลื่นโดยอนุภาคที่ใช้มีขนาด $4 \mu\text{m}$ ที่สภาวะสมดุลย์



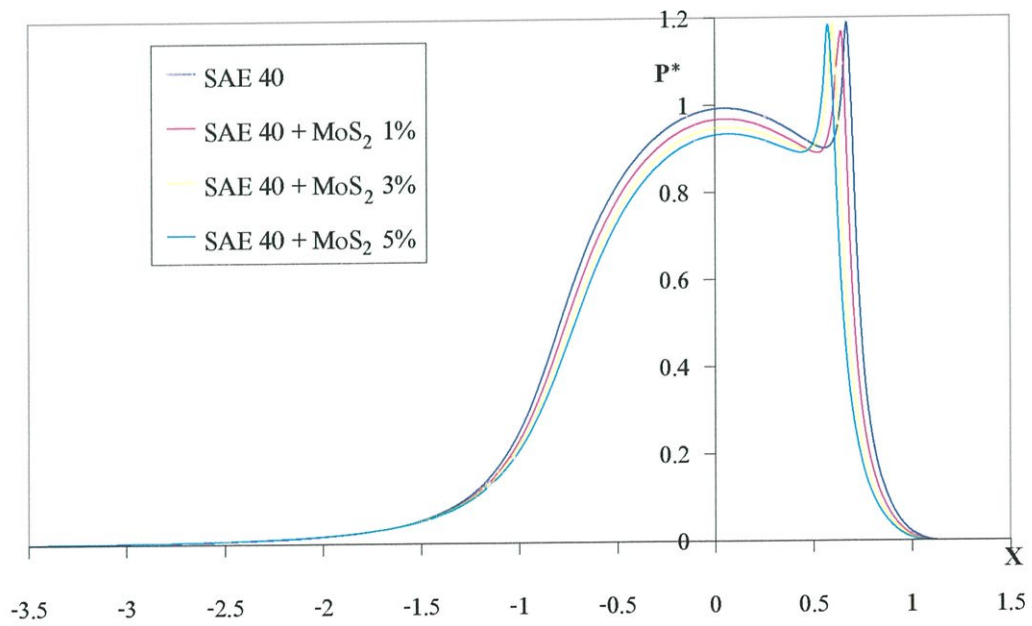
รูปที่ 6.83 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



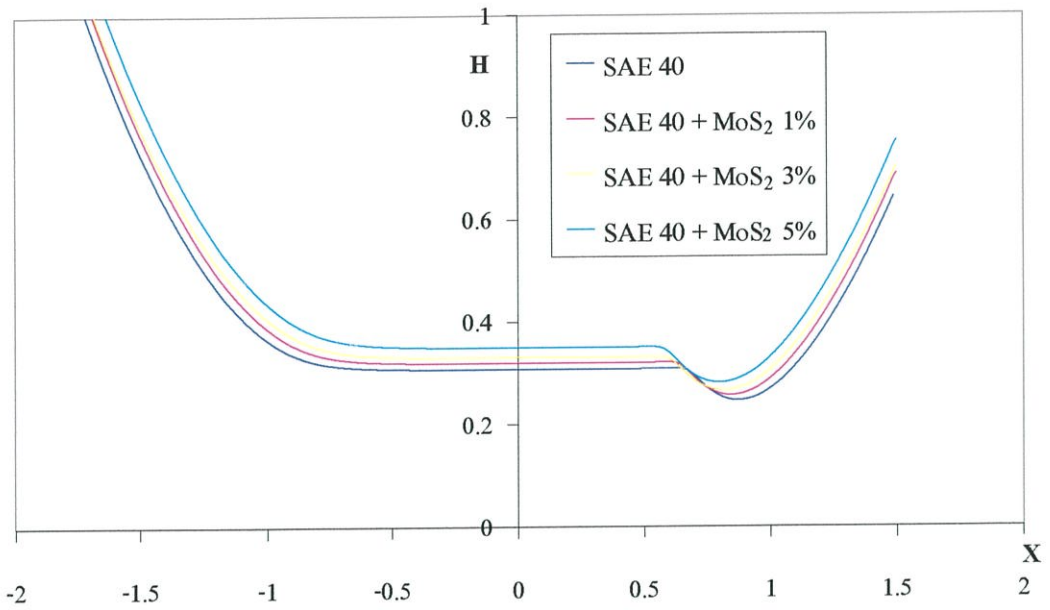
รูปที่ 6.84 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



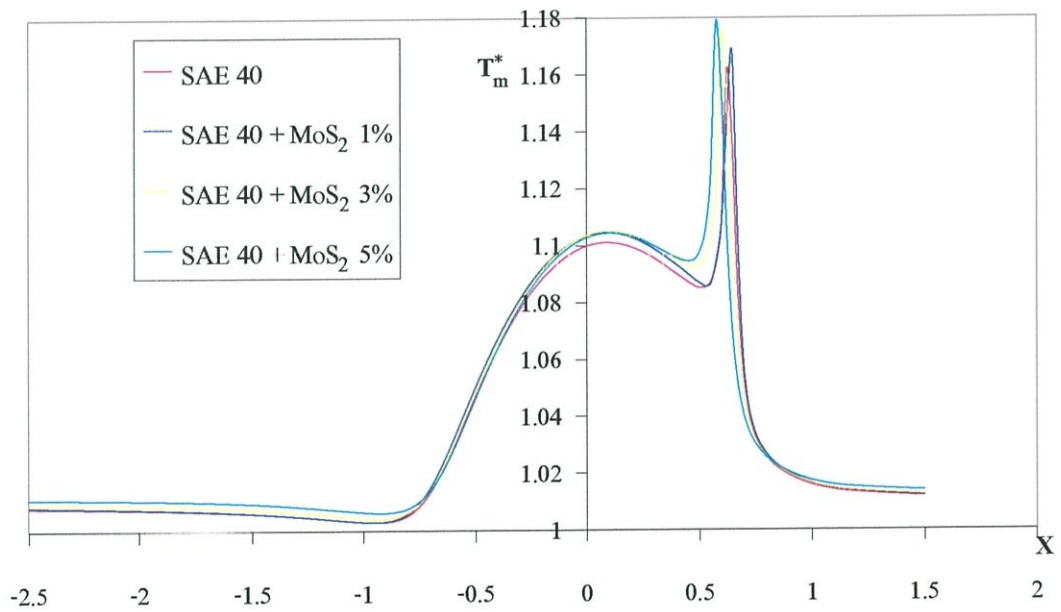
รูปที่ 6.85 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมกราฟไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



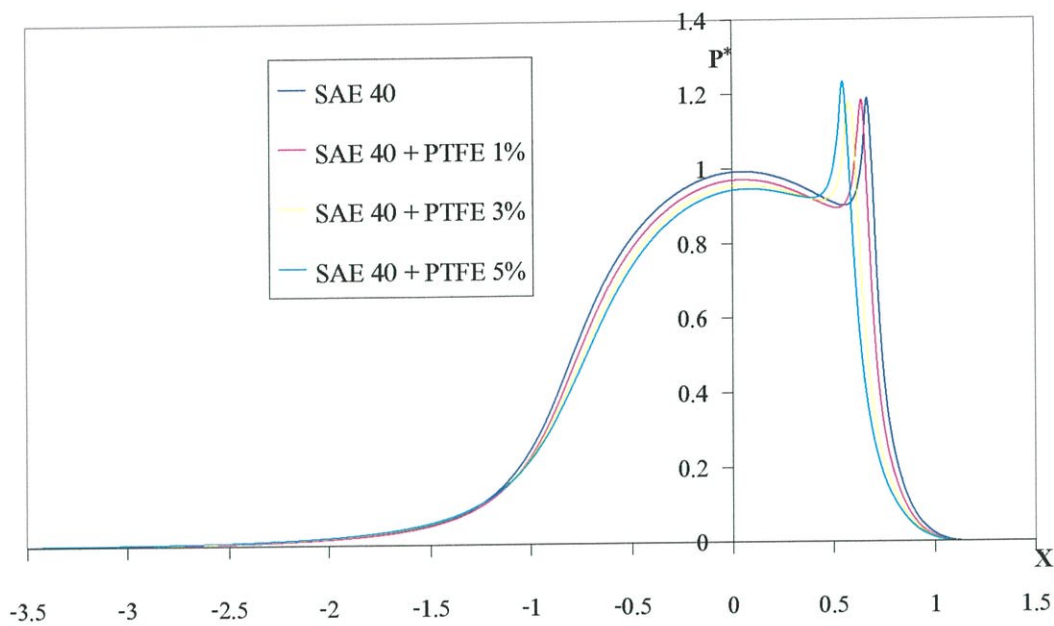
รูปที่ 6.86 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



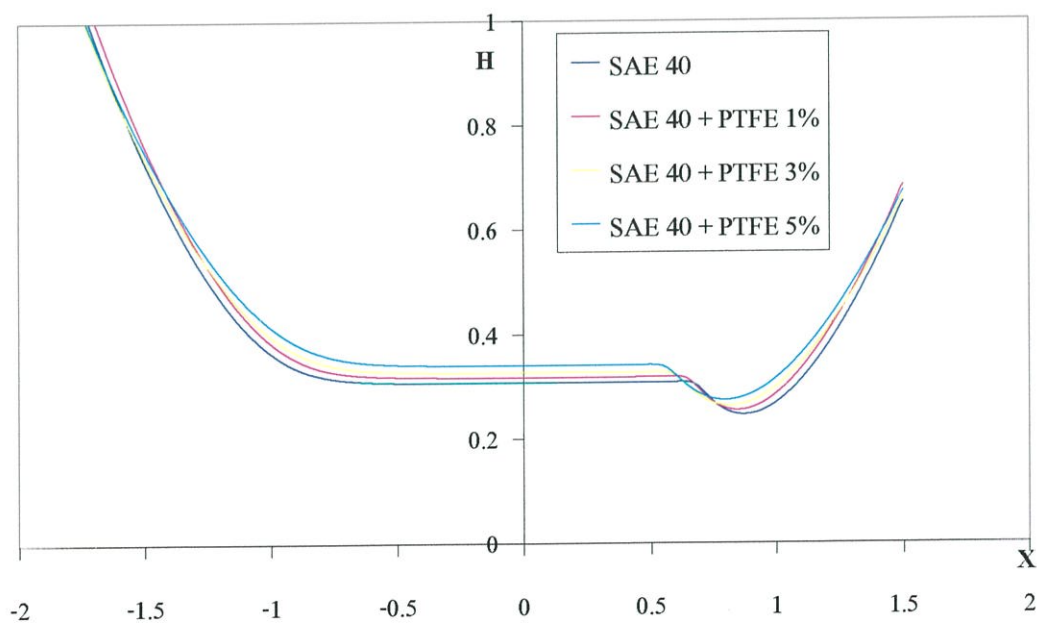
รูปที่ 6.87 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



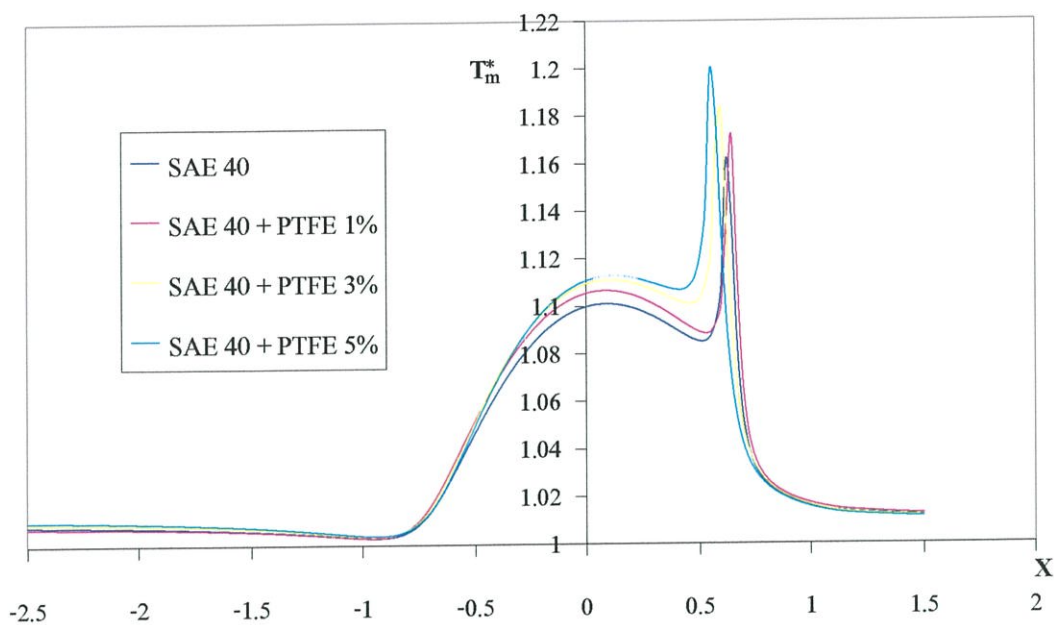
รูปที่ 6.88 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสม โมลิดินัม ไดไซไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



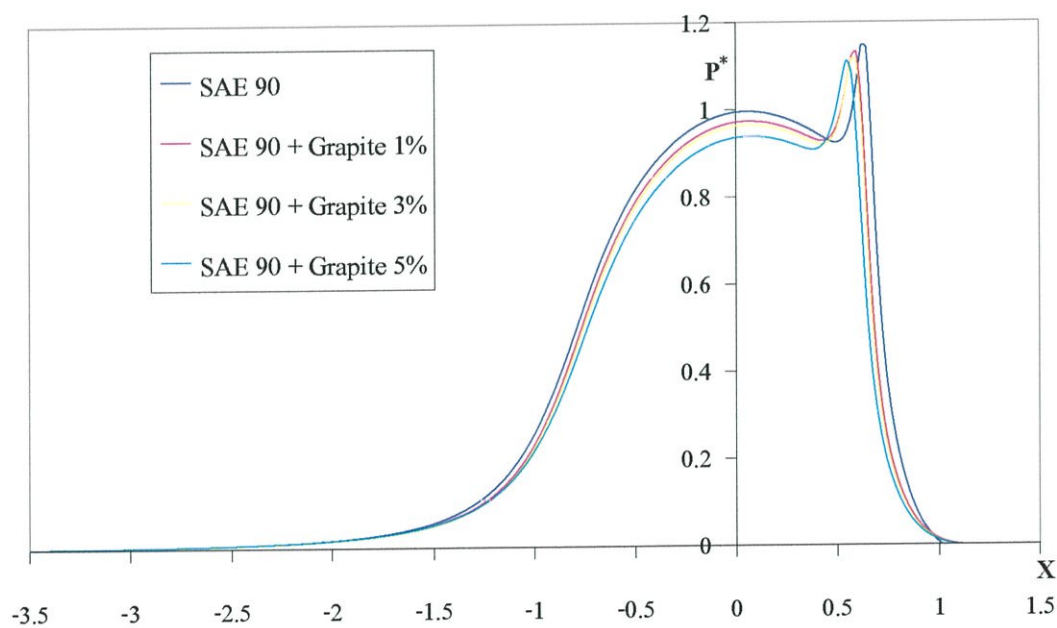
รูปที่ 6.89 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



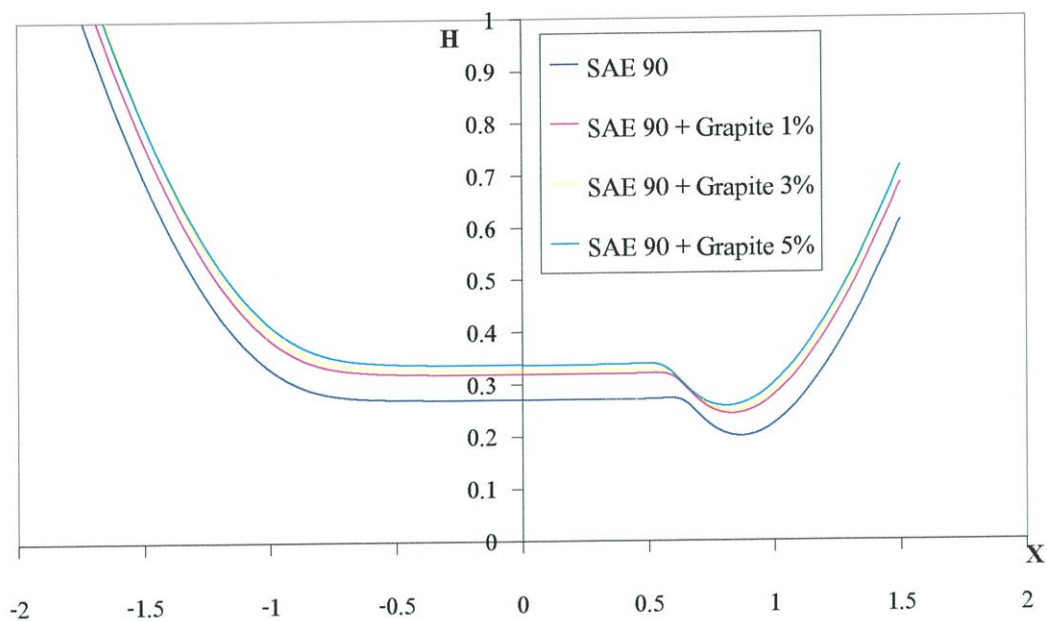
รูปที่ 6.90 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



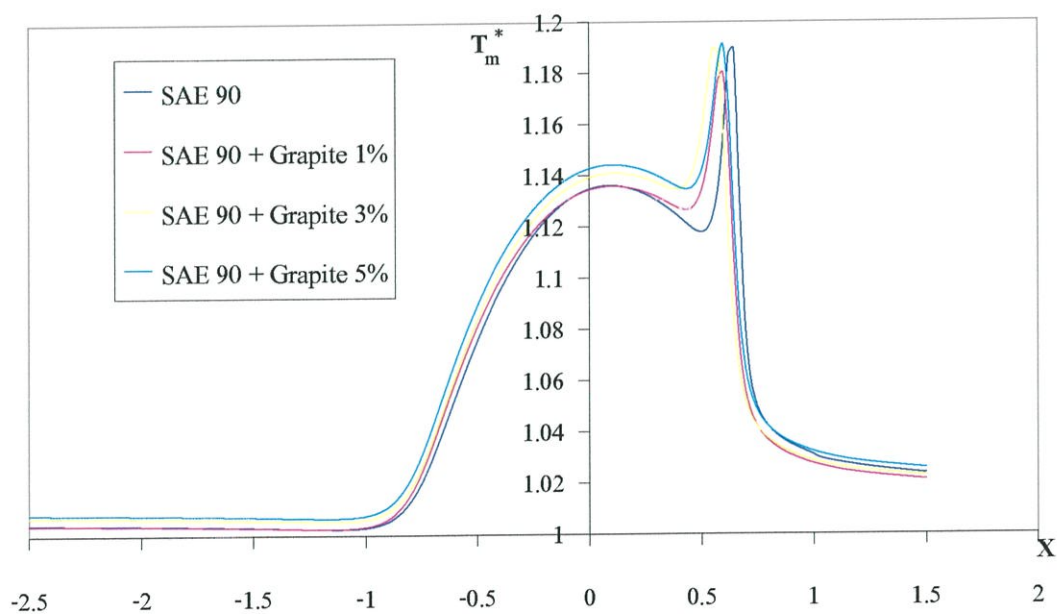
รูปที่ 6.91 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 40 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



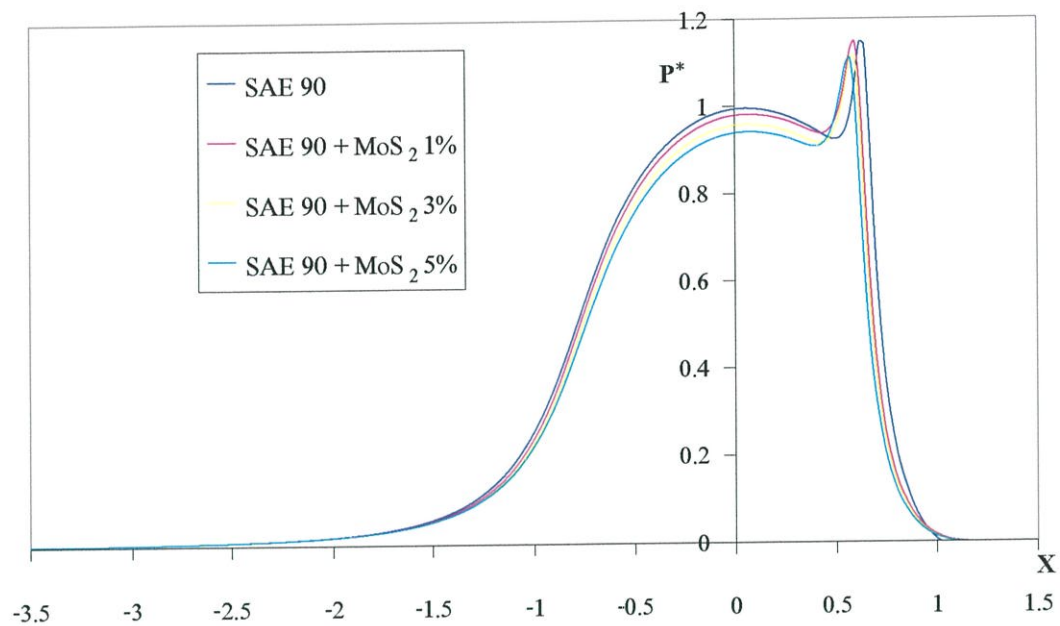
รูปที่ 6.90 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



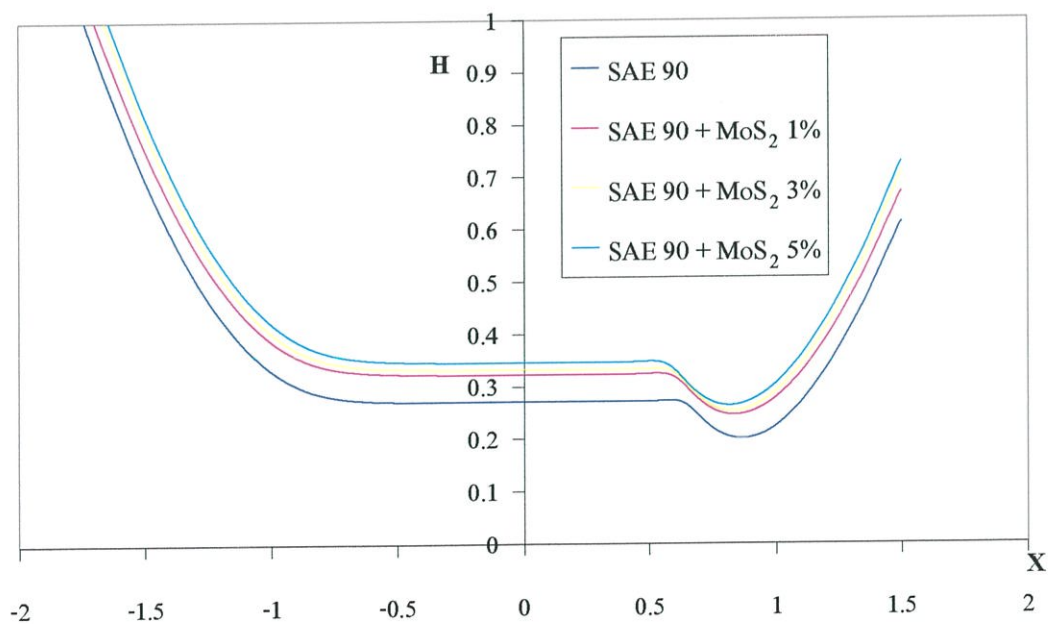
รูปที่ 6.93 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



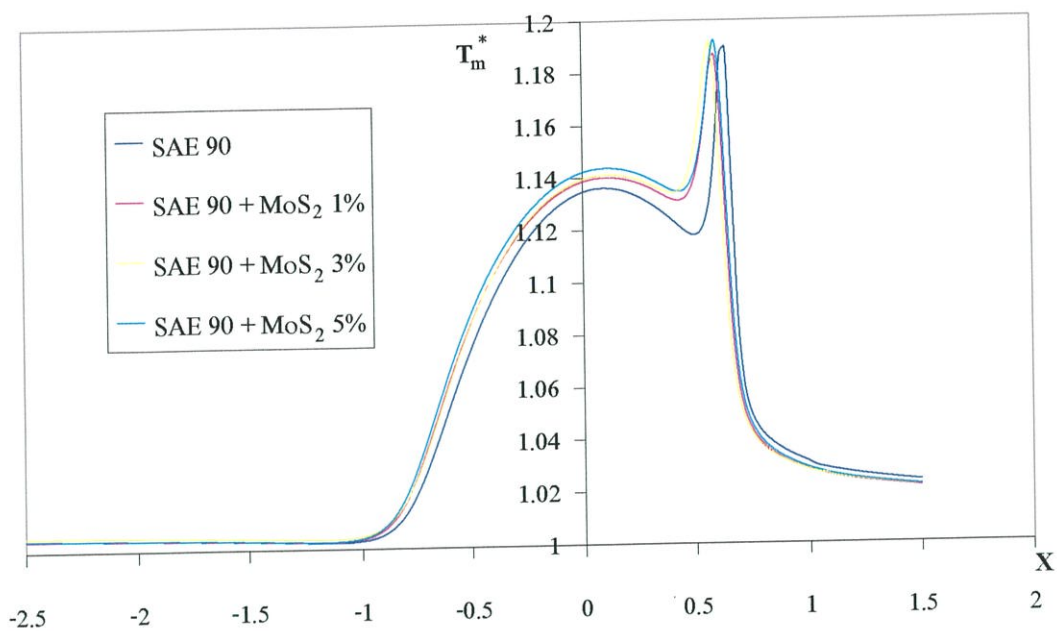
รูปที่ 6.94 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



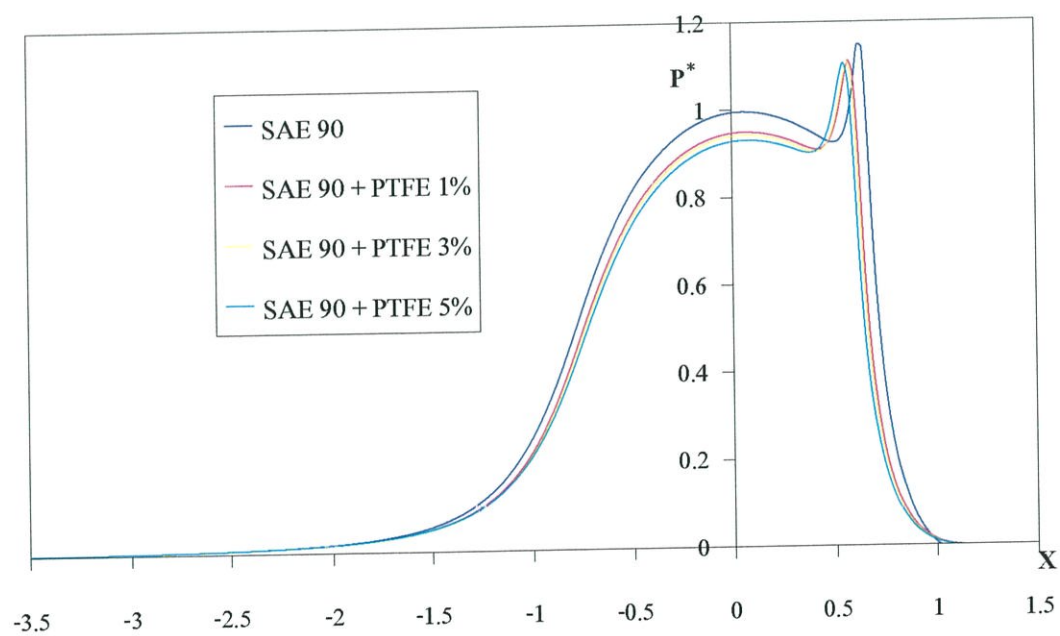
รูปที่ 6.95 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



