

อิทธิพลของความหยาบของผิวต่อการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์  
ของสองผิวที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON ELASTOHYDRODYNAMIC  
LUBRICATION OF TWO SURFACES IN LINE CONTACT



สุทธินันท์ ศรีรัตยาวงศ์

SUTTHINAN SRIRATTAYAWONG

ฉพ.  
๑๗๗๓ ๑  
๒๕๔๘

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

61020

- 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

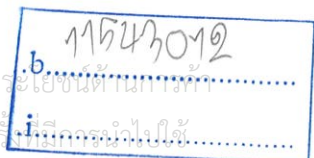
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1885-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง



**EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON ELASTOHYDRODYNAMIC  
LUBRICATION OF TWO SURFACES IN LINE CONTACT**

**SUTTHINAN SRIRATTAYAWONG**



**A THESIS 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**

**2005**

**ISBN 974-15-1885-4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของความหยาบของผิวต่อการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของสองผิวที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น
นักศึกษา	นายสุทธินันท์ ศรีรัตยาวงศ์
รหัสนักศึกษา	45060606
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความหยาบของผิวที่มีต่อการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของสองผิวที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น โดยใช้วิธีนิวตันราฟสันและวิธีมัลติกริด-มัลติเลเวลร่วมกันในการแก้ปัญหาที่จำลองพฤติกรรมการหล่อขึ้นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ในสถานะสถิตย์และพลวัต ซึ่งจะทำการเปลี่ยนค่าภาระที่กระทำ ความเร็วในการหมุน ชนิดของสารหล่อลื่น สลิป สไลด์และค่าวัสดุ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายแรงดัน ความหนาของฟิล์มของสารหล่อลื่น อุณหภูมิ ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่น โดยจะใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่มีเทอมของความหยาบรวมอยู่ด้วยในการจำลอง จากการศึกษาพบว่าความหยาบของผิวมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์

<b>Thesis Title</b>	Effect of Surface Roughness on Elastohydrodynamic Lubrication of Two Surfaces in Line Contact
<b>Student</b>	Mr. Sutthinan Srirattayawong
<b>Student ID.</b>	45060606
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongroj

### ABSTRACT

This thesis presents the effect of surface roughness on elastohydrodynamic lubrication of two surfaces in line contact. The Newton-Raphson method and the Multigrid-Multilevel techniques are implemented to calculate the static and dynamic characteristics of elastohydrodynamic lubrication under line contact. Pressure distribution, oil film thickness, temperature distribution, density distribution and viscosity distribution, that profiles are presented in both transient and steady state conditions with varying loads, velocities, slip-slide ratio, material and lubricant. In this study, both the roughness and the reology model parameters have significant effects on the elastohydrodynamic characteristics.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณเกษม ธรรมโกศล ที่ช่วยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเขียน โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรวิทยาเขตสารสนเทศพะเยา ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษา  
ขอขอบคุณ โครงการสำนักวิจัยเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ คุณกฤติยา สิริตัน ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูและอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุทธินันท์ สิริธยาวงศ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ .....	XXI

บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา .....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 สารหล่อลื่น .....	4
2.1 น้ำมันหล่อลื่น .....	4
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน .....	4
2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน .....	7
2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น .....	8
2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น .....	9
2.4 หน่วยของค่าความหนืดสัมบูรณ์ .....	10
2.5 ค่าความนำความร้อน .....	10
2.6 ค่าความร้อนจำเพาะ .....	10
2.7 รีโอโลยี .....	11
2.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด .....	13
2.8.1.1 ของไหลแบบนิวทอนเนียน .....	13
2.8.1.2 ของไหลแบบนอนนิวทอนเนียน .....	13
2.8 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการจำลอง .....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3	ผิวหยาบ .....	21
3.1	ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว .....	21
3.2	การวัดด้วยปลายปากกาแหลม .....	22
3.3	เครื่องมือวัดผิวที่ไม่สัมผัสโดยตรง .....	23
3.4	เส้นอ้างอิง .....	23
3.5	ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องใช้ในการคำนวณพื้นผิว .....	25
3.6	โมเดลที่ใช้ในการจำลอง .....	30
บทที่ 4	เทอร์โมอิลาสโตไฮโดร ไดนามิกส์ที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น .....	33
4.1	การหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดร ไดนามิกส์ .....	33
4.2	สมมติฐานของเฮอร์ตซ์ .....	33
4.3	สมการเรย์โนลด์ส์ .....	34
4.4	สมมูลแรงในชั้นของของไหล .....	35
4.5	สมการความหนาฟิล์ม .....	39
4.6	สมการความหนาแน่น .....	40
4.7	สมการความหนืด .....	40
4.8	สมการบาลานซ์โหลด .....	41
4.9	สมการพลังงาน .....	41
บทที่ 5	วิธีการเชิงตัวเลข .....	45
5.1	วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม .....	45
5.2	วิธีนิวตันราฟสัน .....	47
5.3	วิธีมัลติกริด-มัลติเลเวล .....	49
5.3.1	การประมาณแบบเต็ม .....	50
บทที่ 6	ผลการจำลอง .....	54
6.1	ผลการจำลอง .....	55
6.1.1	ความเร็วเปลี่ยนแปลง .....	55
6.1.1.1	กรณีโรลเลอร์และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ .....	55
6.1.1.2	กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบ โมเดล 1 และแผ่นเพลท โมเดล 2 .....	64
6.1.1.3	กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบ โมเดล 3 และแผ่นเพลท โมเดล 4 .....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นใบแจ้งขออนุญาตในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.1.2	ภาวะเปลี่ยนแปลง .....	85
6.1.2.1	กรณีโรตเตอร์ และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ.....	85
6.1.2.2	กรณีโรตเตอร์มีผิวหยาบ โมเดล 1 และแผ่นเพลท โมเดล 2.....	95
6.1.2.3	กรณีโรตเตอร์มีผิวหยาบ โมเดล 3 และแผ่นเพลท โมเดล 4.....	104
6.1.3	ผลจากการเปลี่ยนวัสดุ .....	113
6.1.3.1	กรณีโรตเตอร์และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ.....	113
6.1.3.2	กรณีโรตเตอร์มีผิวหยาบ โมเดล 1 และแผ่นเพลท โมเดล 2.....	123
6.1.3.3	กรณีโรตเตอร์มีผิวหยาบ โมเดล 3 และแผ่นเพลท โมเดล 4 .....	132
6.1.4	สลิป-สไลด์.....	142
6.1.4.1	กรณีโรตเตอร์และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ.....	142
6.1.4.2	กรณีโรตเตอร์มีผิวหยาบ โมเดล 3 และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ.....	152
6.1.4.3	กรณีโรตเตอร์มีผิวเรียบและแผ่นเพลท โมเดล 4 .....	161
6.1.5	สารหล่อลื่น.....	169
6.1.5.1	กรณีโรตเตอร์และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ.....	169
6.1.5.2	กรณีโรตเตอร์มี โมเดล 3 และแผ่นเพลทมี โมเดล 4.....	177
บทที่ 7	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	187
7.1	สรุปผลการจำลอง .....	188
7.2	ข้อเสนอแนะ .....	187
เอกสารอ้างอิง.....		188
ภาคผนวก .....		190
ภาคผนวก ก	Flow chart program .....	191
ภาคผนวก ข	ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	192
ประวัติผู้เขียน .....		209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของสารหล่อลื่น.....	15
3.1	แสดงการคำนวณผิวหยาบที่แต่ละ โมเดล .....	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน .....	11
2.2	แสดงลักษณะของกรวยวัดความหนืดแบบแกนหมุน .....	12
2.3	แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของของไหลเมื่อวัดความหนืดแบบแกนหมุน .....	12
2.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงของไหลตามหลักการของนิวตัน .....	12
2.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน .....	14
2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสมบูรณ์และอัตราความเครียดเฉือน .....	14
2.7	แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 40 °C .....	16
2.8	แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 60 °C .....	16
2.9	แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 80 °C .....	17
2.10	แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100 °C .....	17
2.11	แสดงกราฟการไหลของ SAE 40 ที่แต่ละอุณหภูมิ .....	18
2.12	แสดงกราฟการไหลของ SAE 90 ที่แต่ละอุณหภูมิ .....	18
2.13	แสดงกราฟการไหลของ Palm + ZDPT 2% ที่แต่ละอุณหภูมิ .....	19
2.14	แสดงกราฟการไหลของ SAE 40 + Palm 10% ที่แต่ละอุณหภูมิ .....	19
2.15	แสดงกราฟการไหลของ SAE 40 + Palm 20% ที่แต่ละอุณหภูมิ .....	20
3.1	แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบ .....	21
3.2	แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบที่อาจทำให้การวัดผิดพลาด .....	22
3.3	เปรียบเทียบเส้นอ้างอิง 3 แบบ a.) ระบบ M b.) ค่าเฉลี่ย 10 จุด c.) กำลังสองน้อยสุด .....	25
3.4	แสดงโค้งแอมบอทของพื้นผิวสองแบบที่แตกต่างกัน .....	27
3.5	แสดงการหาความโค้งน่าจะเป็นจากผิวหยาบที่วัดได้ .....	28
3.6	แสดงผิวหยาบของโรลเลอร์ที่มีความหยาบ โมเดล 1 .....	30
3.7	แสดงผิวหยาบของแผ่นเพลทที่มีความหยาบ โมเดล 2 .....	31
3.8	แสดงผิวหยาบของโรลเลอร์ที่มีความหยาบ โมเดล 3 .....	31
3.9	แสดงผิวหยาบของแผ่นเพลทที่มีความหยาบ โมเดล 4 .....	32
4.1	แสดงการแบ่งประเภทของการหล่อลื่น .....	34
4.2	แสดงแรงที่กระทำต่ออิมัลชันของของไหล .....	35
4.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอิมัลชันของสารหล่อลื่น .....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	แสดงการพิจารณาจุดสัมผัสที่เป็นผลต่างแบบตรงกลางบนแผ่นเพลท .....45
5.2	แสดงการแบ่งกริดแบบ $V - Cycle$ .....50
5.3	แสดงการแบ่งกริดและจำนวนระดับชั้น .....53
5.4	แสดงตัวอย่างการแบ่งกริดและจำนวนระดับชั้นด้วยวิธี FMG .....53
6.1	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....55
6.2	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....55
6.3	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....56
6.4	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....56
6.5	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....57
6.6	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....57
6.7	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....58
6.8	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....58
6.9	กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....59
6.10	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....59
6.11	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....60
6.12	กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....60
6.13	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....61
6.14	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....61
6.15	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....62
6.16	กราฟความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....62
6.17	กราฟแสดงอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....63
6.18	กราฟแสดงอุณหภูมิที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....63
6.19	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....64
6.20	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.21	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	65
6.22	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	65
6.23	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	66
6.24	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	66
6.25	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	67
6.26	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	67
6.27	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	68
6.28	กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	68
6.29	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	69
6.30	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	69
6.31	กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	70
6.32	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	70
6.33	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	71
6.34	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	71
6.35	กราฟความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละความเร็ว เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	72
6.36	กราฟอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	72
6.37	กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละความเร็ว เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	73
6.38	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละความเร็ว เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	73
6.39	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	74
6.40	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	74
6.41	กราฟความดันสภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	75
6.42	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	75
6.43	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}, SAE40, S = 0$ .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.44	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	76
6.45	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	77
6.46	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	77
6.47	กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	78
6.48	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	78
6.49	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	79
6.50	กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	79
6.51	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	80
6.52	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	80
6.53	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	81
6.54	กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	81
6.55	กราฟอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	82
6.56	กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	82
6.57	กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็วเมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	83
6.58	กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาฟิล์ม กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับ ผิวหยาบ โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	83
6.59	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับ ผิวหยาบ โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	84
6.60	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับ ผิวหยาบ โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40, S = 0$ .....	84
6.61	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	85
6.62	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	86
6.63	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	86
6.64	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.65 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	87
6.66 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	88
6.67 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	88
6.68 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	89
6.69 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	89
6.70 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	90
6.71 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	90
6.72 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	91
6.73 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	91
6.74 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	92
6.75 กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	92
6.76 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดศูนย์กลางที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	93
6.77 กราฟอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	93
6.78 กราฟอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	94
6.79 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	94
6.80 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	95
6.81 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	95
6.82 กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	96
6.83 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	96
6.84 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	97
6.85 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	97
6.86 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	98
6.87 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	98
6.88 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40, S = 0$ .....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.89 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	99
6.90 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	100
6.91 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	100
6.92 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	101
6.93 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	101
6.94 กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	102
6.95 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	102
6.96 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	103
6.97 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่ออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	103
6.98 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	104
6.99 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	104
6.100 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	105
6.101 กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	105
6.102 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	106
6.103 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	106
6.104 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	107
6.105 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	107
6.106 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	108
6.107 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	108
6.108 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	109
6.109 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	109
6.110 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	110
6.111 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	110
6.112 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, SAE40, S = 0$ .	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.113	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40$ , $S = 0$ .....	111
6.114	กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}$ , $SAE40$ , $S = 0$ .....	112
6.115	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับ ผิวหยาบ โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ $W = 4 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ , $S = 0$ .....	112
6.116	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	113
6.117	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	114
6.118	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	114
6.119	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	115
6.120	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	115
6.121	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	116
6.122	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	116
6.123	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	117
6.124	กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	117
6.125	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	118
6.126	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	118
6.127	กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	119
6.128	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	119
6.129	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	120
6.130	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	120
6.131	กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละแต่ละวัสดุเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	121
6.132	กราฟอุณหภูมิที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	121
6.133	กราฟอุณหภูมิที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละวัสดุเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	122
6.134	กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละวัสดุเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	122
6.135	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}$ , $W = 5 \times 10^{-5}$ , $SAE40$ .....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.136	กราฟความดันที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	123
6.137	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	124
6.138	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	124
6.139	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	125
6.140	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	125
6.141	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	126
6.142	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	126
6.143	กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	127
6.144	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	127
6.145	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	128
6.146	กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	128
6.147	กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	129
6.148	กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	129
6.149	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	130
6.150	กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	130
6.151	กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดของวัสดุแต่ละชนิด เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	131
6.152	กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	131
6.153	กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	132
6.154	กราฟความดันที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	132
6.155	กราฟความดันที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	133
6.156	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	133
6.157	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	134
6.158	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	134
6.159	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.160 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	135
6.161 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	136
6.162 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	136
6.163 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	137
6.164 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	137
6.165 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	138
6.166 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	138
6.167 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	139
6.168 กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	139
6.169 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดศูนย์กลางที่เข้าสู่จุดของวัสดุแต่ละชนิด เมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	140
6.170 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหมามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุขของวัสดุแต่ละ ชนิดเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	140
6.171 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุขของวัสดุแต่ละชนิด $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	141
6.172 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุขของวัสดุแต่ละชนิดเมื่อ $U = 2 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	141
6.173 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	142
6.174 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	143
6.175 กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	143
6.176 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	144
6.177 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	144
6.178 กราฟความหนาฟิล์มสภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	145
6.179 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	145
6.180 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	146
6.181 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	146
6.182 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	147
6.183 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	147
6.184 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.185 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	148
6.186 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	149
6.187 กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	149
6.188 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อนไหลต่างกัน เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	150
6.189 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อนไหลต่างกัน เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	150
6.190 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อนไหลต่างกัน เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	151
6.191 กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อนไหลต่างกัน เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	151
6.192 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	152
6.193 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	152
6.194 กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	153
6.195 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	153
6.196 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	154
6.197 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	154
6.198 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	155
6.199 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	155
6.200 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	156
6.201 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	156
6.202 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	157
6.203 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	157
6.204 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	158
6.205 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	158
6.206 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	159
6.207 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.208	กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงสุดที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	160
6.209	กราฟอุณหภูมิที่จุดที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำเมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	160
6.210	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	161
6.211	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	161
6.212	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	162
6.213	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	162
6.214	กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	163
6.215	กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	163
6.216	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	164
6.217	กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	164
6.218	กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	165
6.219	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	165
6.220	กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	166
6.221	กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	166
6.222	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	167
6.223	กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	167
6.224	กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	168
6.225	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	169
6.226	กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	169
6.227	กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	170

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.228 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	170
6.229 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	171
6.230 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	171
6.231 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	172
6.232 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	172
6.233 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	173
6.234 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	173
6.235 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	174
6.236 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	174
6.237 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	175
6.238 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	175
6.239 กราฟความหนืดที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40, S = 1.5$ .....	176
6.240 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด เมื่อ $U = 4 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	176
6.241 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่ที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุลที่สารหล่อลื่น แต่ละชนิด เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, S = 1.5$ .....	177
6.242 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	177
6.243 กราฟความดันที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	178
6.244 กราฟความดันที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	178
6.245 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.246 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	179
6.247 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	180
6.248 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	180
6.249 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	181
6.250 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	181
6.251 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	182
6.252 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	182
6.253 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสถิตย์ เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	183
6.254 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตีที่ 1 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	183
6.255 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตีที่ 5 เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	184
6.256 กราฟความหนืดที่สภาวะไรมิตี เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, SAE40$ .....	184
6.257 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุลที่สารหล่อลื่น แต่ละชนิด เมื่อ $U = 3 \times 10^{-11}, W = 5 \times 10^{-5}, S = 1.5$ .....	185

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$b$	ความกว้างครึ่งหนึ่งของการสัมผัส (m) = $R(8w/\pi)^{0.5}$
$c_1$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$c_2$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$c_3$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$c_4$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$C_f$	ค่าความร้อนจำเพาะของสารหล่อลื่น ( J/kg/K )
$C_p$	ความร้อนจำเพาะ (Btu/lb/R)
$d_k$	ค่าเสียดทาน
$D(x,t^*)$	ฟังก์ชันความหนาของผิว
$E$	โมดูลัสความยืดหยุ่นของผิว
$h$	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใดๆ (m)
$H$	ความหนาฟิล์มไร้มิติ $H = \frac{\pi}{8Rw'} h$
$H_0$	ความหนาฟิล์มต่ำสุด
$\bar{H}$	ความหนืดเชิงโพลีแซกกล ของน้ำมันมาตรฐานที่ VI = 100
$I_k^{k-1}$	ตัวกระทำการถ่ายโอนจำกัด Restriction
$I_{k-1}^k$	ตัวกระทำการถ่ายโอนจำกัด Prolongation
$I_2$	ค่ากำลังสองของอัตราความเครียดเฉือน
$K$	ค่าคงที่ในสมการเรย์โนลด์ $K = \frac{\pi^2 U}{16(W')^2}$
$K$	ค่าความนำความร้อน (Btuin./hft <sup>2</sup> F)
$k_f$	ค่าความนำความร้อน (W/m/K)
$\bar{L}$	ความหนืดเชิงโพลีแซกกล ของน้ำมันมาตรฐานที่ VI = 0
$m_0$	พาวเวอร์ลอร์แฟคเตอร์ที่อุณหภูมิอ้างอิง (Pa.s)
$\bar{m}$	ค่าความชัน
$n$	ดัชนีเพาเวอร์ลอร์
$N$	จำนวนกริดที่แบ่งในการคำนวณ
$p$	ความดัน (Pa)
$P$	ความดันไร้มิติ $P = \frac{p}{P_H}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$P_H$	ความดันสูงสุดในการสัมผัสของ Hertz (Pa)	$P_H = E' \left( \frac{W'}{2\pi} \right)^{0.5}$
$R$	รัศมีของลูกกลิ้ง	
$R_a$	เส้นศูนย์กลางเฉลี่ย	
$R_q$	ค่ารากที่สองของกำลังสอง(RMS)	
$spgr$	ค่าความถ่วงจำเพาะ	
$s_1$	ค่าระยะทางตามแนวแกน x ของผิวหยาบ โมเดล 1(m.)	
$s_2$	ค่าระยะทางตามแนวแกน x ของผิวหยาบ โมเดล 1(m.)	
$S_1$	ค่าระยะทางตามแนวแกน x แบบไร้มิติของผิวหยาบ โมเดล 1	
$S_2$	ค่าระยะทางตามแนวแกน x แบบไร้มิติของผิวหยาบ โมเดล 1	
$S$	อัตราส่วนการเลื่อนไถล $S = 2 \left( \frac{u_2 - u_1}{u_2 + u_1} \right)$	
$t$	เวลา (s)	
$t^*$	เวลาไร้มิติ $t^* = \frac{\bar{u}}{R} t$	
$t_p$	อัตราส่วนของช่วงแปริ่ง	
$T$	อุณหภูมิ (K)	
$T^*$	อุณหภูมิในรูปไร้มิติ	
$T_{S1}$	เงื่อนไขอุณหภูมิ (K) ที่ขอบ ที่ $y=0$	
$T_{S2}$	เงื่อนไขอุณหภูมิ (K) ที่ขอบ ที่ $y=h$	
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ย(K)	
$T_m^*$	อุณหภูมิเฉลี่ยในรูปไร้มิติ	
$T_0$	อุณหภูมิอ้างอิง (303 K)	
$u$	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x (m/s)	
$u_1$	ความเร็วของลูกกลิ้ง (m)	
$u_2$	ความเร็วของแผ่นเลื่อน (m)	
$\bar{u}$	ความเร็วเฉลี่ยของลูกกลิ้งกับแผ่นเลื่อน (m) $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$	
$U$	พารามิเตอร์ความเร็วไร้มิติ $U = \frac{\mu_0 \bar{\mu}}{E'R}$	
$v$	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน y (m/s)	
$VI$	ดัชนีความหนืด (Viscosity index)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$w$	น้ำหนักที่กระทำกับลูกกลิ้ง (N/m.)
$W$	น้ำหนักที่กระทำกับลูกกลิ้งไร้มิติ $W = \frac{w}{ER}$
$x$	โคออร์ดิเนต $x$
$\bar{x}$	ความหนืดเชิงโบลต์ซาลกของน้ำหนักที่ต้องการหาค่า $VI$
$X$	โคออร์ดิเนต $x$ ไร้มิติ
$y$	โคออร์ดิเนต $y$
$Y$	โคออร์ดิเนต $y$ ไร้มิติ $Y = \frac{y}{h}$
$z$	โคออร์ดิเนต $z$
$z$	ค่าความสูงของผิวหยาบที่จุดอ้างอิง
$z^*$	ค่าที่ห่างจากค่าเฉลี่ยที่เลือกไว้
$Z$	ดัชนีความหนืด-ความดัน
<b>Greek symbols</b>	
$\eta$	ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity)
$\bar{\eta}$	ค่าความหนืดในรูปไร้มิติ
$\eta_0$	ความหนืดปรากฏของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิง (Pa.s)
$\tau$	ความเค้นเฉือน (Shear stress)
$\tau_{zx}$	ความเค้นเฉือนในแนว $zx$ (Pa)
$\tau_{zy}$	ความเค้นเฉือนในแนว $zy$ (Pa)
$\rho$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_0$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $\text{kg/m}^3$ )
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น ในรูปไร้มิติ
$\rho_f$	ค่าความหนาแน่นสัมบูรณ์ของน้ำมันหล่อลื่น
$\beta$	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น-อุณหภูมิ (1/K)
$\gamma$	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ (1/K)
$\psi$	ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของความหนาแน่นของการกระจายความสูง
$\bar{\sigma}$	ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$\nu_k$	ค่าผิดพลาดจากการส่งค่าในแต่ละระดับของมัลติกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทนำ

## บทที่ 1

### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน โลกได้มีการเปลี่ยนแปลงไปมาก ประเทศไทยก็เป็นประเทศหนึ่งที่กำลังพัฒนา มีการนำเครื่องจักรมาใช้แทนการทำงานของคนทำให้สามารถทำการผลิตได้คราวละหลายๆ และอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีการขยายตัวมากขึ้น ในปัจจุบันนี้พลังงานได้ถูกนำมาใช้มากขึ้น เนื่องจากรถยนต์และเครื่องจักรต่างๆ ต้องใช้น้ำมันหรือไฟฟ้าในการที่จะนำมาเป็นแหล่งพลังงานให้เกิดพลังงานกลขึ้นมา แต่เนื่องด้วยแหล่งพลังงานเหล่านี้มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นหลายฝ่ายต้องคำนึงถึงความสำคัญของพลังงานและคิดค้นเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีให้เกิดการประหยัดหรือการสิ้นเปลืองให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

การพัฒนาการหล่อลื่นให้กับเครื่องจักรก็เป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญในการที่จะช่วยรัฐประหยัดพลังงานหรือค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องจักร ซึ่งหากเครื่องจักรมีการหล่อลื่นที่ดีก็จะส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน, มีการสึกหรอลดลงและอีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงอันตรายในเครื่องจักรลงซึ่งส่งผลให้ต้องใช้พลังงานน้อยลง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความหนืดของผิวที่มีต่อการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของสองผิวที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น โดยจะใช้ น้ำมันหล่อลื่น 5 ชนิดคือ SAE40, SAE90, Palm+ZDTP 2%, SAE40+Palm 10% และ SAE40+Palm 20% โดยจะทำการเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่และค่าภาระที่กระทำและจะเปลี่ยนขนาดของผิวหยาบที่สัมผัสเพื่อศึกษาถึงผลที่มีต่อแรงดัน, ความหนาฟิล์ม, อุณหภูมิ, ความหนาแน่น และความหนืดของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้น

### 1.2. บทความวิจัยที่ผ่านมา

ในปี ค.ศ. 1786 Reynolds ได้เขียนสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการไหลและความหนาแน่นของสารหล่อและแรงดันของไหลและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนิวทอนเนียนเพื่อใช้จำลองการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ และต่อมาในปี ค.ศ. 1896 Hertz ได้ประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเข้ากับสมการเรย์โนลด์ ทำให้งานวิจัยทางด้านอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก

N. Patir และ H.S. Cheng ปี ค.ศ. 1978 ศึกษาถึงปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ที่พิจารณาถึงผลของผิวสัมผัส ซึ่งหลังจากนั้นก็ยังมีผู้ที่สนใจมากขึ้น เนื่องจากปัญหาที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามดูหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจะมีความเป็นจริงมากขึ้น โดยในตอนเริ่มแรกจะคิดผิวหยาบ อยู่ในเทอมของสถิติของการไหลเฉลี่ย โดยการสัมผัสจะเป็นแบบสามมิติ และต่อมาก็ได้มีการพัฒนาถึงผลของผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมของการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยการนำผิวหยาบมารวมอยู่ในสมการความหนาฟิล์ม ซึ่งลักษณะของผิวหยาบจะแตกต่างกันไป เช่น เป็นรูปไซน์ หรือเป็นเหลี่ยมตามแนวขวางและตามแนวยาว

C.H. Venner และ W. E. ten Napel ปี ค.ศ. 1992 ศึกษาถึงผลของผิวหยาบที่มีต่อการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยจะพิจารณาผิวหยาบที่ได้จากการวัดผิววัสดุจริงมาใช้ในการคำนวณ โดยจะรวมอยู่ในเทอมของสมการความหนาฟิล์ม ซึ่งผลของผิวหยาบจะมีผลต่อความดันที่เกิดขึ้นมาก

Xiaolan Ai และ Herbert S. Cheng ปี ค.ศ. 1994 ศึกษาการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ในสภาวะพลศาสตร์ที่มีผลของผิวหยาบโดยใช้วิธีแก้สมการแบบมัลติกริด ในการจำลองจะกำหนดให้แผ่นเพลทล่างมีผิวหยาบที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ โดยจะศึกษาถึงผลของการสลิปสไลด์

### 1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.3.1. ศึกษาถึงผลของผิวสัมผัสที่มีต่อพฤติกรรมของการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยจะพิจารณาถึงความดัน, ความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น, อุณหภูมิที่เกิดขึ้น, ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อขึ้นที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในการจำลองจะเปลี่ยนค่าความหยาบของผิวสัมผัส, ความเร็วในการสัมผัส, ภาวะที่กระทำและสารหล่อขึ้น โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขณะที่เวลาเปลี่ยนแปลงด้วย

1.3.2. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการกระจายความดัน ความหนาฟิล์ม น้ำมัน อุณหภูมิความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อขึ้นที่เกิดขึ้นของลูกกลิ้งบนแผ่นเรียบเลื่อน ในสภาวะสถิตย์และพลวัต

### 1.4. ขอบเขตของงานวิจัย

จะทำการศึกษาถึงผลของผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ โดยจะกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.4.1. ทำการศึกษาถึงผลของผิวหยาบ 4 โมเดล คือ โมเดล 1 สำหรับโรลเลอร์  $R_q = 0.298 \mu\text{m}$ ., โมเดล 2 สำหรับแผ่นเพลท  $R_q = 0.289 \mu\text{m}$ ., โมเดล 3 สำหรับโรลเลอร์  $R_q = 0.586 \mu\text{m}$ ., โมเดล 4 สำหรับแผ่นเพลท  $R_q = 0.584 \mu\text{m}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2. ทำการศึกษาดังผลของความเร็วและการสิ้นเปลือง โดยจะกำหนดให้ความเร็วไว้มิติในการสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้  $2 \times 10^{-11}$ ,  $4 \times 10^{-11}$  และ  $6 \times 10^{-11}$  สำหรับการเลื่อนไหลจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลง 3 ค่า คือ 0,1,1.5

1.4.3. ทำการศึกษาดังผลของภาระที่กระทำ 3 ค่าคือ  $2 \times 10^{-5}$ ,  $6 \times 10^{-5}$  และ  $1 \times 10^{-4}$

1.4.4. ทำการศึกษาดังผลของสารหล่อลื่นทั้งหมด 5 ค่าคือ SAE 40+Palm 10%, SAE 90, Palm+ZDTP 2%, SAE 40, SAE 40+Palm 20%

1.4.5. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีนิวตันราฟสันและวิธีมัลติกริดมัลติเลเวลแก้สมการเรย์โนลด์และสมการพลังงาน เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการหล่อลื่นของโรลเลอร์บนแผ่นเลื่อนที่มีผลของความหยาบของผิวสัมผัส

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สิ่งที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเตอไซโครไดนามิกส์ที่มีผลที่เกิดจากผิวสัมผัสที่มีความหยาบซึ่งทำให้ผลที่ได้จากการจำลองมีความถูกต้องและมีความเป็นจริงมากขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิชาการทางด้านโทรโบโลยีและการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลให้มีการหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพต่อไป

## บทที่ 2

# สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น (Lubricants) คือสารที่ใช้เติมลงไปเครื่องจักรกล ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ช่วยให้การหล่อลื่นตามจุดส่งกำลังหรือจุดที่มีการเสียดสีไม่ให้เกิดการสัมผัสกัน โดยสารหล่อลื่นจะเป็นตัวกั้นกลางระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองและจะช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรทำให้เกิดการสึกหรอน้อยลงและทำให้พลังงานที่ต้องใช้ลดลง ซึ่งสารหล่อลื่นอาจจะอยู่ในรูปของแข็งที่เป็นผง, ของเหลว หรือก๊าซ แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี เป็นต้น

### 2.1 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม ในการที่จะผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่น

#### 2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยทั่วไปมักจะนำน้ำมันแร่มาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืช น้ำมันจากสัตว์หรือน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษๆ บางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้คือ

##### 2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or animal base oil)

สมัยก่อนนิยมนำมาใช้ในงานหลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีต่ำเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งาน ดังนั้นถ้านำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมาก ความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่น น้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral base oil)

เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกถัน กล่าวคือส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซ, แก๊สโซลีน, น้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซลจะระเหยเป็นไอแยกออกมาก่อน ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตาและยางมะตอยซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวเติมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกถันบรรยากาศผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศแยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมาที่ เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาถัน น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิกมักจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้ สุญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดีพอ

น้ำมันพื้นฐานหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมสามารถแยกคุณสมบัติได้ 3 พื้นฐานขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันปิโตรเลียมพื้นฐานที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานพาราฟินิก (Paraffinic base oil) น้ำมันดิบ พาราฟินิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- โมเลกุลของสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยากมาก
- มีความต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี
- ฟิล์มน้ำมันเหนียวและแข็งแรง
- มีจุดวาบไฟสูง
- มีการระเหยตัวต่ำ
- รักษาคุณสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี
- จุดไหลเทสูง
- มีความถ่วงจำเพาะต่ำ
- มีคุณสมบัติหล่อลื่นได้ดี
- เกิดไขได้ดี
- มีค่าดัชนีความหนืดสูง
- ถ้าเผาไหม้จะให้เขม่าแข็ง แต่หลุร่อนได้ง่าย

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานแนพธิก (naphthenic base oil) น้ำมันดิบฐาน

แนพธิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีจุดวาบไฟต่ำ
  - มีการระเหยตัวต่ำ
  - รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร
  - มีจุดไหลเทต่ำ
  - มีความถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี
  - มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ
  - มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ
  - เมื่อเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว
  - การขีดเกาะโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดีเป็นบางส่วน
  - มีความต้องการการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน
3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบอะโรมาติก (aromatic bas oil) มีคุณสมบัติดังนี้
- มีค่าดัชนีความข้นใสต่ำ
  - มีจุดไหลเทต่ำมาก
  - ไม่มีไข
  - คุณสมบัติทางการหล่อลื่นไม่ดี
  - โครงสร้างการจับตัวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร
  - คุณสมบัติในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ
  - ไม่รักษาคุณสมบัติทางเคมีให้แน่นอน
  - มีความถ่วงจำเพาะสูง

2.1.1.3 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic base oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยตัว เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมาอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก เช่น

- โพลีแอลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin; PAO) เป็นสารที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก มีจุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดี ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นเพราะราคาถูกและสามารถผลิตได้ง่าย

- เอสเทอร์(Ester) ไดเอสเทอร์ (diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (complex ester) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ของเครื่องบิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอพ่น นอกจากนี้พวก ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

- พวกโพลีไกลคอล(polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ เป็นต้น

- พวกซิลิโคน(Silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

- พวกฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน(Halogenated hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbons) หรือสารซีเอฟซี (CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจน เพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความอยู่ตัวเชิงความร้อนดีมาก

- พวกโพลีฟีนิลอีเทอร์(Polyphenyl ether) เป็นสารที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมากถึง 800 องศาเซลเซียส เช่น น้ำมันไฮดรอลิกในยานอวกาศ เนื่องจากมีความอยู่ตัวเชิงความร้อนสูงมาก และมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์ ได้ด้วย

### 2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างในตัวเองอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่

**2.1.2.1 ความหนืด (Viscosity)** หมายถึงความใสหรือความข้นของน้ำมันที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง โดยน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่ายแต่ฟิล์มของสารหล่อลื่นก็จะบางมาก และน้ำมันที่มีความหนืดสูงย่อมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มน้ำมันหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่ด้วยกันหลายระบบแต่ที่นิยมใช้คือเซนติสโตกส์ (Centistokes, cSt)

**2.1.2.2 ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (Anti-oxidation)** น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

**2.1.2.3 จุดวาบไฟ (Flash point)** คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

**2.1.2.4 จุดติดไฟ (Fire point)** คืออุณหภูมิที่น้ำมันสามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดวาบไฟ โดยทั่วไปประมาณ 50-70 °F

**2.1.2.5 จุดไหลเท (Pour point)** คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ ปรกติน้ำมันจะมีความหนืดสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำและจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง โดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดเพื่อเป็นการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยถ้าค่าดัชนีความหนืดมีค่าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้าค่าดัชนีความหนืดต่ำอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย

## 2.2 หน้าทีของน้ำมันหล่อลื่น

2.2.1 การหล่อลื่น สารหล่อลื่นจะมีฟิล์มหรือเยื่อบางๆ ทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มน้ำมัน ให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป คือจะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2.2.2 ระบายความร้อน คุณสมบัติข้อนี้เป็นสิ่งสำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในระบบสูบ และระบายความร้อนอื่นเนื่องจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ระบบเกียร์ หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

2.2.3 รักษาความสะอาด ขณะที่เครื่องจักรทำงานน้ำมันหล่อลื่นก็จะเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นส่วนของเครื่องจักรนั้นไปด้วย คือจะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆ จากผิวชิ้นงาน

2.2.4 ป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อน นอกจากนี้เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้ เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำ หรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลง และต้องไม่กัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

2.2.5 กระจายความสกปรก น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายความสกปรกต่าง ๆ ที่มีปนในน้ำมันหล่อลื่นอันเนื่องจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่าง ๆ เหล่านี้รวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นยางเหนียว

2.2.6 ป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน(Antioxidant) จะมีสารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเครื่องกับออกซิเจนในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันเครื่องจะทำปฏิกิริยาออกสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวได้ง่ายและจะทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อเครื่องยนต์

**2.2.7 ป้องกันการสึกหรอของวัสดุ** จะมีสารที่ช่วยให้ฟิล์มของน้ำมันคงทนต่อแรงเสียดทานได้ดี

**2.2.8 ป้องกันการเกิดฟอง** การเกิดฟองของน้ำมันเครื่องภายในห้องเพลาช้อเหวี่ยงจะเกิดขึ้นมากเนื่องจากความเร็วสูงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบการหล่อลื่นลดลง สารป้องกันการเกิดฟองจะช่วยทำให้ฟองอากาศละลายตัวได้ง่าย

**2.2.9 ป้องกันสนิม** สารนี้จะช่วยให้น้ำมันเครื่องเป็นตัวเคลือบไม่ให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ทำด้วยเหล็กเป็นสนิมขณะที่เครื่องยนต์หยุดทำงานเป็นเวลานาน ๆ

**2.2.10 การระเหยตัวต่ำ (Low volatility)** น้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องมีจุดวาบไฟสูง ทำให้เกิดการระเหยตัวต่ำและทนต่อความร้อนสูง ๆ ได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะทำให้ไม่สิ้นเปลืองน้ำมันเครื่องขณะเครื่องยนต์ทำงาน

**2.2.11 จุดไหลเทต่ำ (Low pour point)** เพื่อที่จะนำน้ำมันเครื่องไปใช้งานในที่ที่อุณหภูมิต่ำได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องความหนืดของสารหล่อลื่น

## 2.3 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดเกรดเดียวกับชนิดเกรดรวม ซึ่งแต่ละชนิดก็เหมาะสมกับสภาพของงานแต่ละอย่าง ลักษณะที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดมีดังนี้

**2.3.1 น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว (Single viscosity)** สมาคมวิศวกรรรมยานยนต์ (Society of Automotive Engineers ; SAE) เป็นผู้วางมาตรฐานเกี่ยวกับการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิด ถ้าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดต่ำ ความหนืดจะน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีตัวเลขแสดงค่าความหนืดสูง ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นสองชนิดคือ SAE 20 และ SAE 50 จะหมายความว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 มีความหนืดมากกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 20 ที่อุณหภูมิเดียวกัน น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดต่ำกว่าเบอร์ที่แสดงไว้หลัง SAE จะตามด้วยตัว W ซึ่งเป็นการแสดงการทดลองวัดความหนืดที่ 0 องศาฟาเรนไฮด์ (ในกรณีที่ไม่มี W จะทดสอบที่ 210 องศาฟาเรนไฮด์) ตัวอย่าง เช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 20 และน้ำมันเครื่องชนิด SAE 20 W แสดงว่าน้ำมันเครื่องชนิด SAE 20 W มีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 20 น้ำมันหล่อลื่นชนิดที่มี W ตามท้ายมักจะใช้กับฤดูหนาวหรือในที่ที่มีอากาศเย็น เพื่อช่วยตอนสตาร์ทเครื่องยนต์ที่เย็น ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเกรดเดียวที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ได้แก่ SAE 5 W, SAE 10 W, SAE 20, SAE 20 W, SAE 30, SAE 40, SAE 50

**2.3.2 น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวม (Multi viscosity)** อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมน้อยกว่าชนิดเกรดเดียว ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จึงสามารถใช้แทนน้ำหล่อลื่นชนิดเดียวได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 10/50 หมายความว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามในชื่อของสำนักงานเพื่อการค้าของสถาบัน เมื่อผู้ซื้อเห็น ใบแจ้งรายละเอียดการคำนวณราคา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 0 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จะมีความหนืดเท่ากับน้ำมันเครื่องชนิด SAE 10 W แต่ที่อุณหภูมิ 210 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้จะมีความหนืดเท่ากับน้ำมันหล่อลื่นชนิด 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

สาเหตุที่น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมมีคุณสมบัติได้ดังกล่าวก็เนื่องจากน้ำมันเครื่องชนิดนี้ได้เติมสารประกอบบางอย่างลงไป ซึ่งเรียกว่า สารปรับปรุงค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improver หรือ VI improver) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เรียกว่าโพลีเมอร์ (Polymer) โดยสารนี้จะเข้าไปรวมตัวกับบริเวณส่วนประกอบ (Open chain) ของโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน เพื่อจะรวมตัวให้เป็นโมเลกุลที่ยาวมาก และทราบได้ที่น้ำมันหล่อลื่นมีอุณหภูมิลดลง โมเลกุลที่เป็นสายยาวนี้จะคลายตัวออกไปปนกับโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นอีก โมเลกุลนี้ก็ยิ่งคลายออก ความหนืดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดเดียว

## 2.4 หน่วยของค่าความหนืดสัมบูรณ์

หน่วยของความหนืดสัมบูรณ์จะเป็นหน่วยของความเค้นเฉือนหารด้วยอัตราความเครียดเฉือน หน่วยของความหนืดสัมบูรณ์จะแบ่งออกเป็น 3 แบบด้วยกันคือ

1. ระบบ SI หน่วยของระบบคือ  $N \cdot s / m^2$  หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า  $Pa \cdot s$
2. ระบบ CGS หน่วยของระบบคือ  $dyn \cdot s / cm^2$  หรือ พอยซ์ เมื่อ  $1 cP = 10^{-2} P$
3. ระบบอังกฤษ หน่วยของระบบ คือ  $lbf \cdot s / in^2$

## 2.5 ค่าความนำความร้อน

สารหล่อลื่นจะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ ซึ่งในการคำนวณหาความร้อนที่เกิดจากสารหล่อลื่นที่ถ่ายเทต้องทราบค่าความนำความร้อนของสารหล่อลื่นนั้นๆ ในการศึกษานี้จะประมาณค่าความนำความร้อนของสารหล่อลื่น จากสมการดังต่อไปนี้[15]

$$K = \frac{0.813}{sp\ gr} [1 - 0.0003(T - 32)] \quad (2.1)$$

โดยที่  $K$  คือค่าความนำความร้อน  $[Btu \cdot in. / (h \cdot ft^2 \cdot F)]$

$T$  คืออุณหภูมิ,  $[^{\circ}F]$

$sp\ gr$  คือค่าความถ่วงจำเพาะ,  $60/60^{\circ}F$

## 2.6 ค่าความร้อนจำเพาะ

ขณะเดียวกันเราก็สามารถที่จะประมาณค่าความร้อนจำเพาะของสารหล่อลื่นได้จากสมการดังต่อไปนี้ [15]

$$C_p = \frac{1}{\sqrt{sp\ gr}} (0.388 + 0.00045T) \quad (2.2)$$

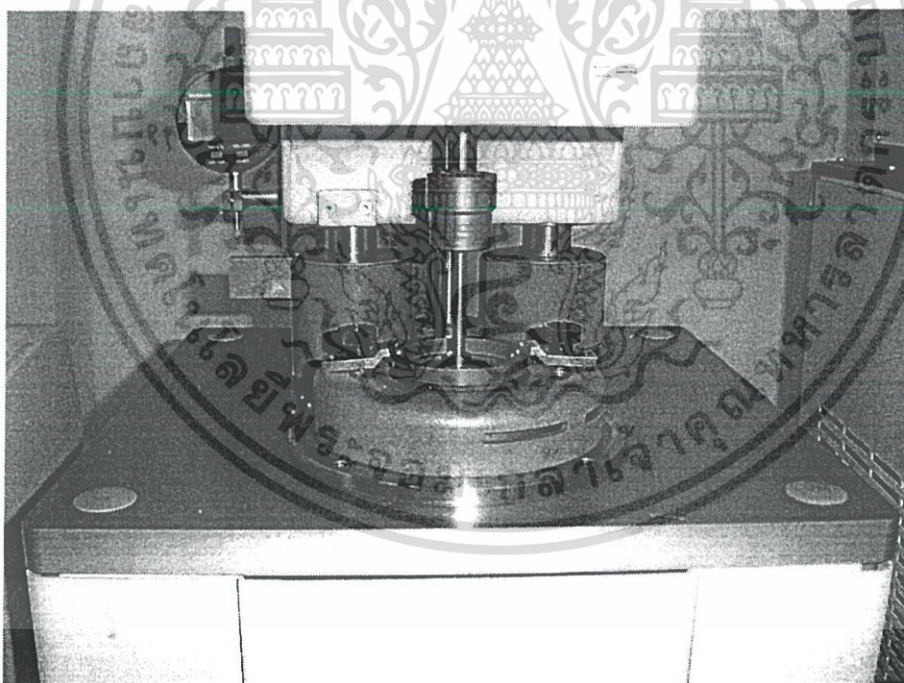
โดยที่  $C_p$  คือค่าความร้อนจำเพาะ  $[Btu/lb/^\circ R]$

$sp\ gr$  คือความถ่วงจำเพาะ,  $60/60^\circ F$

$T$  คืออุณหภูมิ,  $[^\circ F]$

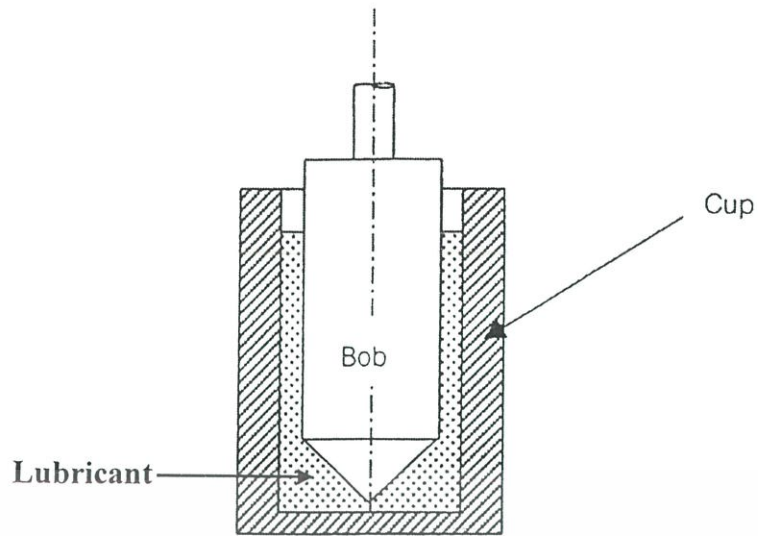
## 2.7 รีโวลยี (Rheology)

รีโวลยีเป็นวิชาที่เกี่ยวกับการไหล โดยมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องได้แก่ความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด เป็นต้น

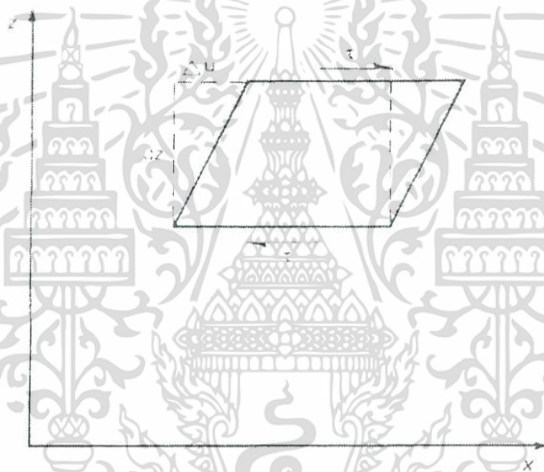


รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

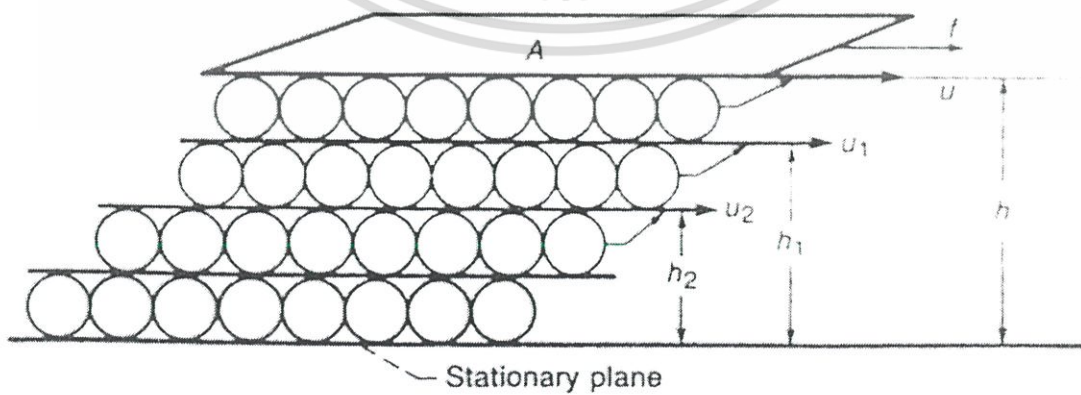
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของกรวยวัดความหนืดแบบแกนหมุน



รูปที่ 2.3 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของของไหลเมื่อวัดความหนืดแบบแกนหมุน



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของไหลตามหลักการของนิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนแล้ว สามารถแบ่งของไหลออกเป็นได้ 2 ประเภทคือ

### 2.7.1.1 ของไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian fluids)

แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่เป็นอิสระต่อกัน (ไม่คิดความหยาบของผิว) จะมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานภายในของของไหล หรืออาจเรียกว่าความหนืด ซึ่งนิวตันได้พบถึงความสัมพันธ์ของความหนืดสมบูรณ์ของของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงถึงชั้นของของไหลดังนี้ [1]

$$\eta = \frac{\tau}{s} \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.13 นิวตันได้ทำการจำลองให้โมเลกุลของน้ำมันมีขนาดที่เล็กมากมีลักษณะเป็นทรงกลมและกลิ้งไปตามแกนของแต่ละชั้นแนวราบ ซึ่งแต่ละชั้นก็จะมีความเร็วที่แตกต่างกันไป ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับความเร็วที่แต่ละชั้น หรืออาจเรียกว่า “แนวเส้นการไหล”, “การไหลราบเรียบ” หรือ “การไหลแบบเหนียวหนืด” ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\tau$  คือค่าความเค้นเฉือน (Shear stress)

$\eta$  คือค่าความหนืดสมบูรณ์ (Absolute viscosity)

$\frac{du}{dy}$  คืออัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate)

ดังนั้นจะเห็นว่าสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน ( $\tau$ ; Shear stress) กับความเครียดเฉือน ( $\frac{du}{dy}$ ; Shear strain rate) จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปกราฟที่

2.14 หรืออาจเรียกความสัมพันธ์ของสมการ (2.4) ว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด [2]

### 2.7.1.2 ของไหลแบบอนินิวตันเนียน (Non Newtonian fluid)

สำหรับของไหลอนินิวตันเนียนก็จะมีสมการคล้ายกับของนิวตันเนียนจะแตกต่างกันตรงที่มีการประยุกต์ให้เป็นสมการที่ไม่เชิงเส้น โดยใช้กฎการยกกำลังมาช่วย (Power law model) ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน ( $\tau$ ; Shear stress) กับความเครียดเฉือน ( $\frac{du}{dy}$ ; Shear strain rate) จะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนโมเดลได้ดังนี้

$$\tau = m \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (2.5)$$

โดยที่  $n=1$  เป็นของไหลแบบนิวตันเนียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n > 1$  เป็นของไหลแบบนอนนิวทอนเนียนชนิดไคลลาแตนท์ (Dilatants)

$n < 1$  เป็นของไหลแบบนอนนิวทอนเนียนชนิดซูโดพลาสติก (Pseudo plastic)

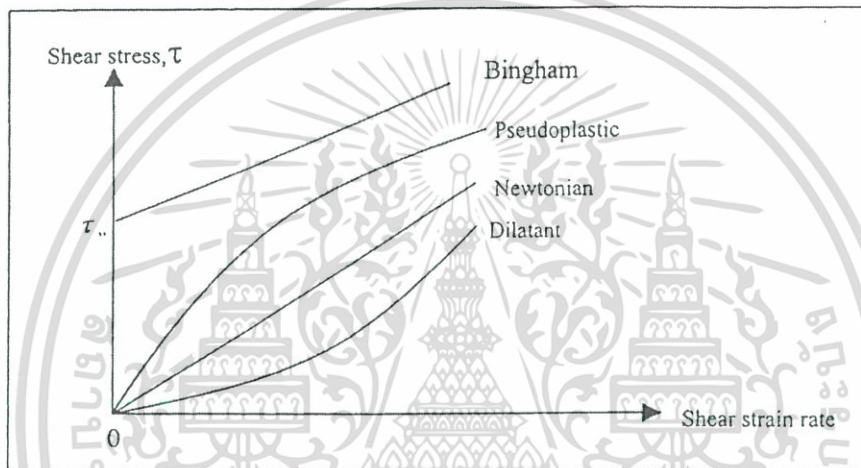
นอกจากนี้ยังมีโมเดลอื่นๆ อีก เช่น

$$\tau = k \dot{\gamma}^n = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.6)$$

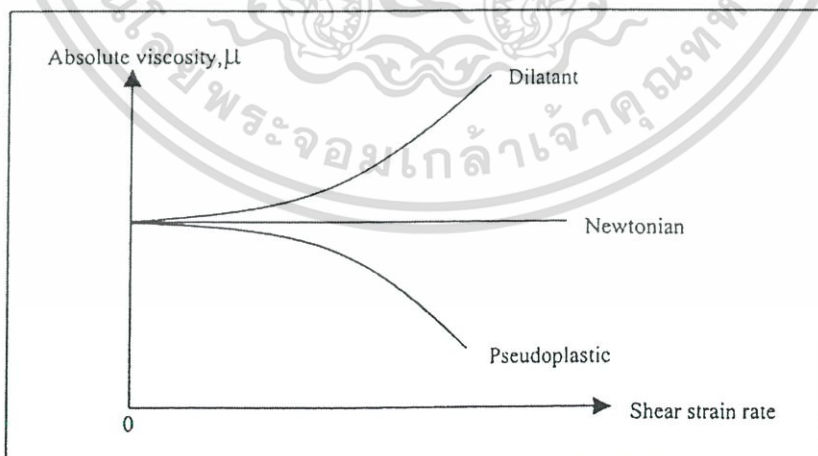
โดยที่  $k > 0$  เป็นของไหลนอนนิวทอนเนียน ชนิดซูโดพลาสติก

$k < 0$  เป็นของไหลนอนนิวทอนเนียน ชนิดไคลลาแตนท์

$k = 0$  เป็นของไหลนิวทอนเนียน



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสมบูรณ์และอัตราความเครียดเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารหล่อลื่นบางประเภทอาจมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับของไหลแบบนิวทอนเนียนคือความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือนเป็นแบบเชิงเส้น แต่จะต่างกันเพียงจุดที่ค่าความเค้นเฉือนที่จุดเริ่มต้นไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งอาจเรียกว่า ของไหลชนิดพลาสติกบิงแฮม ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.14 และดังสมการที่ (2.7)

$$\tau = \tau_y + \eta_c \frac{du}{dy} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\tau_y = 0$  ก็จะเป็นของไหลนิวทอนเนียน

$\tau_y \neq 0$  ก็จะเป็นของไหลนอนิวทอนเนียน ชนิดพลาสติกบิงแฮม

## 2.8 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองจะใช้สารหล่อลื่นทั้งหมด 7 ชนิดด้วยกันคือ

1. น้ำมันเครื่อง เกรด SAE 40
2. น้ำมันเครื่อง เกรด SAE 90
3. น้ำมันปาล์มผสม ZDPT 2% โดยน้ำหนัก
4. น้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันเครื่อง เกรด SAE 40 ในอัตราส่วนผสม 10:90 โดยน้ำหนัก
5. น้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันเครื่อง เกรด SAE 40 ในอัตราส่วนผสม 20:80 โดยน้ำหนัก

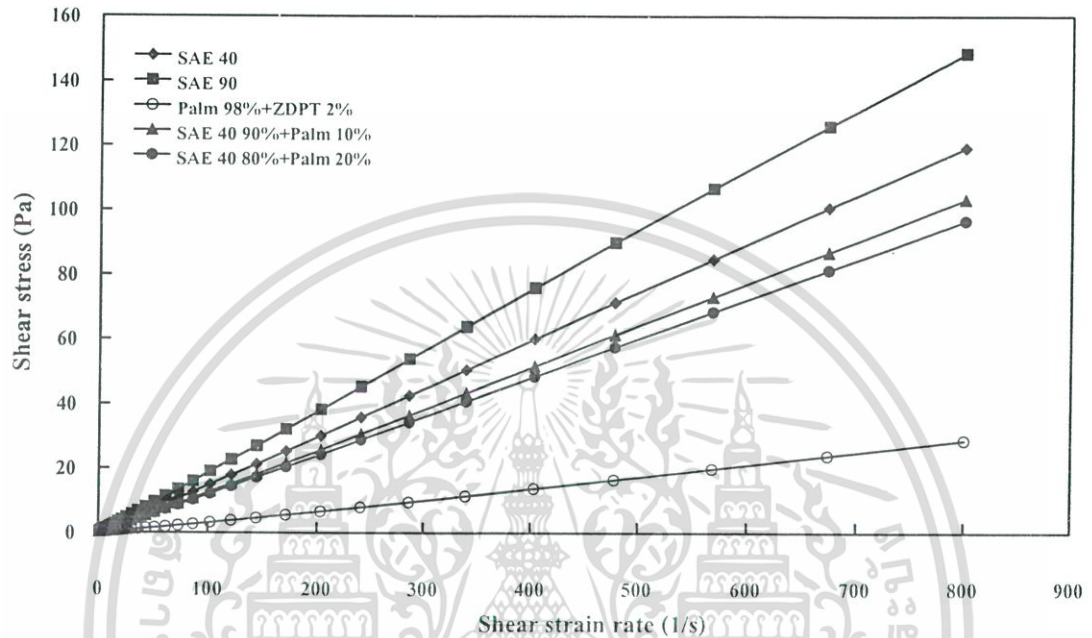
จากสารคุณสมบัติสารหล่อลื่นที่ได้จากการทดลอง เราสามารถหาค่าคุณสมบัติอื่นๆ ของสารหล่อลื่นได้จากสมการที่ (2.1), (2.2)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

