



รายงานฉบับสมบูรณ์

Final Report

พฤติกรรมเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกของผิวสองผิวและ
สัมผัสภายใต้สภาวะการส่งถ่ายแรงสูง

Thermoelastohydrodynamic characteristics of Two surfaces under
High Traction Conditions

RCH
TJ
1098
2114

มงคล มงคลวงศ์โรจน์

Mongkol MONGKOLWONGROJN

เลขหมู่.....
เลขจากทะเบียน..... 83631
วัน,เดือน,ปี..... 10. 0. 2551

ห้องปฏิบัติการวิจัย วิศวกรรมเครื่องกลไฟฟ้า
โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กันยายน พ.ศ. 2549

Electro-Mechanical Engineering Laboratory
Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

11981453

September 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology : ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 วงเงินงบประมาณ 117,869 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยใช้น้ำมัน SAE 90 เป็นน้ำมันหล่อลื่นและทำการผสม กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และ โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง จากการใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนพบว่าน้ำมัน SAE 90 มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน เมื่อเติมสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปจะทำให้พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบนอนนิวโตเนียนแบบไคลาแดนท์ และเมื่อยิ่งเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นจะยิ่งทำให้พฤติกรรมการไหลยิ่งเป็นไคลาแดนท์มากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเรียดทานสูงเป็นผลทำให้สามารถส่งถ่ายแรงได้สูง โดยทำการจำลองกับลูกกิ้งที่หมุนอยู่บนแผ่นเลื่อน ซึ่งลูกกิ้งมีขนาด 50 mm รับภาระ 345,000 N/m สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเพิ่มส่วนผสมของสารหล่อลื่นของแข็งจะช่วยทำให้คุณลักษณะการหล่อลื่นมีผลที่ดีขึ้นแต่จะทำให้คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้น
2. เมื่อเพิ่มขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งจะช่วยทำให้คุณลักษณะการหล่อลื่นมีผลที่ดีมากกว่าสารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าแต่จะทำให้คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นมากกว่า สารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า
3. สารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจะช่วยรับแรงกระแทกและช่วยทำให้ลูกกิ้งเคลื่อนที่เข้าสู่ภาวะคงตัวได้ดีขึ้นและยังช่วยป้องกันการกระทบกันระหว่างลูกกิ้งกับแผ่นเลื่อนด้วย
4. สารหล่อลื่นของแข็งช่วยทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเรียดทานสูงเป็นผลทำให้สามารถส่งถ่ายแรงได้สูง

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นของแข็งในแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮดรอดนามิกส์ของทรงกระบอกบนแผ่นราบภายใต้แรงกดเป็นเส้นที่สภาวะการส่งถ่ายแรงเนื่องจากความเสียดทานสูง โดยน้ำมันหล่อลื่น SAE90 ที่ผสม กราไฟต์, โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และโพลีเตตาฟลูออไรด์ในปริมาณ 0% 1% 3% และ 5% โดยน้ำหนักตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำมันหล่อลื่นที่เติมของแข็งลงไปจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงเป็นผลทำให้สามารถส่งถ่ายแรงได้สูง

Abstract

In this report, the study of the thermoelastohydrodynamic lubrication (EHL) characteristics under two surfaces in line contact with solid-liquid lubricants for high traction condition. The pure SAE 90, are mixed with solid additives such as graphite, MoS₂ and polytetrafluoroethylene (PTFE) with concentration of 0 % ,1% , 3% and 5% by weight, respectively. From the theoretical results show the effects of solid additives play an important role on raising the friction coefficient between the two surfaces under high traction conditions

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทสรุปย่อ	II
บทคัดย่อ.....	III
คำย่อและสัญลักษณ์.....	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย	2.
บทที่ 2 ทฤษฎีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของน้ำมันหล่อลื่น ของแข็งและวิธีการเชิงตัวเลข	3
บทที่ 3 ผลการคำนวณ.....	10
บทที่ 4 สรุป	36
บทที่ 5 เอกสารอ้างอิง	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

A_h	พื้นที่ของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัส (m^2)
\bar{A}_h	พื้นที่ของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสไร้มิติ
a	รัศมีของพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคกับลูกกลิ้งและแผ่นเลื่อน (m)
b	ความกว้างครึ่งหนึ่งของความในช่วงสัมผัส (m) $= R(8w/\pi)^{0.5}$
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
E_1	โมดูลัสความยืดหยุ่นของแผ่นเลื่อน (Pa)
E_2	โมดูลัสความยืดหยุ่นของอนุภาค (Pa)
E_{ps}	โมดูลัสความยืดหยุ่นสมมูลของลูกกลิ้งกับอนุภาค (Pa)
h	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใดๆ (m)
H	ความหนาฟิล์มไร้มิติ $H = \frac{\pi}{8Rw'} h$
I	ค่าอินทิเกรต
K	ค่าคงที่ในสมการเรย์โนลด์ $K = \frac{\pi^2 U}{16(W')^2}$
KM	ตัวเลขที่ใช้ปรับค่าสมการพลังงาน
p	ความดัน (Pa)
P^*	ความดันไร้มิติ $P^* = \frac{p}{P_H}$
P_H	ความดันสูงสุดในการสัมผัสของ Hertz (Pa) $P_H = E' \left(\frac{W'}{2\pi} \right)^{0.5}$
R	รัศมีของลูกกลิ้ง
S	อัตราส่วนการลื่นไถล $S = 2 \left(\frac{u_2 - u_1}{u_2 + u_1} \right)$
t	เวลา (s)
t^*	เวลาไร้มิติ $t^* = \frac{\bar{u}}{R} t$
U	พารามิเตอร์ความเร็วไร้มิติ $U = \frac{\mu_0 \bar{u}}{E'R}$
u_1	ความเร็วของลูกกลิ้ง (m)
u_2	ความเร็วของแผ่นเลื่อน (m)
\bar{u}	ความเร็วเฉลี่ยของลูกกลิ้งกับแผ่นเลื่อน (m) $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$
u	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรรักษาไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน y (m/s)
V_2	พจน์ของการรืดน้ำมัน $V_2 = \frac{\partial h}{\partial t}$
w	น้ำหนักที่กระทำกับลูกกลิ้ง (N/m)
W'	น้ำหนักที่กระทำกับลูกกลิ้งไร้มิติ $W' = \frac{w}{E'R}$
w	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน z (m/s)
x	โคออร์ดิเนต x
X	โคออร์ดิเนต x ไร้มิติ
y	โคออร์ดิเนต y
Y	โคออร์ดิเนต y ไร้มิติ $Y = \frac{y}{h}$
z	โคออร์ดิเนต z
$W_{i,el}$	ภาระที่อนุภาคได้รับในช่วงยืดหยุ่น (N)
$W_{i,pl}$	ภาระที่อนุภาคได้รับในช่วงเสียรูปอย่างถาวร (N)
H_d	ความแข็งของอนุภาค (Pa)
ρ	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น (kg/m^3)
ρ_0	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง (kg/m^3)
ρ_1	ความหนาแน่นของแผ่นเลื่อน (kg/m^3)
ρ_2	ความหนาแน่นของลูกกลิ้ง (kg/m^3)
ρ_p	ความหนาแน่นของลูกกลิ้ง (kg/m^3)
μ^*	ความหนืดปรากฏของน้ำมันหล่อลื่น (Pa.s)
μ_0	ความหนืดปรากฏของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิง (Pa.s)
u^*	ความเร็วของของไหลในแนวแกน x ไร้มิติ
τ_{xy}	ความเค้นเฉือนในแนว xy (Pa)
τ_{zy}	ความเค้นเฉือนในแนว zy (Pa)
λ	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง โดยน้ำหนัก
β	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ ($1/K$)
T	อุณหภูมิ (K)
T_0	อุณหภูมิอ้างอิง (303 K)
T^*	อุณหภูมิไร้มิติ $T^* = \frac{T}{T_0}$
Z_1	ดัชนีความหนืด-ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบำรุงรักษาที่มีความจำเป็นมากอย่างหนึ่งคือ การหล่อลื่นเครื่องจักร เนื่องจากเครื่องจักรจะสามารถทำงานได้ก็อาศัยการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หากทำการหล่อลื่นไม่ถูกวิธี เช่น ใช้น้ำมันหล่อลื่นไม่ถูกต้องอาจจะทำให้เครื่องจักรเครื่องนั้นเสียหายได้ ดังนั้นจึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าหาการเพิ่มคุณภาพสารหล่อลื่นโดยวิธีการต่างๆ เช่น การเติมสารโพลีไอโซบิวทีลีนลงไปสู่น้ำมันหล่อลื่นเพื่อเพิ่มค่าดัชนี ความหนืดให้กับน้ำมันหล่อลื่น การเติมสารหล่อลื่นของแข็งก็เป็นการเพิ่มคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นอีกวิธีการหนึ่ง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการหล่อลื่นเมื่อทำการเติมสารหล่อลื่นของแข็งลงไปสู่น้ำมันหล่อลื่น SAE 90 และทำการเติมสารหล่อลื่นของแข็ง 3 ชนิด ได้แก่ กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆ

1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา

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

ต่อมาในปี ค.ศ.1896 Hertz [2] ได้ทำการพิจารณาความเค้นและการเสียดรูปของรูปทรงวงรีสองอันสัมผัสกัน โดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเพื่อกำหนดรูปแบบของปัญหาสำหรับการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แบริ่งทรงกลม แบริ่งลูกกลิ้ง เฟืองและ ลูกเบี้ยว และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสมการเรย์โนลด์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นในจุดที่มีการสัมผัสกันของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

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

ในปีค.ศ.1987 Conry ได้นำใช้แบบจำลองของ Eyring เพื่อประยุกต์กับการหล่อลื่นแบบ อีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์สำหรับหล่อลื่นกับสารหล่อลื่นแบบนอนิวโตเนียนกับปัญหาแบบสัมผัสเป็นเส้น (line contact) ในปี 1989 Najji, Bou-Said และ Berthe [3] ได้ทำการนำเสนอสมการเรย์โนลด์ที่ใช้ได้กับสารหล่อลื่นแบบนอนิวโตเนียนซึ่งใช้ได้กับแบบจำลองได้ทุกชนิด

ไม่วารณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการหล่อลื่นโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวทำให้ในบางครั้งมีการกระแทกกันระหว่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงได้มีการศึกษาโดยนำของแข็งที่เป็นสารหล่อลื่นมาช่วยในการลดการกระแทกของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยในปี ค.ศ. 1966 Rylander [6] ได้ทำการศึกษา การหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งบนการรองลื่นเพลากลมสำหรับรับภาระสถิตและในปี ค.ศ. 1968 Rylander และ Tolle [7] ได้ทำการศึกษากับน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็งบนการรองลื่นเพลากลมสำหรับรับภาระพลวัต ในปี 1988 Khonsari และ Esfahanian [8] ทำการวิเคราะห์การหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์บนการรองลื่นเพลากลมโดยใช้ โพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิทผสมในน้ำมันหล่อลื่นและ โมลิตินัมไดซันไฟต์ผสมในน้ำมันหล่อลื่น โดยมีความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง 1% โดยน้ำหนัก

ในปี ค.ศ. 1989 และ 1990 Khonsari ,Wang และ Qi [9,10] ได้ทำการศึกษาการหล่อลื่น สองสถานะโดยใช้การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮดรอไดนามิกส์ และเทอร์โมอีลาสโตไฮดรอไดนามิกส์ ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็งต่ำ

ในปี ค.ศ. 1994 Hua และ Khonsari [11] ได้ทำการศึกษาการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮดรอไดนามิกส์ โดยใช้โมลิตินัมไดซันไฟต์ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เขียนสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานแสดงการไหลระหว่างลูกกลิ้งบนแผ่นเรียบโดยของไหลนี้เป็น SAE 90 ผสมกราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และโพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิท
2. ศึกษาผลของ SAE 90 ที่เติมสารหล่อลื่นของแข็งได้แก่ กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และโพลีเตตาฟลูโอโลเอตเทลิทต่อการส่งถ่ายแรงเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นเรียบ

บทที่ 2

ทฤษฎีการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผสมสารหล่อลื่นของแข็ง และวิธีการเชิงตัวเลข

2.1 สมการเรย์โนลด์[3]

สมการเรย์โนลด์เป็นสมการที่ใช้ในการหาการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

1. การไหลของของไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ
2. ของไหลที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นซึ่งผสมสารหล่อลื่นของแข็งแล้วจะมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบ

นอนนิวโตเนียน

3. ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหลและแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนของไหล

4. ไม่มีการลื่นไถลของของไหลที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน

3. ความหนาของฟิล์มบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดความหนาฟิล์มของไหลจึงมีผลน้อย

6. ไม่คิดถึงผลของความโค้งของผิวสัมผัสเนื่องจากความหนาฟิล์มมีขนาดน้อยมาก

7. แรงเฉื่อยของของไหลมีผลน้อยมาก เนื่องจากมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมของผลต่างของความดันรวมทั้งไม่คิดความเร่งของของไหล

8. อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของไหลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่มีการชนกันระหว่างอนุภาค

9. อนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

สำหรับปัญหาแบบลูกกลิ้งและแผ่นเลื่อน เนื่องจากความยาวของลูกกลิ้งจะยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างของการสัมผัสดังนั้นการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกนของแกน z จะมีการไหลน้อยกว่าในแนวแกน x จึงสมมุติให้มีการไหลในแนวแกน x อย่างเดียว และในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์นั้นนิยมทำให้สมการมีรูปแบบไร้มิติโดยกำหนดให้

$$p = p_H P \quad p_H = E' \left(\frac{W'}{2\pi} \right)^{0.5} \quad \frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)$$

$$h = \frac{8RW'}{\pi} H \quad w = E'RW'$$

$$x = bX \quad b = R \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{0.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = hY \quad y = \frac{8RW'}{\pi}HY \quad (2.1)$$

$$T^* = T_0T \quad \mu = \mu_0\bar{\mu} \quad \rho = \rho_0\bar{\rho}$$

$$u = \bar{u}u^*$$

$$S = 2\left(\frac{u_2 - u_1}{u_2 + u_1}\right) \quad t = \frac{R}{\bar{u}}t^*$$

$$\bar{u} = \left(\frac{u_2 + u_1}{2}\right)$$

เพราะฉะนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ความหนืดของสารหล่อลื่นและสมการอัตราความเครียดเฉือนไร้มิติ ได้ดังนี้

$$u^* = \frac{16}{U} \left(\frac{WH^2}{\pi} \right) \left[\int \frac{Y}{\bar{\mu}^*} dY - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \int \frac{dY}{\bar{\mu}^*} \right] \frac{dP}{dX} + S\bar{\mu}_{e0} \int \frac{dY}{\bar{\mu}^*} + \left(1 - \frac{S}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial Y} = \frac{16}{U} \left(\frac{WH^2}{\pi} \right) \left[\frac{Y}{\bar{\mu}^*} - \frac{1}{\bar{\mu}^*} \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right] \frac{dP}{dX} + S \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ U คือพารามิเตอร์ความเร็วไร้มิติ (dimensionless speed parameter) $= \frac{\mu_0 \bar{u}}{E'R}$ และ $\bar{\mu}_{e1}$ มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 4.4

$$\frac{1}{\bar{\mu}_{e,i}} = \int_0^1 \frac{Y^i}{\bar{\mu}^*} dY \quad \text{เมื่อ } i = 0, 1, 2 \quad (2.4)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (4.1) (4.2) และ (4.3) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการเรย์โนลด์

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho}H^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho}H) + K \frac{S}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho}H \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho}H) \quad (2.3)$$

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

2.2 สมการความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความหนาฟิล์มมีความสัมพันธ์ขึ้นกับรูปทรงของชิ้นงานในที่นี้คือทรงกระบอกและเทอมของการเสียดรูปเพราะฉะนั้นสามารถเขียนสมการฟิล์มน้ำมันได้ตามสมการที่ (4.6)

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} P \ln(X - X') dX' \quad (2.6)$$

2.3 สมการความหนาแน่นและความหนืด

สมการความหนาแน่นและความหนืดของสารน้ำมันได้รับอิทธิพลจากความดันและอุณหภูมิ และเนื่องจากการหล่อลื่นมีการผสมอนุภาคของของแข็งเข้าไปในน้ำมันหล่อลื่นทำให้ความหนาแน่นและความหนืดได้รับอิทธิพลจากอนุภาคของของแข็งด้วย และสามารถเขียนสมการได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.7) และ (4.8)

$$\bar{\rho} = \frac{\left[1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P} \right] \left[1 - \beta T_0 (T^* - 1) \right]}{1 - \lambda \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_p} \right)} \quad (2.7)$$

$$\bar{\mu}^* = \frac{m_0}{\mu_0} \left| \frac{\bar{n}\pi}{8RW'H} \right|^{n-1} \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{n-1} \left(1 + 2.5 \frac{\lambda \rho_0}{\lambda \rho_0 + (1 - \lambda) \rho_p} \right) \exp \left\{ \left[\ln(\mu_0) + 9.67 \right] \left[-1 + \left(1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P \right)^2 \right] - \gamma T_0 (T^* - 1) \right\} \quad (2.8)$$

2.4 สมการพลังงาน

การหาการกระจายอุณหภูมิของปัญหาทางเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของของผสมสามารถหาได้จากสมการพลังงาน (Rohsenow W.M. (1983) [18] และ Khonsari M.M., Hua D.Y. (1994) [11]) คือ

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^2} = -N_{VD} \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 - N_{VW} T^* H^2 u^* \frac{dP}{dX} + N_{IE} \bar{\rho} H^2 u^* \frac{\partial T^*}{\partial X} - N_{HG} H^2 \left(\frac{f_p W_p S}{A_h} \right) \quad (2.9)$$