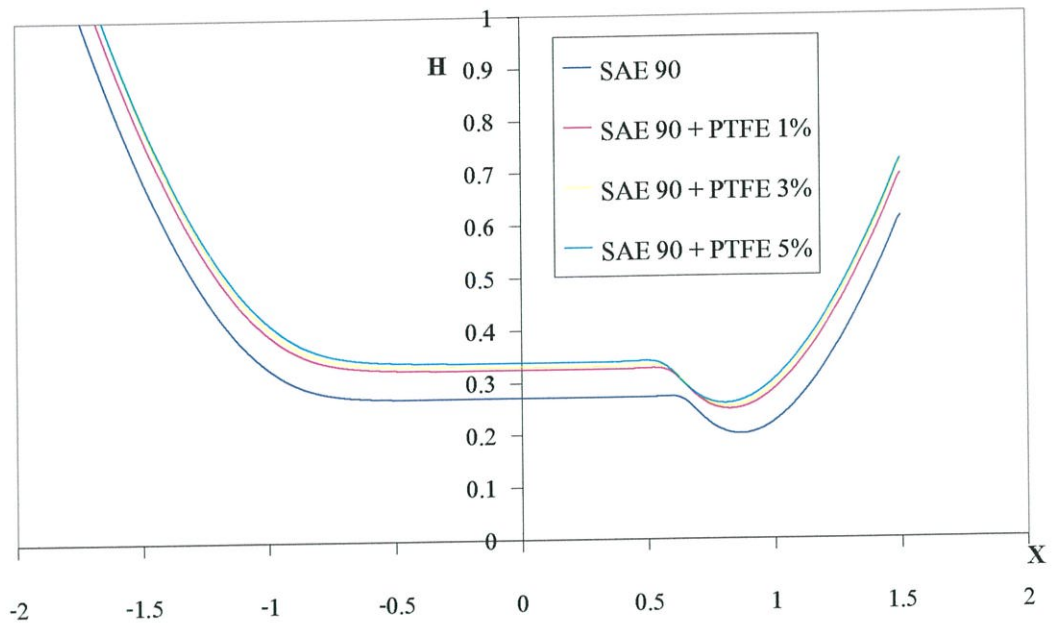
รูปที่ 6.96 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิตินัมไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



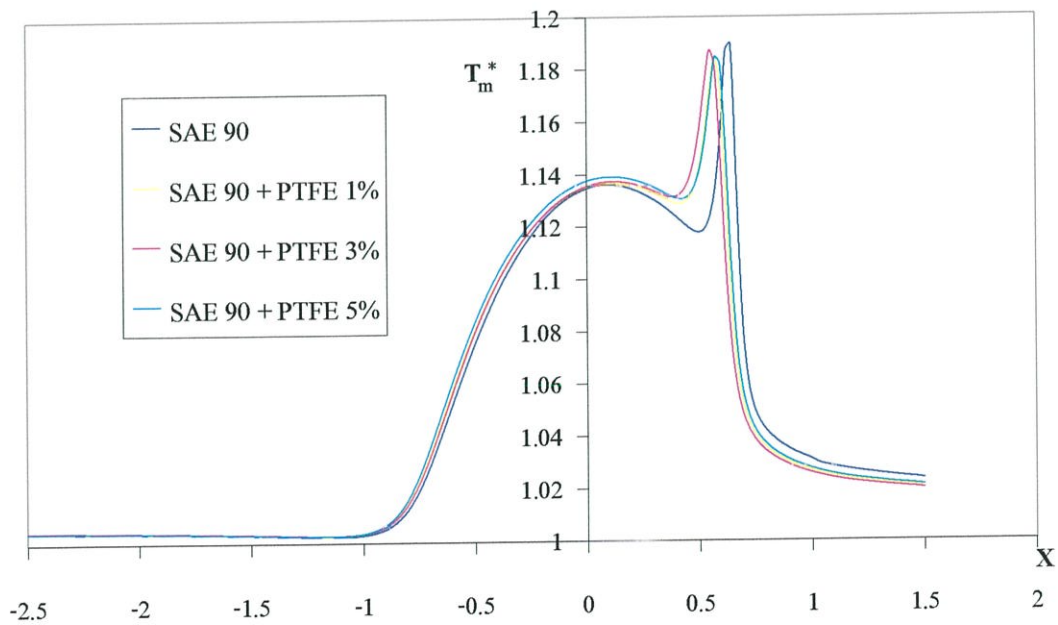
รูปที่ 6.97 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิบดีนัมไดซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



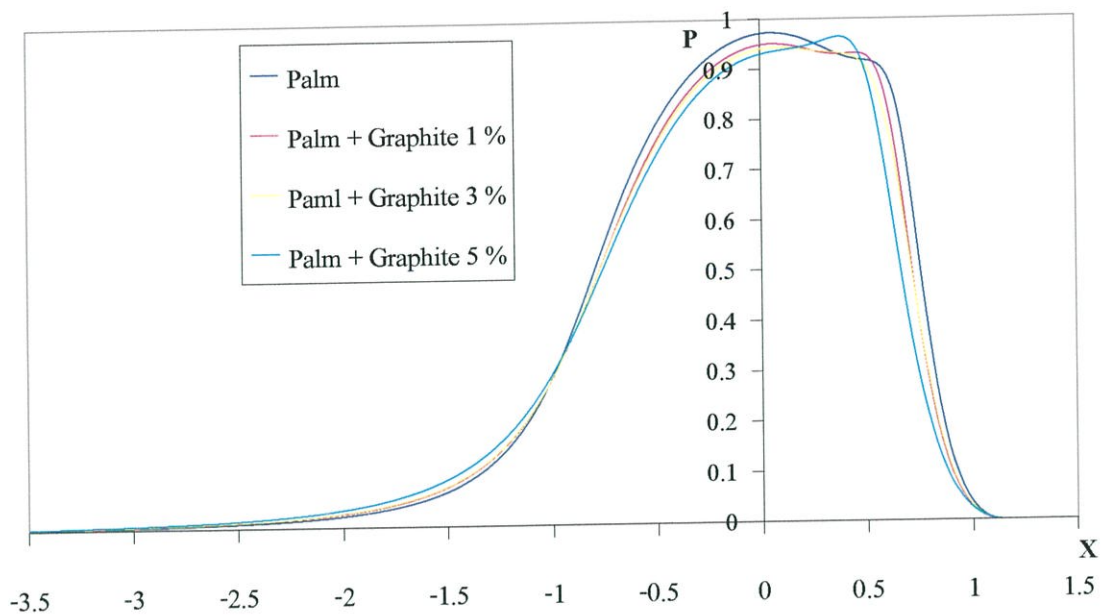
รูปที่ 6.98 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



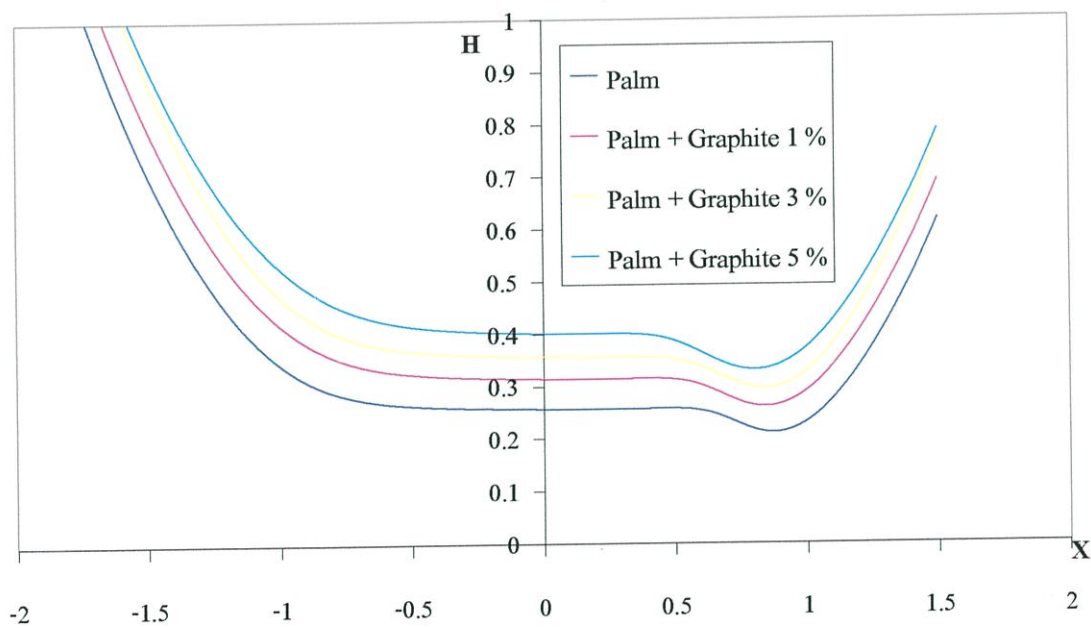
รูปที่ 6.99 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



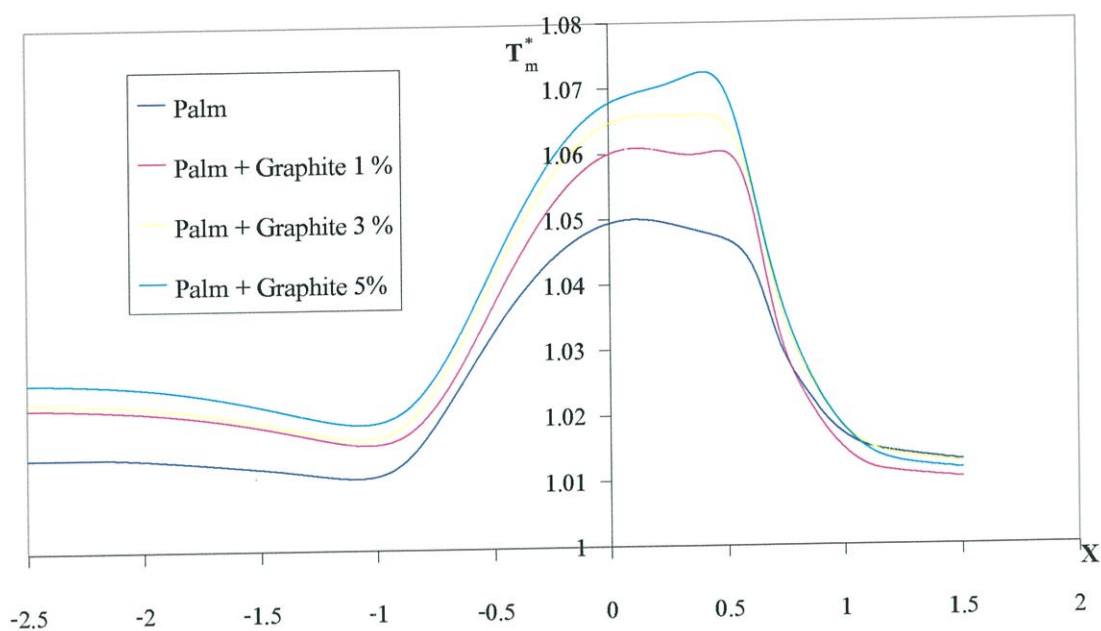
รูปที่ 6.100 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



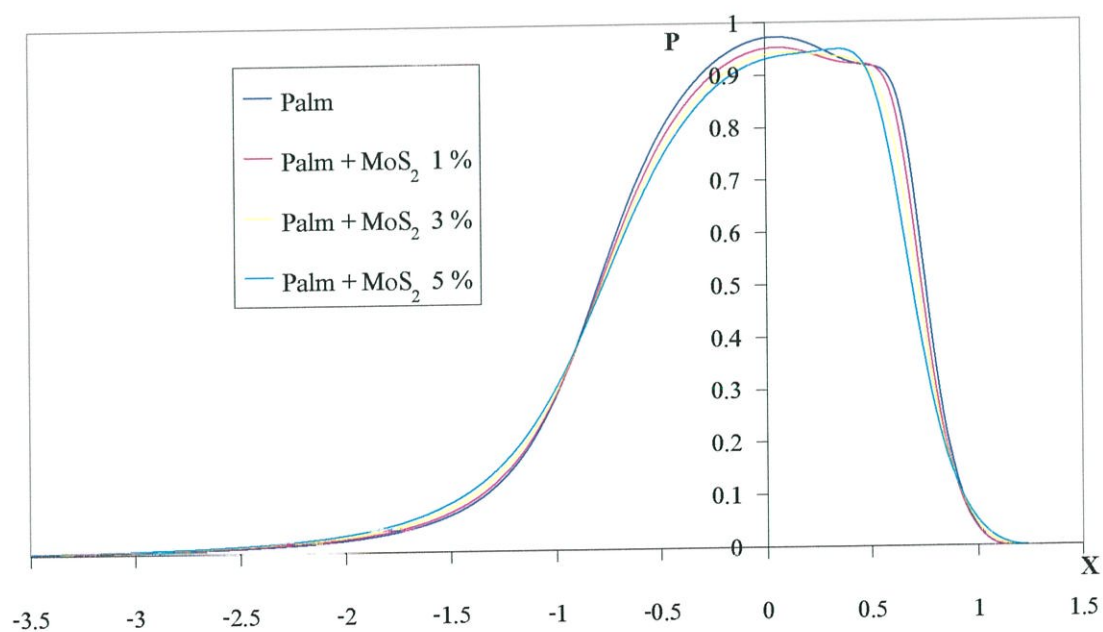
รูปที่ 6.101 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆที่สภาวะสมดุลย์



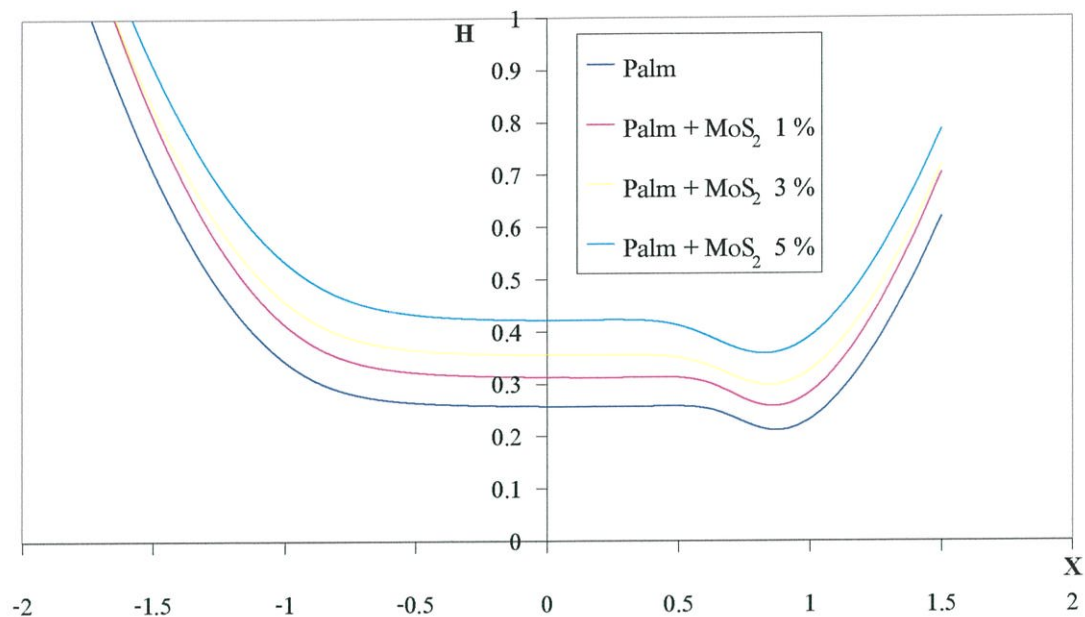
รูปที่ 6.102 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสมกราไฟต์
ในความเข้มข้นต่างๆที่สภาวะสมดุลย์



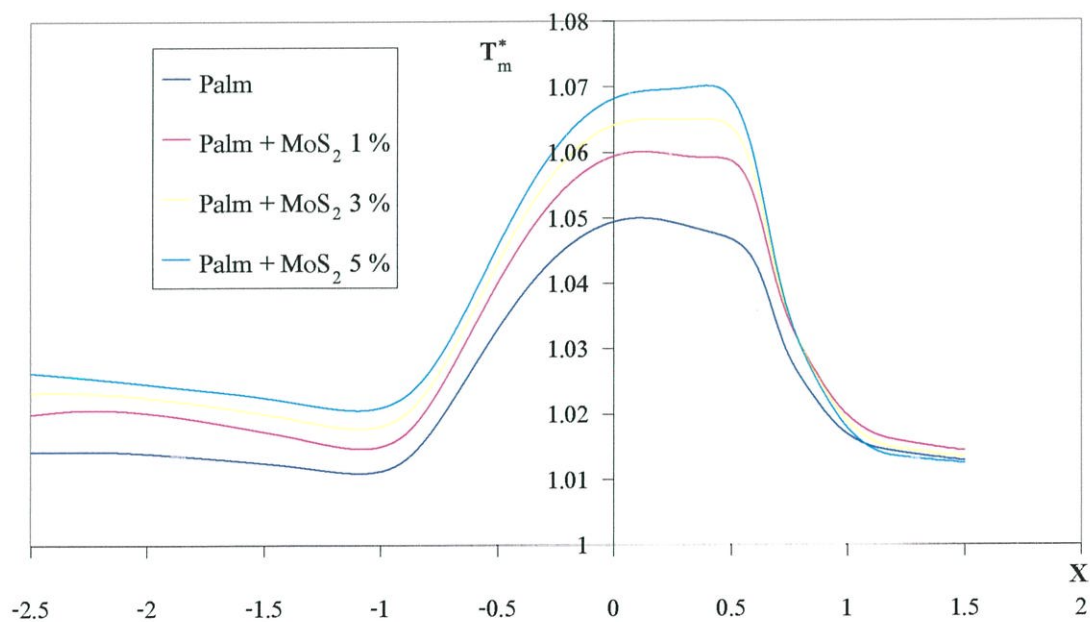
รูปที่ 6.103 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% เมื่อผสมกราไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



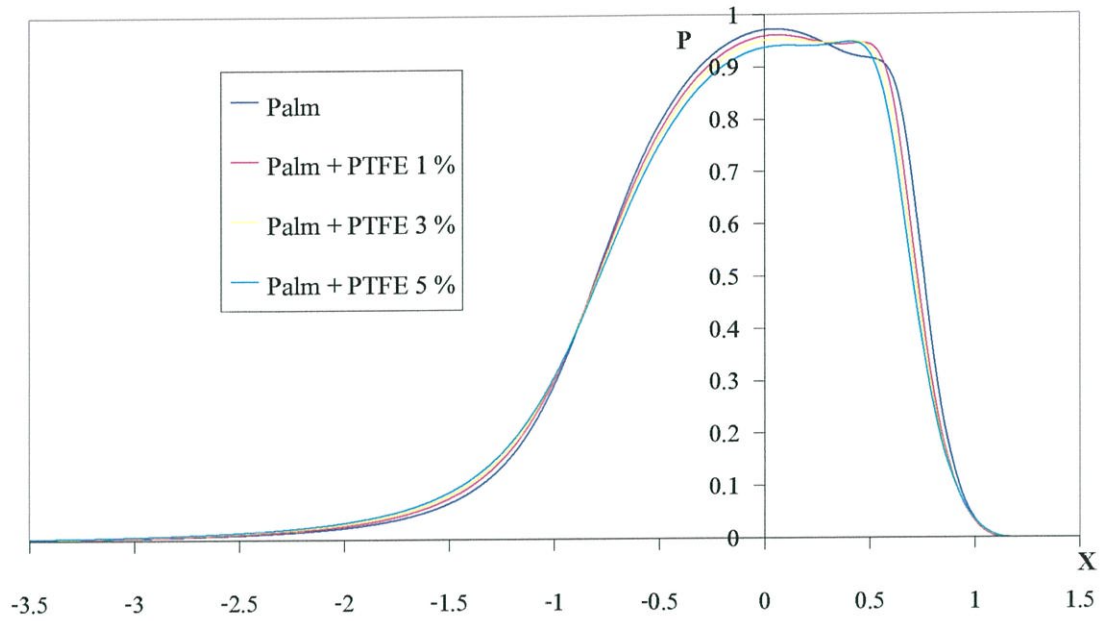
รูปที่ 6.104 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



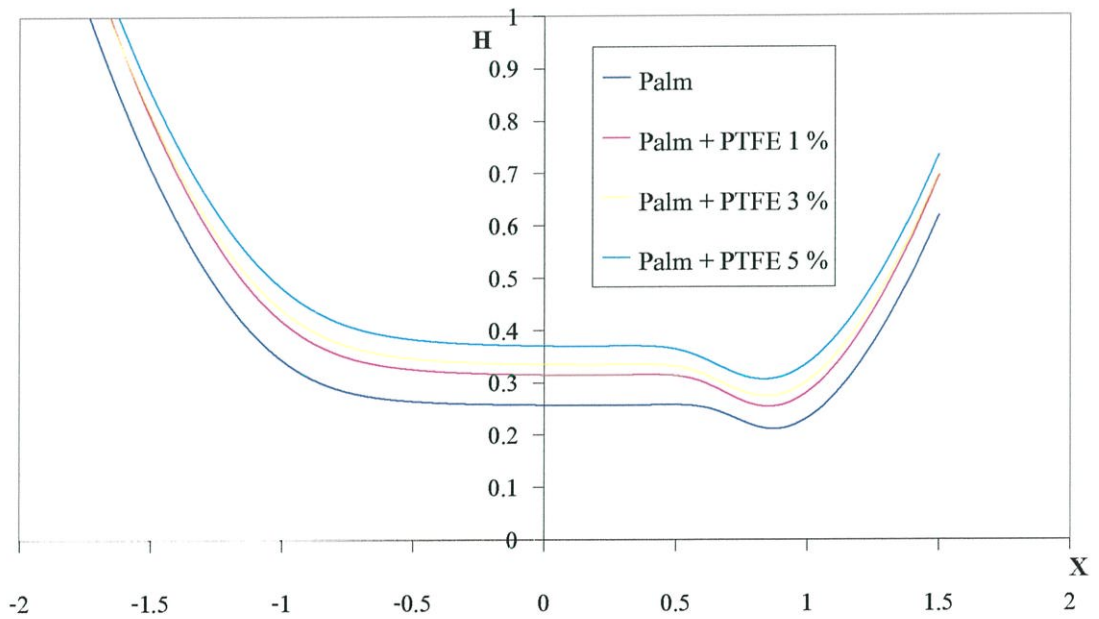
รูปที่ 6.105 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



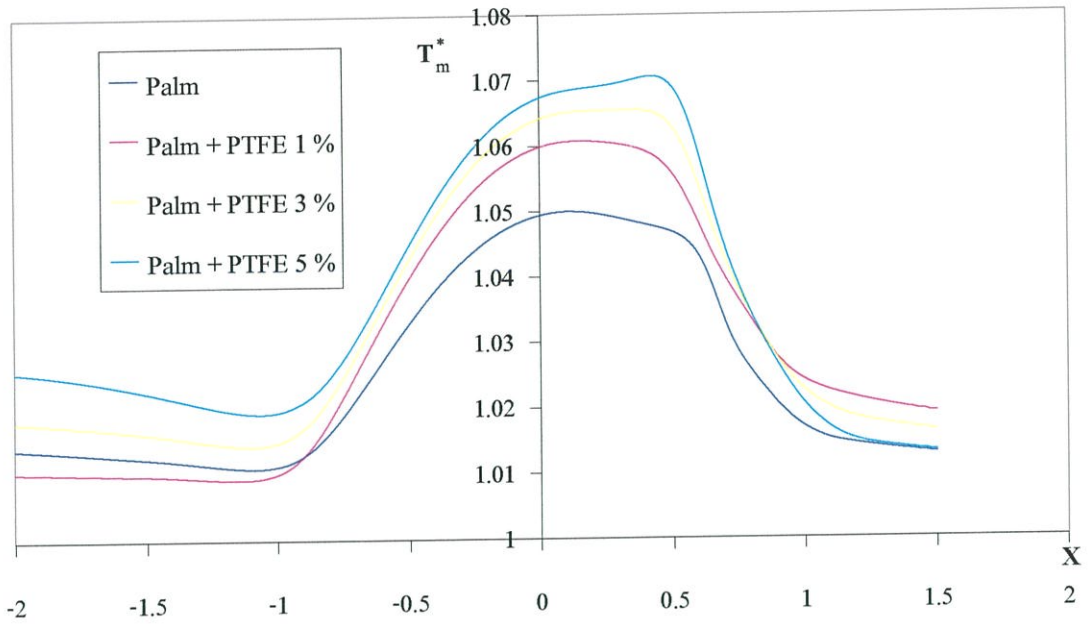
รูปที่ 6.106 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์



รูปที่ 6.107 แสดงการกระจายความดันของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีนในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์

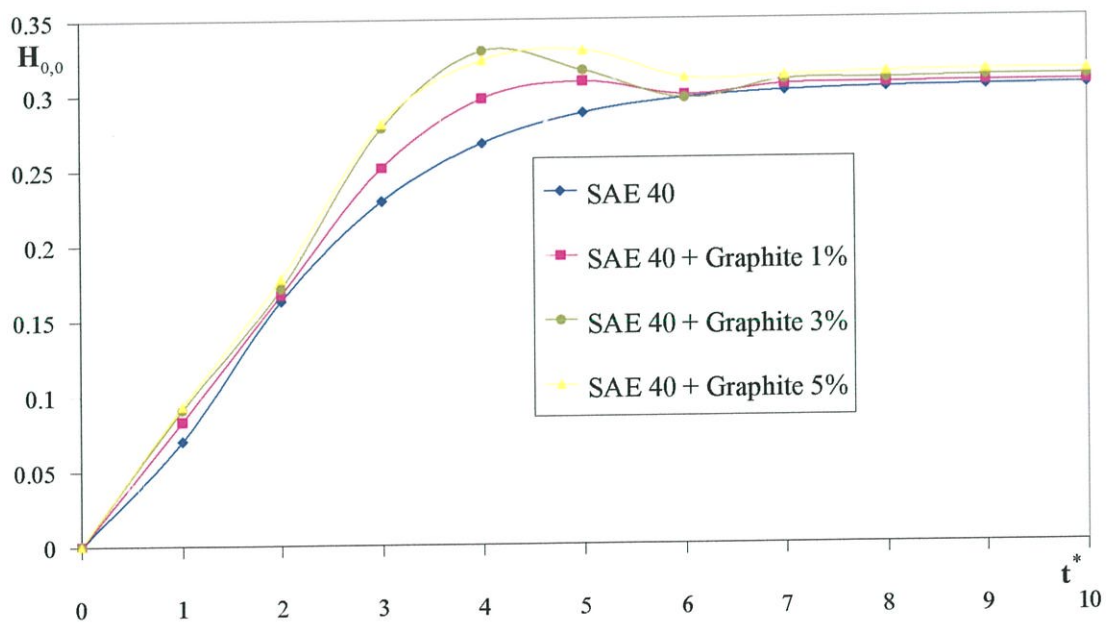


รูปที่ 6.108 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีนในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์