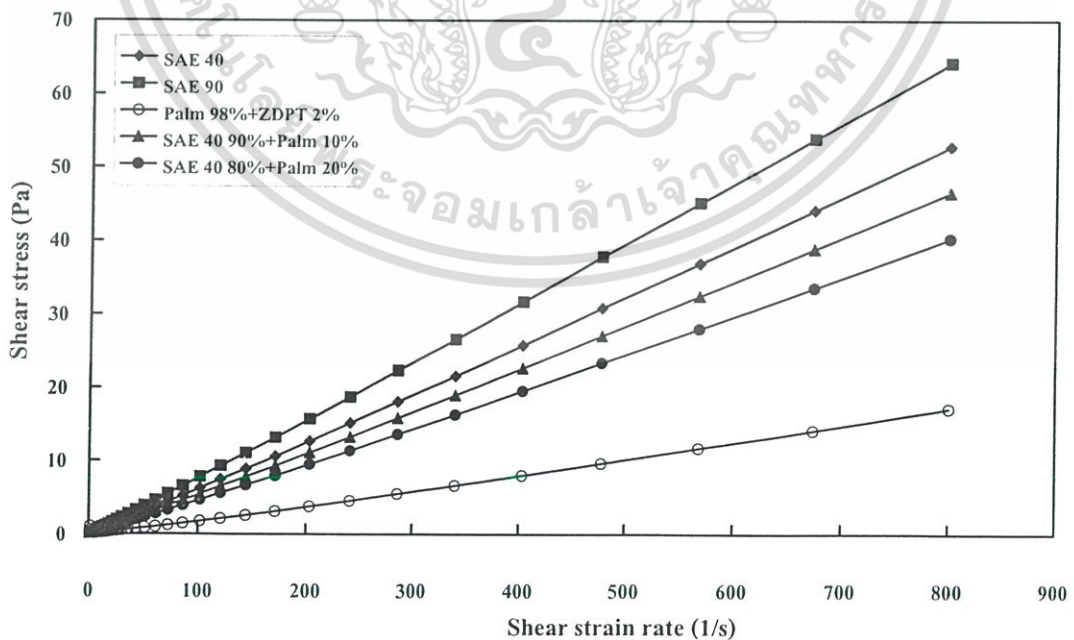
สารหล่อลื่น คุณสมบัติ	SAE40	SAE90	Palm+ ZDTP 2%	SAE40+ Palm10%	SAE40+ Palm 20%
$T_0 [^{\circ}K]$	303	303	303	303	303
$\rho_f [kg/m^3]$	879.625	892.80	929.6	884.59	889.56
$k_f [W/m/K]$	0.125	0.126	0.525	0.165	0.205
$C_f [J/kg/K]$	1900	1870	2038.0	1913.79	1927.58
$m_o$	0.142486	0.177697	0.0270983	0.1232	0.1191
$\eta_0 [Pa \cdot s]$	0.146731	0.184903	0.0313	0.125065	0.120925
$N$	1.00719	1.00969	1.03458	1.011537	1.0158
$Z$	0.550085	0.5439	0.38378	0.521192	0.513198
$\beta [1/K]$	0.000771	0.000740	0.0007486	0.00076887	0.0007665
$\gamma [1/K]$	0.046	0.05763	0.02600	0.043949	0.041838

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบหาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นด้วยเครื่องวัดความหนืดทำให้เราได้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นซึ่งสามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.7-2.10 แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นแต่ละชนิดที่แต่ละอุณหภูมิคือ  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  และ  $100^{\circ}\text{C}$  และกราฟรูปที่ 2.10-2.15 แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

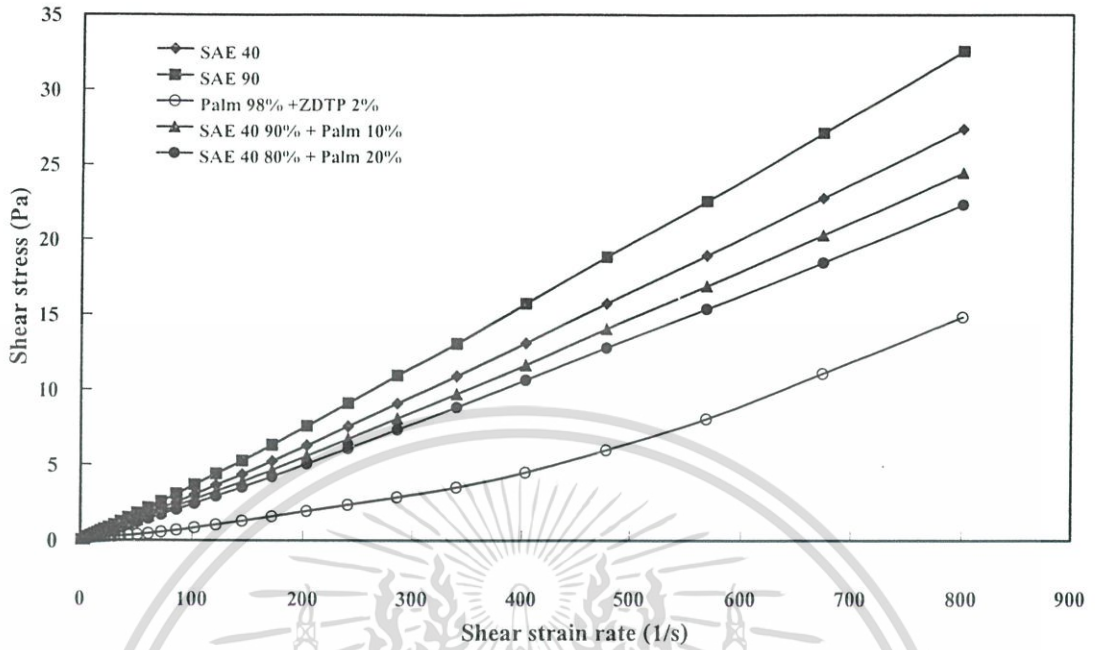


รูปที่ 2.7 แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$

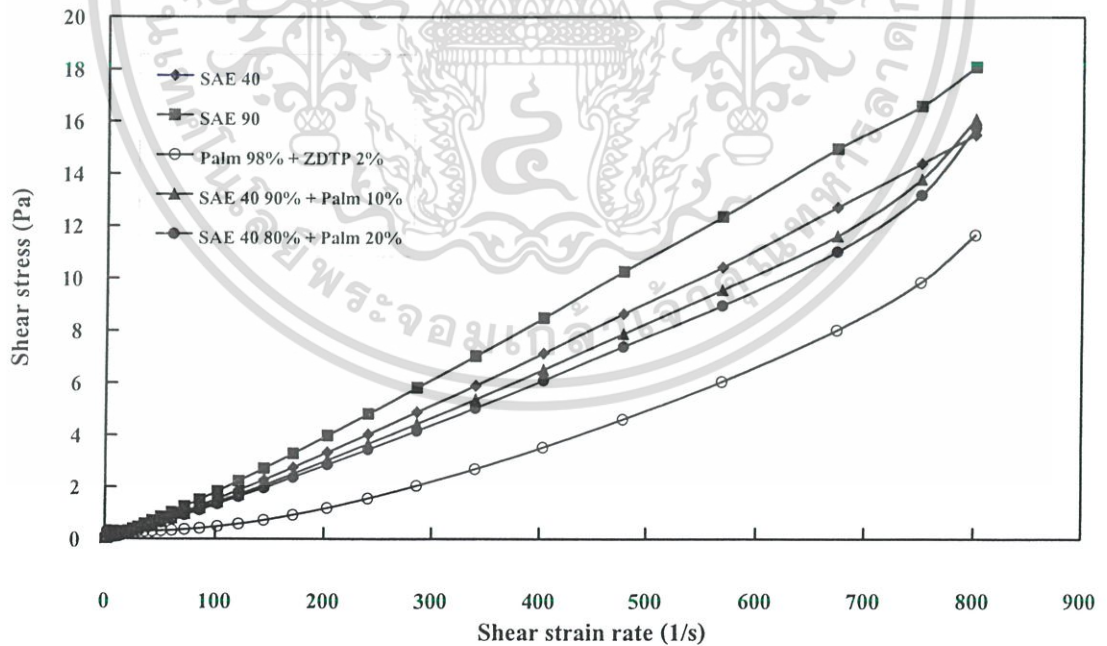


รูปที่ 2.8 แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$

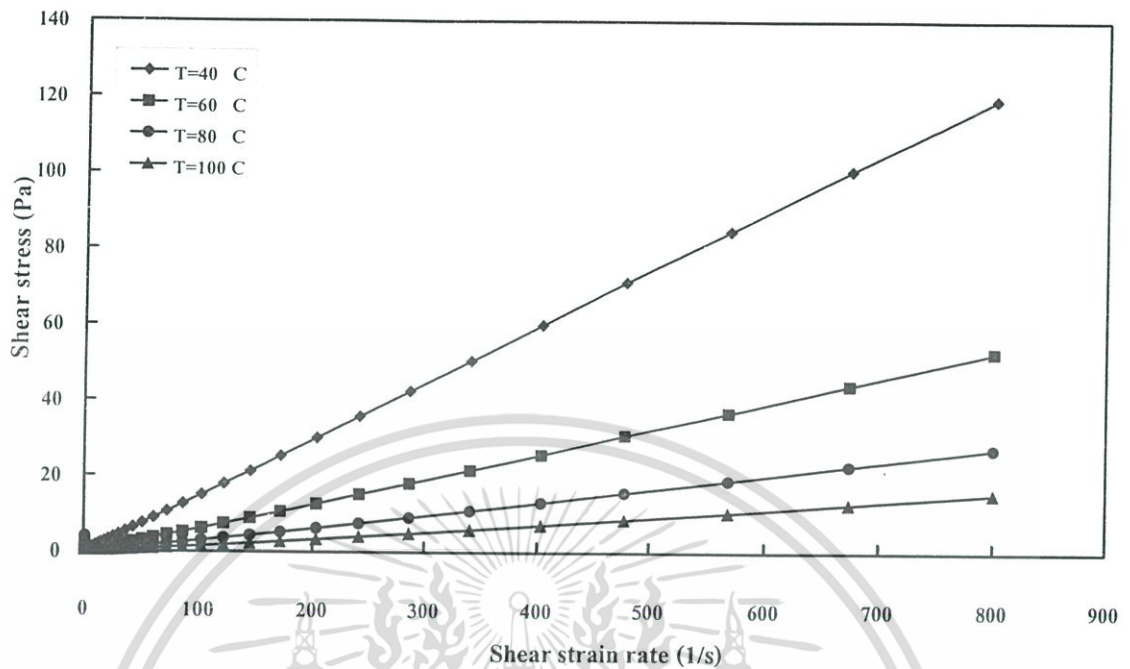
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



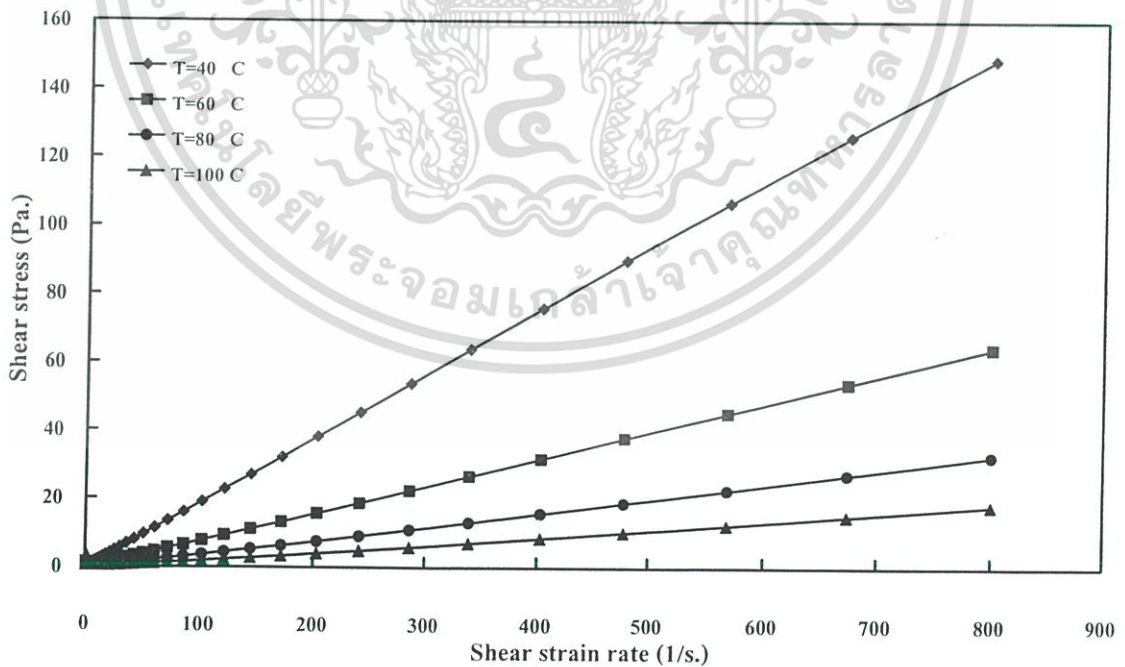
รูปที่ 2.9 แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟการไหลของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100 °C

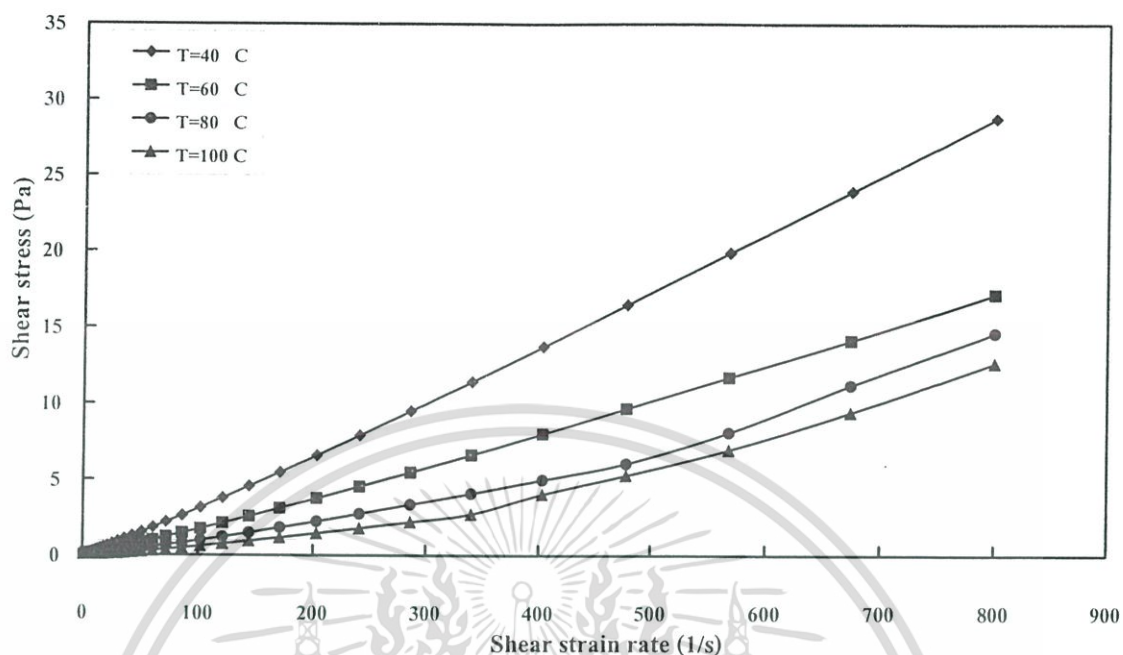


รูปที่ 2.11 แสดงกราฟการไหลของ SAE 40 ที่แต่ละอุณหภูมิ

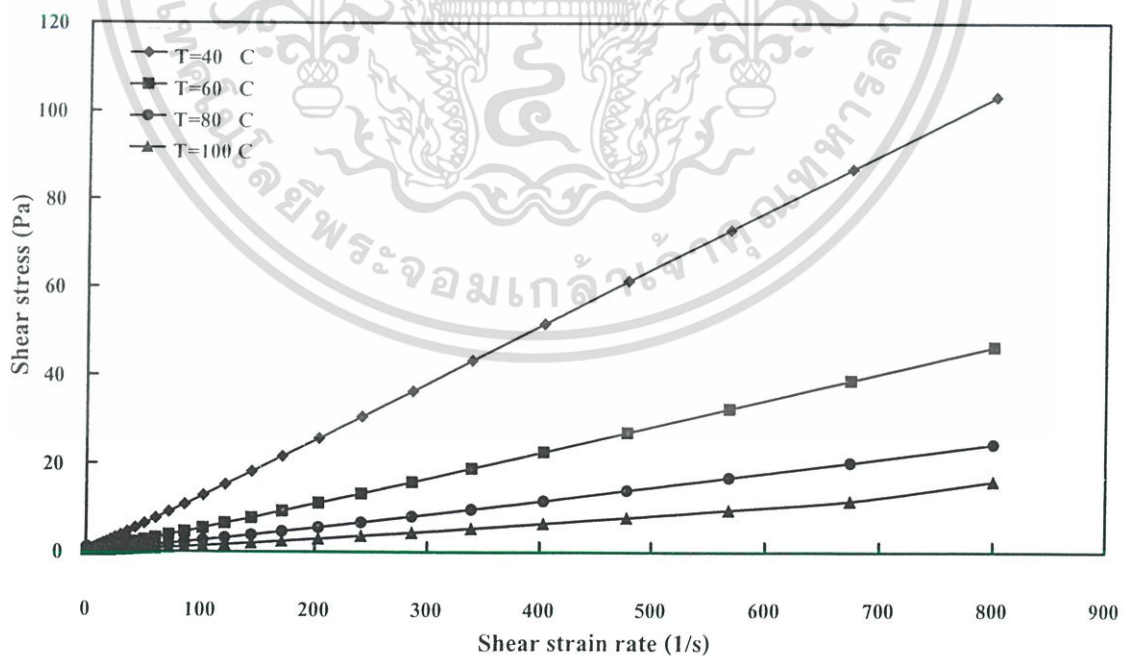


รูปที่ 2.12 แสดงกราฟการไหลของ SAE 90 ที่แต่ละอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

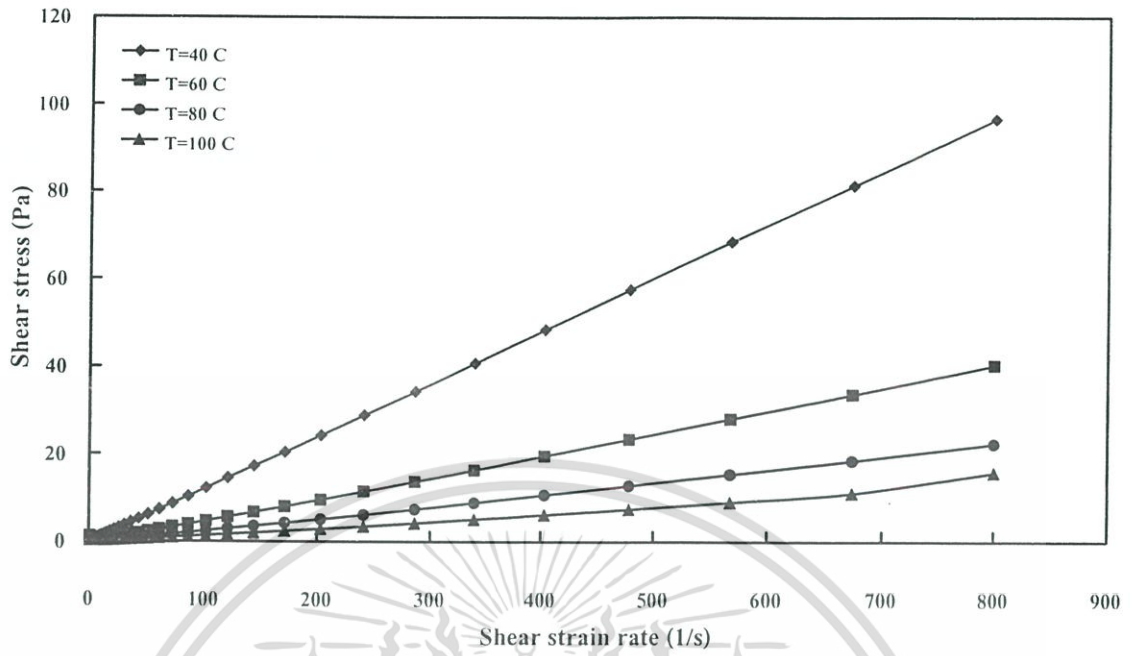


รูปที่ 2.13 แสดงกราฟการไหลของ *Palm + ZDPT 2%* ที่แต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟการไหลของ *SAE 40 + Palm 10%* ที่แต่ละอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟการไหลของ *SAE 40 + Palm 20%* ที่แต่ละอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## ผิวหยาบ

พื้นผิวของชิ้นงานนับว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการอุตสาหกรรม เนื่องจากชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีการสัมผัสกันจะต้องมีการออกแบบให้มีการสึกหรอให้น้อยที่สุด โดยจะให้มีการหล่อลื่นที่ดีที่สุดแก่ชิ้นงานเพื่อลดการเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซึ่งการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์เป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ดังนั้นผิวสัมผัสจึงมีผลเป็นอย่างมากต่อการหล่อลื่นประเภทนี้ เพราะหากขนาดของความหยาบของผิวสัมผัสมีค่ามากกว่าความหนาฟิล์มก็จะทำให้เกิดการสัมผัสกันของชิ้นส่วนทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น

ถึงแม้ทฤษฎีการออกแบบเบร็งจะมีการพัฒนามากขึ้นแต่ก็ยังคงประสบกับปัญหาเรื่องผิวสัมผัสกันอยู่ สิ่งแรกที่จะต้องศึกษาอย่างละเอียดเกี่ยวกับการหล่อลื่นของผิวของแข็งก็คือการตรวจวัดลักษณะรูปร่างของผิวหยาบ ผิวเรียบคือผิวที่ราบกับพื้นในหน่วยที่ละเอียด ความหยาบของผิวชิ้นงานจากกระบวนการขึ้นรูปเพื่อทำการหล่อลื่นจะมีค่าประมาณ  $0.01-10 \mu m$ . ขณะที่ขนาดของปรมาณูจะประมาณ  $0.0001-0.001 \mu m$ . ซึ่งผิวหยาบจะประกอบด้วยจุดที่สูงและต่ำสลับกันไป โดยทั่วไปจะเรียกจุดที่สูงว่า “ความหยาบ” (Asperity)

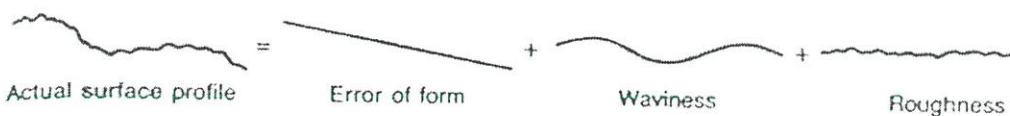
### 3.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว (Geometric characteristics of surfaces)

รูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิว โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ดังรูป 3.1

3.1.1 ความผิดพลาดของรูปร่าง (Error of form) ผิวที่เบนไปจากรูปแบบที่กำหนดไว้ สาเหตุเนื่องมาจากความผิดพลาดที่มีอยู่ในกระบวนการผลิต

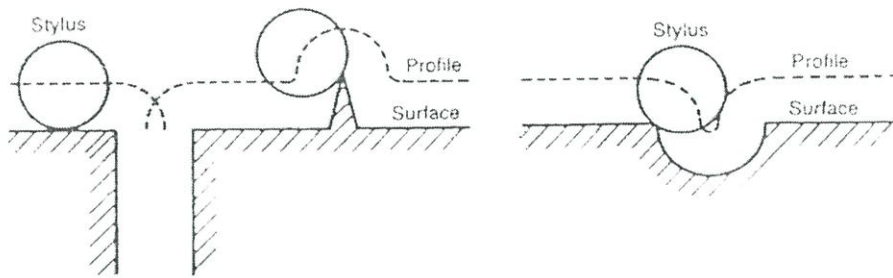
3.1.2 คลื่น (Waviness) คลื่นที่มีเกิดขึ้นจะเป็นแนวยาวในพื้นที่ผิว โดยมักจะเกิดจากความสั่นสะเทือนที่เราไม่ต้องการในเครื่องจักร ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในเครื่องจักรเสมอ

3.1.3 ความหยาบ (Roughness) ความไม่สม่ำเสมอที่รวมอยู่ในคลื่นและความผิดรูปจากการผลิต ซึ่งมักจะเกิดขึ้นขณะการตัดหรือการทำผิวสำเร็จ



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของผิวสัมผัสที่มีความหยาบที่อาจทำให้การวัดผิดพลาด

### 3.2 การวัดด้วยปลายปากกาแหลม (Stylus measurements)

เครื่องมือวัดผิวหยาบที่มีใช้อยู่โดยทั่วไป จะแบ่งออกเป็น 2 อย่างหลักๆ คือ เครื่องมือที่มีการสัมผัสโดยตรง กับแบบที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือที่ทำการวัดผิวด้วยการใช้ปลายเข็มแหลมในการวัดขนาดของความหยาบ โดยจะอาศัยหลักการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแกนเข็มที่วัดชิ้นงานซึ่งจะมีการเคลื่อนขึ้นและลงตามลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัด ในขณะที่แนวแกนเกิดการเคลื่อนขึ้นลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นและแปลงออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล และนำสัญญาณที่ได้มากรองสัญญาณอีกครั้งก่อนที่จะทำการพลอตกราฟ ซึ่งแนวความคิดนี้นำเสนอโดย แอบบอทและฟูลส์โตนในปี 1933

โดยทั่วไปปลายเข็มแหลมจะทำมาจากเพชร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $4\ \mu\text{m}$ . และจะมีแรงกระทำคงที่โดยประมาณ ไม่เกิน  $0.0007\ \text{N}$ . ซึ่งเป็นไปได้ยากที่ปลายหัวเพชรจะมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวที่ทำการวัด เนื่องจากพื้นผิวที่จะทำการวัดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการวัดจึงอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้จากขนาดของหัวเพชร ไม่สัมพันธ์กับพื้นผิวที่ทำการวัด ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงถึงข้อผิดพลาดจากการวัดในพื้นที่ที่มีลักษณะต่างๆ กัน คือกรณีที่เป็นร่องลึกเท่ากับขนาดของปลายเข็มพอดี, กรณีที่เป็นยอดแหลมขึ้นมา และกรณีที่เป็นจุดเว้าเท่าหัวเข็มพอดี ซึ่งแนวเส้นที่ได้จะถูกรวมกับขนาดของหัวเข็มเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะได้รูปภาพของพื้นผิวที่แท้จริงจากการวัดค่าด้วยวิธีนี้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังคงได้รับความนิยมสูง ความสามารถในการเคลื่อนที่แนวตั้งของปลายเข็มจะอยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 100,000 และแนวระนาบจะอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 5000 หรืออยู่ในอัตราส่วนของแนวตั้ง : แนวราบ=50:1 ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการที่จะเลือกขนาดของการเคลื่อนที่ของปลายเข็มกับลักษณะของพื้นผิวที่จะทำการวัด

### 3.3 เครื่องมือวัดผิวที่ไม่สัมผัสโดยตรง (Some no contacting measurement Devices )

3.3.1 ชุดวัดแบบใช้ลม (Pneumatic devices) เครื่องมือวัดชนิดนี้จะอาศัยหลักการรั่วของอากาศที่ปลายของหัววัด โดยหัววัดจะมีลักษณะคล้ายหัวฉีดที่ตรงปลายจะเรียบและแบน ขณะที่หัววัดเคลื่อนที่ไปก็จะมีแรงดันลมออกมาบริเวณไหนที่มีการรั่วของลมออกก็แสดงว่าไม่เรียบและมีช่องเล็กๆ อยู่วิธีนี้นิยมใช้วัดพื้นอาคารที่ต้องการผิวเรียบเนื่องจากสามารถทำการวัดได้เร็ว, ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและวัดได้สะดวก อีกทั้งหัววัดยังทนทานต่อสึกหรอเนื่องจากการเสียดสี

3.3.2 ชุดวัดแบบเลนส์ (Optical devices) จะอาศัยหลักการสะท้อนจากแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมาโดยจะคำนวณจากปริมาณของแสงที่มีการสะท้อนกลับซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงลักษณะของพื้นผิวที่วัดได้ วิธีนี้ไม่เหมาะกับการที่จะนำมาใช้กับงานที่มีการเคลื่อนย้ายอยู่เสมอเนื่องจากว่าเลนส์ที่ใช้ในการวัดจะมีความละเอียดอ่อนมาก หากเกิดการเคลื่อนย้ายจะทำให้ตำแหน่งในการตั้งค่าไว้เปลี่ยนไป

3.3.3 ชุดกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Electron microscope devices) วิธีการวัดแบบนี้จะให้ผลการวัดที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเลนส์ธรรมดา เนื่องจากความยาวของคลื่นจะสั้นมาก ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนทะลุผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) โดยลำของอิเล็กตรอนจะทะลุผ่านชิ้นงานที่ทำการวัดผิวและลำแสงจะเกิดการหักเหและกระจายไป และแสดงที่จอภาพเป็นรูปแสดงลักษณะของพื้นผิว วิธีนี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้หาปริมาณการฟุกร่อนของผิวโครงสร้าง โดยปรกติแล้วชิ้นงานต้องหนาไม่เกิน  $3 \mu m$ .

- กล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง (Reflection electron microscopy, REM) อิเล็กตรอนจะกระจายจากผิวของชิ้นงานและถูกรวมแสง ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า และสัญญาณนี้จะถูกนำมาแสดงเป็นรูปภาพลักษณะผิวของชิ้นงานที่ทำการวัดบนจอมอนิเตอร์ ลำแสงของอิเล็กตรอนที่ยิงออกไปจะทำให้เกิดเป็นจุดโฟกัสซึ่งชัดเจนบนชิ้นงาน บางทีเรียกว่า “กล้องจุลทรรศน์แบบสแกน” โดยการสแกนแบบนี้สามารถปรับให้มีความละเอียดได้สูงสุดประมาณ  $10 nm$ . ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าที่ TEM ทำได้

### 3.4 เส้นอ้างอิง (Reference lines)

ในการคำนวณจะต้องกำหนดตัวแปรเพื่อหาขนาดของความสูงของผิวหยาบ ซึ่งจะต้องมีจุดอ้างอิงว่าความสูงในแต่ละจุดมีขนาดเท่าไร ดังแสดงในรูป 3.3

3.4.1 เฉลี่ย หรือ ระบบเอ็ม (Mean or M system) วิธีค่าเฉลี่ยจะมีพื้นฐานมาจากการเลือกเส้นเฉลี่ยที่จุดกึ่งกลางของรูปร่าง ดังนั้นพื้นที่ด้านบนและด้านล่างเส้นต้องมีค่าเท่ากัน ถ้ารูปร่างกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแต่ละรูปเป็นสี่เหลี่ยม วิธีนี้ก็เท่ากับว่าเป็นการหาค่าความสูงเฉลี่ยของทั้งหมด วิธีนี้อาจเรียกว่า “แนวระดับ” ซึ่งจะไม่ได้อรวมค่าที่เป็นความลาดเอียงเข้าไปด้วย

**3.4.2 ค่าเฉลี่ยสิบจุด (Ten point average)** ค่าเฉลี่ยแบบสิบจุดเป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของการหาตำแหน่งจุดที่สูงที่สุดและจุดที่ต่ำที่สุดอย่างละห้าจุด ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้ก็จะเท่ากับ 10 จุด เป็นเส้นอ้างอิง

**3.4.3 วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least squares)** วิธีนี้เป็นวิธีที่มีพื้นฐานมาจากเส้นอ้างอิงที่เอียงขึ้นมาแทนที่เส้นแนวระดับดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นหัวใจหลักของการหาวิธีนี้คือการนำค่าผิดพลาดมารวมกับวิธีที่มีอยู่เพื่อชดเชยค่าเอียงของแนวระดับ สามารถเขียนเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

$$z = \bar{m}x + \bar{b} \tag{3.1}$$

เมื่อ  $\bar{m}$  = ค่าความชัน  
 $\bar{b}$  = ค่าตัดแกน z

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

$$\bar{d}_1 = [z_1 - (\bar{m}x_1 + \bar{b})], \dots, \bar{d}_n = [z_n - (\bar{m}x_n + \bar{b})] \tag{3.2}$$

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

เส้นอ้างอิงหรือเส้นเฉลี่ยไม่เพียงแต่จะมีความสำคัญกับแนวทิศทางแกน z ยังมีความสำคัญต่อช่วงตัวอย่างการทดสอบด้วย ซึ่งจะแสดงถึงความแตกต่างของผิวหยาบและคลื่น

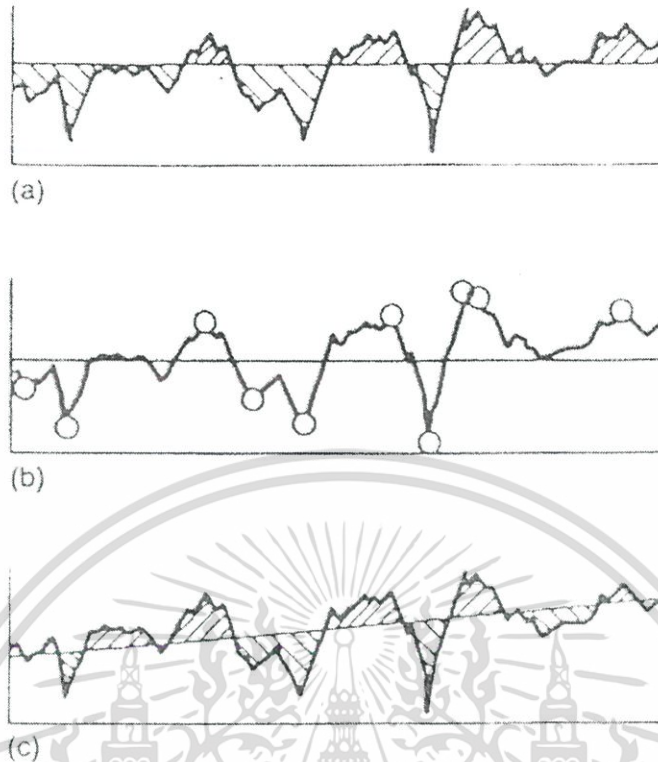
$$\bar{f}(\bar{m}, \bar{b}) = \sum_{i=1}^n d_i^2 \tag{3.3}$$

หรือ

$$\bar{f}(\bar{m}, \bar{b}) = (z_1 - \bar{m}x_1 - \bar{b})^2 + (z_2 - \bar{m}x_2 - \bar{b})^2 + \dots + (z_n - \bar{m}x_n - \bar{b})^2 \tag{3.4}$$

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

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{m}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{b}} = 0 \tag{3.5}$$



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบเส้นอ้างอิง 3 แบบ a.) ระบบ M b.) ค่าเฉลี่ย 10 จุด c.) กำลังสองน้อยสุด

### 3.5 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณพื้นผิว

สมมุติว่าจะทำการวัดผิวหยาบด้วยเครื่องมือแบบปลายเข็มแหลม ซึ่งเส้นอ้างอิงที่ใช้เป็นแบบเฉลี่ยและแบบกำลังสองน้อยสุด ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ  $z$ , เท่ากับศูนย์ ในการวัดขนาดของผิวหยาบจะนิยมใช้ จะมี 3 แบบคือ

3.5.1 เส้นศูนย์กลางเฉลี่ย (Centerline average ,CLA) จะใช้สัญลักษณ์  $R_a$

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i| \quad (3.6)$$

3.5.2 ค่ารากที่สองของกำลังสอง (RMS) จะใช้สัญลักษณ์  $R_q$

$$R_q = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2 \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 ค่าสูงสุด-ต่ำสุด จะสมมุติให้มีการกระจายของความสูงเป็นแบบเกาส์เซียน ค่า  $R_q$  สามารถใช้แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะใช้อธิบายโดยค่า  $R$ ,

$$R_r = \max(z) - \min(z) \quad (3.8)$$

กรณีที่มีการกระจายตัวเป็นแบบไชน์ สามารถที่จะหาอัตราส่วนของ  $R_q : R_n$  ได้ดังนี้

$$\frac{R_q}{R_n} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (3.9)$$

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

ดังนั้นจะเห็นว่าค่า  $R_n$  เพียงอย่างเดียวไม่สามารถระบุลักษณะของผิวได้ ดังนั้นจะต้องระบุค่าความสัมพันธ์ตามแนวแกน  $z$  ด้วย ซึ่งเรียกว่า “ช่วงเบร็ง” คือการตัดยอดของผิวหยาบขนานกับแกน  $z$  ดังรูป 3.4 ซึ่งจะอธิบายในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

$$l^* = l_1^* + l_2^* + \dots + l_n^* \quad (3.10)$$

อัตราส่วนของช่วงเบร็ง จะหาได้ดังนี้

$$l_p = \frac{l^*}{l} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $l =$  ช่วงที่วัด,  $m$ .

โค้งแอบบอทหรือที่เรียกกันอีกอย่างคือ โค้งเบร็ง ดังแสดงในรูป 3.4 แกนแนวตั้งเป็นอัตราช่วงเบร็งคูณด้วย 100 กราฟเหล่านี้จะบ่งบอกให้ทราบถึงค่าผิวที่เบี่ยงเบนจากเส้นเฉลี่ย ซึ่งกราฟเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่ามีความสูงของผิวหยาบเท่าไร และมีปริมาณเท่าไร ซึ่งรูปร่างของผิวหยาบสามารถที่จะอธิบายในเทอมของฟังก์ชันการกระจายของความสูง ในรูปของสถิติจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{F}(z) = \int_{-\infty}^z \bar{\psi} dz \quad (3.12)$$

เมื่อค่า

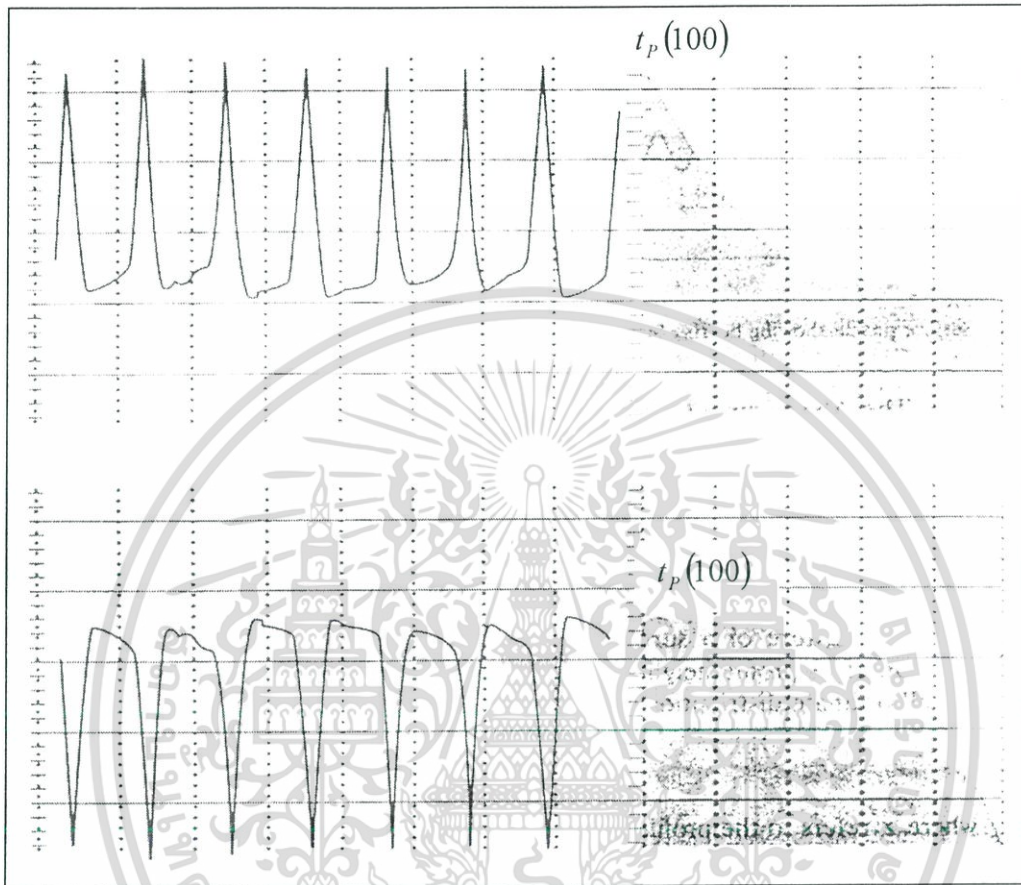
$z =$  ค่าความสูงของผิวหยาบที่จุดอ้างอิง

$\bar{\psi} =$  ฟังก์ชันความน่าจะเป็นซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของการกระจายความสูง

ฟังก์ชันของความน่าจะเป็นอาจจะทำให้เห็นในรูปของอัตราส่วนของความสูงในช่วงที่

กำหนดให้ ดังนั้นกราฟแสดงการเบี่ยงเบนจะรวมถึงค่า  $z_1, z_2, \dots, z_n$  ที่บางช่วงของจุดต่อและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลรวมของจำนวนของจุดที่ความสูงบางระดับ รูปที่ 3.5 แสดงวิธีที่ใช้ในการหาโค้งของการกระจายทั้งหมด, โค้งการกระจายในรูปที่ 3.5 เป็น โค้งที่เรียบที่สุดสามารถที่จะเขียนเป็นอีทโทแกรม ซึ่งโค้งเรียบนี้จะมีการกระจายเป็นแบบเกาส์เซียน



รูปที่ 3.4 แสดงโค้งแอมบอทของพื้นผิวสองแบบที่แตกต่างกัน

ถ้าแนวความคิดนี้เกี่ยวกับการกระจายความสูงที่มีความหนาแน่นแบบพาราโบลิกหรืออีทโทแกรม ซึ่งค่า  $R_a$  สามารถที่จะประมาณจากค่า  $R_q$  ถ้าอัตราส่วนของความสูงในช่วง  $z_j - \Delta \leq z_j \leq z_j + \Delta$  แทนค่าด้วย  $\bar{\psi}_j$  สำหรับ  $j = -L, \dots, 0, \dots, L$  ดังนั้นค่าโดยประมาณที่โค้งก็จะเท่ากับสมการ (3.1) และ (3.2) ดังนี้

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

$$R_q = \left( \int_{-L}^{+L} z^2 \bar{\psi} dz \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

จากความสัมพันธ์ของเกาส์-ลาปาส สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของความน่าจะเป็น จากการสมมติจากการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังนี้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\psi} = \frac{1}{\bar{\sigma}(2\pi)^{1/2}} \exp \frac{-(z-z^*)^2}{2\bar{\sigma}^2} \quad (3.14)$$

เมื่อค่า

$\bar{\sigma}$  = เป็นค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$z^*$  = เป็นค่าที่ห่างจากค่าเฉลี่ยที่เลือกไว้

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



รูปที่ 3.5 แสดงการหาความโค้งน่าจะเป็นจากผิวหยาบทั่วๆได้

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

$$M_n = \int_{-\infty}^{+\infty} z^n \bar{\psi} dz \quad (3.15)$$

ซึ่งสามารถที่จะสังเกตถึงโมเมนต์ 2 เท่าของครึ่ง  $\bar{\psi}dz$  จะสมมูลกับเส้น  $R_q$  เฉลี่ยในสมการ (3.8) หรือ

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

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

$$R_q = \bar{\sigma} = \left( \int_{-\infty}^{\infty} z^2 \bar{\psi} dz \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

ค่าโมเมนต์ที่ 3 ของ  $\bar{\psi}dz$  สัมพันธ์กับยอดแหลมของส่วน โค้ง สามารถที่จะเขียนในรูป สมการคณิตศาสตร์ ได้คือ

$$\bar{\alpha} = R_q^{1/3} \int_{-\infty}^{\infty} z^3 \psi dz \quad (3.17)$$

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

$$\bar{\beta} = R_q^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 \bar{\psi} dz \quad (3.18)$$

ค่า  $\bar{\beta}$  ที่ได้จากการแจกแจงความถี่จะมีค่าเป็นค่าบวกเสมอ และค่าที่วัดได้ก็จะสมมาตร และสำหรับที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียนค่าโค้งจะมีการแจกแจงความถี่จะปิดที่ 3 เมื่อเส้นรูปร่างของความสูงทั้งหลายจะทับกับเส้นอ้างอิงจะมีค่า  $\bar{\beta}$  กว้าง ช่วงความโค้งที่มีค่า  $\bar{\beta}$  มากกว่า 3 จะเรียกว่า “Leptokurtic” ส่วนช่วงความโค้งที่มีค่า  $\bar{\beta}$  น้อยกว่า 3 จะเรียกว่า “Platykurtic” รูปที่ 3.10 แสดงถึงค่าการกระจายความถี่ที่แตกต่างกัน

สำหรับโค้งที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังสมการที่ (3.14) สามารถเขียนในรูปของโมเมนต์ได้ดังนี้

$$M_n = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} z^n \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) dz \quad (3.19)$$

เมื่อค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมาตรฐาน  $\sigma = R_q$  จากสมการ (3.14) สามารถใช้ได้ ถ้า n เป็นค่าคู่ แต่ถ้า n เป็นค่าคี่สามารถหาได้จาก

$$M_n = \frac{n!}{2^{n/2} (n/2)!} \sigma^n \quad (3.20)$$

ค่าตัวแปรบางตัวอาจใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับผิวในฟิล์มของสารหล่อลื่นดังค่าในช่วงที่พบมากดังแสดงข้างล่างนี้

ความหนาแน่นของยอดผิวหยาบ  $10^2$  ถึง  $10^6$  peak / mm<sup>2</sup>

ค่าระยะห่างของยอดผิวหยาบ 1 ถึง 75  $\mu$ m

ค่าความชันของผิวหยาบ 0 ถึง 25°

รัศมีของยอดปลายผิวหยาบ ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10 ถึง 30  $\mu$ m

### 3.6 โมเดลที่ใช้ในการจำลอง

โดยในการจำลองจะกำหนดให้ผิวจากการสัมผัสมีค่าความหยาบแตกต่างกัน ทั้งหมด 4 โมเดล คือ

3.6.1 โมเดล 1 สำหรับโรลเลอร์  $R_q = 0.298 \mu\text{m}$ . (ดังรูปที่ 3.6)

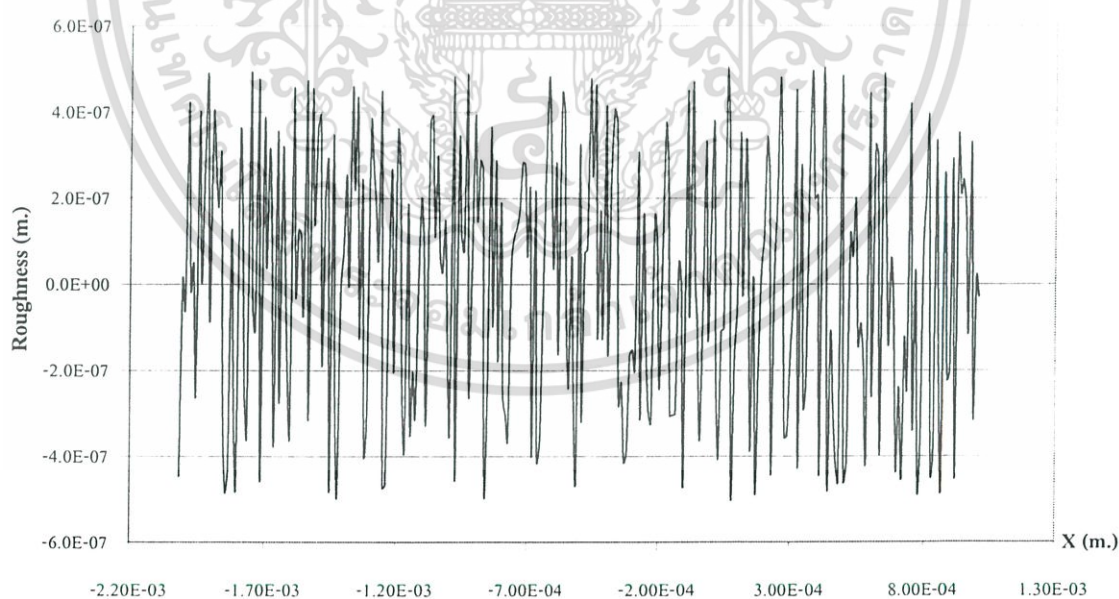
3.6.2 โมเดล 2 สำหรับแผ่นเพลท  $R_q = 0.289 \mu\text{m}$ . (ดังรูปที่ 3.7)

3.6.3 โมเดล 3 สำหรับโรลเลอร์  $R_q = 0.586 \mu\text{m}$ . (ดังรูปที่ 3.8)

3.6.4 โมเดล 4 สำหรับแผ่นเพลท  $R_q = 0.584 \mu\text{m}$ . (ดังรูปที่ 3.9)

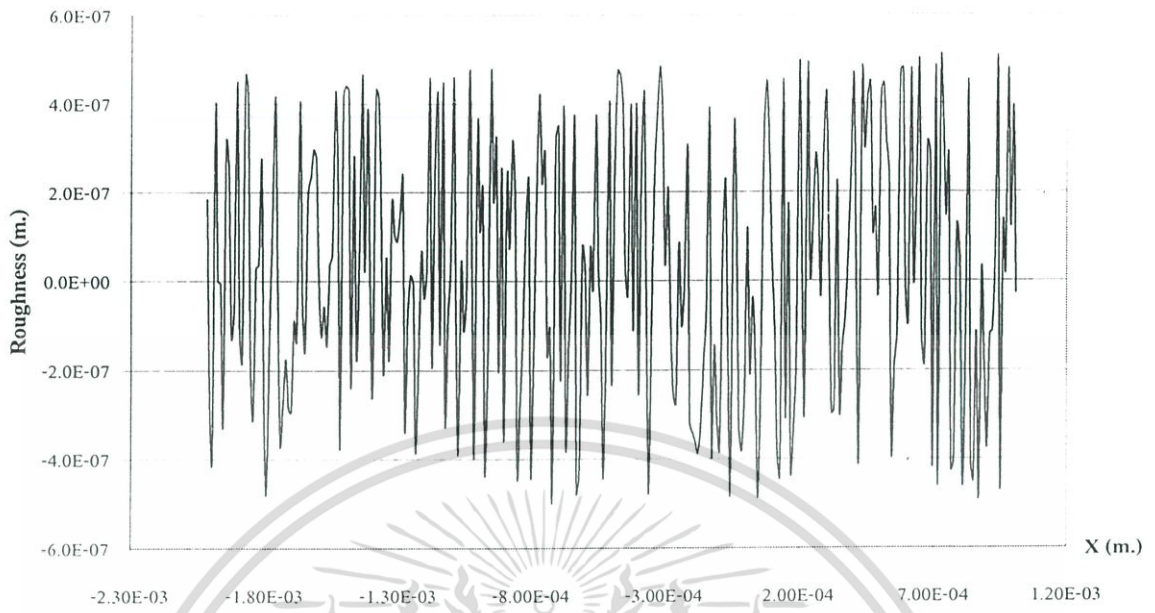
ตารางที่ 3.1 แสดงการคำนวณผิวหยาบที่แต่ละโมเดล

ความหยาบ	โมเดล 1	โมเดล 2	โมเดล 3	โมเดล 4
$Z_i (\mu\text{m})$	$9.56 \times 10^{-3}$	$-2.63 \times 10^{-2}$	$-1.93 \times 10^{-2}$	$2.29 \times 10^{-2}$
$R_a (\mu\text{m})$	0.261	0.247	0.513	0.504
$R_q (\mu\text{m})$	0.298	0.289	0.586	0.584

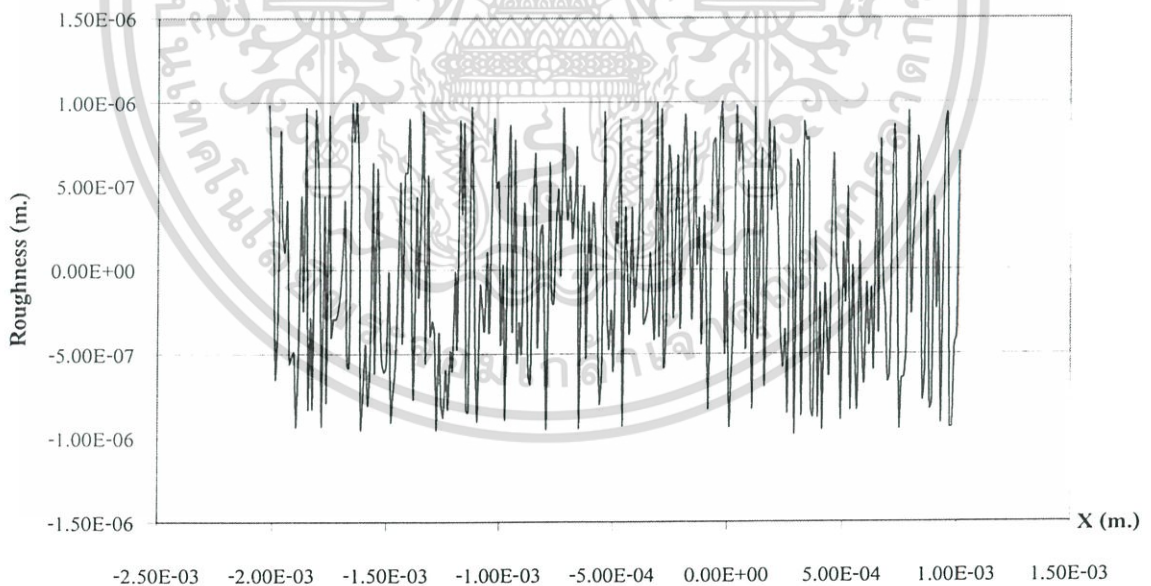


รูปที่ 3.6 แสดงผิวหยาบของโรลเลอร์ที่มีความหยาบ โมเดล 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

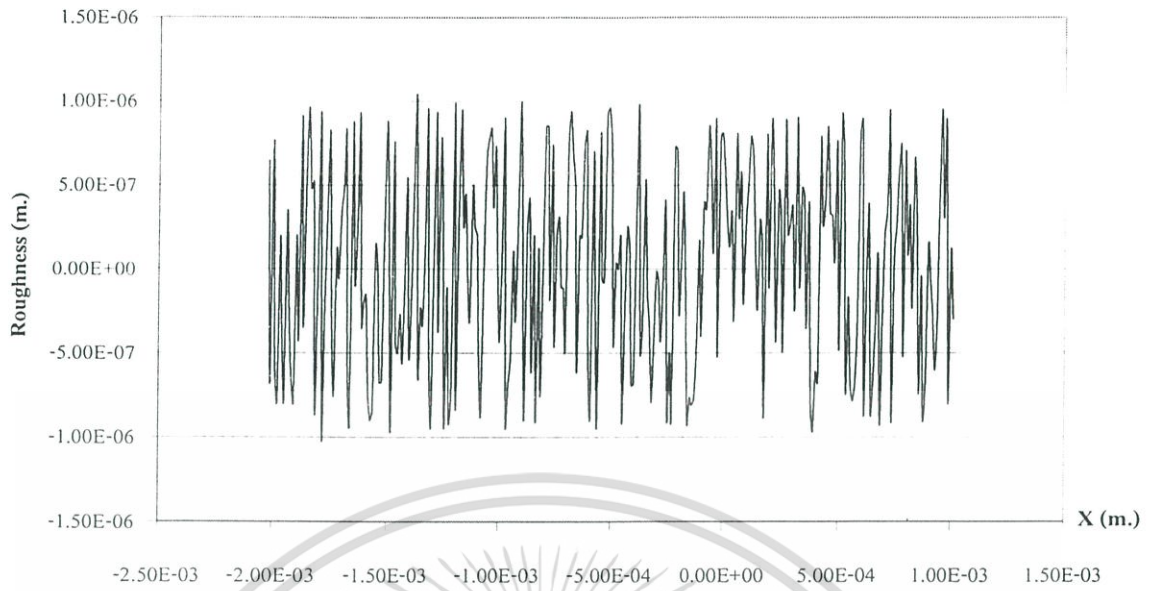


รูปที่ 3.7 แสดงผิวหยาบของแผ่นเพลทที่มีความหยาบ โมเดล 2



รูปที่ 3.8 แสดงผิวหยาบของโรลเลอร์ที่มีความหยาบ โมเดล 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงผิวหยาบของแผ่นเพลทที่มีความหยาบ โมเดล 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# เทอร์โมไดนามิกส์ไฮโดรไดนามิกส์ที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น

การหล่อลื่นแบ่งออกเป็นหลายประเภท แต่โดยหลักของการแบ่งตามขนาดของความหนาฟิล์มและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งมีการแบ่งดังรูปที่ 4.1 คือ

1. การหล่อลื่นแบบเบาดารี เป็นการหล่อลื่นที่ผิวของทั้งสองส่วนสัมผัสกันทั้งหมด ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ได้มีค่าคงที่
2. การหล่อลื่นแบบมีคส์ เป็นการหล่อลื่นที่ผิวของทั้งสองส่วนเริ่มมีการสัมผัสเป็นบางส่วน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเริ่มมีค่ามากขึ้นเมื่อความหนาฟิล์มบางลง
3. การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ จะเห็นว่าทั้งสองส่วนไม่เกิดการสัมผัสแต่ความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นจะบางมากและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะลดลงตามความหนาของฟิล์ม
4. การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ จะเป็นการหล่อลื่นที่ความหนาฟิล์มหนากว่าแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ แรงดันที่เกิดขึ้นจะไม่สูงมากนักจะไม่ทำให้ผิวสัมผัสของทั้งสองส่วนเกิดการเสียดสีรูป