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

เมื่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารฉบับลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่อุณหภูมิที่ผิวของผิวสองผิวมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการดังนี้

$$T_{S1} = 1 + D_1 \int_{x_{in}}^x \frac{1}{H} \frac{\partial T^*}{\partial Y} \bigg|_{Y=0} \frac{dX'}{\sqrt{X-X'}} \quad (2.10)$$

$$T_{S2} = 1 - D_2 \int_{x_{in}}^x \frac{1}{H} \frac{\partial T^*}{\partial Y} \bigg|_{Y=1} \frac{dX'}{\sqrt{X-X'}} \quad (2.11)$$

โดยที่

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

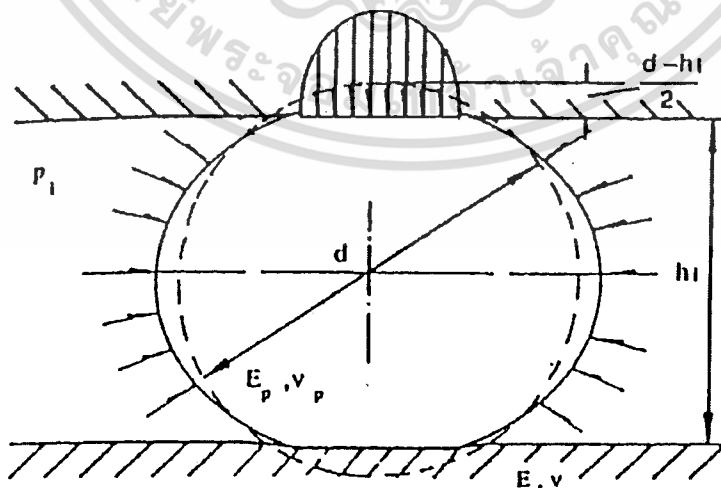
2.3 ภาระที่รับ (Load carrying capacity) [11]

ภาระที่น้ำมันหล่อลื่นและสารหล่อลื่นของแฉ่งรับสามารถแบบออกได้สองส่วนคือ ส่วนที่น้ำมันหล่อลื่นรับและส่วนที่สารหล่อลื่นของแฉ่งรับสามารถเขียนได้ดังนี้

$$w_T = w_f + w_p \quad (2.12)$$

เมื่อ w_T คือภาระรวมที่รับ w_f คือภาระที่น้ำมันหล่อลื่นรับและ w_p ภาระที่สารหล่อลื่นของแฉ่งรับ โดยภาระที่น้ำมันหล่อลื่นได้รับคือ

$$w_f = \int_{x_{in}}^{out} p dx \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.1 แสดงการเสีรูปร่างของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ภาระที่สารหล่อลื่นของแข็งได้รับจะรับเป็นภาระในแนวตั้งฉาก (normal load) ดังรูปที่ 2.1 สารหล่อลื่นของแข็งอาจจะมีการเสีรูปร่างที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่นหรือในช่วงเสีรูปร่างอย่างถาวรและก็ได้โดยที่ภาระของอนุภาคได้รับในช่วงยืดหยุ่นของอนุภาคแต่ละอนุภาคคือ

$$w_{i,el} = \frac{1}{6} [d_p - h(x)]^{1.5} d_p^{0.5} E_{ps} + p(x) \nu_p A_{i,el} \quad (2.14)$$

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

$$\frac{1}{E_{ps}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu^2}{E} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อการเสีรูปร่างของอนุภาคอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ความดันที่สัมผัสเฉลี่ยคือ

$$p_m = \frac{w_{i,el}}{\pi a^2} \quad (2.16)$$

เมื่อ a คือรัศมีของวงกลมของพื้นที่สัมผัสที่ถูกกระทำสามารถหาได้จาก

$$a = \left[\frac{3 w_{i,el} d_p}{4 E_{ps}} \right]^{1/3} \quad (2.17)$$

โดยทั่วไปขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสดังนั้นอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัสจะอยู่ในช่วงเสีรูปร่างอย่างถาวร การพิจารณาการเสีรูปร่างอย่างถาวรจะพิจารณาได้ยาก ดังนั้นในที่นี้จะใช้วิธีการประมาณค่าอย่างง่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ของเสีรูปร่างอย่างถาวรกับความแข็งของวัสดุ ความสัมพันธ์นี้คือ

$$w_{i,pl} = \pi a^2 H_d \quad (2.18)$$

เมื่อ H_d คือค่าความแข็งของอนุภาคและ a คือรัศมีของวงกลมของพื้นที่สัมผัสที่ถูกกระทำซึ่งจะสมมุติว่ามีขนาดเท่ากับสมการ (4.17)

ภาระรวมที่ทุกอนุภาครับคือ $\sum w_{i,pl}$ สามารถใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w_p = \sum_i^{N_z} \sum_i^{N_x} w_i \quad (2.19)$$

เมื่อ N_x และ N_z คือจำนวนของอนุภาคที่อยู่ในช่วงสัมผัสในทิศทางในแนวแกน x และ z ตามลำดับ สมมติว่าอนุภาคมีการกระจายอยู่ทั่วและไม่มีการซ้อนกันในช่วงสัมผัสจำนวนของอนุภาคคือ

$$N_j = I_j \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_x I_z} \right) \frac{6\lambda}{\pi d_p^3} \frac{\rho_0/\rho_p}{(1-\lambda[1-\rho_0/\rho_p])}} \quad j=1,2 \quad (2.20)$$

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

2.6 การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

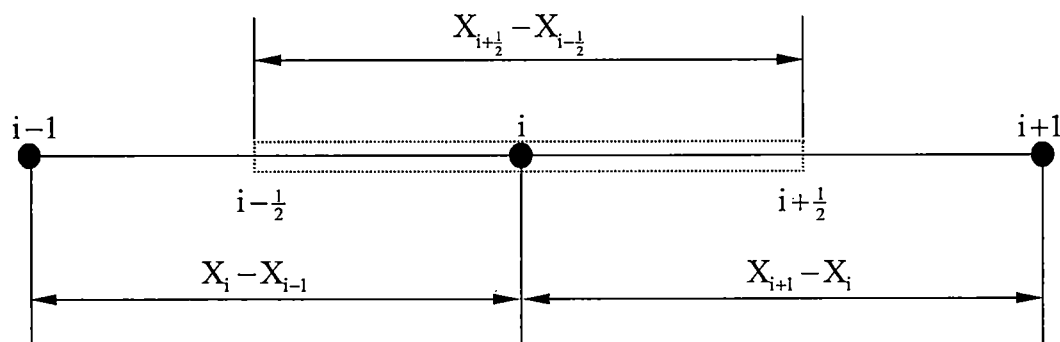
จากสมการเรย์โนลด์แบบไร้มิติ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + K \frac{S}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho} H) \quad (2.21)$$

เมื่อ

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

การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) [18] สามารถแก้ได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโนดใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& -\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}(X_i - X_{i-1})P_{i+1} + \left[\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}(X_i - X_{i-1}) + \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}(X_{i+1} - X_i) \right] P_i - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}(X_{i+1} - X_i)P_{i-1} \\
& = K(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}})(X_{i+1} - X_i)(\rho_{i-1}H_{i-1} - \rho_i H_i) \\
& + K \frac{S}{2}(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}})(X_{i+1} - X_i) \left[\bar{\rho}_{i-1}H_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{e1}} \right)_{i-1} - \bar{\rho}_i H_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\mu_{e1}} \right)_i \right] \\
& + K(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}})(X_{i+1} - X_i)(X_i - X_{i-1}) \left(\frac{\bar{\rho}_i^0 H_i^0 - \bar{\rho}_i H_i}{\Delta t^*} \right)
\end{aligned} \tag{2.22}$$

โดยที่เงื่อนไขขอบของสมการเรย์โนลด์คือ

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

เมื่อแทนค่า i เป็นค่าหมายเลขโนดต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง n และแทนค่าเงื่อนไขขอบลงไปจะได้ระบบสมการไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[A]\{P\} = \{B\} \tag{2.23}$$

2.7 การแก้สมการพลังงานโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

จากสมการพลังงานที่ทำการปรับปรุงในบทที่แล้วคือ

$$\begin{aligned}
T_m^* & = -N_{VD} \left[\int \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY dY - \frac{1}{2} \int \int \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY dY \right] \\
& - N_{VW} T_m^* H^2 \frac{dP}{dX} \left[\int \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int \int u^* dY dY \right] \\
& + N_{IE} \bar{\rho} H^2 \frac{\partial T_m^*}{\partial X} \left[\int \int \int u^* dY dY dY - \frac{1}{2} \int \int u^* dY dY \right] + \frac{N_{HG}}{12} H^2 \left(\frac{f_p W_p^* S}{A_h} \right) + \frac{T_{S1} + T_{S2}}{2}
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$[A_T]\{T_m^*\} = \{B_T\} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

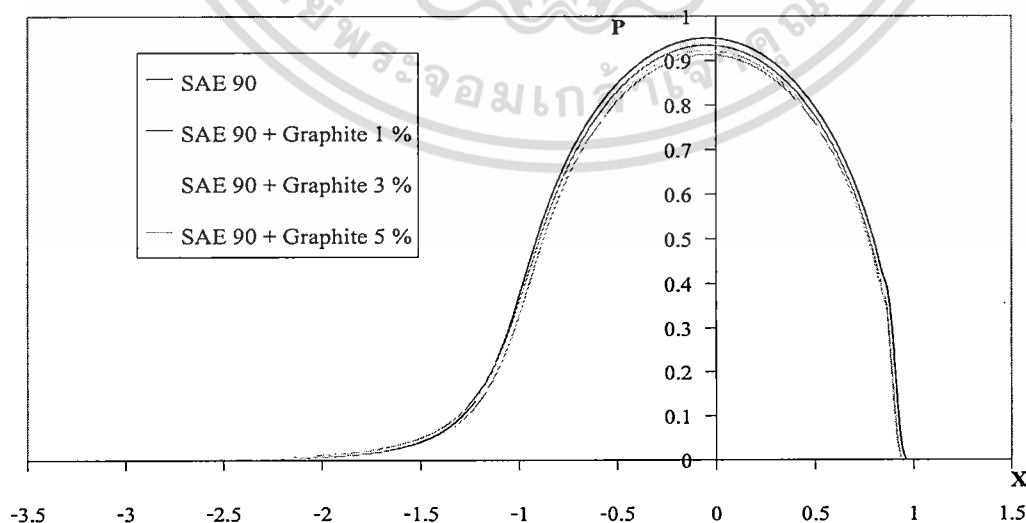
บทที่ 3

ผลการคำนวณ

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของลูกกลิ้งกับแผ่นเลื่อนโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นผสมกับสารหล่อลื่นของแข็ง ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้คือ น้ำมัน SAE 90 โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะทำการผสมกราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟต์ และโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทิลีน (PTFE) ในอัตราส่วน 0%, 1%, 3% และ 3% ตามลำดับ โดยลูกกลิ้งมีรัศมีขนาด 30 มิลลิเมตร รองรับภาระ 343,000 N/m และมีพารามิเตอร์ความเร็วไ่วมิติ 1×10^{-11} โดยมีผลการคำนวณดังนี้

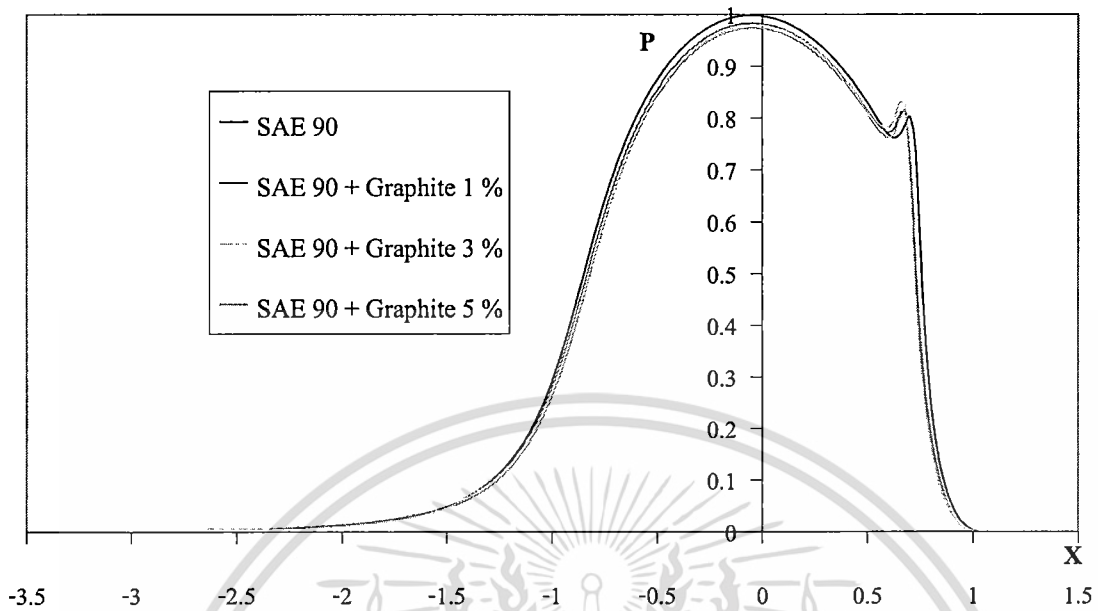
3.1 ผลเนื่องจากความเข้มข้นของสารหล่อลื่นของแข็ง

สารหล่อลื่นของแข็งที่ใส่ลงไปใ้น้ำมันหล่อลื่น โดยที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันจะมีผลต่อคุณลักษณะการหล่อลื่นคือ จะทำให้การกระจายความดันของน้ำมันมีขนาดลดลงเนื่องจากอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งจะเข้าไปช่วยรับภาระในช่วงของการสัมผัสและเนื่องจากขนาดของอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งมีขนาดใหญ่กว่าความหนาฟิล์มในช่วงสัมผัสเมื่อน้ำมันหล่อลื่นล้วนๆ จึงทำให้อนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปช่วยในการเพิ่มความหนาฟิล์มน้ำมัน แต่ในทางตรงข้ามอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งกลับทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากยังเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคของสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปยิ่งมากจะยิ่งทำให้พฤติกรรมการไหลของสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็น ไดลาแทนท์มากยิ่งขึ้น และยังทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีความฝืด (Friction) มากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิของระบบโดยรวมจึงเพิ่มมากขึ้น

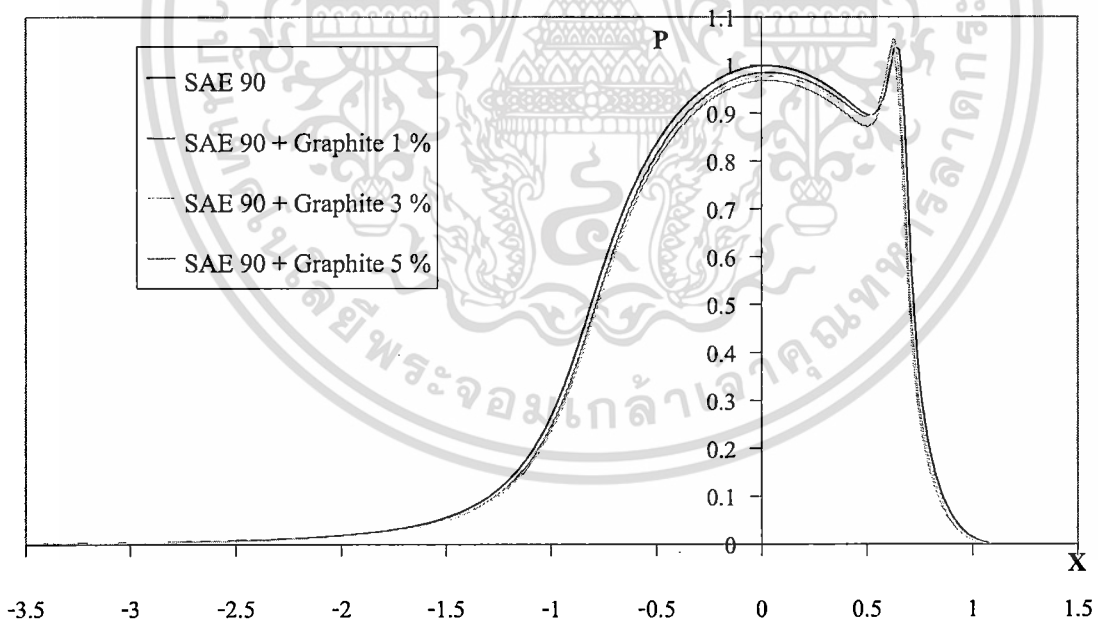


รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารที่เวลาไร้มิติที่ 1 ใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