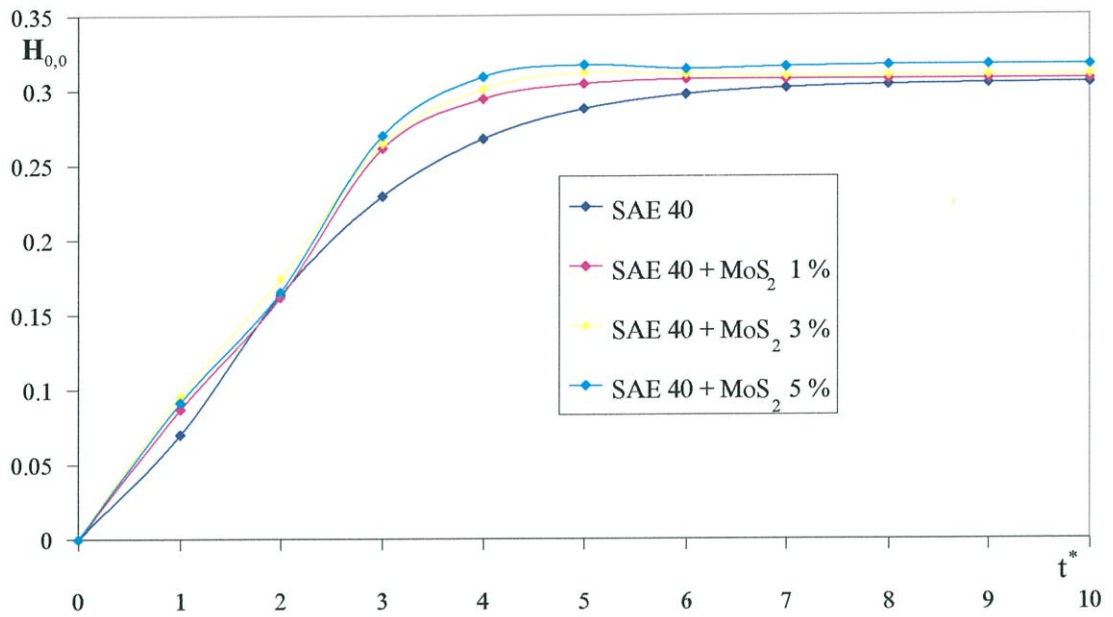


รูปที่ 6.109 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %
เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีนในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์

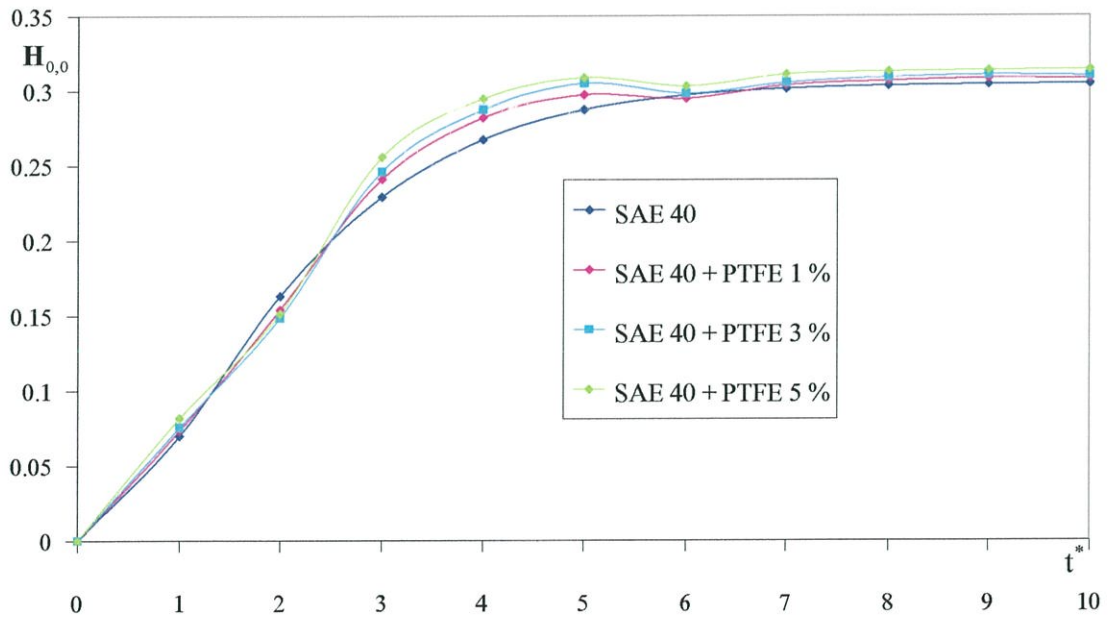
จากรูปที่ 6.110 ถึงรูปที่ 6.118 แสดงถึงความหนาฟิล์มที่ตำแหน่ง $X = 0$ ของน้ำมันชนิดต่างๆ



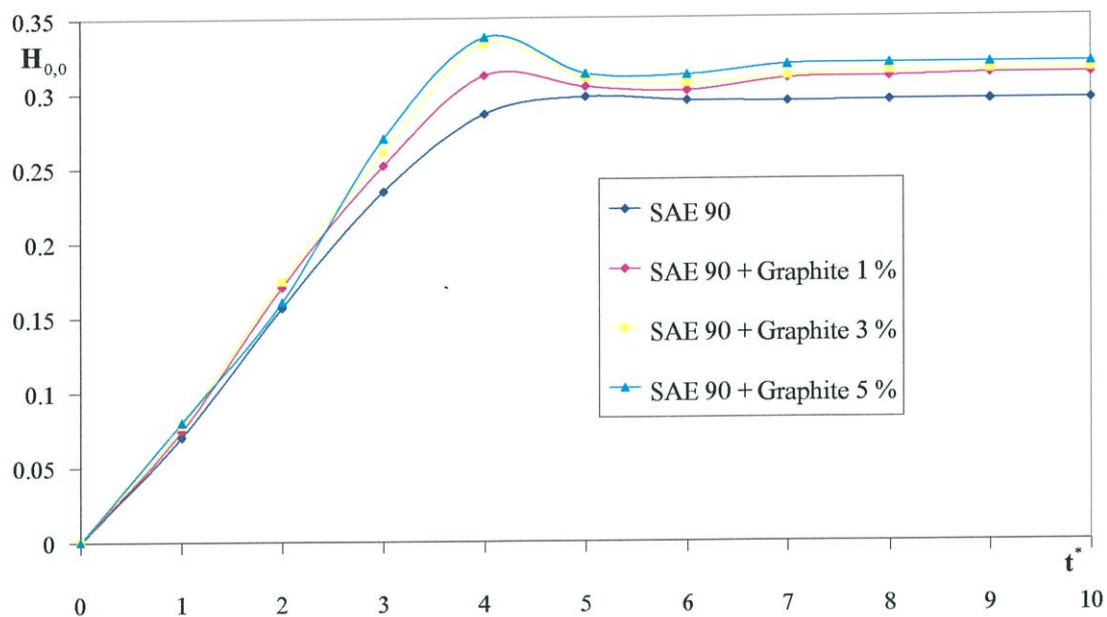
รูปที่ 6.110 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ
ที่ตำแหน่ง $X = 0$



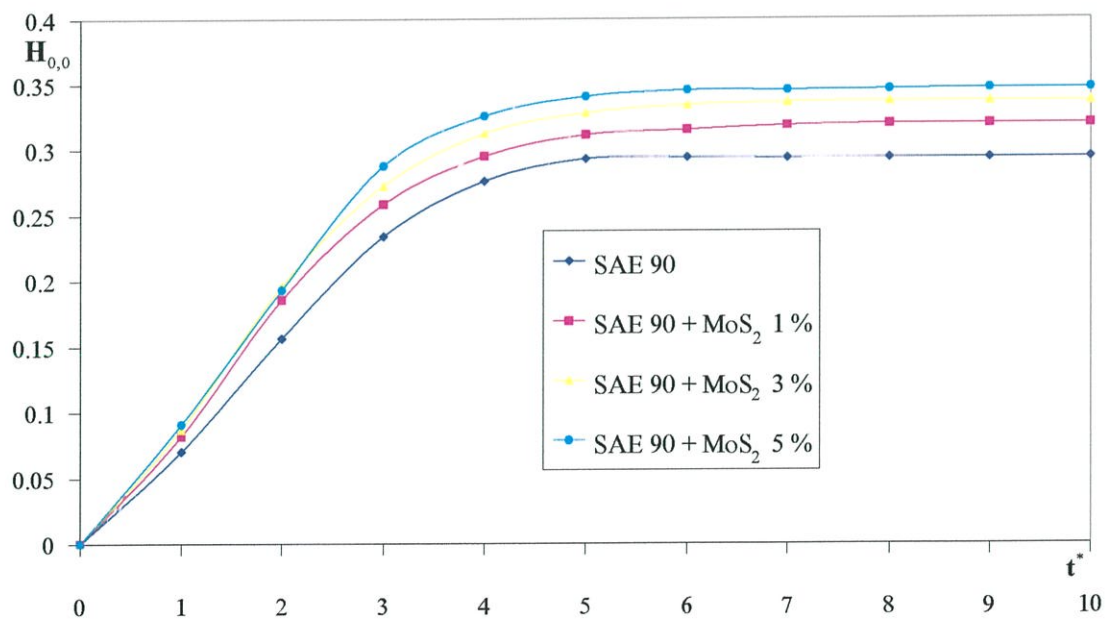
รูปที่ 6.111 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



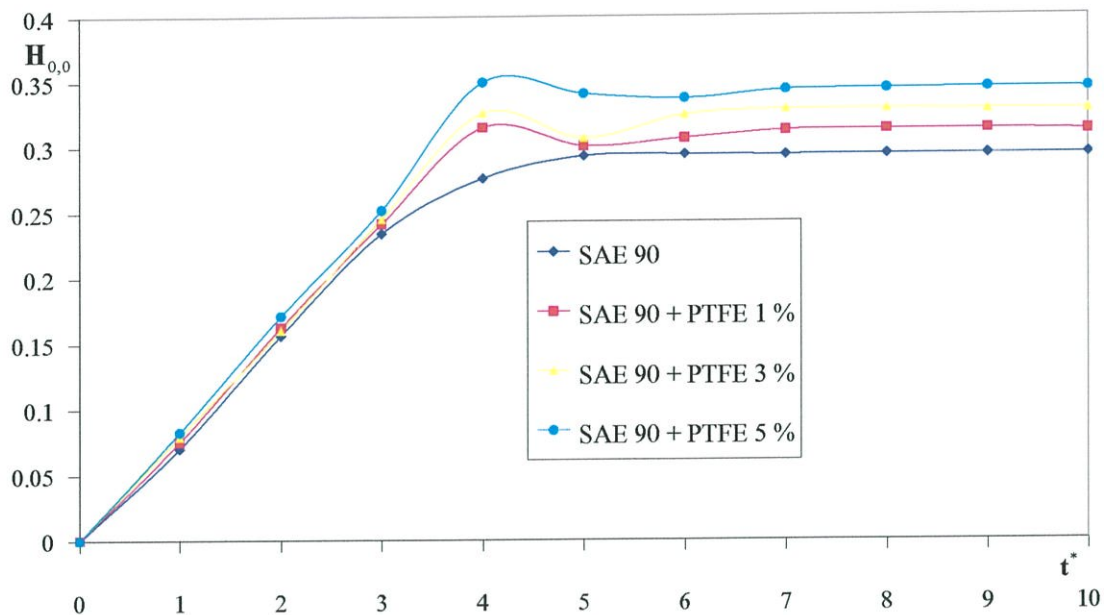
รูปที่ 6.112 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิน ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



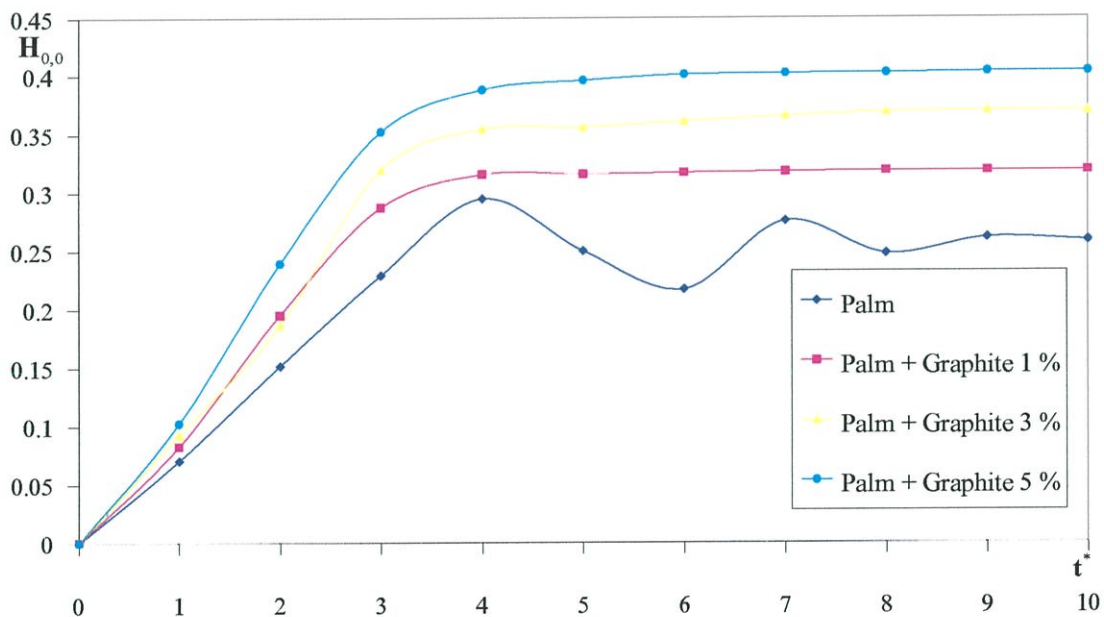
รูปที่ 6.113 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$



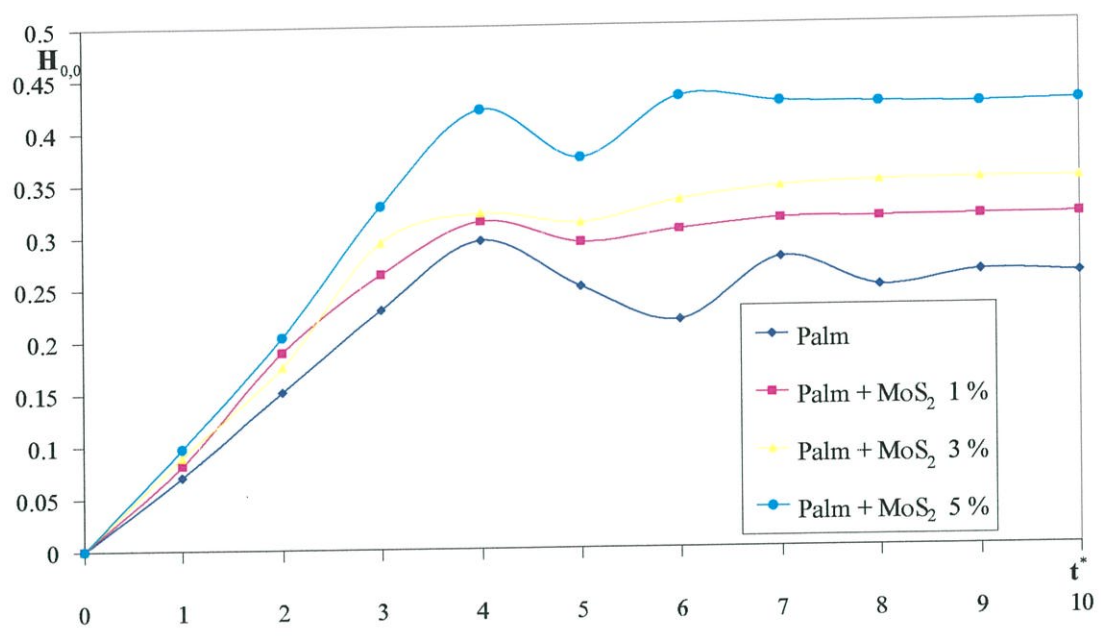
รูปที่ 6.114 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



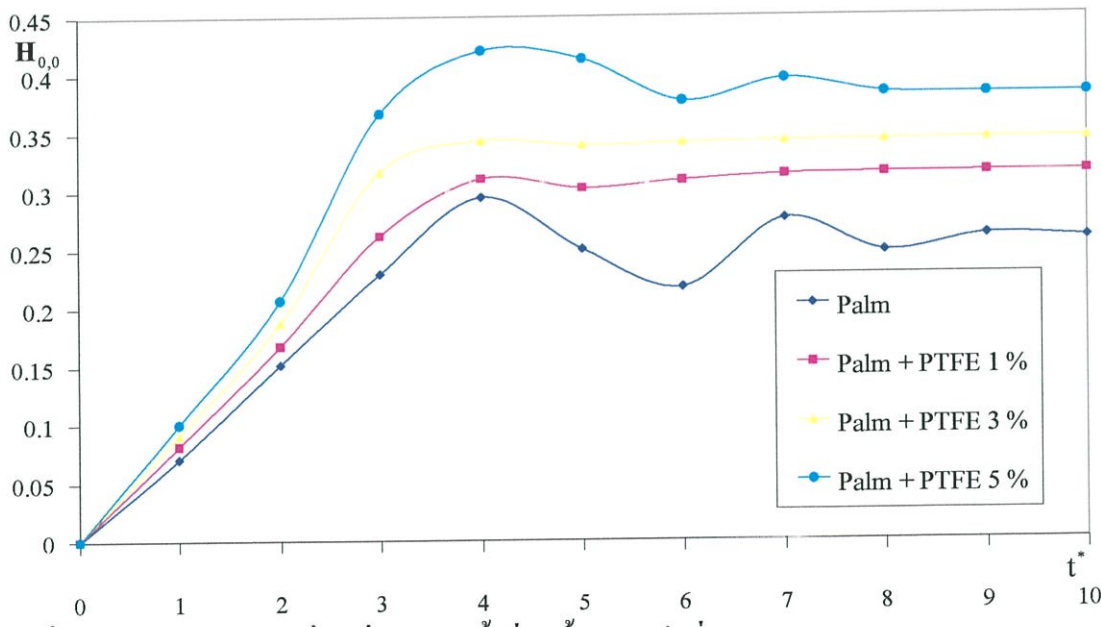
รูปที่ 6.115 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิน ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



รูปที่ 6.116 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



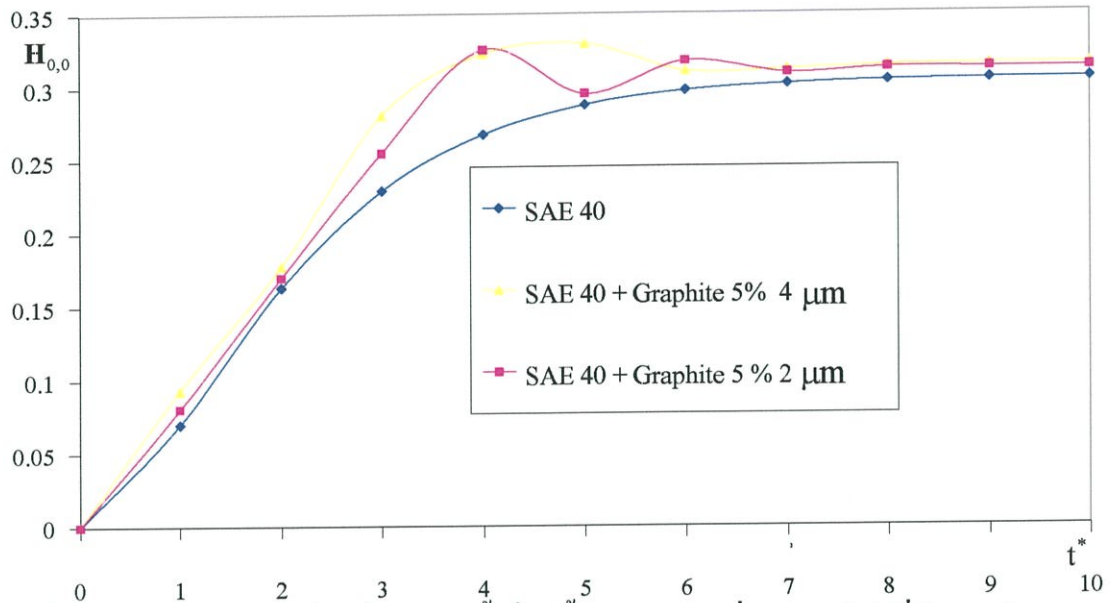
รูปที่ 6.117 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% ที่ผสมโมลิตินัมไดไซไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



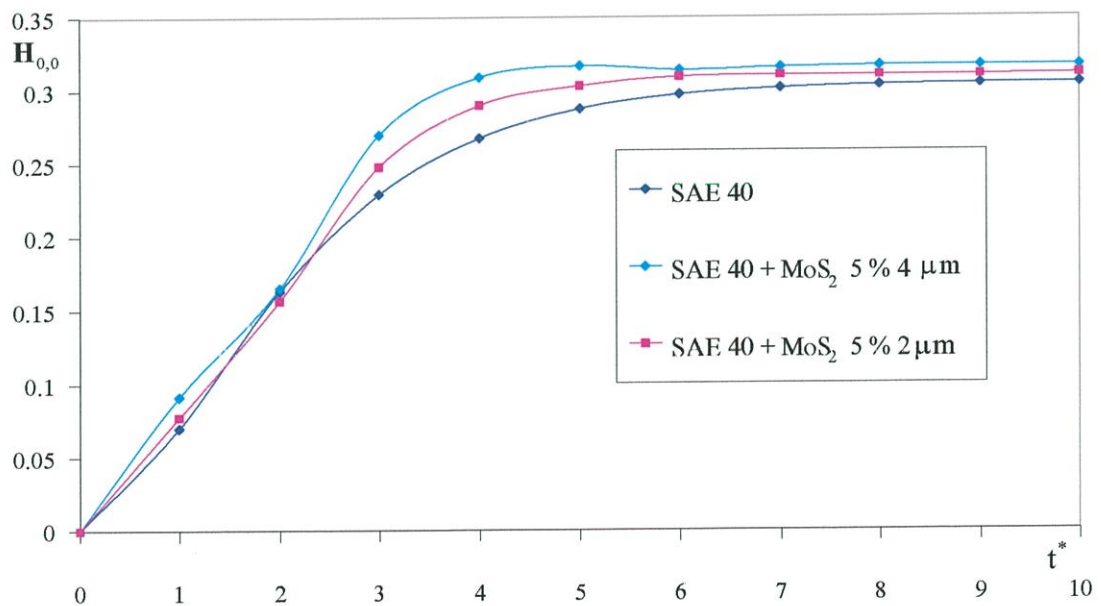
รูปที่ 6.118 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทินในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$

6.2 ผลเนื่องจากขนาดของอนุภาค

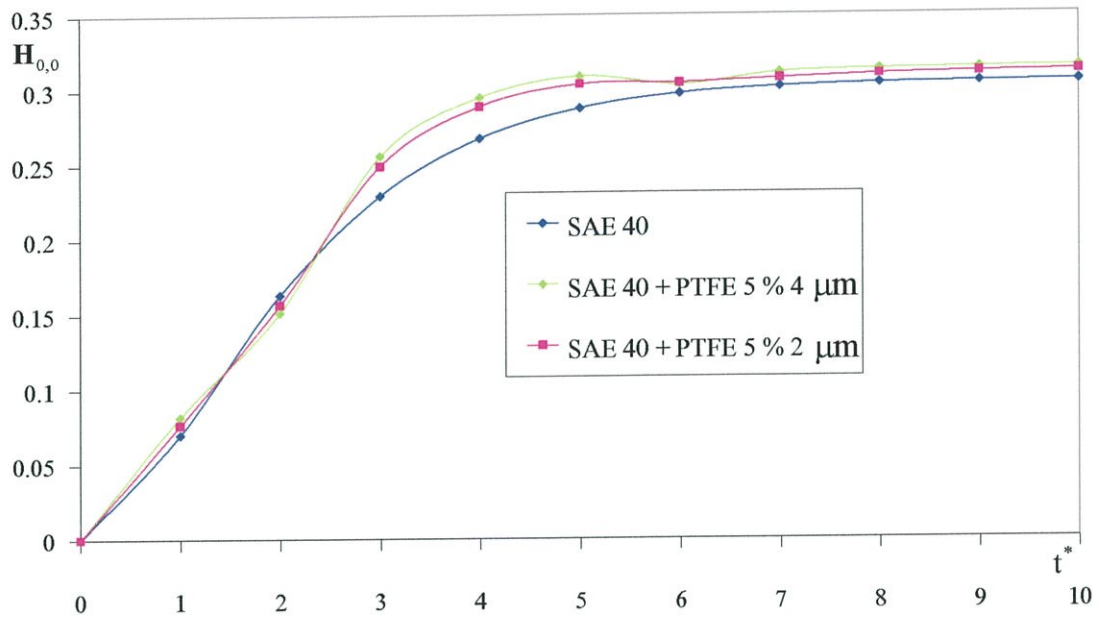
ขนาดของอนุภาคจะมีผลต่อความดัน ความหนาฟิล์มเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นจะเข้าไปรบกวนรับภาระได้กว้างมากขึ้น จากรูปที่ 6.119 ถึง 6.127 แสดงถึงความหนาฟิล์มที่ตำแหน่ง $X = 0$ ของน้ำมันชนิดที่ใช้สารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดต่างๆ ที่มีส่วนผสมที่ 5 %