### 4.1 การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์

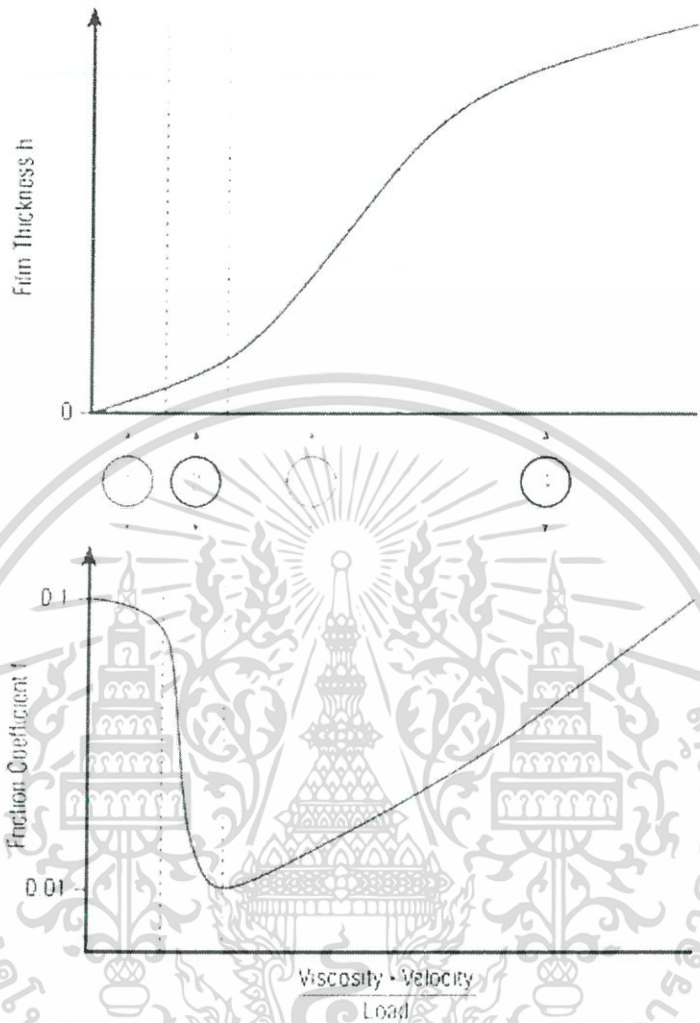
จากการแบ่งประเภทข้างต้นจะเห็นว่ากรณีการหล่อลื่นประเภทนี้เป็นกรณีที่มีความสำคัญมากในระบบอุตสาหกรรมเพราะการที่เครื่องจักรมีความเสียดทานต่ำ จะส่งผลให้เสียพลังงานในการขับเคลื่อน และการที่ทั้งสองส่วนไม่เกิดการสัมผัสกันก็ส่งผลให้การสึกหรอเกิดขึ้นน้อยมาก

### 4.2 สมมติฐานของเฮิร์ตซ์

เนื่องจากการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของส่วนที่เกิดการสัมผัสกัน ดังนั้นเฮิร์ตซ์จึงได้ทำการพิจารณาความเค้นและการเสียดสีของรูปทรงวงรี (Ellipsoidal) สองอันสัมผัสกัน โดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเพื่อกำหนดรูปแบบของปัญหาสำหรับการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แบริ่งทรงกลม, เพลาข้อเหวี่ยง, ตลับลูกปืน, เฟืองและลูกเบี้ยว โดยมีสมมติฐานดังนี้ [2]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงการแบ่งประเภทของการหล่อลื่น

### 4.3 สมการเรย์โนลด์

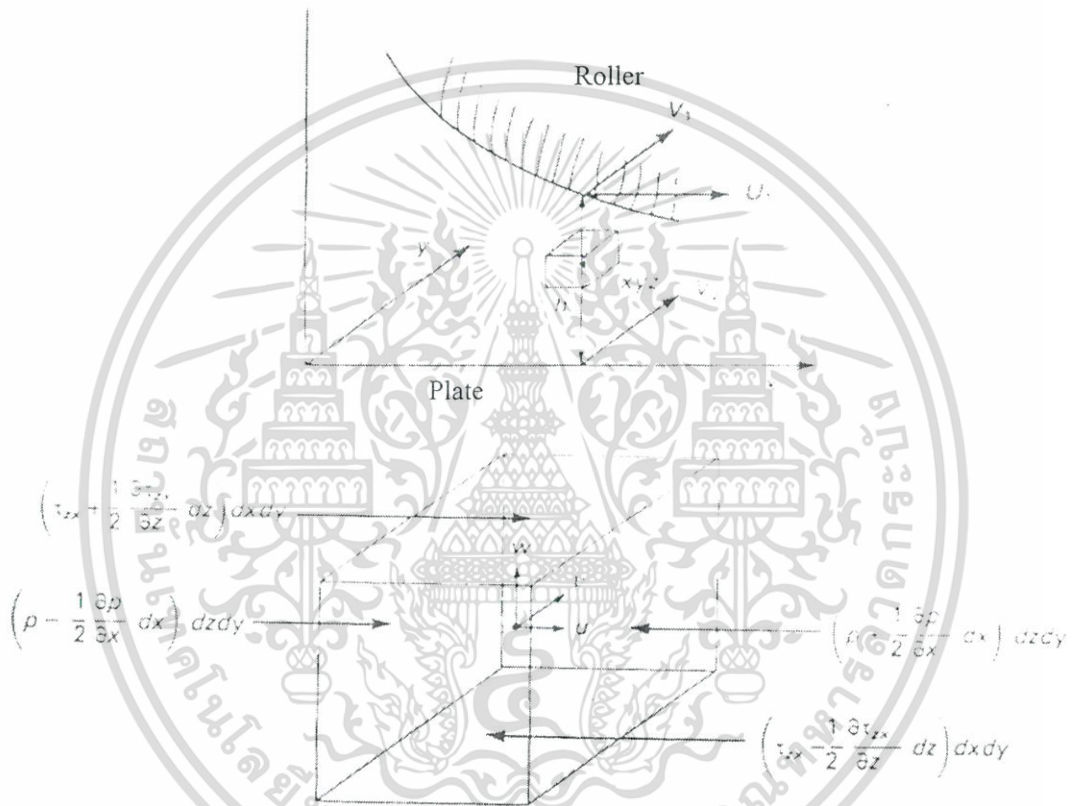
สมการเรย์โนลด์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการไหลและการกระจายแรงดันในฟิล์มของของไหล คิดค้นโดยเรย์โนลด์ในปี 1886. โดยสมการที่ใช้ของไหลจะมีคุณสมบัติเป็นนิวทอนเนียน ซึ่งจะได้มาจากสมการนาเวียร์-สโตกและดอร์สันก็ได้พัฒนาต่อมาโดยพิจารณาถึงผลของความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาฟิล์ม โดยในการคำนวณจะสมมุติดังต่อไปนี้

1. พิจารณาน้ำหนักของของไหลมีค่าน้อยมาก
2. แรงดันมีค่าคงที่ตลอดความหนาฟิล์ม
3. ไม่มีการเลื่อนไถลระหว่างขอบผิวของโรลเลอร์กับของไหล
4. สารหล่อลื่นมีการไหลแบบราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แรงดึงผิวและโมเมนต์ความเฉื่อยพิจารณาว่ามีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงจากความหนืด
6. ความเค้นและเกรเดียนความเร็วเป็นสิ่งที่สำคัญมากในแนวความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น
7. สารหล่อลื่นพิจารณาเป็นนอนนิวทอเนียน

#### 4.4 สมดุลแรงในชั้นของของไหล



รูปที่ 4.2 แสดงแรงที่กระทำต่ออลิเมนต์ของของไหล

จากรูปที่ 4.2 พิจารณาถึงขอบของผิวสัมผัสโรลเลอร์และเพลทให้ผิวเพลทเป็นระนาบ  $XY$  เมื่อสารหล่อลื่นมีความหนา  $h$  จะให้ความเร็วตามจุดต่างๆ เป็น  $(U_1\hat{i} + V_1\hat{j} + W_1\hat{k})$  และ  $(U_2\hat{i} + V_2\hat{j} + W_2\hat{k})$  เมื่อ  $\hat{i}, \hat{j}$  และ  $\hat{k}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ตามแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ พิจารณาแรงกระทำที่ขอบของชิ้นส่วนของของไหลที่  $(x, y, z)$  ในคอลัมน์ความหนาฟิล์ม  $H$  ซึ่งจะให้ความเร็วแทนด้วยเทอม  $(u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k})$  พิจารณาว่าค่าความเค้นและความเร็วในแนวแกน  $x$  และ  $y$  น้อยมาก ดังนั้นเราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial x}\end{aligned}\quad (4.1)$$

เมื่อ  $\tau_{zx}$  = ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน  $x$   
ขณะเดียวกัน

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \frac{\partial p}{\partial y}\end{aligned}\quad (4.2)$$



รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเอลิเมนต์ของสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 4.2 และกฎของนิวตันจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\tau_{zx} &= \eta \frac{\partial u}{\partial z} \\ \tau_{zy} &= \eta \frac{\partial v}{\partial z}\end{aligned}\quad (4.3)$$

เมื่อ

$$\eta = m_0 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $\eta = \eta(I_2)$  และ  $I_2$  คือ Second invariant of strain rate หาได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

และทำการอินทิเกรตสมการ (4.6) อีกครั้งจะได้

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

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

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

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

จากรูปที่ 4.1 เงื่อนไขขอบคือ

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

$$y=h, \quad u=u_2, v=V_2, \quad w=0 \quad (4.11)$$

แทนค่าเงื่อนไขขอบของสมการ (4.10) และ (4.11) ลงในสมการ (4.7) และ (4.9) ดังนั้น

$$u = \left( \int \frac{y}{\eta} dy - h \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \int \frac{dy}{\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_2 - u_1}{h} \mu_{e0} \int \frac{dy}{\eta} + u_1 \quad (4.12)$$

$$w = \left( \int \frac{y}{\eta} dy - h \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \int \frac{dy}{\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.13)$$

โดยที่อัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate) คือ

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left( \frac{y}{\eta} - \frac{h}{\eta} \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_2 - u_1}{h} \frac{\mu_{e0}}{\eta} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \left( \frac{y}{\eta} - \frac{h}{\eta} \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.15)$$

โดยที่

$$\frac{1}{\mu_{e,i}} = \frac{1}{h^{i+1}} \int \frac{y^i}{\eta} dy \quad \text{เมื่อ } i = 0,1,2 \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลในสองมิติเราสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (4.17)$$

อินทิเกรตสมการ (4.16) เทียบกับ  $y$  ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง  $h$  ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \int_0^h u dy \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \int_0^h w dy \right) = - \int_0^h d(\rho v) \quad (4.18)$$

เทอมทางขวามือของสมการ (4.17) เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของลูกกลิ้งในแนวตั้งฉากเป็นผลทำให้ความหนาฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาหาได้จาก

$$\rho V_2 = \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) \quad (4.19)$$

ทำการหาสมการเรย์โนลด์สำหรับแบบจำลองใดๆ โดยอินทิเกรตสมการ (4.17) และ (4.18) ตลอดความหนาฟิล์มจาก 0 ถึง  $h$  ได้

$$\int_0^h u dy = - \left( \frac{h^3}{\mu_{e2}} - h^3 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{dp}{dx} + h(u_2 - u_1) \left( 1 - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) + u_1 h \quad (4.20)$$

$$\int_0^h w dy = - \left( \frac{h^3}{\mu_{e2}} - h^3 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{dp}{dz} \quad (4.21)$$

แทนค่าสมการ (4.20), (4.21) และ (4.19) ลงในสมการ (4.18) จะได้สมการเรย์โนลด์สำหรับของไหลแบบนอนนิวโตเนียนคือ [3], [4]

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

สำหรับปัญหาแบบลูกกลิ้งและแผ่นเลื่อน เนื่องจากความยาวของลูกกลิ้งจะยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างของการสัมผัส ดังนั้นการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกนของแกน  $z$  จะมีการไหลน้อยกว่าในแนวแกน  $x$  สมการ (4.21) จึงลดรูปเป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho h^3 \left( \frac{1}{\mu_{e2}} - \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}^2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \left( \frac{u_2 + u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x}(\rho h) + \\ \left( \frac{u_2 - u_1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho h \left( 1 - 2 \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) \end{aligned} \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4.23) สามารถทำให้เป็นสมการแบบไร้มิติได้โดยแทนค่าดังต่อไปนี้ [1]

$$\begin{aligned}
 x &= bX & p &= p_H P & \rho &= \rho_o \bar{\rho} & h &= \frac{8RW}{\pi} H \\
 \mu_{e0} &= \eta_o \bar{\mu}_{e0} & \mu_{e1} &= \eta_o \bar{\mu}_{e1} & \mu_{e2} &= \eta_o \bar{\mu}_{e2} & t &= \frac{R}{\bar{u}} t^* \\
 b &= R \left( \frac{8W}{\pi} \right)^{0.5} & t &= T_0 T & y &= hY & y &= \frac{8RW}{\pi} HY \\
 \bar{u} &= \frac{u_1 + u_2}{2} & S &= \frac{u_2 - u_1}{\bar{u}} & \bar{u} &= \frac{UER}{\eta_o} & w &= ERW \\
 p_H &= \frac{2w}{\pi b} & p_H &= E \left( \frac{W}{2\pi} \right)^{0.5}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้สมการเรย์โนลด์แบบไร้มิติดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( \varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \right) = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + \frac{KS}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[ \bar{\rho} H \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho} H) \quad (4.24)$$

เมื่อ

$$\varepsilon = \bar{\rho} H \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right) \quad \text{และ} \quad K = \frac{U\pi^2}{16W^2}$$

#### 4.5 สมการความหนาฟิล์ม

จากสมการเรย์โนลด์ (4.24) เราจะเห็นว่ามีส่วนแปรอยู่หลายตัวที่ยังไม่ทราบค่า ดังนั้นในการจำลองจะแทนค่าตัวแปรเหล่านี้ด้วยสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ถึงแรงดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น ซึ่งการหล่อลื่นแบบฮิสโตไฮโดรไดนามิกส์จะมีค่าความดันที่สูงมาก ดังนั้นความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นก็จะบางมากและจากสาเหตุที่ความดันสูงมาก จะส่งผลให้ผิวสัมผัสของโรลเลอร์และแผ่นเพลทเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไป Okamura [5] ได้แนะนำเทอมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโรลเลอร์และเพลทเพื่อให้เกิดความสมดุลของการไหล และเนื่องจากผิวสัมผัสก็จะมีควมหนาขยบรวมอยู่ด้วย ดังนั้นสมการความหนาฟิล์มก็จะรวมผลจากความหนาขยบด้วย [6], [7] ดังแสดงต่อไปนี้

$$h_i = h_{oo} + \frac{x^2}{2R} + d(x,t) - \frac{2}{\pi E} \int_{-\infty}^{x_p} p(\xi) \ln(x - \xi)^2 d\xi \quad (4.25)$$

เมื่อ

$$h_{oo} = h_o + const. \quad (4.26)$$

$$d(x,t) = d(s_1) + d(s_2) \quad (4.27)$$

$$s_1 = x - x_{r1} - u_1 t \quad (4.28)$$

$$s_2 = x - x_{r2} - u_2 t \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำสมการ (4.25) ให้เป็นแบบไร้มิติได้ดังนี้

$$H_i = H_o + \frac{X_i^2}{2} + D(X, t^*) - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{i=1}^N P_j \ln \left\{ \left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \left| \frac{X_i + X_{i-1}}{2} - X_j \right| \right\} \quad (4.30)$$

เมื่อ

$$D(X, t^*) = D(S_1) + D(S_2) \quad (4.31)$$

$$S_1 = X_i - X_{r1} - \frac{u_1}{u} t^* \quad (4.32)$$

$$S_2 = X_i - X_{r2} - \frac{u_2}{u} t^* \quad (4.33)$$

#### 4.6 สมการความหนาแน่น

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นคือมวลต่อหน่วยปริมาตรของของไหล สำหรับสารหล่อลื่นเมื่อความดันที่กระทำต่อสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลง ก็จะส่งผลให้สารหล่อลื่นมีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไป ในสมการจะรวมถึงผลจากอุณหภูมิที่กระทำต่อสารหล่อลื่น [8]

$$\rho_i = \rho_o \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_i} \right) [1 - \beta(T - T_o)] \quad (4.34)$$

ทำสมการ (4.31) ให้เป็นแบบไร้มิติ ได้ดังนี้

$$\bar{\rho}_i = \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_i} \right) [1 - \beta T_o (T^* - 1)] \quad (4.35)$$

#### 4.7 สมการความหนืด

เนื่องจากความหนืดเป็นคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อความดันมีการเปลี่ยนแปลง จากการทดลองจะเห็นว่าสารต่างชนิดกันก็จะมีค่าความหนืดที่แตกต่างกันไปและเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นลดลง ดังนั้นในโมเดลของความหนืดจะใช้สมการของเพาเวอร์ลอว์กำหนดคุณลักษณะของสารหล่อลื่นและจะรวมอิทธิพลจากความดันและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่อสารหล่อลื่น ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_i = m_o \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|_i^{n-1} \exp \left\{ \left[ \ln \eta_o + 9.61 \left[ -1 + \left( 1 + 5.1 \times 10^{-9} p_i \right)^2 \right] \right] [-\gamma(T - T_o)] \right\} \quad (4.36)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left( \frac{y}{\eta_i} - \frac{h}{\eta_i} \frac{\mu_{e0}}{\mu_{e1}} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_2 - u_1}{h} \frac{\mu_{e0}}{\eta_i} \quad (4.37)$$

$$\frac{1}{\mu_{e,i}} = \frac{1}{h^{i+1}} \int_0^y \frac{y^i}{\eta_i} dy \quad ; i = 0, 1, 2 \quad (4.38)$$

ทำสมการ (4.36) ให้เป็นแบบไร้มิติโดย

$$\bar{\eta}_i = \frac{m_o}{\eta_o} \left( \frac{\bar{u} \pi}{8RWH} \right) \left( \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)_i^{n-1} \exp \{ \ln \eta_o + 9.61 [ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_i)^{\frac{1}{2}} ] [ -\gamma T_o (T^* - 1) ] \} \quad (4.39)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial u^*}{\partial Y} = \frac{16}{U} \left( \frac{WH}{\pi} \right)^2 \left[ \frac{Y}{\eta_i} - \frac{1}{\eta_i} \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}} \right] \frac{dP}{dX} + S \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\eta_i} \quad (4.40)$$

$$\frac{1}{\bar{\mu}_{e,i}} = \int_0^1 \frac{Y^i}{\eta_i} dY \quad ; i = 0, 1, 2 \quad (4.41)$$

#### 4.8 สมการไหลดบาดานซ์

เนื่องจากค่าแรงดันที่คำนวณได้จากสมการเรย์โนลด์ จะต้องตรวจสอบด้วยการเทียบกับภาวะที่กระทำ ดังสมการต่อไปนี้ [1]

$$w = \int_{x_{in}}^{x_{out}} p_i dx \quad (4.42)$$

ทำให้เป็นแบบไร้มิติโดย

$$\int_{x_{in}}^{x_{out}} P dX = \frac{\pi}{2} \quad (4.43)$$

#### 4.9 สมการพลังงาน

พลังงานที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อพฤติกรรมของสารหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์อย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่มีความดันมีค่าสูงมากจะส่งผลให้อุณหภูมิของสารหล่อลื่นมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าความหนืดและความหนืดของสารหล่อลื่นลดลง เพราะฉะนั้นในการศึกษาพฤติกรรมของสารหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์จึงควรพิจารณาถึงผลของพลังงานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณจะมีข้อสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. การสัมผัสเป็นแบบเส้นดังนั้นการรบกวนข้างพิจารณาว่าน้อยมาก
2. ขนาดของฟิล์มบางมากเมื่อเทียบกับรัศมีสมดุค ค่าแรงดันไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกนความหนาฟิล์ม
3. การไหลของของไหลและการไหลของความร้อนอยู่ในสภาวะสถิตที่ส่วนของของไหล
4. สภาวะที่ทางเข้าให้ความดันเท่ากับบรรยากาศและอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อมซึ่งความดันเป็นศูนย์
5. ให้ที่ทางออกของของไหลเป็นแบบอะเดียแบติก
6. อุณหภูมิที่ผิวของแข็งที่เกิดขึ้นจะคำนวณได้จากการเคลื่อนที่ของผิวของแข็งที่สัมผัสกับของไหล

โดยในเทอมของสมการพลังงานจะประกอบด้วย เทอมการพาความร้อน การนำความร้อน และเทอมที่ความร้อนเกิดขึ้นจากการสัมผัส [9]

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho c_p u \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) + u \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) - \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (4.44)$$

ทำสมการ (4.44) ให้เป็นแบบไร้มิติ ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^2} = -N_{UD} \eta \left( \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 - N_{AC} T^* H^2 \left[ u^* \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial P}{\partial t^*} \right] + N_{CU} \rho H^2 \left[ u^* \frac{\partial T^*}{\partial X} + \frac{\partial T^*}{\partial t^*} \right] \quad (4.45)$$

เมื่อ 
$$N_{UD} = \frac{(ERU)^2}{T_o \eta_o k_f}$$

$$N_{AC} = \frac{\beta (ER)^2 U \left( \frac{8W}{\pi} \right)^2}{4 \eta_o k_f}$$

$$N_{CU} = \frac{c_p \rho_o ER^2 U \left( \frac{8W}{\pi} \right)^{3/2}}{\eta_o k_f}$$

จากสมการพลังงาน (4.45) ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับความดันที่เกิดขึ้นและค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของสารหล่อลื่น ดังนั้นในการคำนวณเพื่อหาอุณหภูมิจะต้องใช้เวลาและความจำที่คอมพิวเตอร์ต้องใ้้มาก ซึ่งหากพิจารณาให้สมการพลังงานมีการกระจายแบบพาราโบลา ซึ่งจะทำให้การคำนวณใช้เวลาที่น้อยลง สามารถที่จะเขียนสมการพลังงานได้ดังต่อไปนี้ [10]

$$T(x, y) = ay^2 + by + c \quad (4.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบคือ

$$y = 0 \quad ; \quad T = T_{S1}$$

$$y = h \quad ; \quad T = T_{S2}$$

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

จากเงื่อนไขขอบเราสามารถหาค่าคงที่จากสมการ (4.46) ได้ดังต่อไปนี้

$$T(x, y) = (3T_{S2} - 6T_m + 3T_{S1}) \left(\frac{y}{h}\right)^2 + (6T_m - 4T_{S1} - 2T_{S2}) \left(\frac{y}{h}\right) + T_{S1} \quad (4.47)$$

ทำสมการ (4.47) ให้เป็นแบบไร้มิติได้ดังนี้

$$T^*(X, Y) = (3T_{S2}^* - 6T_m^* + 3T_{S1}^*) Y^2 + (6T_m^* - 4T_{S1}^* - 2T_{S2}^*) Y + T_{S1}^* \quad (4.48)$$

แทนค่าสมการ (4.48) ลงในสมการ (4.45) และจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$F_{T,i} = \frac{(T_{S2}^* + T_{S1}^*)}{2} + \frac{N_{UD}}{12} \int_0^1 \bar{\eta} \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y}\right)^2 dY + \frac{N_{AC}}{12} H^2 T_{m,i}^* \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{(P_{i+1} - P_i)}{\Delta X} + \frac{(P_i - P_{i,0})}{\Delta t^*} \right] - \frac{N_{CV}}{12 \rho H^2} \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{(T_{m,i}^* - T_{m,i-1}^*)}{\Delta X} + \frac{(T_{m,i}^* - T_{m,i,0}^*)}{\Delta t^*} \right] - T_{m,i}^* \quad (4.49)$$

สมการสำหรับคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้านแสดงดังต่อไปนี้

$$T_{S1}(x, 0) = T_0 + \frac{k_f}{\sqrt{\pi \rho_1 c_1 k_1 u_1}} \int_{x_m}^x \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{z=0} \frac{dx'}{\sqrt{x-x'}} \quad (4.50)$$

$$T_{S2}(x, h) = T_0 + \frac{k_f}{\sqrt{\pi \rho_2 c_2 k_2 u_2}} \int_{x_m}^x \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{z=h} \frac{dx'}{\sqrt{x-x'}} \quad (4.51)$$

ทำสมการอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของทั้งสองด้านให้เป็นแบบไร้มิติได้ดังต่อไปนี้

$$T_{S1}^*(X, 0) = 1 + D_1 \int_{x_m}^X \frac{1}{H} \left( \frac{\partial T^*}{\partial Y} \right)_{Y=0} \frac{dX'}{\sqrt{X-X'}} \quad (4.52)$$

$$T_{S2}^*(X, 1) = 1 - D_2 \int_{x_m}^X \frac{1}{H} \left( \frac{\partial T^*}{\partial Y} \right)_{Y=1} \frac{dX'}{\sqrt{X-X'}} \quad (4.53)$$

โดยที่

$$D_{1/2} = \frac{k_f (\eta_o)^{1/2}}{\sqrt{\pi \rho_{1/2} c_{1/2} k_{1/2}} [EU(1 \mp S/2)] R} \left( \frac{\pi}{8W} \right)^{3/4} \quad (4.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเราสามารถที่จะหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยได้ดังต่อไปนี้

$$T_m^* = \int_0^1 T^* dY \quad (4.55)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

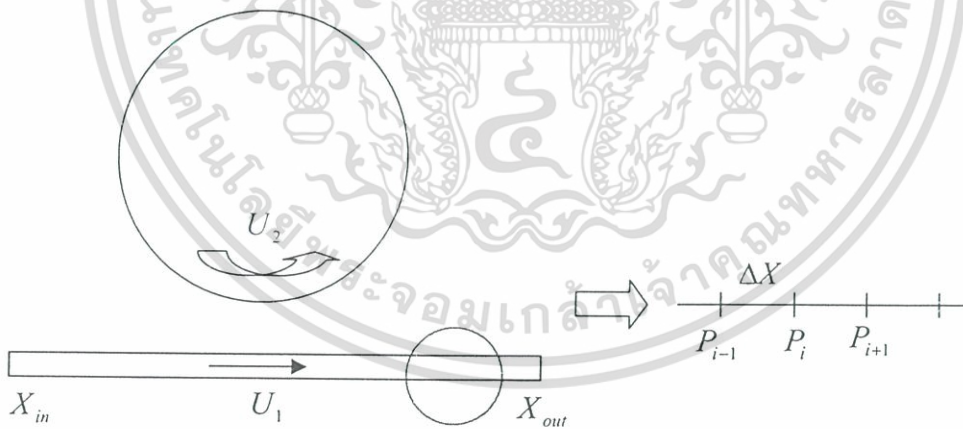
### วิธีเชิงตัวเลข

สมการที่ได้อธิบายในบทที่ 4 ส่วนใหญ่จะเป็นสมการแบบเชิงอนุพันธ์และมีความเป็นแบบไม่เชิงเส้นสูง ดังนั้นในการที่จะแก้ปัญหาจึงเป็นการยากมากที่จะหาค่าแบบเชิงตรง จึงจะทำการจำลองโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วย เพื่อให้การแก้สมการทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โดยจะพิจารณาวิธีการดังต่อไปนี้

1. วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม
2. วิธีนิวตันราฟสัน
3. วิธีมัลติเพล็กซ์-มัลติกริด

#### 5.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

จากสมการเรย์โนลด์ส์ในบทที่ 4 จะเห็นรูปแบบของสมการจะเป็นสมการเอลลิปติกที่อยู่ในรูปของสมการลาปลาซ ดังแสดงในสมการ (5.1) โดยจะทำการกระจายสมการให้มีเทอมของสมการอนุพันธ์ให้เป็นแบบผลต่างแบบตรงกลางดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการพิจารณาจุดสัมผัสที่เป็นผลต่างแบบตรงกลางบนแผ่นเพลท

จากสมการเรย์โนลด์ส์แบบไร้มิติสามารถทำการกระจายเทอมให้อยู่ในรูปของผลต่างแบบตรงกลางได้ดังนี้ [11]

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( \varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \right) = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + \frac{KS}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[ \bar{\rho} H \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_e} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} H) \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแทนค่าอนุพันธ์โดยการใส่การประมาณแบบผลต่างแบบตรงกลาง (Central differences) เนื่องจากเราทราบเงื่อนไขขอบที่ทางเข้าและทางออกของการสัมผัส ซึ่งจะได้สมการเรย์โนลด์ดังนี้

$$F_i = \left( \frac{\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i}{2} \right) \left( \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i}{2} \right) \left( \frac{P_i - P_{i-1}}{\Delta X} \right) - K(\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1}) - \frac{KS}{2} \left\{ \left[ \bar{\rho}_i H_i \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \right] - \left[ \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i-1}}{\bar{\mu}_{e1,i-1}} \right) \right] \right\} - \frac{K\Delta X}{\Delta t^*} [\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1}] \quad (5.2)$$

เมื่อ  $\varepsilon = \bar{\rho}H \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{e2}} - \frac{\bar{\mu}_{e0}}{\bar{\mu}_{e1}^2} \right)$  และ  $K = \frac{U\pi^2}{16W^2}$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้

1.  $X = X_{inlet}$  ;  $P = 0$
2.  $X = X_{exit}$  ;  $P = \frac{dP}{dX} = 0$

สำหรับสมการพลังงานก็จะแทนค่าแบบผลต่างแบบถอยหลัง (Backward differences) เนื่องจากเงื่อนไขขอบที่ทราบคือ อุณหภูมิที่ทางเข้า ซึ่งจะกำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และในการแทนค่าเริ่มต้น

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^2} = -N_{UD}\eta \left( \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 - N_{AC} T^* H^2 \left[ u^* \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial P}{\partial t^*} \right] + N_{CU} \bar{\rho} H^2 \left[ u^* \frac{\partial T}{\partial X} + \frac{\partial T}{\partial t^*} \right] \quad (5.3)$$

เมื่อ  $N_{UD} = \frac{(ERU)^2}{T_o \eta_o k_f}$

$$N_{AC} = \frac{\beta(ER)^2 U \left( \frac{8W}{\pi} \right)^2}{4\eta_o k_f}$$

$$N_{CU} = \frac{c_p \rho_o ER^2 U \left( \frac{8W}{\pi} \right)^{3/2}}{\eta_o k_f}$$

เมื่อแทนสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยผลต่างแบบถอยหลัง และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$F_{T,i} = \frac{(T_{S2}^* + T_{S1}^*)}{2} + \frac{N_{UD}}{12} \int_0^1 \eta \left( \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY + \frac{N_{AC}}{12} H^2 T_{m,i}^* \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{(P_{i+1} - P_i)}{\Delta X} + \frac{(P_i - P_{i,o})}{\Delta t^*} \right] - \frac{N_{CU}}{12} \bar{\rho} H^2 \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{(T_{m,i}^* - T_{m,i-1}^*)}{\Delta X} + \frac{(T_{m,i}^* - T_{m,i,0}^*)}{\Delta t^*} \right] - T_{m,i}^* \quad (5.4)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 วิธีนิวตันราฟสัน

ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton – Raphson method) เป็นวิธีที่มีรากฐานมาจากอนุกรมเทย์เลอร์ โดยอนุกรมเทย์เลอร์เป็นอนุกรมที่ใช้ในการหาค่าฟังก์ชันที่ตำแหน่ง  $x$  จากค่าของฟังก์ชันและค่าอนุพันธ์ (derivatives) ที่มีอันดับต่างๆ กันของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง  $x_0$  ซึ่งจะหาได้ดังนี้ [12]

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) \quad (5.5)$$

ดังนั้นสมการ (5.5) จึงเปรียบเสมือนสมการเส้นตรงและจะให้ค่าที่ถูกต้องเสมอหากฟังก์ชันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตรง ในทำนองเดียวกันหากฟังก์ชันที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันสมการพหุนามได้ ก็จะต้องถูกรวมเทอมของเทย์เลอร์ถึงพจน์อนันต์ แต่ในวิธีนิวตัน – ราฟสันจะหารากของสมการ  $f(x) = 0$  โดยใช้การประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วยพจน์เพียง 2 พจน์ ดังแสดงในสมการ ต่อไปนี้

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) = 0 \quad (5.6)$$

หรือ

$$x - x_0 = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (5.7)$$

โดยจะทำการคำนวณซ้ำระหว่างค่าเก่ากับค่าใหม่ที่ได้ดังสมการที่ (5.8)

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_{k+1} \quad ; \quad \Delta x_{k+1} = -\frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (5.8)$$

ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยเริ่มจากสมการที่ (5.9) ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้  $\varepsilon = 10^{-3}$

$$\left| \frac{X_{k+1} - X_k}{X_{k+1}} \right| \times 100\% < \varepsilon \quad (5.9)$$

จากสมการเรย์โนลด์จะเห็นว่ามีความเป็นไม่เชิงเส้นสูง ดังนั้นในการแก้สมการจึงควรทำให้มีความเป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตันราฟสันเสียก่อน ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dP_i} &= \frac{1}{\Delta X} \left[ -\left( \frac{\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i}{2} \right) + (P_{i+1} - P_i) \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial P_i} \right] - \frac{1}{\Delta X} \left[ \left( \frac{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i}{2} \right) + (P_i - P_{i-1}) \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial P_i} \right] \\ &\quad - K \frac{\partial}{\partial P_i} (\bar{\rho}_i H_i) - \frac{KS}{2} \frac{\partial}{\partial P_i} \left[ \bar{\rho}_i H_i \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) \right] - \frac{K\Delta X}{\Delta t^*} \frac{\partial}{\partial P_i} (\bar{\rho}_i H_i) \quad (5.10) \\ \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial P_i} &= H_i^3 \left[ \frac{1}{\bar{\mu}_{e2,i}} - \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}^2} \right] \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial P_i} + 3\bar{\rho}_i H_i^2 \left[ \frac{1}{\bar{\mu}_{e2,i}} - \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}^2} \right] \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\rho}_i H_i^3 \frac{\partial}{\partial P_i} \left[ \frac{1}{\bar{\mu}_{c2,i}} - \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}^2} \right] \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial P_i} = \left( \frac{p_H \times 0.6 \times 10^{-9}}{(1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_i)^2} \right) (1 - \beta T_0 (T^* - 1)) \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial H_i}{\partial P_i} = - \left( \frac{\Delta X}{2\pi} \right) \ln \left\{ \left| \frac{X_{i+1} - X_i}{2} - X_i \right| \left| \frac{X_i - X_{i-1}}{2} - X_i \right| \right\} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left[ \frac{1}{\bar{\mu}_{c2,i}} - \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}^2} \right] = \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{c2,i}} \right) - \left[ 2 \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right) - \left( \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right)^2 \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{c0,i}} \right) \right] \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{c0,i}} \right) = \int_0^1 \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\eta}_i} \right) dY \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right) = \int_0^1 Y \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\eta}_i} \right) dY \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{c2,i}} \right) = \int_0^1 Y^2 \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\eta}_i} \right) dY \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\eta}_i} \right) = - \left( \frac{1}{\bar{\eta}_i^2} \right) \frac{\partial \bar{\eta}_i}{\partial P_i} \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial \bar{\eta}_i}{\partial P_i} = \frac{m_0}{\eta_0} \left\{ (n-1) \left| \frac{\bar{u}\pi}{8RWH_i} \right|^{n-2} \left( \frac{\bar{u}\pi}{8RWH_i^2} \right) \frac{\partial H_i}{\partial P_i} \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{n-1} \left| A_i + \frac{\bar{u}\pi}{8RWH_i} \right|^{n-1} \right. \\ \left. (n-1) \left| \frac{\bar{u}\pi}{8RWH_i} \right|^{(n-1)} \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{n-2} \left| \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right) \right| \left| A_i \right| + \left| \frac{\bar{u}\pi}{8RWH_i} \right|^{(n-1)} \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{(n-1)} \frac{\partial A_i}{\partial P_i} \right\} \quad (5.19)$$

$$A_i = \exp \left\{ \ln \eta_0 + 9.67 \right\} \left[ -1 + \left( 1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_i \right)^Z \right] \left[ -\gamma T_0 (T^* - 1) \right] \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial P_i} = \exp \left\{ \left( \ln \eta_0 + 9.67 \right) \left[ -1 + \left( 1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_i \right)^Z \right] \left( -\gamma T_0 (T^* - 1) \right) \right\} \left( \ln \eta_0 + 9.67 \right) \left( Z \right) \left( 1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_i \right)^{Z-1} \left( 5.1 \times 10^{-9} p_H \right) \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{\partial U}{\partial Y} \right)_i = \frac{16}{U} \left( \frac{WH_i}{\pi} \right)^2 \left[ \frac{Y}{\bar{\eta}_i} - \frac{1}{\bar{\eta}_i} \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right] \frac{1}{\Delta X} \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} (\bar{\rho}_i H_i) = \bar{\rho}_i \left( \frac{\partial H_i}{\partial P_i} \right) + \left( \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial P_i} \right) H_i \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left[ \bar{\rho}_i H_i \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right) \right] = \bar{\rho}_i \left( \frac{\partial H_i}{\partial P_i} \right) \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right) + \left( \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial P_i} \right) H_i \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right) \\ + \bar{\rho}_i H_i \frac{\partial}{\partial P_i} \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{c0,i}}{\bar{\mu}_{c1,i}} \right) \quad (5.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial P_i} \left( 1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e0,i}}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) = - (2 \bar{\mu}_{e0,i}) \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right) + 2 \frac{(\bar{\mu}_{e0,i})^2}{\bar{\mu}_{e1,i}} \left( \frac{\partial}{\partial P_i} \left( \frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right) \right) \quad (5.25)$$

ขณะเดียวกันสมการพลังงานที่ (5.4) เราจะสามารถที่จะทำการหาอนุพันธ์สมการให้มีความเป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dF_{T,i}^*}{dT_{m,i}^*} &= \frac{N_{UD}}{12} \int_0^1 \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial T_{m,i}^*} \left( \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right)^2 dY + \frac{N_{AC}}{12} H^2 \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{(P_{i+1} - P_i)}{\Delta X} + \frac{(P_i - P_{i,o})}{\Delta t} \right] - \\ &\frac{N_{CU}}{12} H^2 \left\{ \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{1}{\Delta X} + \frac{1}{\Delta t} \right] \bar{\rho}_i + \left[ \int_0^1 u^* dY \frac{(T_{m,i}^* - T_{m,i-1}^*)}{\Delta X} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{(T_{m,i}^* - T_{m,i0}^*)}{\Delta t} \right] \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial T_{m,i}^*} \right\} - 1 \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\eta}_i}{\partial T_{m,i}^*} &= \frac{m_0}{\eta_0} \left\{ \left| \frac{\bar{u} \pi}{8RWH_i} \right|^{n-1} \left\{ (n-1) \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{n-2} \frac{\partial}{\partial T_{m,i}^*} \left( \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right| \right) \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[-1 + (1 + \right. \right. \\ &5.1 \times 10^{-9} p_H P_i)^2 (-\gamma T_0 (T^* - 1))\} + \left| \frac{\partial u^*}{\partial Y} \right|^{n-1} \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[-1 + (1 + \right. \\ &5.1 \times 10^{-9} p_H P_i)^2 (-\gamma T_0 (T^* - 1))\} (-\gamma T_0) \left. \left. \right\} \right\} \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial T_{m,i}^*} = \left[ 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_i} \right] (-\beta T_0) \quad (5.28)$$

จากสมการเรย์โนลด์ (5.10) และสมการพลังงาน (5.26) เราสามารถจัดรูปโดยใช้วิธีนิวตันราฟสันได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_i}{\partial P_i} & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_{T,i}}{\partial T_{m,i}^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta T_{m,i}^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_i \\ F_{T,i} \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

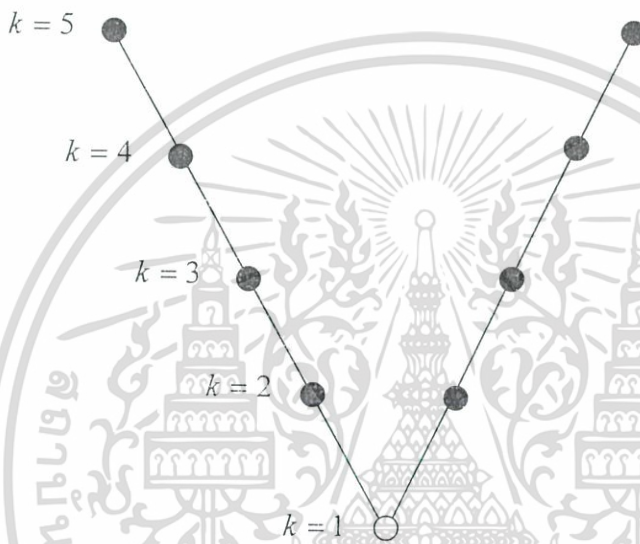
### 5.3 วิธีมัลติกริด – มัลติเลเวล

วิธีมัลติกริด – มัลติเลเวล [13] เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี 1970 โดยบรานซ์ วิธีนี้เหมาะกับสมการเชิงอนุพันธ์แบบเอลลิปติกเพื่อช่วยให้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยลง ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการคำนวณที่เมทริกซ์มีขนาดใหญ่มากๆ จะมีผลกับจำนวนพื้นที่ของความจำของคอมพิวเตอร์ที่จะใช้ลดลงและในการคำนวณจะลู่เข้าสู่คำตอบที่เร็วขึ้น จากการคำนวณจะให้กริดของการสัมผัสเป็น 256 กริด จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่ามีการแบ่งกริดแบบตัววี จะมีระดับของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นในการคำนวณทั้งหมด 5 ชั้น และจำนวนกริดที่ระดับสูงสุดคือ 256 กริดและจะลดลงมาเรื่อยๆ จนเหลือ 8 กริด ซึ่งสัญลักษณ์จะมีดังต่อไปนี้

- แทน การทำ Smoothing
- แทน การทำ Smoothing จนกระทั่งได้คำตอบที่ถูกต้อง (Exact solution)
- \\ แทน การทำ Restriction:  $I_k^{k-1}$
- / แทน การทำ Prolongation:  $I_{k-1}^k$



รูปที่ 5.2 แสดงการแบ่งกริดแบบ V-Cycle

### 5.3.1 การประมาณแบบเต็ม (Full Multigrid Algorithm; FMG)

หัวใจหลักของวิธีมัลติกริดที่สามารถที่จะทำความเข้าใจได้ไม่ยาก โดยจะขอยกตัวอย่างเป็นแบบ  $N$  กริด สมมุติว่าเราต้องการที่จะทำการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

$$NP = F \quad (5.30)$$

เมื่อ  $N$  คือการกระทำแบบไม่เชิงเส้น จากสมการที่ (5.34) เราสามารถนำมาเขียนในรูปของสมการที่แทนไฟไนซ์ดิฟเฟอเรนซ์แล้วกระจายในรูปของกริดจะได้ดังนี้

$$N_k P_k = F_k \quad (5.31)$$

ทำการแก้สมการโดยวิธีนิวตันราฟสันจะได้คำตอบโดยประมาณ  $\tilde{P}_k$  และทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นถ้าเรากำหนดให้  $P_k$  เป็นคำตอบที่ถูกต้อง โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำการคำนวณหาค่าผิดพลาด (Error) ได้ดังนี้

$$v_k = P_k - \tilde{P}_k \quad (5.32)$$

2. ทำการคำนวณหาค่าเศษตกค้าง (Defect) ได้ดังนี้

$$d_k^m = F_k - N_k P_k^m \quad (5.33)$$

ซึ่งบางครั้งค่าเศษตกค้างอาจหาได้จาก

$$d_k = N_k v_k \quad (5.34)$$

3. ทำการลดจำนวนกริดของค่าเศษตกค้างลงเหลือครึ่งหนึ่งของครึ่งแรก (Restrict) จะได้

$$d_{k-1}^m = I_k^{k-1} d_k^m \quad (5.35)$$

สำหรับค่า  $I_k^{k-1}$  สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{k,1} = \frac{1}{2} P_{K,1}$$

$$P_{k,i} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{P_{k,i-1} + P_{k,i+1}}{2} \right) & i = 3, 5, \dots, n-2 \\ P_{k,i} & i = 2, 4, \dots, n-1 \end{cases} \quad (5.36)$$

$$P_{k,n_h} = \frac{1}{2} P_{K,n_H}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} P_{k,1} \\ P_{k,2} \\ P_{k,3} \\ P_{k,4} \\ P_{k,5} \\ P_{k,6} \\ P_{k,7} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{K,1} \\ P_{K,2} \\ P_{K,3} \end{Bmatrix} \quad (5.37)$$

$$I_k^{k-1} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

4. ทำการลดจำนวนกริดของค่าคำตอบที่ได้ลงเหลือครึ่งหนึ่งของครึ่งแรก จะได้

$$P_{k-1}^m = I_k^{k-1} P_k^m \quad (5.39)$$

5. ทำการคำนวณค่าด้านขวามือของสมการที่ (5.35) ใหม่ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ปรากฏในหน้าปก กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{k-1} = d_{k-1}^m + N_{k-1}P_{k-1}^m \quad (5.40)$$

6. ทำการนำค่าเศษตกค้างที่ได้ไปคำนวณด้วยวิธีนิวตันกราฟสันใหม่อีกครั้งจะได้

$$N_{k-1}w_{k-1}^m = F_{k-1} \quad (5.41)$$

สำหรับการคำนวณหาค่า  $w_{k-1}^m$  หากเป็นที่ระดับที่ยังไม่ใช่ระดับต่ำสุด ( $k \geq 1$ ) จะทำการทำซ้ำแค่ 1 ครั้ง ซึ่งจะเป็นการหาคำตอบแบบประมาณ แต่หากทำการคำนวณที่ระดับต่ำสุด ( $k = 1$ ) จะทำการคำนวณจนกระทั่งได้ค่าผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จึงจะส่งค่ากลับ

เมื่อเราคำนวณได้คำตอบที่ระดับต่ำสุดแล้วเราก็จะทำการส่งค่ากลับไปทีระดับสูงสุด ได้ดังนี้

1. ทำการคำนวณหาค่าปรับแก้ (Correction) จากการส่งค่าลงมาในแต่ละเลเวลได้ดังนี้

$$v_{k-1}^m = w_{k-1}^m - P_{k-1}^m \quad (5.42)$$

2. ส่งค่าปรับแก้ขึ้นไปทีระดับที่สูงกว่า ได้ดังนี้

$$v_k^m = I_{k-1}^k v_{k-1}^m \quad (5.43)$$

ซึ่งค่า  $I_{k-1}^k$  หรือเรียกว่า ตัวกระทำแบบถ่ายโอนจำกัด โดยจะใช้ตอนที่มีการกระจายค่าคำตอบกลับในระดัที่สูงกว่า ซึ่งอาจเขียนได้ดังนี้

$$I_{k-1}^k = \frac{1}{2} [I_{k-1}^{k-1}]^T \quad (5.44)$$

$$P_{k,i} = 0.25P_{k,2i-1} + 0.5P_{k,2i} + 0.25P_{k,2i+1} \quad (5.45)$$

$$I_{k-1}^k = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

3. คำนวณหาค่าคำตอบที่ได้จากการแก้ไขแล้ว

$$P_k^{m.cor} = P_k^m + v_k^m \quad (5.47)$$

4. ทำการคำนวณหาค่า  $P_k^{m+1}$  โดยใช้ค่า  $P_k^{m.cor}$  เป็นค่าเริ่มต้นในระบบสมการที่ (5.35) และคำนวณตั้งแต่ข้อ 1- 6 และส่งค่ากลับตามข้อ 1-3 จนกว่าค่าคำตอบจะอยู่ในช่วงที่เรากำหนด การคำนวณวิธีเชิงตัวเลขแบบมัลติกริดมีหลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงการแบ่งกริดและจำนวนระดับชั้น

รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างการแบ่งกริดและจำนวนระดับชั้นด้วยวิธี FMG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการจำลอง

ในการจำลองพฤติกรรมของการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ที่มีผลที่เกิดจากผิวหยาบที่โรลเลอร์และเพลท ซึ่งในการจำลองจะจำลองกรณีที่โรลเลอร์หมุนอยู่บนแผ่นเพลทที่มีการเคลื่อนที่ จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 1. โรลเลอร์

ค่ารัศมี (Equivalent radius, m.) : R	0.05
ค่าความหนาแน่น (Density, $kg - m^{-3}$ ): $\rho_0$	8000
ค่าความนำความร้อน (Thermal conductivity, $Wm^{-1}K^{-1}$ ): $K_1$	52
ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat, $J kg^{-1}K^{-1}$ ): $C_{p,1}$	460
โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, Pa.) : $E_1$	$1.6 \times 10^{11}$ , $1.8 \times 10^{11}$ , $2.0 \times 10^{11}$ , $2.0 \times 10^{11}$

#### 2. แผ่นราบเรียบ

ค่าความหนาแน่น (Density, $kg - m^{-3}$ ): $\rho_0$	8000
ค่าความนำความร้อน (Thermal conductivity, $Wm^{-1}K^{-1}$ ): $K_2$	52
ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat, $J kg^{-1}K^{-1}$ ): $C_{p,2}$	460
โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, Pa.) : $E_2$	$1.6 \times 10^{11}$ , $1.8 \times 10^{11}$ , $2.0 \times 10^{11}$ , $2.0 \times 10^{11}$

#### 3. สารหล่อลื่น

- 3.1 SAE 40
- 3.2 SAE 90
- 3.3 Palm+ZDTP 2%
- 3.4 SAE 40+Palm 10%
- 3.5 SAE 40+Palm 20%

ในการจำลองจะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปใน สภาวะสถิตและพลศาสตร์

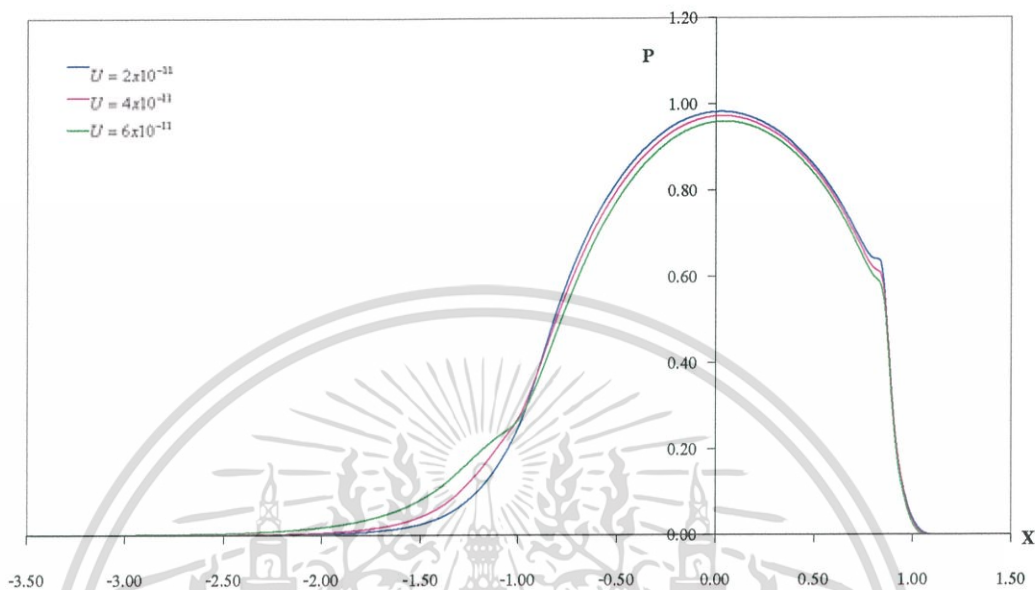
1. ความเร็วในการสัมผัสเปลี่ยนแปลง  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $4 \times 10^{-11}$ ,  $6 \times 10^{-11}$
2. ค่าภาระในการกระทำ  $W = 2 \times 10^{-5}$ ,  $6 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$
3. ความหยาบของผิวสัมผัส โมเดลที่ 1, โมเดลที่ 2, โมเดลที่ 3, โมเดลที่ 4
4. อัตราการการสลิป สไลด์  $S = 0$ , 1.0, 1.5
5. ค่าสารหล่อลื่น (ตารางที่ 3.1) SAE40 , SAE90, Palm+ZDTP2%, SAE40+Palm 10%, SAE40+Palm20%
6. ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ  $E_2 = 1.8 \times 10^{11}$ ,  $2.0 \times 10^{11}$ ,  $2.2 \times 10^{11}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