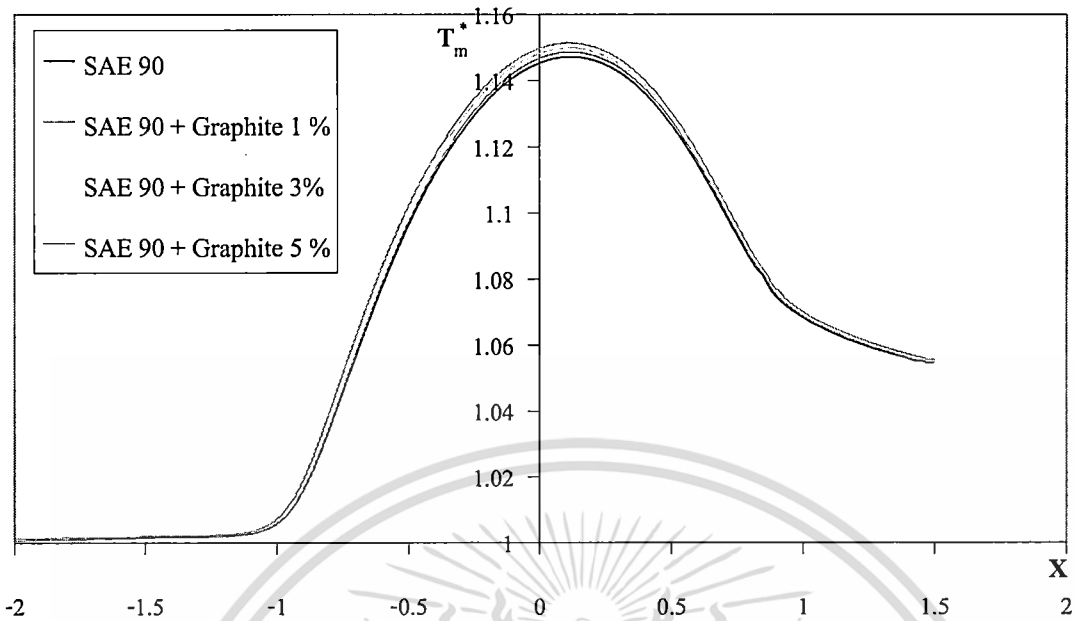


รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

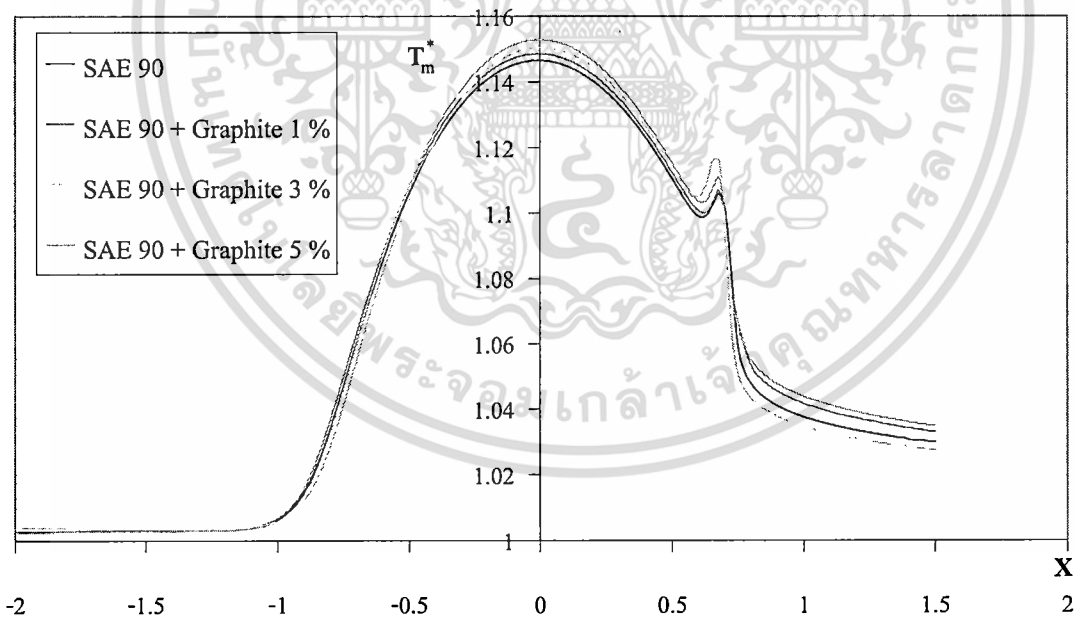


รูปที่ 3.3 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

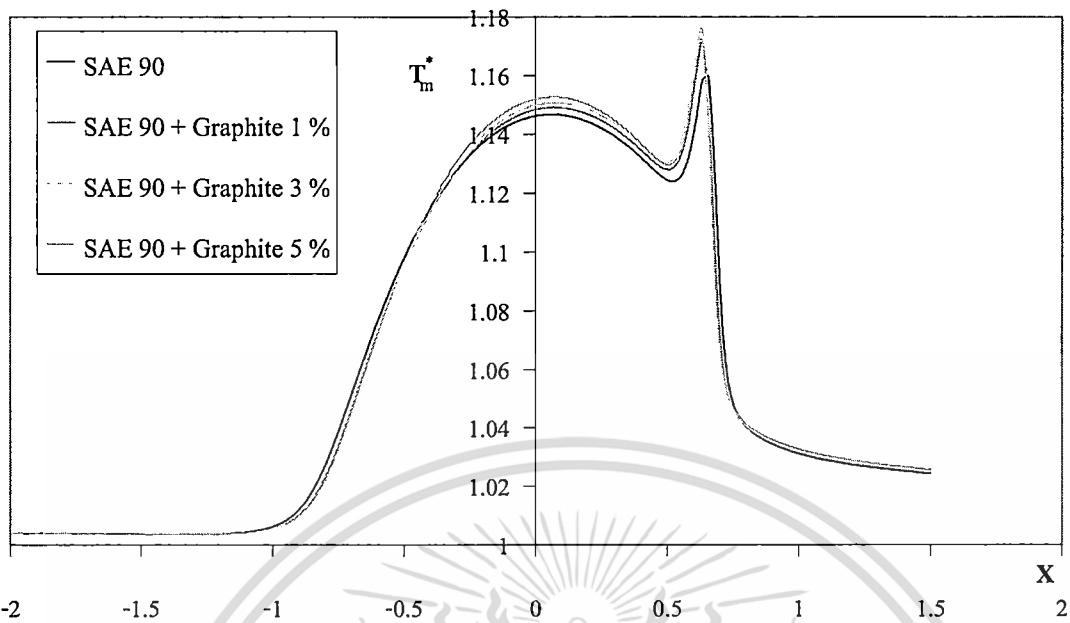


รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

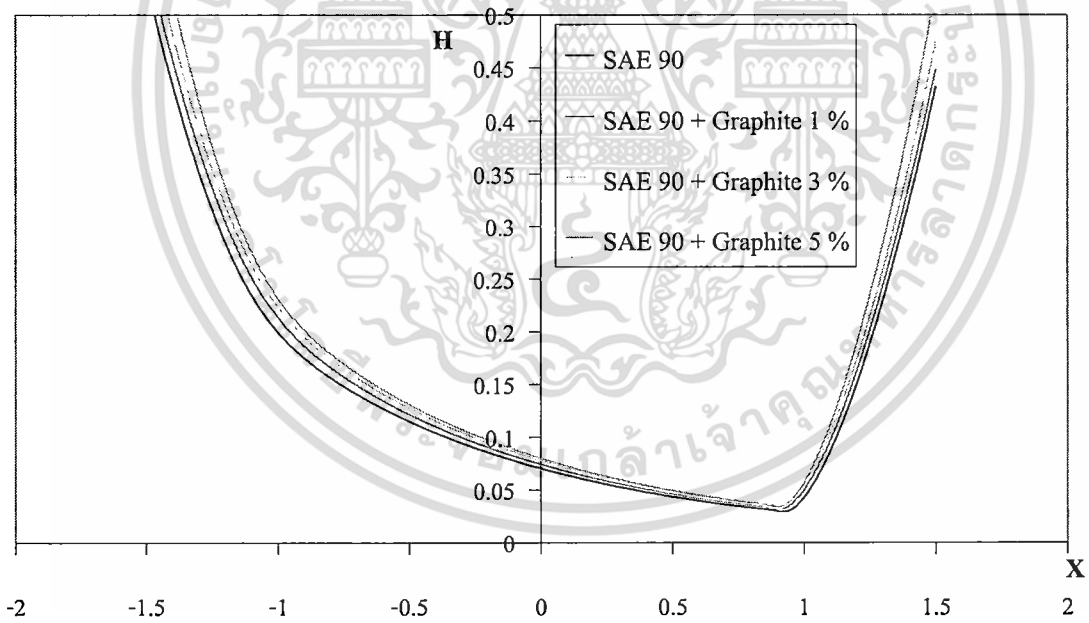


รูปที่ 3.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

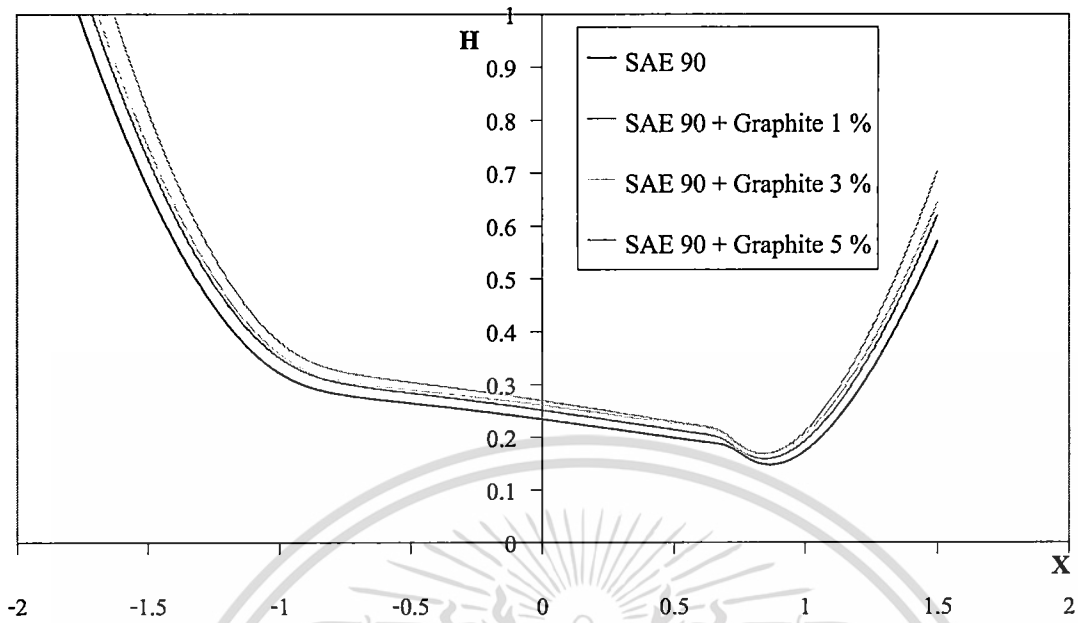


รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

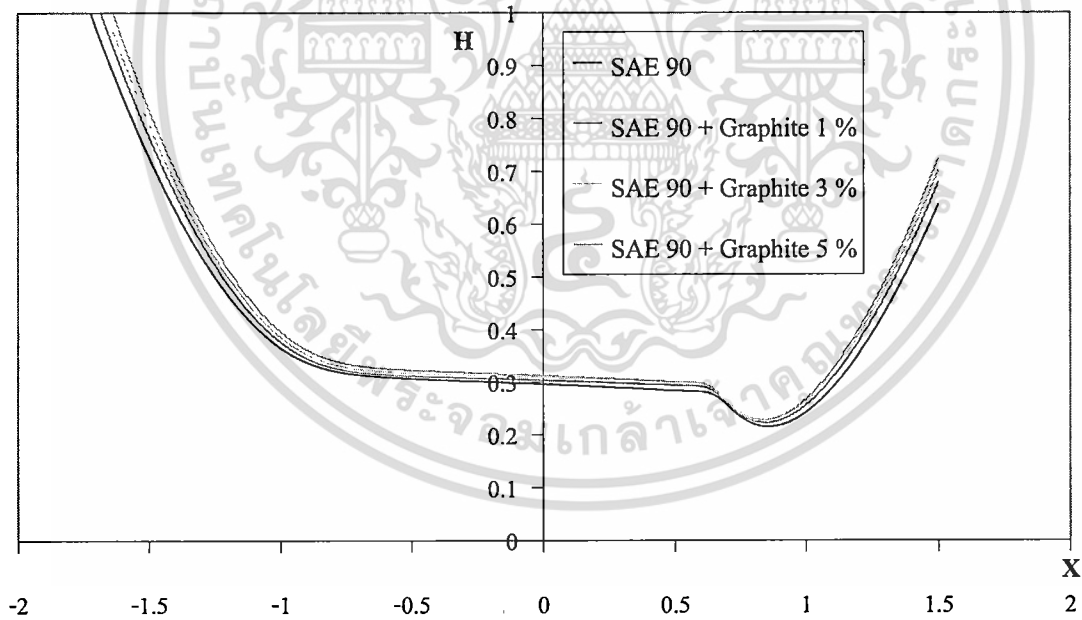


รูปที่ 3.7 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

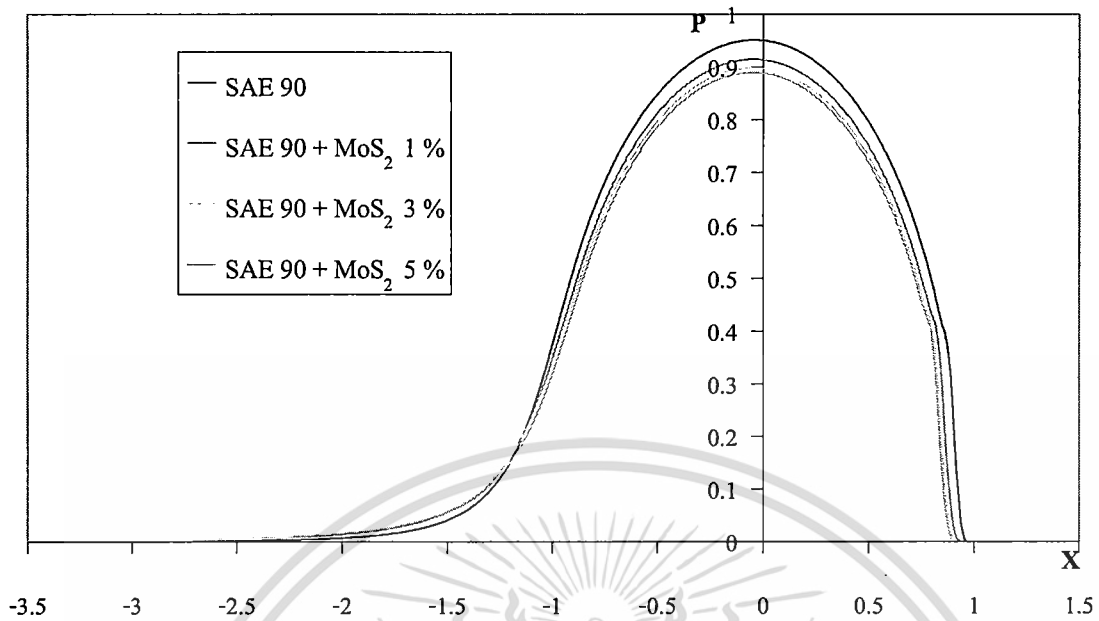


รูปที่ 3.8 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

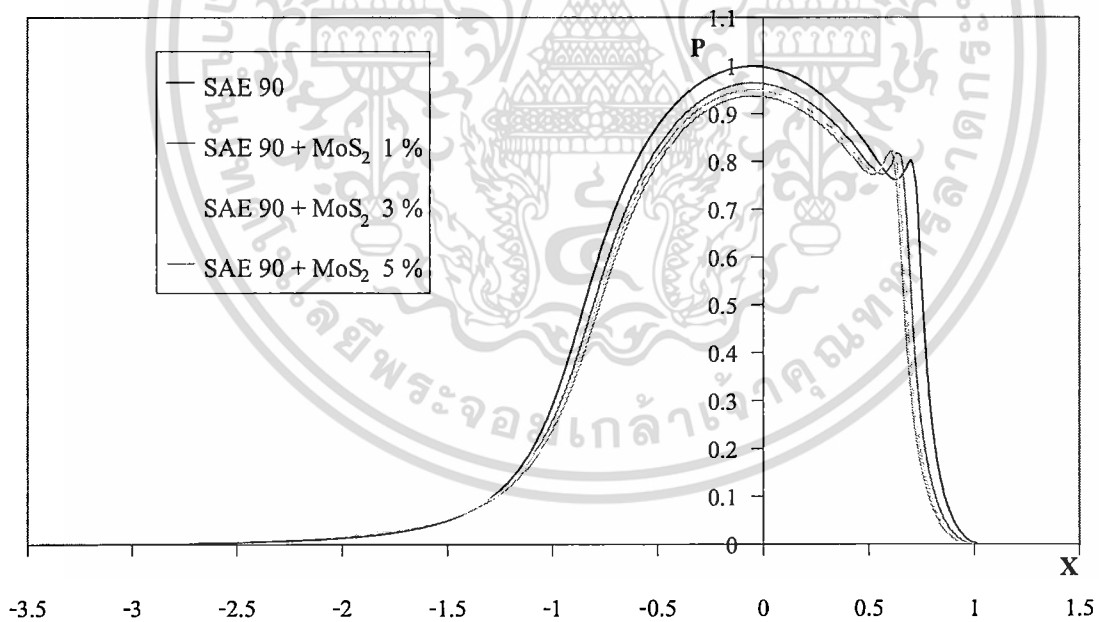


รูปที่ 3.9 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

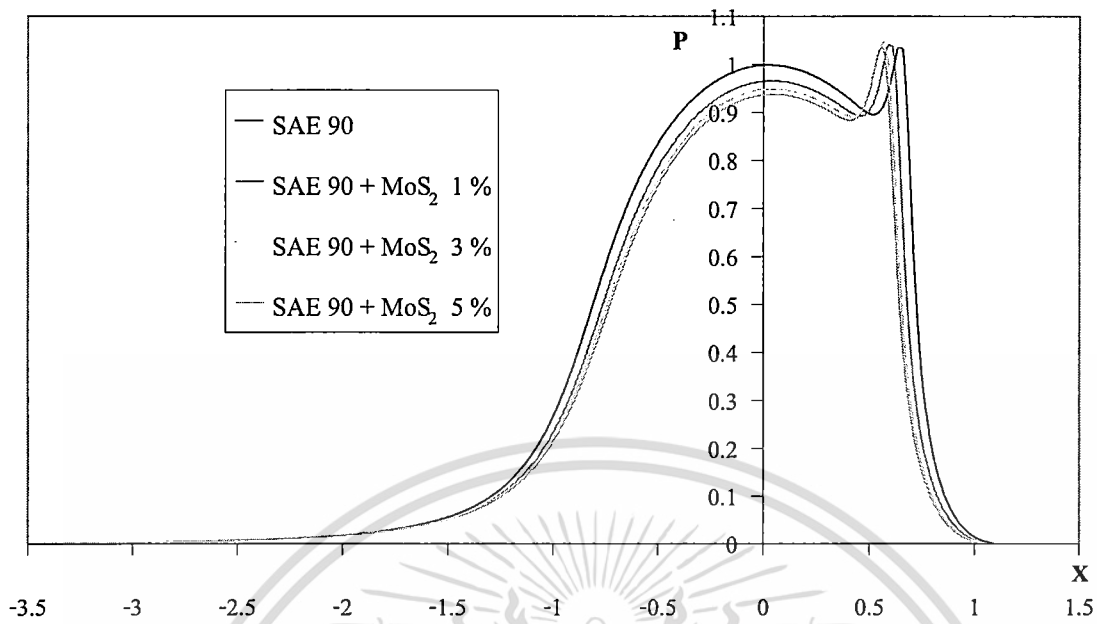


รูปที่ 3.10 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

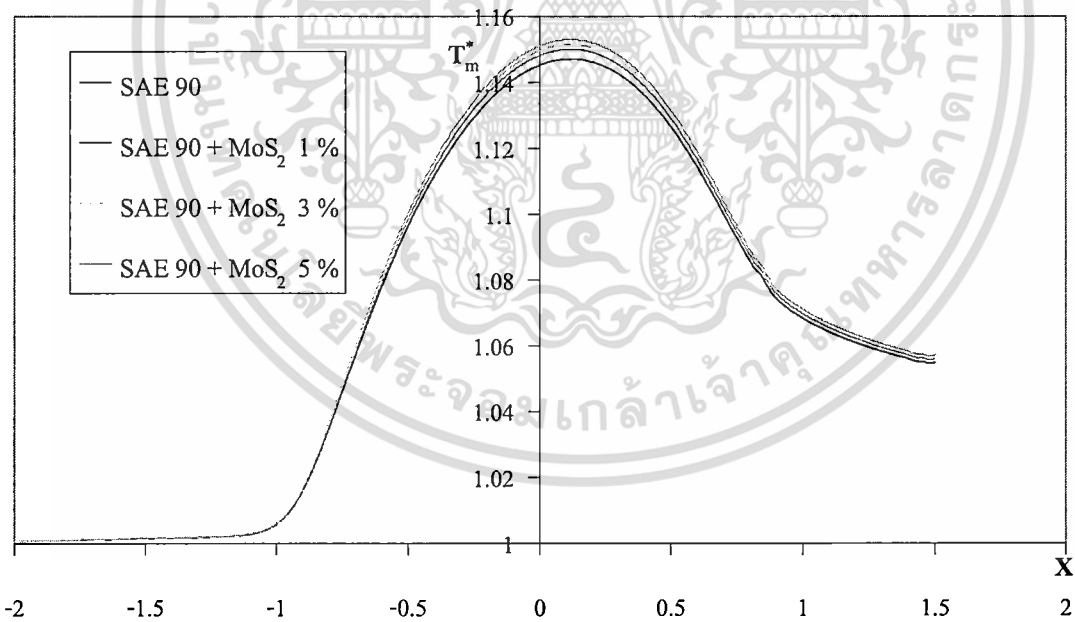


รูปที่ 3.11 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