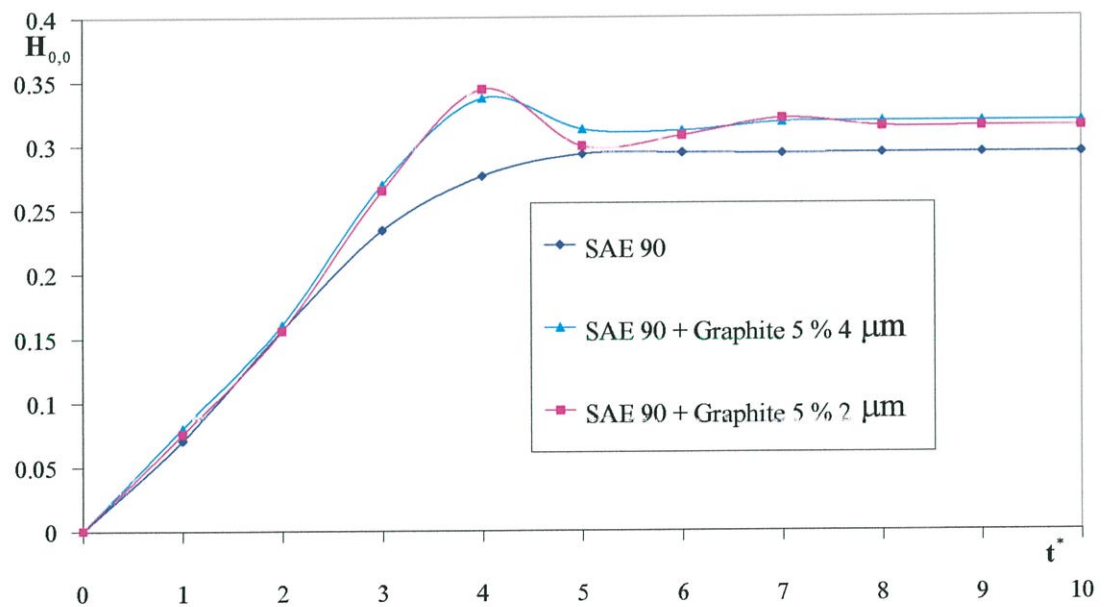
รูปที่ 6.119 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสมกราไฟต์ที่มีขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$



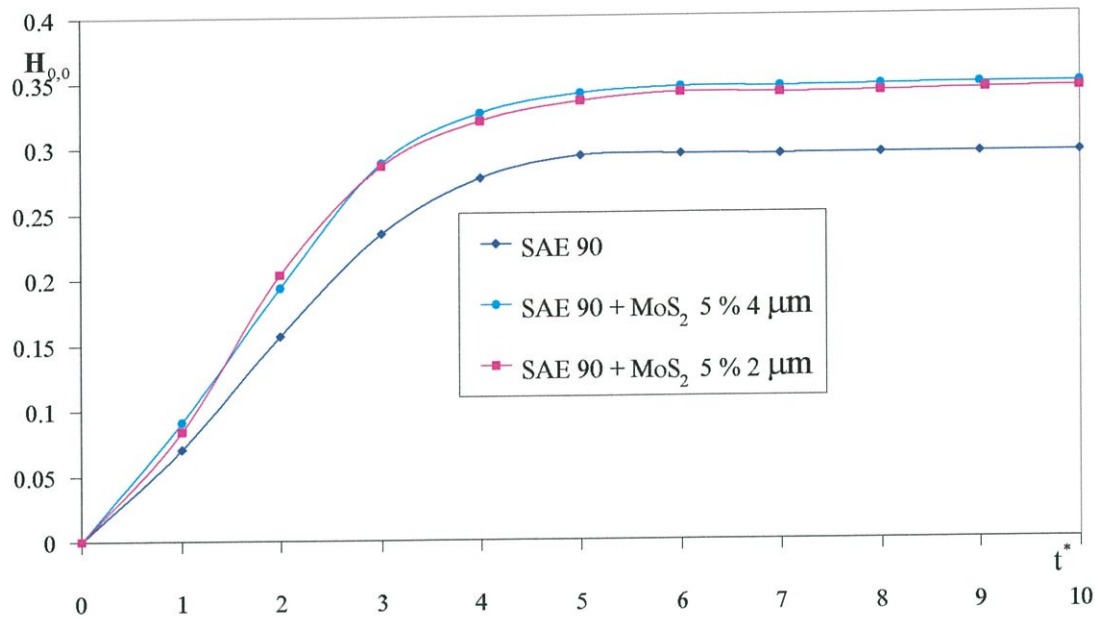
รูปที่ 6.120 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



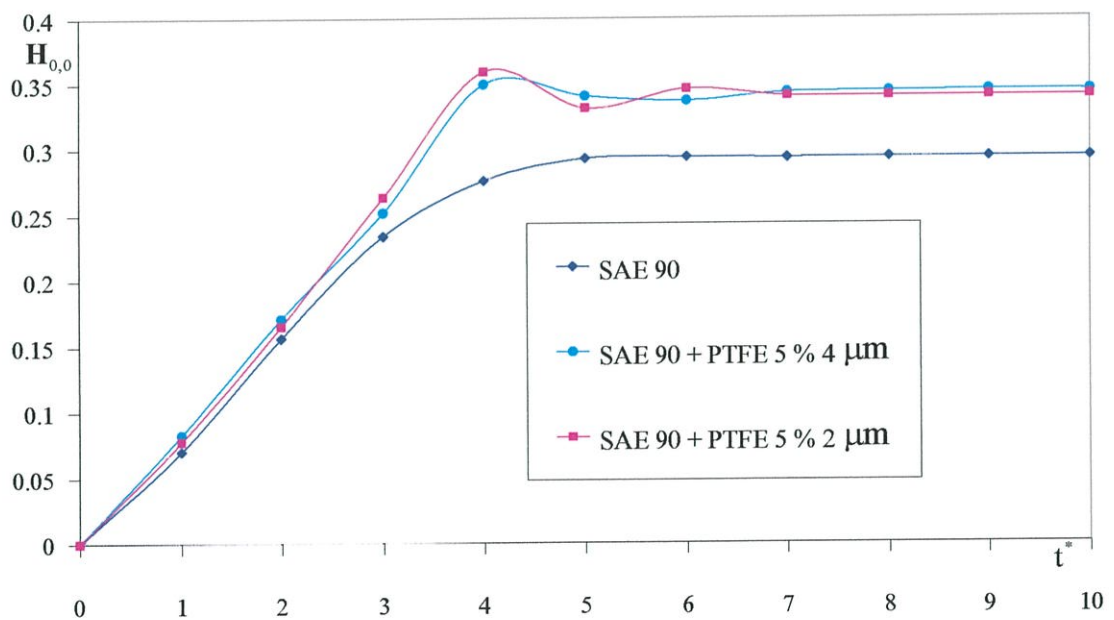
รูปที่ 6.121 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 40 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิน ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



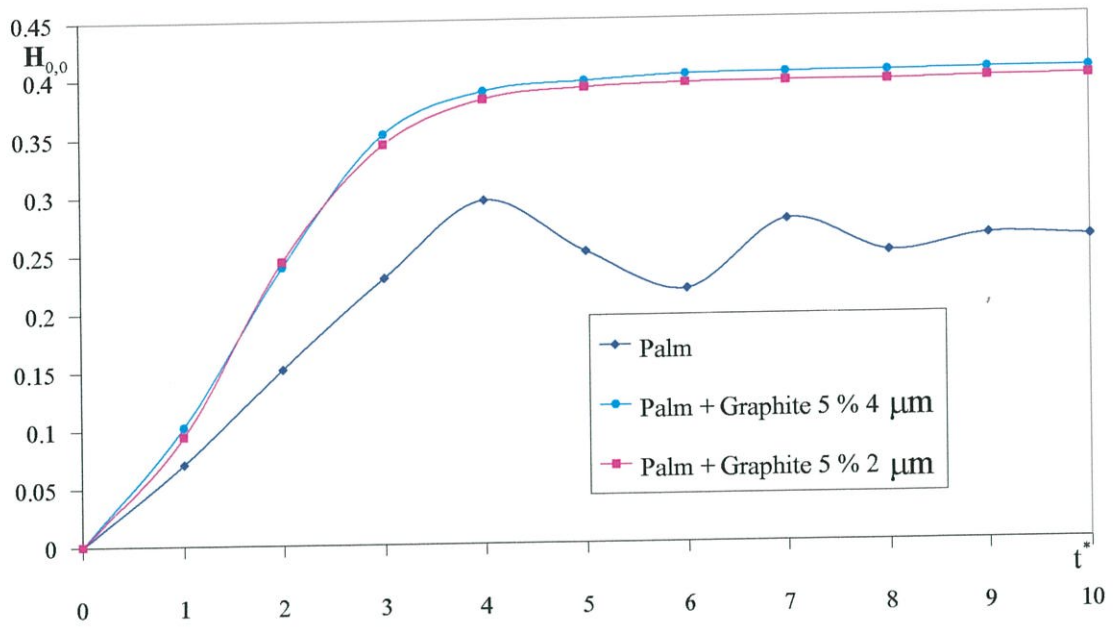
รูปที่ 6.122 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ที่มีขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$



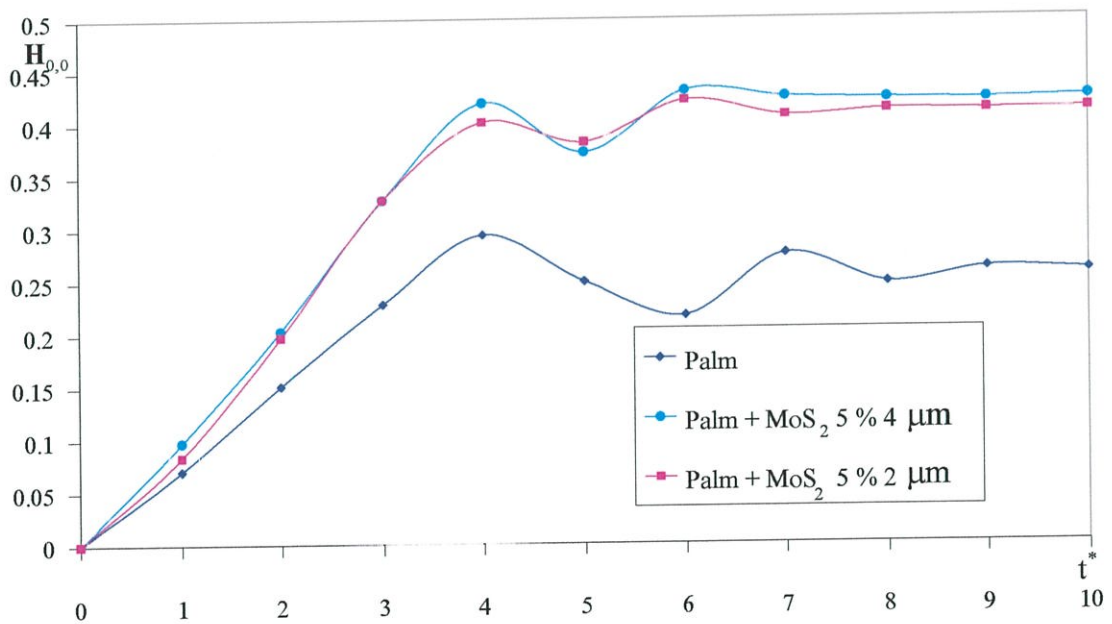
รูปที่ 6.123 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมโมลิดินัมไดไซไฟด์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



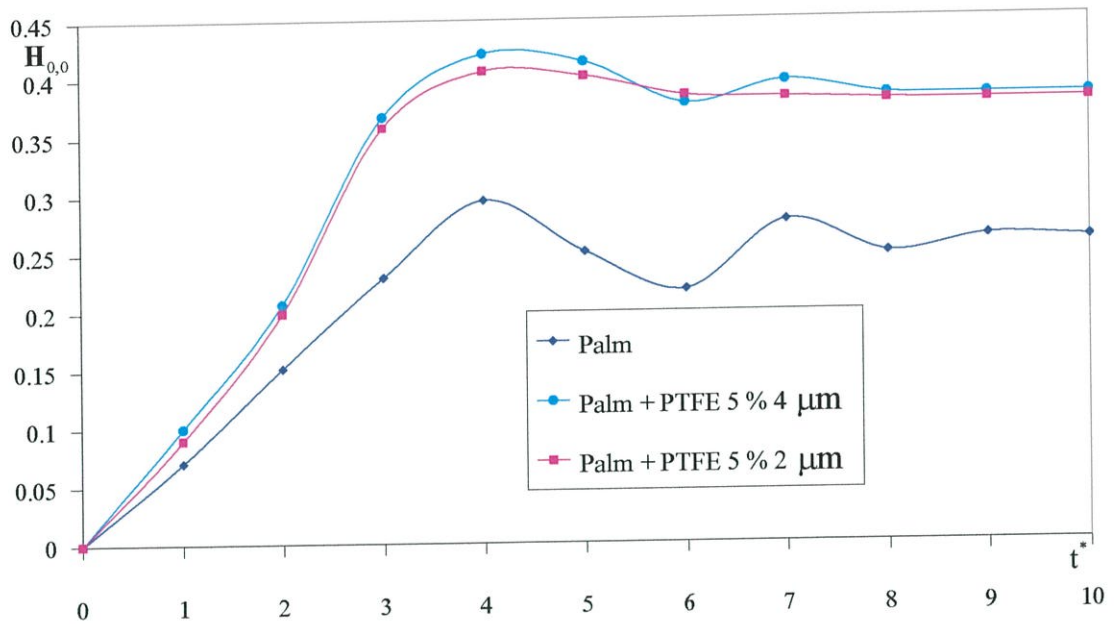
รูปที่ 6.124 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกิ้งที่ใช้น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิน ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



รูปที่ 6.125 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% ที่ผสมกราไฟต์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



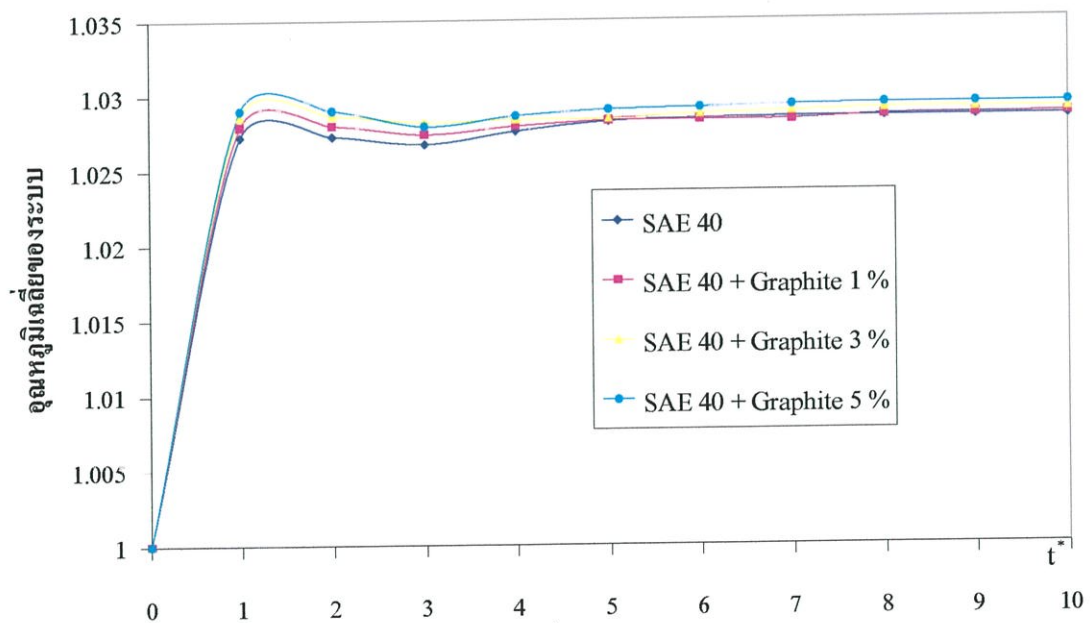
รูปที่ 6.126 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% ที่ผสม โมลิบดีนัมไดไซไฟต์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



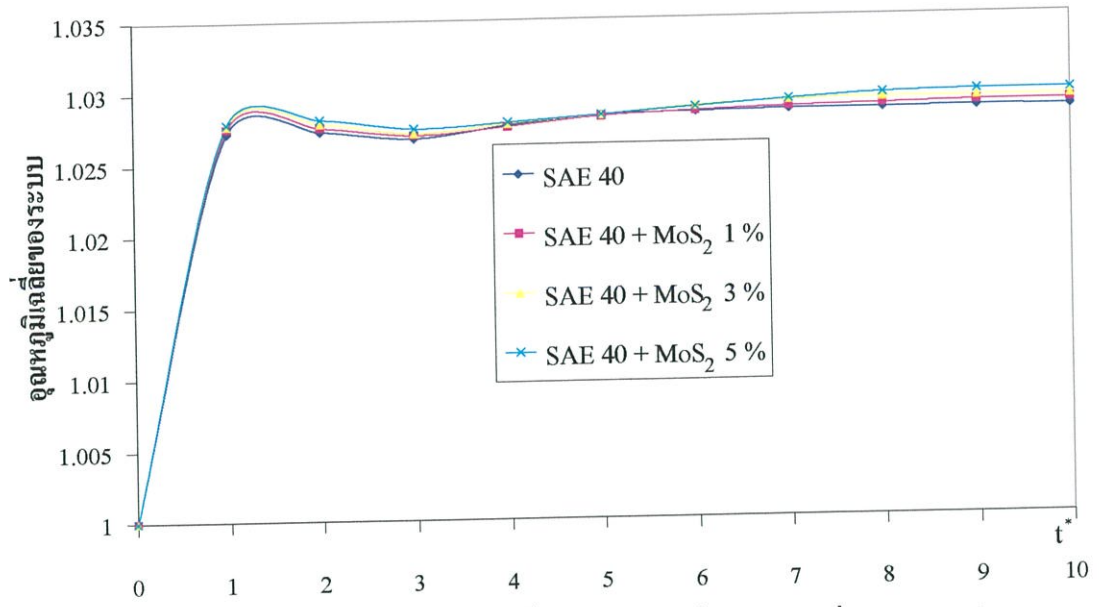
รูปที่ 6.127 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %

ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีนที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$

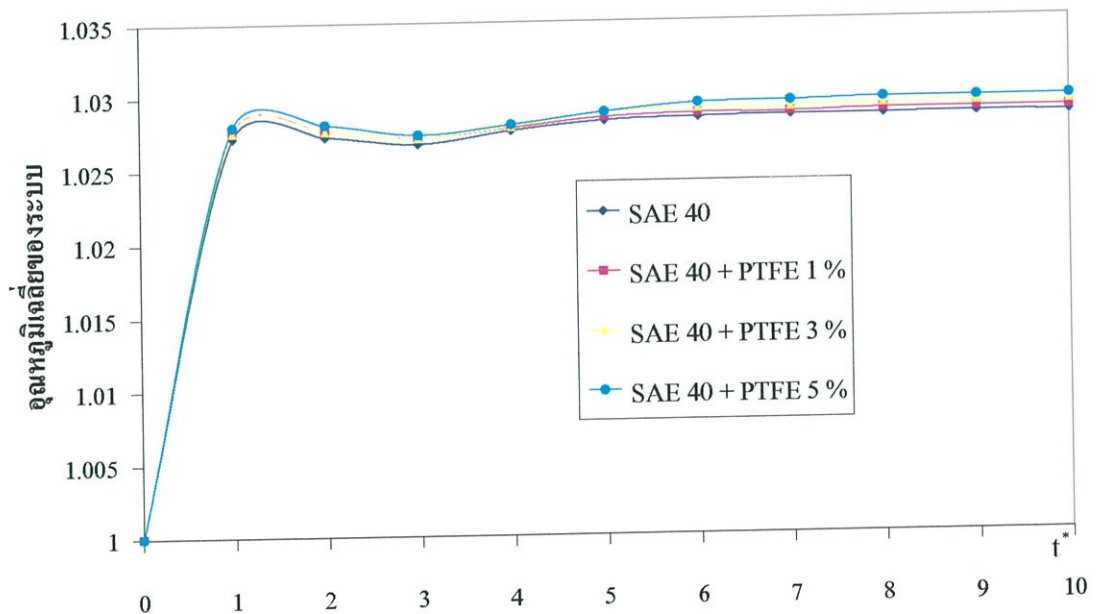
จากรูปที่ 6.128 ถึง 6.136 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบเมื่อทำการเติมสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปในอัตราส่วนต่างๆ



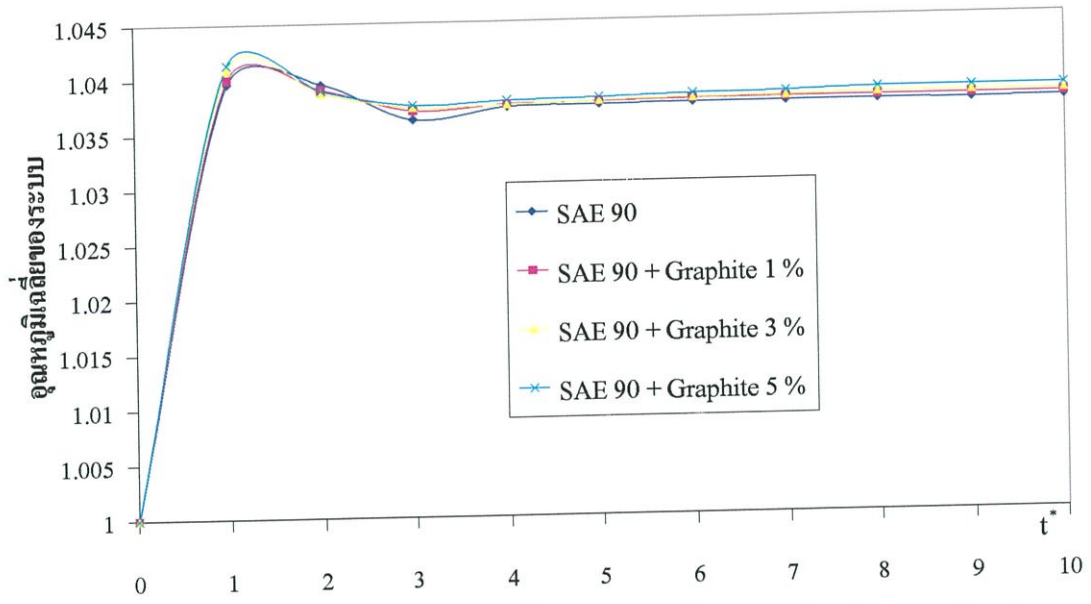
รูปที่ 6.128 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 40 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ



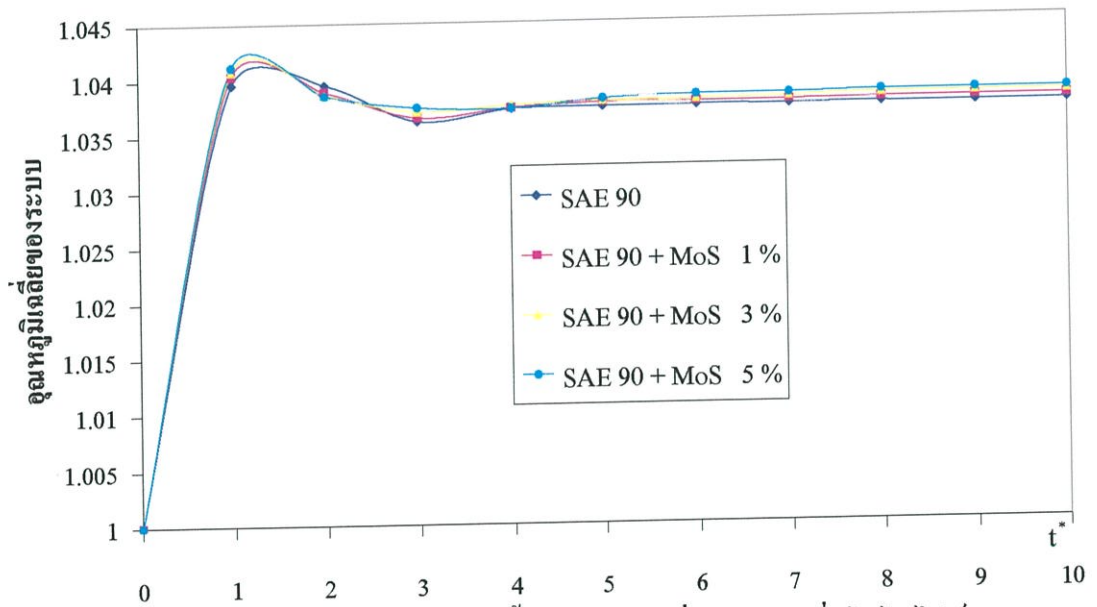
รูปที่ 6.129 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆ



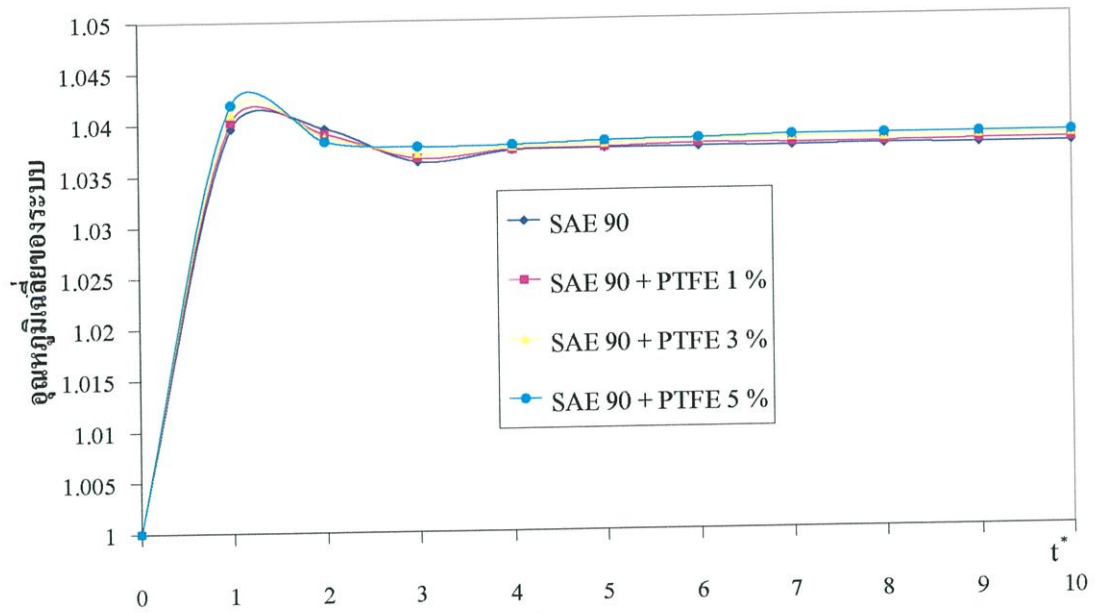
รูปที่ 6.130 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 40 ที่ผสม โพลีเตตาฟลูออโรเอทเทิน ในอัตราส่วนต่างๆ