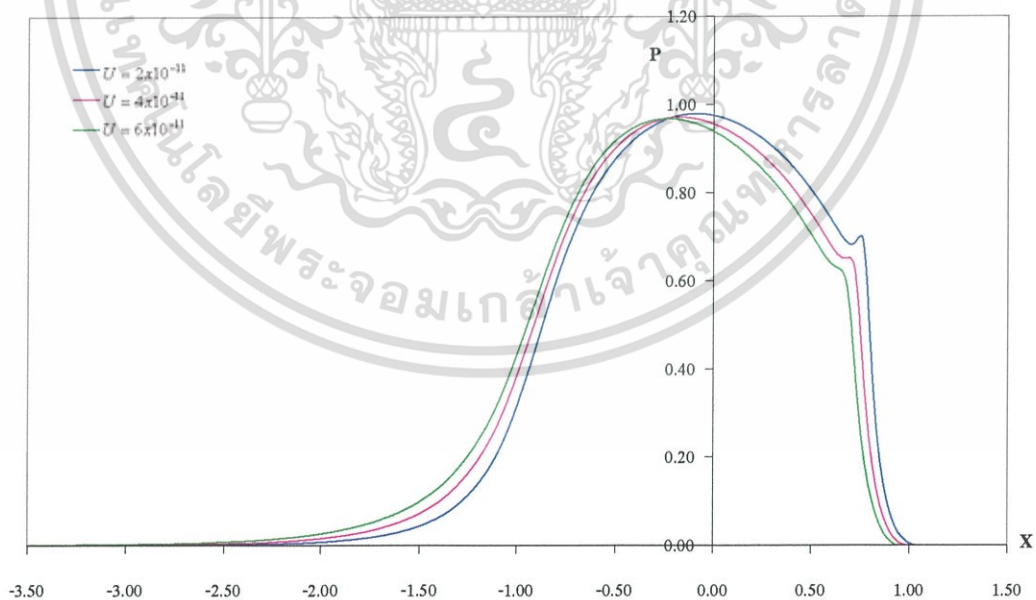
## 6.1 ผลการจำลอง

### 6.1.1 ความเร็วเปลี่ยนแปลง

#### 6.1.1.1 กรณีโรลเลอร์และแผ่นเพลทามีผิวเรียบ

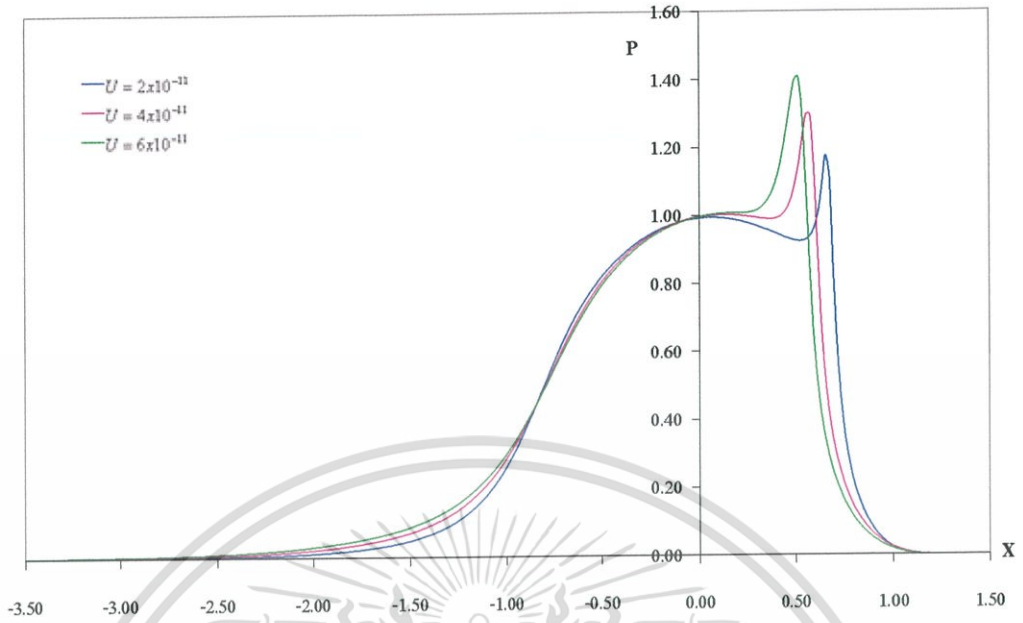


รูปที่ 6.1 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

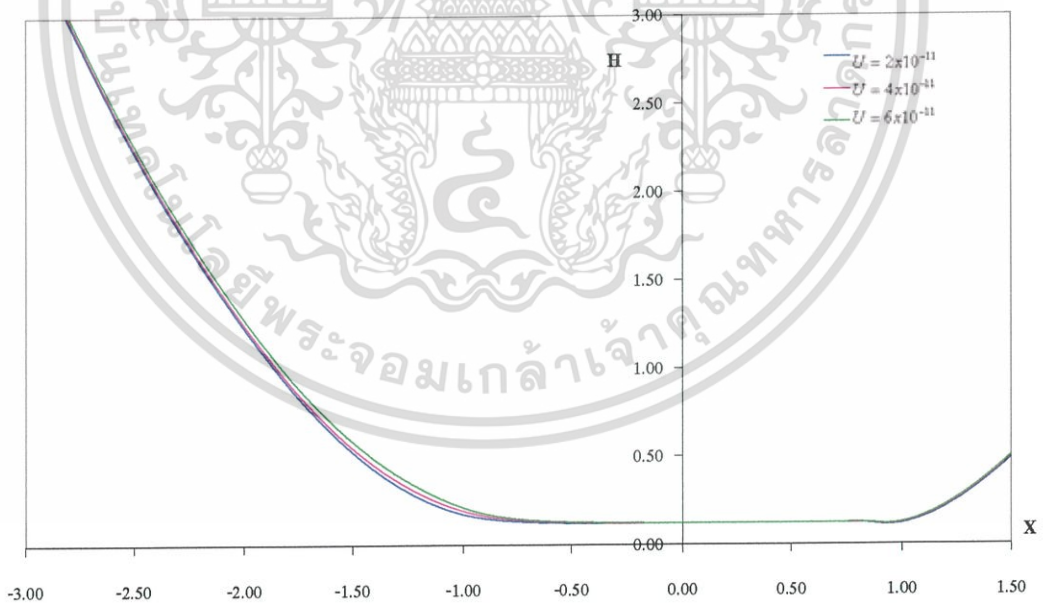


รูปที่ 6.2 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

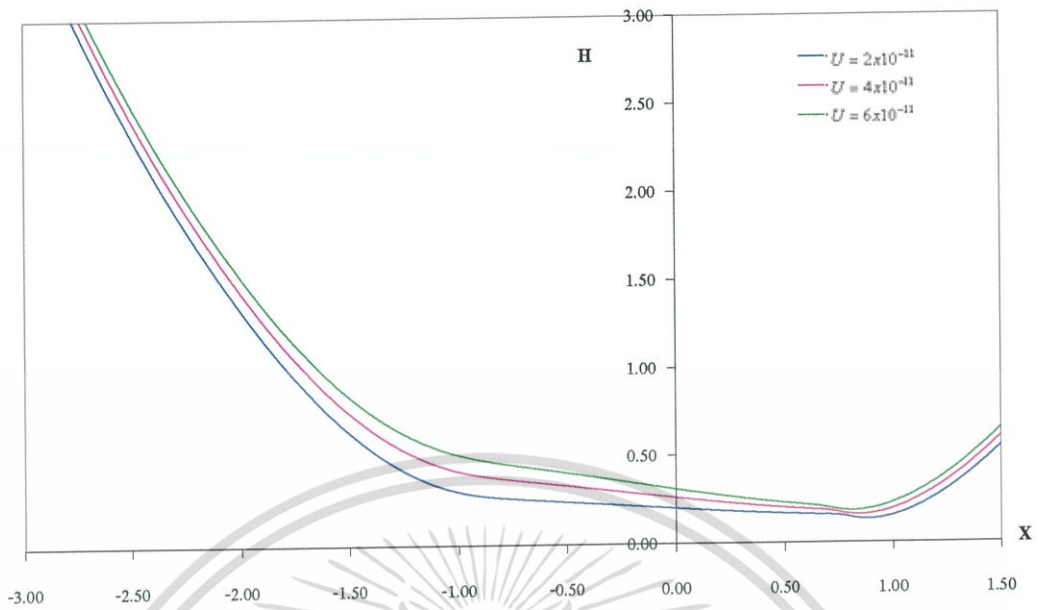


รูปที่ 6.3 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

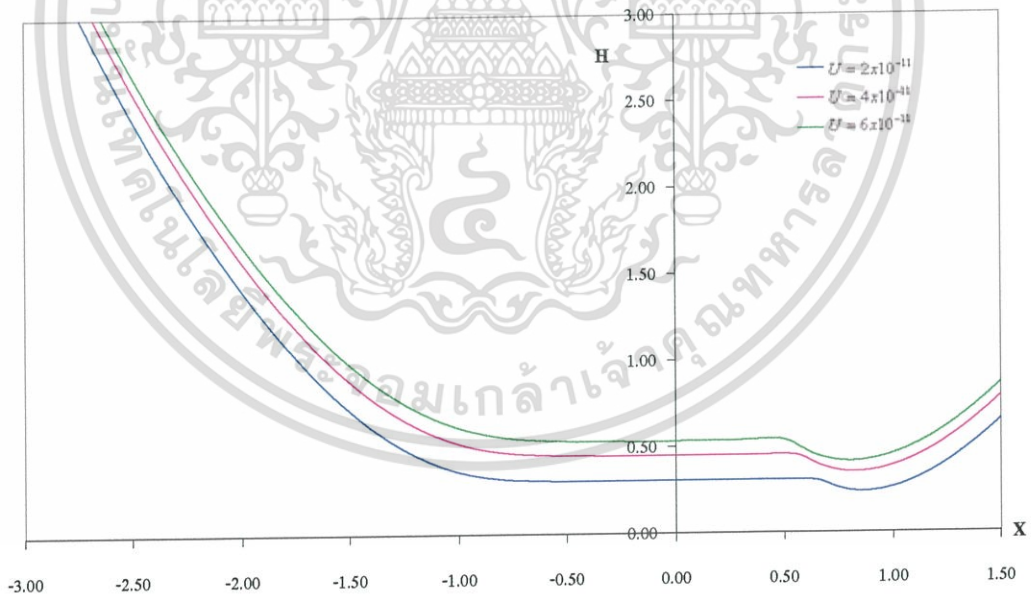


รูปที่ 6.4 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

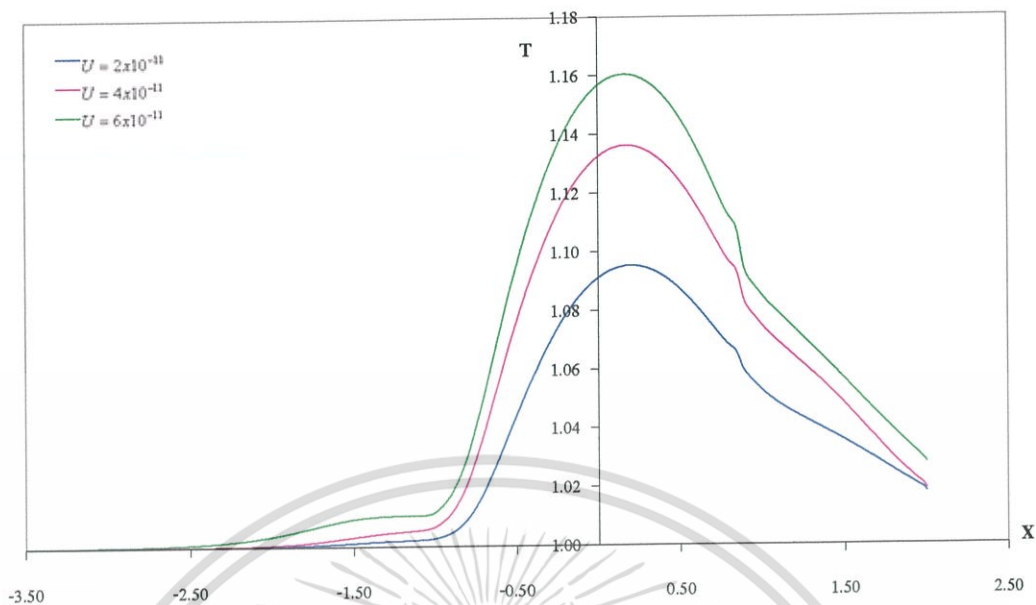


รูปที่ 6.5 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

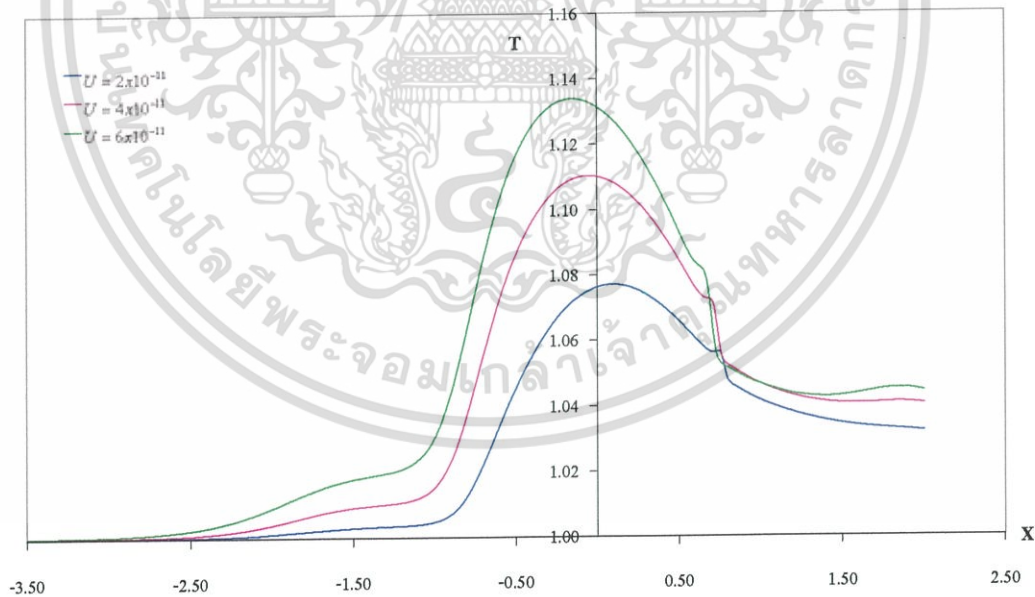


รูปที่ 6.6 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

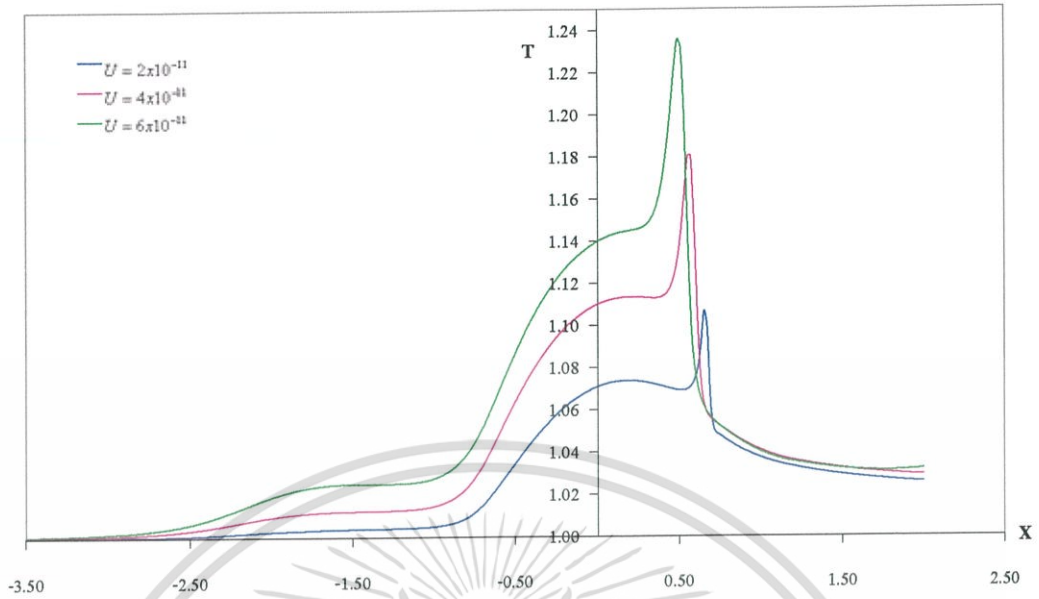


รูปที่ 6.7 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมันด์ที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

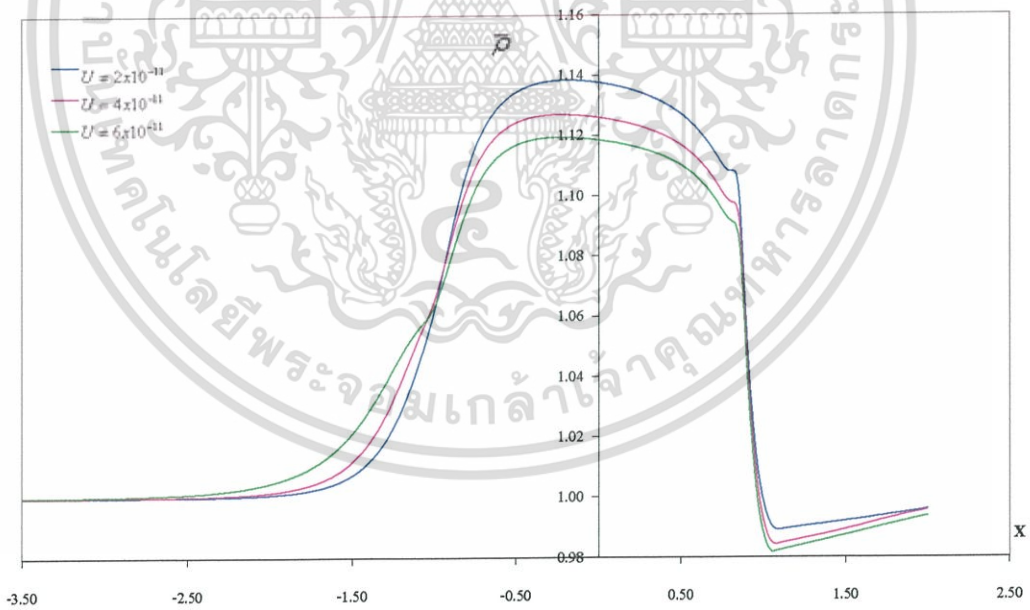


รูปที่ 6.8 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรมันด์ที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

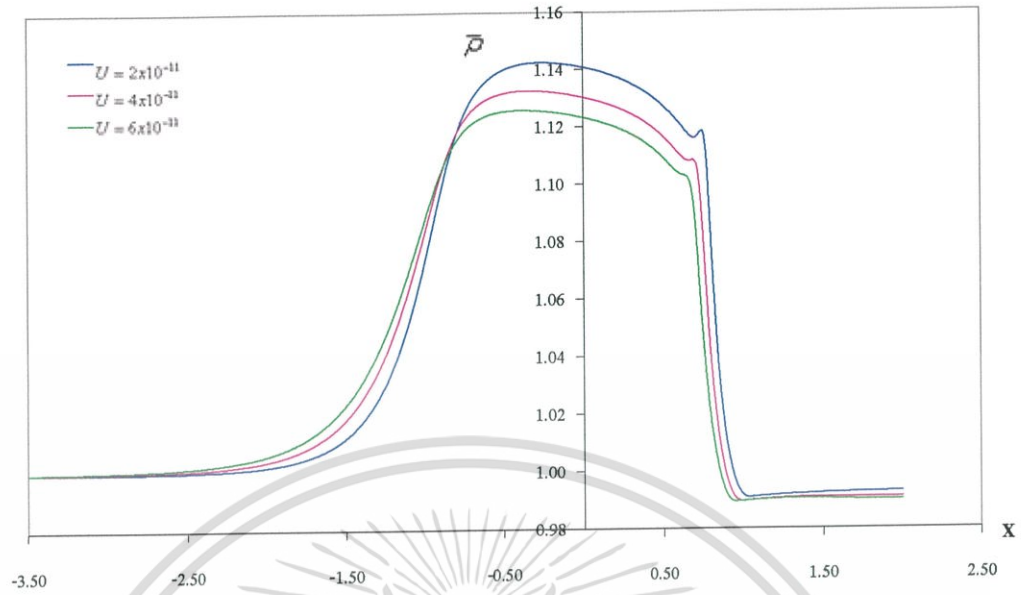


รูปที่ 6.9 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

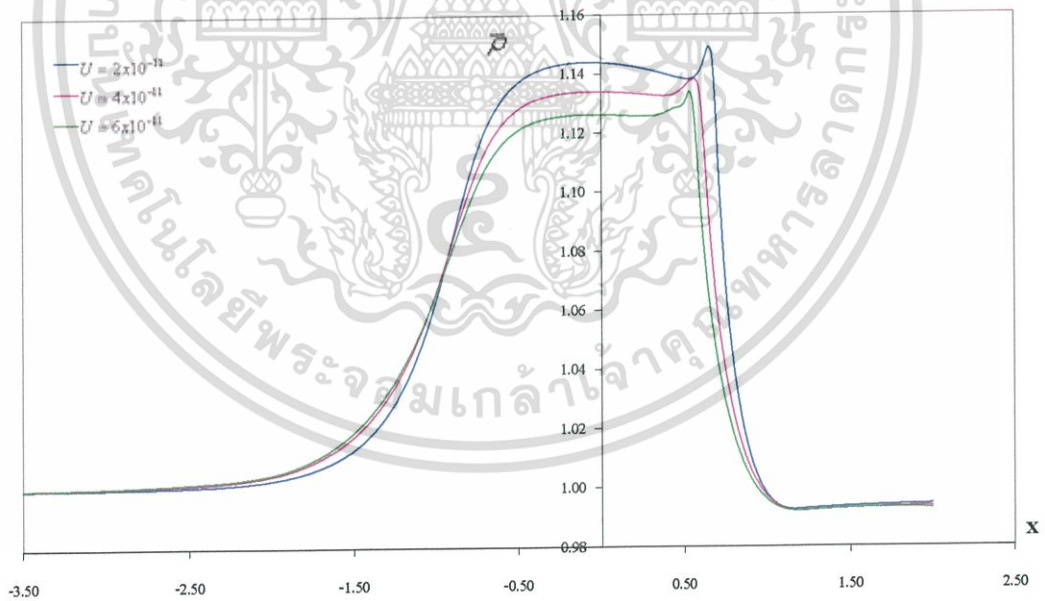


รูปที่ 6.10 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

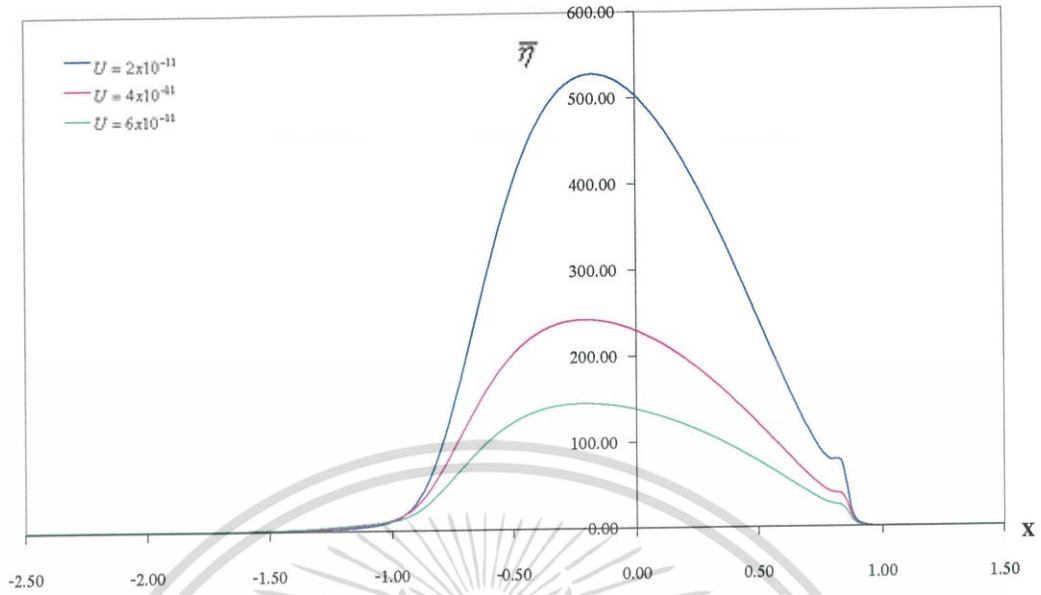


รูปที่ 6.11 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

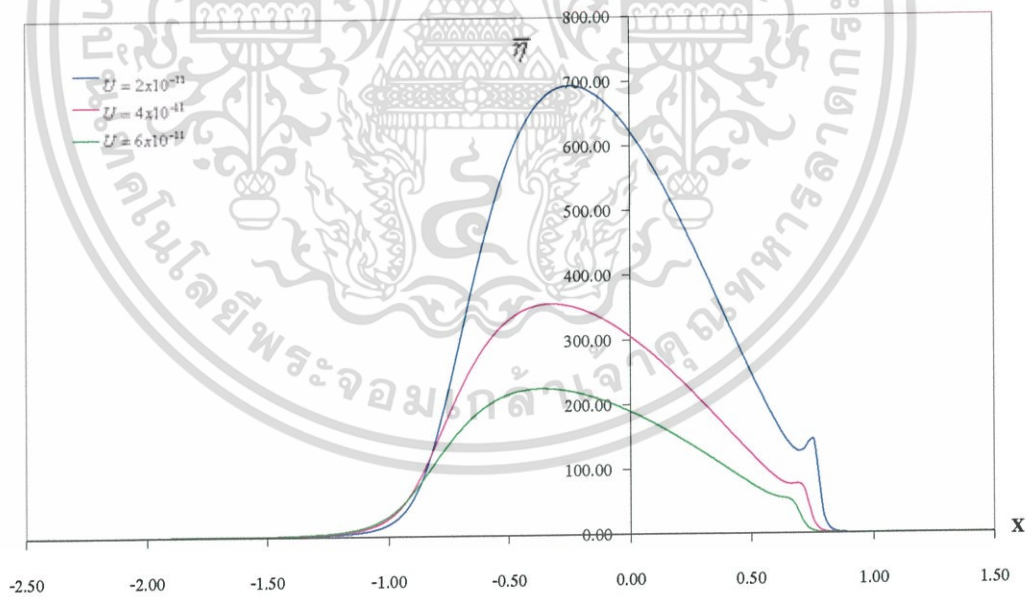


รูปที่ 6.12 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

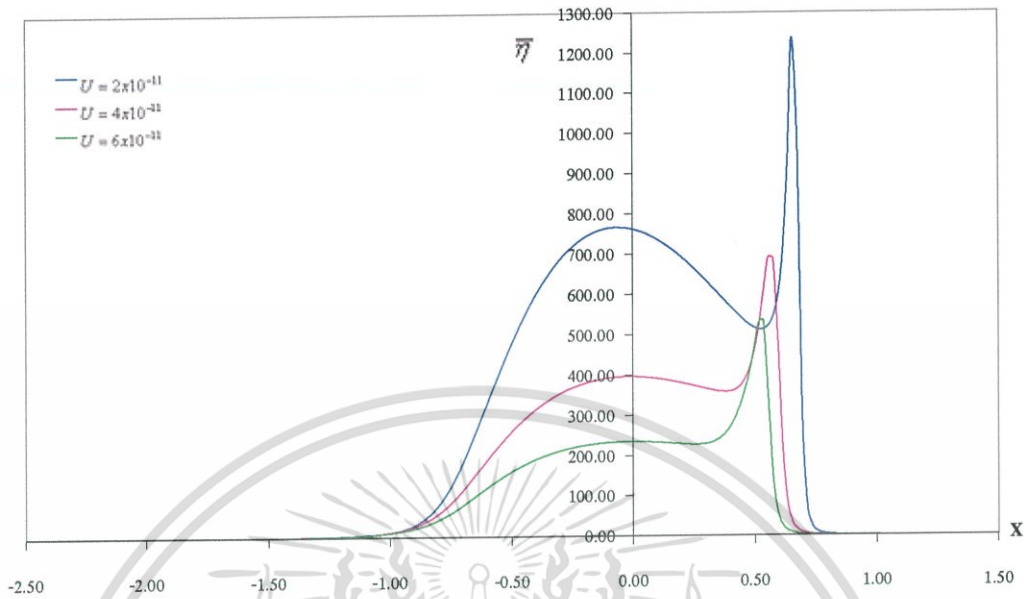


รูปที่ 6.13 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

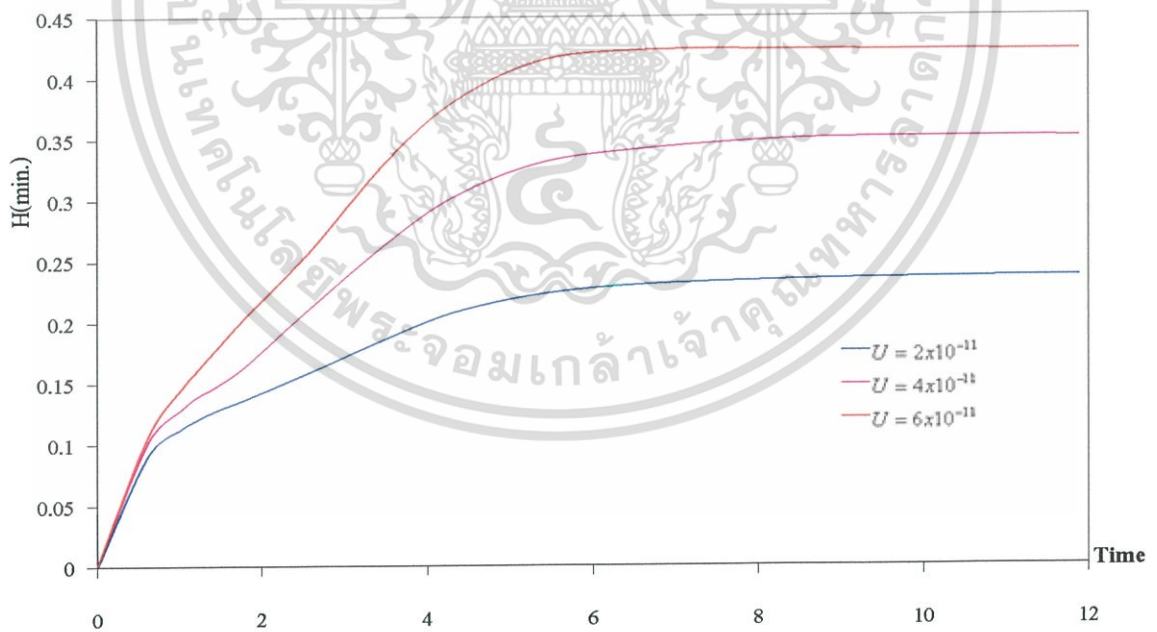


รูปที่ 6.14 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

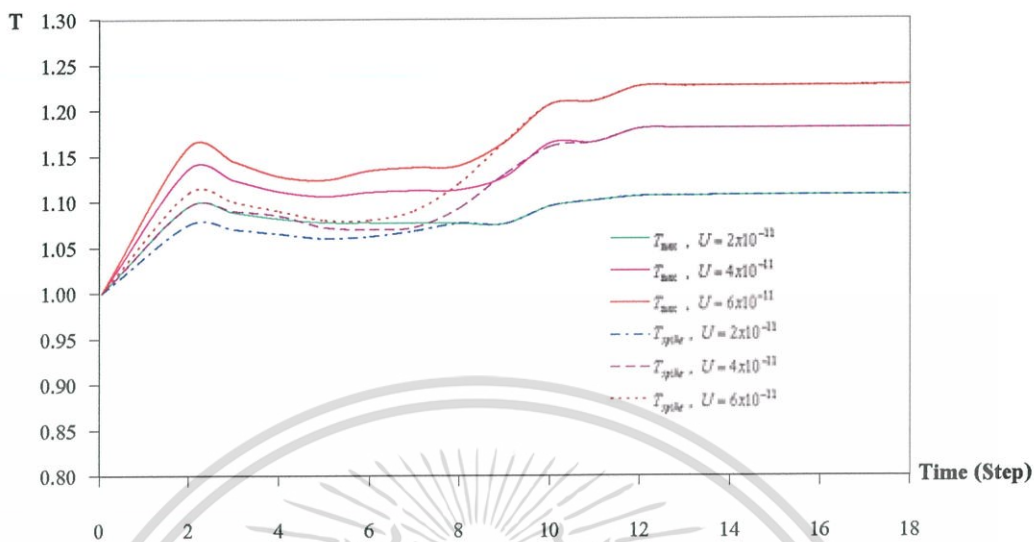


รูปที่ 6.15 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

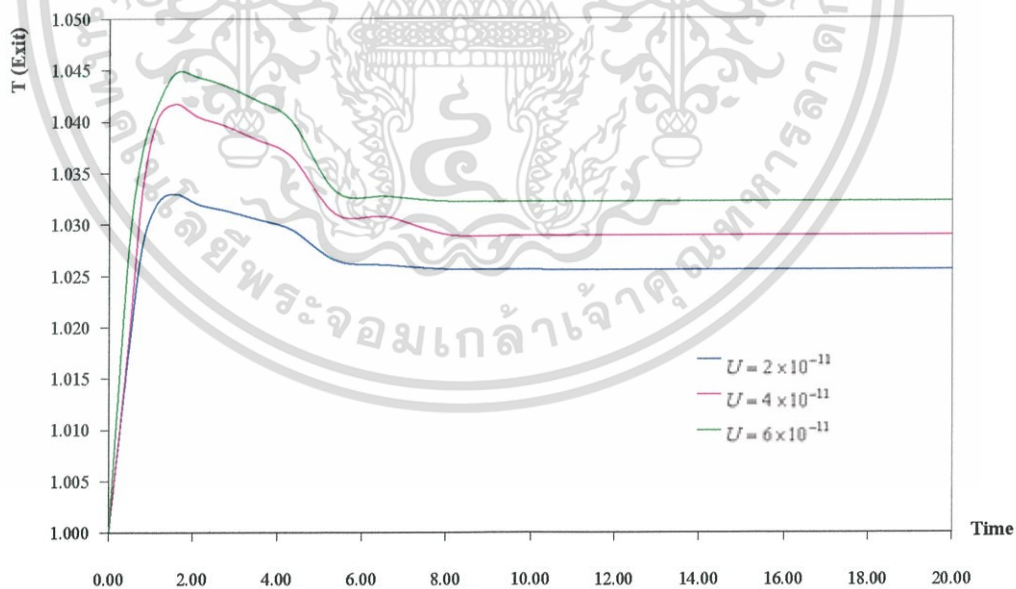


รูปที่ 6.16 กราฟความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

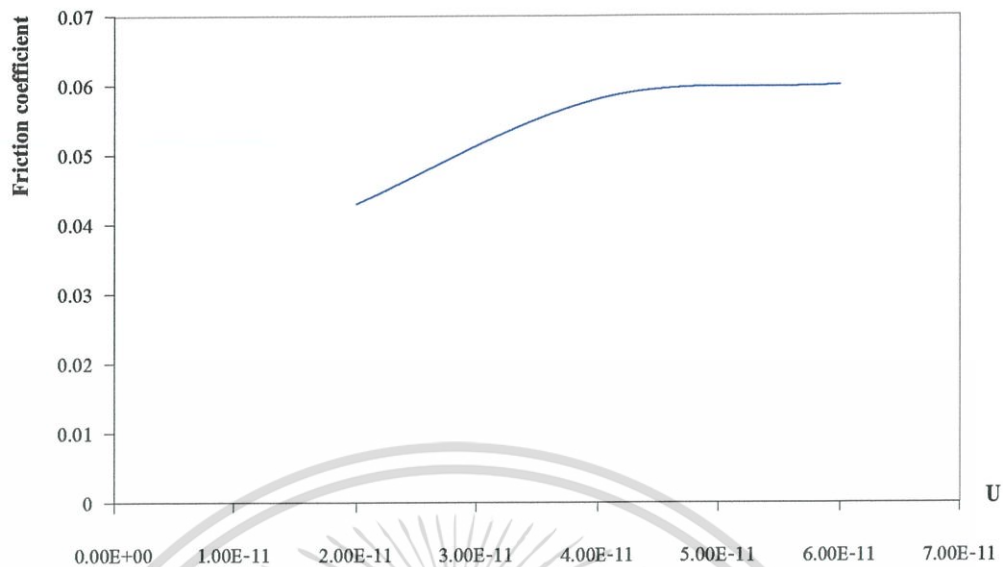


รูปที่ 6.17 กราฟแสดงอุณหภูมิที่สูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำสุดที่ขอยกนามแหลมที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$



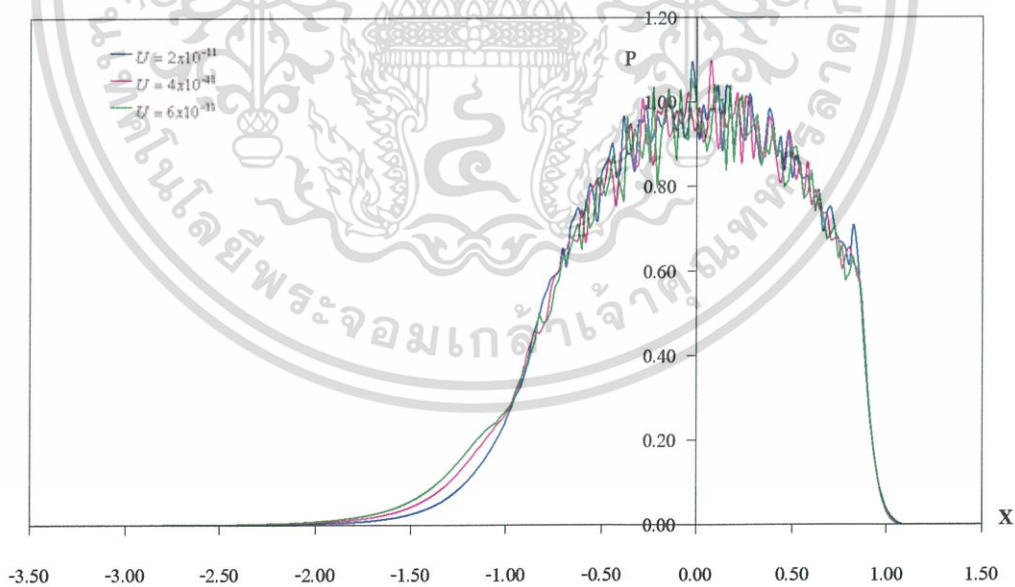
รูปที่ 6.18 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



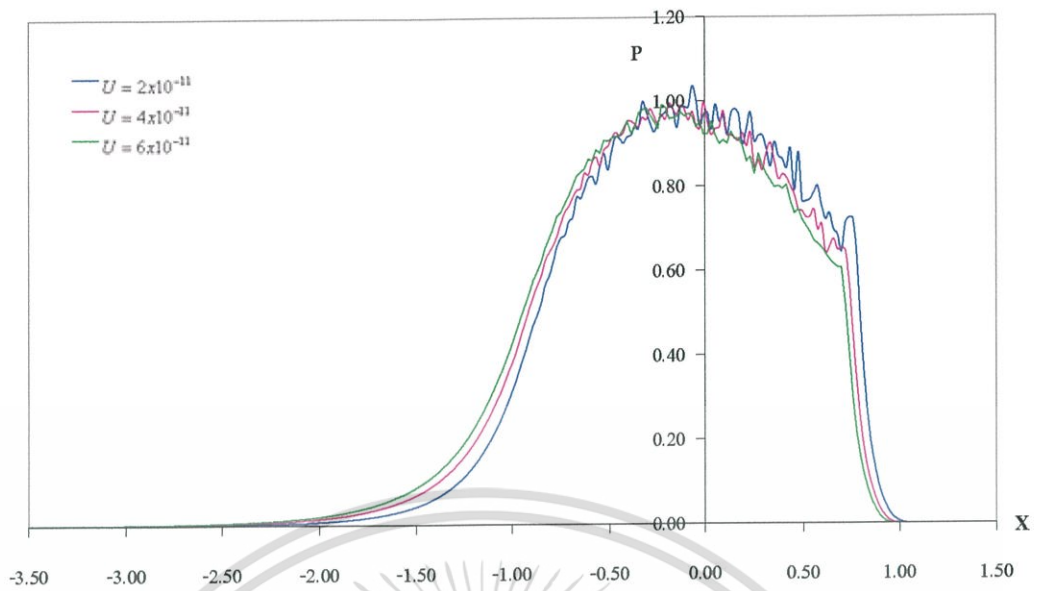
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

### 6.1.1.2 กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบโมเดล 1 และแผ่นเพลทโมเดล 2

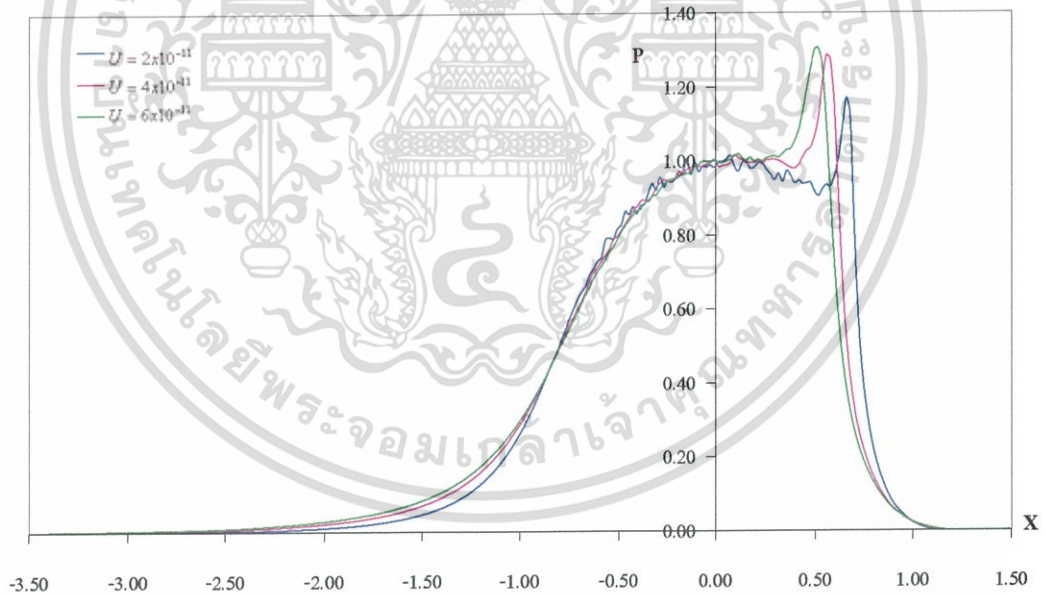


รูปที่ 6.20 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

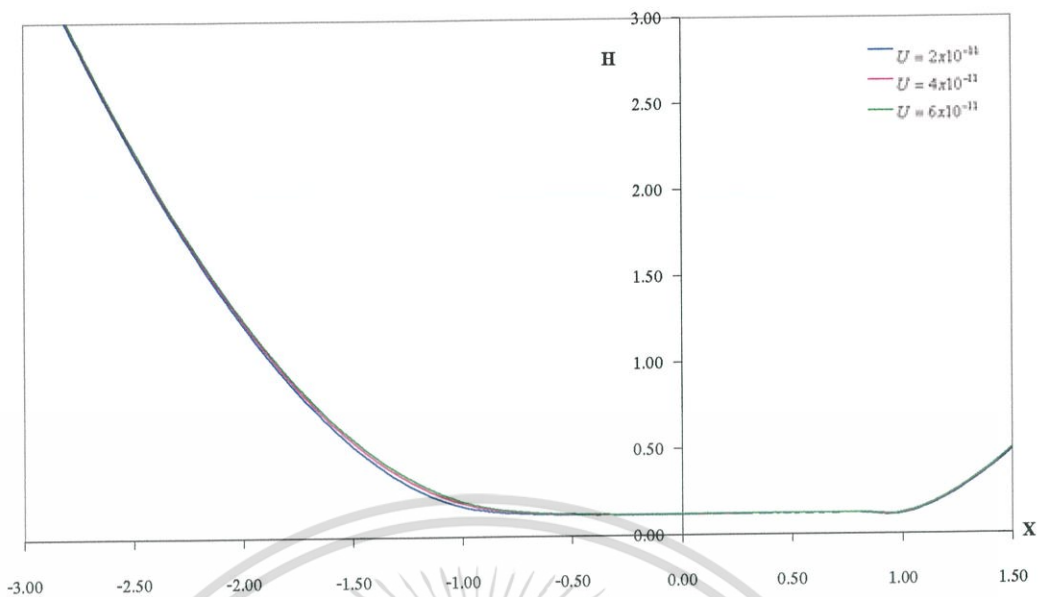


รูปที่ 6.21 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

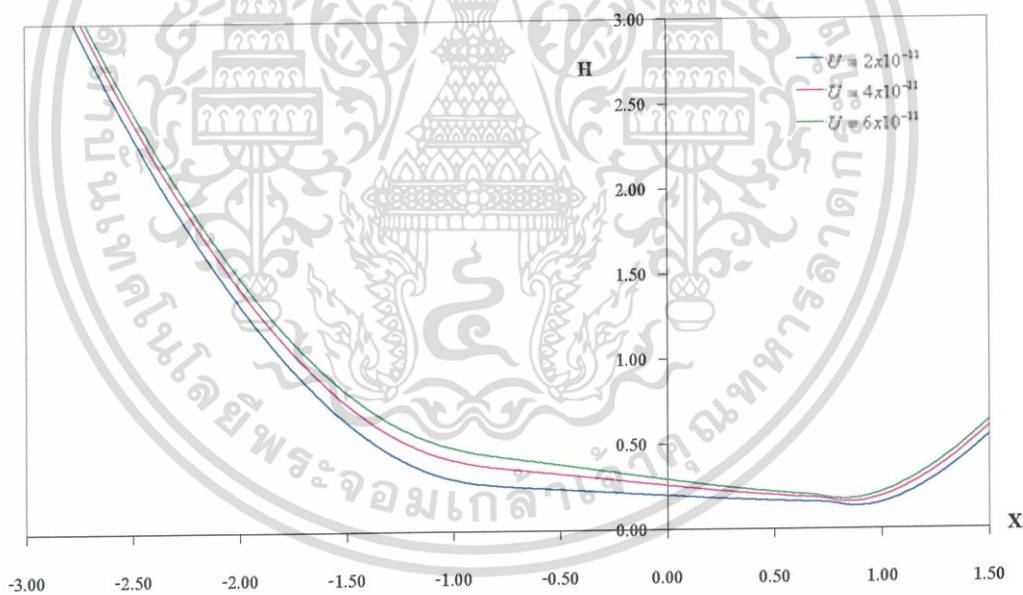


รูปที่ 6.22 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

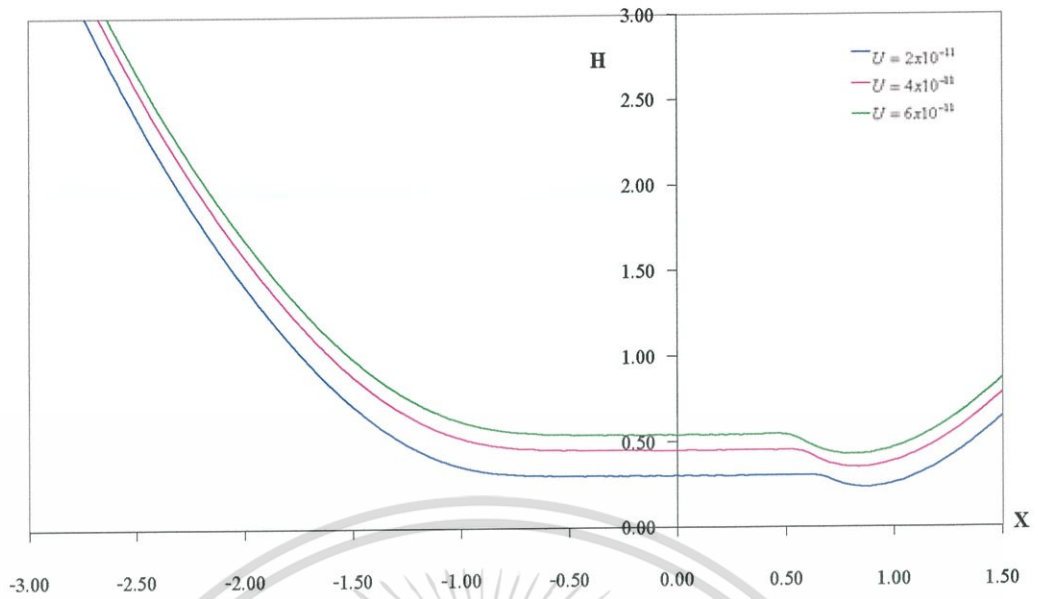


รูปที่ 6.23 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

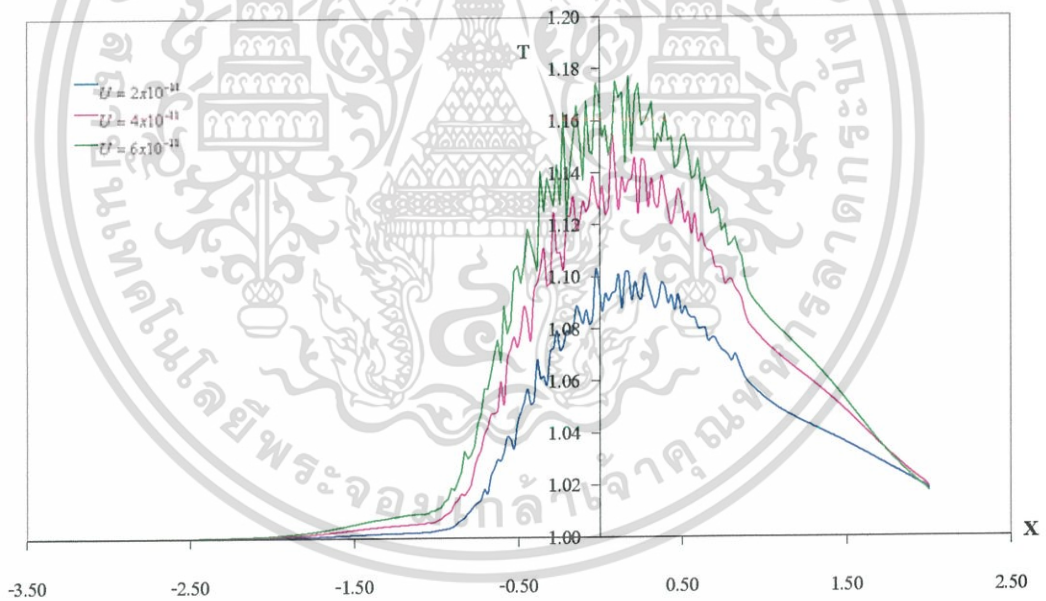


รูปที่ 6.24 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

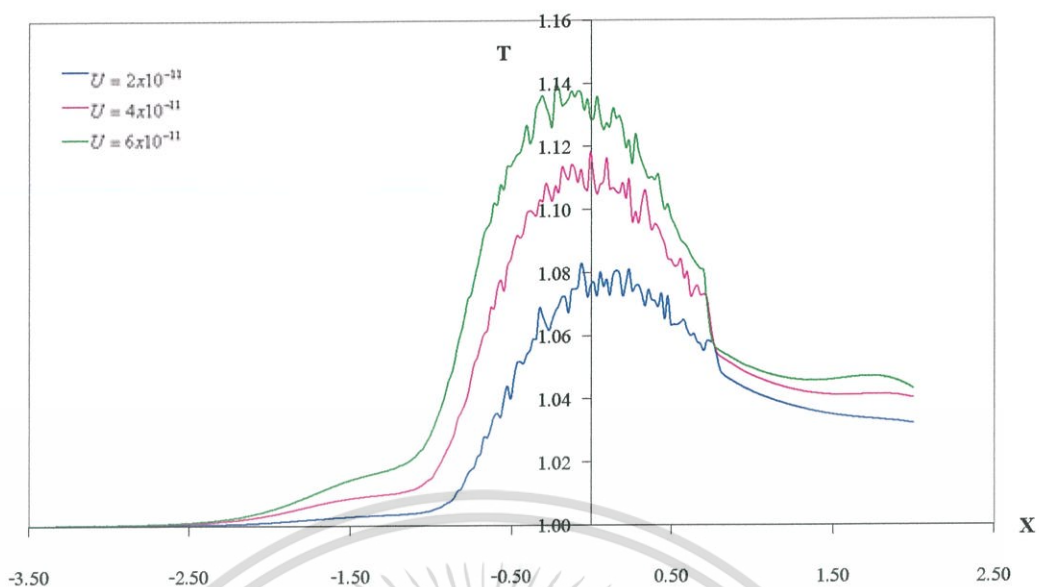


รูปที่ 6.25 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุลเมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

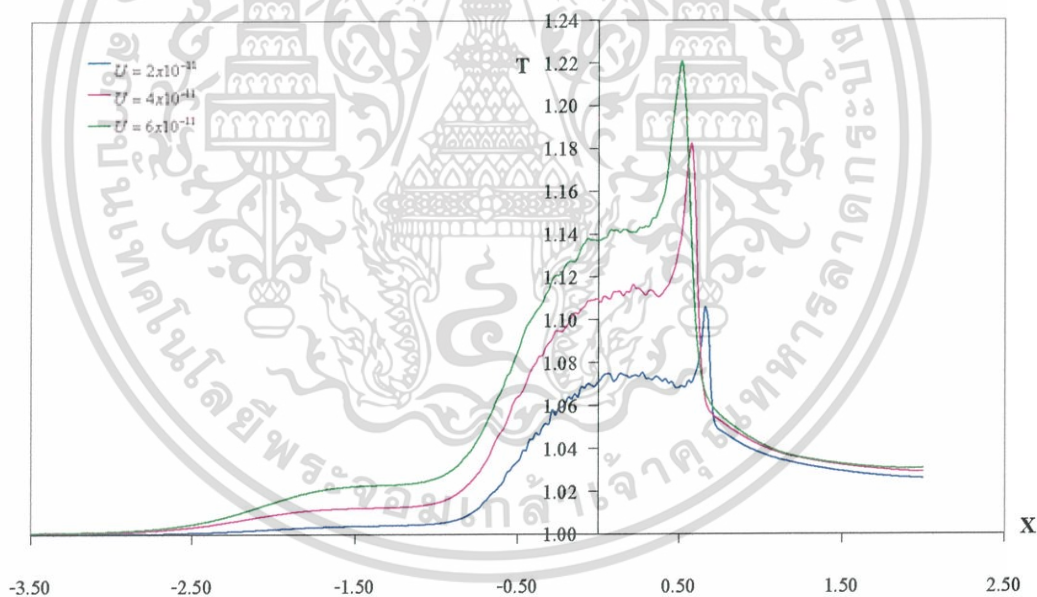


รูปที่ 6.26 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

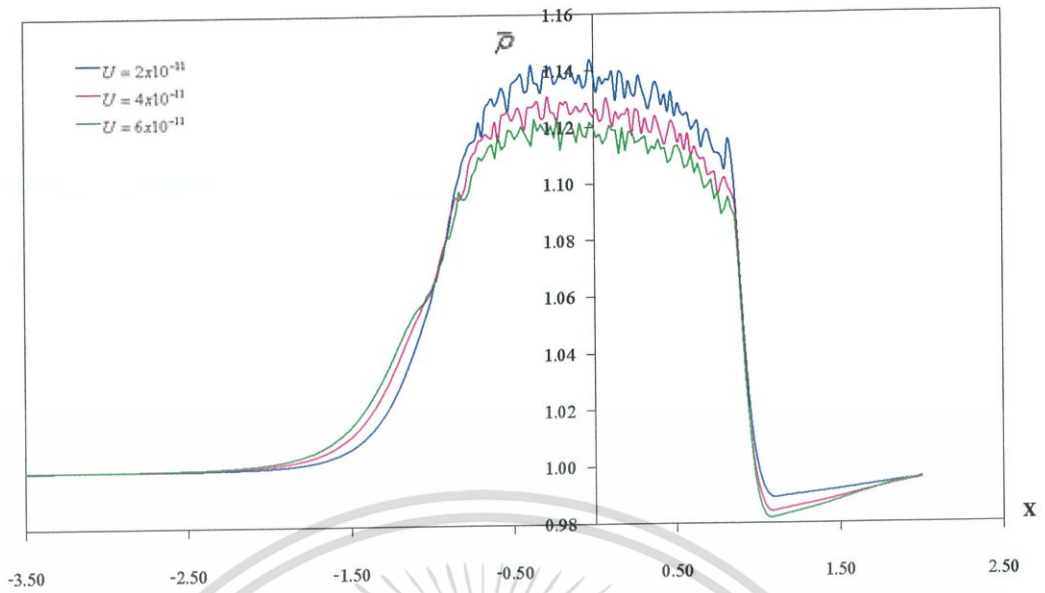


รูปที่ 6.27 กราฟอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

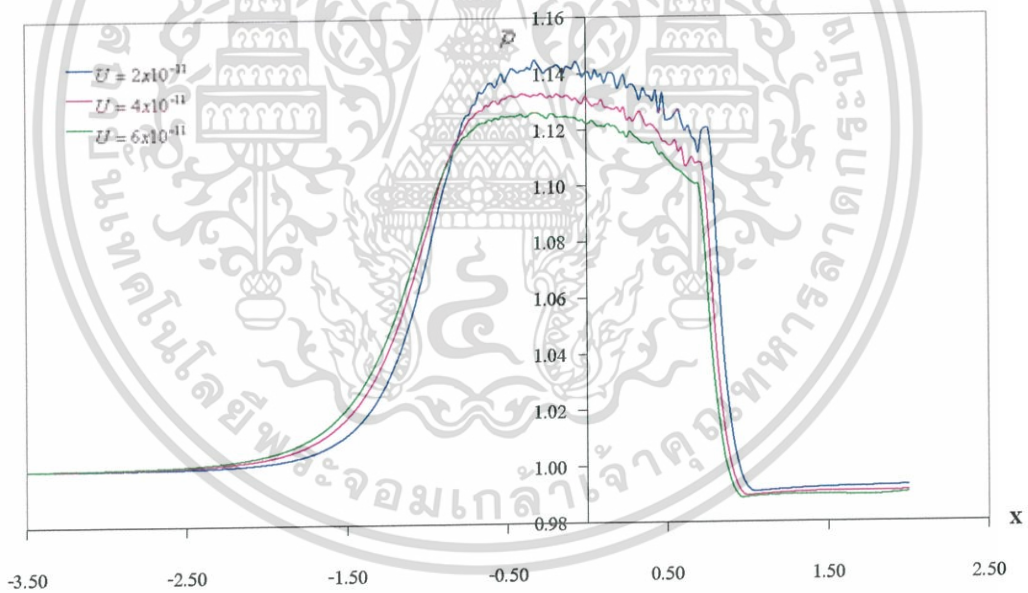


รูปที่ 6.28 กราฟอุณหภูมิที่สถานะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

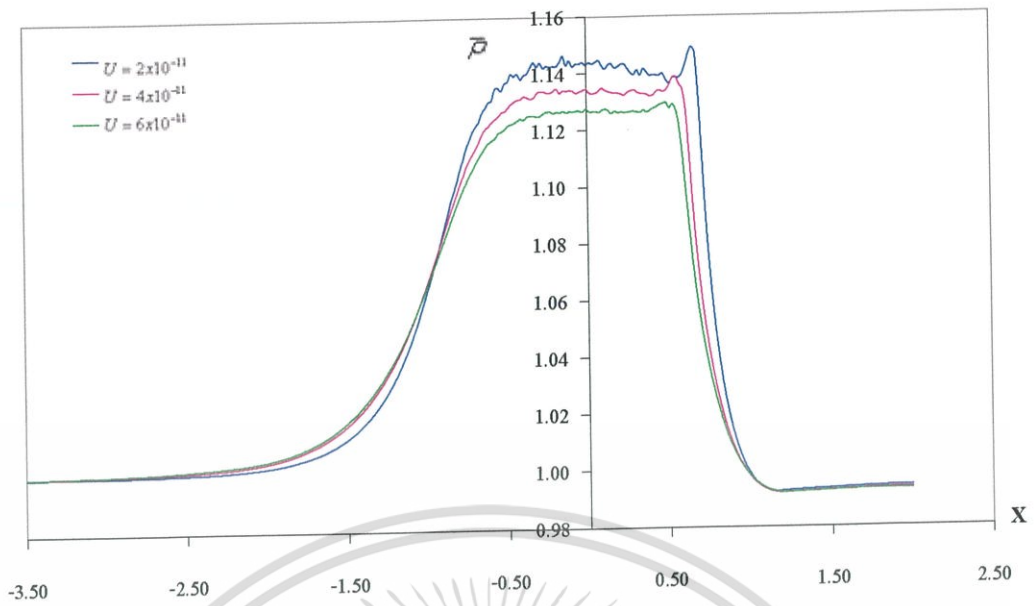


รูปที่ 6.29 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

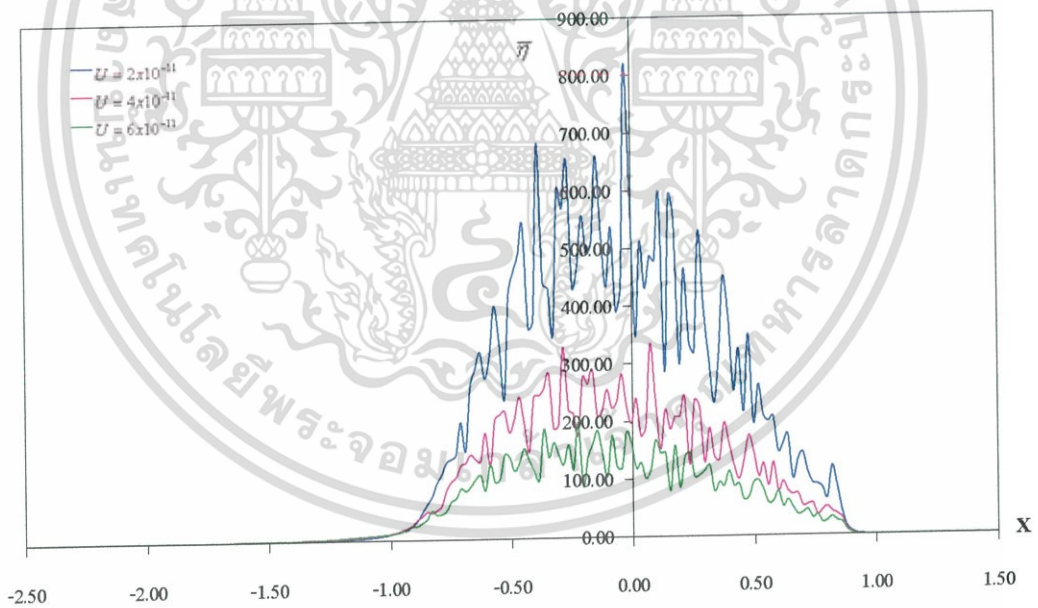


รูปที่ 6.30 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

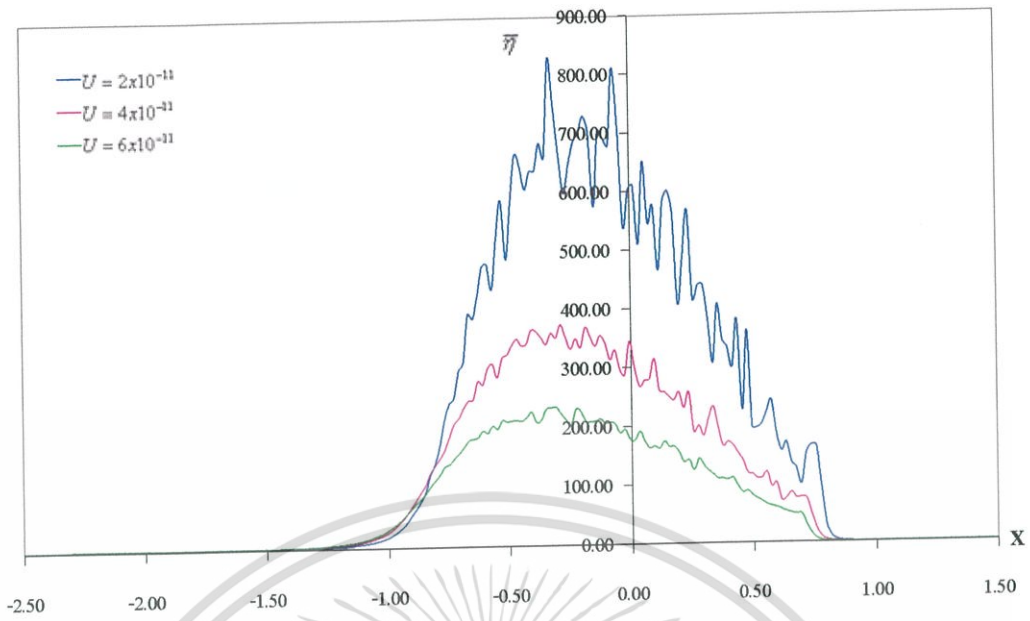


รูปที่ 6.31 กราฟความหนาแน่นที่สถานะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$