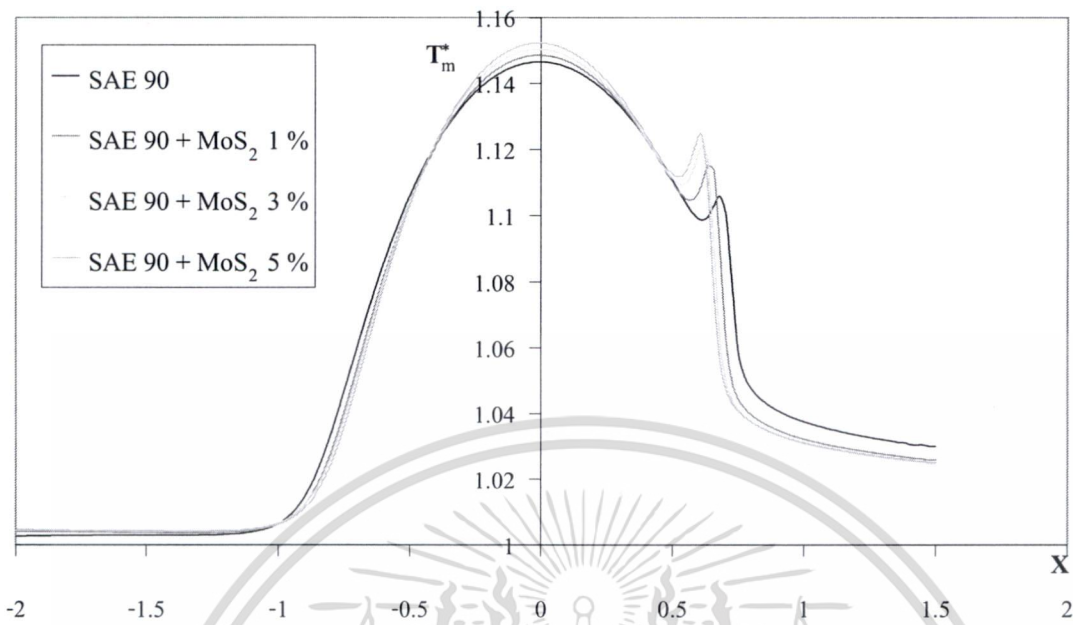


รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

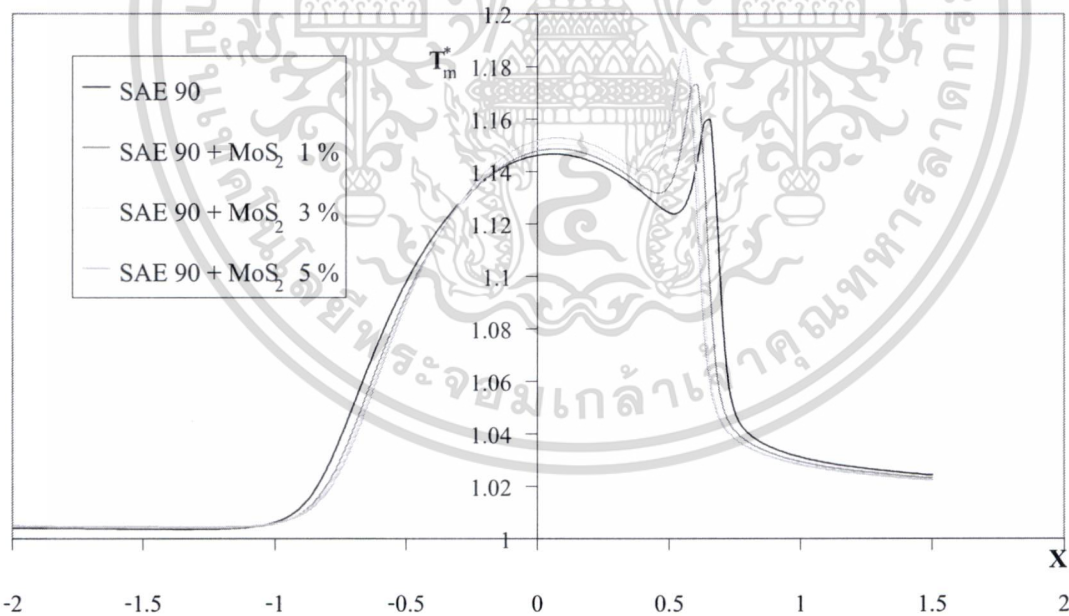


รูปที่ 3.13 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

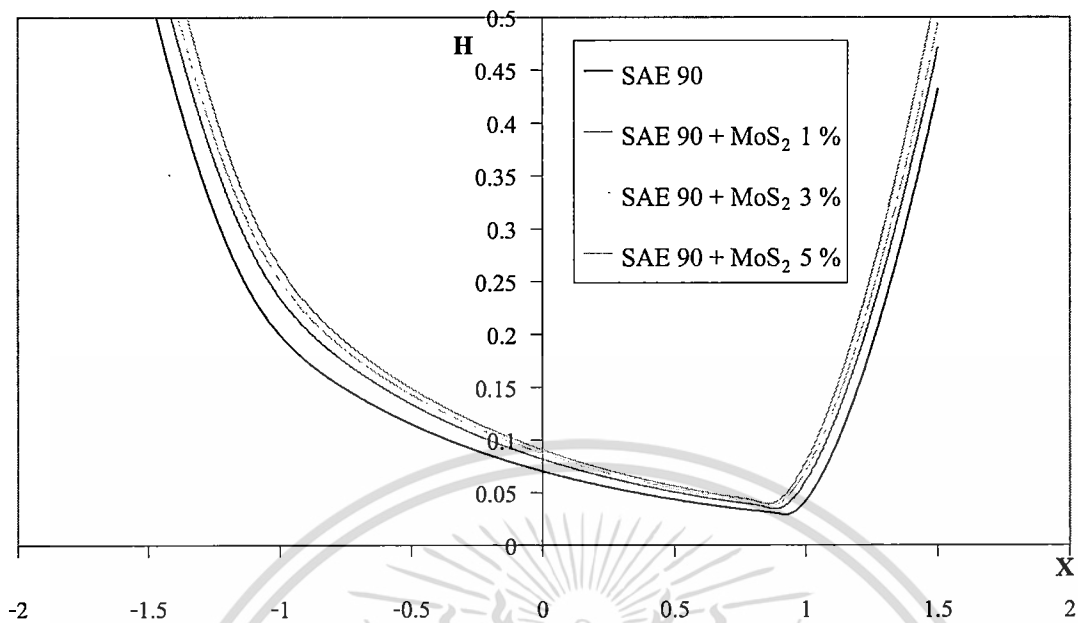
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



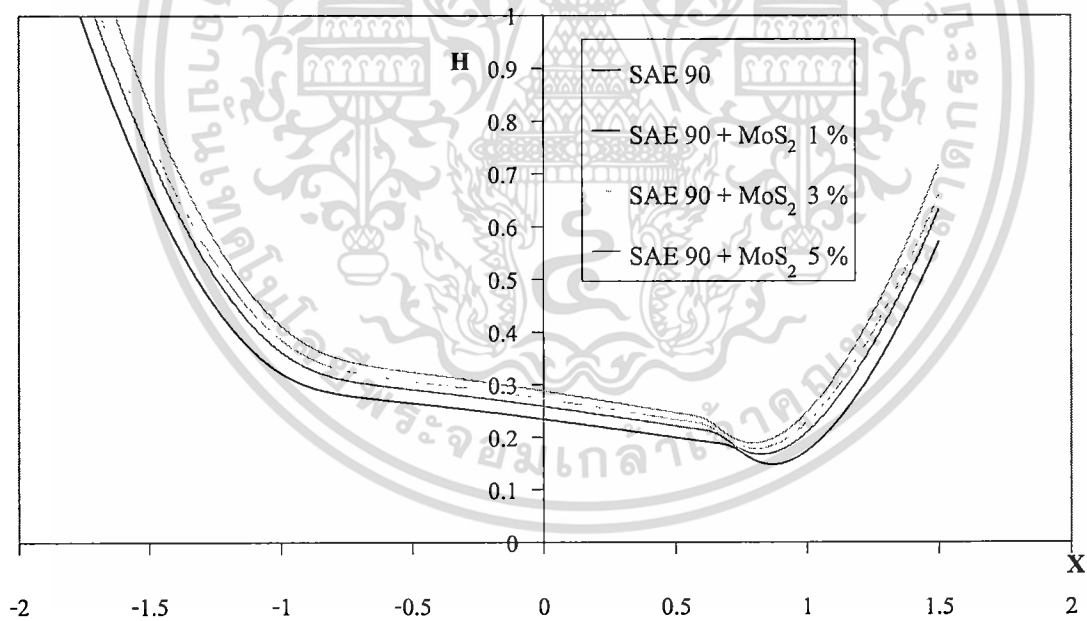
รูปที่ 3.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิติน้ำมโคไฮไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3



รูปที่ 3.15 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโมลิติน้ำมโคไฮไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

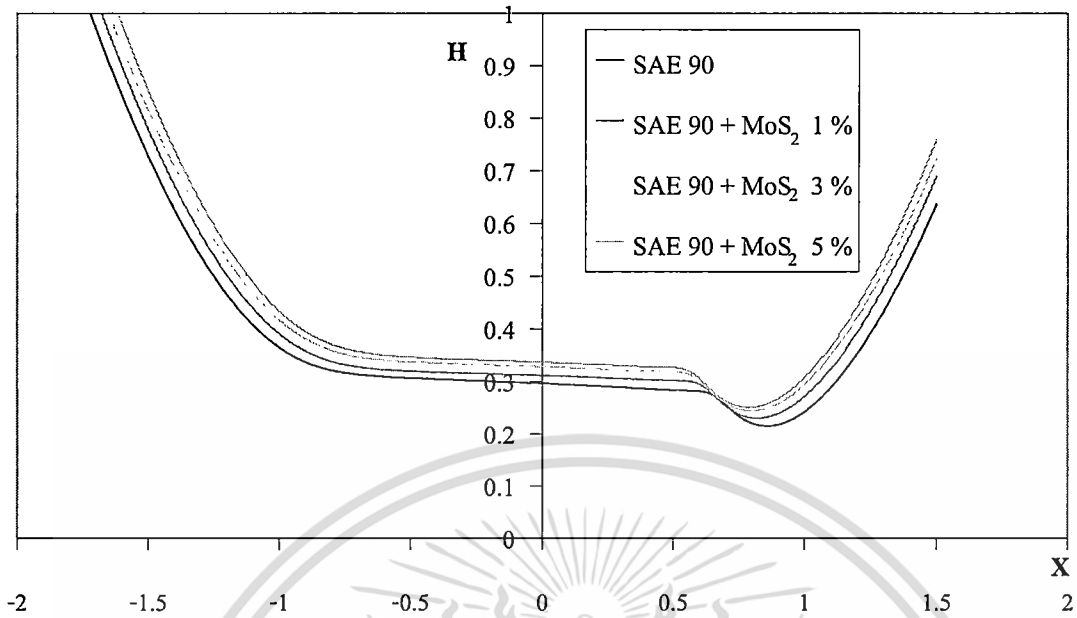


รูปที่ 3.16 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

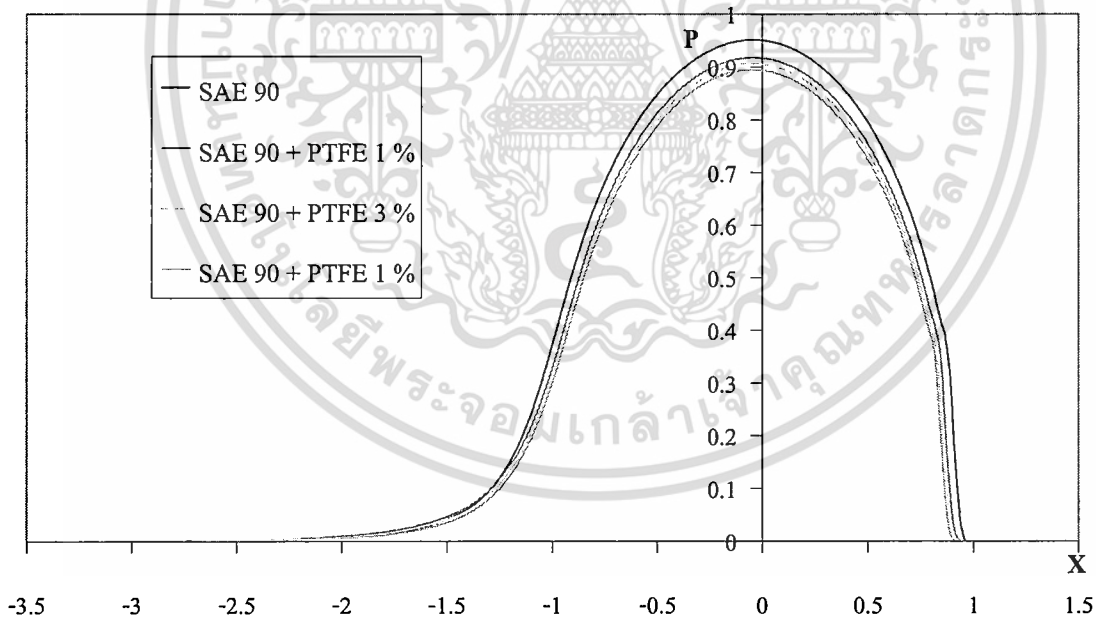


รูปที่ 3.17 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

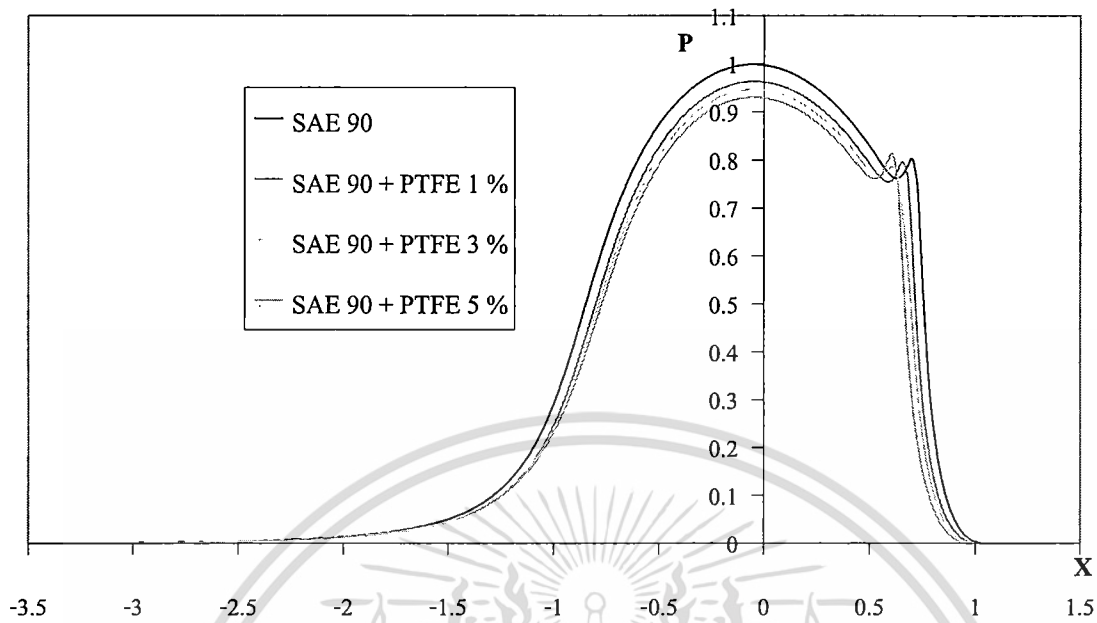


รูปที่ 3.18 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัมไดซไฟด์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไ่วมิติที่ 3