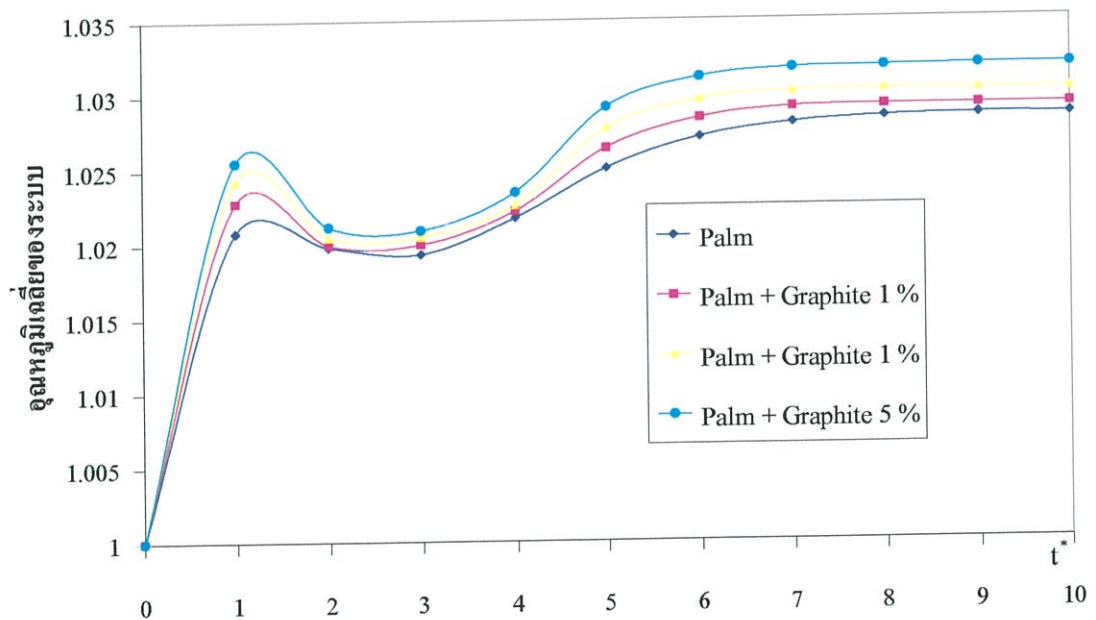
รูปที่ 6.131 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ



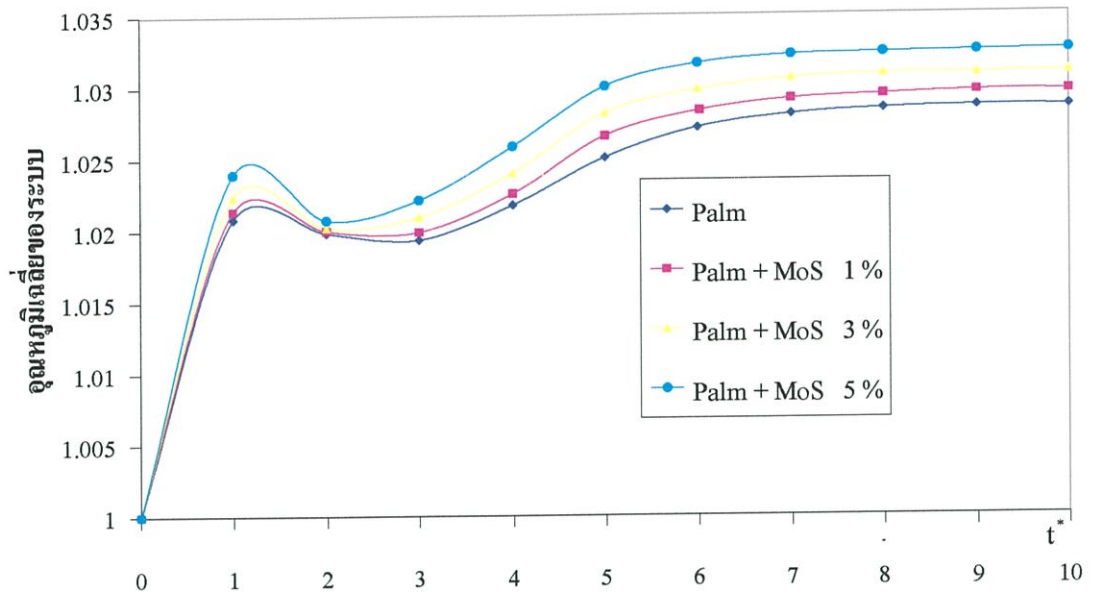
รูปที่ 6.132 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสมโมลิตินัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆ



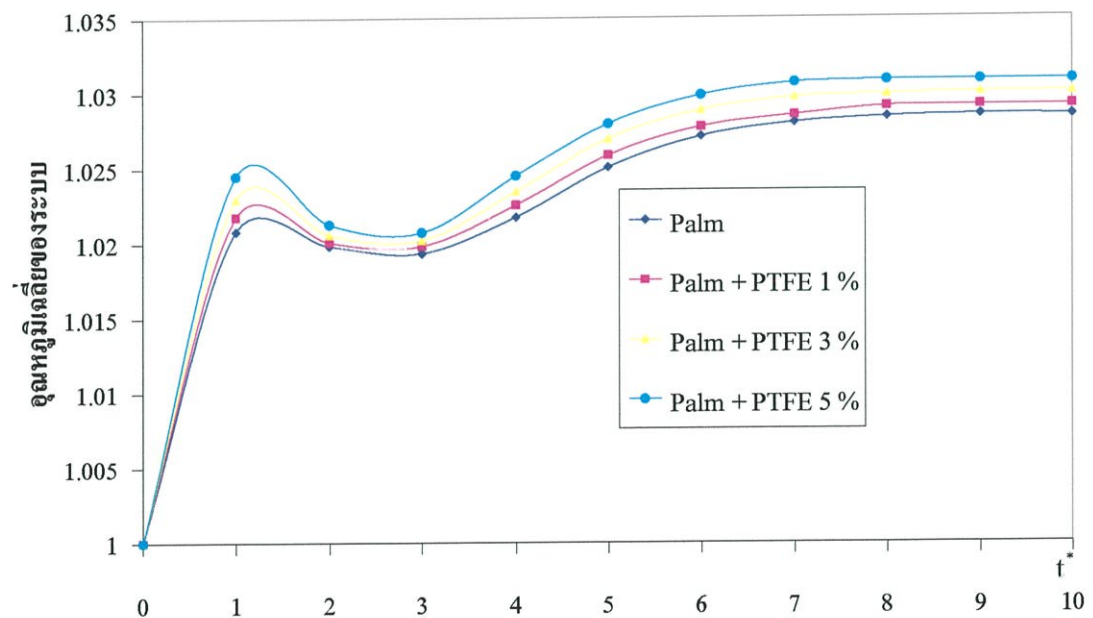
รูปที่ 6.133 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 6.134 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 % ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ

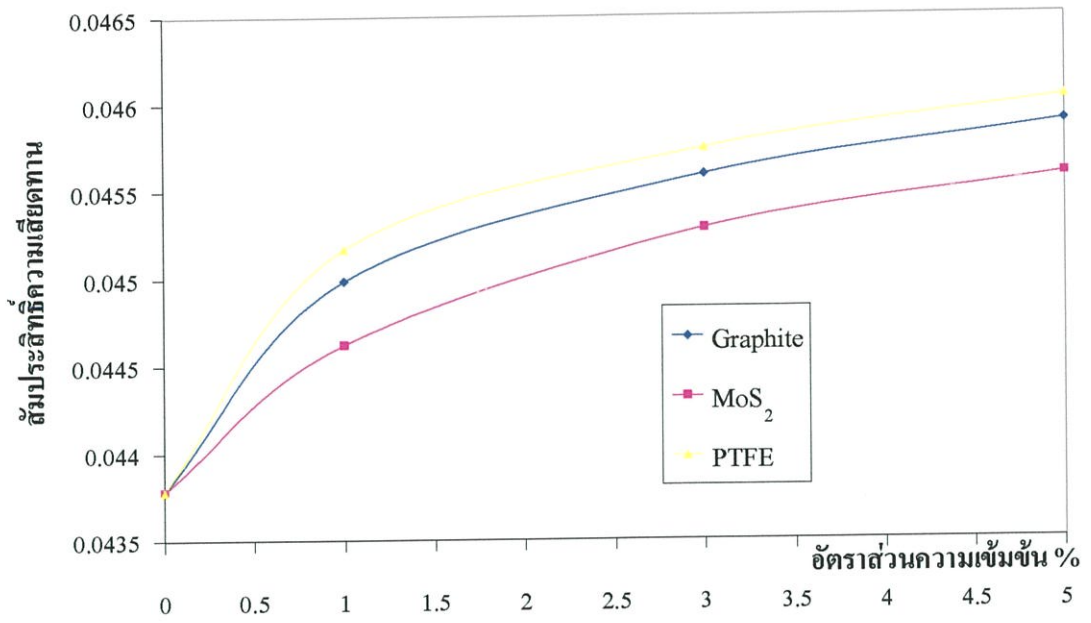


รูปที่ 6.135 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% ที่ผสมโมลิบดีนัมไดซไฟด์ในอัตราส่วนต่างๆ

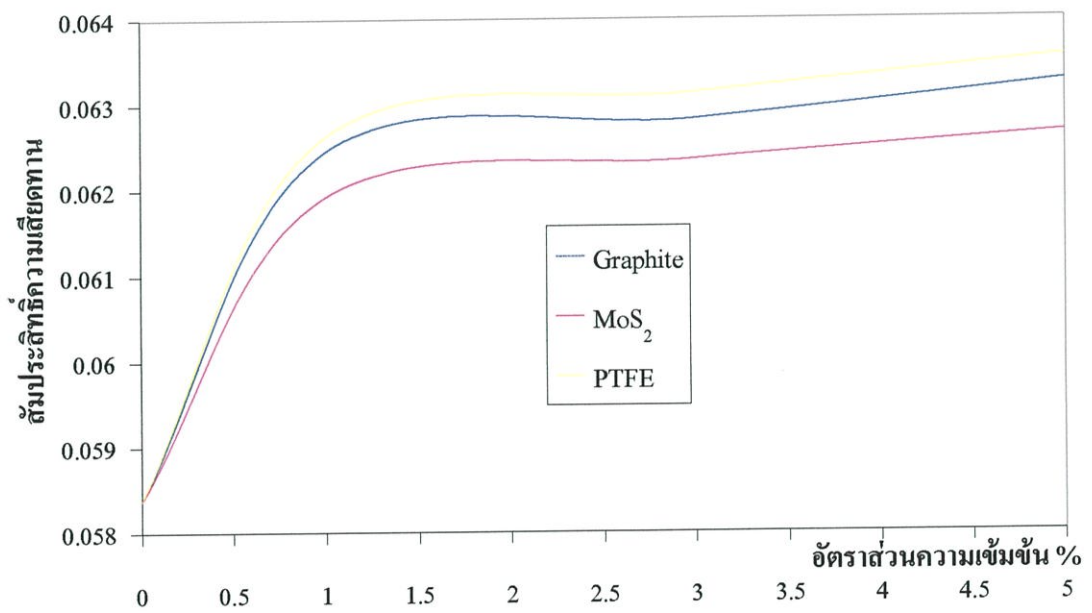


รูปที่ 6.136 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1% ที่ผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทินในอัตราส่วนต่างๆ

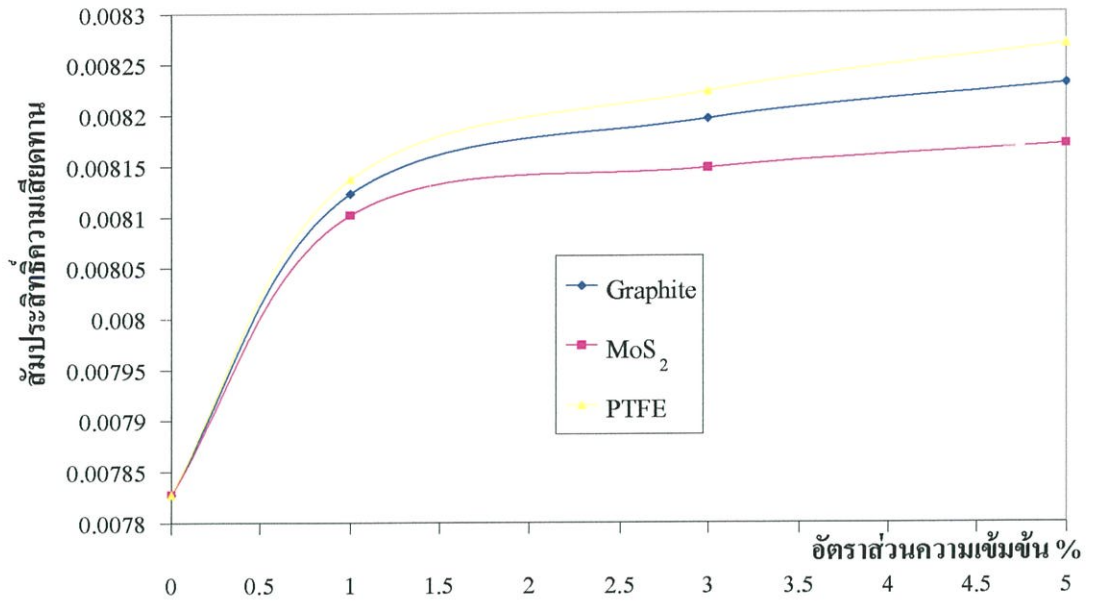
จากรูปที่ 6.137 ถึง 6.139 แสดงถึงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงในน้ำมันตัวสามชนิดในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 6.137 แสดงผลของสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมัน SAE 40

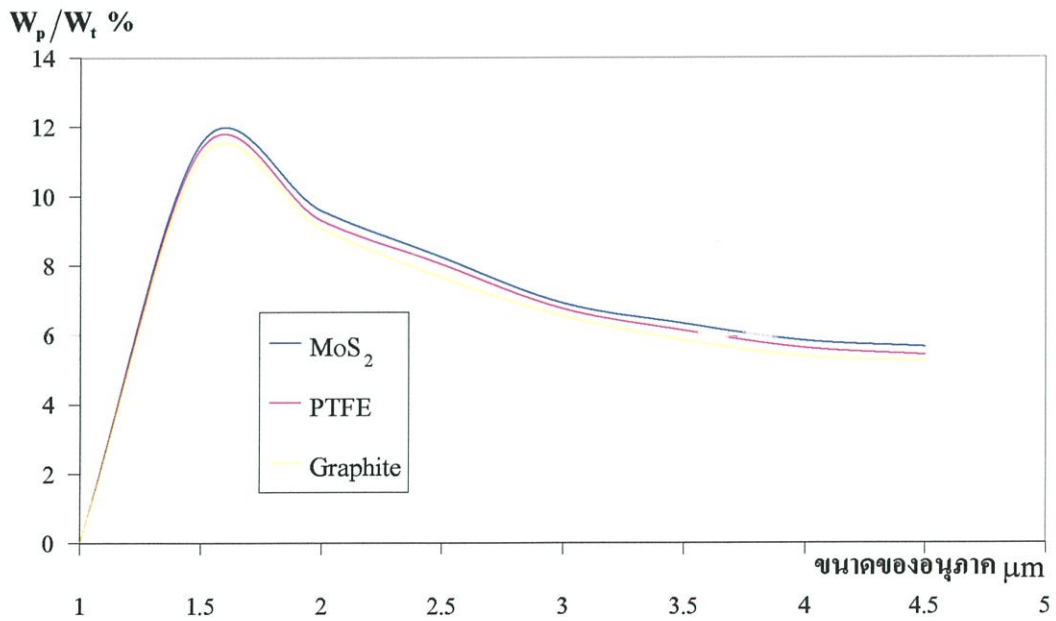


รูปที่ 6.138 แสดงผลของสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมัน SAE 90

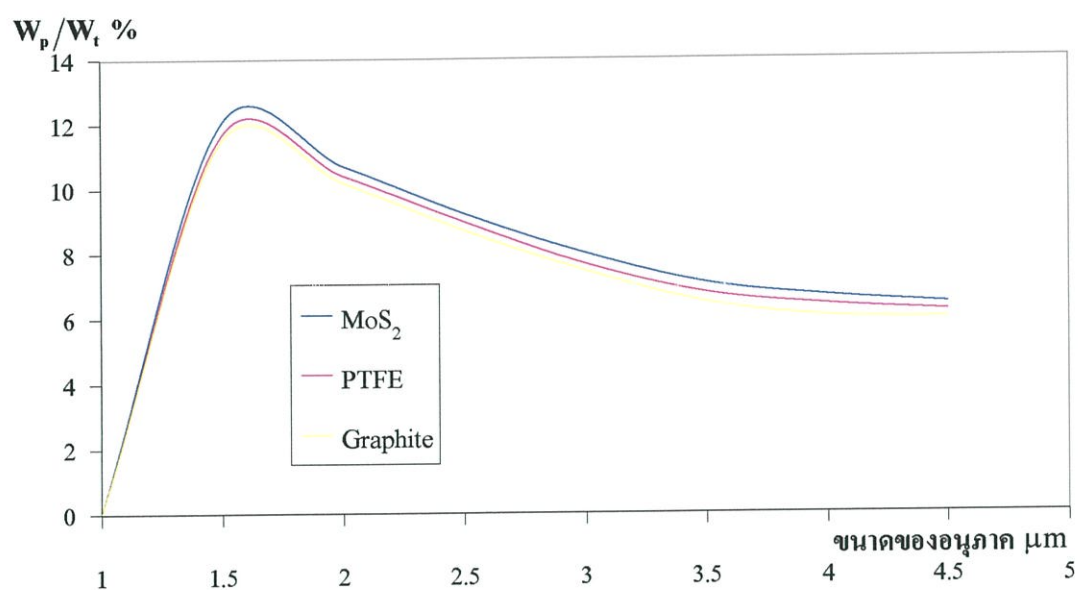


รูปที่ 6.139 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมันปาล์ม
ที่ผสม ZDPT 1 %

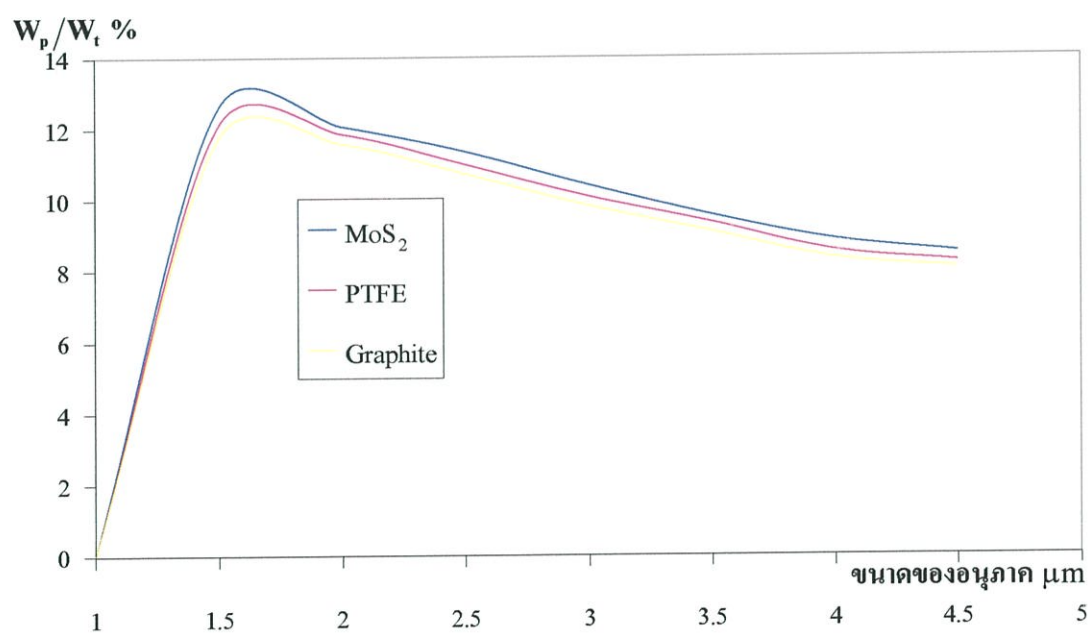
รูปที่ 6.140 ถึง 6.142 แสดงถึงภาระของอนุภาคต่อภาระรวมเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของ
อนุภาค



รูปที่ 6.140 แสดงภาระที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 5% ของน้ำมัน SAE 40



รูปที่ 6.141 แสดงการที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 5% ของน้ำมัน SAE 90



รูปที่ 6.142 แสดงการที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 5% ของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %

6.3 ผลเนื่องจากความแข็งของอนุภาค

ความแข็งของอนุภาคมีผลต่อการรับภาระพิจารณาจากรูปที่ 6.140 ถึง 6.142 จะเห็นว่า โมลิบดีนัมไดซไฟด์จะสามารถรับภาระได้ดีกว่าโพลีเตตาฟูโอโลเอตเทลินและกราไฟต์ เนื่องจาก โมลิบดีนัมไดซไฟด์มีความแข็งมากกว่าสองตัวที่เหลือ

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยใช้ น้ำมัน SAE 40, SAE 90 และ น้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1 % เป็นน้ำมันหล่อลื่นและทำการผสม กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟด์ และ โพลีเตตาฟูโอโลเอเดเทลิน เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง จากการใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนพบว่า น้ำมัน SAE 40 และ SAE 90 มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน ส่วนน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1 % มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนแบบโคลาแดนท์ เมื่อเติมสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปจะทำให้พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบนอนนิวโตเนียนแบบโคลาแดนท์ และเมื่อยังเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นจะยังทำให้พฤติกรรมการไหลยังเป็นโคลาแดนท์มากยิ่งขึ้น แล้วนำไปเขียนสมการเรย์โนลด์สำหรับสารหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียน โดยใช้แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ และสมการพลังงาน แล้วนำสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานที่ได้นำไปแก้โดยวิธีการเชิงตัวเลข โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องประกอบกับวิธีมัลติกริด เพื่อทำการหาค่าการกระจายความดัน, อุณหภูมิและความหนาฟิล์มน้ำมัน โดยทำการจำลองกับลูกกิ้งที่หมุนอยู่บนแผ่นเลื่อน ซึ่งลูกกิ้งมีขนาด 50 mm รับภาระ 345,000 N/m สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเพิ่มส่วนผสมของสารหล่อลื่นของแข็งจะช่วยทำให้คุณลักษณะการหล่อลื่นมีผลที่ดีขึ้นแต่จะทำให้อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้น
2. เมื่อเพิ่มขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งจะช่วยทำให้คุณลักษณะการหล่อลื่นมีผลที่ดีมากกว่าสารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าแต่จะทำให้อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าสารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า
3. สารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจะช่วยรับแรงกระแทกและช่วยทำให้ลูกกิ้งเคลื่อนที่เข้าสู่ภาวะคงตัวได้ดีขึ้นและยังช่วยป้องกันการกระทบกันระหว่างลูกกิ้งกับแผ่นเลื่อนด้วย
4. สารหล่อลื่นของแข็งช่วยเพิ่มความหนาฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นจึงช่วยทำให้สามารถรับภาระได้มากขึ้นไปด้วย

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณและไม่ได้คำนวณหาอัตราส่วนผสมของสารหล่อลื่นของแข็งแต่ละชนิดที่เหมาะสมที่สุด และไม่ได้ทำการศึกษาผลของความเสียดทานและการสึกหรอของลูกกิ้งและแผ่นเลื่อนได้รับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Reynolds,O. 1886 **On the Theory of Lubrication and its Application to Mr.Beachamp Tower's Experiments.** Phil.Trans.Roy.Soc.,177,1886
- [2] Herzt,H. 1896 **Miscellaneous Paper by H.Herzt** ,Jones&Schort(eds),Macmillan ,London
- [3] Roelands,C.J.A. 1969 **Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils.** Druk,V.R.B.,Groingen,Netherland
- [4] Dowson,D.,and Higginson,G.R. 1966 **Elastohydrodynamic Lubrication:The Fundamental of Roller and Gear Lubrication.** Pergamon,Oxford
- [5] Najji,B.,Bou-Said,B.,and Berthe,D.,1989 **New Formulation for Lubrication with Non-Newtonian Fluids** ASME Journal of Tribology,Vol.111 pp.29-34
- [6] Rylander,H.G. 1966 **A Theory of Liquid-Solid Hydrodynamic Film Lubrication** ASLE Journal of the American Society of Lubrication Engineerings,pp.264-271
- [7] Rylander,H.G,Tolle,G.C. 1968 **Control of Whirl and Resonant Whip in a Full Journal Bearing by the Use of a Liquid-Solid Biphase Lubricant** ASLE Journal of the American Society of Lubrication Engineerings,pp.531-539
- [8] Khonsari, M.M., Esfahanian, V., 1988 **Thermoelastohydrodynamic Analysis of Solid-Lubricated Journal Bearings** ASME Journal of Tribology,Vol.110,pp.367-373
- [9] Khonsari, M.M., Wang, S.H., Qi, Y.L., 1989 **A Theory of Solid-Liquid Lubrication in Elastohydrodynamic Regime** ASME Journal of Tribology,Vol.111,pp.440-447
- [10] Khonsari, M.M., Wang, S.H., Qi, Y.L.,A, 1990 **Theory of Thermoelastohydrodynamic Lubrication of Liquid-Solid Lubricated Cylinders** ASME Journal of Tribology, Vol.112, pp.259-264
- [11] Hua, D.Y.,Khonsari, M.M., 1994 **Elastohydrodynamic Lubrication by Powder Slurries** ASME Journal of Tribology,Vol.118,pp.67-73
- [12] ประเสริฐ เทียนนิมิตร,ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์,ปานเพชร ชินินทร **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จก. หน้า 228-247**
- [13] Hamrock,B.J.,1994 **Fundamentals of Fluid Film Lubrication** McGraw-Hill
- [14] มงคล มงคลวงศ์โรจน์,ฮิโรมุ ฮาชิโมโตะ ,2536 **ทฤษฎีการหล่อลื่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

- [15] ประภัทร อรุณเมตตา, 2544 พฤติกรรมการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชของกาบรองดินเพลากลม
วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [16] Gohar, R., 1988 **Elastohydrodynamic** Ellis Horwood
- [17] Rohsenow, W.M., HERTNETT, J.P., and Ganic, E.N., 1985 , **Handbook of Heat Transfer
Fundamentals** Second Edition, McGraw-Hill, New York.
- [18] Lubrecht, A.A., Napel, W.E., Bosma, R. 1986, Multigrid, An Alternative Method for
Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydrodynamically Lubricated
Line Contacts ASME Journal of Tribology, Vol.108, pp.551-556
- [19] ปราโมทย์ เศษะอำไพ 2538, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [20] Trottenberg, U., Oosterlee, C.W., Schuller, A., Brandt, A., Oswald, P., and Stuben, K., 1998
Multigrid Academic Press
- [21] **Full Approximation Scheme** www.MG-net.net
- [22] Wagner, C., 1998 **Introduction to Algebraic Multigrid** Course Notes of an Algebraic
Multigrid Course at the University of Heidelberg
- [23] Venner, C.H., 1994 Higher-Order Multilevel Solvers for the EHL Line and Point Contact
Problem ASME Journal of Tribology, Vol.116, pp.741-750

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติทางกายภาพของสาร

ตารางที่ ก.1 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่น

	SAE 40	SAE90	น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1 %
ความหนืดปรากฏที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 40 °C $\mu_{0,40}$ (Pa · s)	0.1140574	0.1946304	0.0438
ความหนืดปรากฏที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 100 °C $\mu_{0,100}$ (Pa · s)	0.010814	0.0162545	0.00168
ความหนาแน่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 40 °C ρ_0 (kg/m ³)	879.625	892.8	929.3
ดัชนีการเปลี่ยนแปลงความหนืด-ความดัน Z	0.62	0.5685	0.38
สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ γ (1/K)	0.046	0.05763	0.02519
สัมประสิทธิ์การแผ่ความหนาแน่น β (1/K)	0.000771	0.00074	0.00074856
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน k (W/m · K)	0.125	0.126	0.526
ค่าความร้อนจำเพาะ C_p (J/kg · K)	1900	1870	2037.9