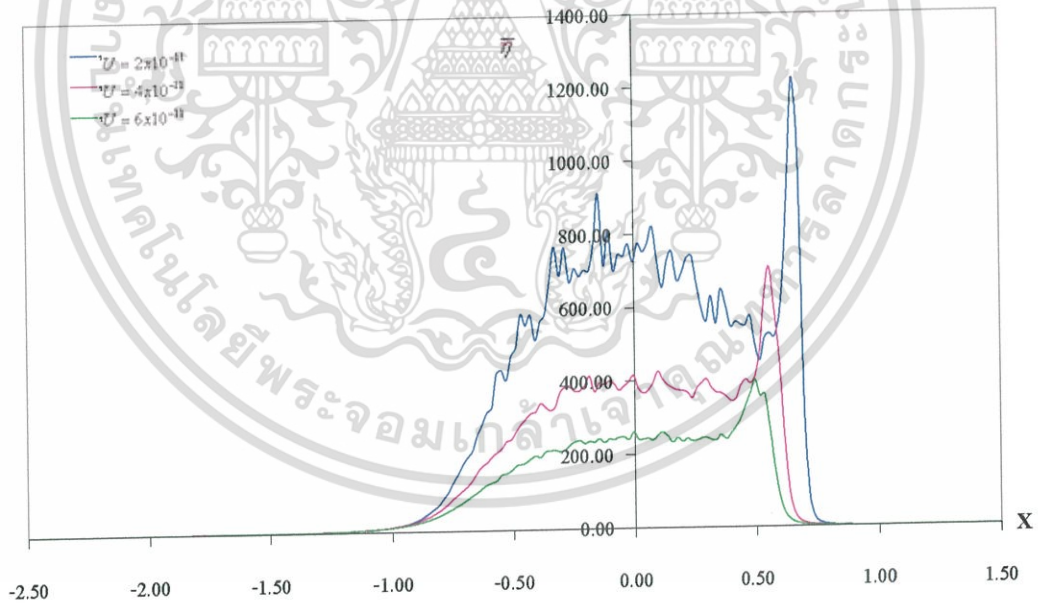


รูปที่ 6.32 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

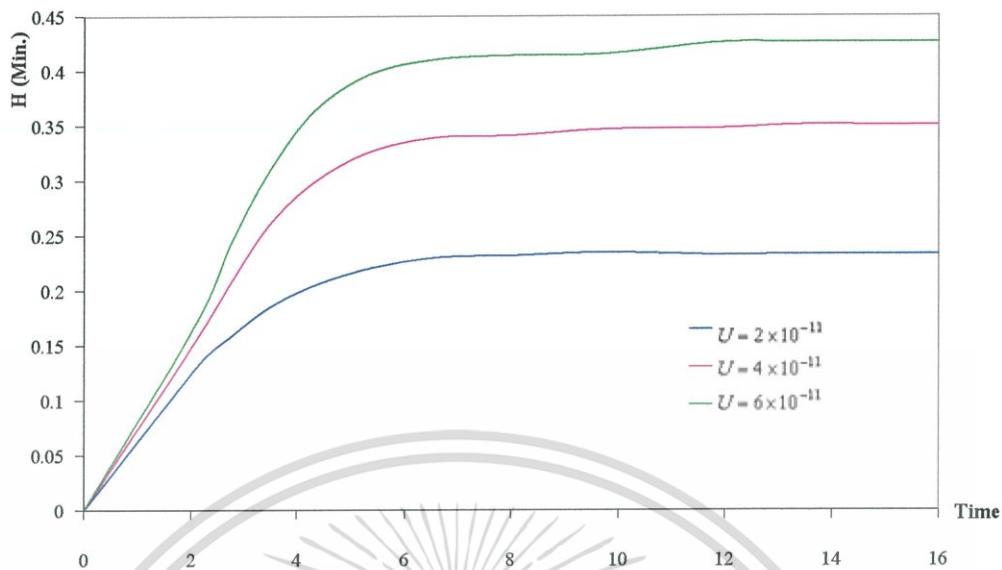


รูปที่ 6.33 กราฟความหนืดที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

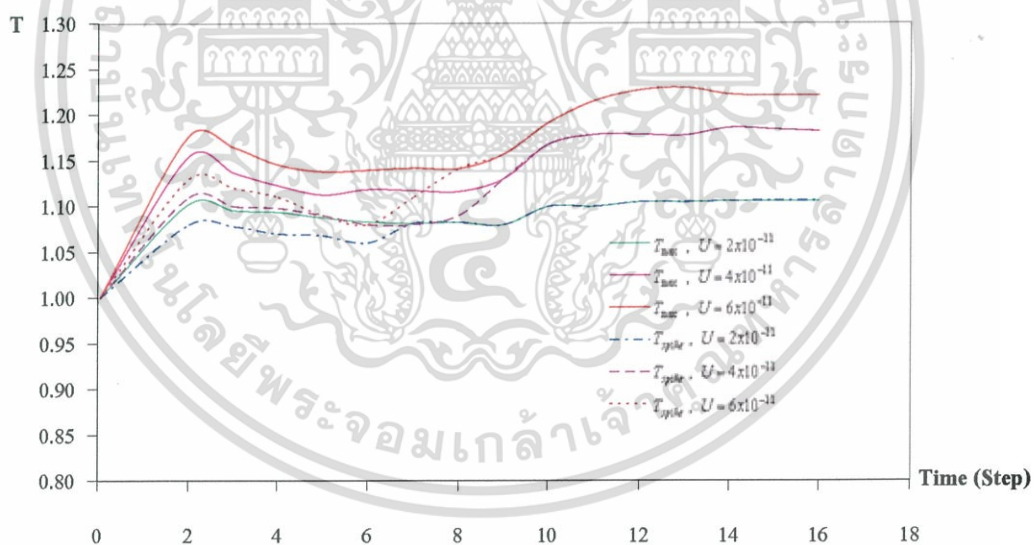


รูปที่ 6.34 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

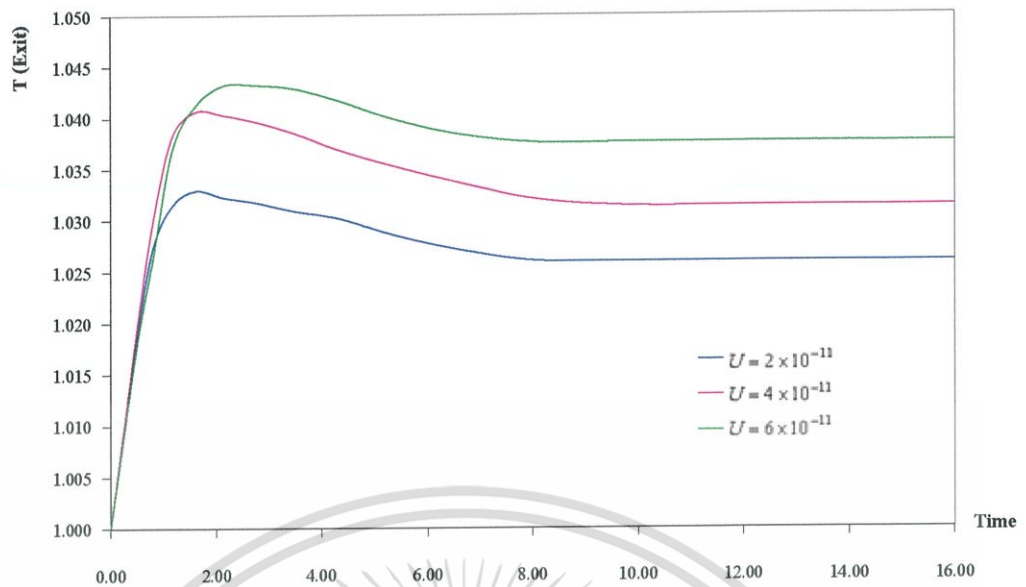


รูปที่ 6.35 กราฟความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

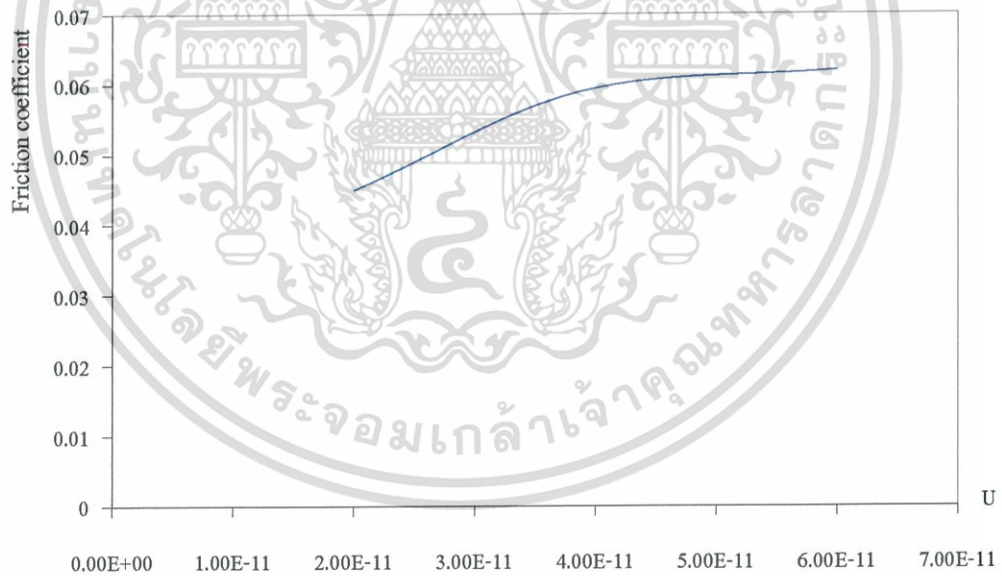


รูปที่ 6.36 กราฟแสดงอุณหภูมิที่สูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำสุดที่ขอบหน้าแหลมที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



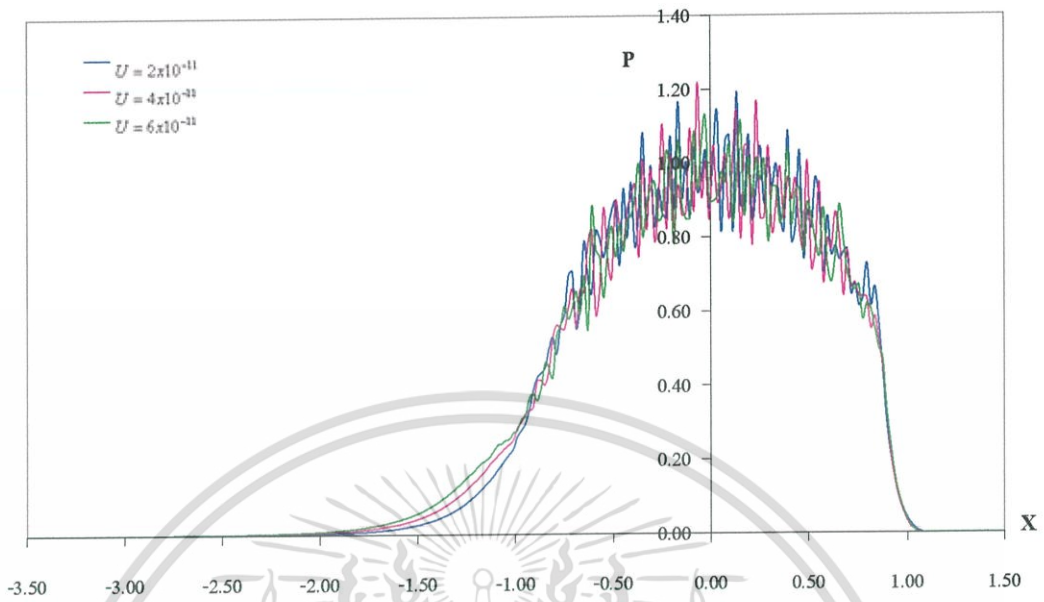
รูปที่ 6.37 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$



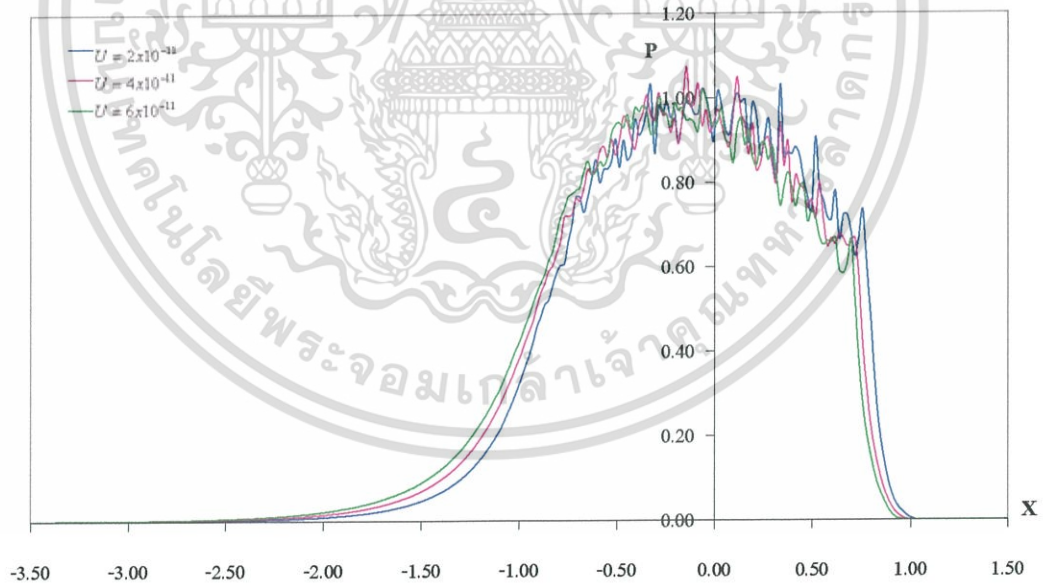
รูปที่ 6.38 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.1.3 กรณีโรตเตอร์มีผิวหยาบโมเดล 3 และแผ่นเพลทโมเดล 4

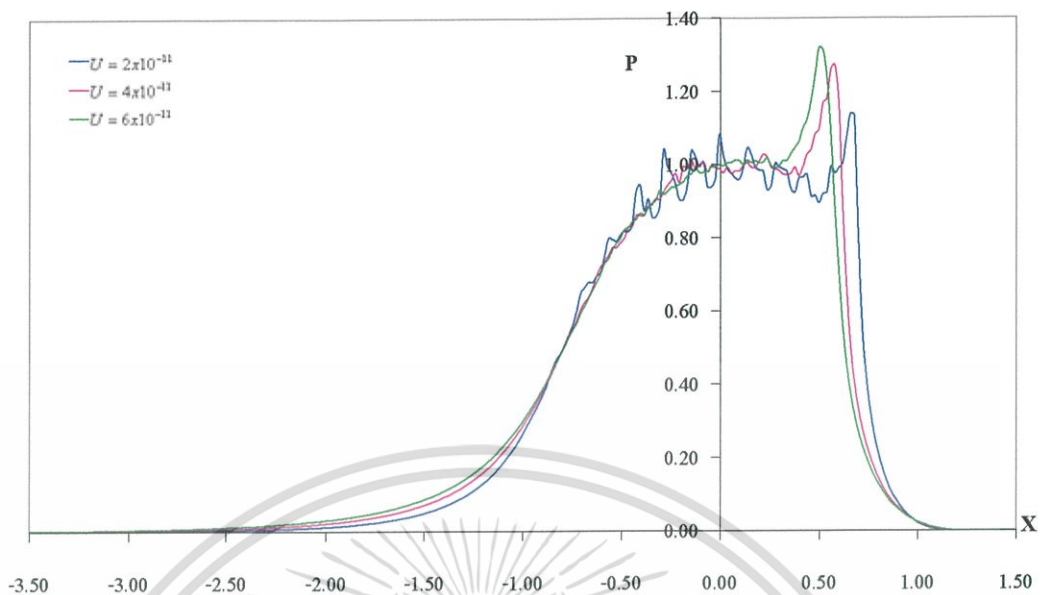


รูปที่ 6.39 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

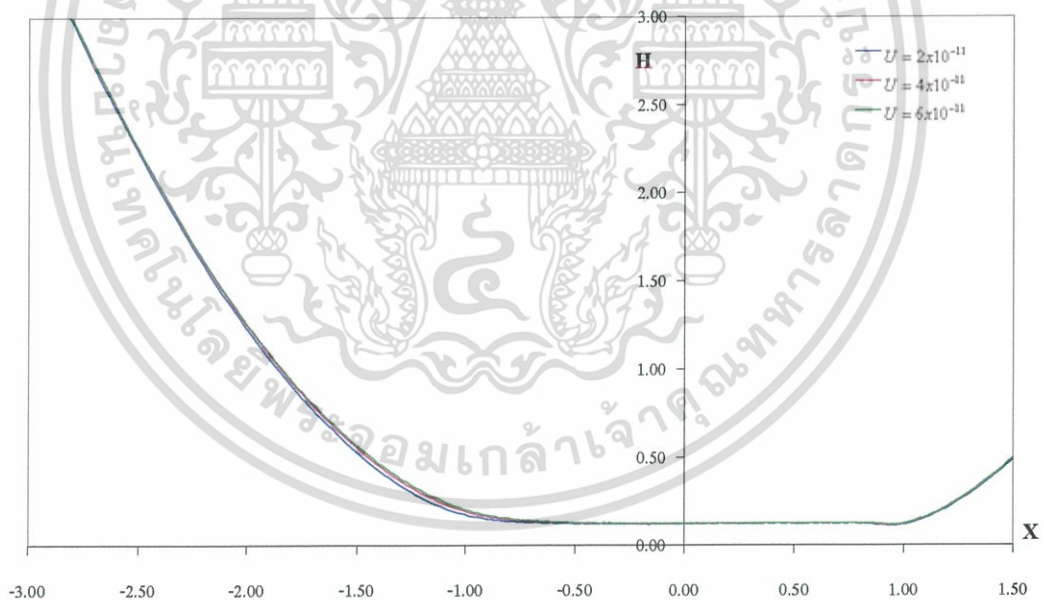


รูปที่ 6.40 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

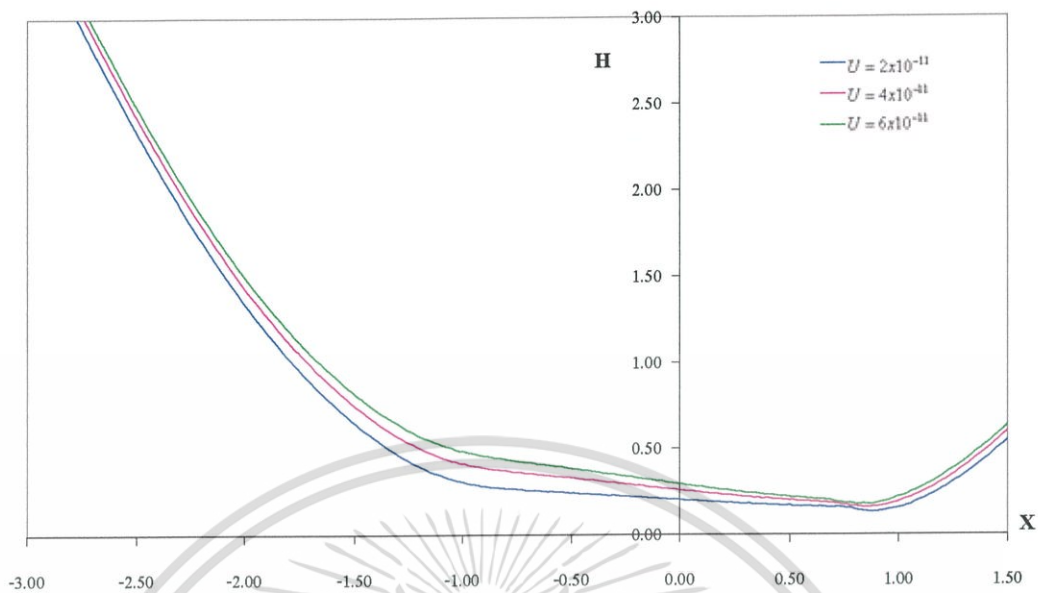


รูปที่ 6.41 กราฟความเข้มข้นสถานะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

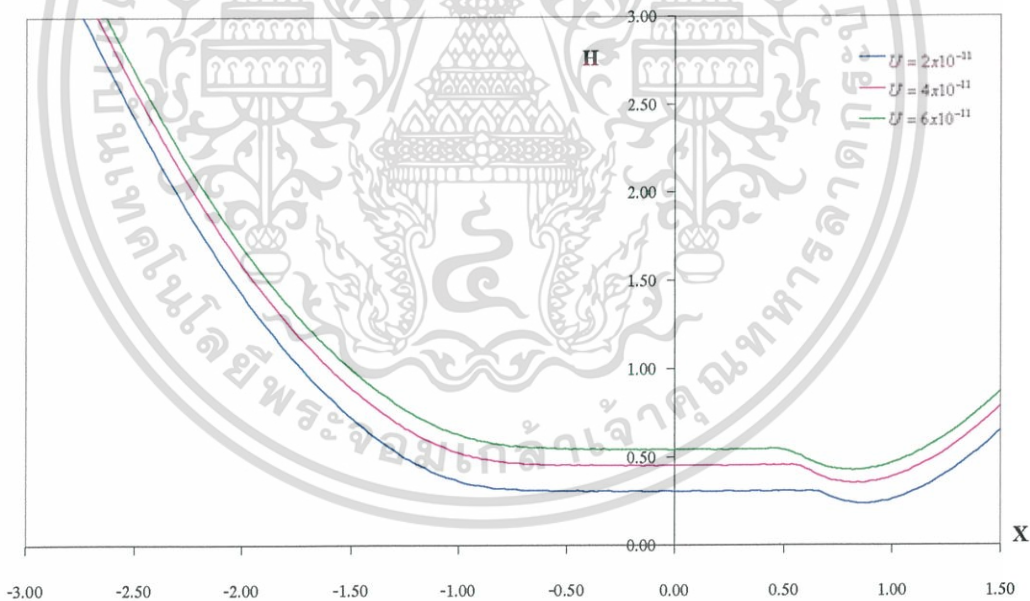


รูปที่ 6.42 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

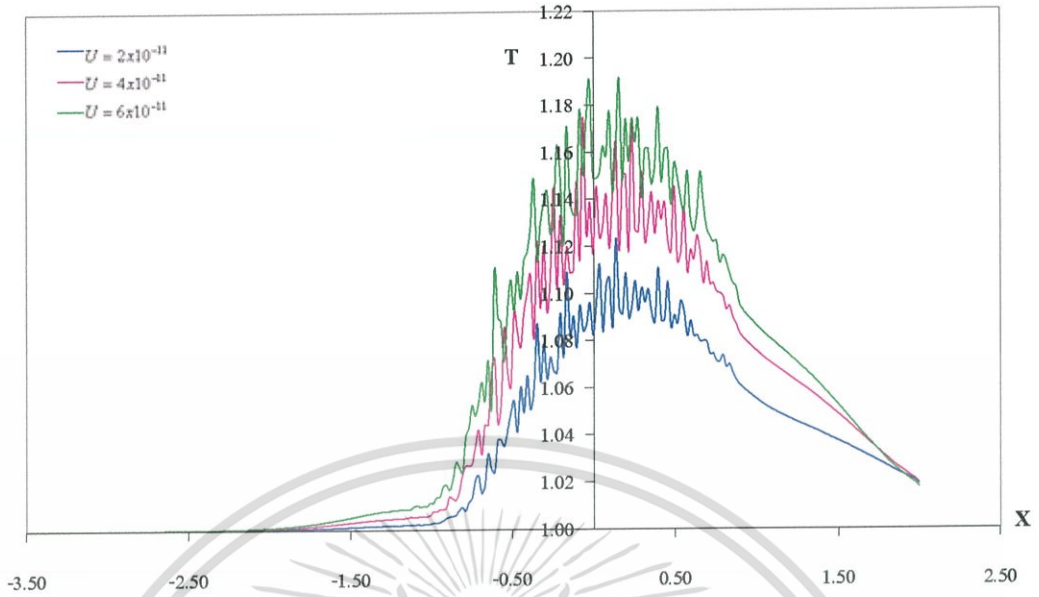


รูปที่ 6.43 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรต์ที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

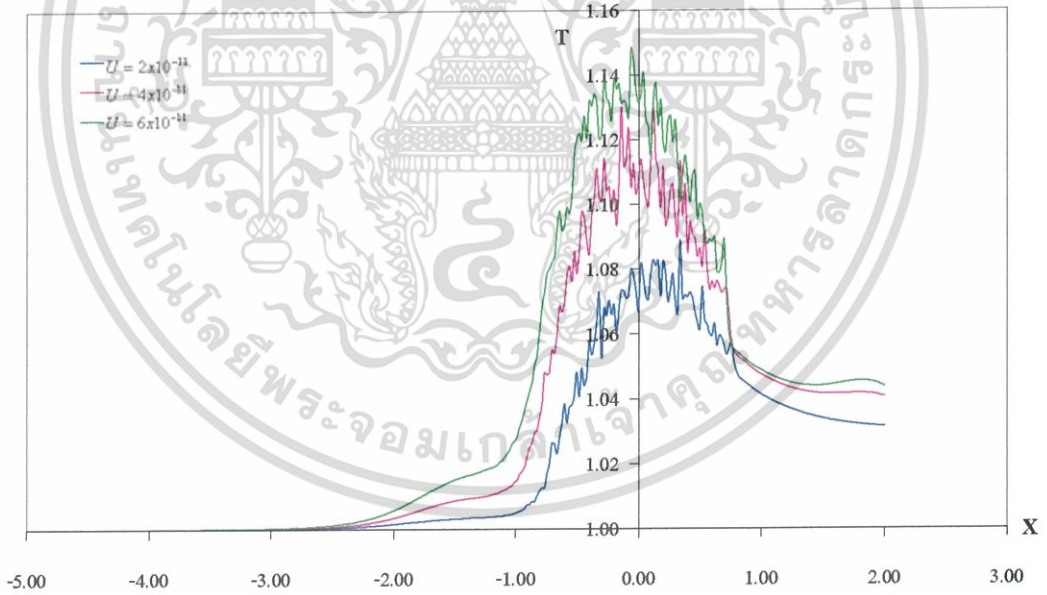


รูปที่ 6.44 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

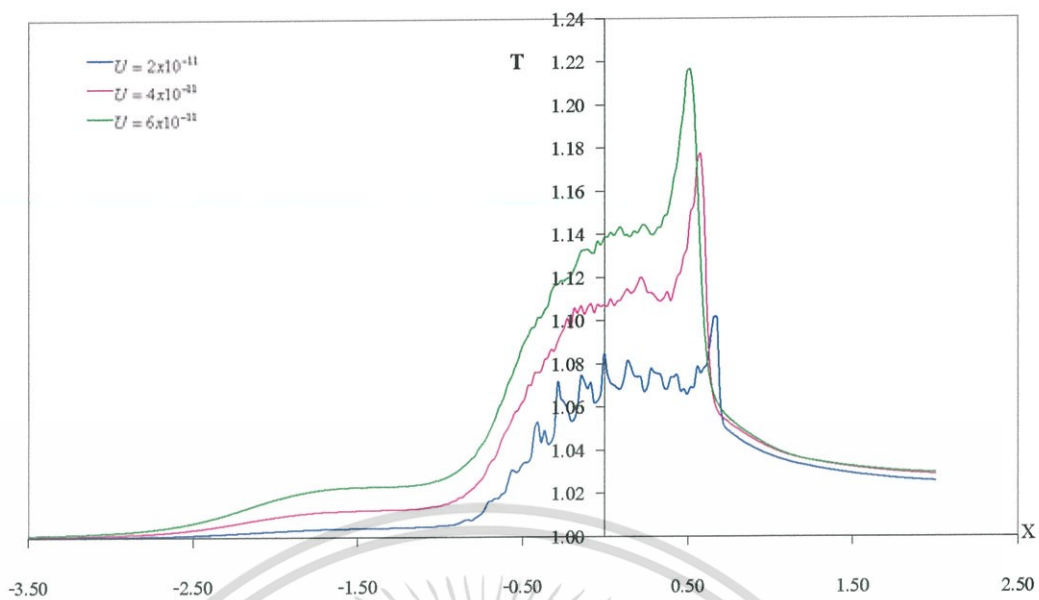


รูปที่ 6.45 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

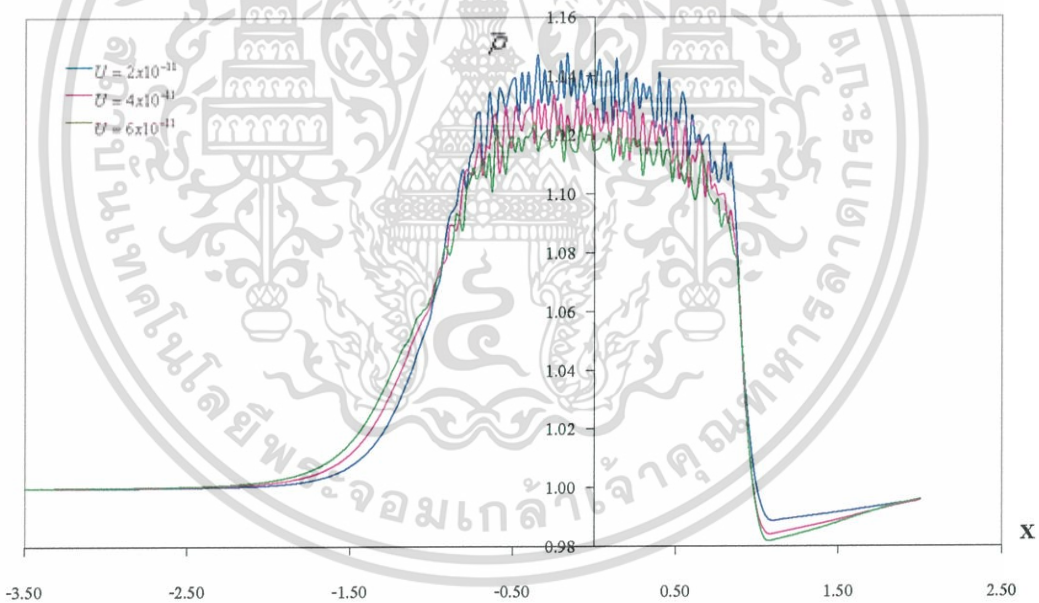


รูปที่ 6.46 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

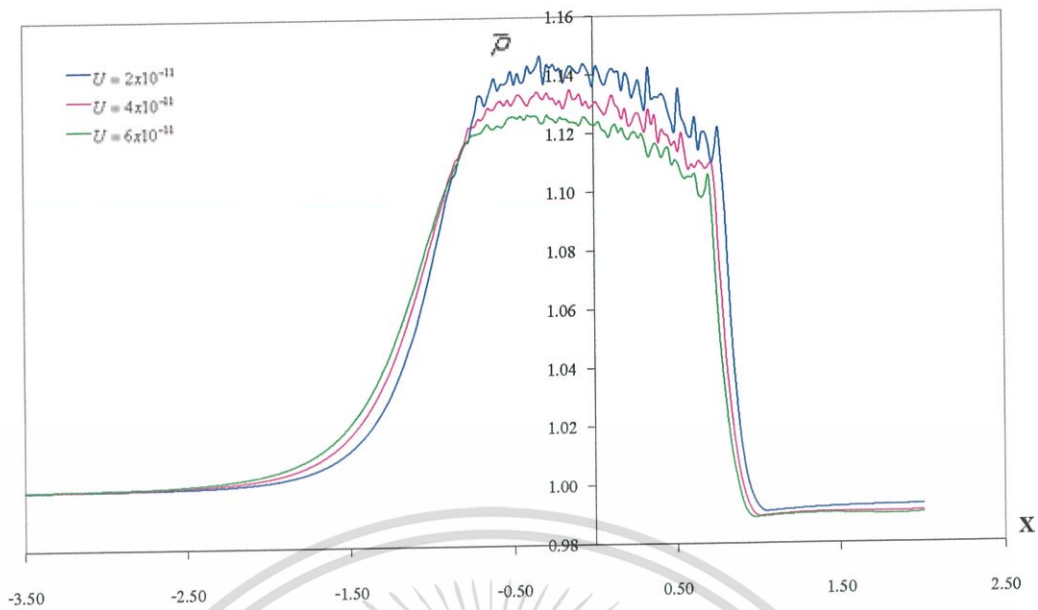


รูปที่ 6.47 กราฟอุณหภูมิที่สถานะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

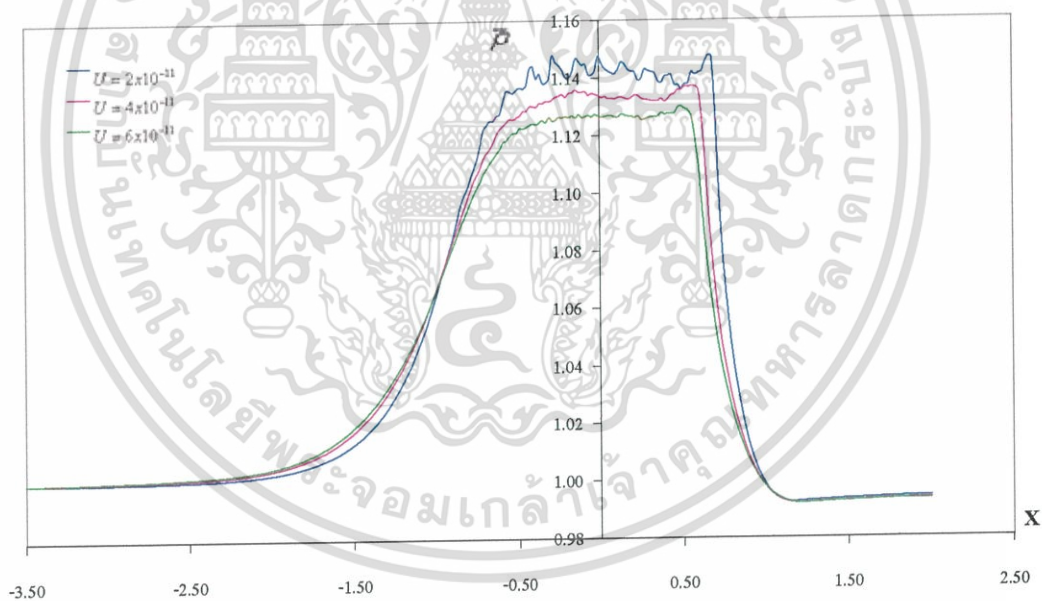


รูปที่ 6.48 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

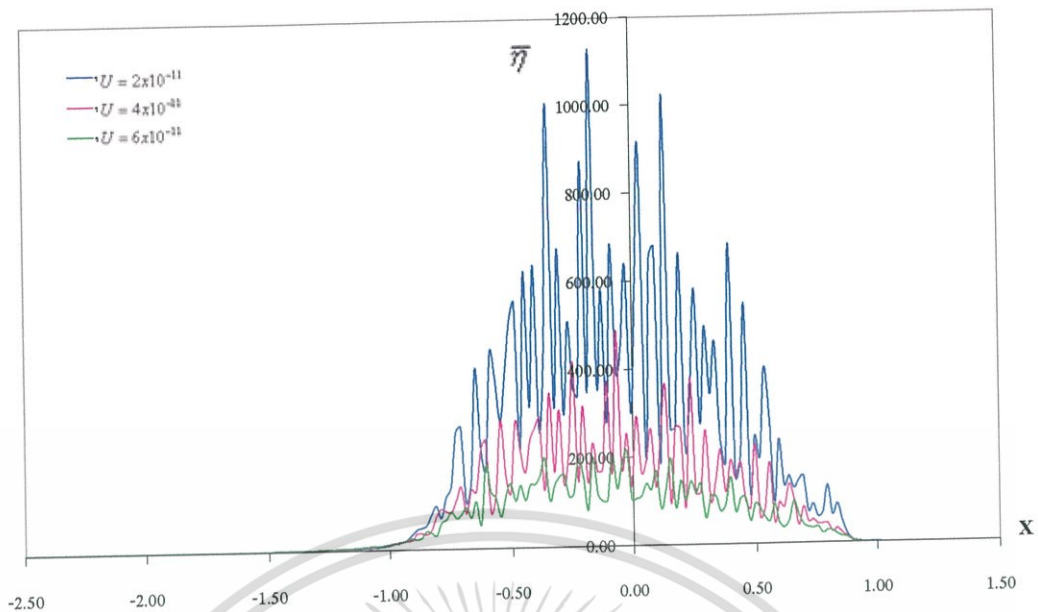


รูปที่ 6.49 กราฟความหนาแน่นที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

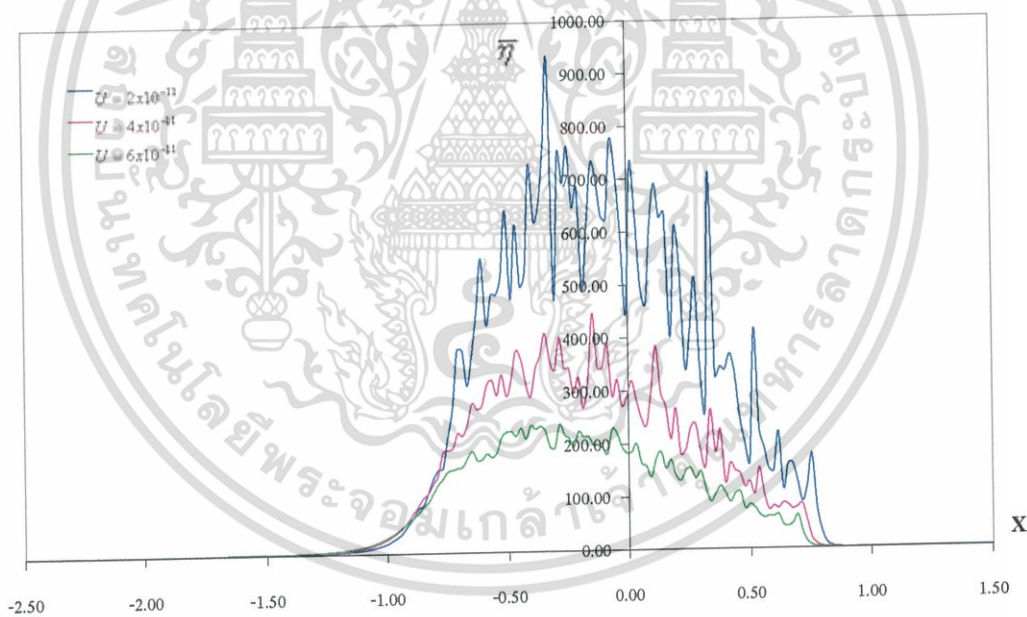


รูปที่ 6.50 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

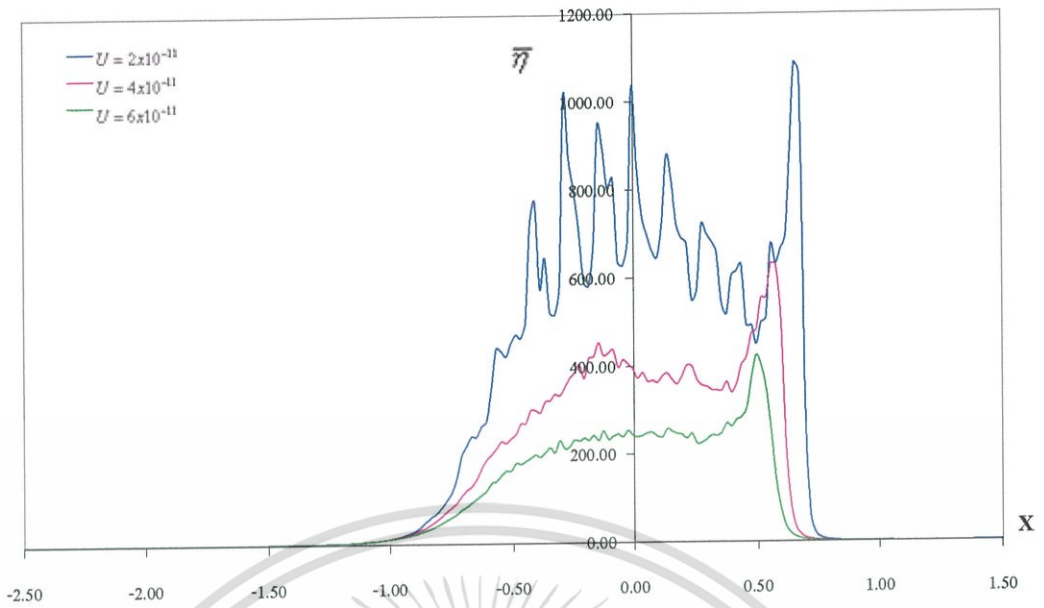


รูปที่ 6.51 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

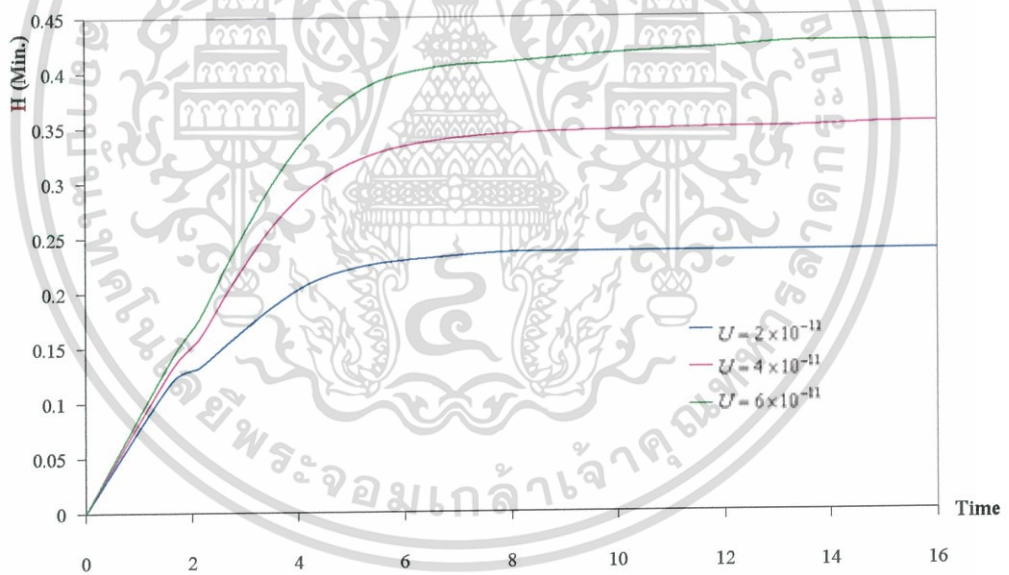


รูปที่ 6.52 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

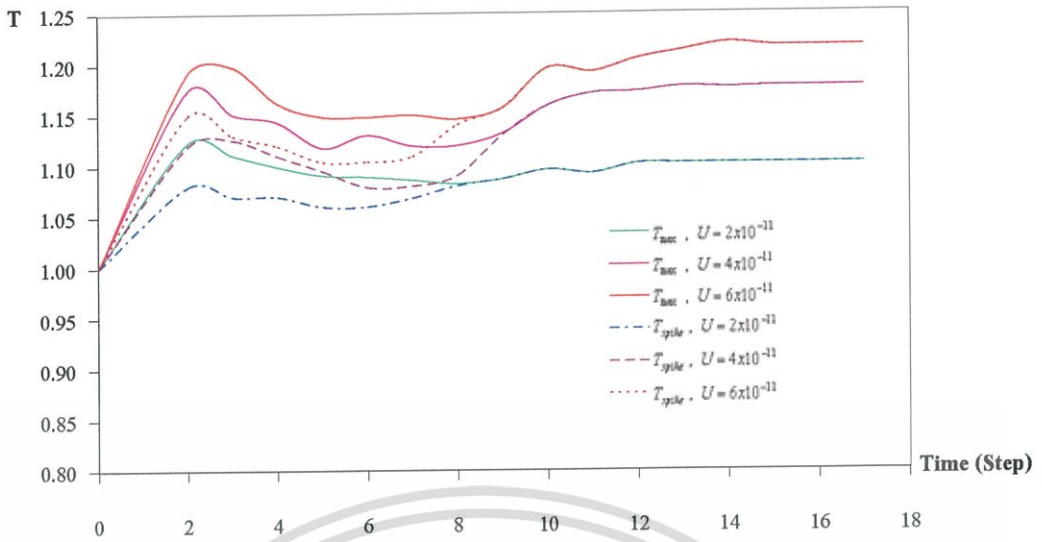


รูปที่ 6.53 กราฟความหนืดที่สถานะสมดุล เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

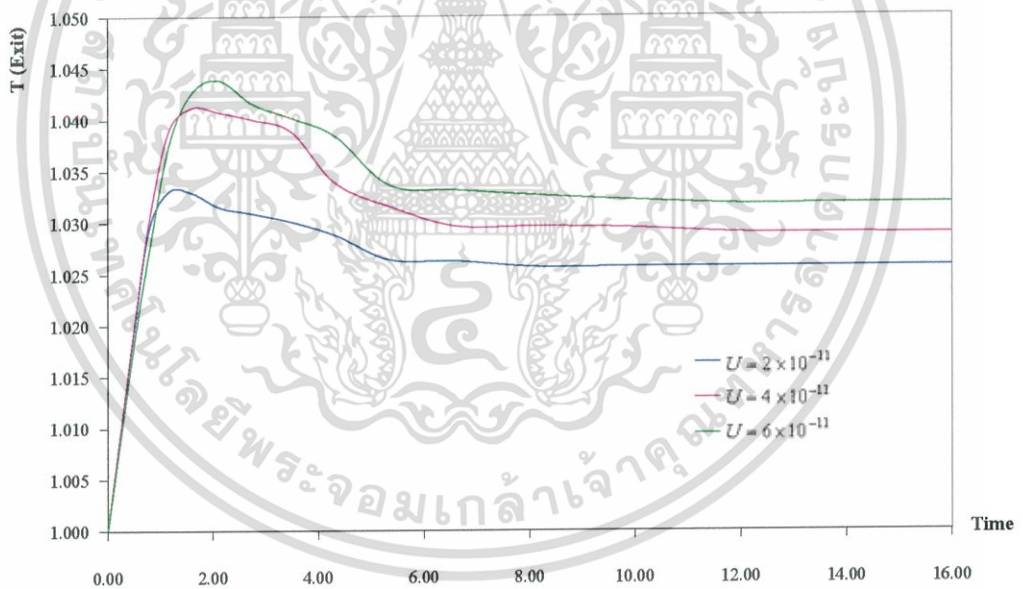


รูปที่ 6.54 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

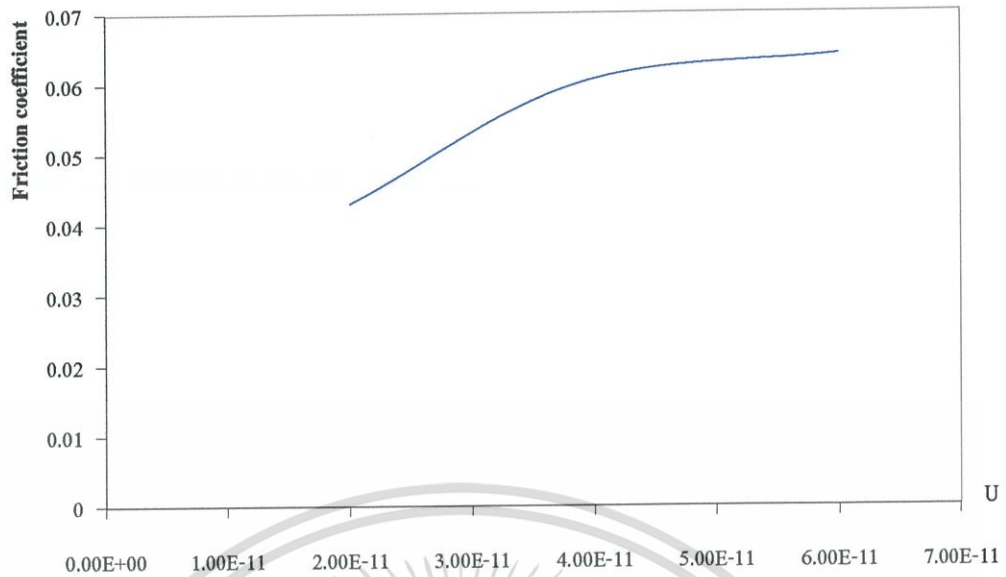


รูปที่ 6.55 กราฟแสดงอุณหภูมิที่สูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำสุดที่ขั้วคานาหมเหล็กที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$



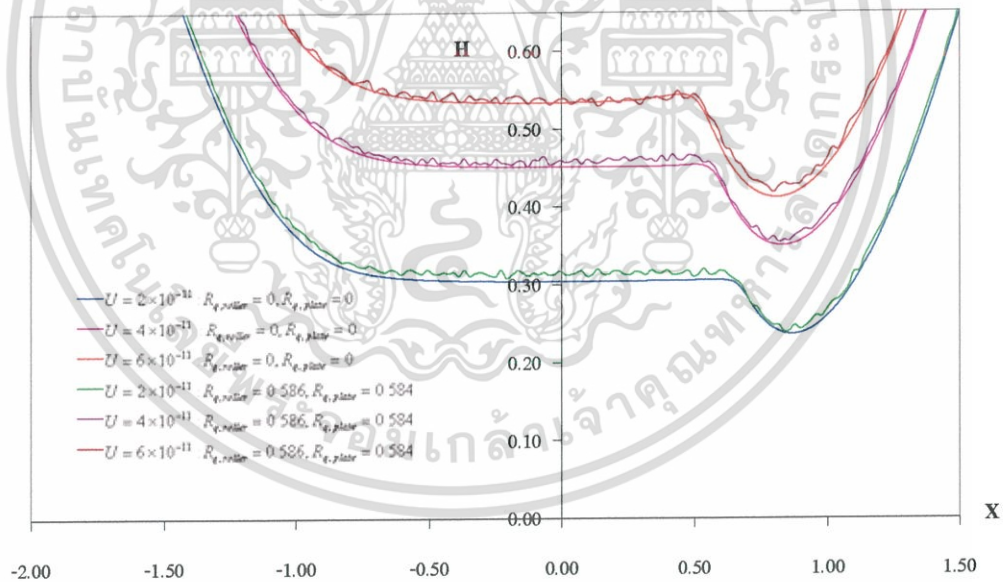
รูปที่ 6.56 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละความเร็ว  
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.57 กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง

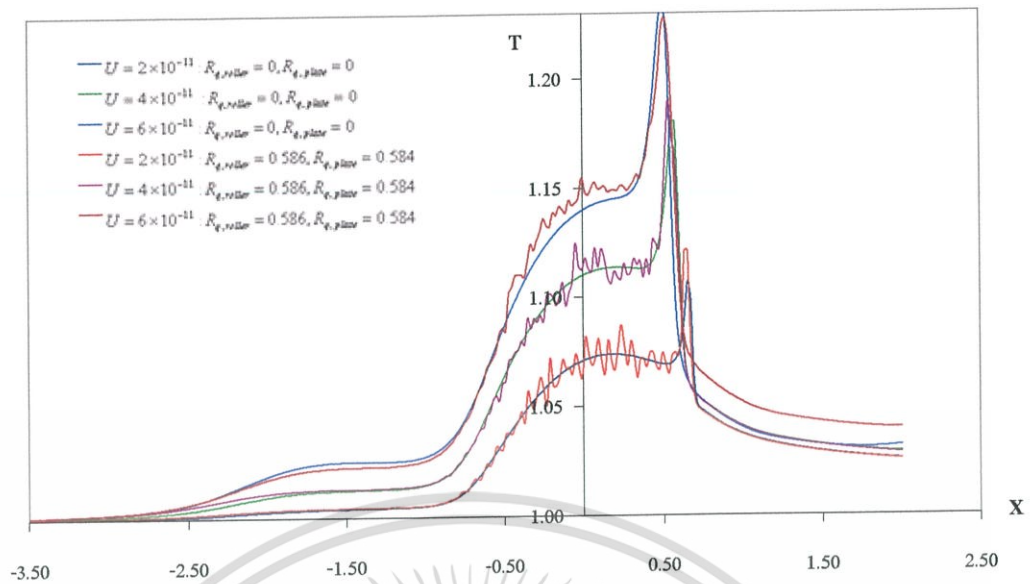
เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$



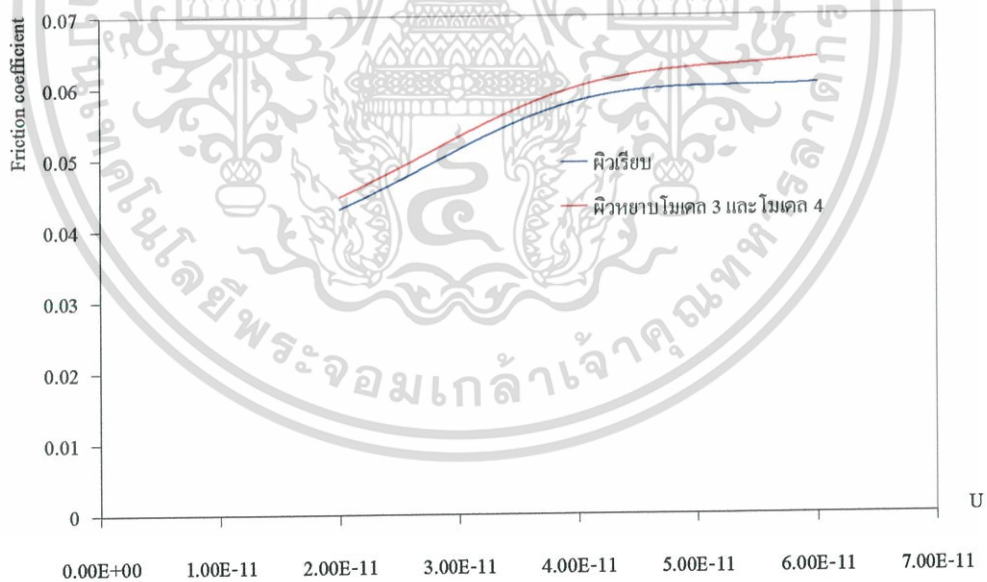
รูปที่ 6.58 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาฟิล์ม กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับผิวหยาบ

โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ , SAE40,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.59 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับผิวหยาบ โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$



รูปที่ 6.60 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กรณีที่โรลเลอร์และเพลทมีผิวเรียบกับผิวหยาบ โมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ  $W = 4 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลจากผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์

### - กรณีผิวเรียบ : เมื่อความเร็วสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 6.1-6.19 พบว่าเมื่อความเร็วที่กระทำมีค่าสูงขึ้น ค่าความดันจะลดลง เนื่องจากจากความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เพราะมีน้ำมันเข้ามามากขึ้น แต่จะส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากสารหล่อลื่นจะมีการเสียดสีกันสูง และอุณหภูมิยังส่งผลทำให้ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงด้วย และจากกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกับเวลาจะพบว่าเมื่อความเร็วสูงขึ้นการเข้าสู่จุดสมดุลจะใช้เวลามากกว่ากรณีที่ความเร็วต่ำ

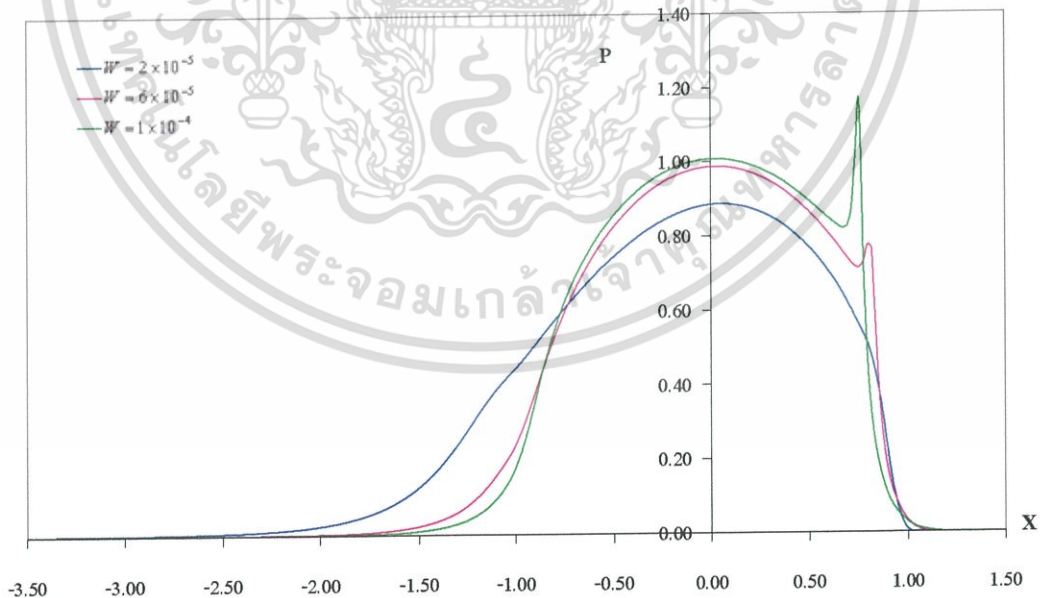
### - กรณีผิวหยาบ : เมื่อความเร็วสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 6.20-6.57 พบว่าความหยาบจะมีผลทำให้ความดันลดลง โดยเฉพาะกรณีที่ความเร็วน้อยสุด เพราะความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นบางมากจึงทำให้ผลของความหยาบมีมาก สำหรับแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อพฤติกรรมก็จะเหมือนกับกรณีผิวเรียบ

จากกราฟรูปที่ 6.58 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาฟิล์มจะพบว่าที่ความเร็วเดียวกันค่าความหนาฟิล์มที่มีผลจากผิวหยาบจะหนากว่าของผิวเรียบ เนื่องจากค่าผิวที่หยาบจะส่งผลให้การไหลของน้ำมันยากขึ้นจึงทำให้การลอยตัวของโรลเลอร์สูงกว่ากรณีผิวเรียบ แต่เมื่อพิจารณากราฟอุณหภูมิจะพบว่าอุณหภูมิของผิวหยาบที่ความเร็วสูงจะมีค่าสูงกว่ากรณีผิวเรียบเนื่องจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากค่าแรงเสียดทานมีค่าสูง ดังแสดงในรูปที่ 6.59-6.60