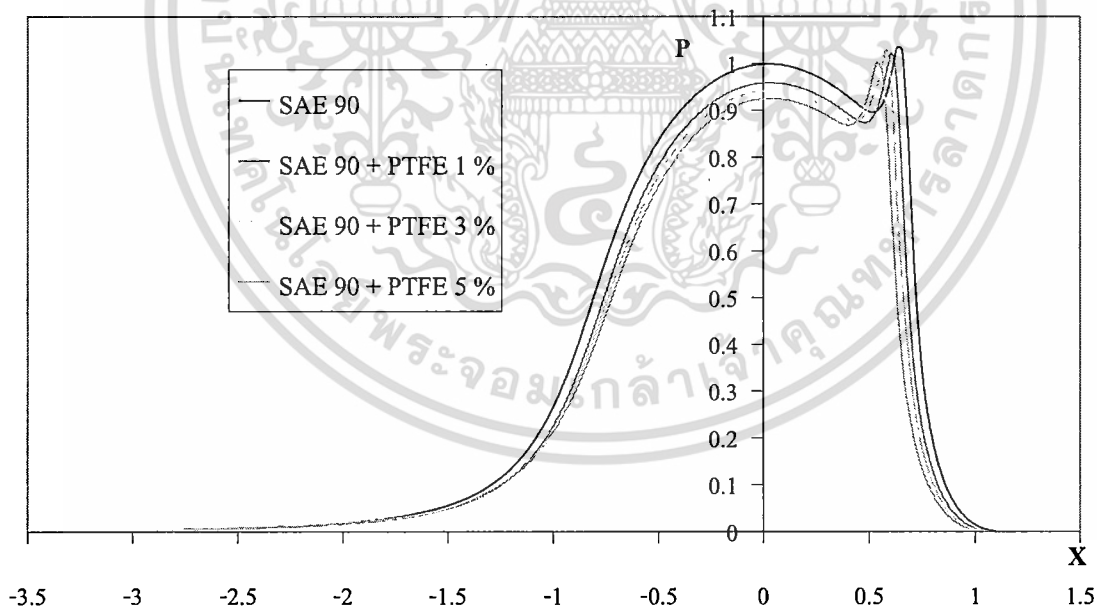


รูปที่ 3.19 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไ่วมิติที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

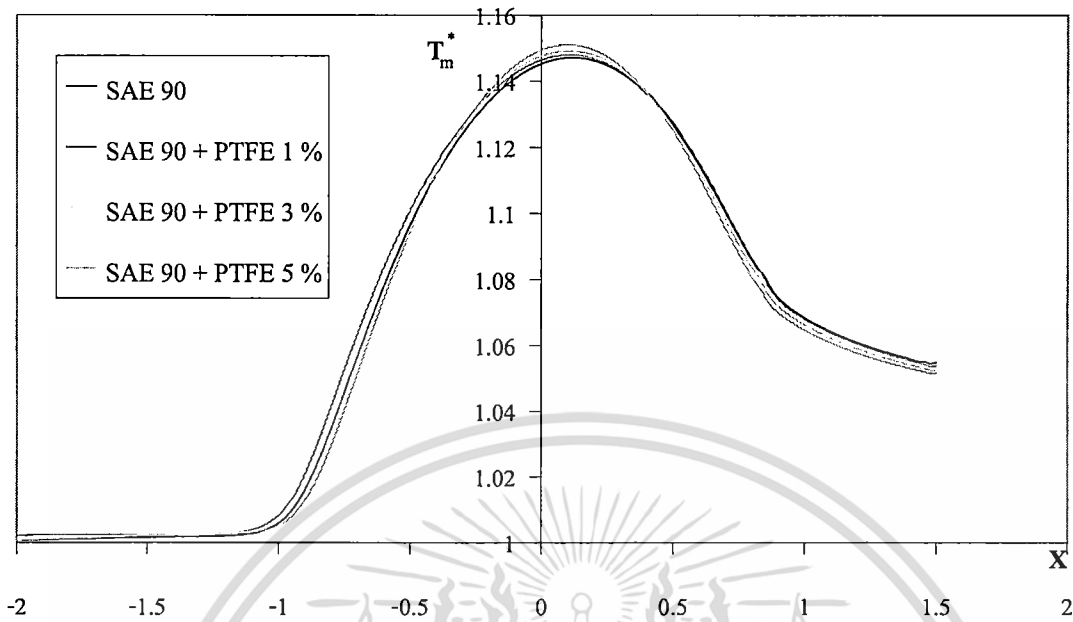


รูปที่ 3.20 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

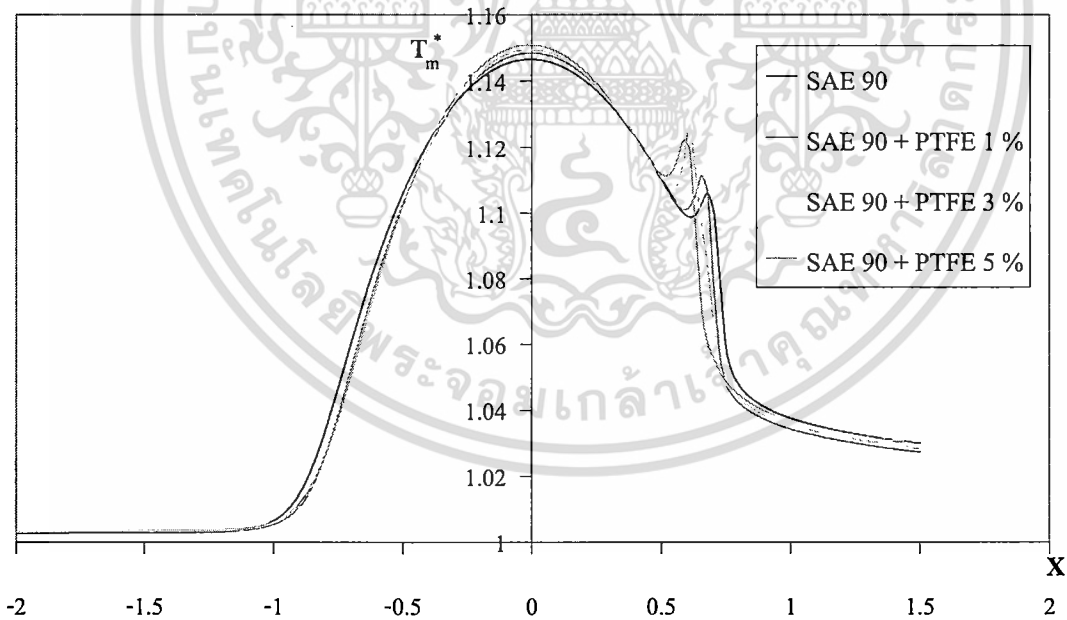


รูปที่ 3.21 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

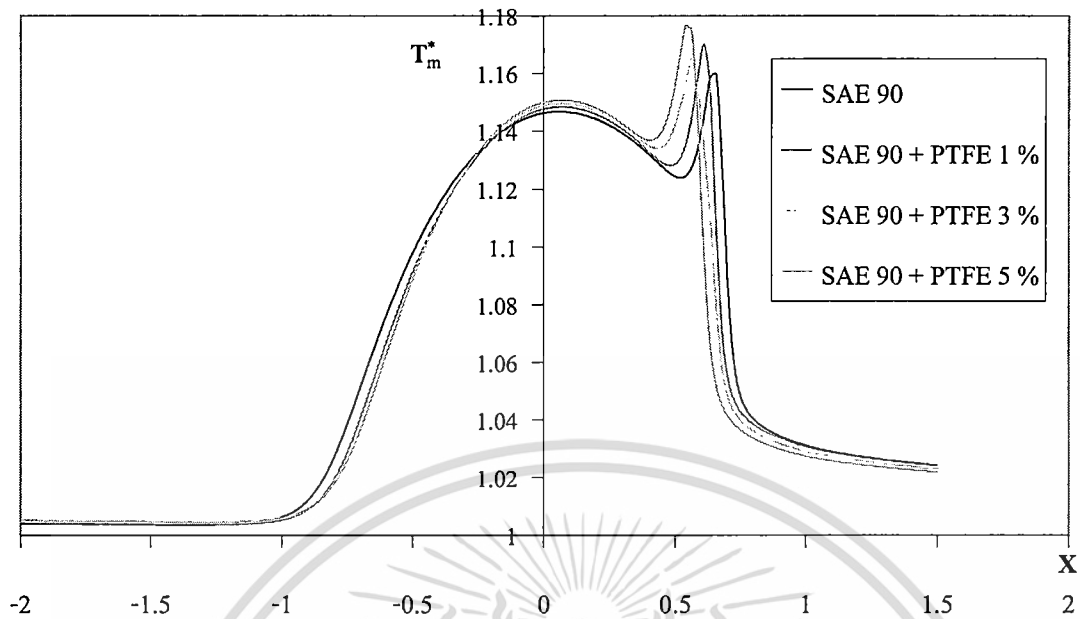


รูปที่ 3.22 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

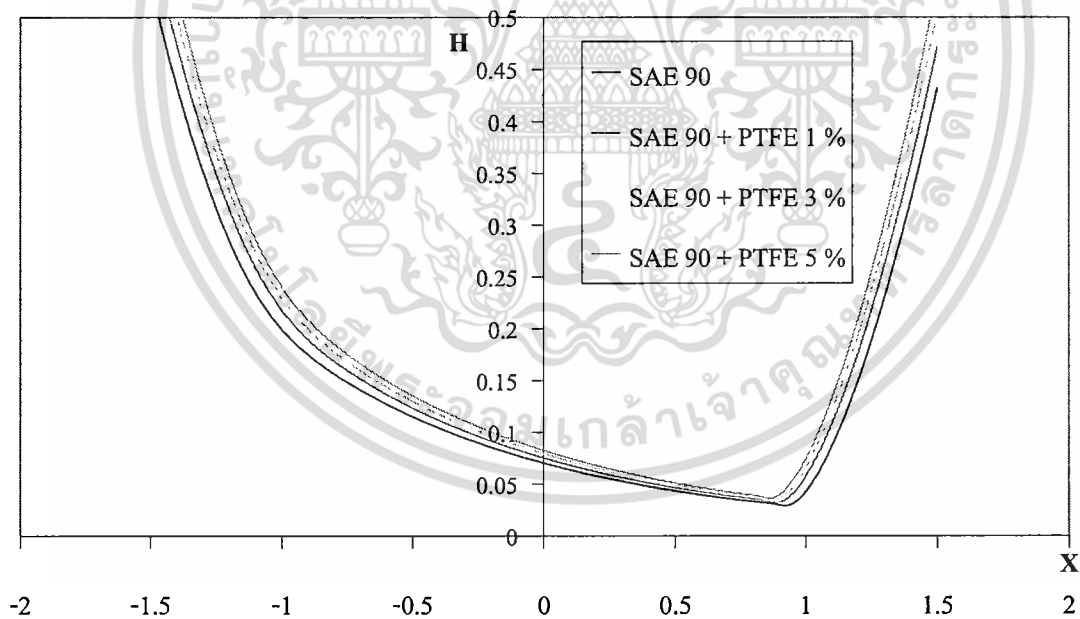


รูปที่ 3.23 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

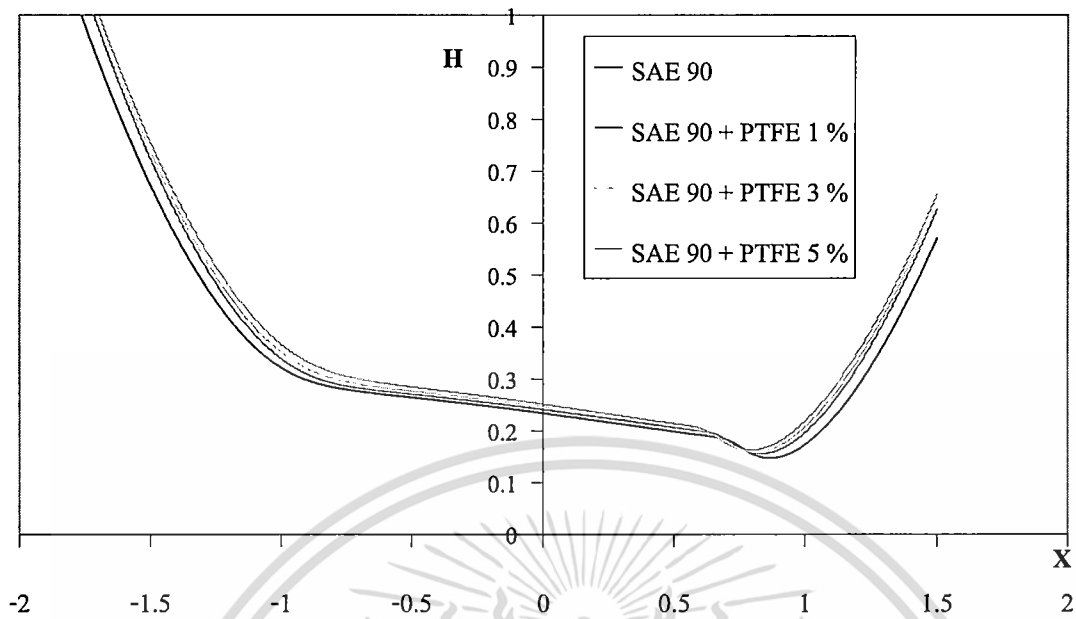


รูปที่ 3.24 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 3

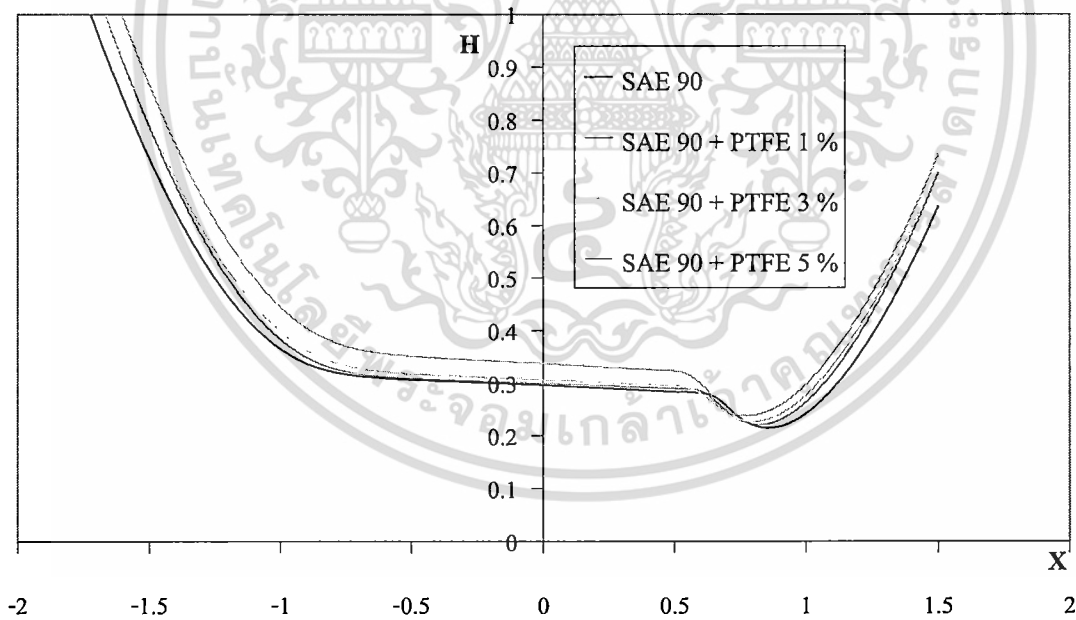


รูปที่ 3.25 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไร้มิติที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

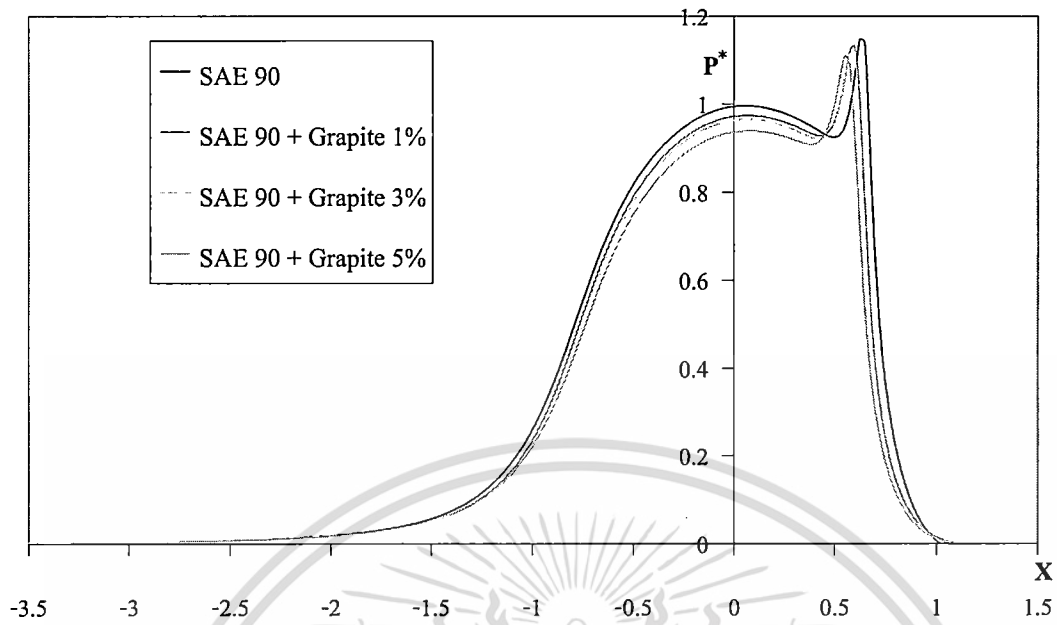


รูปที่ 3.26 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตราฟลูออโรเอทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไ่วมิติที่ 3