ตารางที่ ก.2 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของลูกกิ้งและแผ่นเดือน

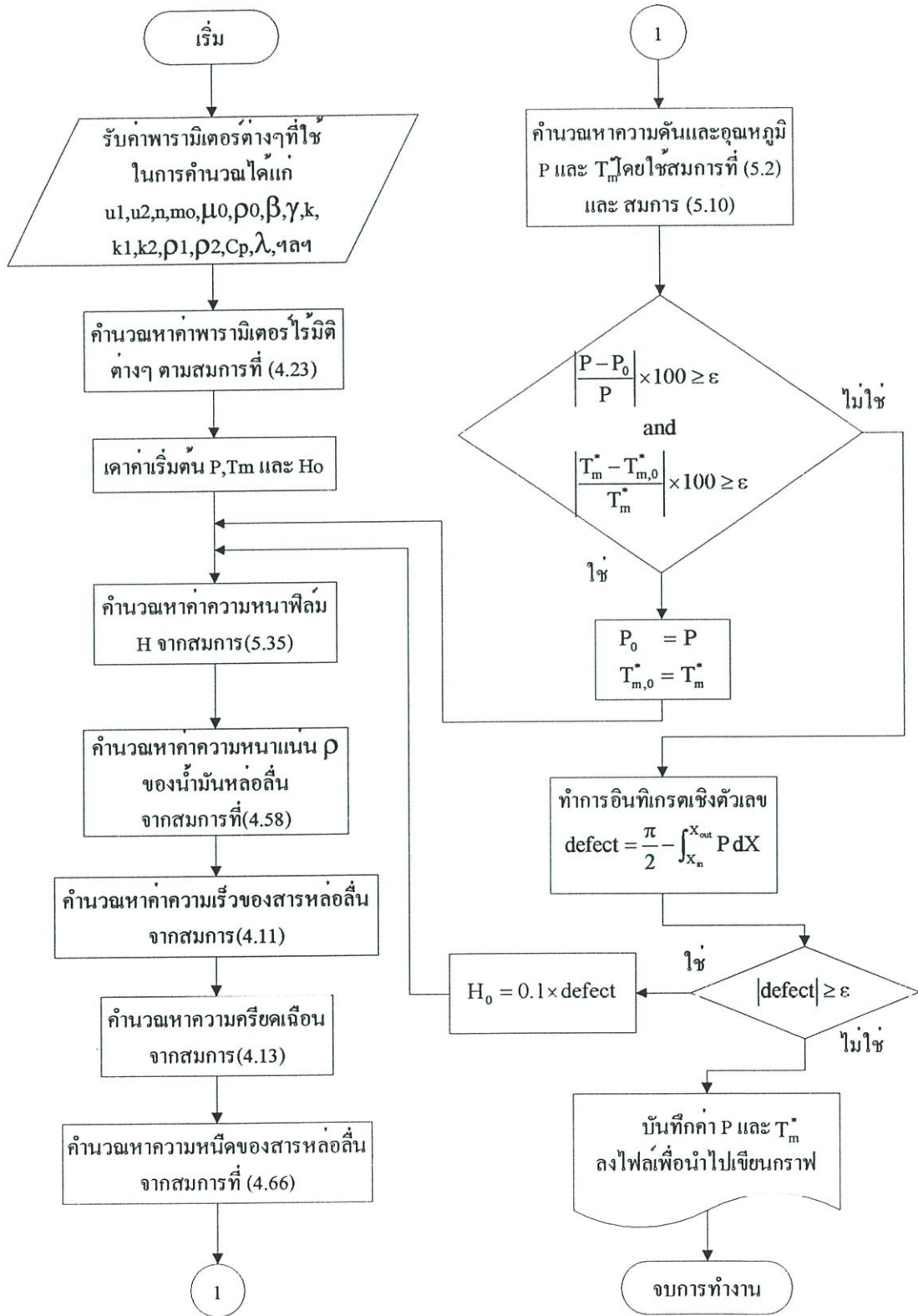
	ลูกกิ้ง	แผ่นเดือน
สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น E (Pa)	2.3×10^{11}	2.3×10^{11}
อัตราส่วน بواسง ν	0.3	0.3
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k_{1,2}$ (W/m · K)	52	52
ค่าความร้อนจำเพาะ $C_{p,1,2}$ (J/kg · K)	460	460

ตารางที่ ก.3 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นของแข็ง

	กราไฟต์	โมลิดินัมไดไซไฟต์	โพลีเตตาฟูโอโล- เอตเทลิน
ความหนาแน่น ρ_p (kg/m ³)	2267	4800	2652
ความแข็งจากการทดลองแบบไฮร- เนล H_d (Pa)	1.95×10^9	3.139×10^9	2.74×10^9
สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น E_p (Pa)	2.24×10^{10}	3.4×10^{10}	2.95×10^{10}
อัตราส่วนบิวของ ν_p	0.15	0.13	0.13
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f_p	0.12	0.1	0.125

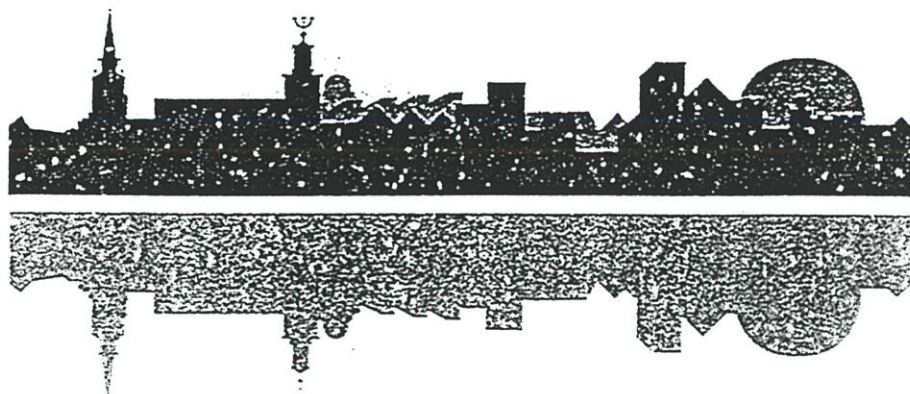
ภาคผนวก ข

Flow chat ที่ใช้ในการคำนวณ



ภาคผนวก ค

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



Nordtrib 2002

Keynotes and Abstracts

The 10th Nordic Symposium on Tribology
Stockholm, June 9-12, 2002



Organized by KTH,
Royal Institute of Technology
Stockholm, Sweden



Leaf Coppin

34 rue Belvalette
62200 Boulogne sur Mer
France

Tel: +33-32187-2521

Fax: +33-32187-0511

email: leafco@wanadoo.fr

Dr. M. Mongkolwongrojn
Electro-Mechanical Engg. Lab.
Mechanical Engg. Dept.
King Mongkut's Inst. of Tech. Chaloongkrung Rd,
Ladkrabang
Bangkok 10520
Thailande

25/03/2003

Dear Dr. Mongkolwongrojn

Paper number 2535 Theoretical Investigation on a Transient Elastohydrodynamic Lubrication
with Newtonian Solid-Liquid Lubricants

The above paper has now been fully reviewed by the Editorial Board of
'Lubrication Science', and I am pleased to inform you that it has been
accepted.

The paper should be published in a forthcoming issue of the journal,
and when it has been we will send you the reprints.

Thank you for allowing us to consider this work for publication.

With kind regards

Yours sincerely



Stephen Godfree
Director

Goryacheva	Evolution of contact characteristics in wear process	181
Grekova, Chigarev	Calculation of porous radial bearing with a porous shaft	182
Haruyyama	Performance evaluation of duplex-treated tool steel sliding against aluminium alloy under oxidation-limited condition	183
Karaszewski	Ceramic layers in sliding contact	184
Kravchuk	Nonlocal theory of contact interaction of real bodies for isotropy surfaces	185
Laaksonen, Parikka, Kupiainen, Tervo	The influence of circulation lubrication oil impurities on the formation of lubrication film in rolling bearings of paper machine rolls	186
Mashkov, Surikov, Kalistratova, Yegorova	Influence of fillers-modifiers on thermal physical and tribochemical properties of PTFE-based composites	187
Mongkolwongroj	Theoretical investigation on a Transient Elastohydrodynamic Lubrication Using Finite Volume Technique	188
Mongkolwongroj, Gunnuang	The effects of geometry change in magnetic head surface on the static flying characteristics of slider head in magnetic storage systems	189
Novytskyy	Wear rate of cast Fe-Cr-Cu-C composites microalloyed by V, Ti, Nb and Zr under sliding friction	190
Ovchar, Mashkov, Gladenko	The method of wear-resistance increase of face seals of centrifugal pumps	191
Palusan, Panaitescu	Electrochemical effects on rheology of lubricants in Taylor-Couette flow	192
Pascovici	Squeeze-film of unconformal, compliant and layered contacts	193
Persson, Gåhlin	Tribological performance of a DLC coating in combination with water-based lubricants	194
Persson, Martinsson, Hansson, Bajouk	Comparison of laboratory tribological tests using multivariate data analysis	195
Piekoszewski, Szczerek, Tuszynski, Bujak	Bench and component testing of antiwear properties of PVD coatings	196
Poleshenko	Complex modification of hard alloy cutting instruments using high-power ion beams	197

Prokudina,
Gladenko,
Mashkov,
Poleshenko

Sharma, Gandhi

Sheypak, Porosh

Strzelecki

Sundvall

Torskaya

Vukolov,
Voronchikin

THEORETICAL INVESTIGATION ON A TRANSIENT ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION WITH NEWTONIAN SOLID-LIQUID LUBRICANTS

M. MONGKOLWONGROJN, Associate Professor

K. THAMMAKOSOL, Graduate student

Electro-Mechanical Engineering Lab.

Mechanical Engineering Department

ReCCIT Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology

Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

E-mail kmmongko@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This paper presented the theoretical investigation on transient electrohydrodynamic lubrication of line contact. Time dependent Reynolds equation and elasticity equations for the compressible solid-liquid lubricants were solved using finite volume and multigrid technique. The lubricants are mineral oil mixed with a small amount of very small solid particles; MoS₂ particle and PTFE particle that can be treated as Newtonian oil. The two surfaces are initially at rest and in contact. The transient oil pressure and oil film thickness can be calculated numerically. This simulation showed the significant effects of solid particles on the lubrication characteristics.

Keyword: Elastohydrodynamic, Finite volume, Newtonian oil, Time dependent Reynolds equation

INTRODUCTION

The calculation for the solution to EHD lubrication problem was numerically solved by Dowson and Higginson in 1959. There are many studies on the time dependent EHD such as Lee and Hamrock(1989), Dowson and Jin(1986). Osborn and Sadeghi(1989) investigated the time dependent line contact EHD lubrication using multigrid technique. In recent year, the studies on liquid-solid lubrication showed some beneficial effects specially the reduction of traction force; Khonsari and Wang, Hua and Khonsari(1989), (1996) respectively.

In this study, the calculation for the solution to time dependent EHD lubrication of line contact using the finite volume and the multigrid techniques are presented.

THEORY

In the theoretical developments of two rolling cylinder in EHD line contact lubricated with a two-phase (liquid-solid) lubricant will be analyzed. At this stage, to simplify the analysis, the following assumptions are:

- (i) The cylinder are infinitely long compared with the width of contact zone.
- (ii) The cylinder are in pure rolling motion and the surface of the cylinders are smooth.
- (iii) Particles are spherical in shape equal size homogeneous and uniformly distributed in the lubricant.
- (iv) For low particle concentration; the lubricant is assumed to remain Newtonian.

The nondimensional time dependent Reynolds equation for compressible lubricant is given by Lubrecht(1987) as

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{\rho H^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X} \right] - K \frac{\partial(\rho H)}{\partial X} - K \frac{\partial(\rho H)}{\partial T} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Where } K = \frac{3\pi^2 U}{4w^2} \quad (2)$$

The boundary conditions are

$$\text{at } X = X_{\text{inlet}} ; P = 0 \quad (3)$$

$$\text{at } X = X_{\text{exit}} ; P = \frac{dP}{dX} = 0 \quad (4)$$

The film thickness can be expressed according to the deformation of the surfaces due to elasticity

$$H = H_e + \frac{x^2}{2} - \frac{1}{\pi} \int_{x_{\text{inlet}}}^{x_{\text{exit}}} P(\xi) \ln(x - \xi) d\xi \quad (7)$$

$$\text{where } H_e = H_{00} - 0.25 \ln \left(R^2 \frac{8W}{\pi} \right)$$

The nondimensional viscosity–pressure relationship for liquid-solid lubricant was proposed by Roelands (1963) and Rylander (1966) can be written as:

$$\mu = \mu_0 \left[1 + 2.5 \left(\frac{\lambda_w \rho_f}{\lambda_w \rho_f - \lambda_w \rho_p} \right) \right] \exp[\ln(\mu_0) + 9.67] \left[-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} P_h P)^2 \right] \quad (8)$$

Where λ_w is the concentration of particles by weight. The density of the lubricant varies with the pressure can be expressed as

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} P_h P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} P_h P} \right) \quad (9)$$

Where ρ is the density and P is dimensionless pressure.

LOAD CARRYING CAPACITY

The total load carrying capacity of the mixture is composed of two parts: one component results from the deformation of particles w_p and the other component due to the hydrodynamic action w_f [2].

$$w_f = \int_{x_{inlet}}^{x_{exit}} p(x) dx \quad (10)$$

Consider a spherically-shaped-particle in the contact region under the action of normal load [2], the particle may undergo elastic or plastic deformation. The load carrying capacity due to elastic deformation, $w_{i,el}$.

$$w_{i,el} = \frac{1}{6} [d_p - h(x)]^{1.5} d_p^{0.5} E_{ps} + p(x) v_p A_{i,el} \quad (11)$$

The equivalent elastic modulus of the particle and the contact surface is

$$\frac{1}{E_{ps}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right] \quad (12)$$

For particle under elastic deformation, the mean contact pressure p_m is

$$p_m = \frac{w_{i,el}}{\pi a^2} \quad (13)$$

Where a is the radius of circular contact area given below in term of load as

$$a = \left[\frac{3}{4} \frac{w_{i,el} d_p}{E_{ps}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

For the particle deforms plastically when the mean contact pressure reaches the hardness of particle, H_d . The load carried by a plastically deformed particle can be written as:

$$w_{i,pl} = \frac{a}{16} \pi^3 H_d^3 \left(\frac{d_p}{E_{ps}} \right)^2 + p(x) v_p A_{i,pl} \quad (15)$$

Where $A_{i,pl}$ is the contact are of an individual particle due to plastic deformation. The equation (11) and equation (15) give the load-carrying capacity of a single particle due to elastic and plastic deformation. Therefore, the load-carrying capacity for all particles is:

$$w_p = \sum_1^{N_x} \sum_1^{N_x} w_i \quad (16)$$

Where N_x and N_z are the number of particles that come in contact with the surface in x and z directions. The number of particles can be calculated as:

$$N_j = l_j \sqrt{\frac{V_f}{l_x l_z} \frac{6\lambda_w}{\pi d_p^3} \frac{\rho_f/\rho_p}{[1 - \lambda_w(1 - \rho_f/\rho_p)]}} \quad ; j = 1,2 \quad (17)$$

Where λ_w is the concentration of particles by weight; V_f is the volume of the solid liquid lubricant within the contact region; l_j is the effective length along which the particles deform. For line contact configuration, $l_z = 1$.

The total load carried by the solid-liquid lubricant can be expressed as:

$$w_T = w_f + w_p \quad (18)$$

NUMERICAL SOLUTION

The simultaneous system of Reynolds and elasticity equation with boundary conditions were solved using finite volume and multigrid techniques.

The time dependent Reynolds equation(1) can be discretized using finite volume technique to obtain the fully implicit scheme as:

$$a_{i+1}P_{i+1} - a_i P_i + a_{i-1}P_{i-1} = b_i + c_i \frac{\Delta X}{\Delta T} \quad (19)$$

$$\text{Where } a_{i+1} = \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2\Delta X} \right) \quad (20)$$

$$a_i = \left(\frac{\varepsilon_i + 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2\Delta X} \right) \quad (21)$$

$$a_{i-1} = \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2\Delta X} \right) \quad (22)$$

$$b_i = \frac{K}{4} \{ (\bar{\rho}_i + \bar{\rho}_{i+1})(H_i + H_{i+1}) + (\bar{\rho}_i + \bar{\rho}_{i-1})(H_i + H_{i-1}) \} \quad (23)$$

$$c_i = K(\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0) \quad (24)$$

At each time step, the Reynolds equation and the elasticity equation are solved using boundary conditions in equation (3) and (4) and the two cylinders are initially in contact with zero velocity.

RESULTS AND DISCUSSION

Fig.1 through 10 show the pressure and film thickness profiles for MoS₂ particle and PTFE particle with 2 μm and 5 μm diameter at the dimensionless speed $U=1\times 10^{-11}$ dimensionless load $W=3\times 10^{-5}$ and dimensionless times $T=2$ and 5 respectively.

The effects of particle concentration on oil film thickness as shown in Fig.1, 2, 3 and 4, 7 and 8 the oil film thickness is increased with the increase in the particle concentration increase but the film pressure is slightly decrease with the particle concentration increase.

The effect of MoS₂ and PTFE particles are shown in Fig.5, 6 and 9. For PTFE particle give larger oil film thickness and lower oil film pressure than that for MoS₂ particle.

The effects of particle diameter are shown in Fig.10. As the diameter is increased, the film pressure is slightly increase and the film thickness is increase.

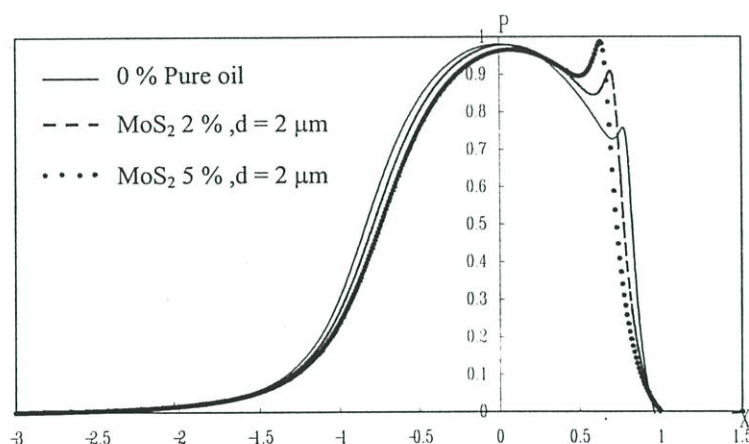


Fig.1 Transient pressure profile for $U=1\times 10^{-11}$, $W=3\times 10^{-5}$, $T=2$

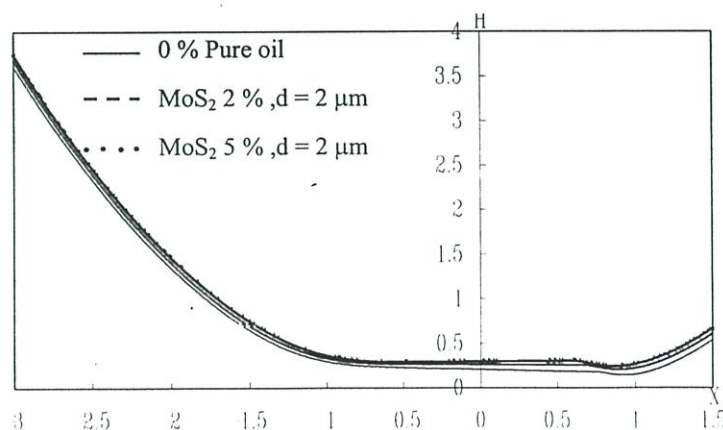


Fig.2 Transient film thickness profile for $U=1\times 10^{-11}$, $W=3\times 10^{-5}$, $T=2$

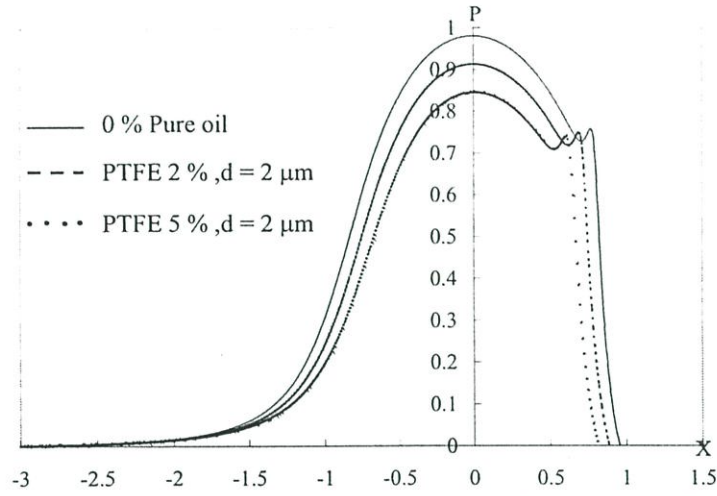


Fig.3 Transient pressure profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 2$

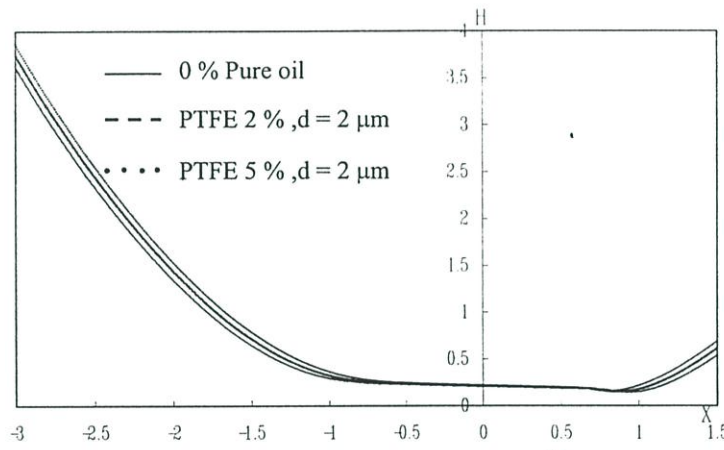


Fig.4 Transient film thickness profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 2$

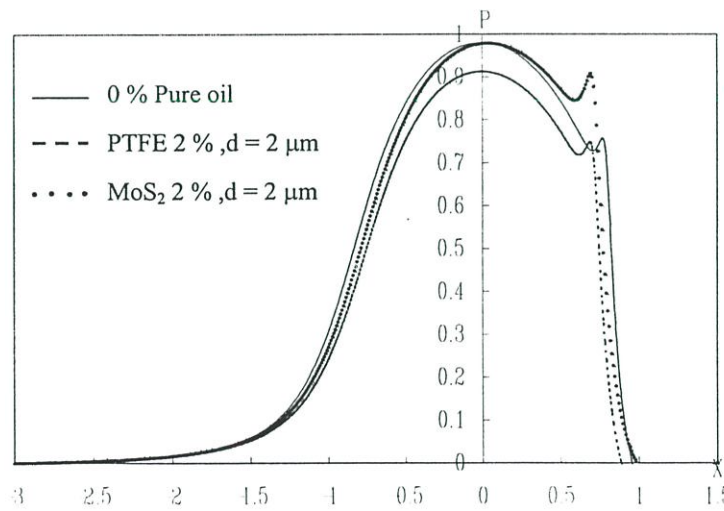


Fig.5 Transient pressure profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 2$

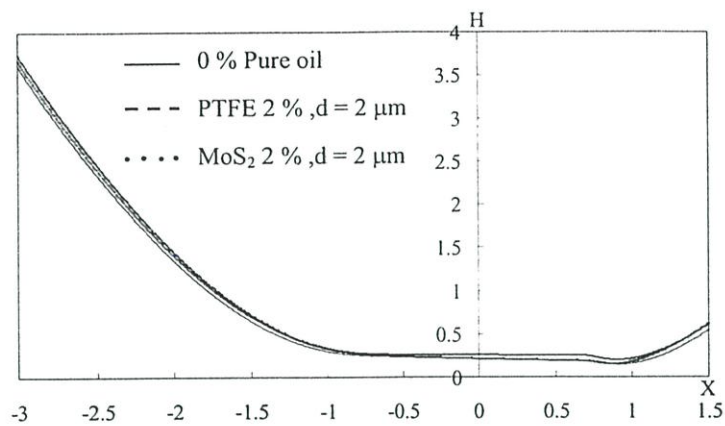


Fig.6 Transient film thickness profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 2$

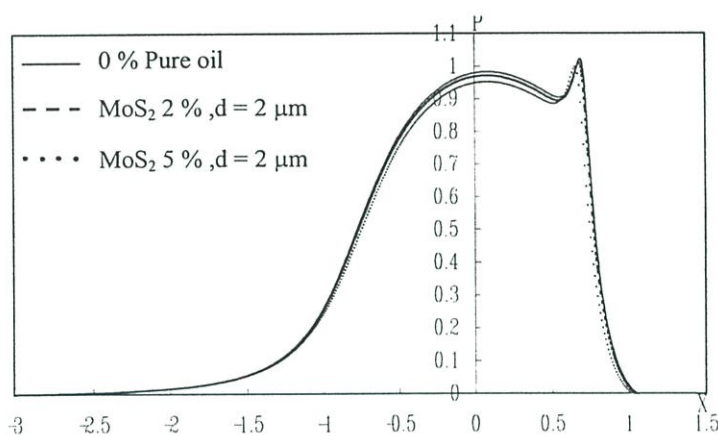


Fig.7 Transient pressure profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 5$

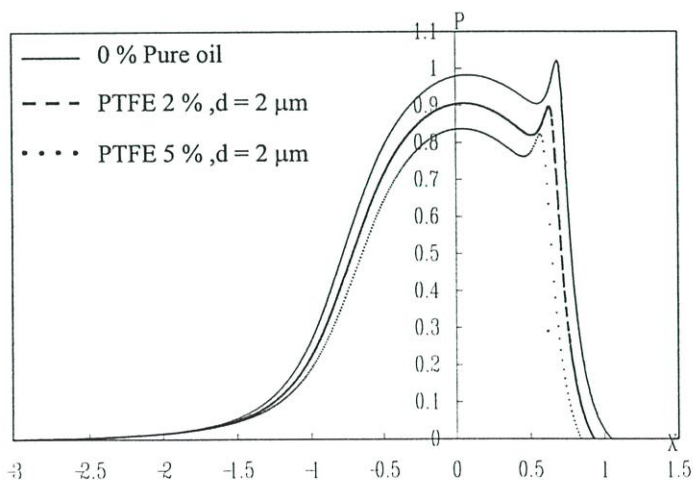


Fig.8 Transient pressure profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 5$

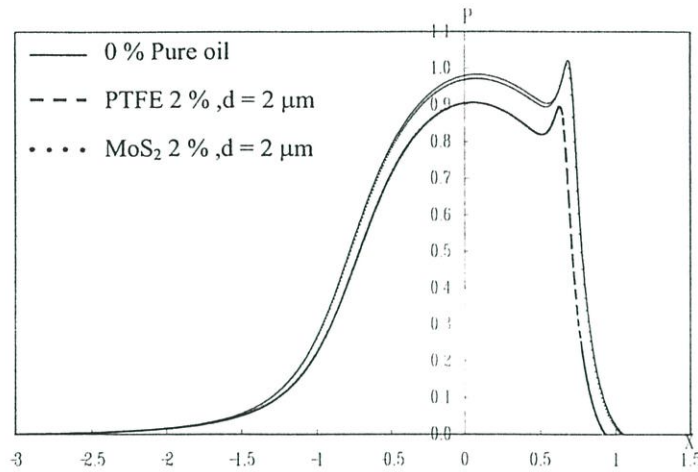


Fig.9 Transient pressure profile for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 5$

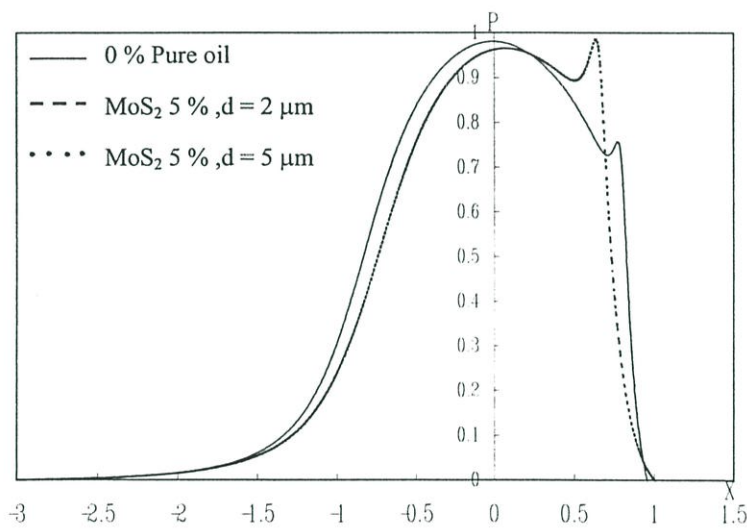


Fig.10 Transient pressure profile $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$, $T = 2$

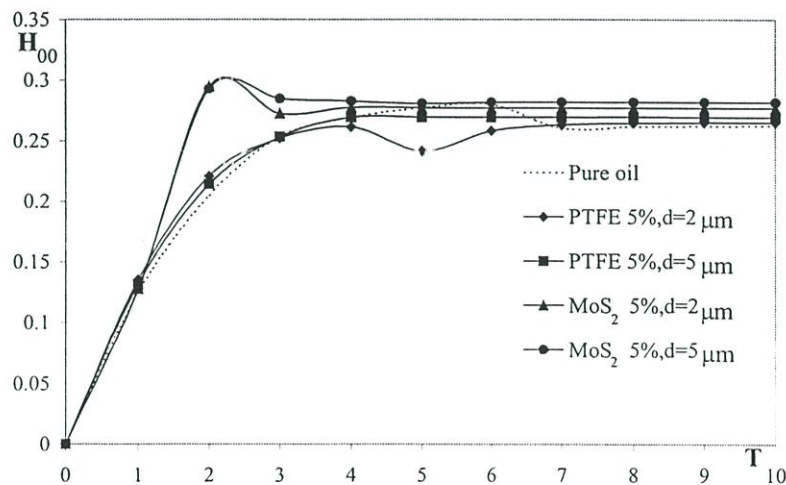


Fig.11 Transient response of the film thickness at $X = 0$ for $U = 1 \times 10^{-11}$, $W = 3 \times 10^{-5}$

Fig.11 shows the transient response of the film thickness at $X = 0$ for pure oil and for solid-liquid oil; PTFE 5% concentration, MoS_2 5% concentration at $2 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$ particle diameter at dimensionless speed $U = 1 \times 10^{-11}$ and dimensionless load $W = 3 \times 10^{-5}$.