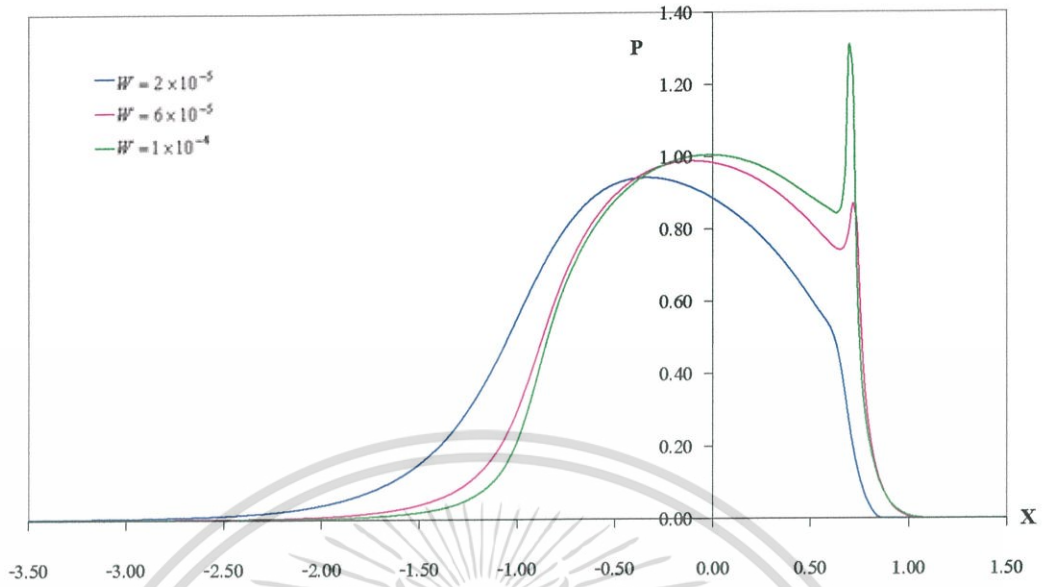
## 6.1.2 ภาวะเปลี่ยนแปลง

### 6.1.2.1 กรณีโรลเลอร์ และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ

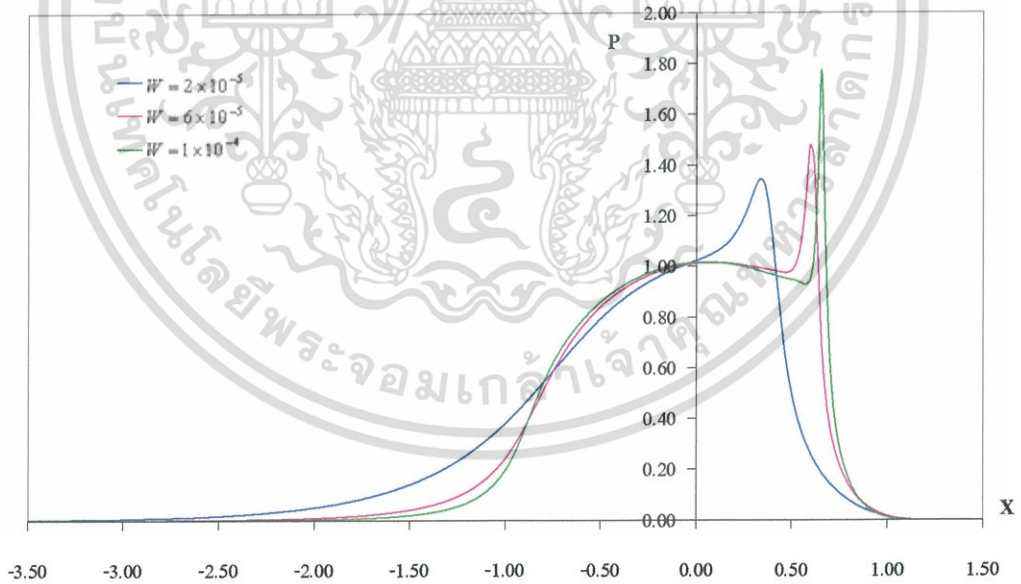


รูปที่ 6.61 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

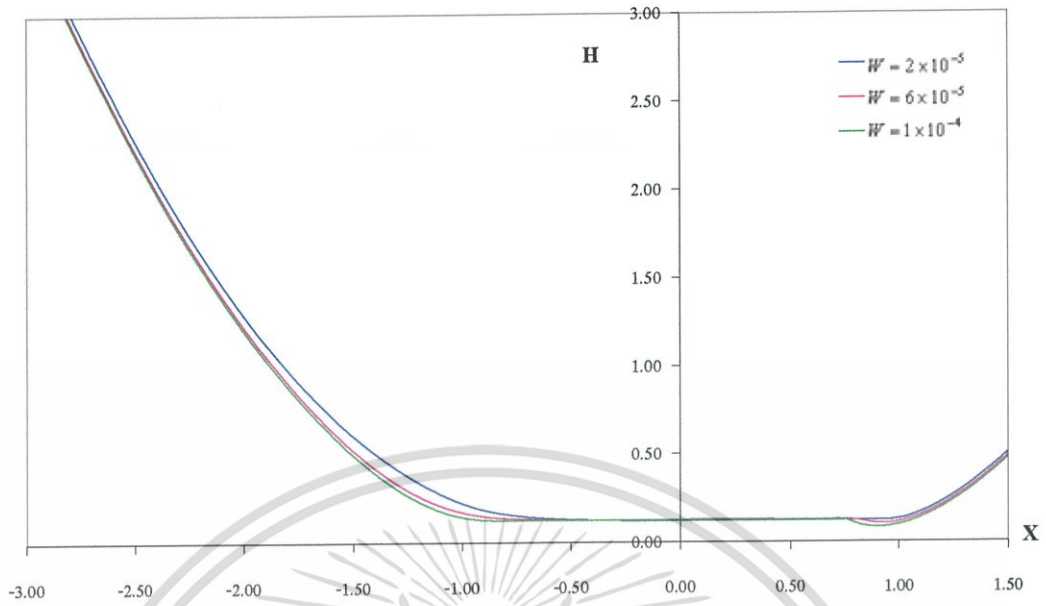


รูปที่ 6.62 กราฟความคั่นที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

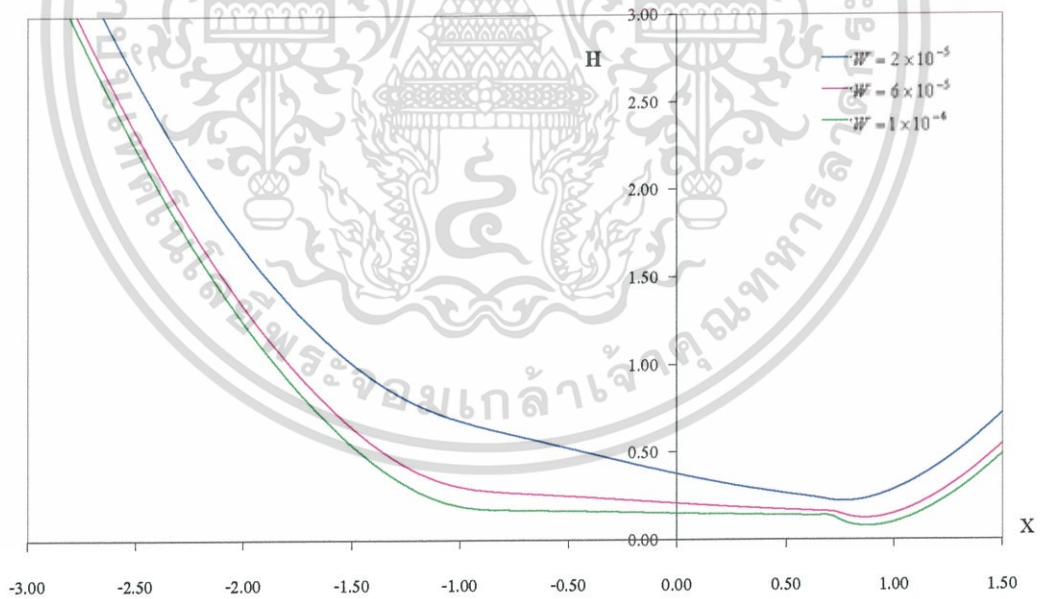


รูปที่ 6.63 กราฟความคั่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

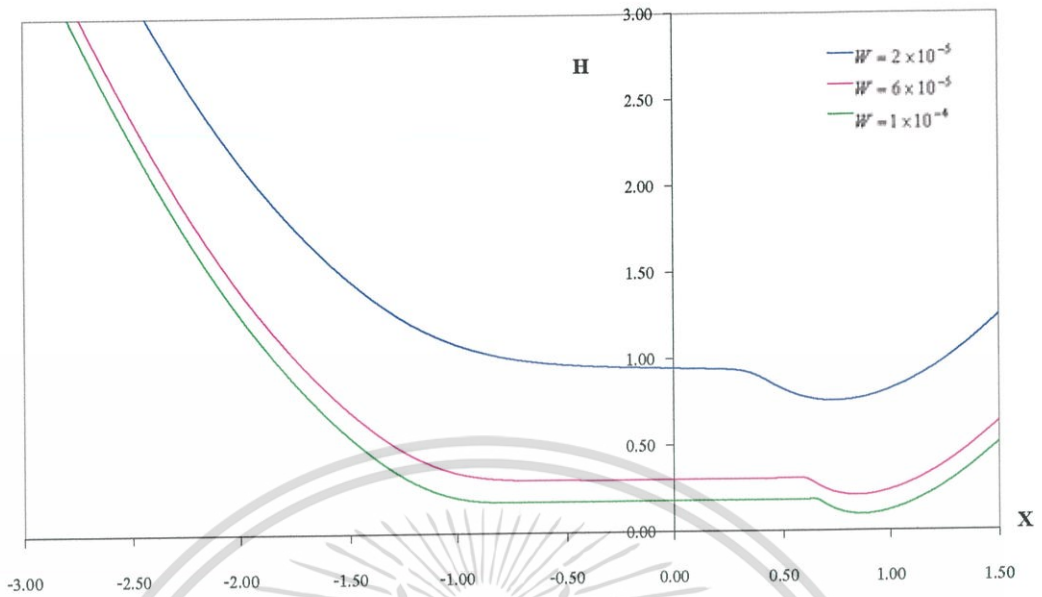


รูปที่ 6.64 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

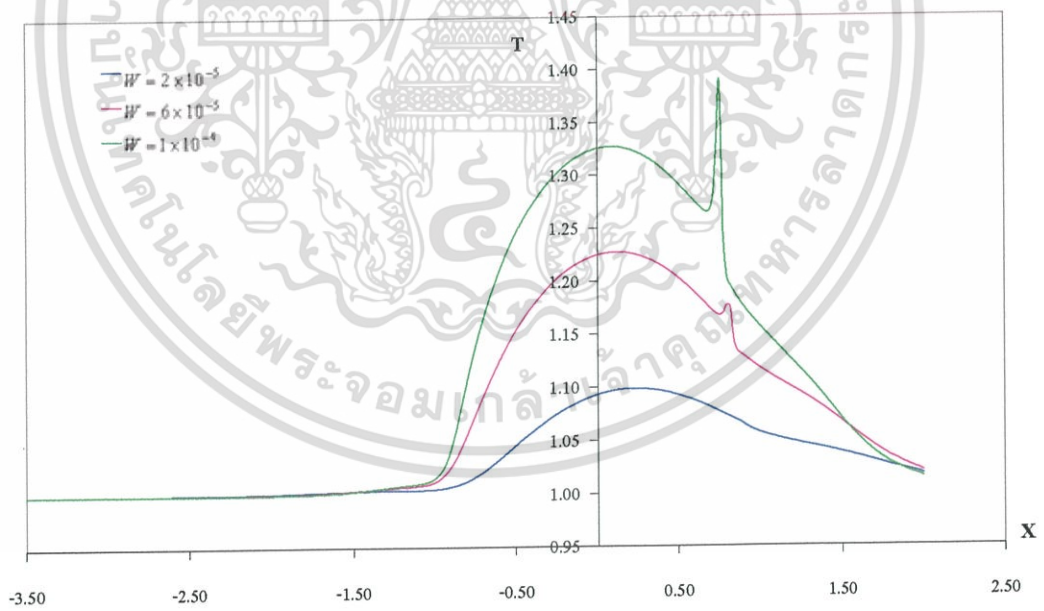


รูปที่ 6.65 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

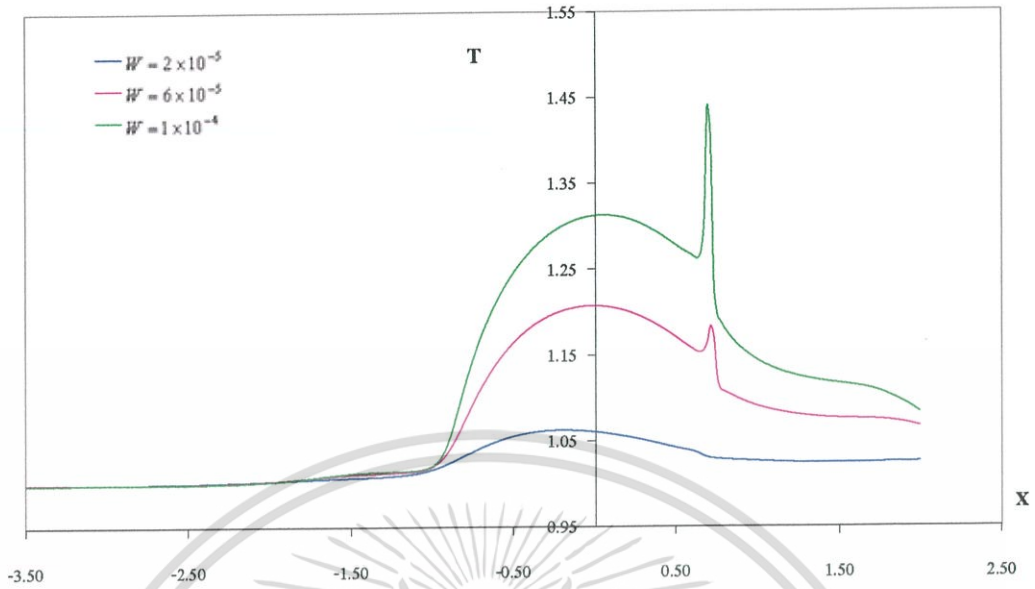


รูปที่ 6.66 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

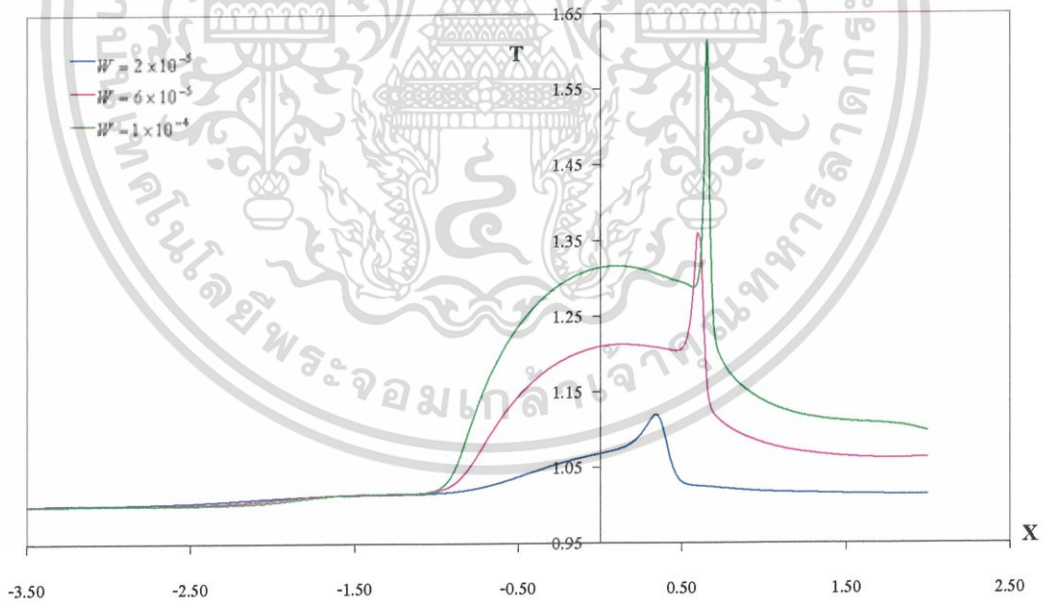


รูปที่ 6.67 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

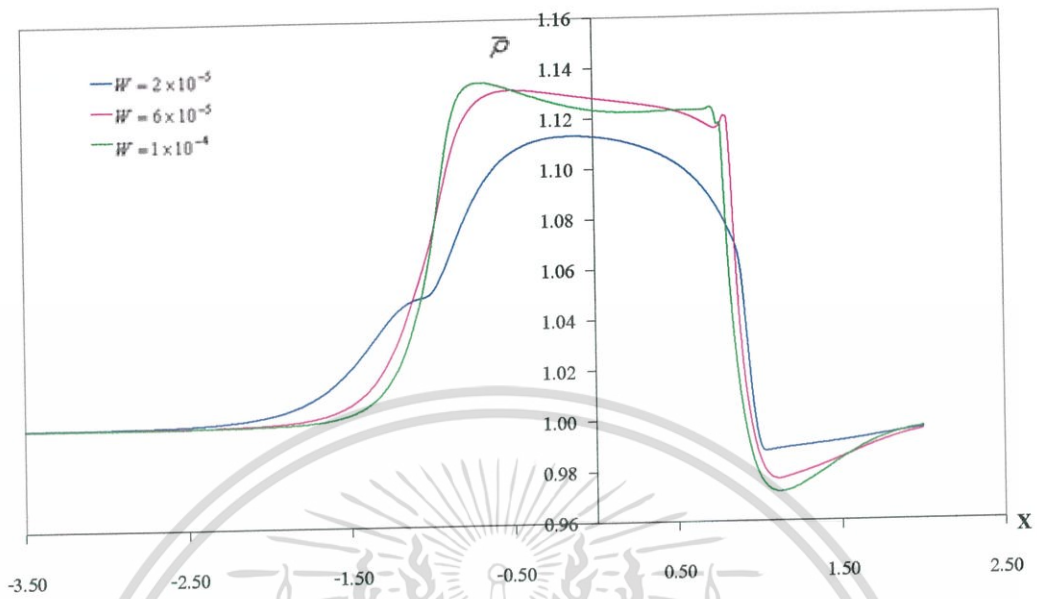


รูปที่ 6.68 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

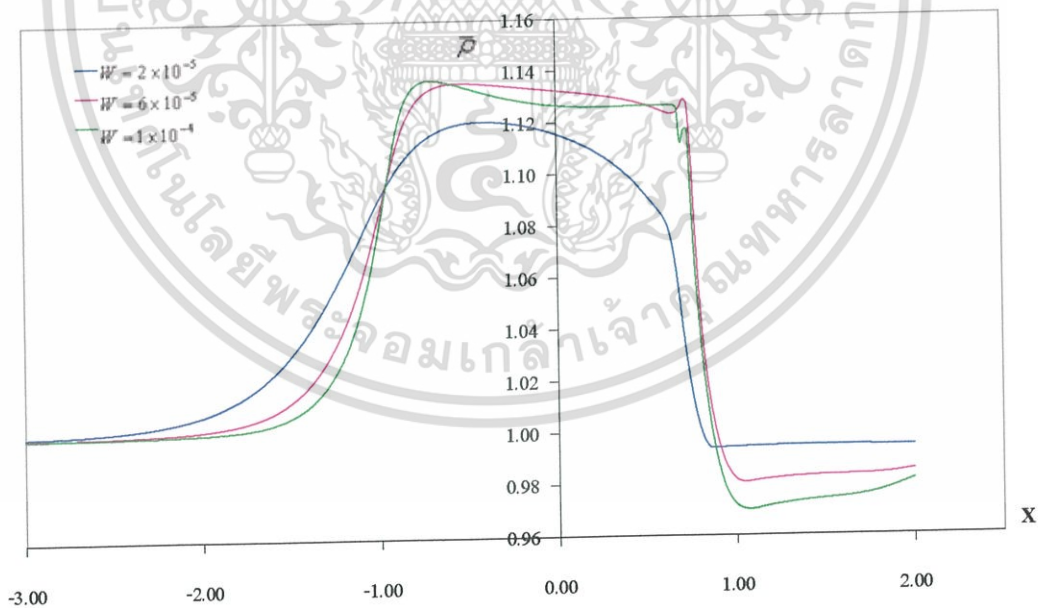


รูปที่ 6.69 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

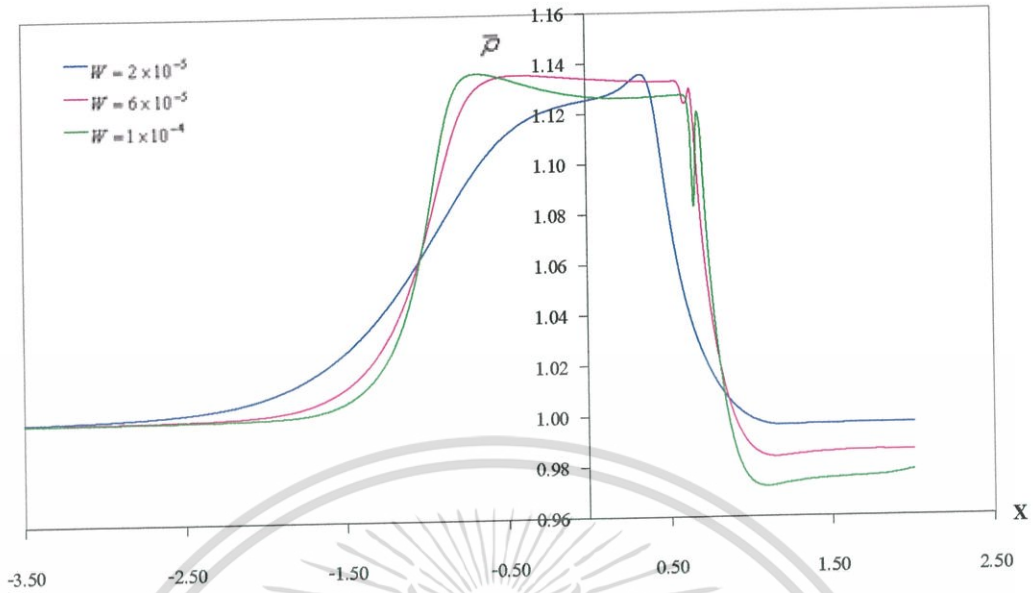


รูปที่ 6.70 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

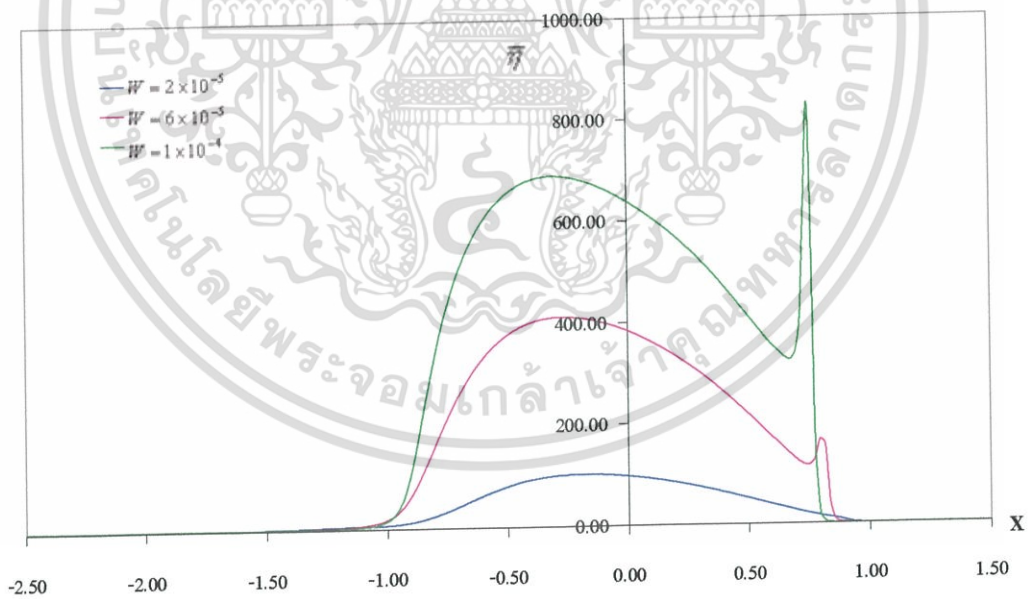


รูปที่ 6.71 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

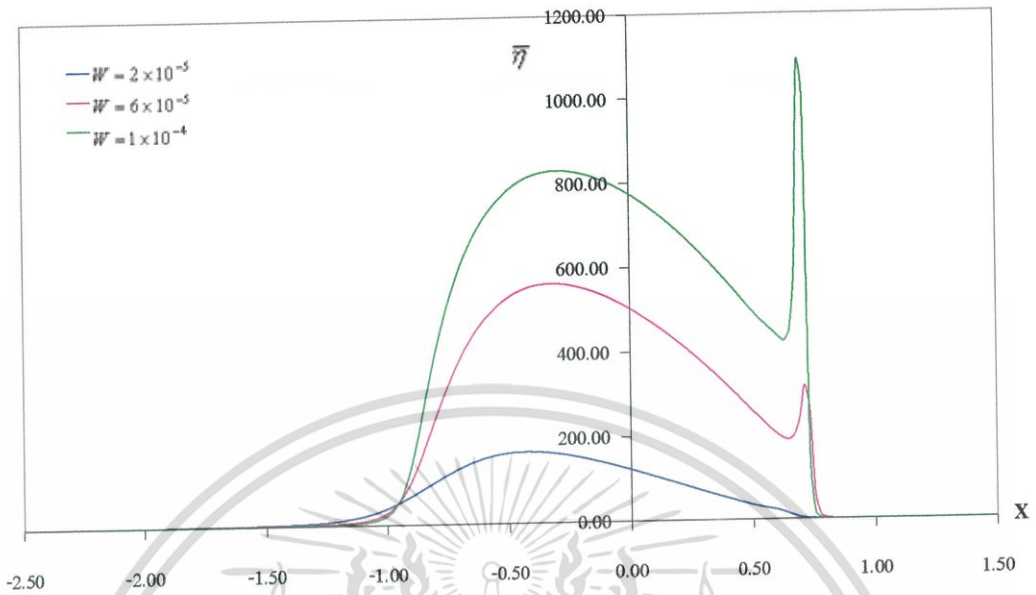


รูปที่ 6.72 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

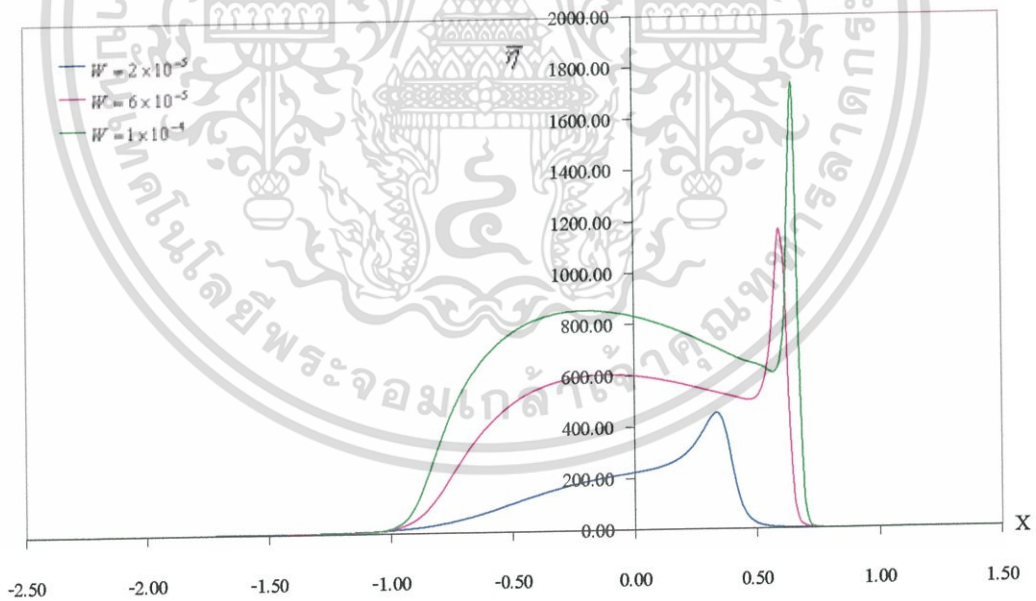


รูปที่ 6.73 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

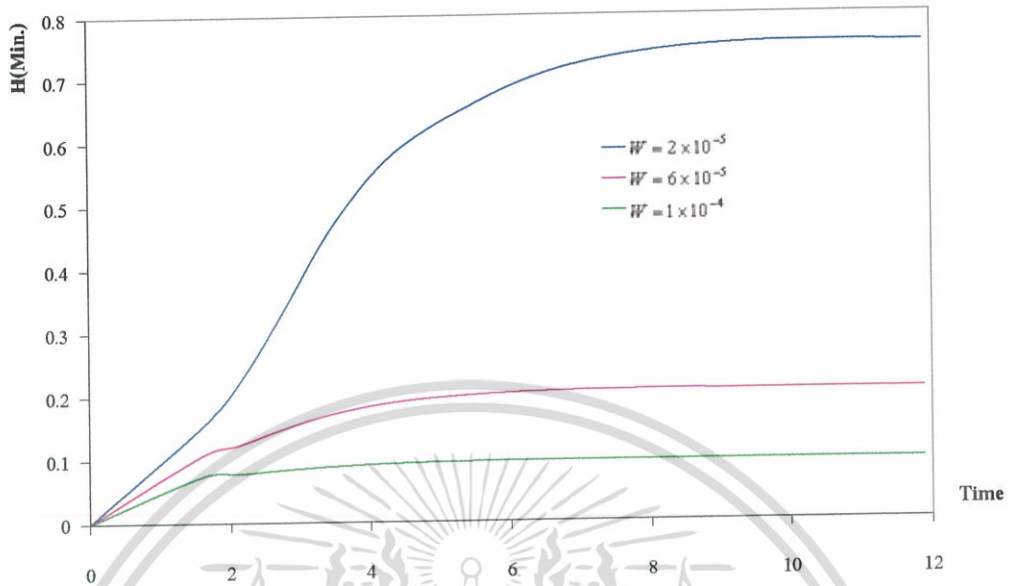


รูปที่ 6.74 กราฟความหนืดที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

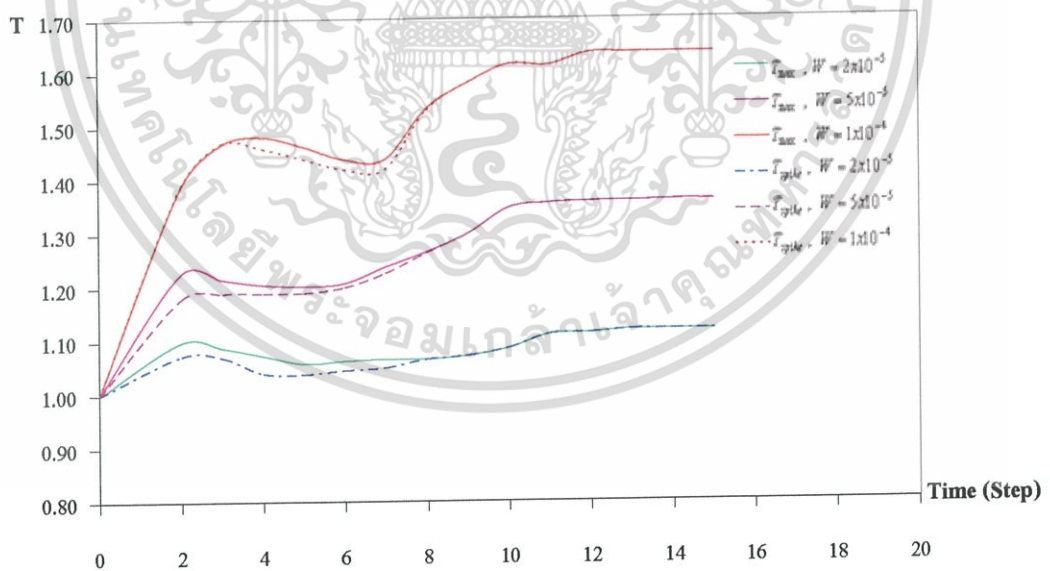


รูปที่ 6.75 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

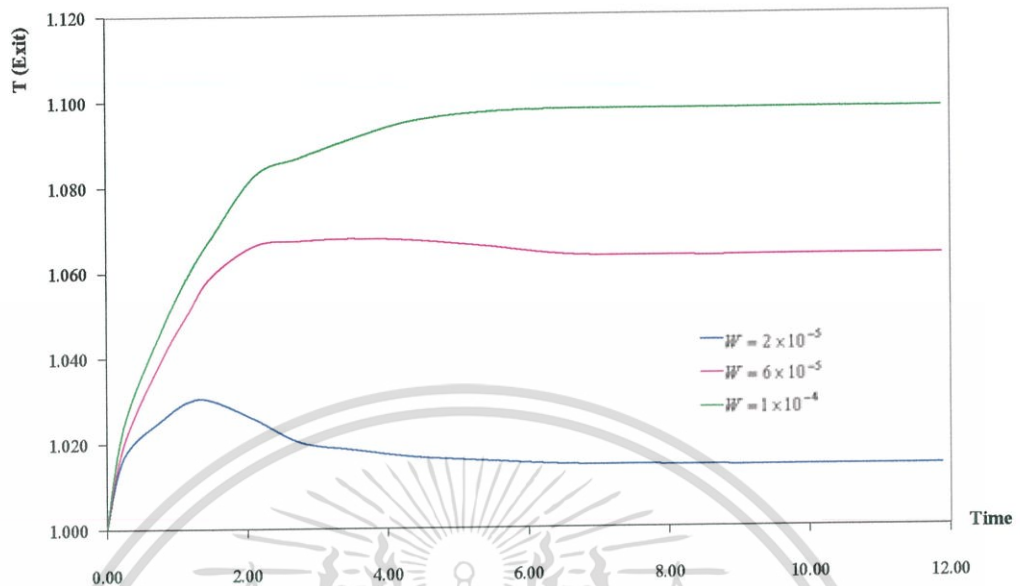


รูปที่ 6.76 กราฟความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

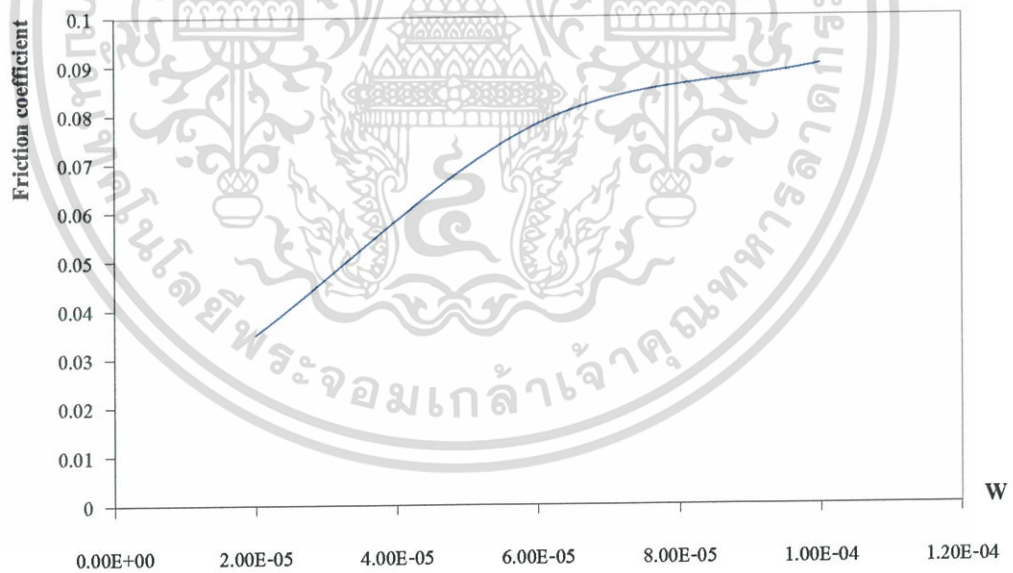


รูปที่ 6.77 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดเกิดขดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



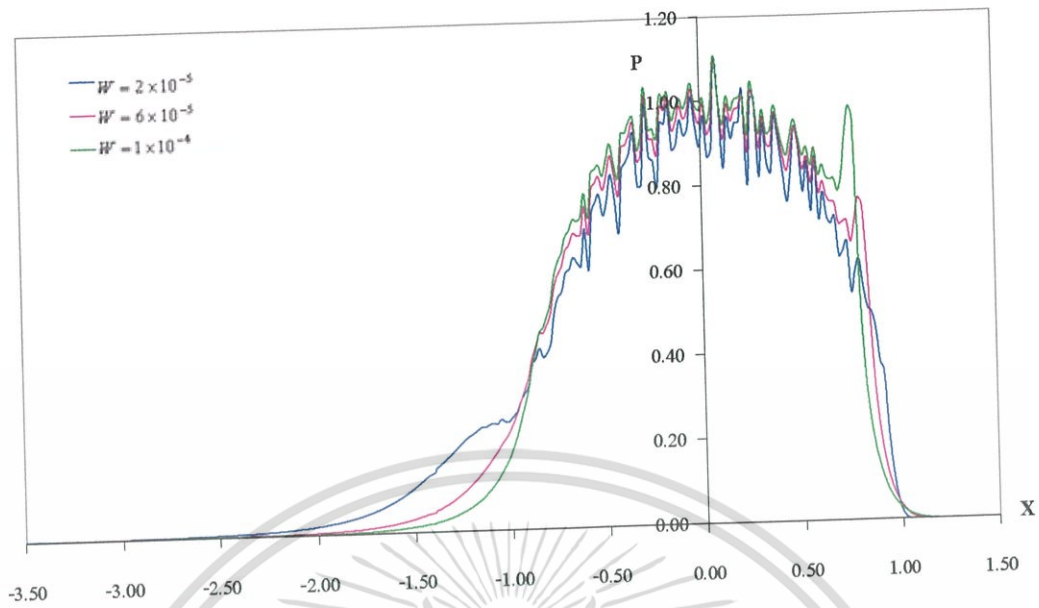
รูปที่ 6.78 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ , SAE40,  $S = 0$ .



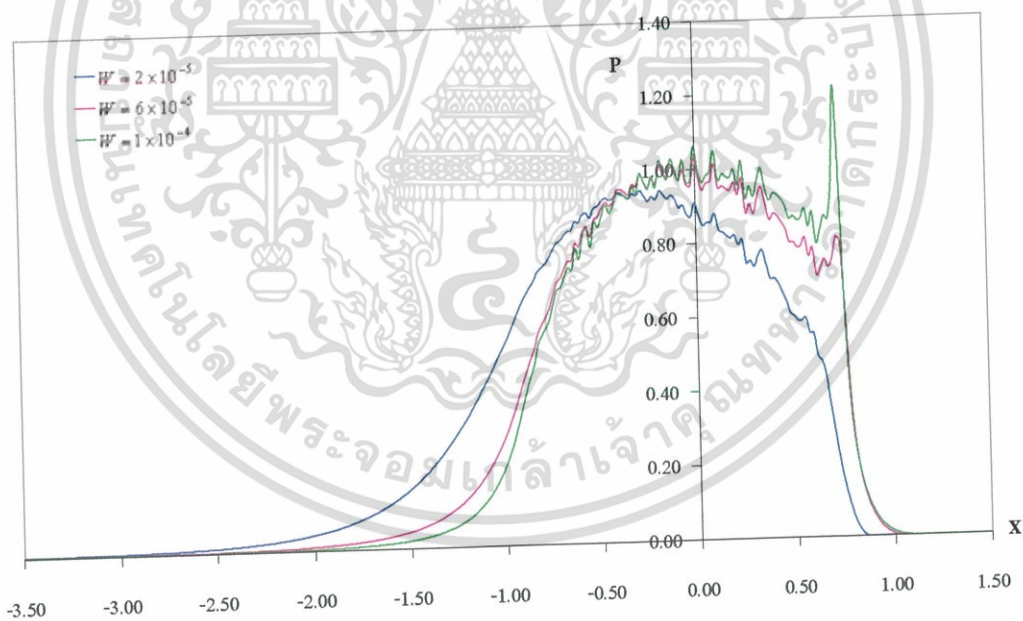
รูปที่ 6.79 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ , SAE40,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.2.2 กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบโมเดล 1 และแผ่นเพลทโมเดล 2

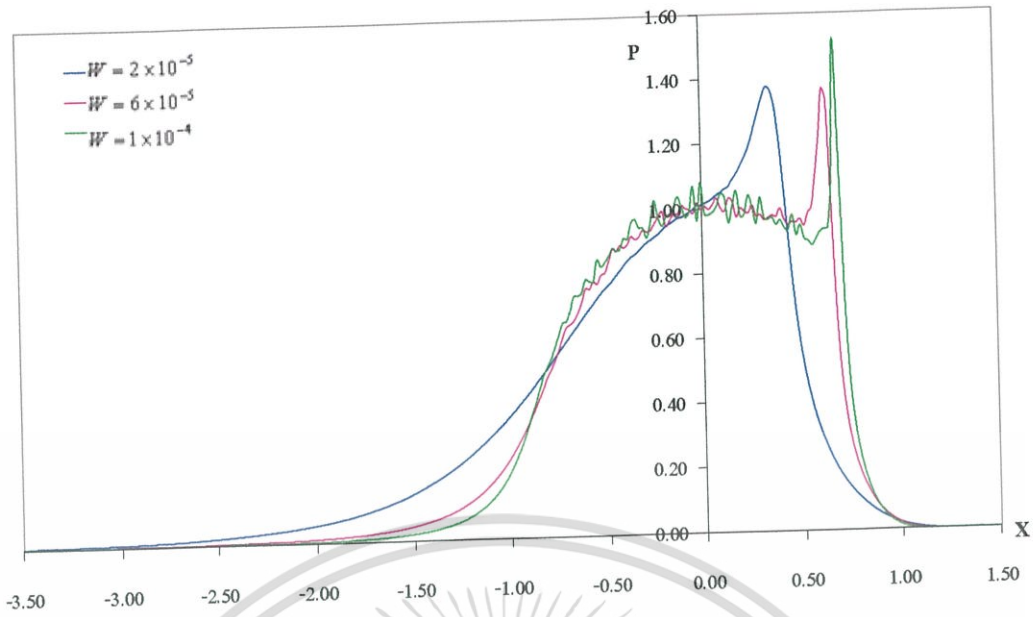


รูปที่ 6.80 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ , SAE40,  $S = 0$ .

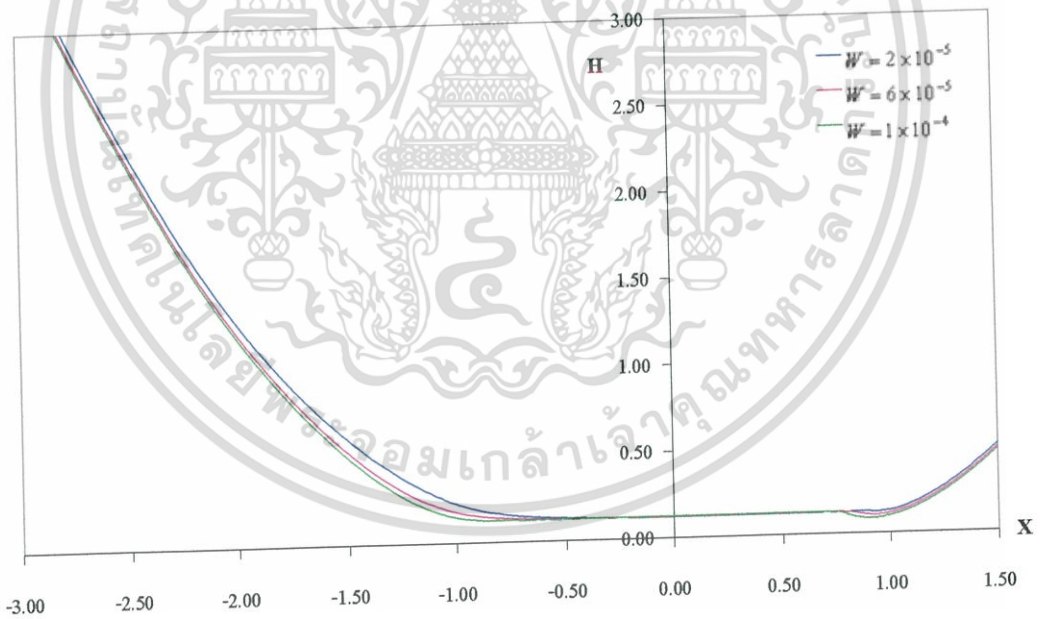


รูปที่ 6.81 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ , SAE40,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

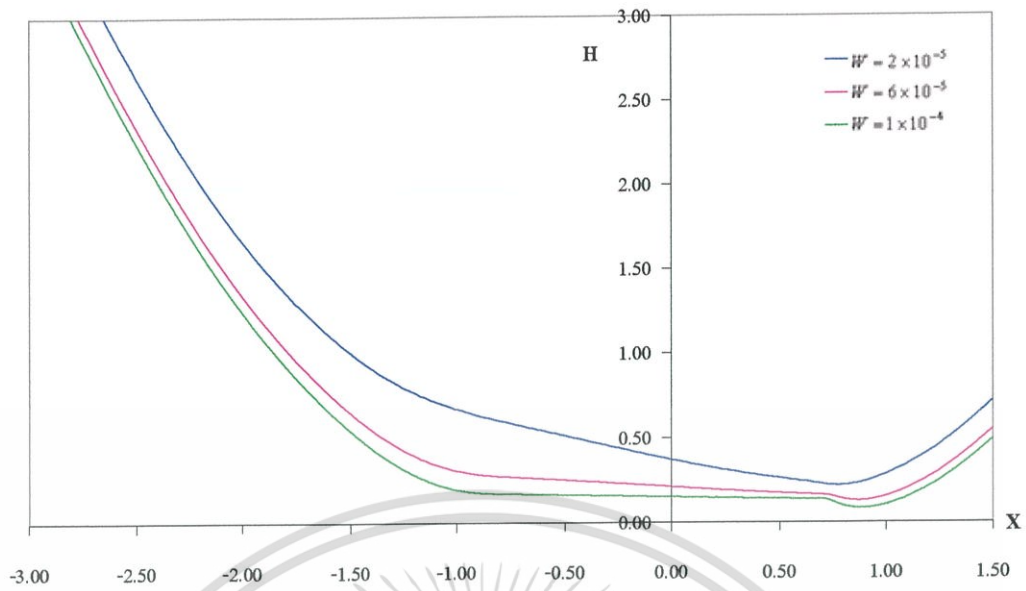


รูปที่ 6.82 กราฟความดันที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

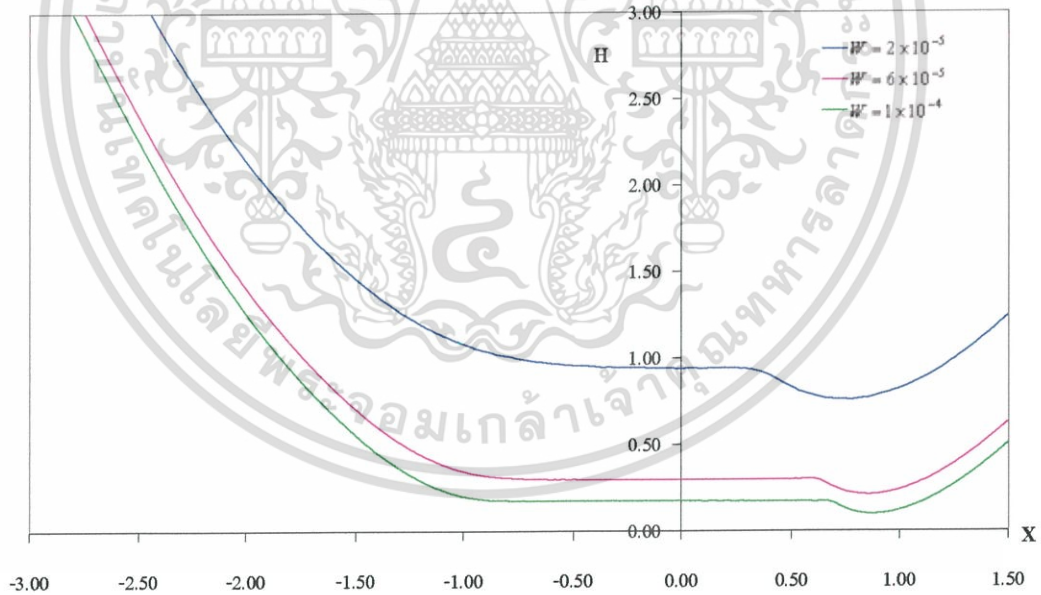


รูปที่ 6.83 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

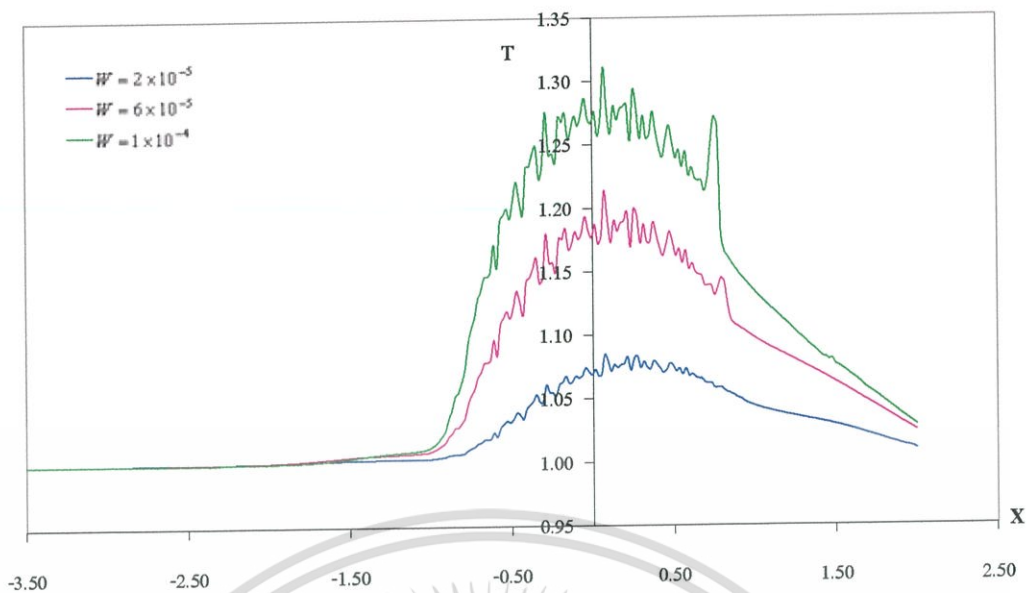


รูปที่ 6.84 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาเริ่มคิดที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

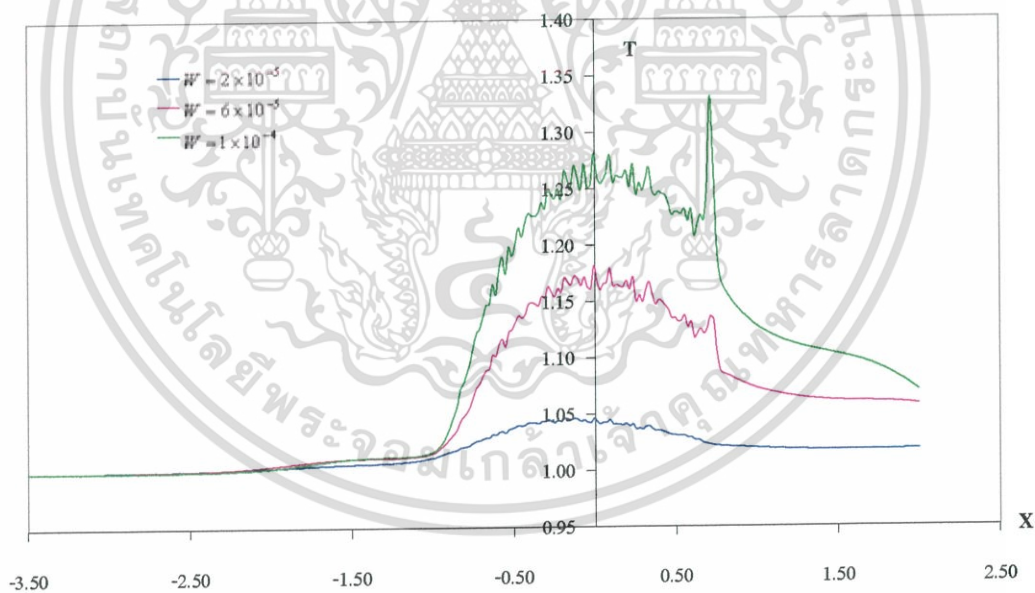


รูปที่ 6.85 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

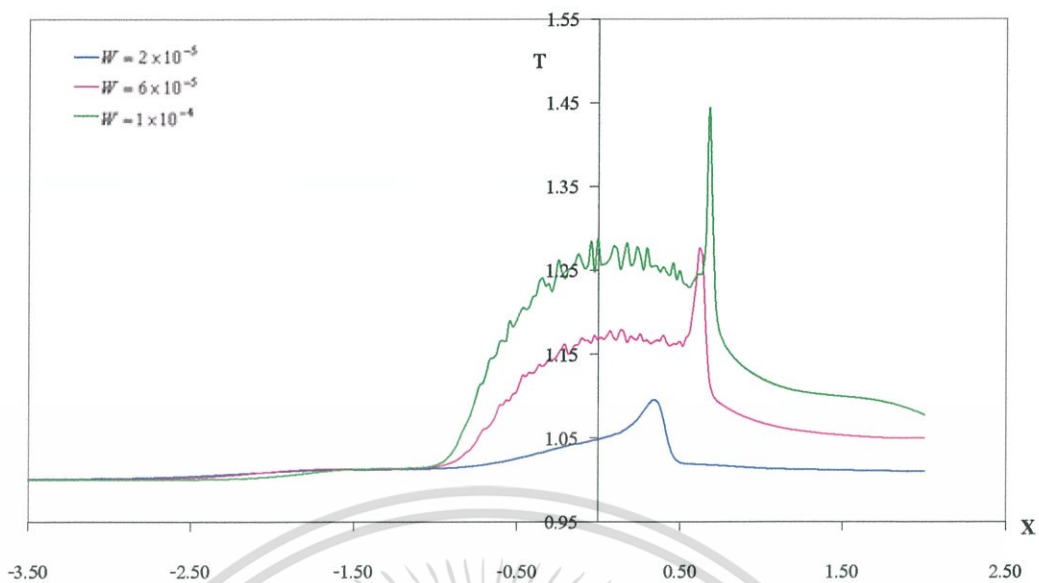


รูปที่ 6.86 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

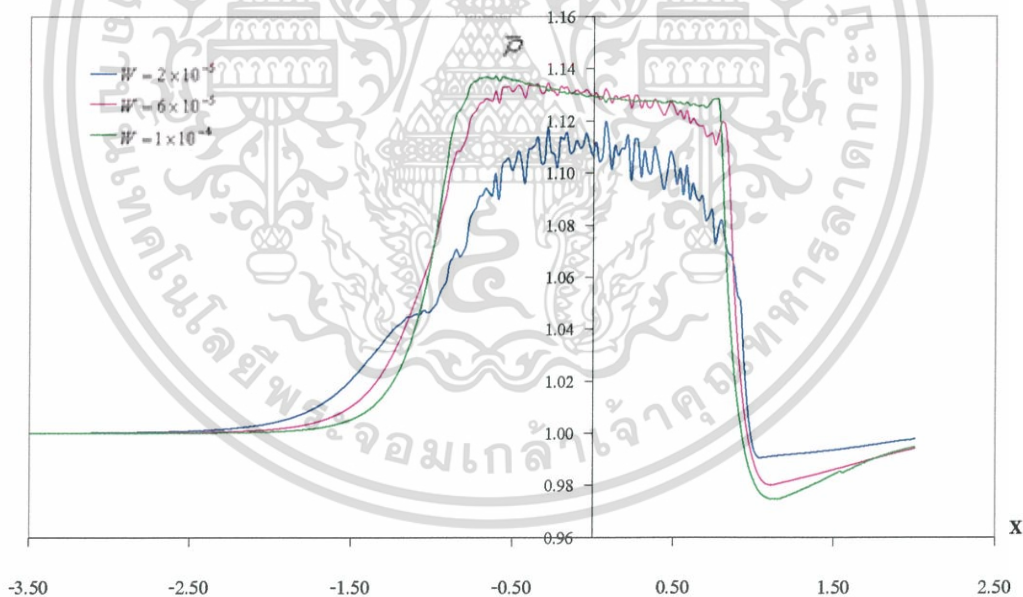


รูปที่ 6.87 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

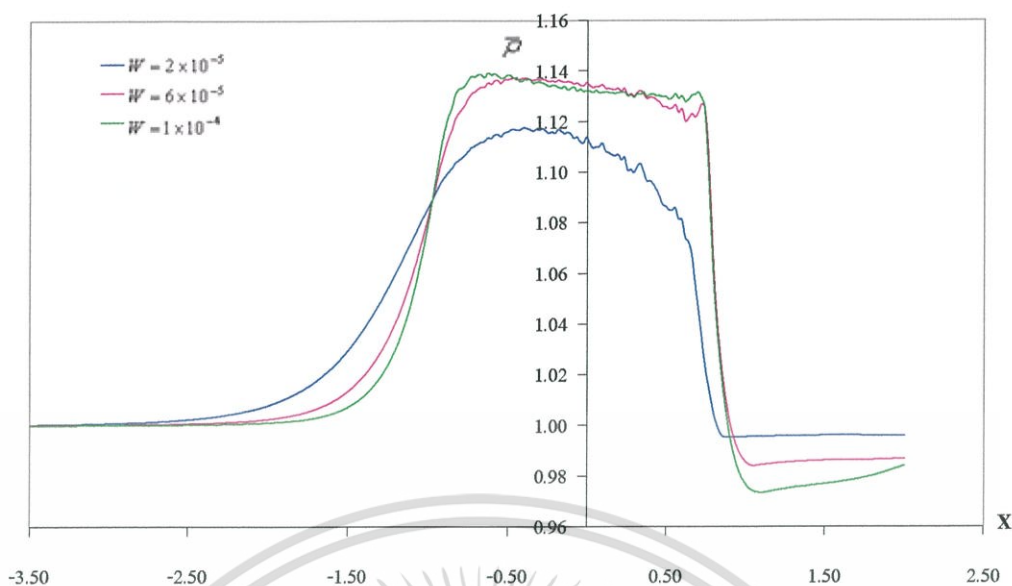


รูปที่ 6.88 กราฟอุณหภูมิที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

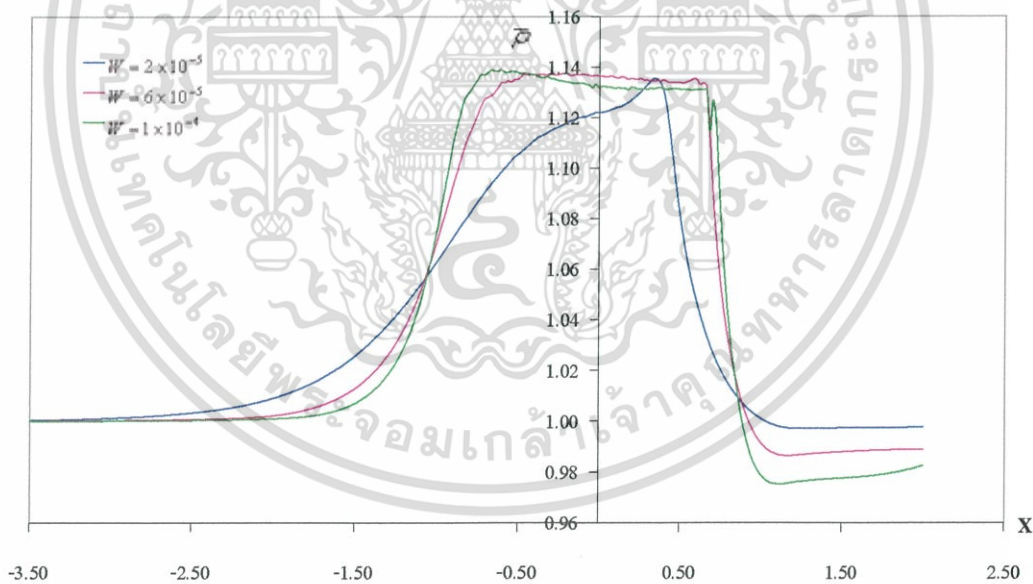


รูปที่ 6.89 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

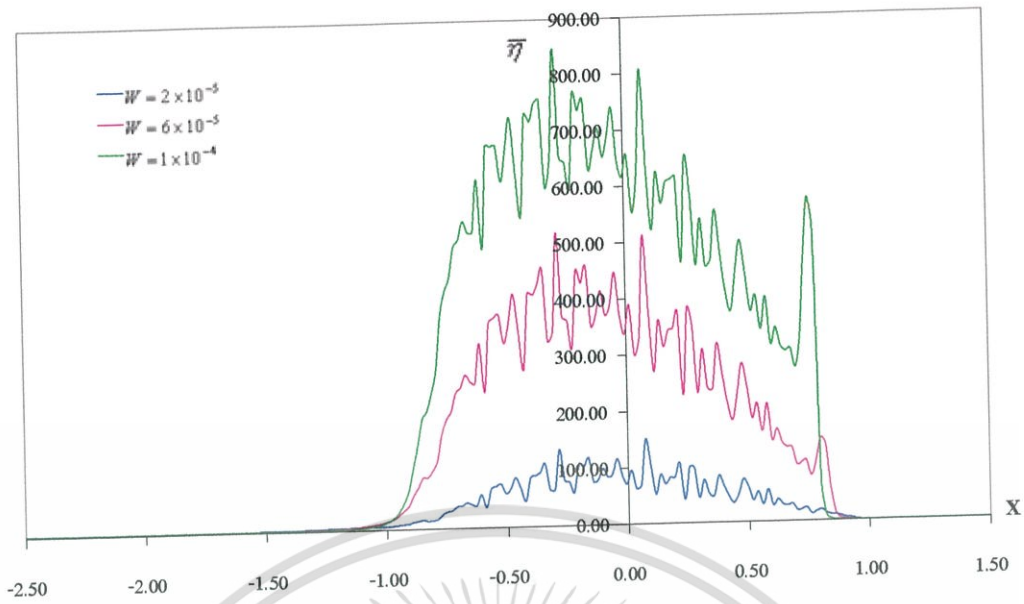


รูปที่ 6.90 กราฟความหนาแน่นที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