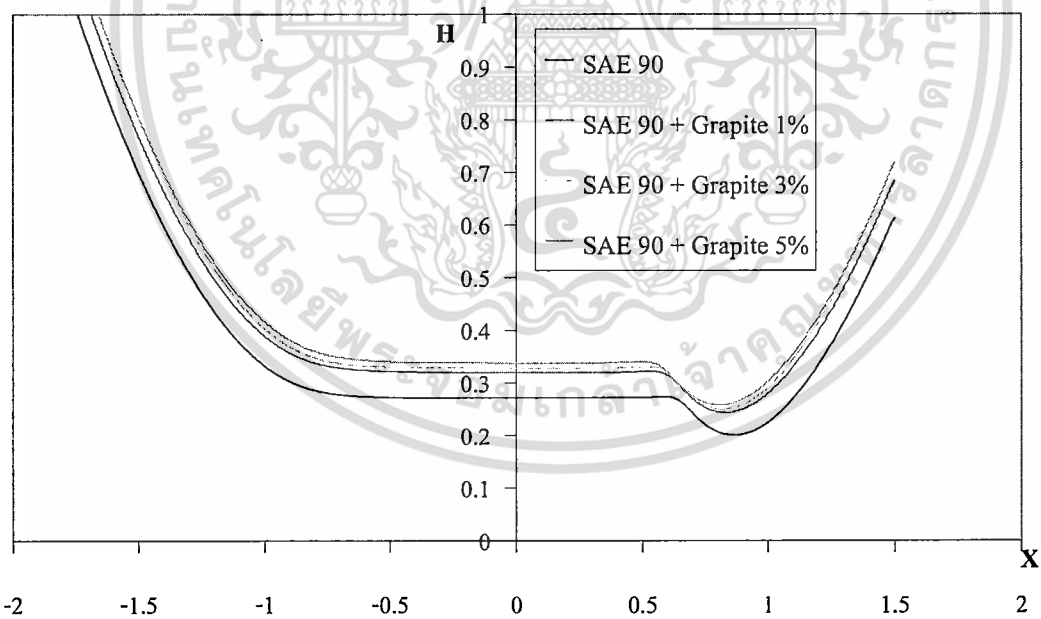


รูปที่ 3.27 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โพลีเตตราฟลูออโรเอทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาไ่วมิติที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

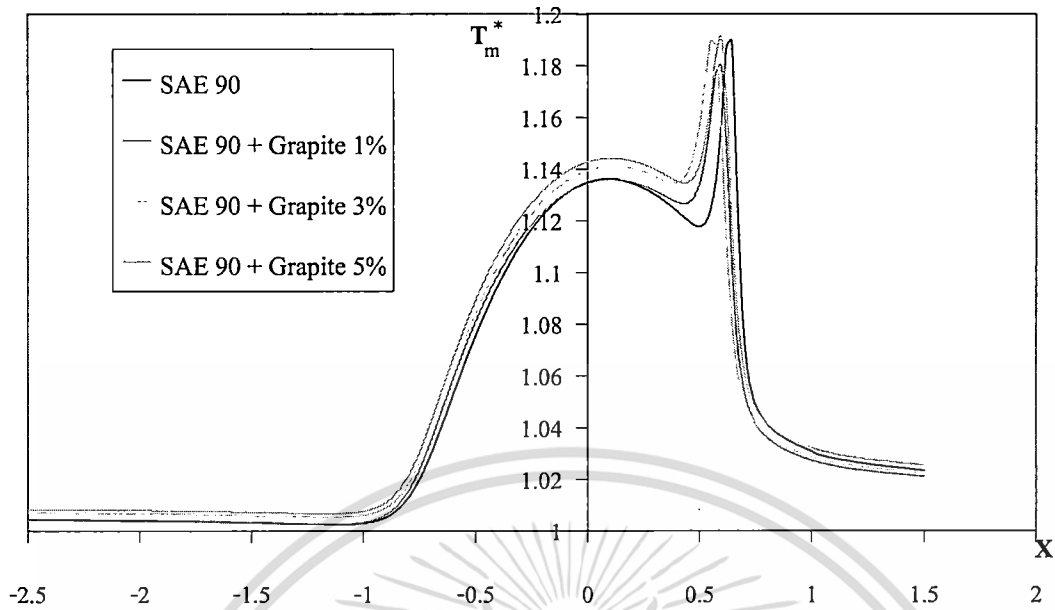


รูปที่ 3.28 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมมูลย์

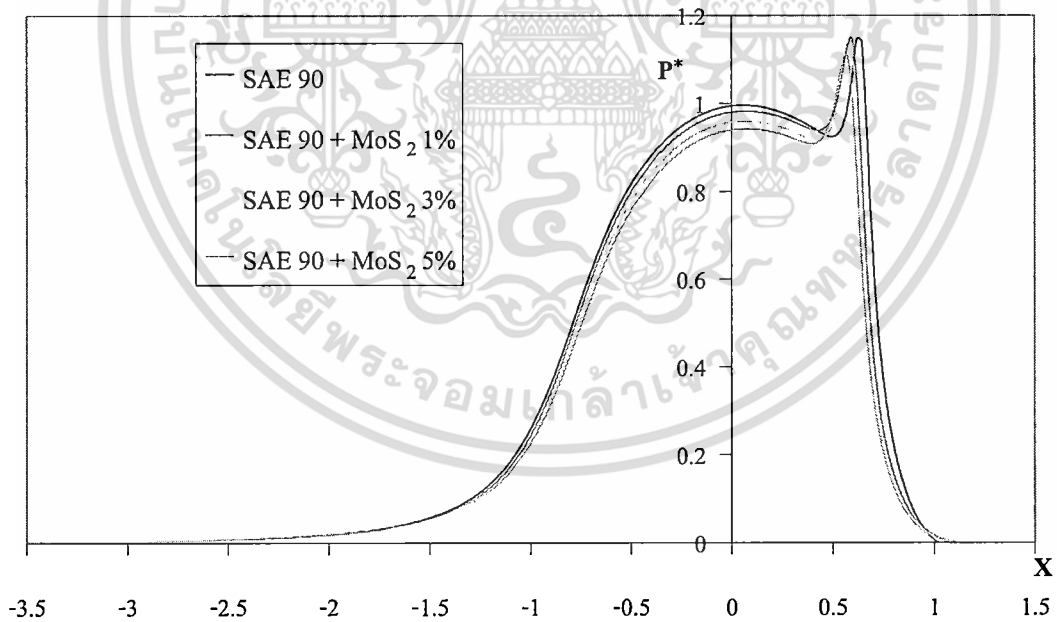


รูปที่ 3.29 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

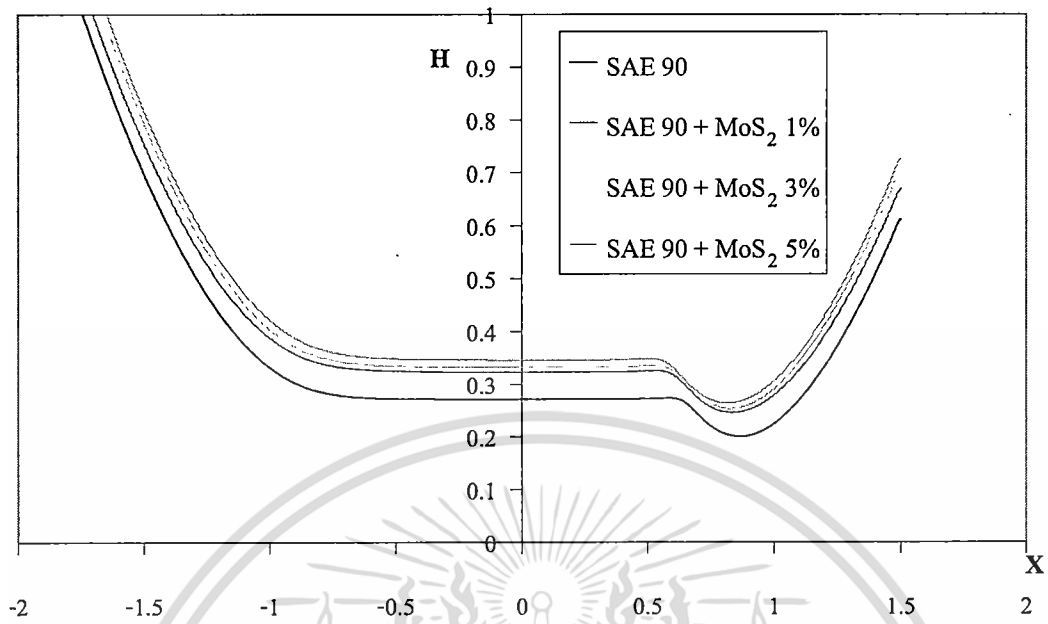


รูปที่ 3.30 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมกราไฟต์ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สถานะสมดุลย์

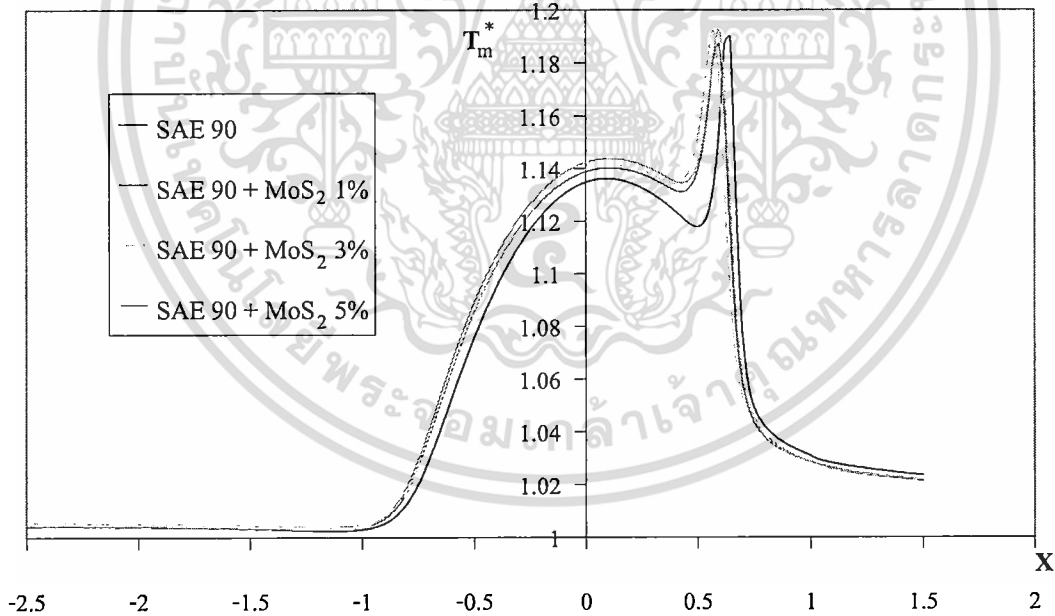


รูปที่ 3.31 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สถานะสมดุลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

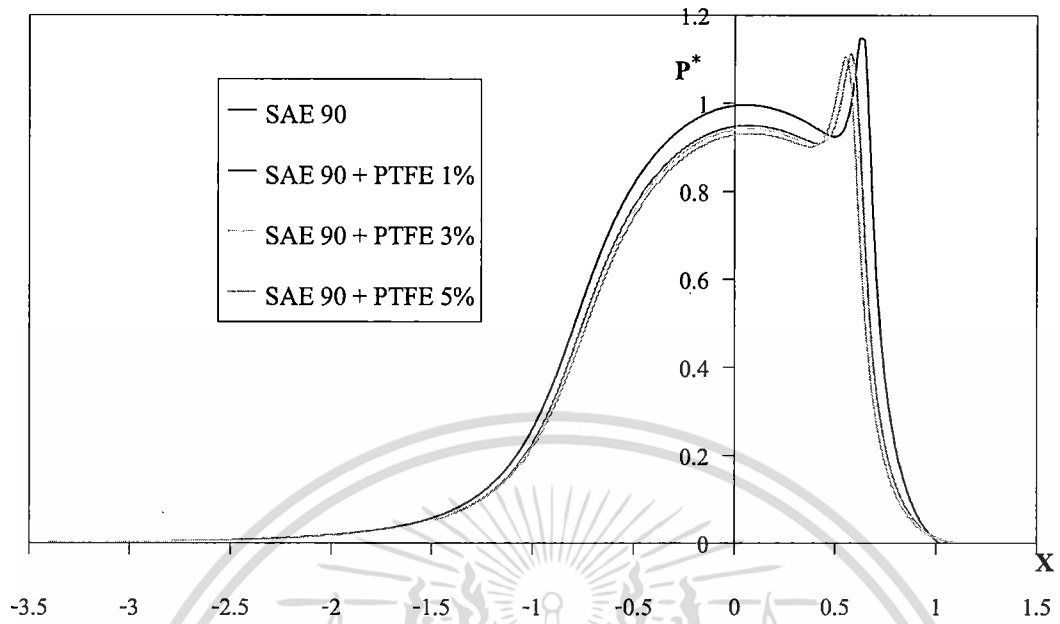


รูปที่ 3.32 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สถานะสมดุลย์

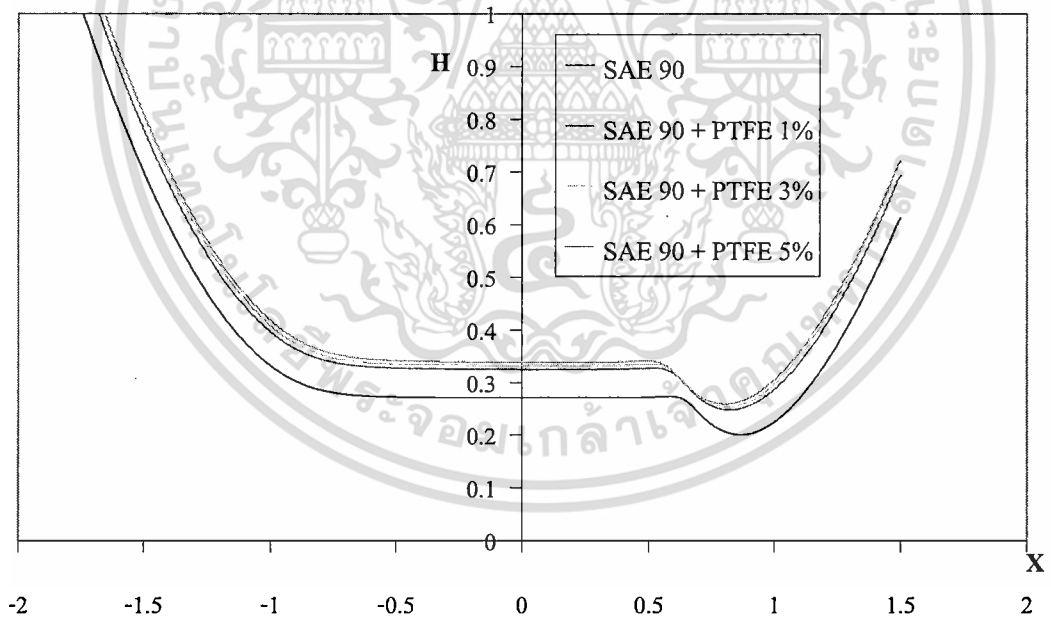


รูปที่ 3.33 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สถานะสมดุลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

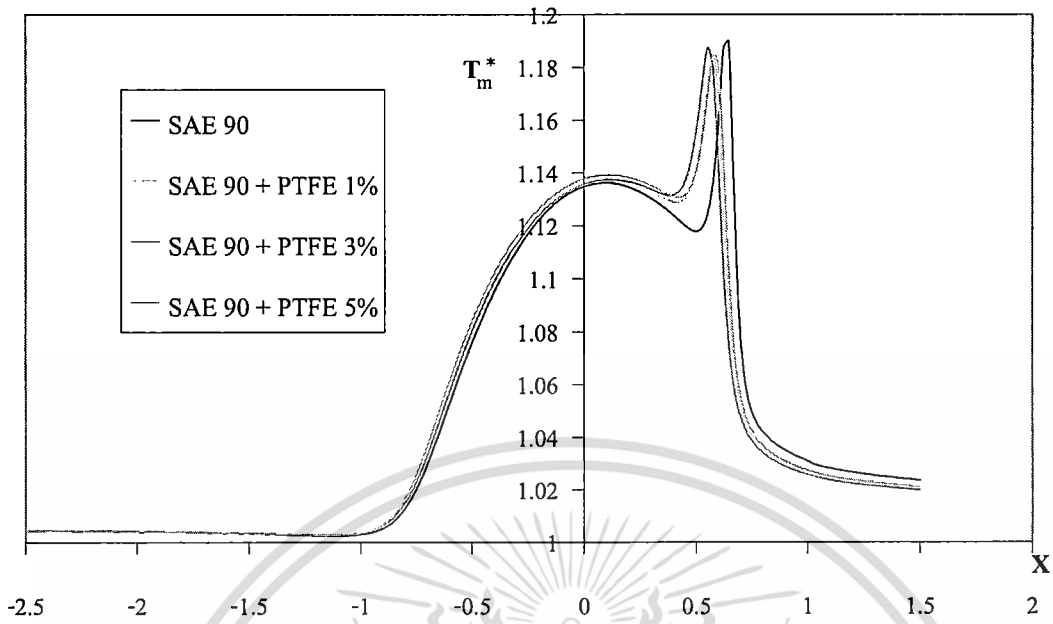


รูปที่ 3.34 แสดงการกระจายความดันของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์