CONCLUSIONS

The simulation of transient EHD lubrication has been discussed in this paper and can be concluded as:

- 1) Transient EHD lubrication can be done effectively using finite volume technique.
- 2) Solid particles play significant effects on the lubrication characteristic; raising the film thickness. The response of the oil film thickness is slightly faster for liquid-solid lubricant compared with the response for pure oil.

Reference

- [1] Osborn, F. K., Sadeghi, F., "Time Dependent Line EHD Lubrication Using the Multigrid/Multilevel Technique", ASME Journal of Tribology, Vol.114, Jan.1992.
- [2] Hua, Y. D., Khonsari, M. M., "Elastohydrodynamic Lubrication by Powder Slurries", ASME Journal of Tribology, Vol.118, Jan.1996
- [3] Khonsari, M. M., Wang, H. S., Qi, L. Y., "A Theory of Liquid-Solid Lubrication in Elastohydrodynamic Regime", ASME Journal of Tribology, Vol.111, July 1989.
- [4] Larsson, R., Hoglund, E., "Numerical Simulation of a Ball Impacting and Rebounding a Lubricated Surface", ASME Journal of Tribology, Vol.117, Jan.1995.
- [5] Ai, X., Cheng, S. H., "Transient EHL Analysis for Line Contacts with Measured Surface Roughness Using Multigrid Technique", ASME Journal of Tribology, Vol.116, July 1994.
- [6] Rylander, H.G., "Theory of Liquid-Solid Hydrodynamic Film Lubrication", ASLE Trans., Vol.9, 1966

NOMENCLATURE

P_h = maximum Hertzian pressure (Pa)	H = dimensionless film thickness at new time step
P = dimensionless pressure	H^o = dimensionless film thickness at old time step
p = oil film pressure (Pa)	H_{00} = dimensionless film thickness at $X = 0$
$\bar{\rho}$ = dimensionless density (ρ/ρ_0)	
ρ_0 = density of oil (kg/m^3)	

$\bar{\mu}$ = dimensionless viscosity (μ/μ_0)

μ_0 = viscosity of oil (Pa . s)

T = dimensionless time

X = dimensionless x coordinate

z = viscosity parameter (Roelands)

w_T = total load carrying capacity (N)

w_f = hydrodynamic load (N)

w_p = load support by particles (N)

d_p = diameter of particles

E_{ps} = equivalent modulus of elasticity (Pa)

$A_{i,el}$ = contact area of an individual particle
due to plastic deformation (m)

ν_p = Poisson ratio of particles

ν_s = Poisson ratio of rolling cylinder

E_p = modulus of elasticity of particles (Pa)

E_s = modulus of elasticity of rolling cylinder
(Pa)

Dimensionless group

$$\varepsilon = \frac{\bar{\rho}H^3}{\bar{\mu}}$$

$$K = \frac{3\pi^2U}{4W^2}$$

$$W = \frac{w}{ER}$$

$$U = \frac{\mu_0\bar{\mu}}{ER}$$



สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทยครั้งที่ ๑๓



บทความทางวิชาการ เล่มที่ ๒/๒

จัดโดย

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล

ดำเนินงานโดย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ ๒-๓ ธันวาคม ๒๕๕๓

(11)

วันที่ 3 ธันวาคม 2542 ห้อง 7, Computational Fluid Dynamics 4 (10.45 – 11.45'น.)

ประธาน : หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองประธาน : รศ.ดร.มงคล มงคลวงษ์โรจน์

10.45- 11.15	Computation of Pressure Distribution Over Aircraft (การคำนวณหาการกระจายความดันบนอากาศยาน) สุรศักดิ์ เพิ่มทรัพย์ทวี, อุดมเกียรติ นนทแก้ว	2/167
11.15- 11.45	Simulation of Turbulent Flow through a Circular Orifice Pongjet Promvong, Kulthorn Silapabanleng	2/172
11.45- 12.15	การประมาณค่าแรงยกและแรงต้านเหนี่ยวนำของปีกที่ความเร็วต่ำกว่าเสียง สุภาพ เริงมาก	2/177

วันที่ 3 ธันวาคม 2542 ห้อง 7, Fluid Mechanics 4 (13.00 – 15.00 น.)

ประธาน : รศ. ดร. เดช พุทธเจริญทอง

รองประธาน : อาจารย์วิภู ศรีสืบสาย

13.00- 13.30	Performance of Supersonic Steam Ejectors and a Simple Loss Analysis (สมรรถนะของซูปเปอร์โซนิคสตีมีเอเจกเตอร์พร้อมแนวทางการวิเคราะห์การสูญเสียอย่างง่าย) ไชยณรงค์ จักรธรานนท์, มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล	2/181
13.30- 14.00	The Study of Performance Characteristic of Partial Journal Bearing with Non-Newtonian Lubricants (การศึกษาสมรรถนะของกบารองลื่นเหลกกลมชนิดรองรับไม่เต็มวง โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตันเนียน) มงคล มงคลวงษ์โรจน์, เกษม ธรรมโกศล	2/187
14.00- 14.30	An Experimental Performance Study of a Ranque-Hilsch Vortex Tube (การศึกษาสมรรถนะเชิงทดลองของท่อ Ranque-Hilsch Vortex) พงษ์เจต พรหมวงศ์, สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด	2/195
14.30- 15.00	A High Specific-Speed Radial-Flow Pump Impeller (ใบพัดเครื่องสูบน้ำชนิดไหลตามรัศมีแบบที่มีความเร็วจำเพาะสูง) สถาพร สุปรีชากร	2/201

วันที่ 3 ธันวาคม 2542 ห้อง 7, General Topics in Mechanical Engineering 3 (15.15 – 17.15 น.)

ประธาน : หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองประธาน : อาจารย์วิภู ศรีสืบสาย

15.15- 15.45	Developing CNC G-code Program by BASIC (การพัฒนาโปรแกรม G-code เครื่องจักร CNC ด้วยภาษา Basic) เบญจดา พิทักษ์รักษากุล, บุญชู ลีลาจรรจิก, ทวี เทศเจริญ	2/204
-----------------	---	-------

การศึกษาสมรรถนะของกบารองลื่นเพลากลมชนิดรองรับไม่เต็มวงโดยใช้ น้ำมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอนเนียน

The Study of Performance Characteristic of Partial Journal Bearings with Non-Newtonian Lubricants

มงคล มงคลวงศ์โรจน์, เกษม ธรรมโกศล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร 66(2)326-9053

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาสมรรถนะของกบารองลื่นชนิดรองรับไม่เต็มวงโดยใช้ไขมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอนเนียน ไขมันหล่อลื่นเมื่อผสมกับสารโพลีไอโซบิวทีนจะเป็นทำให้ความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น การคำนวณหาความดันจะใช้สมการโมดิฟายเรย์โนลด์โดยใช้เทคนิคแยกสมการเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสองสมการแล้วใช้วิธีผลต่างเชิงเส้นคำนวณหาความดันที่กระจายบนกบารองลื่นเพลากลม สำหรับกบารองลื่นเพลากลมชนิดไม่เต็มวงจะใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อคำนวณหามุมแอดคิจูดโดยกบารองลื่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และยาว 10 มิลลิเมตร

ABSTRACT

This research describes the study on static performance of partial circular journal bearings with non-Newtonian oil. The lubricants oil is mixed with high molecular weight polymer (Polyisobutylene) in order to improve the viscosity index. The nonlinear modified Reynolds equation was formulated. Perturbation technique was introduced to obtain zero order pressure differential equation and first order pressure differential equation due to non-Newtonian effect. Finite difference method was used to obtain pressure distribution in the journal bearings. For partial journal bearings, iteration method was introduced to obtain attitude angle and eccentricity ratio. Numerical example was presented for 40 millimeter of diameter and 10 millimeter of length.

บทนำ

เครื่องจักรกลต่างๆที่ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมจะมีการเสียดสีกันระหว่างหน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่ต่างๆ ทำให้มีความเสียหายและมีแรงเสียดทานกันระหว่างหน้าสัมผัส เพื่อเป็นการลดปัญหาของการเสียหายเนื่องจากแรงเสียดสีจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นกันระหว่างหน้าสัมผัส

โดยเฉพาะเพลากลมกับกบารองลื่นนั้นจะเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้งานในเครื่องจักรกลเป็นจำนวนมากและยังทำงานที่ภาวะและความเร็วรอบสูงเพลากลมจะถูกสวมอยู่กับกบารองลื่นอยู่ตลอดเวลา จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียุติมันกันกันระหว่างหน้าสัมผัสเพื่อลดการสึกหรอ เครื่องจักรจะได้มีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสูง

เนื่องจากเครื่องจักรสมัยใหม่ทำงานที่ภาวะและรอบการทำงานที่สูง อุณหภูมิก็จะสูงตามไปด้วย จากที่เราเคยศึกษามาพบว่าสารหล่อลื่นแบบนิวตอนเนียนความหนืดจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดจะลดลงจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เนื่องจากจะทำให้กบารองลื่นรับภาระได้น้อยลง ดังนั้นเพื่อให้สารหล่อลื่นมีความหนืดที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักจึงนำสารหล่อลื่นแบบนิวตอนเนียนมาใส่สารเติมแต่งจำพวก Polyisobutylene ลงไปจะทำให้ไขมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเป็นไขมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอนเนียน ในงานวิจัยนี้จะทำการหาความดันที่กระจายบนกบารองลื่นแบบไม่เต็มวง

ทฤษฎี

ไขมันหล่อลื่นแบบนิวตอนเนียนสำหรับกบารองลื่นเพลากลมเมื่อผสมสารเติมค่าความข้นใส Polyisobutylene ลงไปจะทำให้คุณสมบัติเป็นไขมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอนเนียน แบบ Pseudo-plastic fluid ดังแสดงในรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของไขมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอนเนียนเมื่อเติมสาร Polyisobutylene ลงไป 2 %

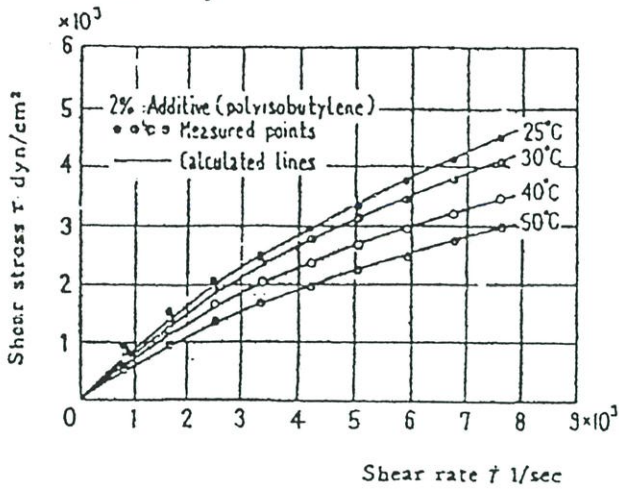
สมมติฐานเบื้องต้นคือให้ไขมันหล่อลื่นเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ เป็นการไหลแบบราบเรียบและไม่มีการดันโตของหน้าสัมผัส แรงเฉื่อยของไขมันหล่อลื่นมีน้อยมากและให้มีการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก

จากสมการโมเมนตัมคือ

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (1)$$

และ

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2)$$



รูปที่ 1 แสดงเส้นโค้งการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่เติมสาร Polyisobutylene ลงไป 2%

จากรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate สามารถหาค่าประมาณได้จาก

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_{xy} + k \tau_{xy}^3 \quad (3)$$

$$\mu \frac{\partial w}{\partial y} = \tau_{zy} + k \tau_{zy}^3 \quad (4)$$

อินทิเกรตสมการที่(1) แล้วแทนค่า τ_{xy} ลงในสมการที่(3) จะได้

$$u = U - \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} (h^2 - y^2) + C_1 (h - y) \right\} - \frac{k}{\mu} \left\{ \frac{1}{4} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^3 (h^4 - y^4) + C_1 \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 (h^3 - y^3) + \frac{3}{2} C_1^2 \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) (h^2 - y^2) + C_1^3 (h - y) \right\} \quad (5)$$

อินทิเกรตสมการที่(2) แล้วแทนค่า τ_{zy} ลงในสมการที่(4) จะได้

$$w = W - \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial z} (h^2 - y^2) + C_2 (h - y) \right\} - \frac{k}{\mu} \left\{ \frac{1}{4} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^3 (h^4 - y^4) + C_2 \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 (h^3 - y^3) + \frac{3}{2} C_2^2 \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) (h^2 - y^2) + C_2^3 (h - y) \right\} \quad (6)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต จากสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

อินทิเกรตสมการที่(7) โดยเทียบกับ y จาก $y=0$ ถึง $y=h$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dy + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^h w dy + V = 0 \quad (8)$$

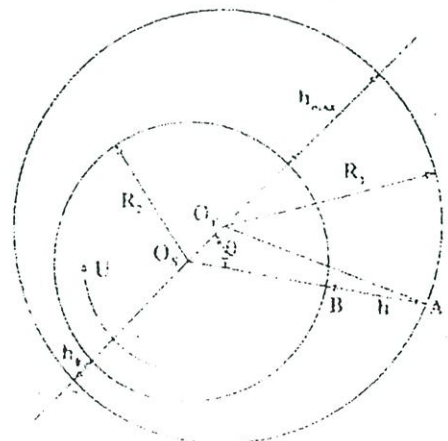
แทนค่าสมการที่ (5) และ (6) ในสมการที่ (8) จะได้สมการโมดิฟายเรย์โนลด์สำหรับสองมิติสำหรับน้ำมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอนเนียน

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^3 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^3 \right] = \frac{U}{2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + V \quad (9)$$

สำหรับเพลากลมจะพิจารณาพิกัดทรงกระบอกจะได้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^3 \right] + \frac{1}{4\lambda^2} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{12} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{1}{4\lambda^2} \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^3 \right] = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (10)$$

เมื่อ δ คือ nonlinear factor เท่ากับ $k \left(\frac{\mu U}{h} \right)^2$



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของกานรอนดิน จากรูปที่ 2 สามารถหาความสัมพันธ์ของ h ได้ดังนี้

$$h = c(1 + \epsilon \cos \theta) \quad (11)$$

เมื่อ ϵ คือ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์ (eccentricity ratio) เท่ากับ $\frac{e}{c}$
 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นแบบ nonlinear ค่าความดันของฟิล์มน้ำมัน
 คือ

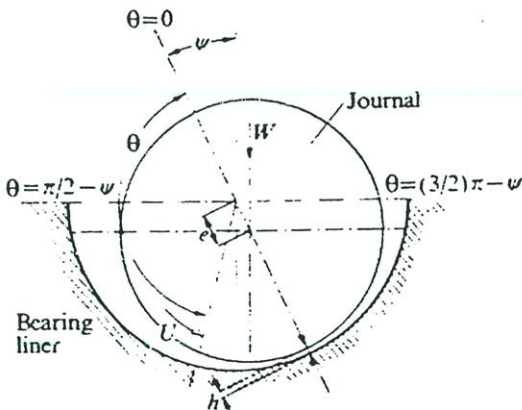
$$P = P_o + \delta P_1 \tag{12}$$

แทนค่า P จากสมการที่ (12) ลงในสมการที่(10) จะได้สมการอีกสองสมการดังนี้

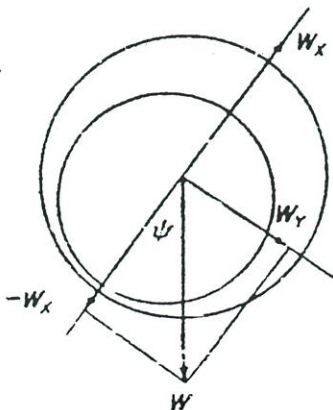
$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_o}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{4\lambda^2} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_o}{\partial z} \right] = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} \tag{13}$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\delta \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial \theta} + \delta \frac{h^5}{80} \left\{ \frac{\partial P_o}{\partial \theta} + \delta \frac{\partial P_1}{\partial \theta} \right\}^3 \right] + \frac{1}{4\lambda^2} \frac{\partial}{\partial z} \left[\delta \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial z} + \frac{1}{4\lambda^2} \delta \frac{h^5}{80} \left\{ \frac{\partial P_o}{\partial z} + \delta \frac{\partial P_1}{\partial z} \right\}^3 \right] = 0 \tag{14}$$

นำสมการที่ (13) และ (14) คำนวณหาค่า P_o และ P_1 ตามลำดับโดยวิธี ผลต่างสืบเนื่อง แล้วนำค่า P_o และ P_1 แทนค่าลงในสมการที่ (12) จะได้ค่า P ซึ่งคือความดันกระจายบนการรองรับเส้นเพลากลม



รูปที่ 3. แสดงการรองรับเส้นเพลากลมแบบไม่เต็มวง



ปที่ 4. แสดงทิศทางของแรงและความสัมพันธ์ของแรงกับมุมเอคตริจิตที่กิดขึ้นบนการรองรับเส้น

จากรูปที่ 4 มุม ψ คือมุมเอคตริจิตซึ่งหาได้จาก

$$\psi = \arctan \left(-\frac{W_y}{W_x} \right) \tag{15}$$

เมื่อ W_y และ W_x เป็นภาระดงแนวแกน Y และ X ตามลำดับหาได้จาก

$$W_y = \int_0^1 \int_{\pi/2-\psi}^{\pi+\psi} P \sin \theta \, d\theta \, dz \tag{16}$$

$$W_x = \int_0^1 \int_{\pi/2-\psi}^{\pi+\psi} P \cos \theta \, d\theta \, dz \tag{17}$$

ซึ่งค่า P คือความดันที่กระจายบนการรองรับเส้นเพลากลมหาได้จากสมการที่ (13), (14) และ (12) ตามลำดับ นำค่า W_x และ W_y จากสมการที่ (16), (17) มาแทนค่าในสมการที่ (15) จะได้ค่าของมุมเอคตริจิตค่าของการรวมสามารถหาได้จาก

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \tag{18}$$

ค่าของ Sommerfeld number เป็นตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณทางด้านการออกแบบสามารถหาได้จาก

$$S = \frac{UL\mu}{W} \left(\frac{R_1}{C} \right)^2 \tag{19}$$

เมื่อ $U = \frac{2\pi R_2 N}{60}$

การคำนวณ

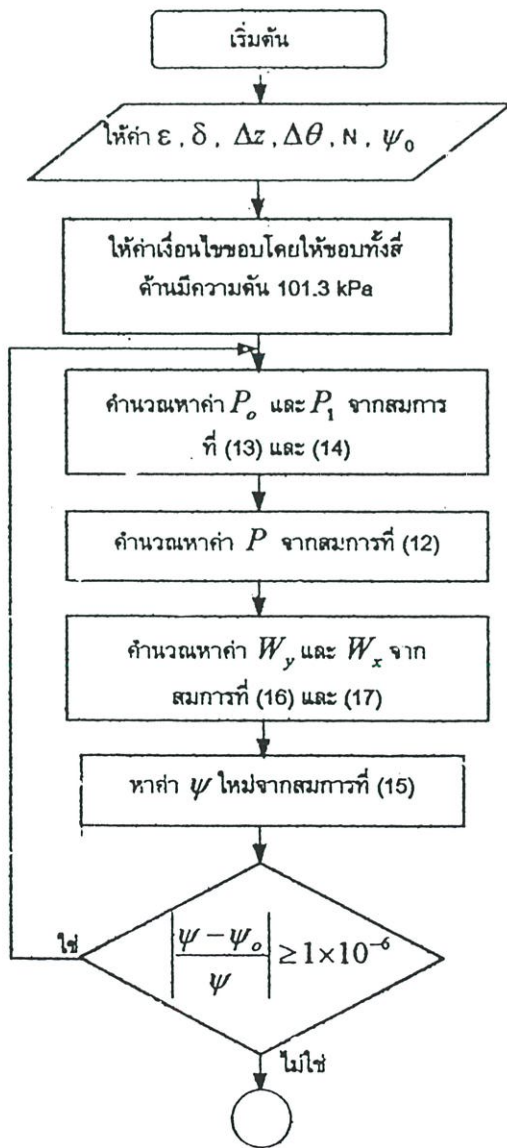
การหาความดันที่กระจายบนการรองรับเส้นเพลากลมแบบไม่เต็มวง ดังรูปที่ 3 จากสมการที่ (13), (14) ซึ่งทั้งสามสมการสามารถหาได้โดยวิธี ผลต่างสืบเนื่อง

การหาค่ามุมเอคตริจิต ψ สามารถหาได้จากสมการที่ (15), (16) และ (17) สำหรับสมการที่ (16) และ (17) จะใช้วิธี Simpson's 1/3 Rule เพื่อหาค่าของการอินทิเกรตสองชั้น

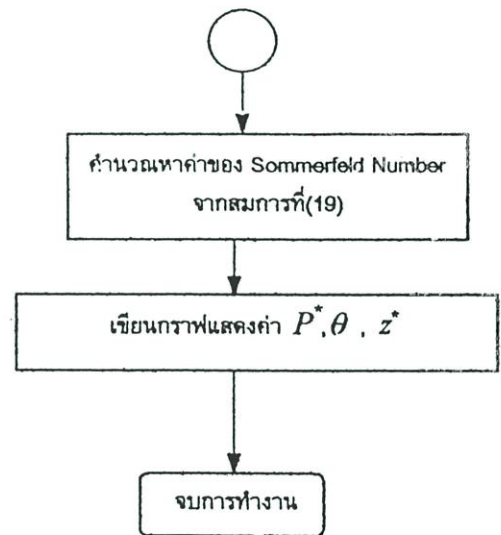
การคำนวณหาค่าต่างๆสามารถอธิบายการคำนวณหาได้จาก Flow chart ดังรูปที่ 4

สัญลักษณ์

P	= พิล์มของความดัน	x,y,z,X,Y	= ระบบแกนอ้างอิง
τ_{xy}, τ_{zy}	= ความเค้นเฉือน	u	= ความเร็วของน้ำมันในแนวแกน x
μ	= ความหนืดสมบูรณ์	v	= ความเร็วของน้ำมันในแนวแกน y
U	= ความเร็วของเพลากลม	w	= ความเร็วของน้ำมันในแนวแกน z
h	= พิล์มความหนาของน้ำมัน	θ	= มุมโคจรของกาบรองดิน
λ	= อัตราส่วนระหว่างความยาวของกาบรองดินต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของกาบรองดิน (L/D)		
P_o, P_1	= ความดันย่อยของฟิล์มของความดัน	R_2	= รัศมีของเพลากลม
R_1	= รัศมีของกาบรองดิน		
c	= ระยะห่างเคลียร์แรน = $R_1 - R_2$		
z^*	= ตัวแปรแกน z ไร้มิติ $\left(\frac{z}{L}\right)$	P^*	= ตัวแปรความดันไร้มิติ $\left(\frac{2Pc^2}{U\mu D}\right)$