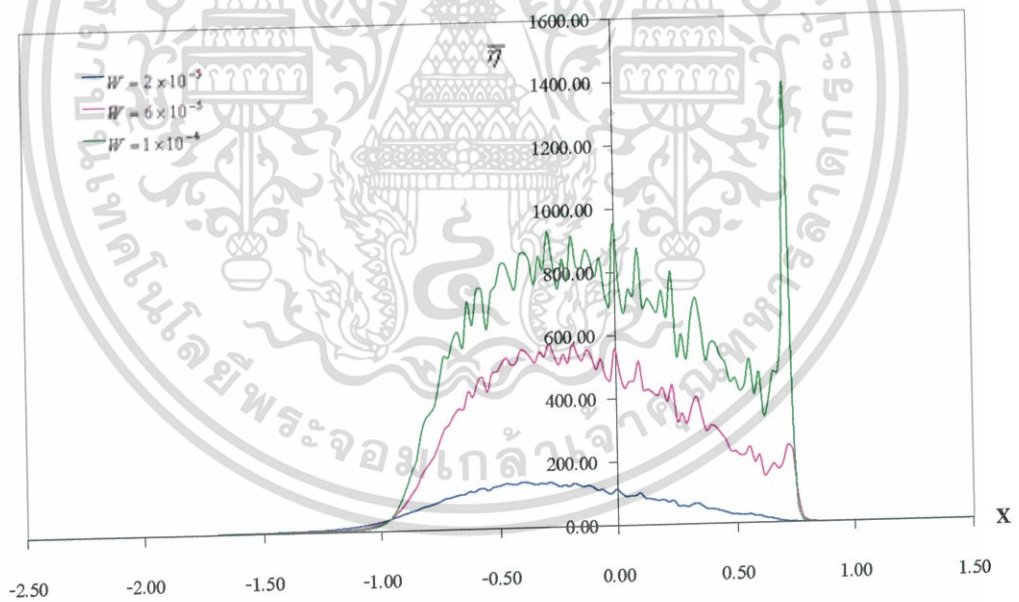


รูปที่ 6.91 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

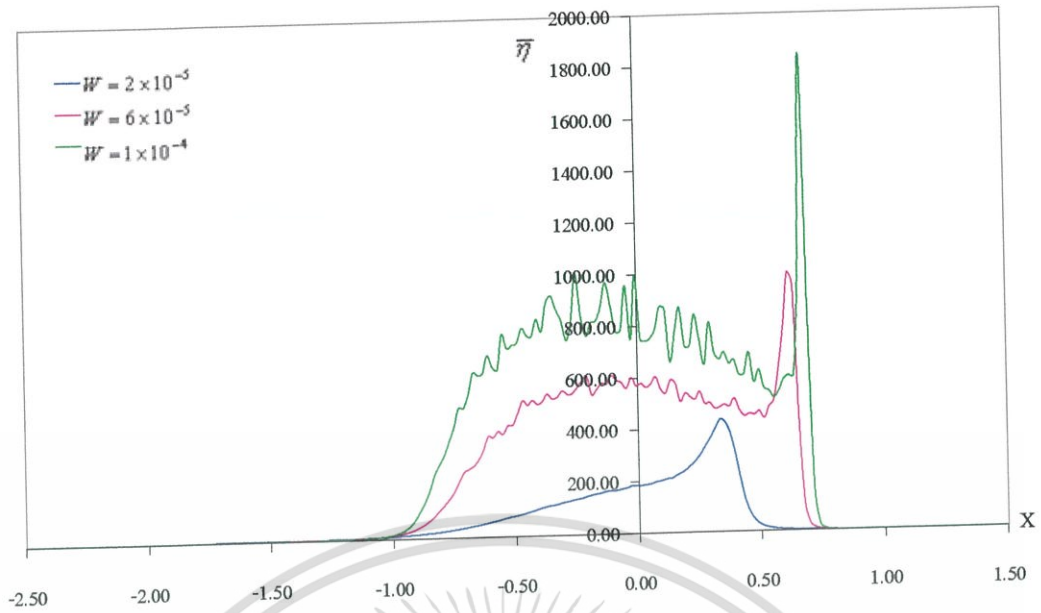


รูปที่ 6.92 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

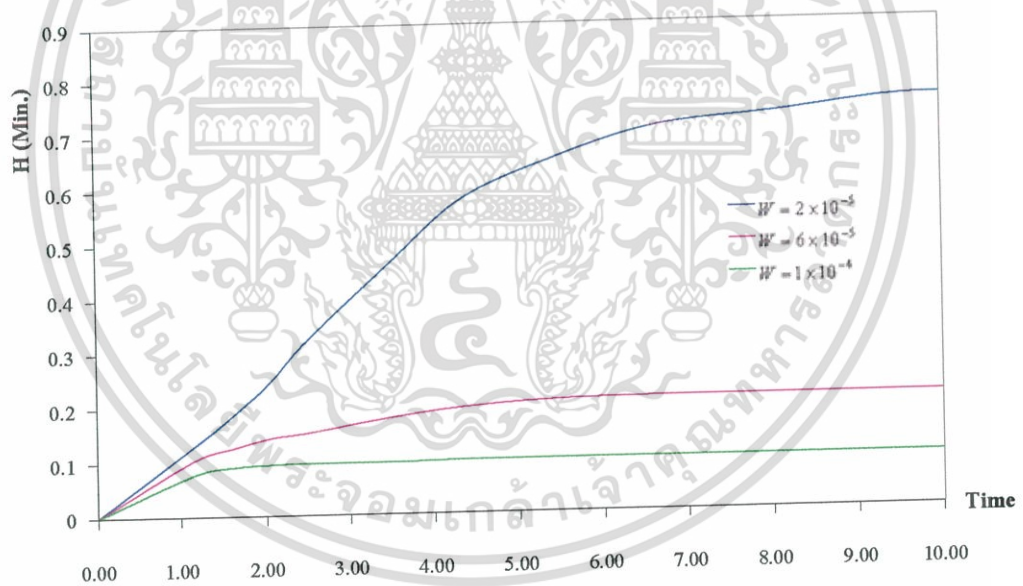


รูปที่ 6.93 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

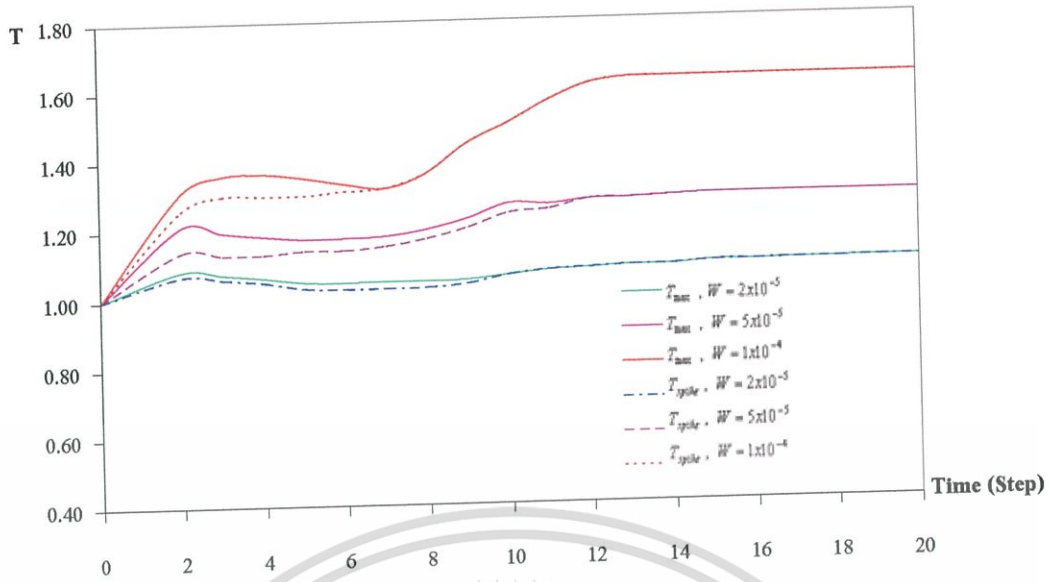


รูปที่ 6.94 กราฟความหนาที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

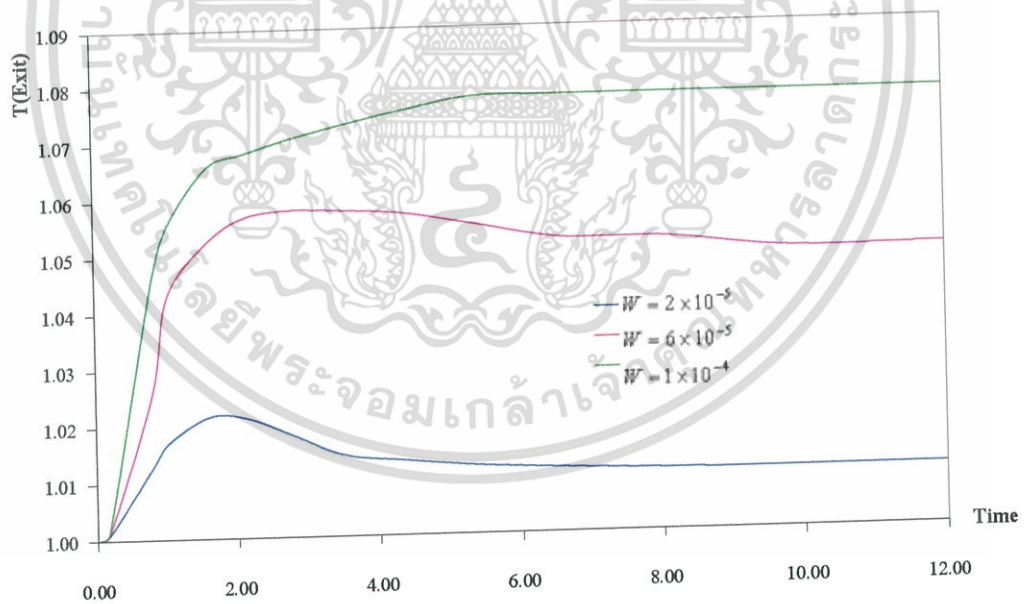


รูปที่ 6.95 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

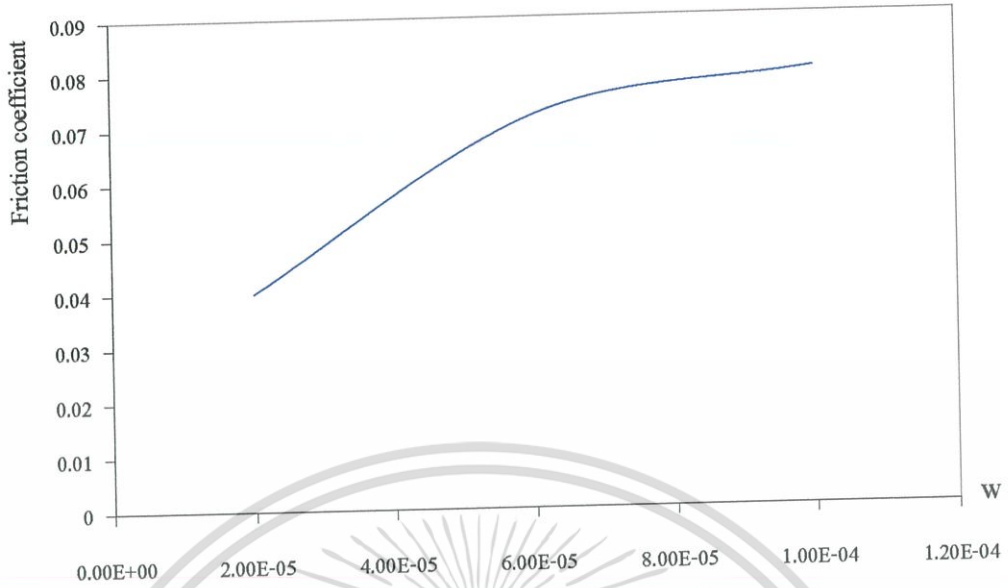


รูปที่ 6.96 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดเกิดขดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละภาวะ เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .



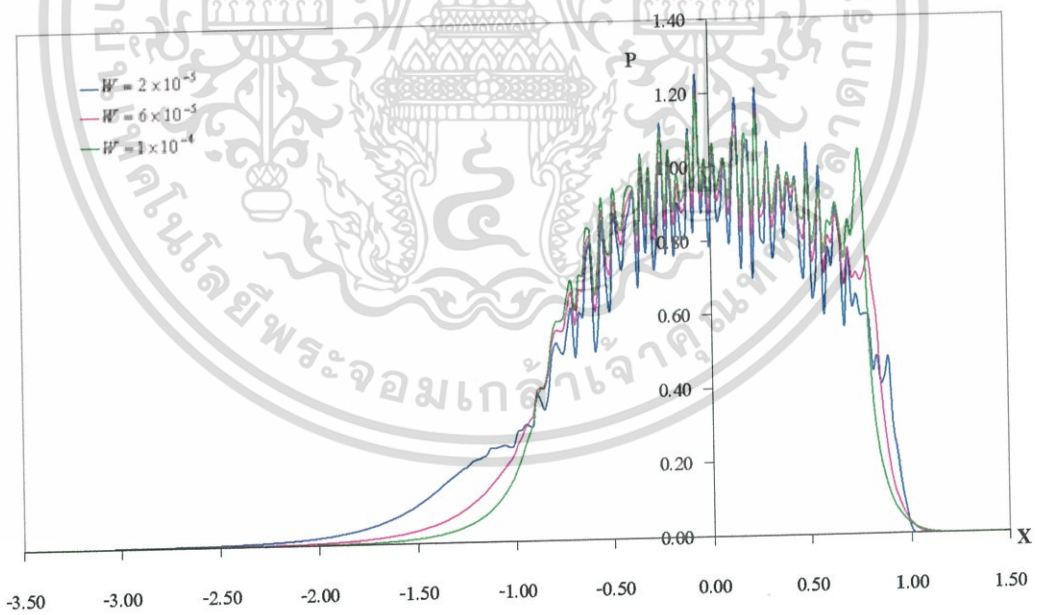
รูปที่ 6.97 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละภาวะ เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



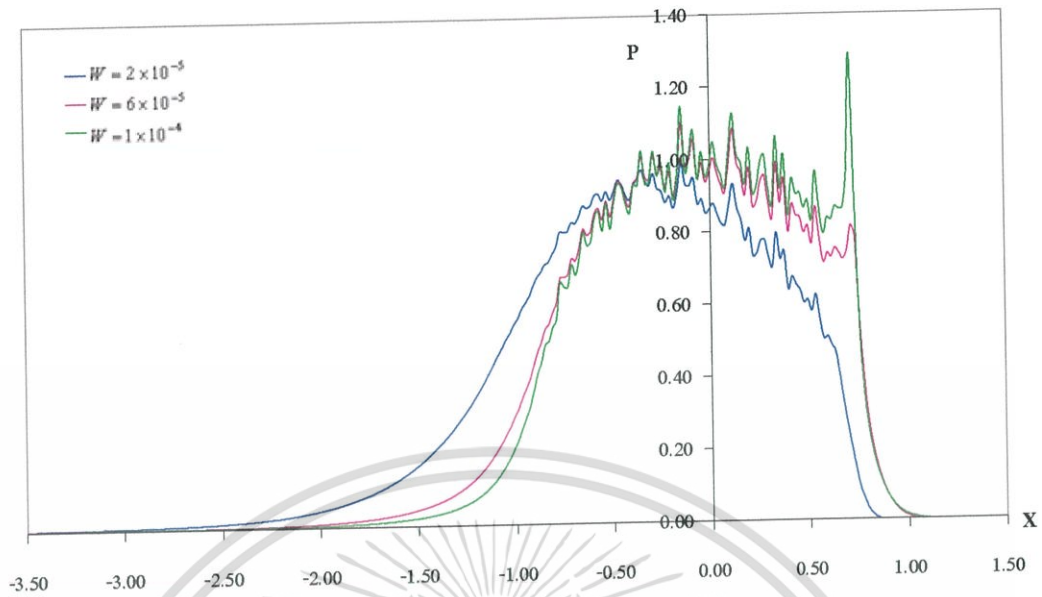
รูปที่ 6.98 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลง  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

#### 6.1.2.3 กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบโมเดล 3 และแผ่นเพลทโมเดล 4

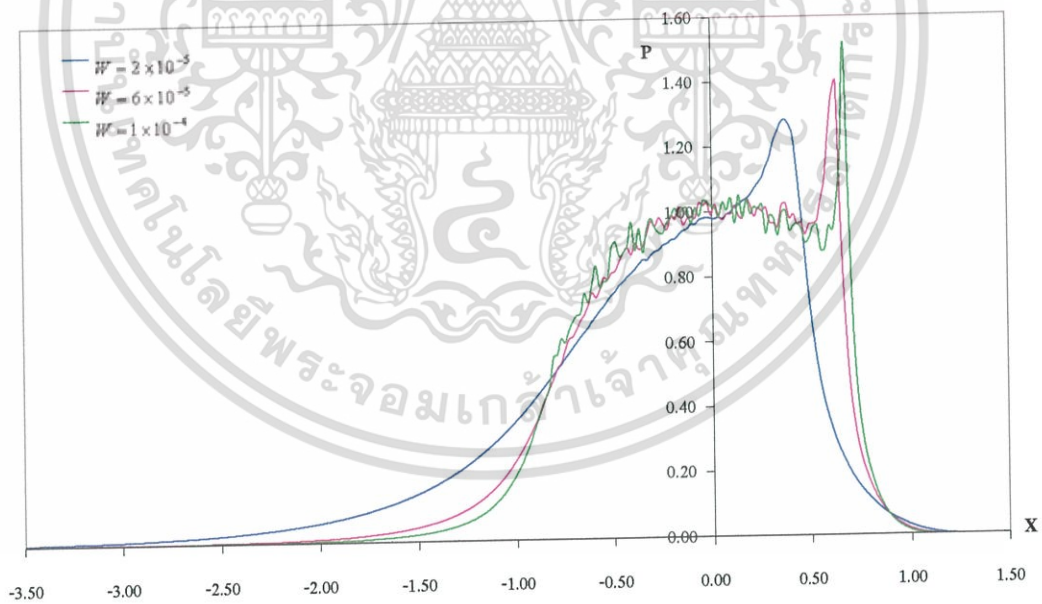


รูปที่ 6.99 กราฟความดันที่เวลาไรมิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

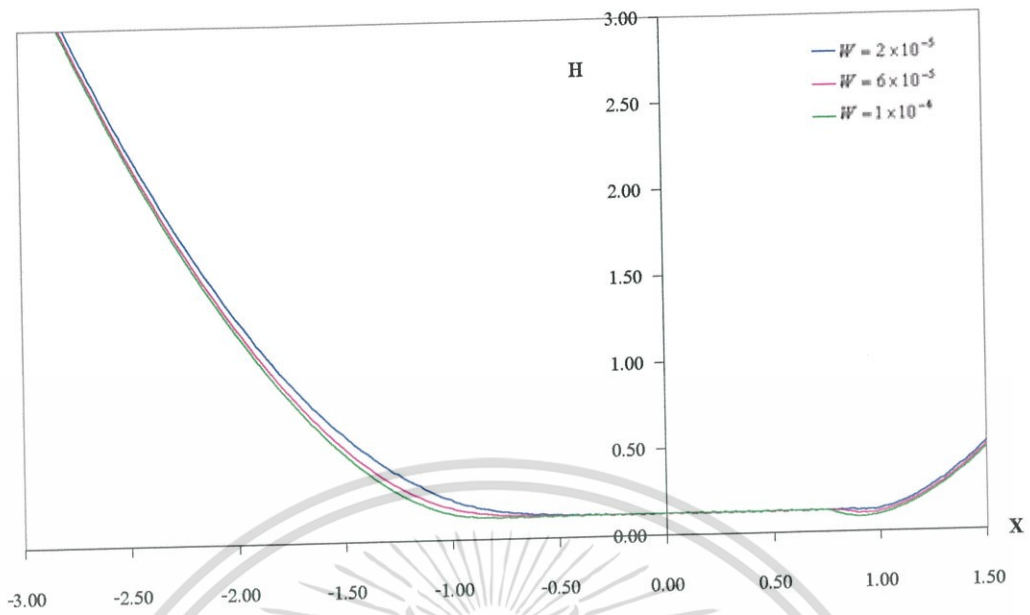


รูปที่ 6.100 กราฟความดันที่เวลาไรต์ที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

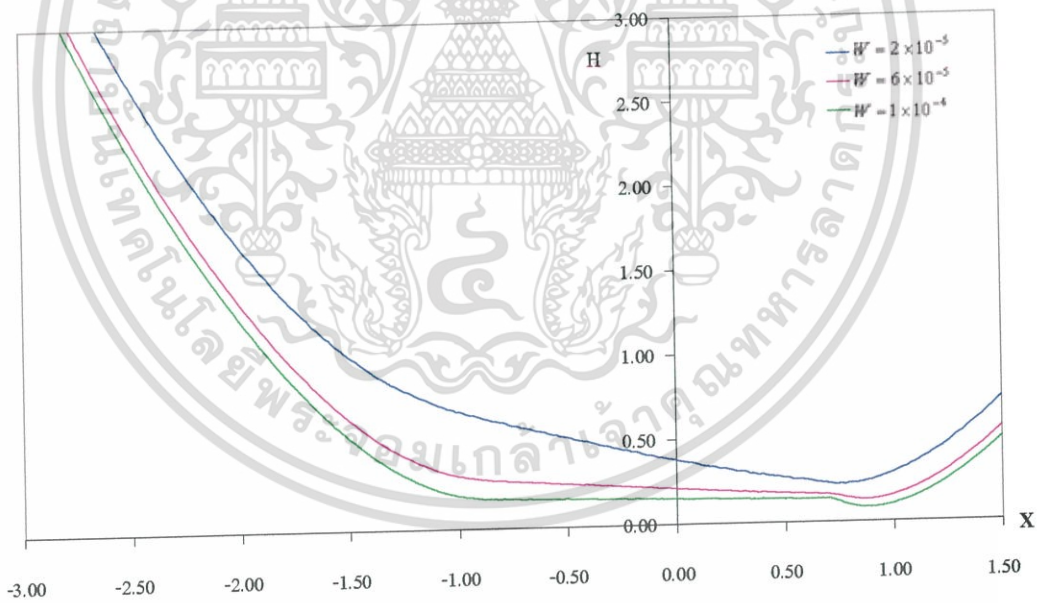


รูปที่ 6.101 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

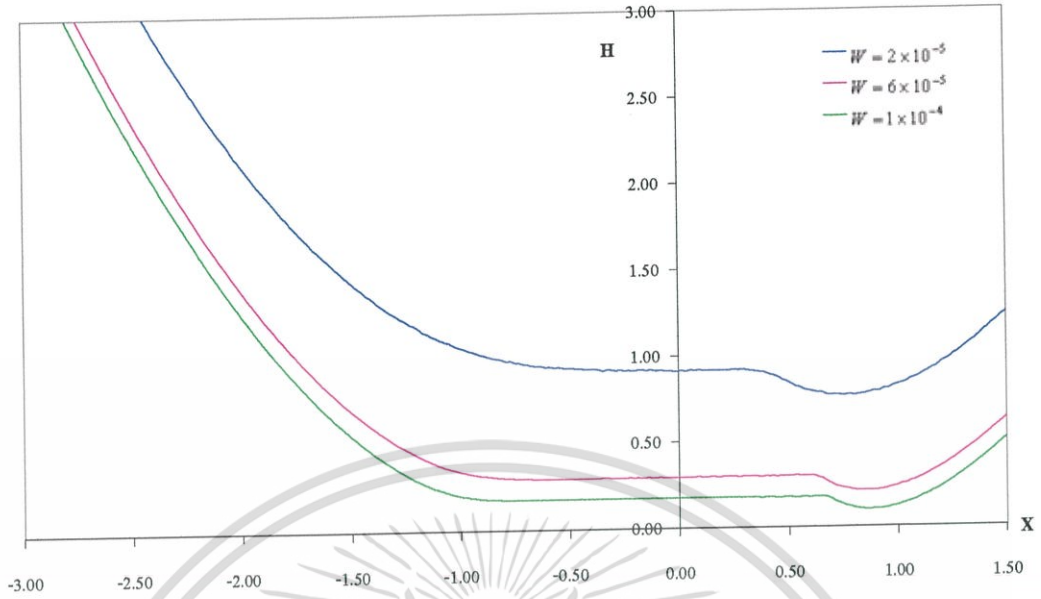


รูปที่ 6.102 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

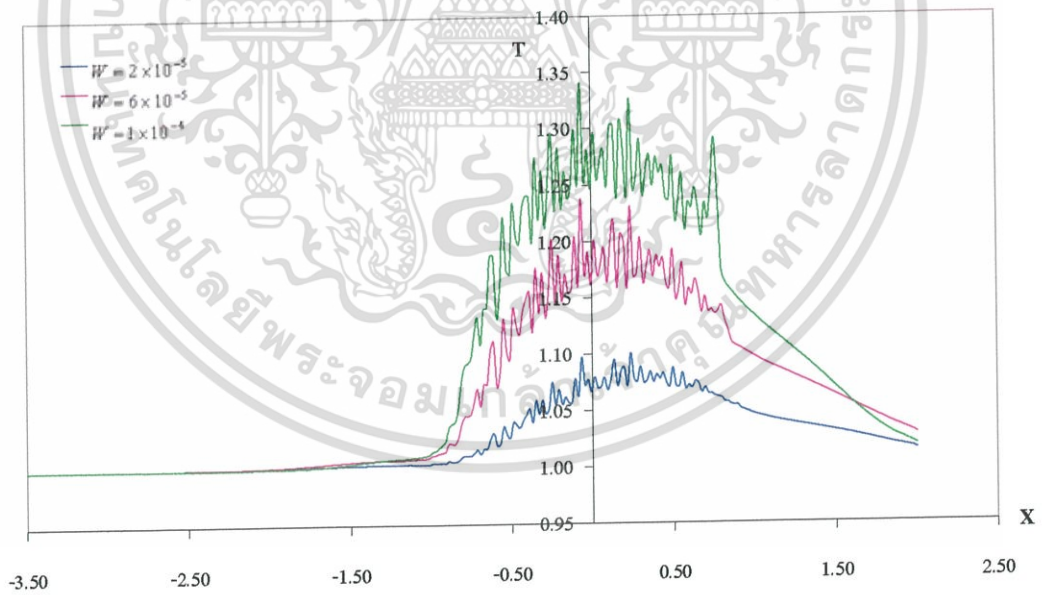


รูปที่ 6.103 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

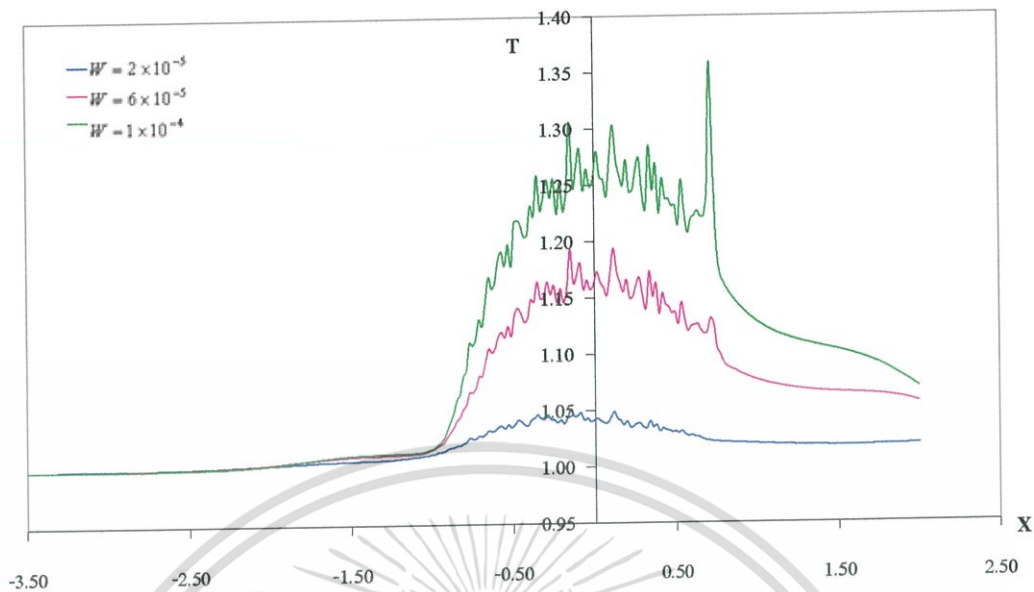


รูปที่ 6.104 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมมูล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

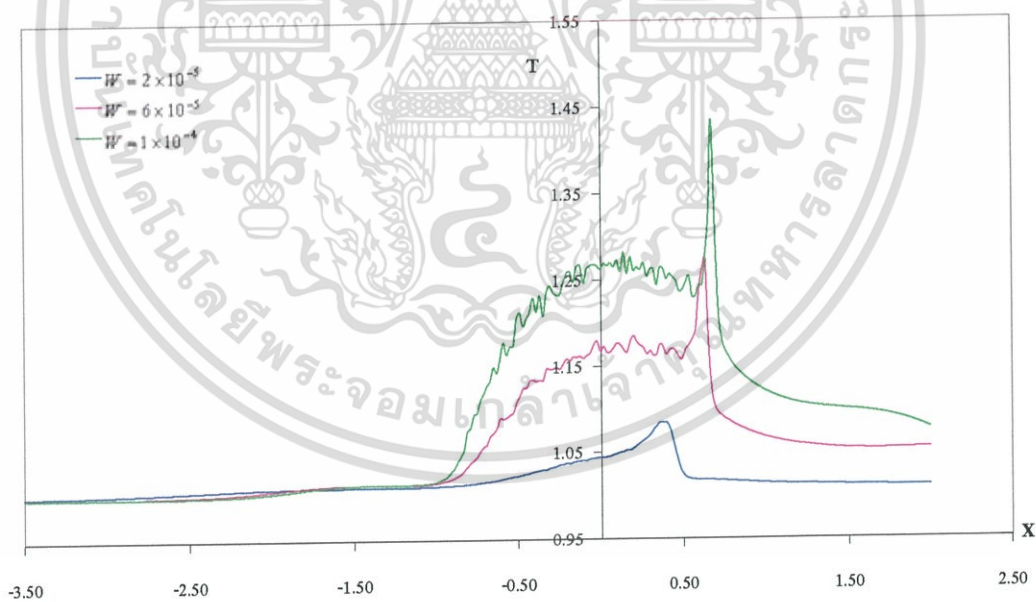


รูปที่ 6.105 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

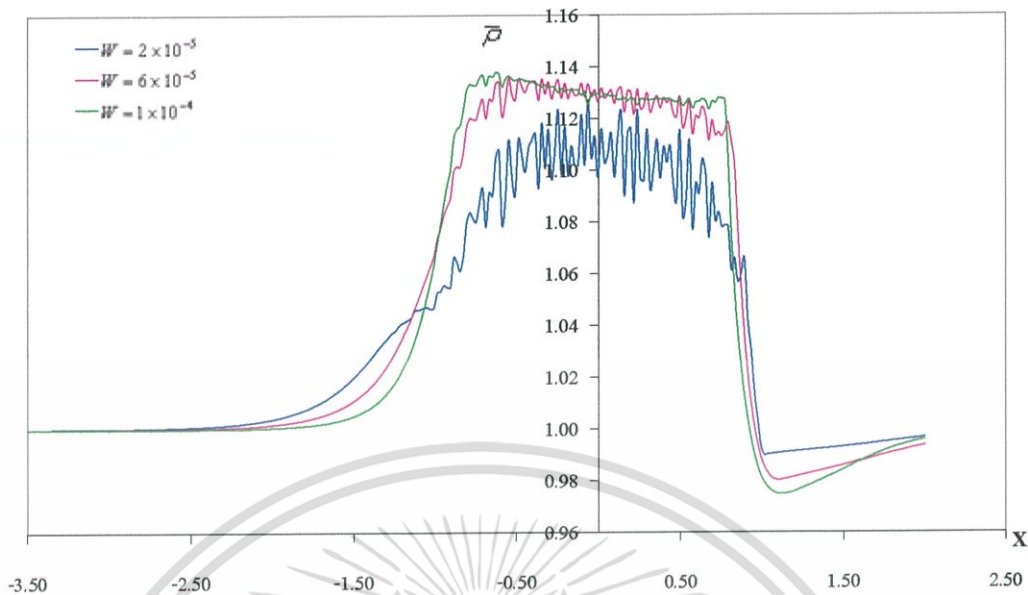


รูปที่ 6.106 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

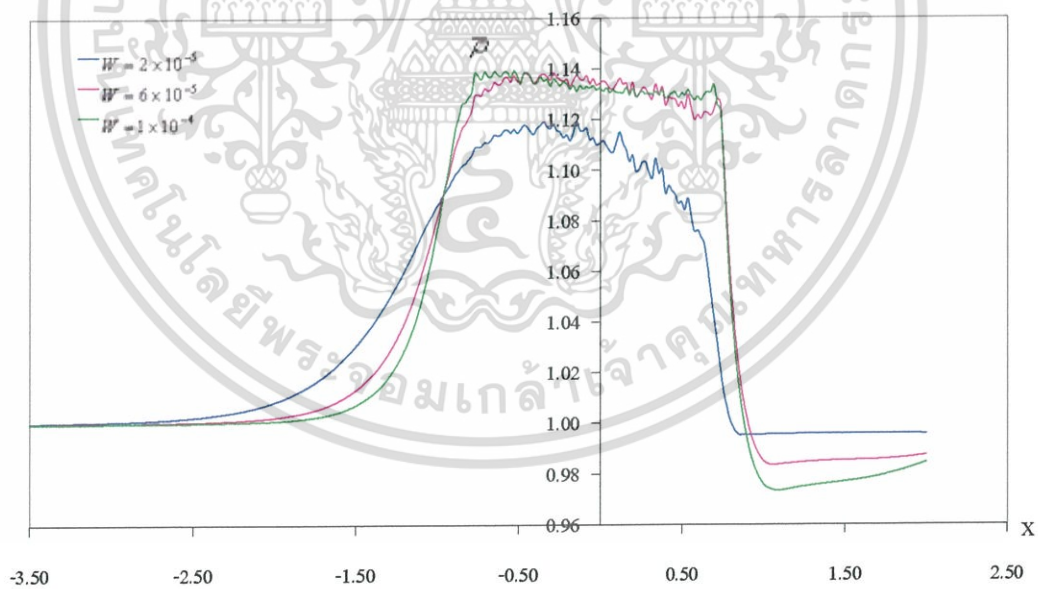


รูปที่ 6.107 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

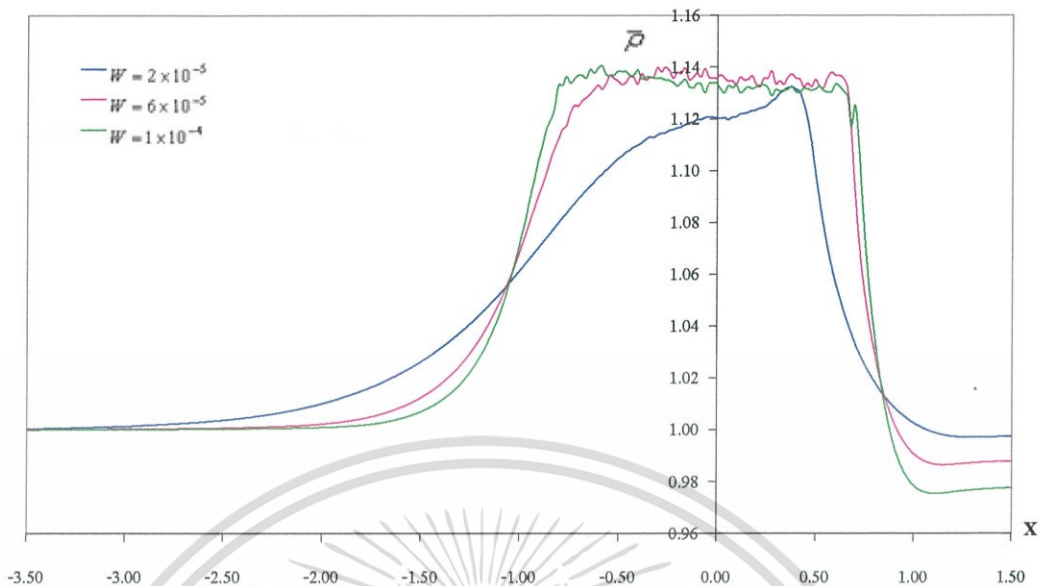


รูปที่ 6.108 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

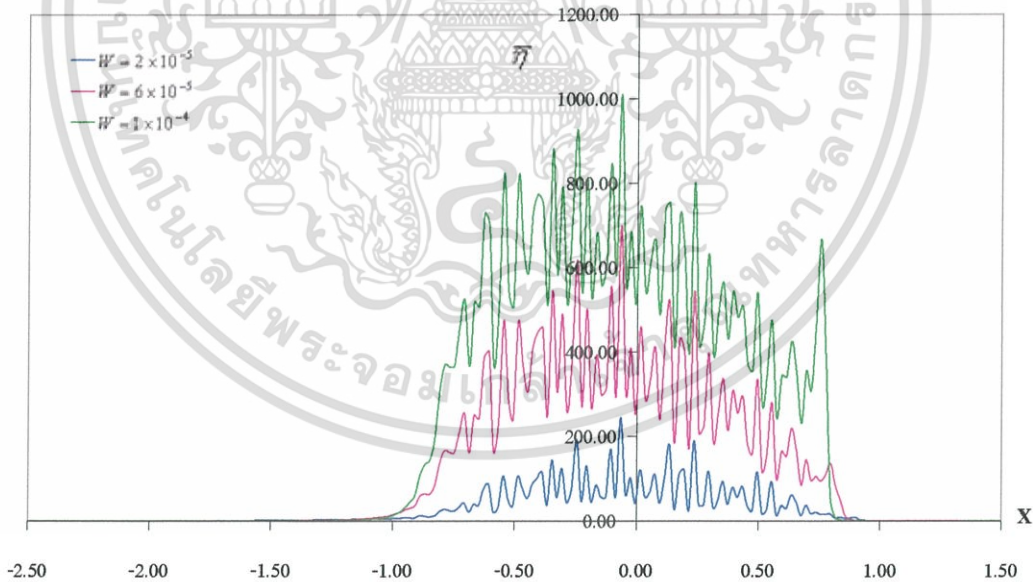


รูปที่ 6.109 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

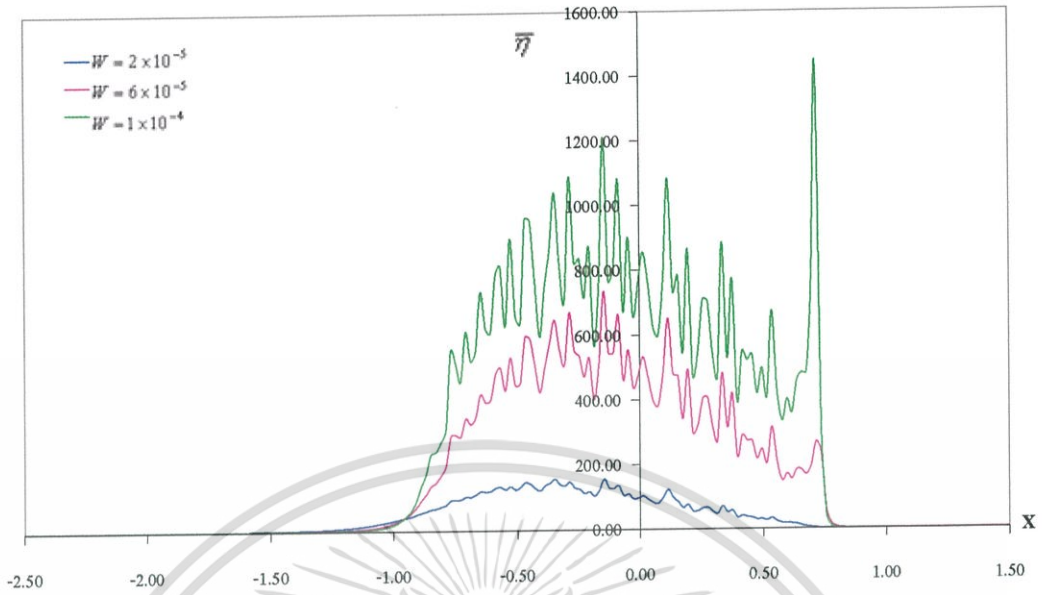


รูปที่ 6.110 กราฟความหนาแน่นที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

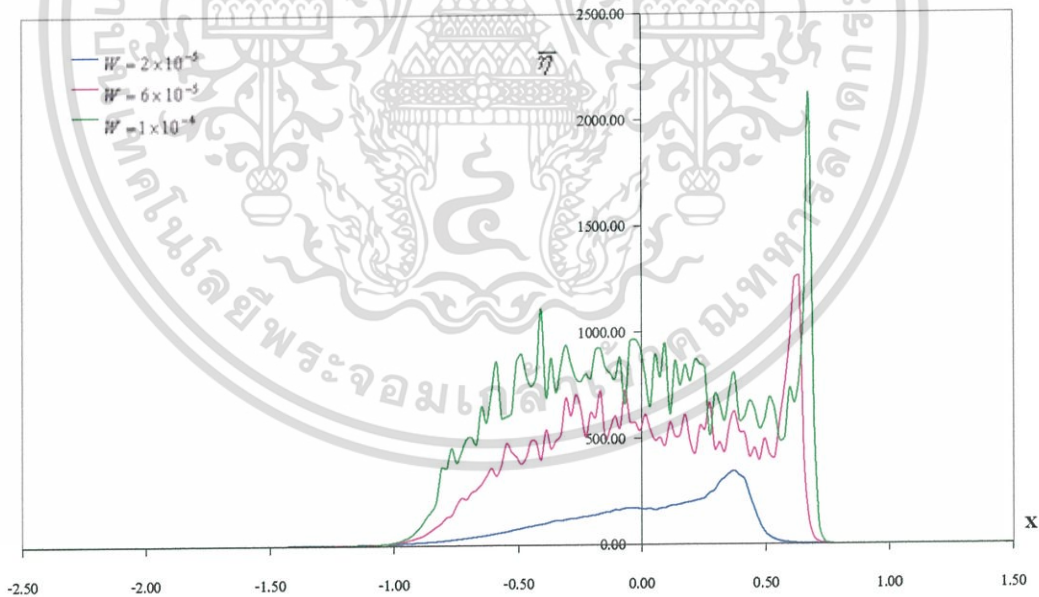


รูปที่ 6.111 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

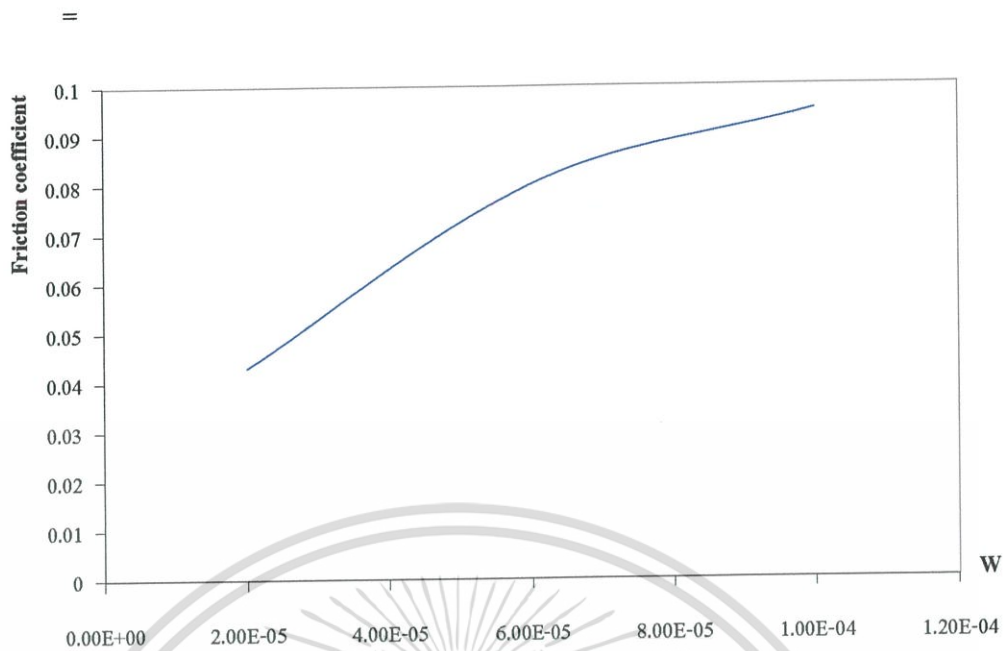


รูปที่ 6.112 กราฟความหนืดที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

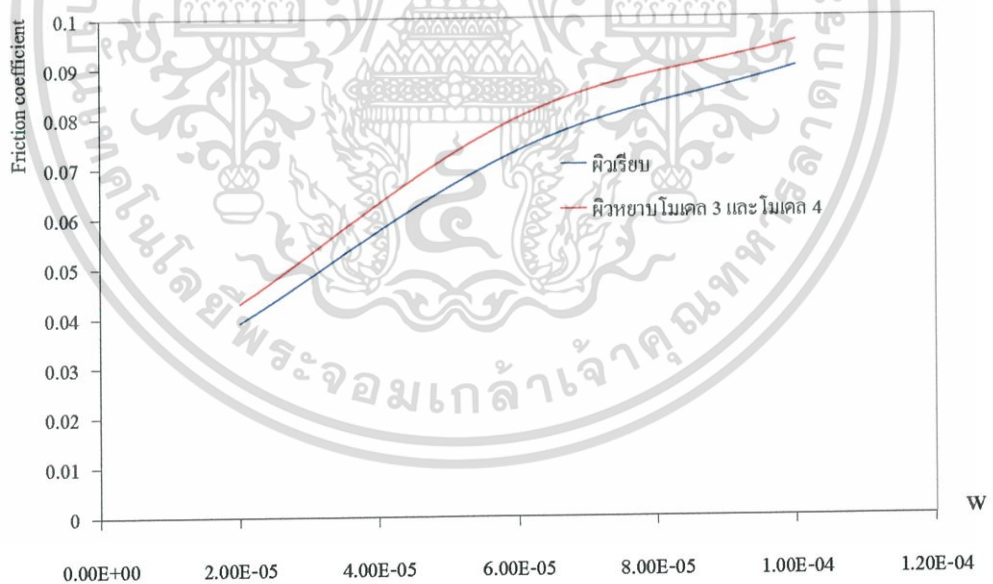


รูปที่ 6.113 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $SAE40$ ,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.114 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ , SAE40,  $S = 0$ .



รูปที่ 6.115 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กรณีที่โรลเลอร์และเพลาที่มีผิวเรียบกับ  
ผิวหยาบโมเดล 3 และ โมเดล 4 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ , SAE40,  $S = 0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลจากผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเตโรติกไดนามิกส์

### - กรณีผิวเรียบ : เมื่อภาระที่กระทำสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 6.61-6.79 พบว่าเมื่อภาระที่กระทำมีค่าสูงขึ้น ค่าความดันจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากความหนาฟิล์มจะลดลง แต่จะส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากสารหล่อลื่นจะมีการเสียดสีกันสูง และอุณหภูมิยังส่งผลทำให้ความหนาแน่นและความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงด้วย และเมื่อภาระที่กระทำสูงขึ้นการเข้าสู่จุดสมดุลจะเร็วกว่ากรณีที่ภาระต่ำ

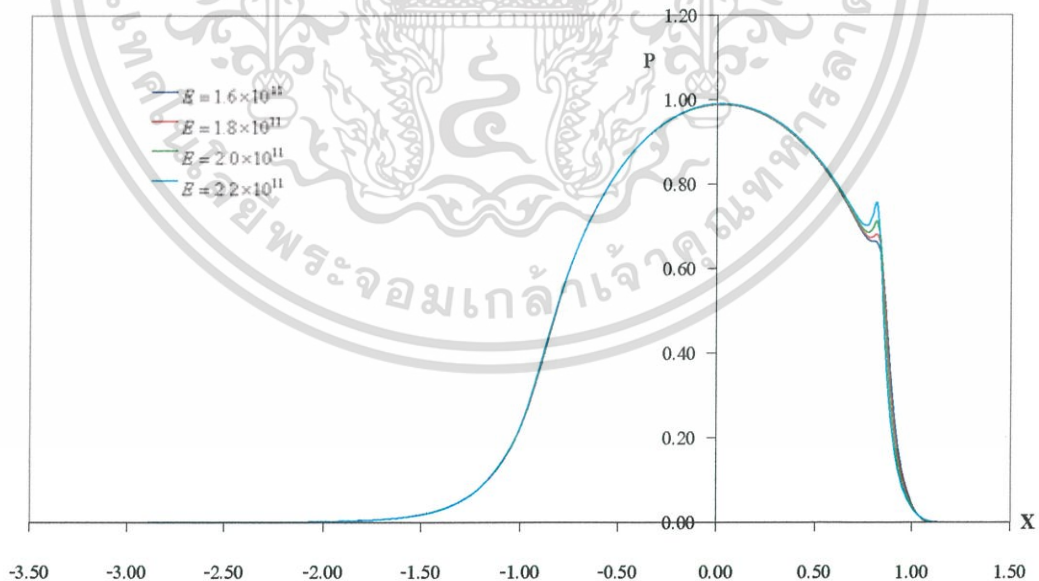
### - กรณีผิวหยาบ : เมื่อภาระที่กระทำสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 6.80 - 6.114 จะพบว่าความหยาบจะมีผลต่อความดันมากขึ้น โดยเฉพาะกรณีที่มีความภาระที่กระทำสูงสุด เพราะความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นบางจึงทำให้ผลของความหยาบมีมากสำหรับแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อพฤติกรรมก็จะเหมือนกับกรณีผิวเรียบ

จากกราฟรูปที่ 6.115 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จะพบว่าที่ภาระกระทำสูงจะส่งผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นมาก เนื่องจากมีการเสียดสีสูง โดยสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