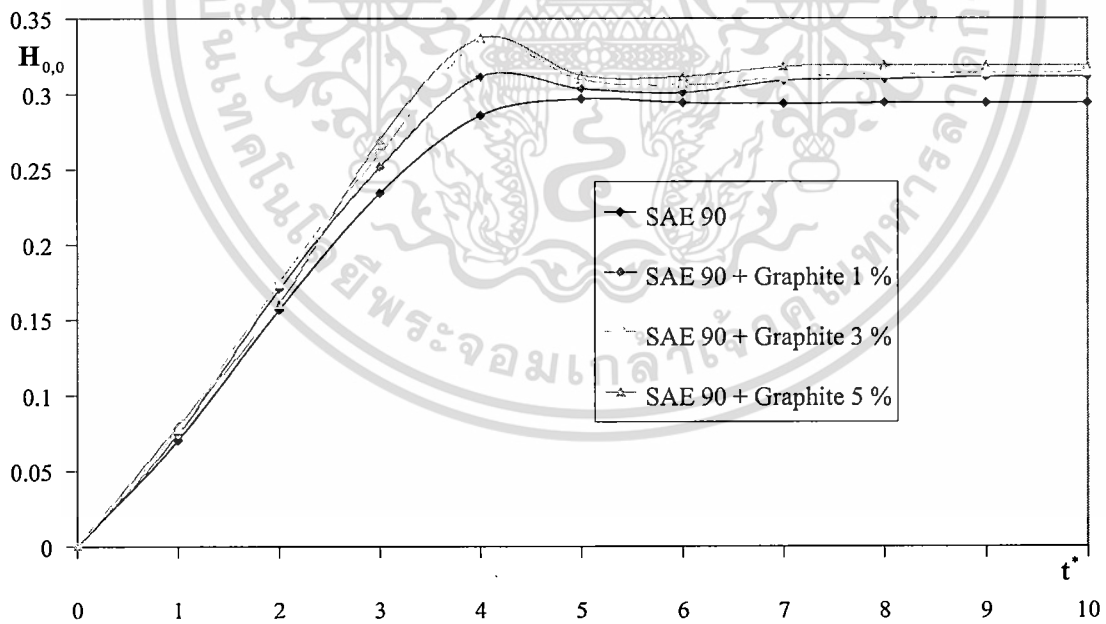


รูปที่ 3.35 แสดงความหนาฟิล์มของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูออโรเอทเทลิน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

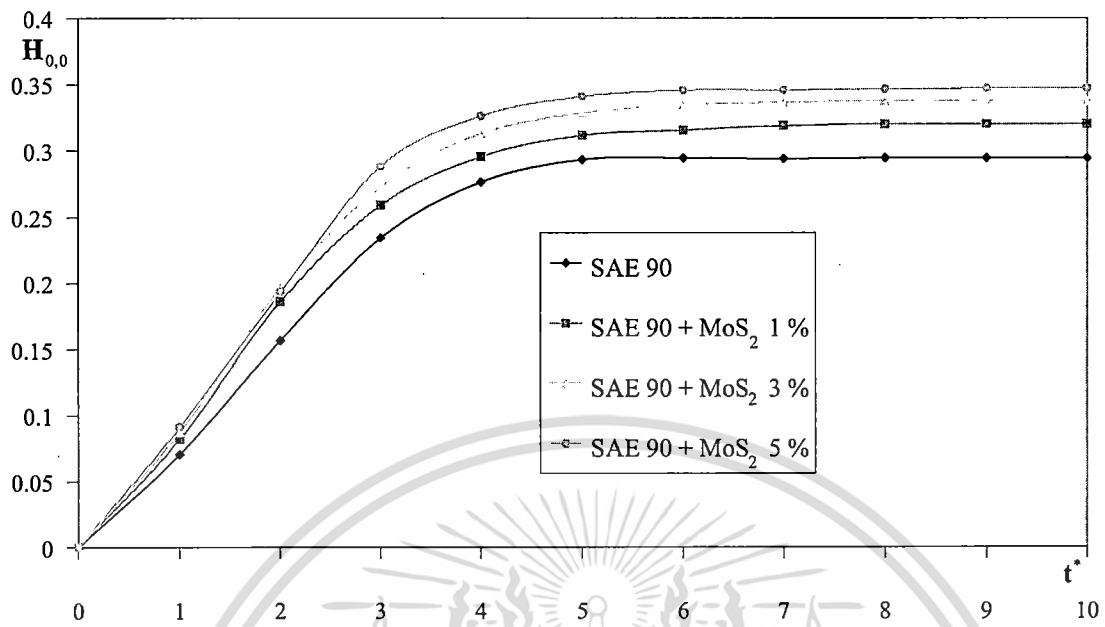


รูปที่ 3.36 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมัน SAE 90 เมื่อผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ในความเข้มข้นต่างๆ ที่สภาวะสมดุลย์

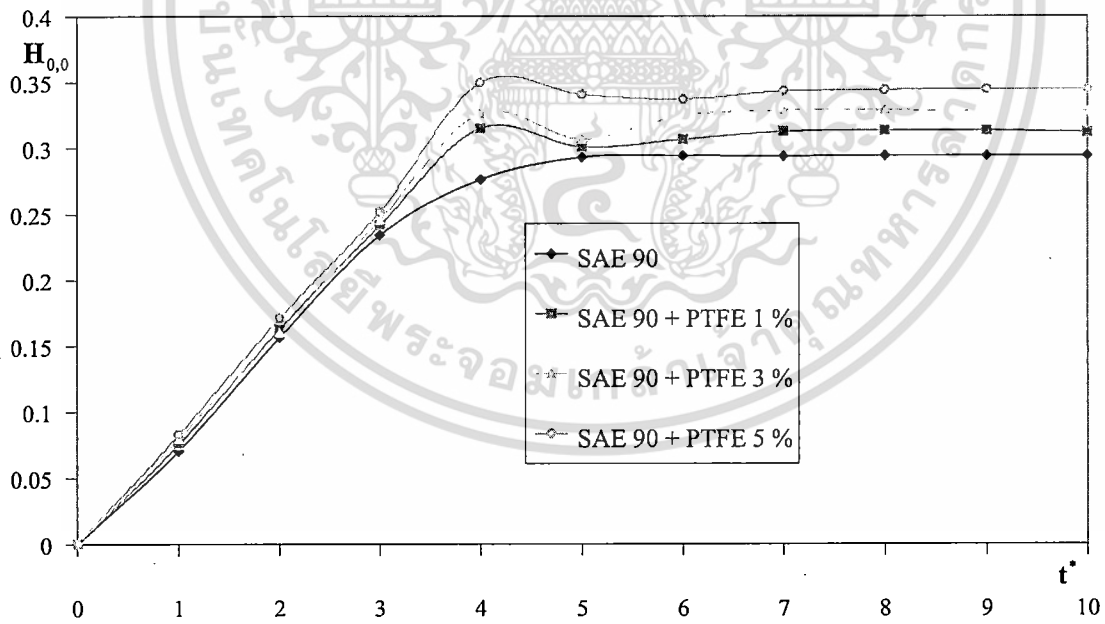


รูปที่ 3.37 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



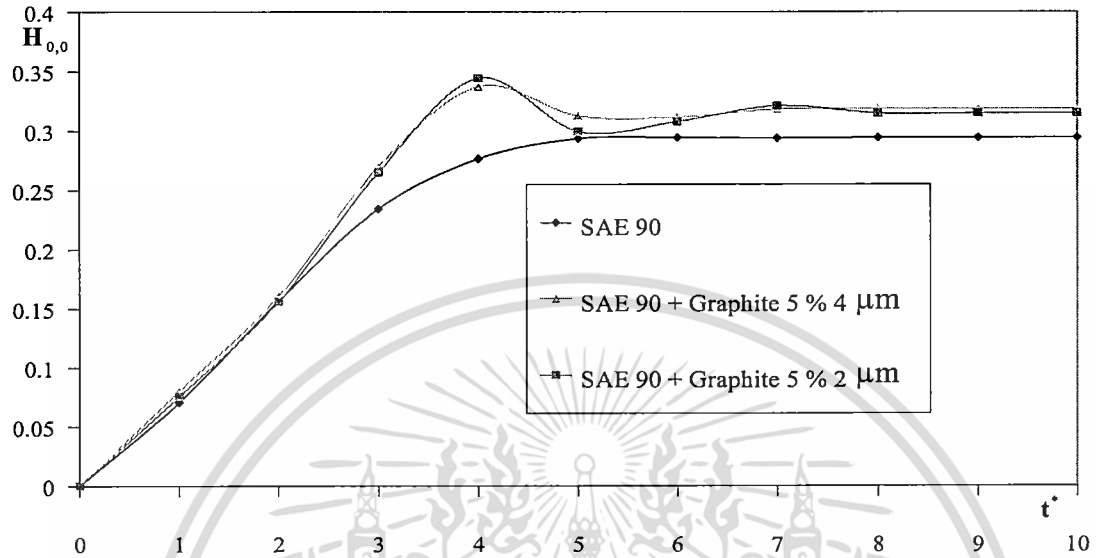
รูปที่ 3.38 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟด์ ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$



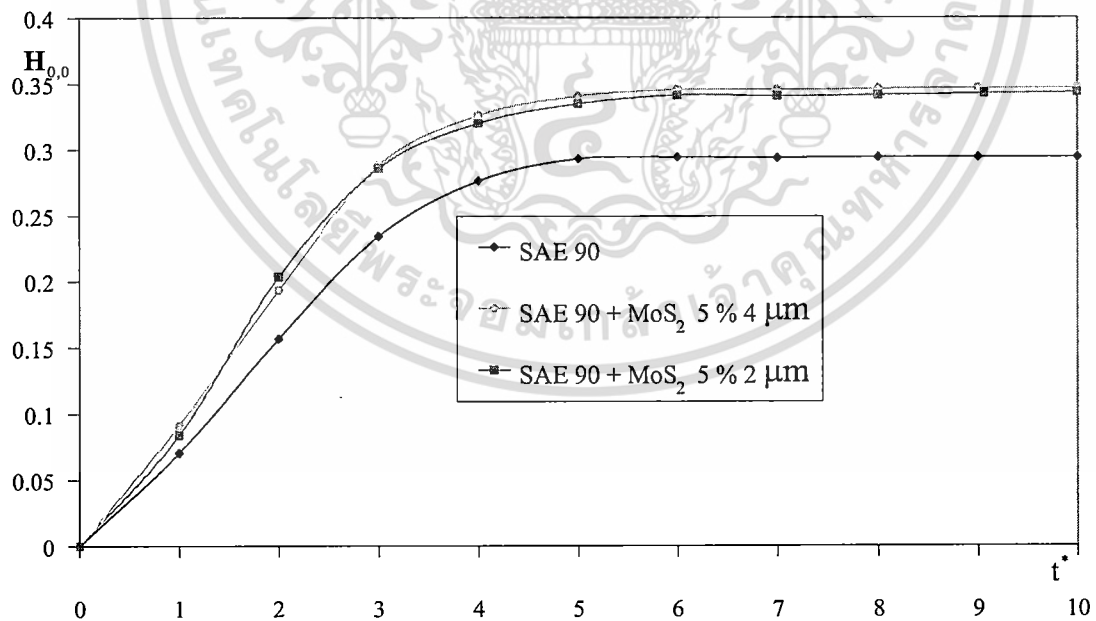
รูปที่ 3.39 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลเนื่องจากขนาดของอนุภาค

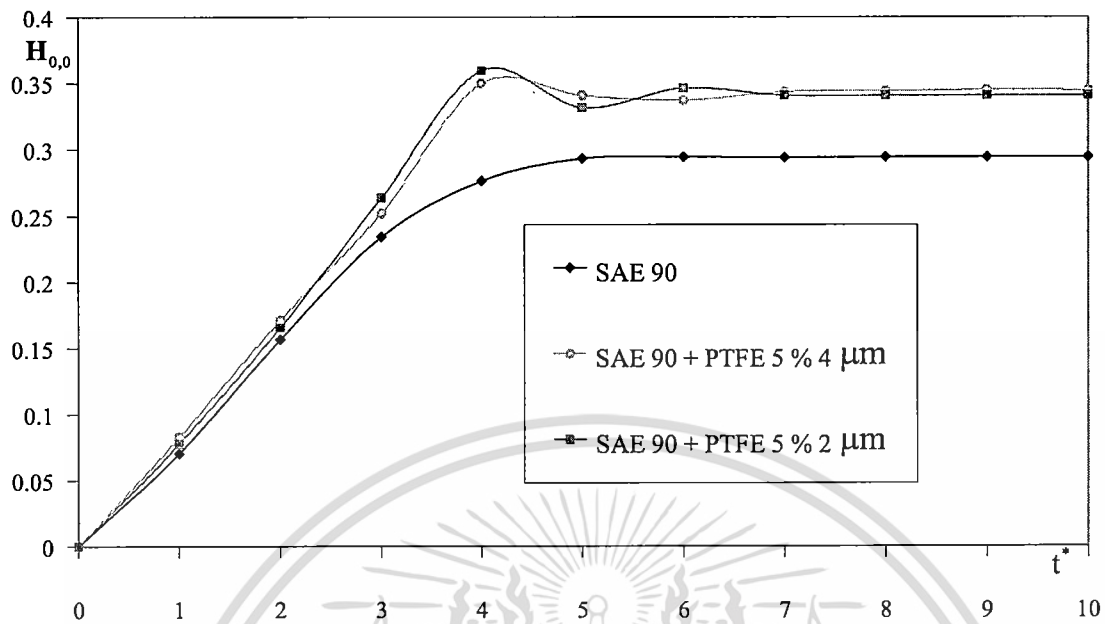


รูปที่ 3.40 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราไฟต์ที่มีขนาดต่างที่ตำแหน่ง $X = 0$

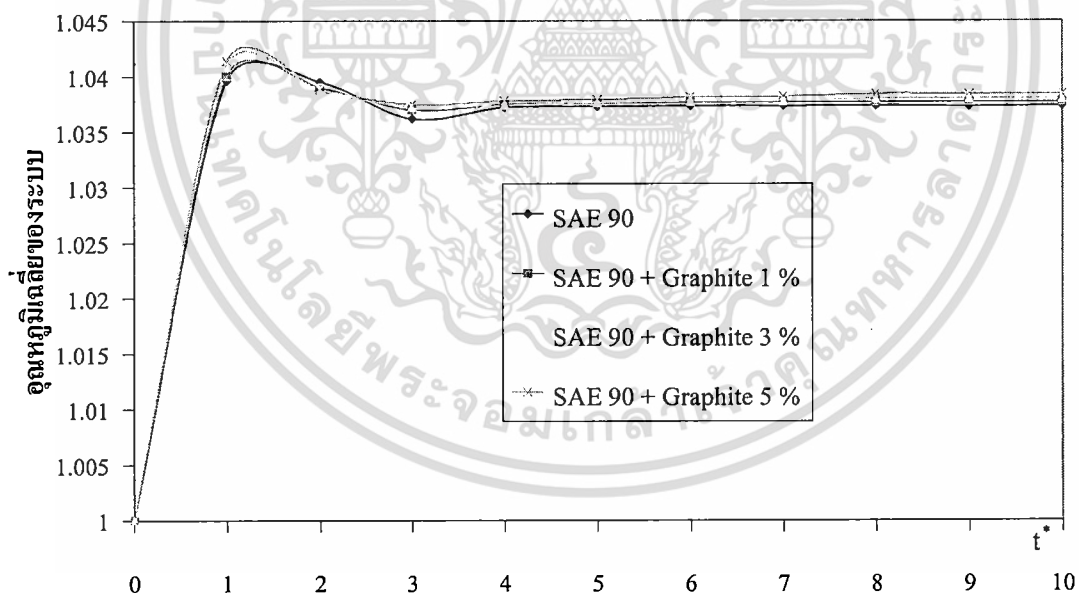


รูปที่ 3.41 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดซไฟด์ ที่มีขนาดต่างๆที่ตำแหน่ง $X = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

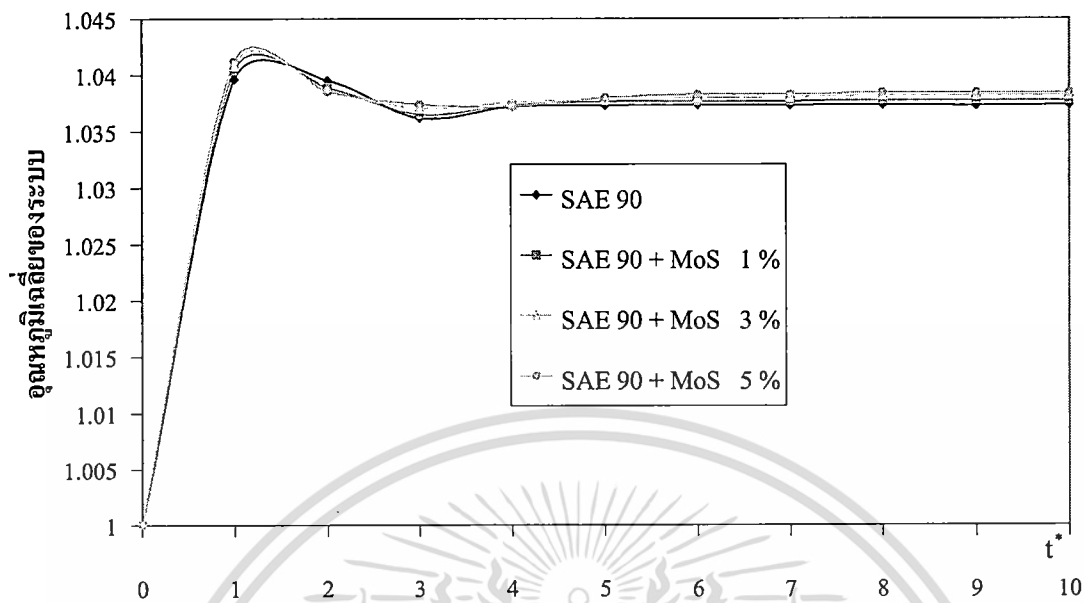


รูปที่ 3.42 แสดงผลการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้งที่ใช้ น้ำมัน SAE 90 ที่ผสมโพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทิลีน ที่มีขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่ง $X = 0$