รูปที่ 5. แสดง Flow chart การคำนวณหาความดัน



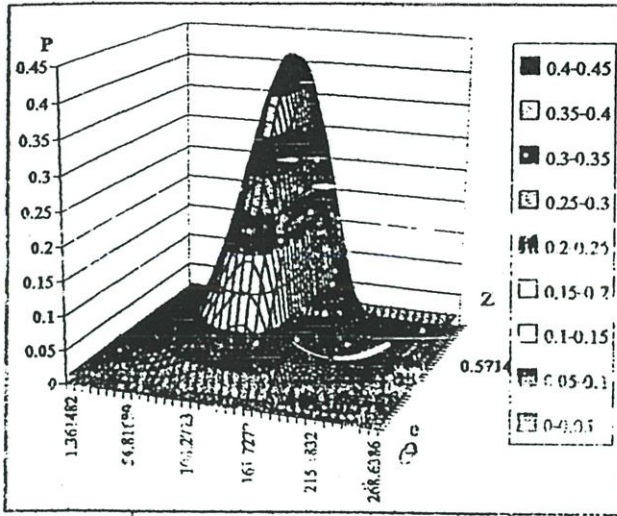
รูปที่ 5. แสดง Flow chart การคำนวณหาความดัน(ต่อ)

ขนาดของกาบรองดินเพลากลมที่ใช้ในการคำนวณคือ $L=10$ mm, $D = 40$ mm, การคำนวณจะทำการเปลี่ยนค่า $\epsilon = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ตามลำดับ และจะทำการเปลี่ยนค่า $\delta = 0.05, 0.2, 0.5, 0.9$ ตามลำดับ ที่ $N = 1000$ rpm และทำการคำนวณค่าที่ $\epsilon = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ของค่า $\delta = 0.05$ ที่ $N = 2000$ rpm

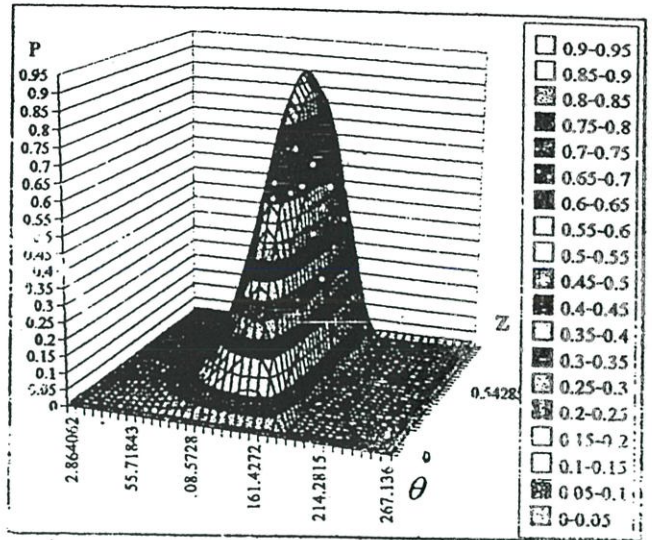
ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณคำนวณความดันกระจายบนกาบรองดินเพลากลม จะขอนำเสนอในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ

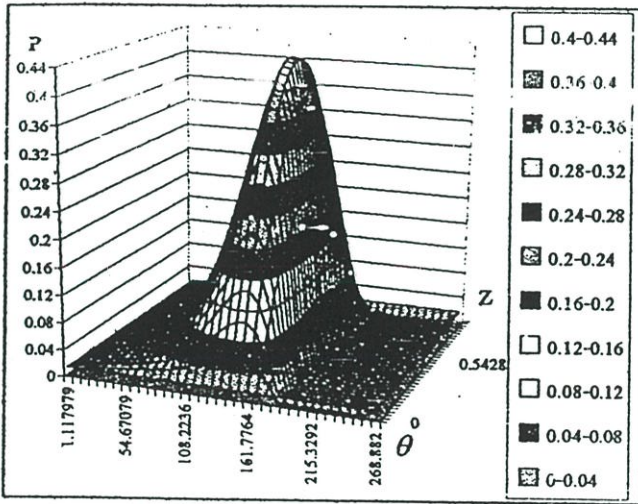
จากรูปที่ 6, 7 และ 8 เป็นรูปการกระจายความดันบนกาบรองดินที่ $\epsilon = 0.6$ $\delta = 0.05, 0.2, 0.5$ ที่ความเร็ว รอบ 1000 รอบต่อนาที ที่ $\epsilon = 0.6$ $\delta = 0.05$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.447705$ ที่ $\epsilon = 0.6$ $\delta = 0.2$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.437102$ และที่ $\epsilon = 0.6$ $\delta = 0.5$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.42278$



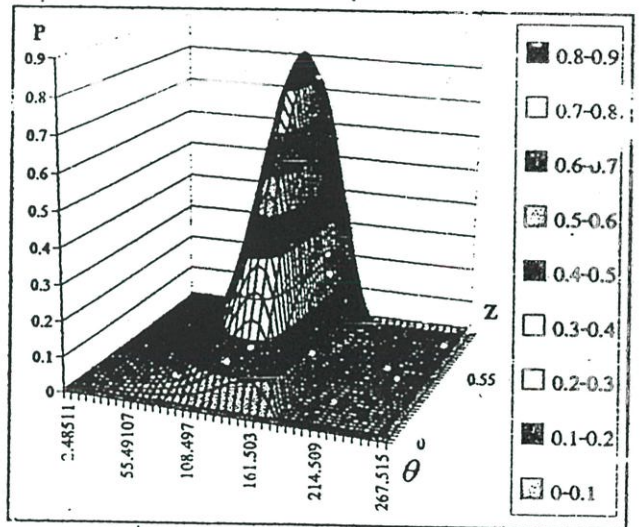
รูปที่ 6. แสดงการกระจายความดันบนกานทรงคลื่น
เมื่อ $\epsilon = 0.6, \delta = 0.05$ ที่ 1000 rpm



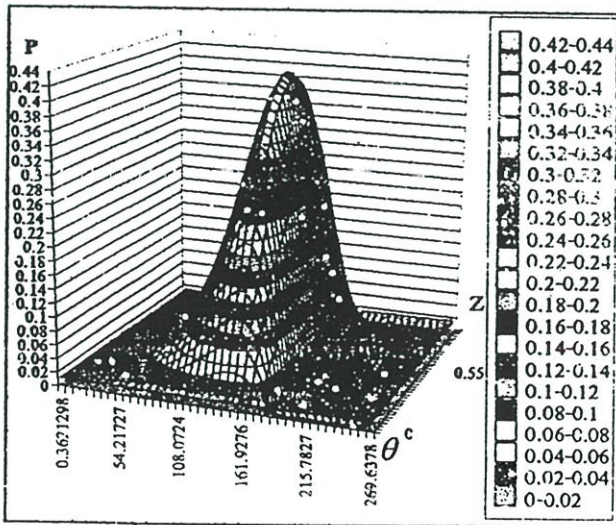
รูปที่ 9. แสดงการกระจายความดันบนกานทรงคลื่นเมื่อ $\epsilon = 0.7, \delta = 0.05$
ที่ 1000 rpm



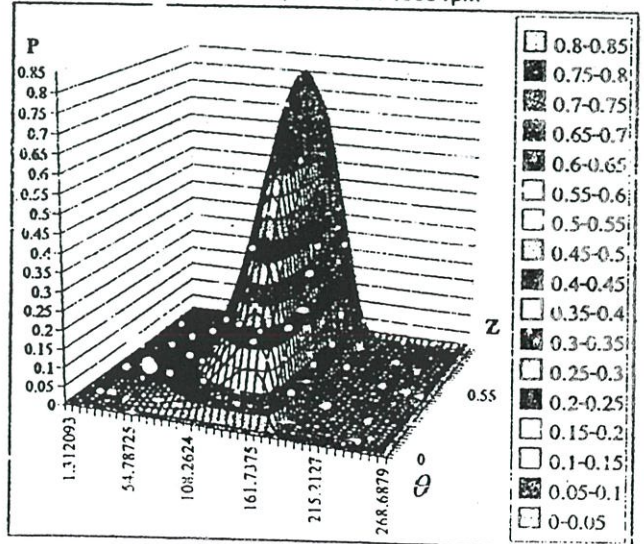
รูปที่ 7. แสดงการกระจายความดันบนกานทรงคลื่น
เมื่อ $\epsilon = 0.6, \delta = 0.2$ ที่ 1000 rpm



รูปที่ 10. แสดงการกระจายความดันบนกานทรงคลื่น
เมื่อ $\epsilon = 0.7, \delta = 0.2$ ที่ 1000 rpm



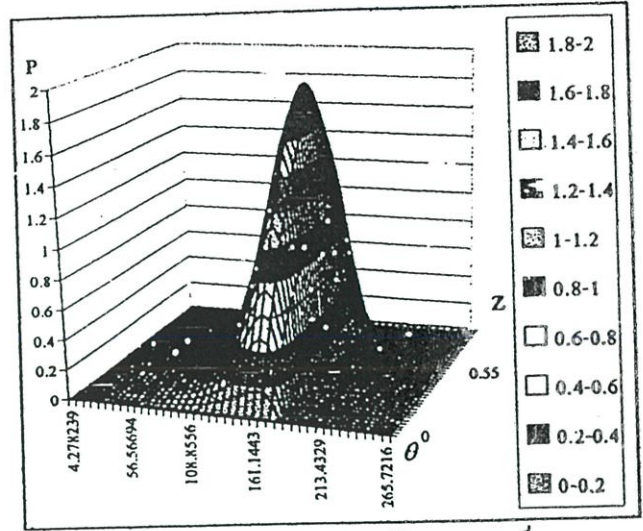
รูปที่ 8. แสดงการกระจายความดันบนกานทรงคลื่น
เมื่อ $\epsilon = 0.6, \delta = 0.5$ ที่ 1000 rpm



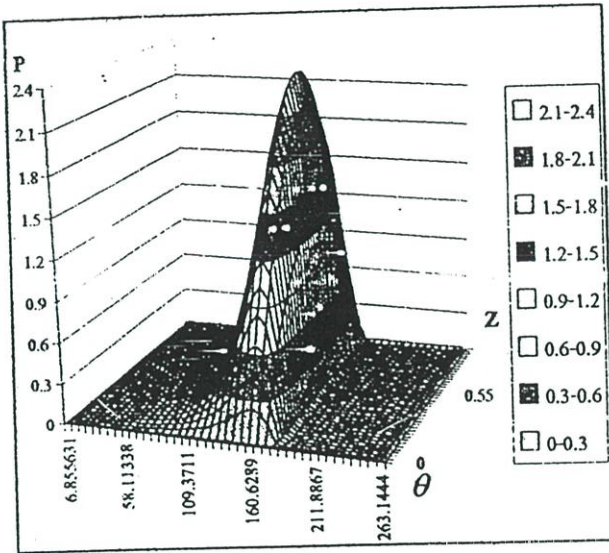
รูปที่ 11. แสดงการกระจายความดันบนกานทรงคลื่น
เมื่อ $\epsilon = 0.7, \delta = 0.5$ ที่ 1000 rpm

จากรูปที่ 9,10 และ 11 เป็นรูปการกระจายความดันบนก้นบารอง
 ลื่นที่ $\epsilon=0.7$ $\delta=0.05,0.2,0.5$ ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที ที่
 $\epsilon=0.7$ $\delta=0.05$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.923796$ ที่ $\epsilon=0.7$ $\delta=0.2$
 ความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.882414$ และที่ $\epsilon=0.7$ $\delta=0.5$ ความดันสูงสุด
 คือ $P^* = 0.824021$

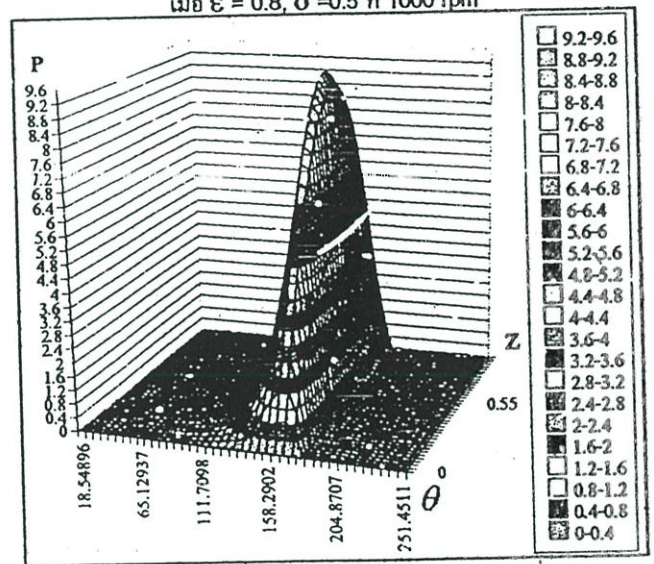
จากรูปที่ 12,13 และ 14 เป็นรูปการกระจายความดันบนก้นบารอง
 ลื่นที่ $\epsilon=0.8$ $\delta=0.05,0.2,0.5$ ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที ที่
 $\epsilon=0.8$ $\delta=0.05$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 2.366041$ ที่ $\epsilon=0.8$ $\delta=0.2$
 ความดันสูงสุดคือ $P^* = 2.143066$ และที่ $\epsilon=0.8$ $\delta=0.5$ ความดันสูงสุด
 คือ $P^* = 1.912855$



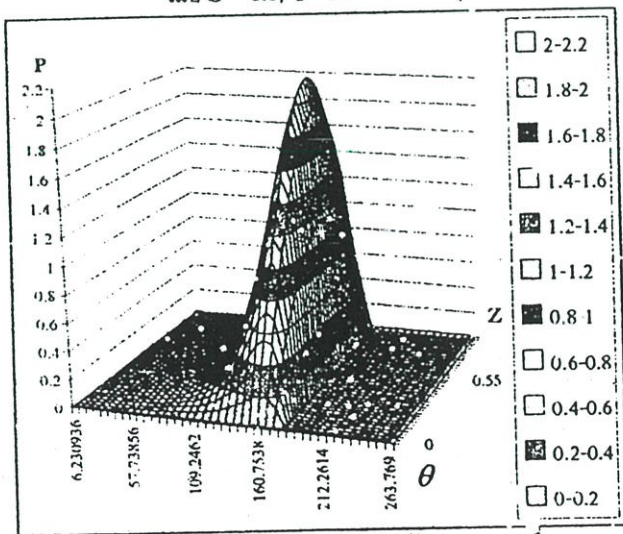
รูปที่ 14. แสดงการกระจายความดันบนก้นบารองลื่น
 เมื่อ $\epsilon = 0.8, \delta = 0.5$ ที่ 1000 rpm



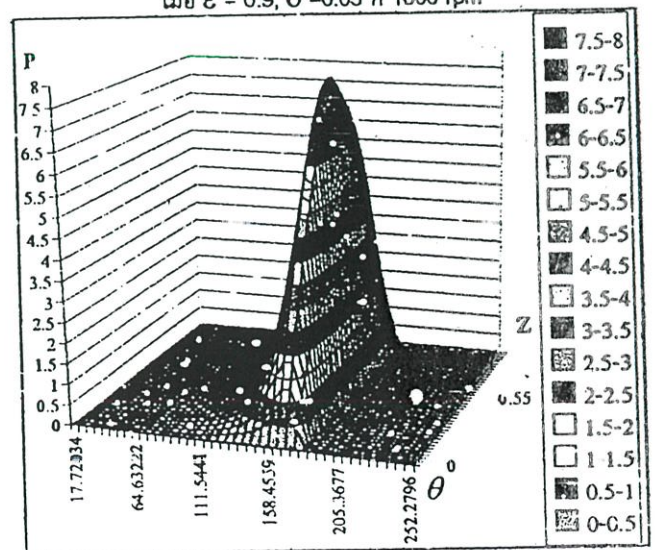
รูปที่ 12. แสดงการกระจายความดันบนก้นบารองลื่น
 เมื่อ $\epsilon = 0.8, \delta = 0.05$ ที่ 1000 rpm



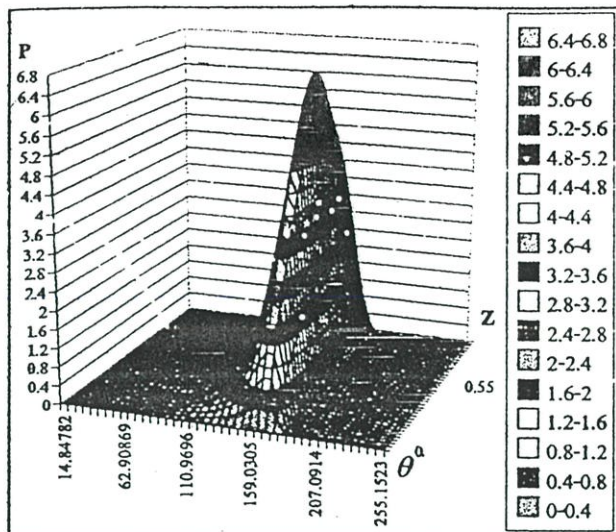
รูปที่ 15. แสดงการกระจายความดันบนก้นบารองลื่น
 เมื่อ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.05$ ที่ 1000 rpm



รูปที่ 13. แสดงการกระจายความดันบนก้นบารองลื่น
 เมื่อ $\epsilon = 0.8, \delta = 0.2$ ที่ 1000 rpm

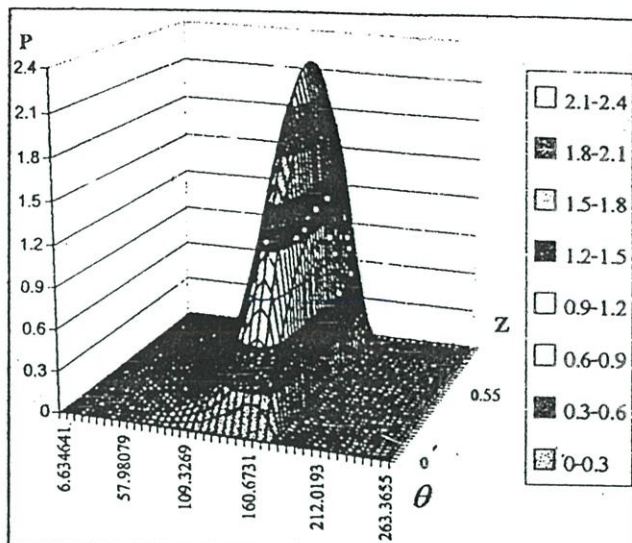


รูปที่ 16. แสดงการกระจายความดันบนก้นบารองลื่น
 เมื่อ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.2$ ที่ 1000 rpm



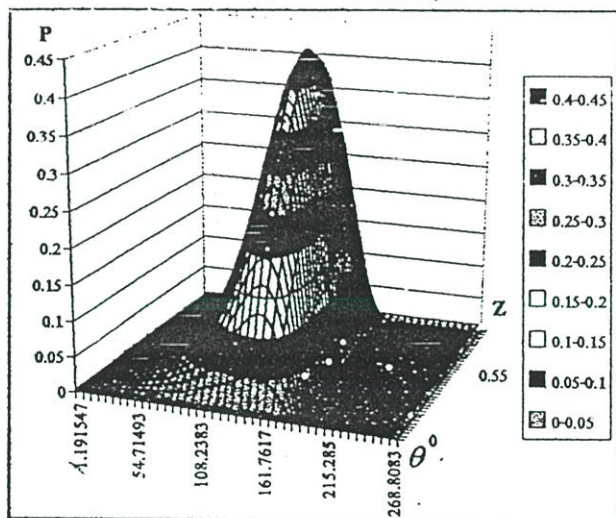
รูปที่ 17. แสดงการกระจายความดันบนกานรอลงดิน

เมื่อ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.5$ ที่ 1000 rpm



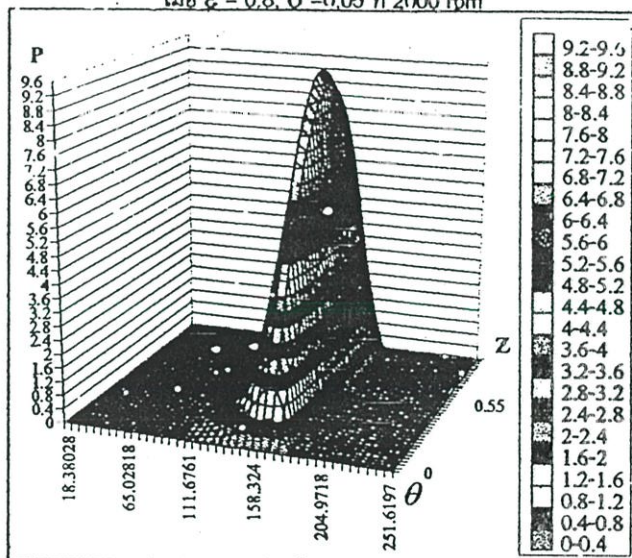
รูปที่ 20. แสดงการกระจายความดันบนกานรอลงดิน

เมื่อ $\epsilon = 0.8, \delta = 0.05$ ที่ 2000 rpm



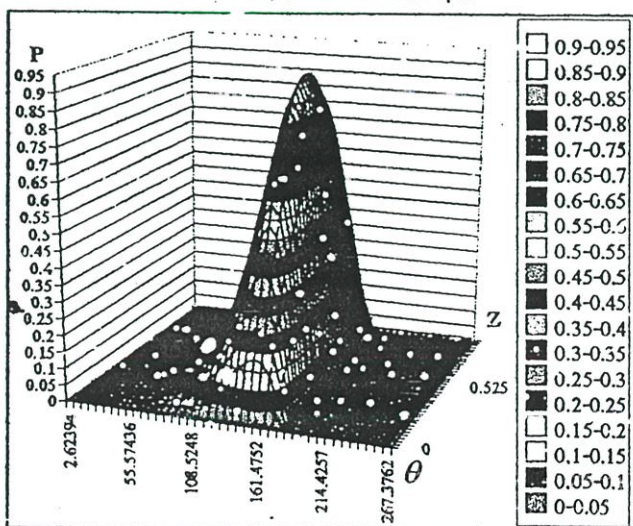
รูปที่ 18. แสดงการกระจายความดันบนกานรอลงดิน

เมื่อ $\epsilon = 0.6, \delta = 0.05$ ที่ 2000 rpm



รูปที่ 21. แสดงการกระจายความดันบนกานรอลงดิน

เมื่อ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.05$ ที่ 2000 rpm

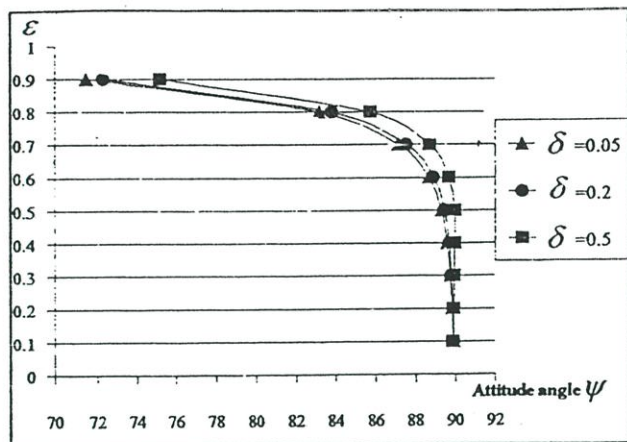


รูปที่ 19. แสดงการกระจายความดันบนกานรอลงดิน

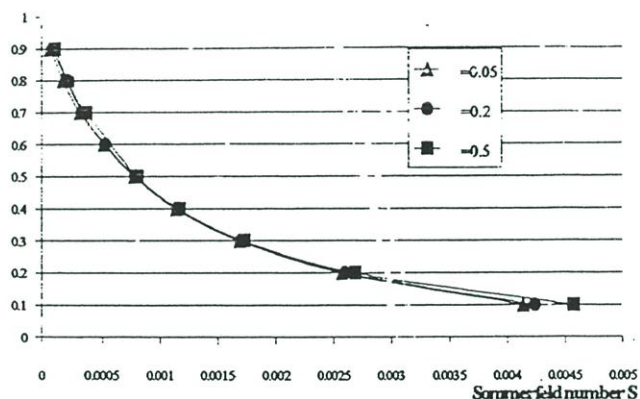
เมื่อ $\epsilon = 0.7, \delta = 0.05$ ที่ 2000 rpm

จากรูปที่ 15, 16 และ 17 เป็นรูปการกระจายความดันบนกานรอลงดินที่ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.05, 0.2, 0.5$ ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที ที่ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.05$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 9.522109$ ที่ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.2$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 7.757396$ และที่ $\epsilon = 0.9, \delta = 0.5$ ความดันสูงสุดคือ $P^* = 6.556551$

จากรูปที่ 18, 19, 20 และ 21 เป็นรูปการกระจายความดันบนกานรอลงดินที่ความเร็วรอบ 2000 rpm $\delta = 0.05$ โดยทำการเปลี่ยนแปลง ϵ จาก $\epsilon = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ จะเห็นว่าที่ $\epsilon = 0.6$ มีความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.443403$ ที่ $\epsilon = 0.7$ มีความดันสูงสุดคือ $P^* = 0.917774$ ที่ $\epsilon = 0.8$ มีความดันสูงสุดคือ $P^* = 2.358492$ ที่ $\epsilon = 0.9$ มีความดันสูงสุดคือ $P^* = 9.523323$



รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสวนการเอียงศูนย์กับ มุมแอคติจูดที่ 1000 rpm



รูปที่ 22 แสดงซัมเมอร์เฟลด์นัมเบอร์กับค่า δ ต่างๆ

สรุป

ในงานวิจัยการวิเคราะห์สมรรถนะของกบารองคั่นเพลากลมแบบรองรับครึ่งวงโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอเนียนสามารถสรุปผลการคำนวณได้ดังนี้

1. ค่าความดันจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเพิ่มค่าความข้นใส Polyisobutylene ให้แก่น้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากความหนืดและค่า nonlinear factor จะมีค่าเพิ่มขึ้น
2. ค่าความดันของน้ำมันหล่อลื่นแบบนอนนิวตอเนียนจะมีค่าน้อยกว่าของน้ำมันหล่อลื่นแบบนิวตอเนียน ทำให้กบารองคั่นสามารถรับภาระได้มากขึ้น
3. ค่าความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบขึ้น

บรรณานุกรม

1. มงคล มงคลวงศ์โรจน์, อีโรจน์, อาชิโมโตะ "ทฤษฎีการหล่อลื่น" พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2536 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
2. Hashimoto H., Mongkolwongroin M. "Advanced lubrication theory" 1993 KMITL Bangkok
3. Barwell F.T. "Bearing system principle and practice" 1979 Oxford University

4. Bernard J.Hamrock "Fundamentals of fluid film lubrication" 1994 McGraw Hill
5. Stachowiak G.W.,Batchelor A.W. "Engineering Tribology" 1993 ELSEVIER

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นายเกษม ธรรมโกศล

วัน เดือน ปีเกิด

13 มิถุนายน 2518

วุฒิการศึกษา

ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาครุศาสตร์เครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปีการศึกษา 2539

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

2542

การศึกษาสมรรถนะของกาบรองถื่นเพลากลมชนิดรองรับไม่
เต็มวง โดยใช้น้ำมันหล่อถื่นแบบนอนนิวตอนเนียน

2545

Theoretical Investigation on a Transient Elastohydrodynamic
Lubrication with Newtonian Solid-Liquid Lubricants