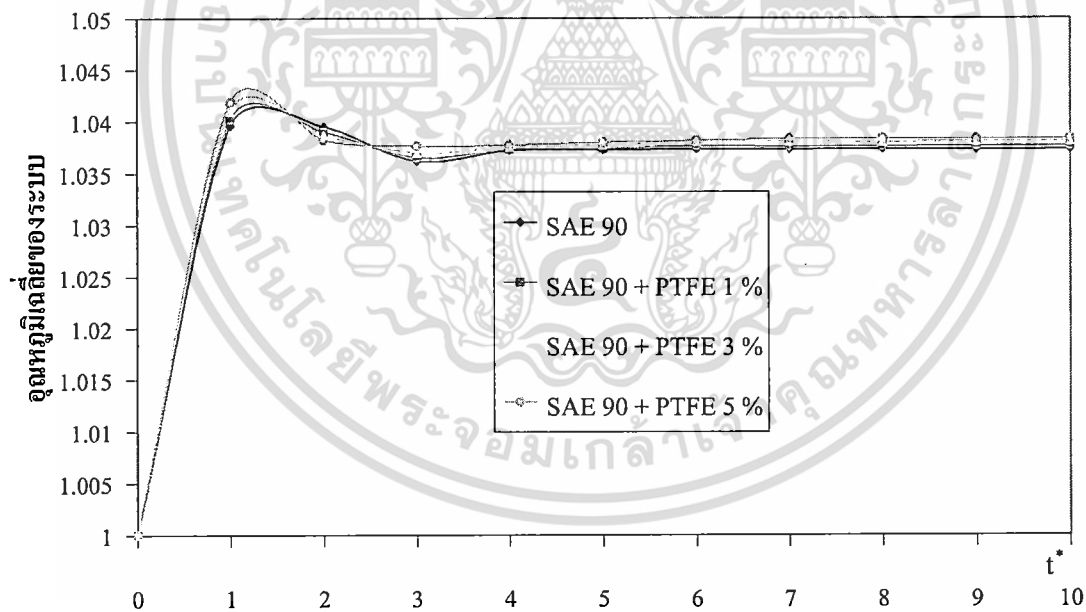


รูปที่ 3.43 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสมกราฟไฟต์ในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

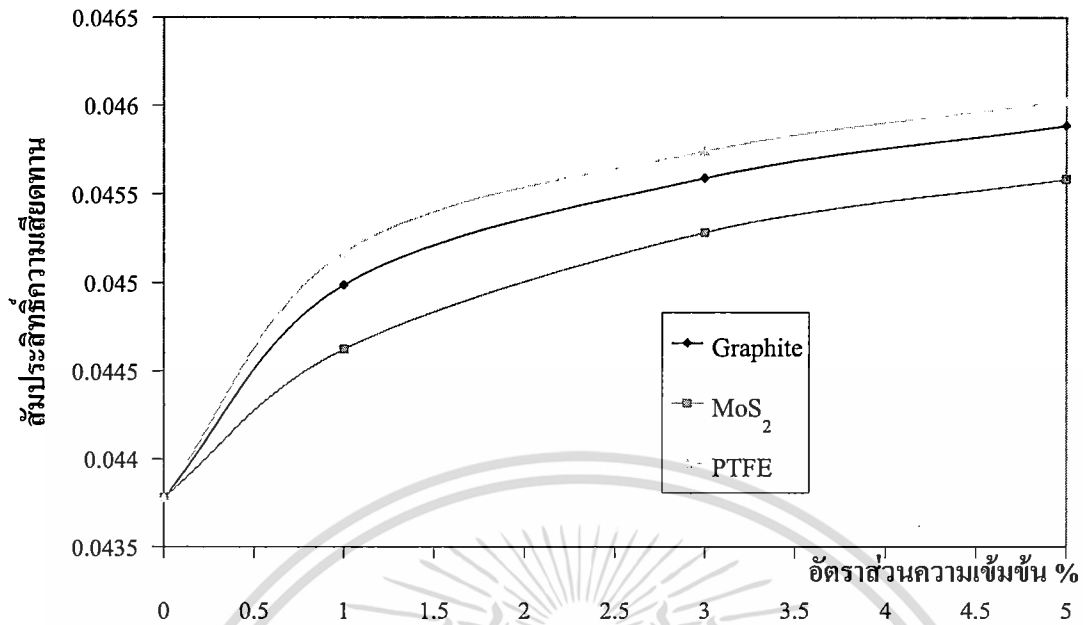


รูปที่ 3.44 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โมลิบดีนัม ไดไซไฟต์ ในอัตราส่วนต่างๆ

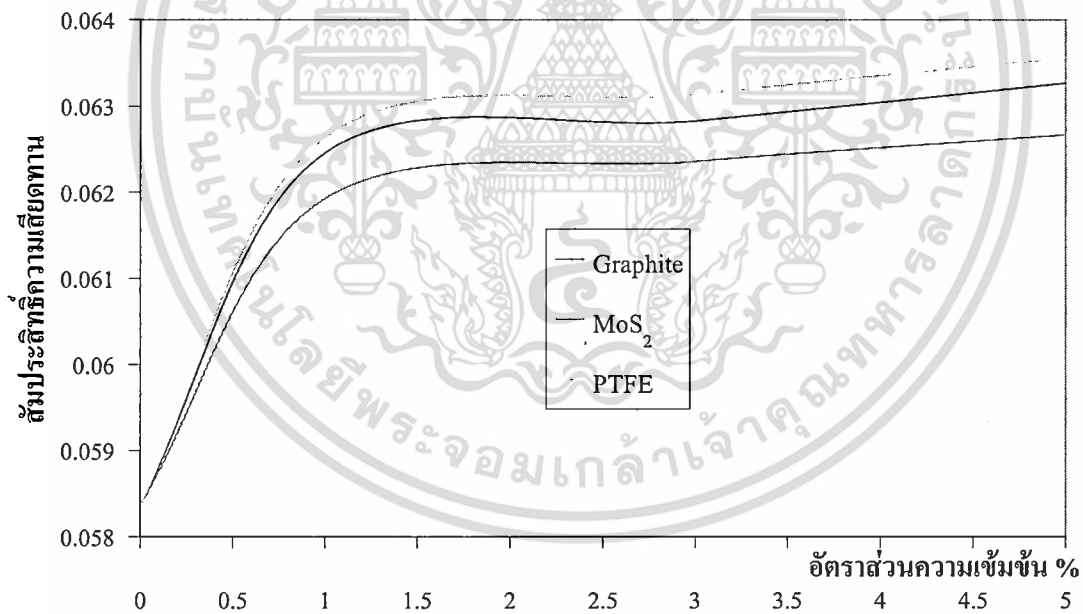


รูปที่ 3.45 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของระบบของน้ำมัน SAE 90 ที่ผสม โพลีเตตาฟลูโอโรเอทเทลิน ในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

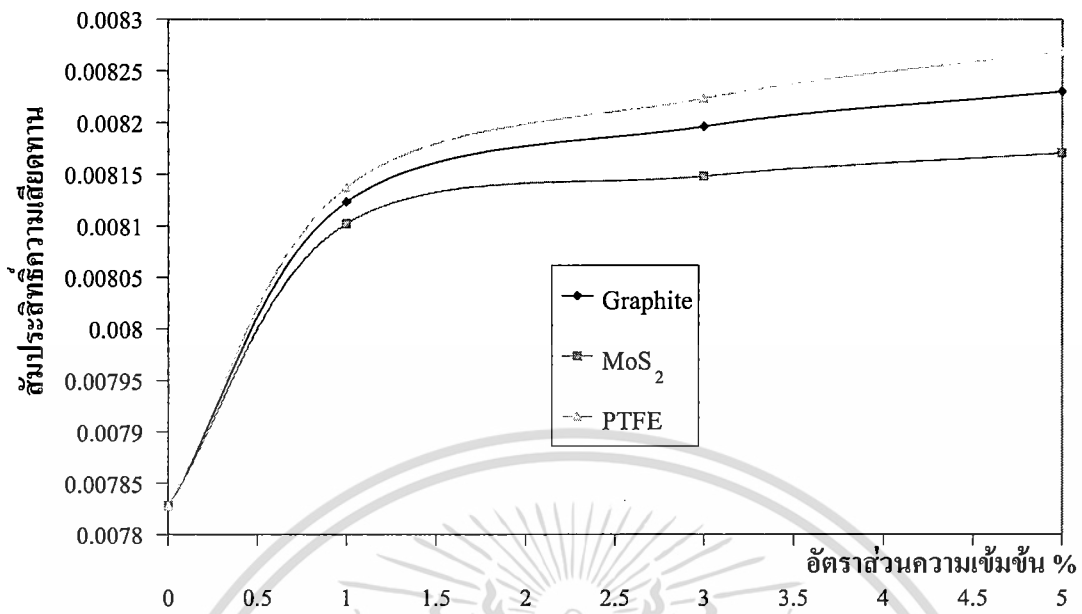


รูปที่ 3.46 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมัน SAE 40

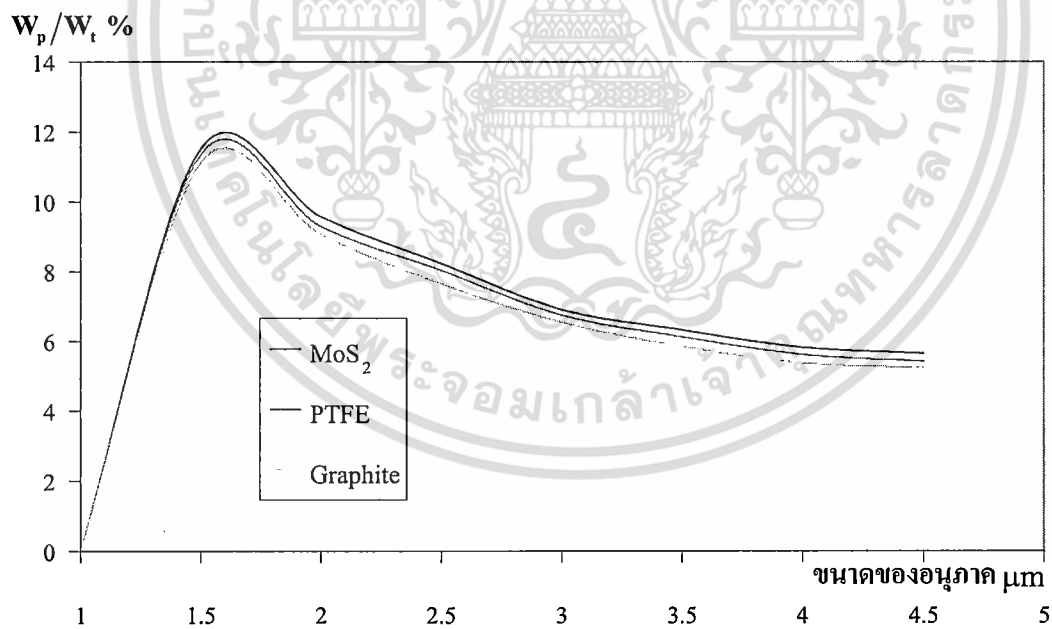


รูปที่ 3.47 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมัน SAE 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

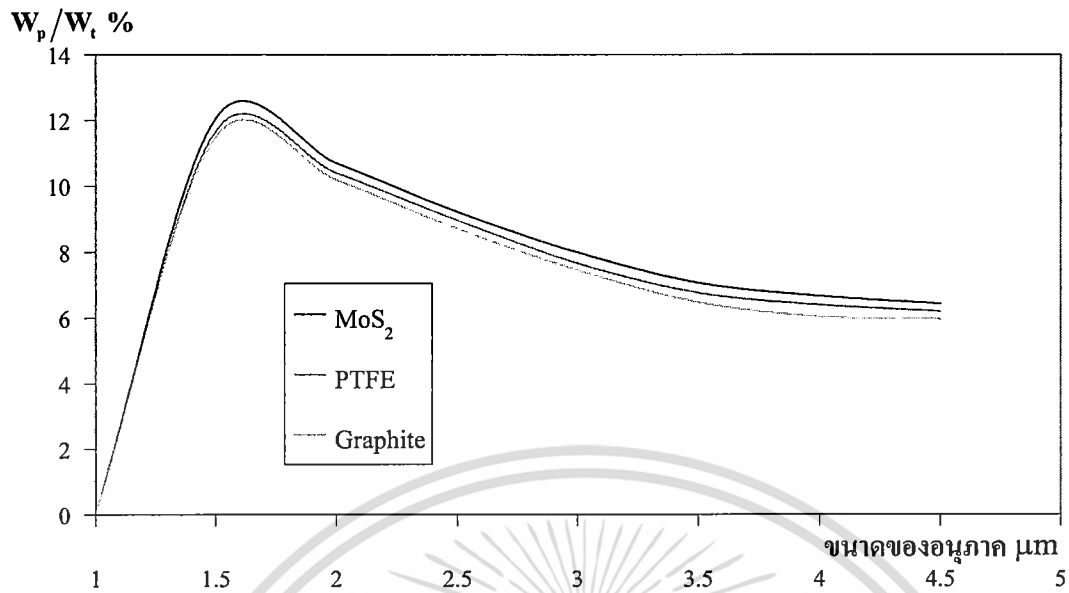


รูปที่ 3.48 แสดงผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราส่วนผสมของน้ำมันปาล์ม
ที่ผสม ZDPT 1 %

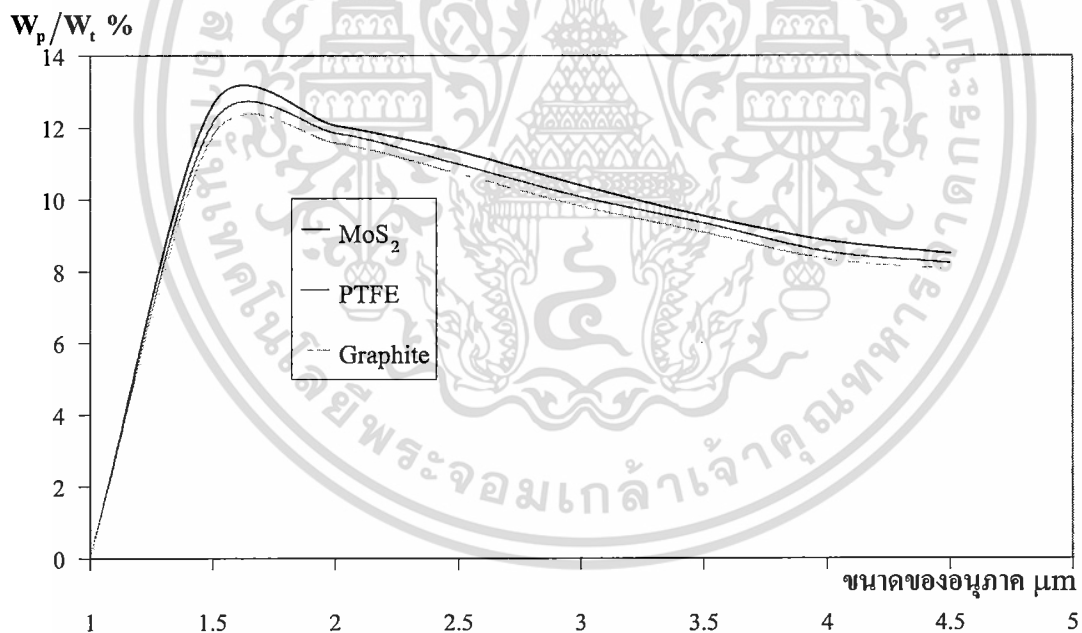


รูปที่ 3.49 แสดงภาวะที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 3% ของน้ำมัน SAE 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.50 แสดงภาระที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 3% ของน้ำมัน SAE 90



รูปที่ 3.51 แสดงภาระที่รับของอนุภาคในอัตราส่วน 3% ของน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDPT 1 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

บทสรุป

4.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยใช้น้ำมัน SAE 90 ผสม กราไฟต์, โมลิตินัมไดไซไฟด์ และ โพลีเตตาฟูโอโล-เอตเทลิน เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง จากการใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนพบว่าน้ำมัน SAE 90 มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน เมื่อเติมสารหล่อลื่นของแข็งเข้าไปจะทำให้พฤติกรรมการไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบนอนนิวโตเนียนแบบไคลาแทนท์ ให้การส่งถ่ายแรงเนื่องจากความเสียดทานสูง งานวิจัยนี้ได้จำลองการส่งถ่ายแรงระหว่างลูกกิ้งก้านบนแผ่นเรียบ ซึ่งลูกกิ้งก้านมีขนาด 50 mm รับภาระ 345,000 N/m สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ส่วนผสมของสารหล่อลื่นของแข็งจะช่วยเพิ่มการส่งถ่ายแรงระหว่างลูกกิ้งก้านบนแผ่นเรียบ
2. เมื่อเพิ่มขนาดของสารหล่อลื่นของแข็งจะช่วยทำให้คุณลักษณะการหล่อลื่นมีผลที่ดีมากกว่า สารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าแต่จะทำให้อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นมากกว่า สารหล่อลื่นของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า
3. สารหล่อลื่นของแข็งที่ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจะช่วยรับแรงกระแทกและช่วยทำให้ลูกกิ้งก้านเคลื่อนที่เข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดีขึ้นและยังช่วยป้องกันการกระทบกันระหว่างลูกกิ้งก้านกับแผ่นเรียบด้วย

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 สันทิพย์สมบุรณ์,ปานเพชร ชินนินทร **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น บ.ซีเอ็ด ยูเคชั่น จก. หน้า 228-247**
- [13] Hamrock,B.J.,1994 **Fundamentals of Fluid Film Lubrication** McGraw-Hill
- [14] มงคล มงคลวงศ์โรจน์,อิโรมู ฮาชิโมโตะ ,2536 **ทฤษฎีการหล่อลื่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
- [15] ประภัทร อรุณเมตตา,2544 **พฤติกรรมของการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชของกาบรองลื่นเพลากลม วิทยานิพนธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สมานไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Gohar,R.,1988 **Elastohydrodynamic** Ellis Horwood
- [17] Rohsenow, W.M., Hertenett, 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 เดชะอำไพ 2538,ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [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 Mutigrid 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