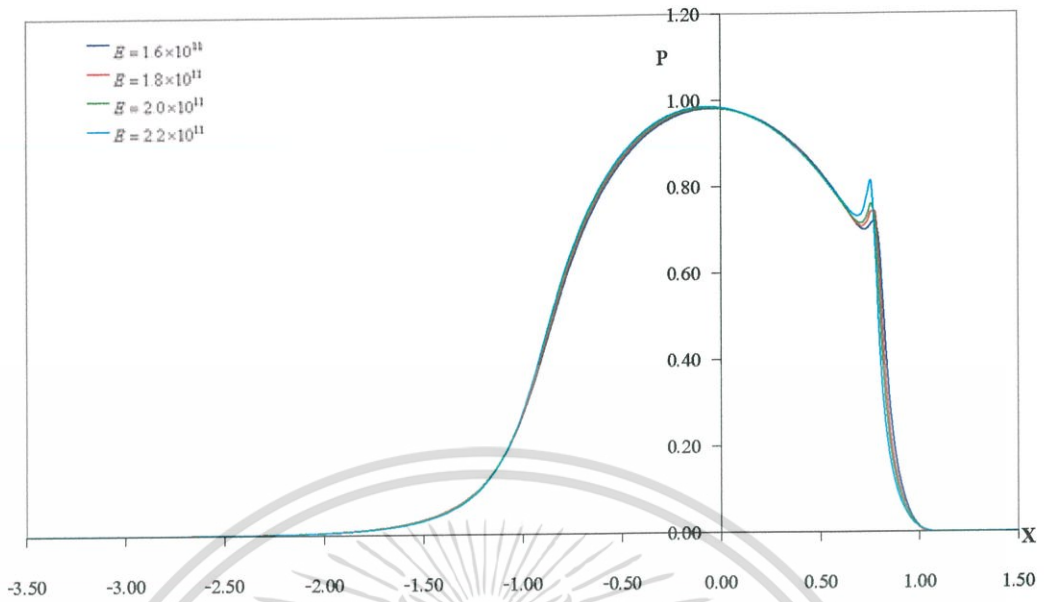
## 6.1.3 ผลจากการเปลี่ยนวัสดุ

### 6.1.3.1 กรณีโรลเลอร์และแผ่นเพลทที่มีผิวเรียบ

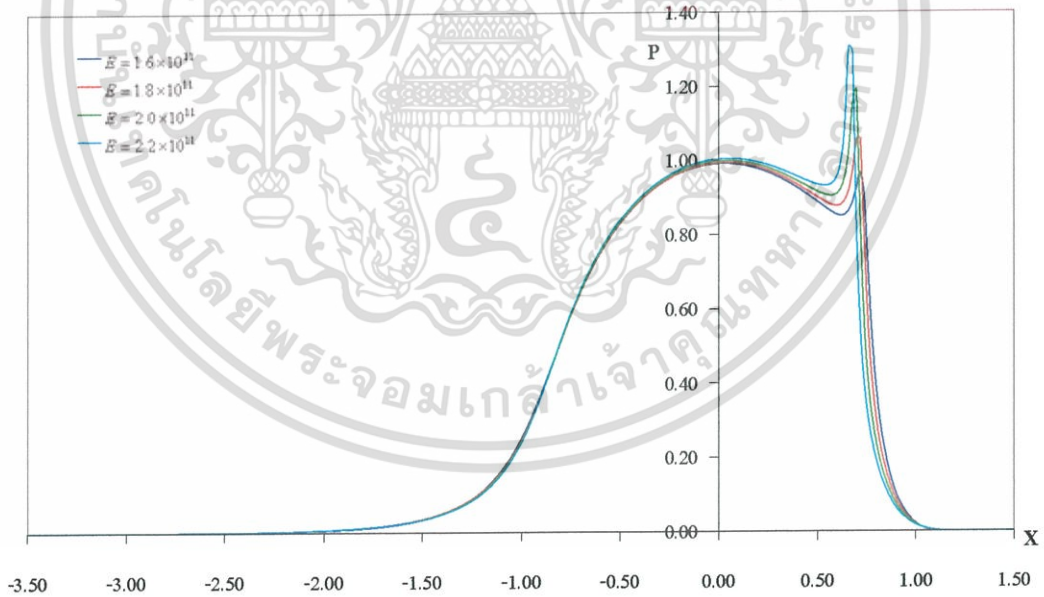


รูปที่ 6.116 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

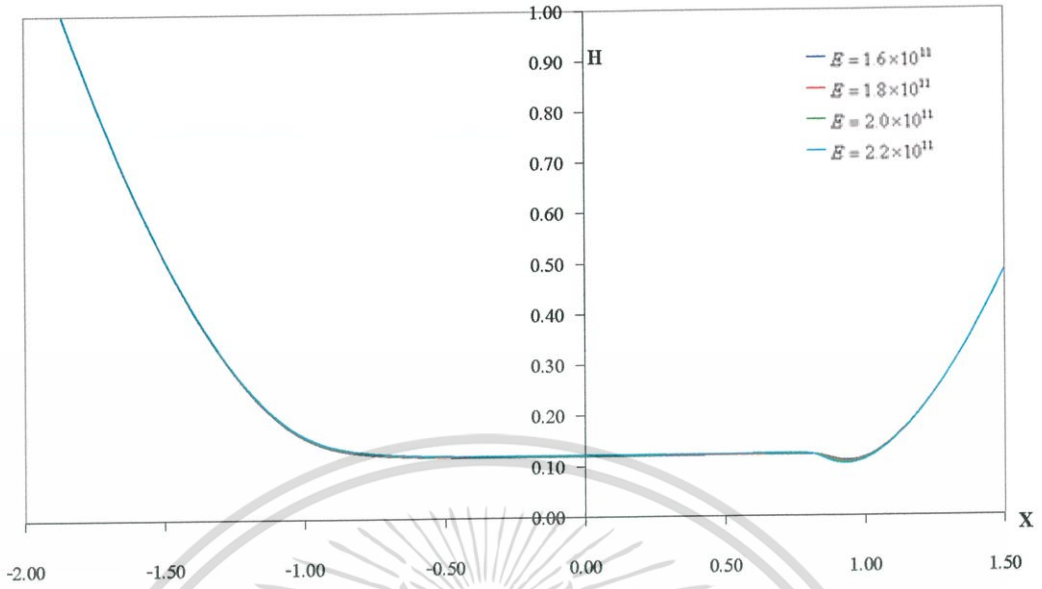


รูปที่ 6.117 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

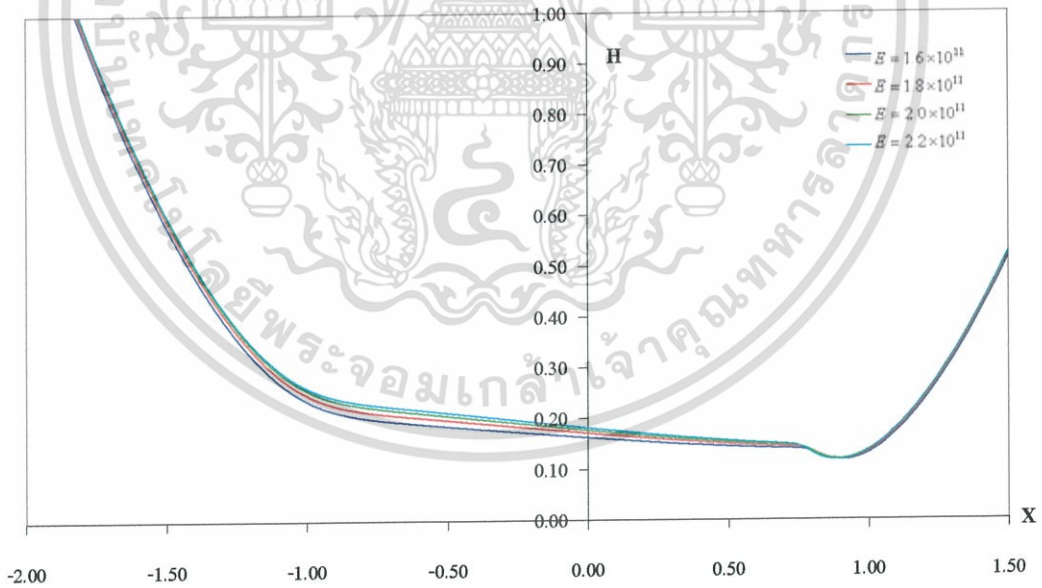


รูปที่ 6.118 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

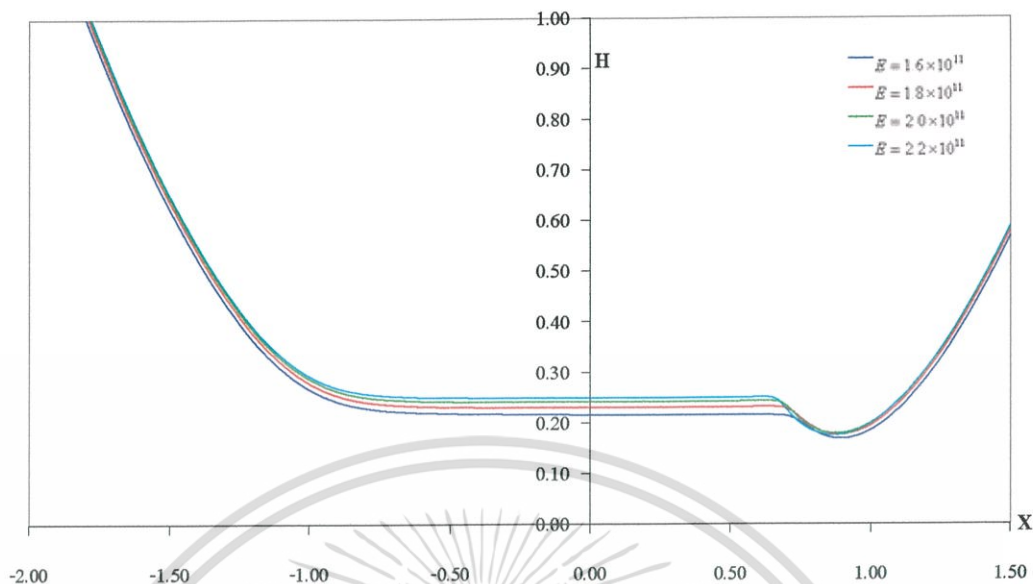


รูปที่ 6.119 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

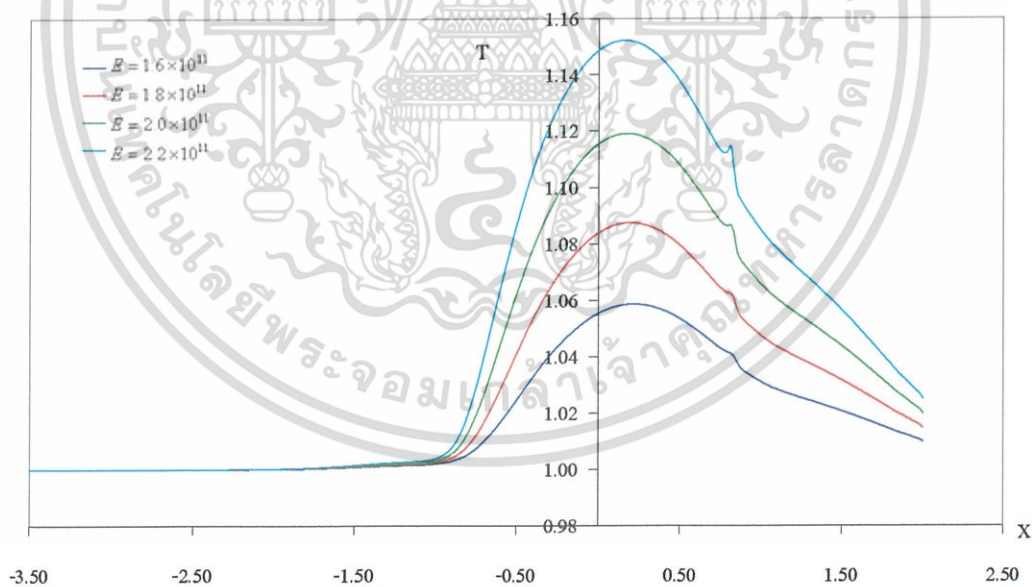


รูปที่ 6.120 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

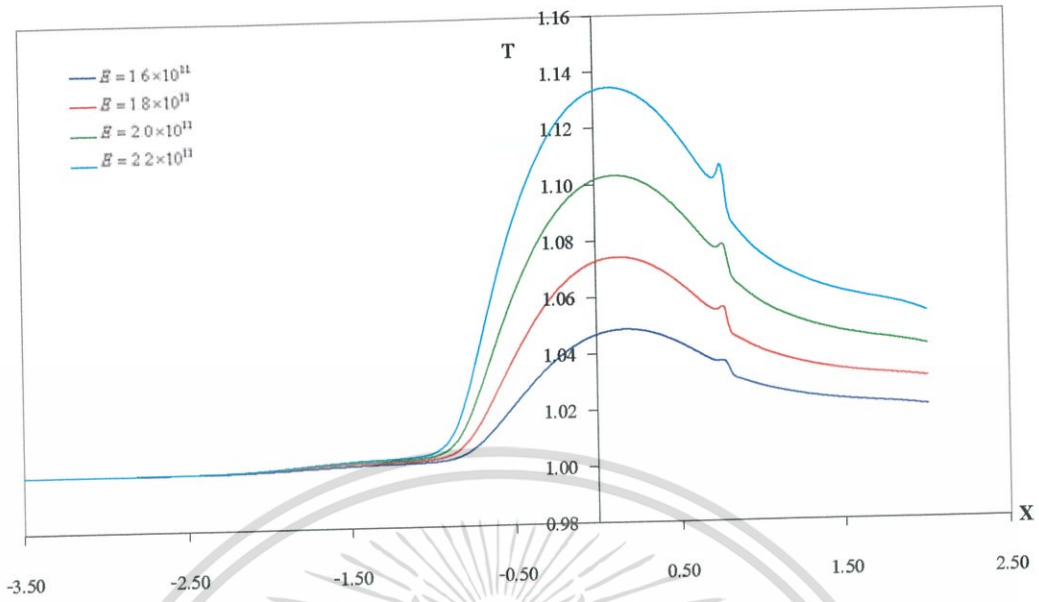


รูปที่ 6.121 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

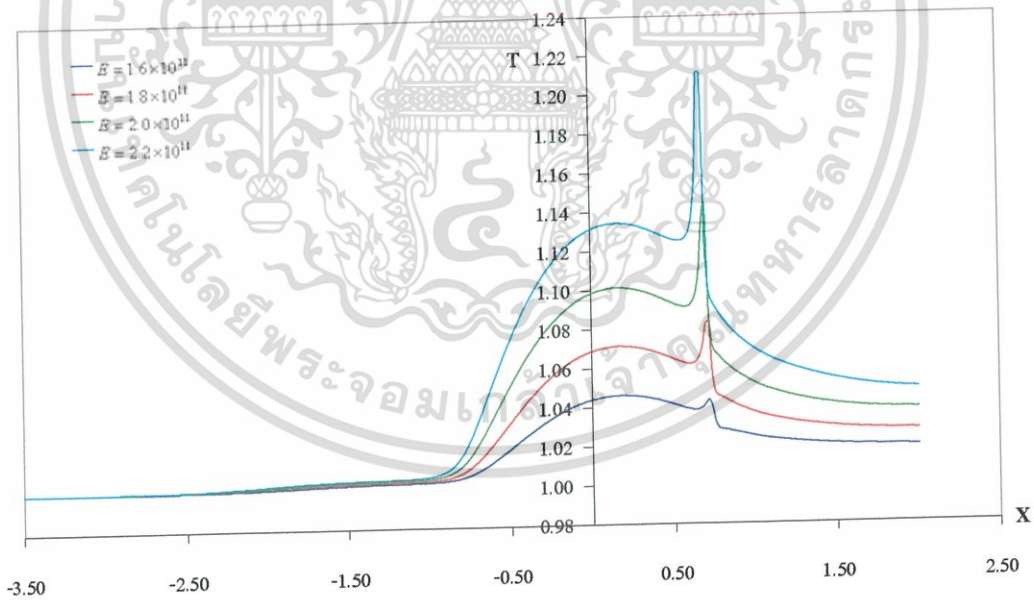


รูปที่ 6.122 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

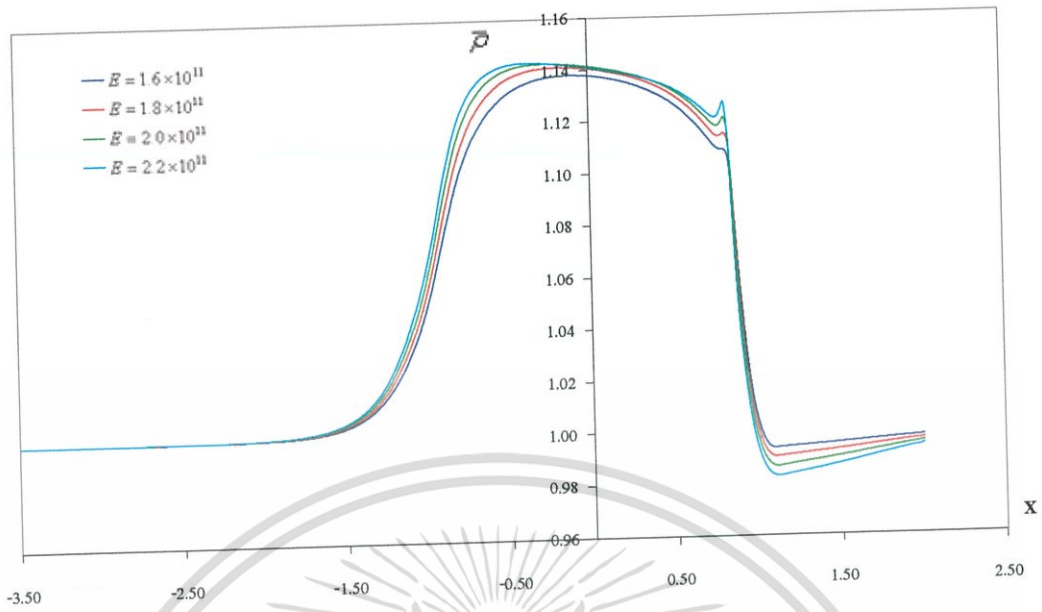


รูปที่ 6.123 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรต์ที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

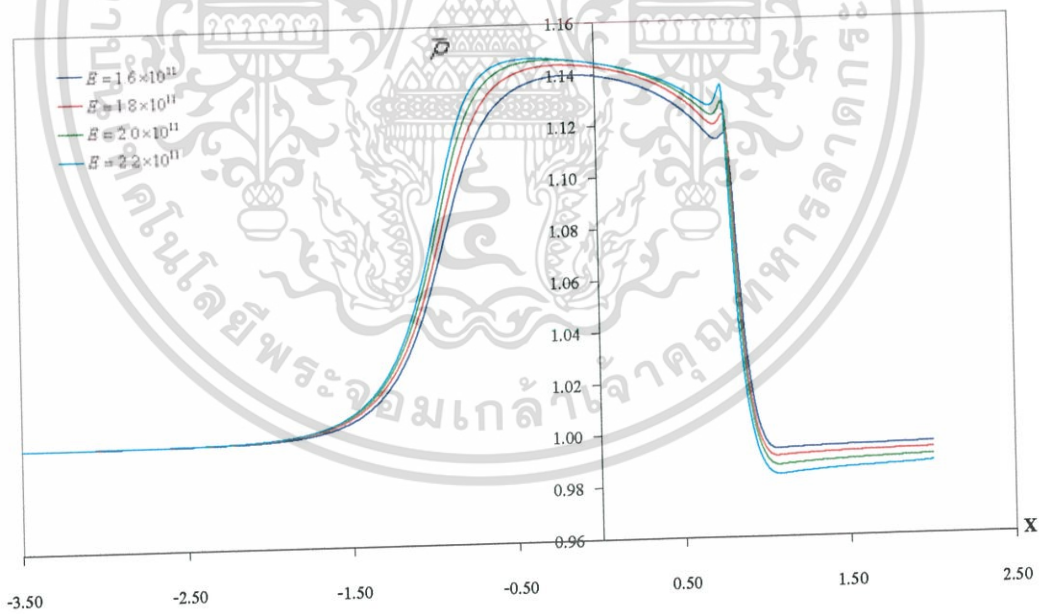


รูปที่ 6.124 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

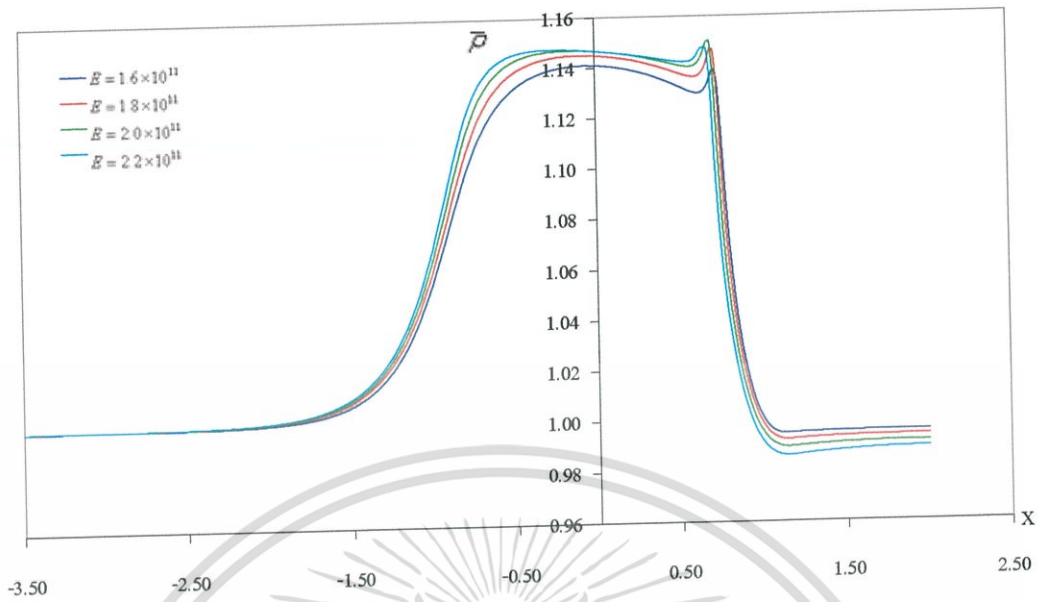


รูปที่ 6.125 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

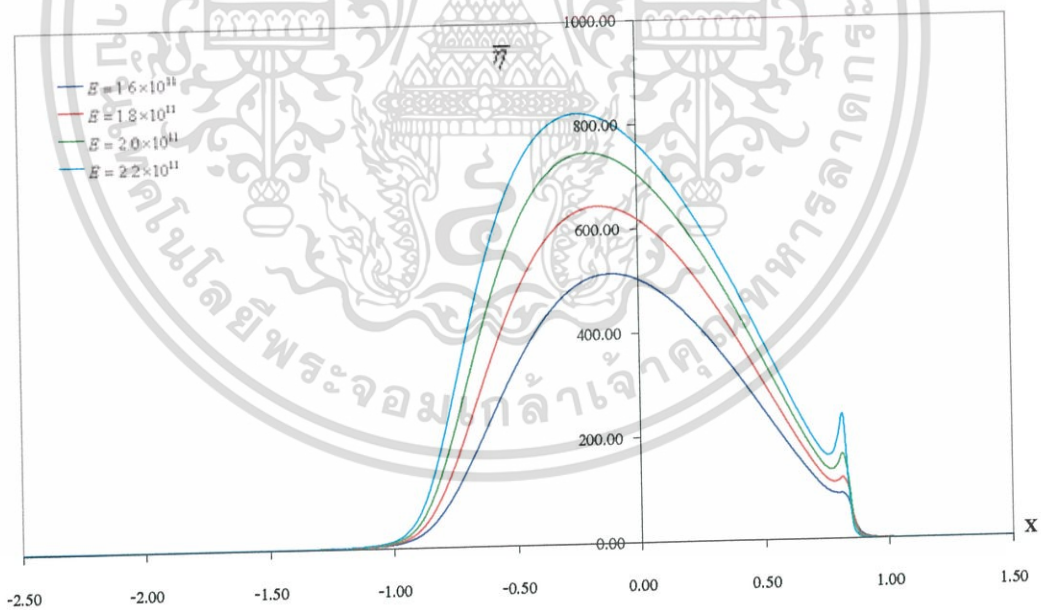


รูปที่ 6.126 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

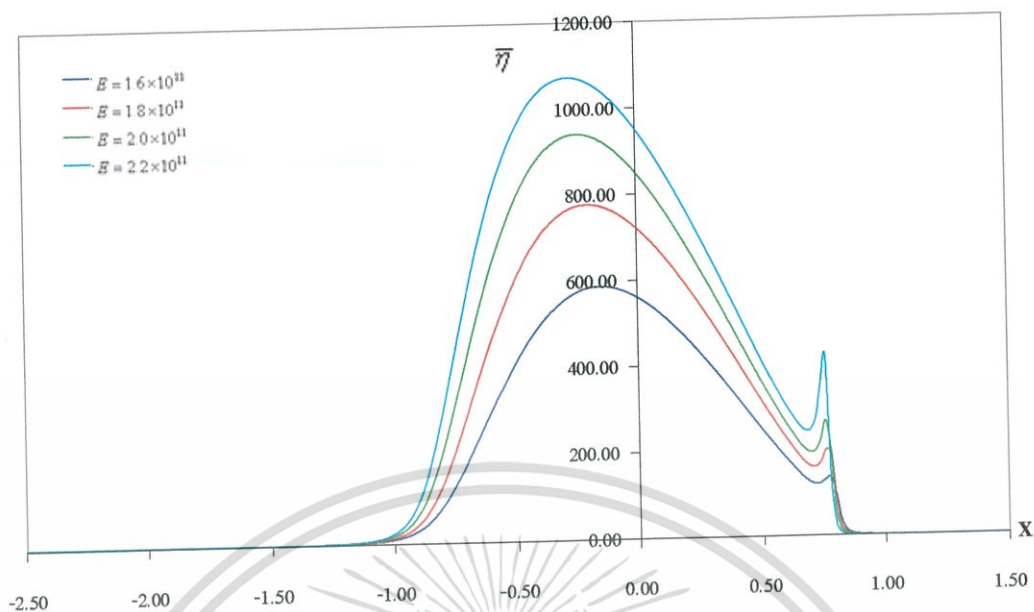


รูปที่ 6.127 กราฟความหนาแน่นที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

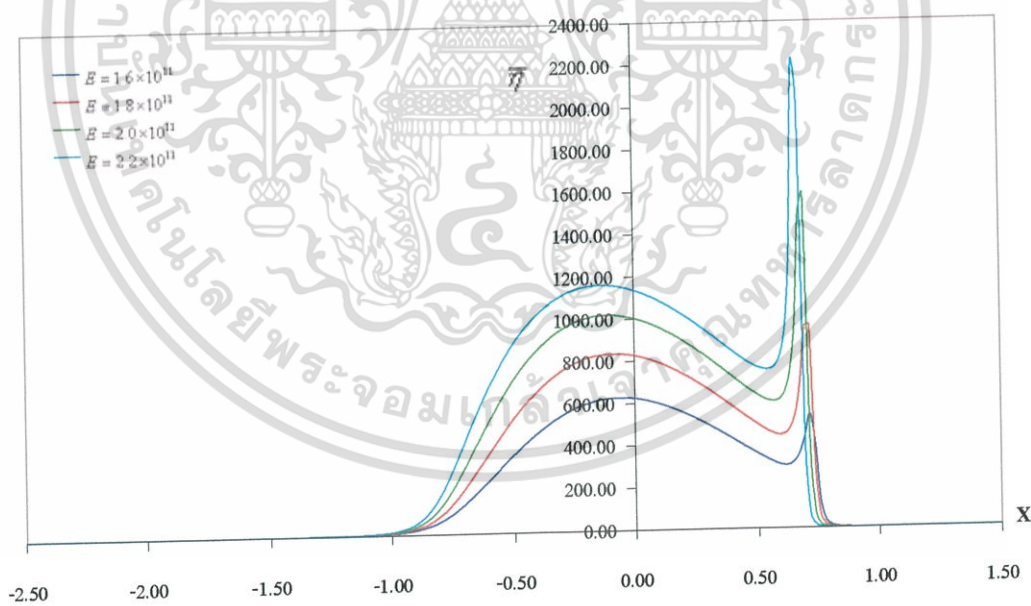


รูปที่ 6.128 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

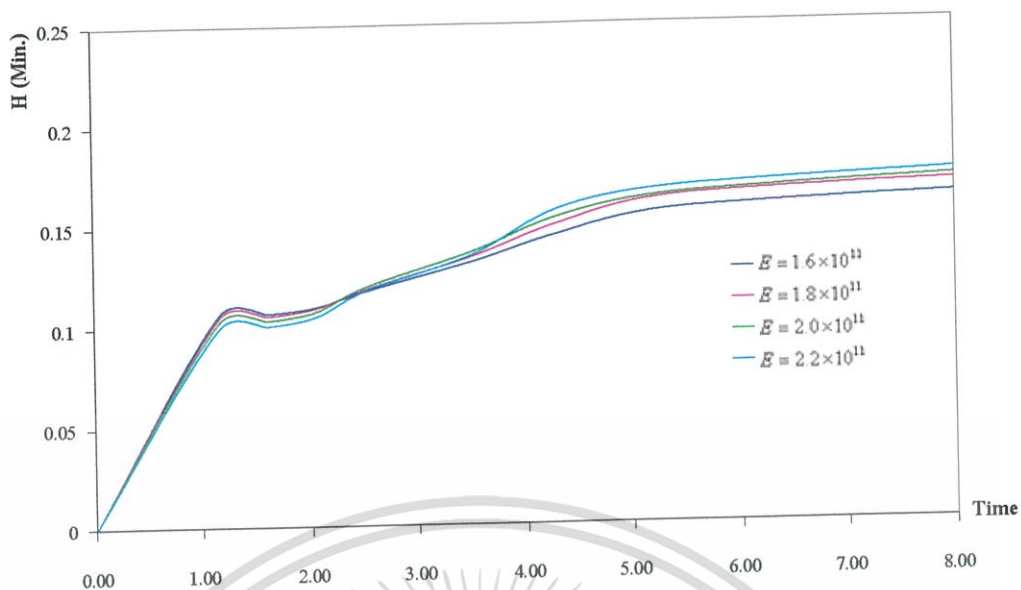


รูปที่ 6.129 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

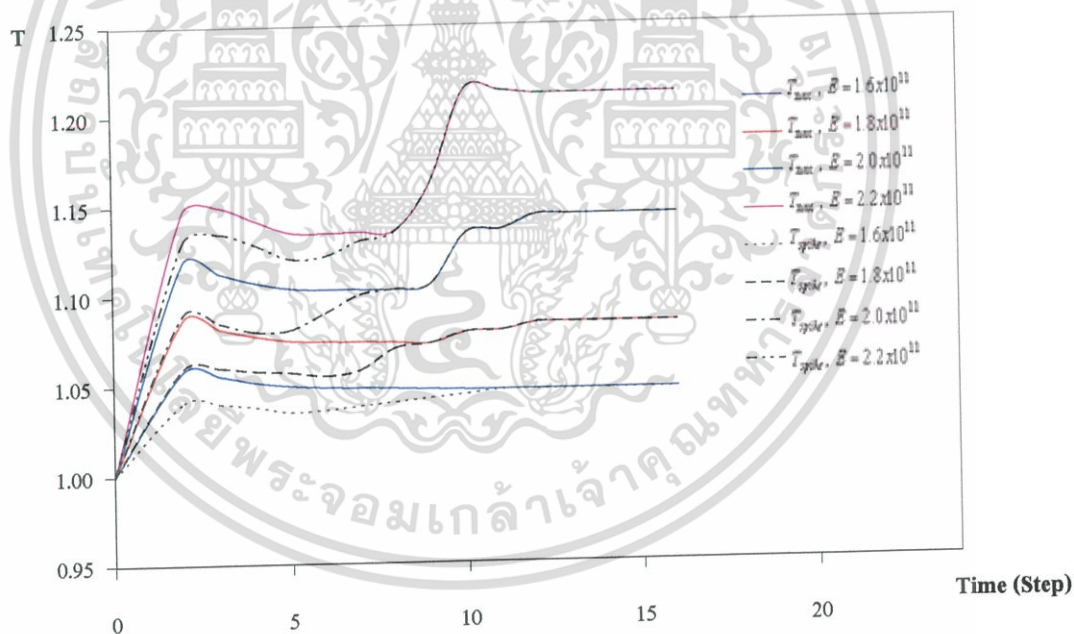


รูปที่ 6.130 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

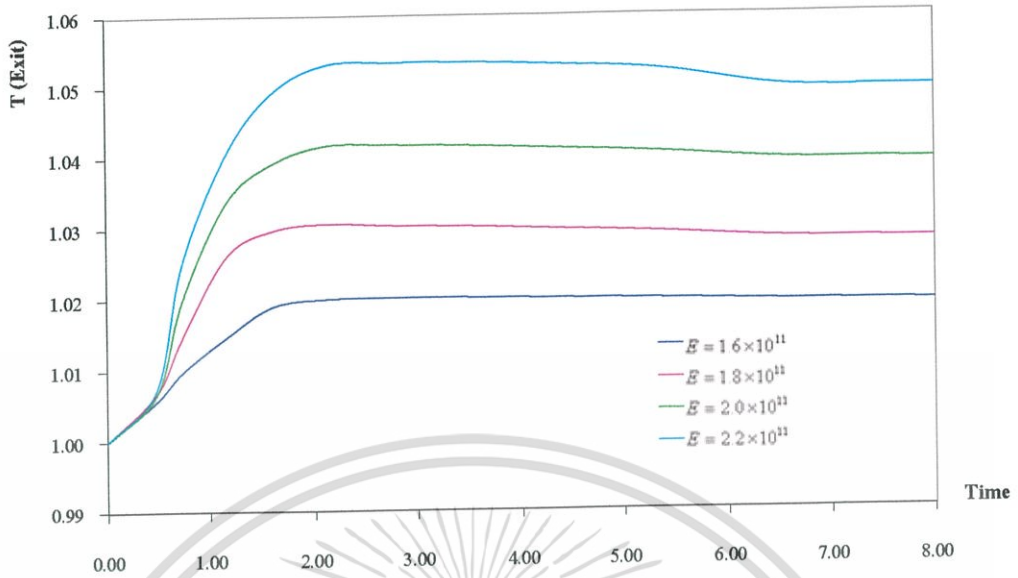


รูปที่ 6.131 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

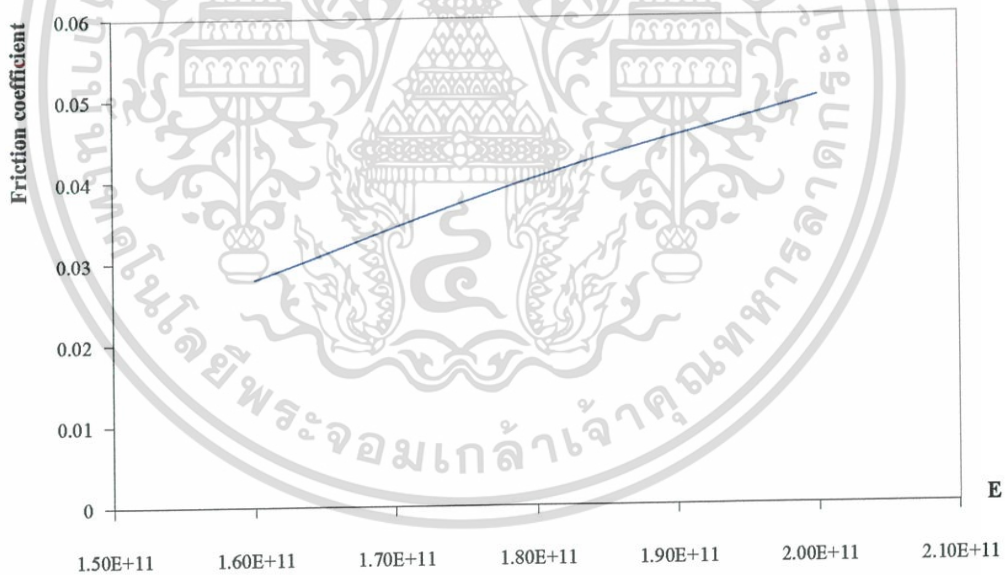


รูปที่ 6.132 กราฟอุณหภูมิที่สูงที่สุดและที่จุดยอดคานาหมที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



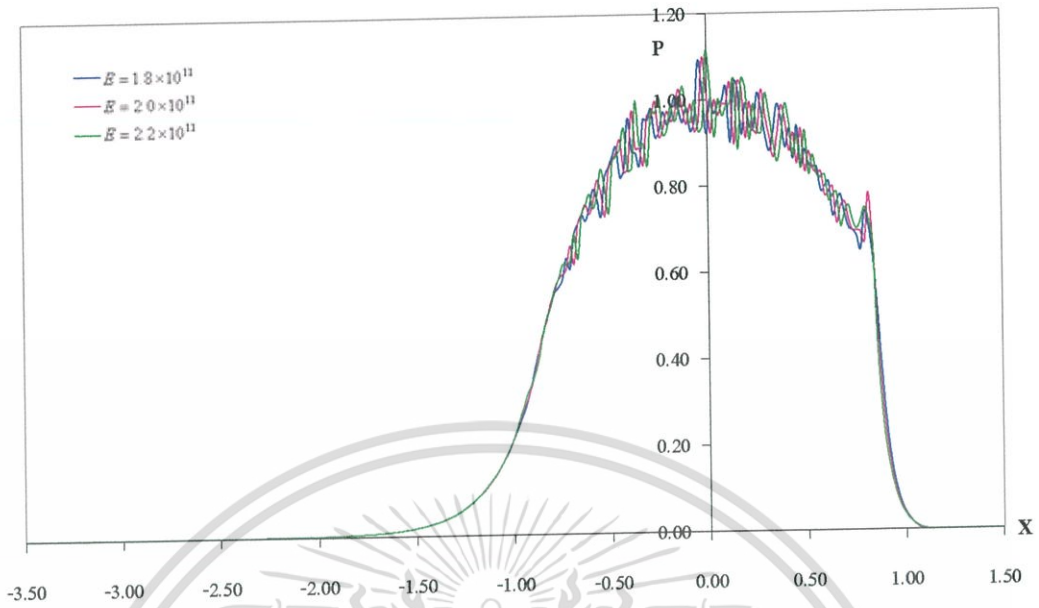
รูปที่ 6.133 กราฟอุณหภูมิที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมมูลของวัสดุแต่ละชนิด  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.



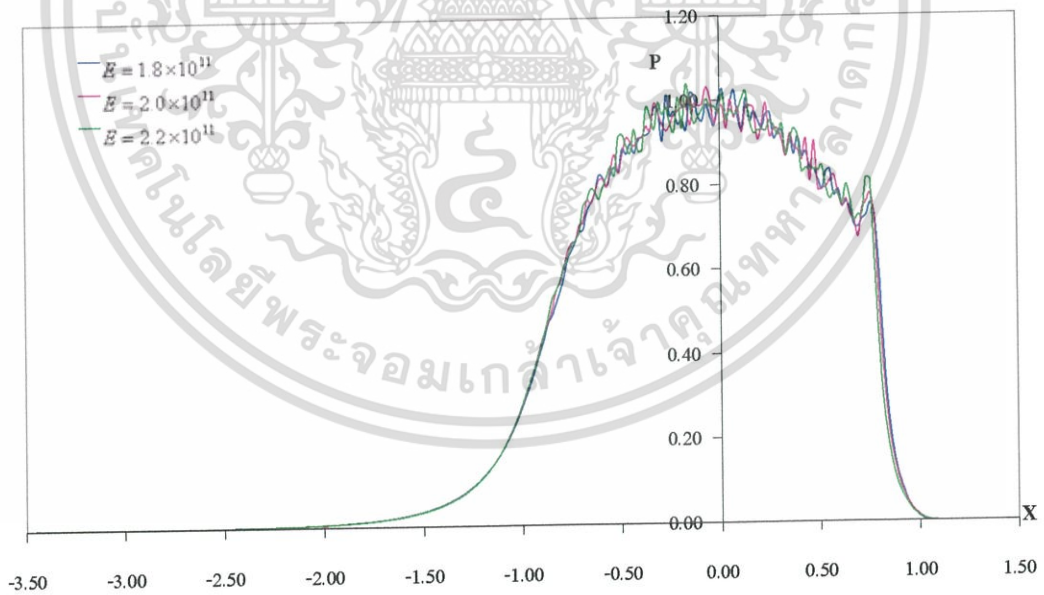
รูปที่ 6.134 กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเปลี่ยนแปลง  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.3.2 กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบโมเดล 1 และแผ่นเพลทโมเดล 2

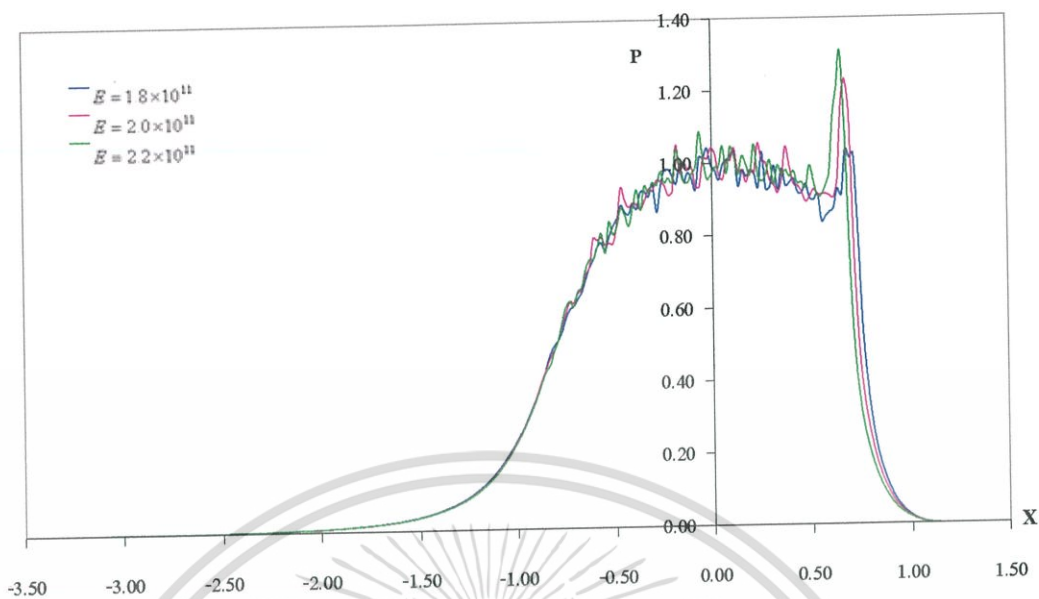


รูปที่ 6.135 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

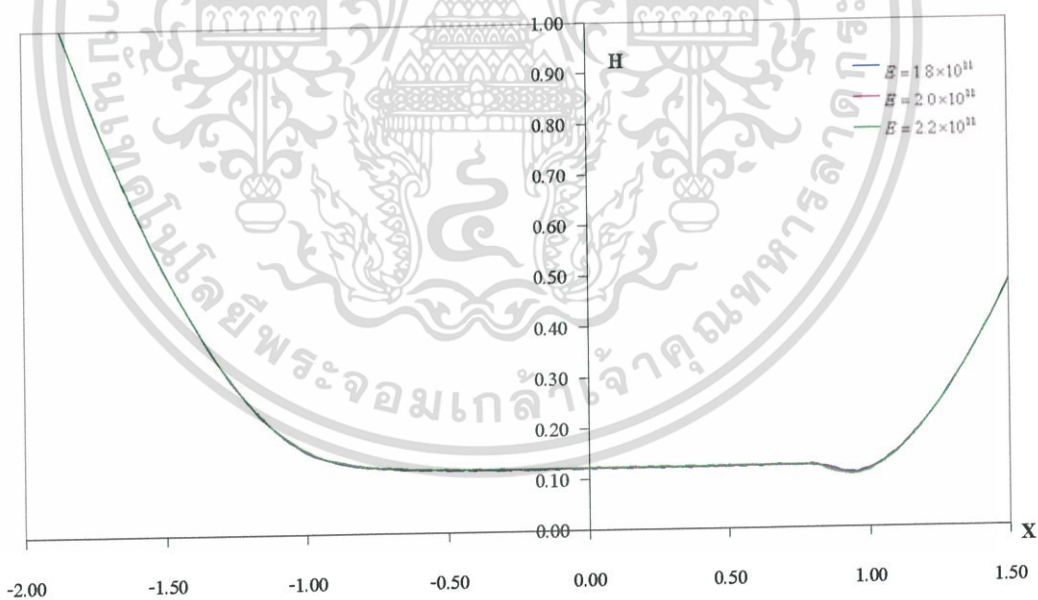


รูปที่ 6.136 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

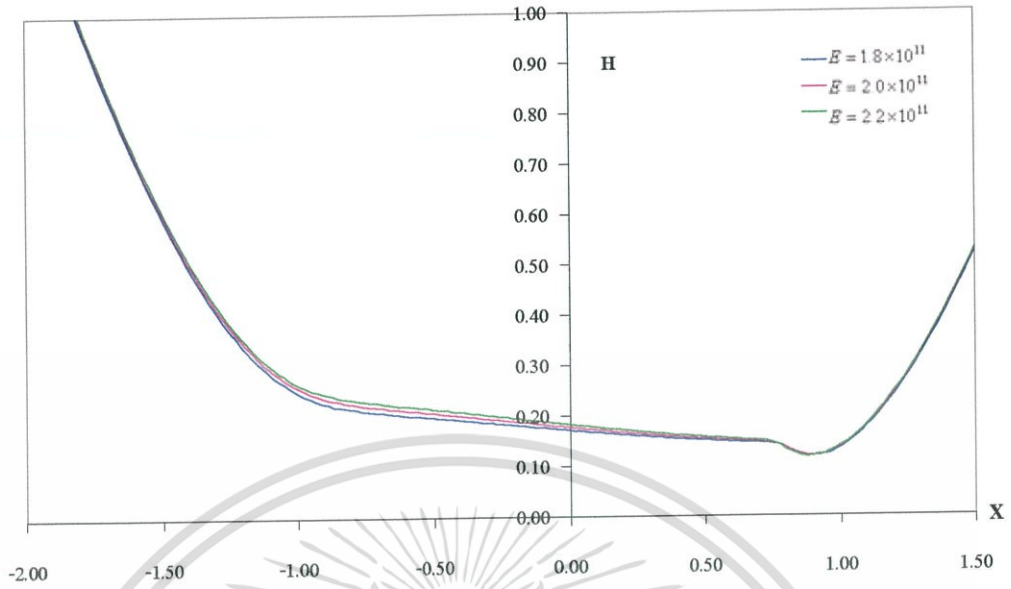


รูปที่ 6.137 กราฟความดันที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

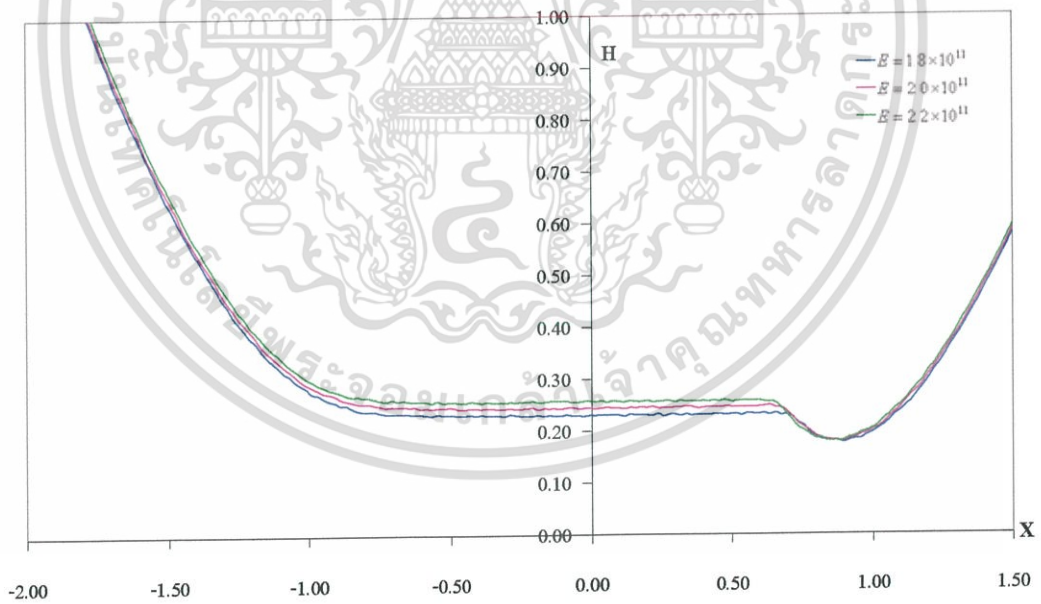


รูปที่ 6.138 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมันต์ที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

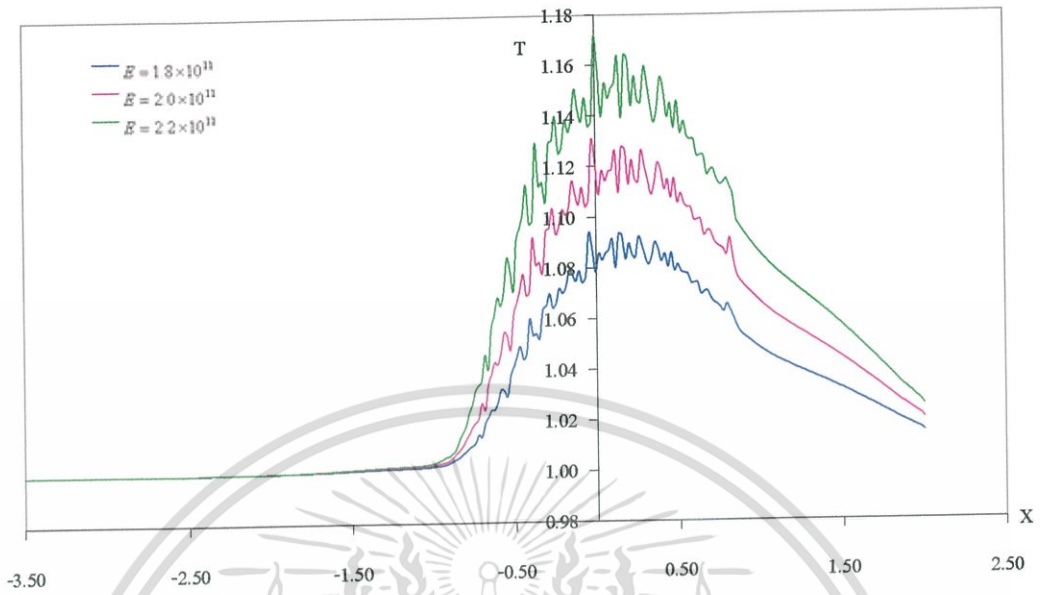


รูปที่ 6.139 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

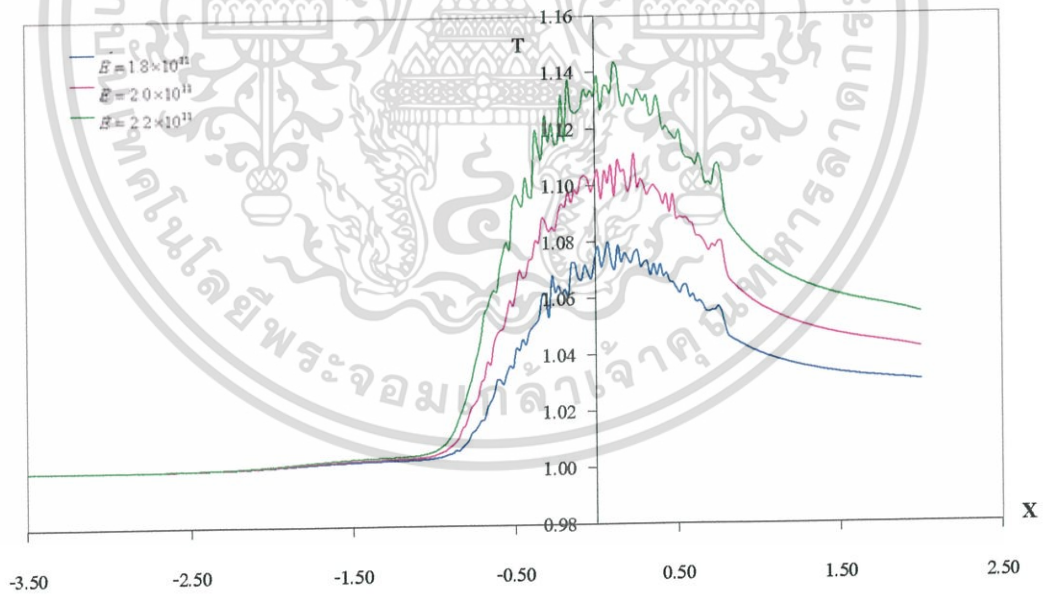


รูปที่ 6.140 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

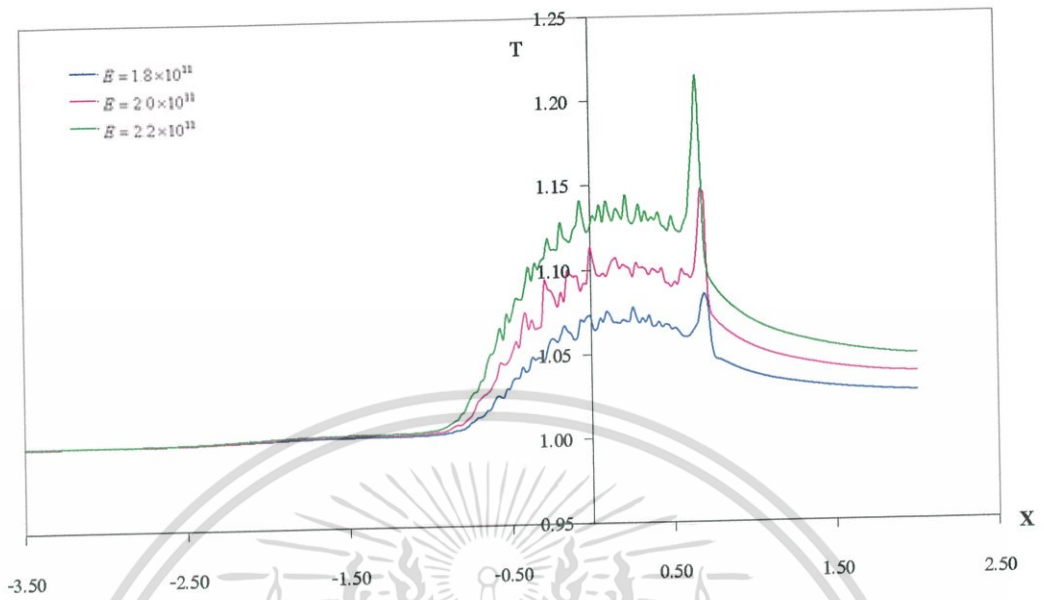


รูปที่ 6.141 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

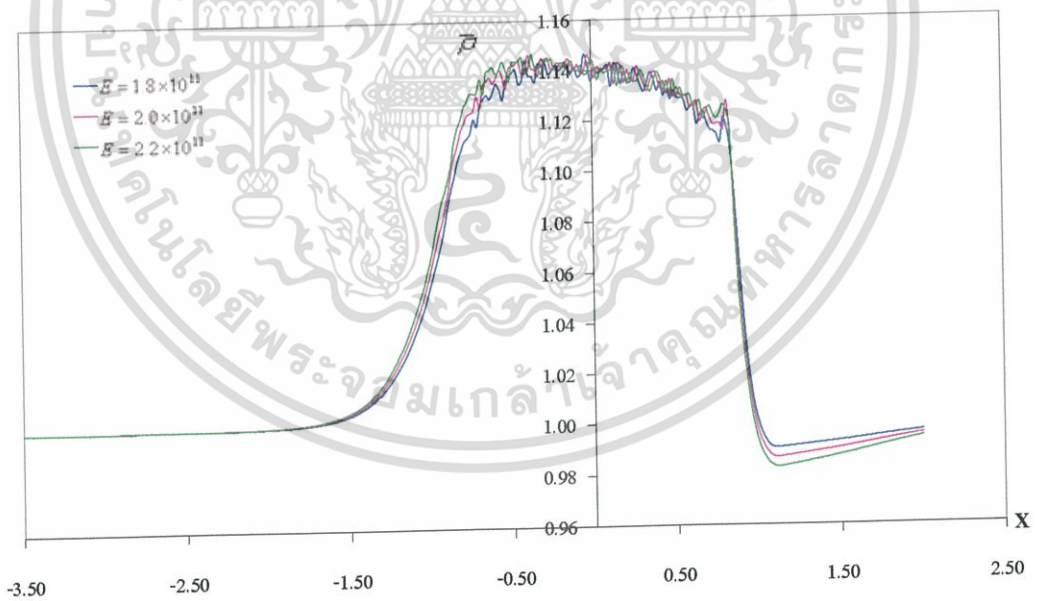


รูปที่ 6.142 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

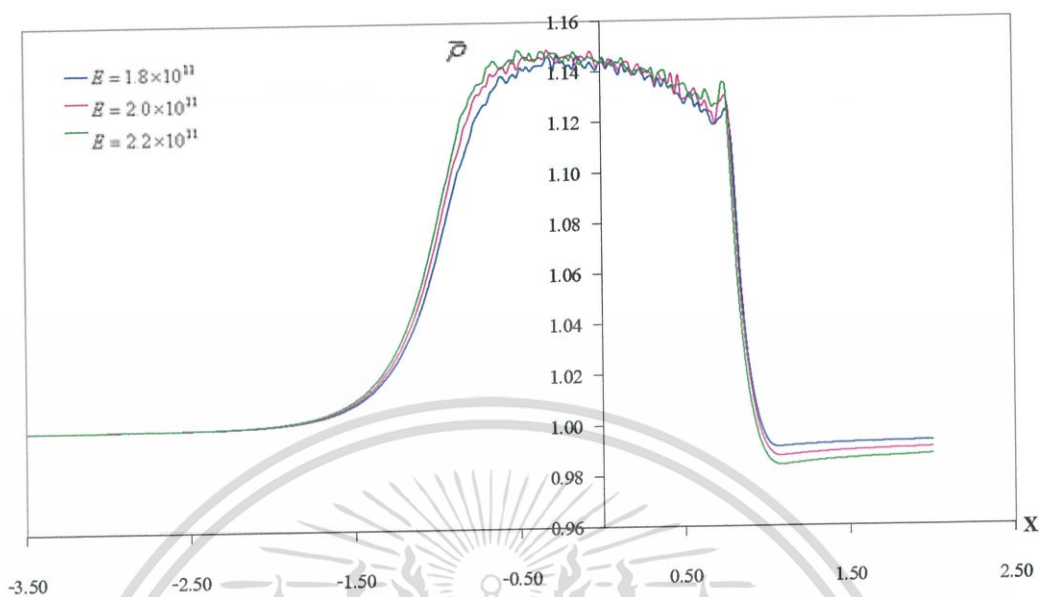


รูปที่ 6.143 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

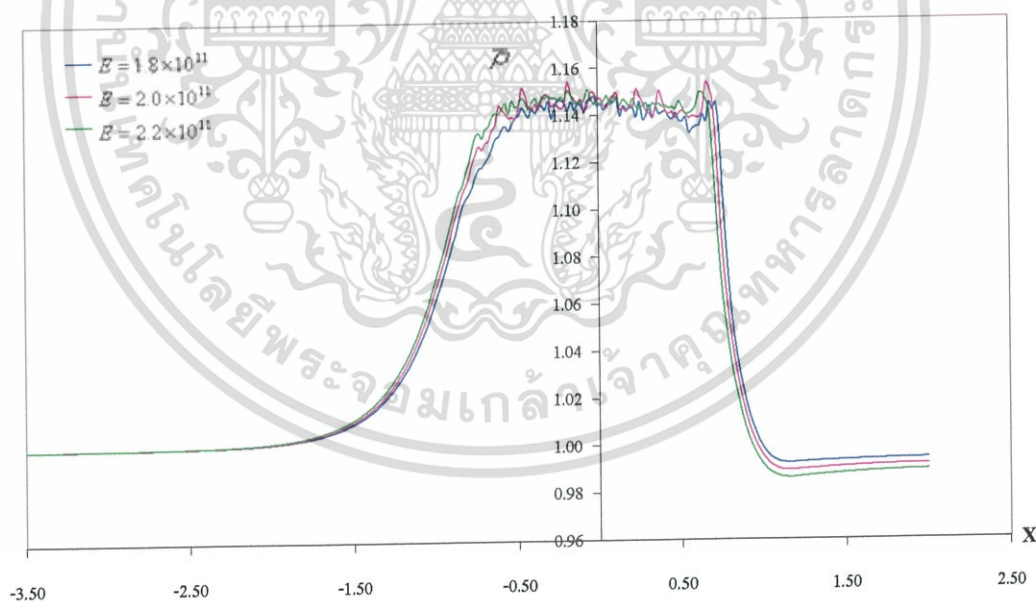


รูปที่ 6.144 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

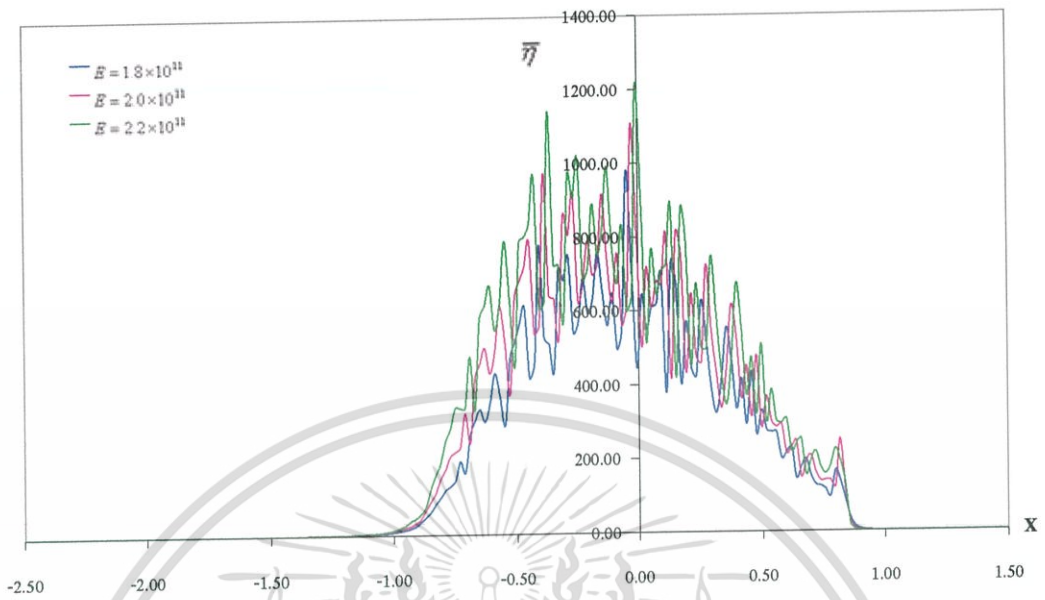


รูปที่ 6.145 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรต์ที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

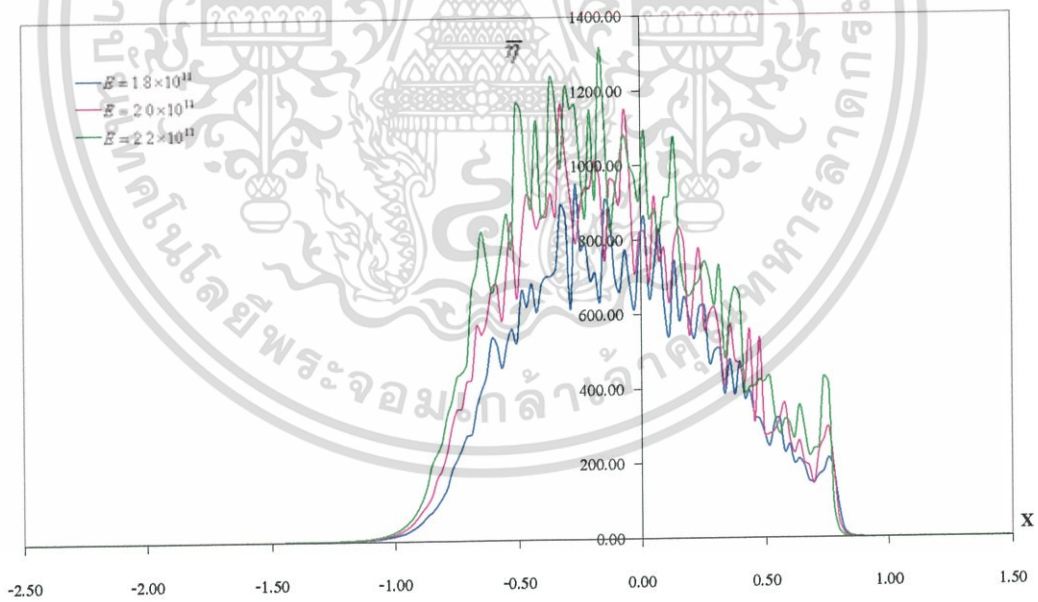


รูปที่ 6.146 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

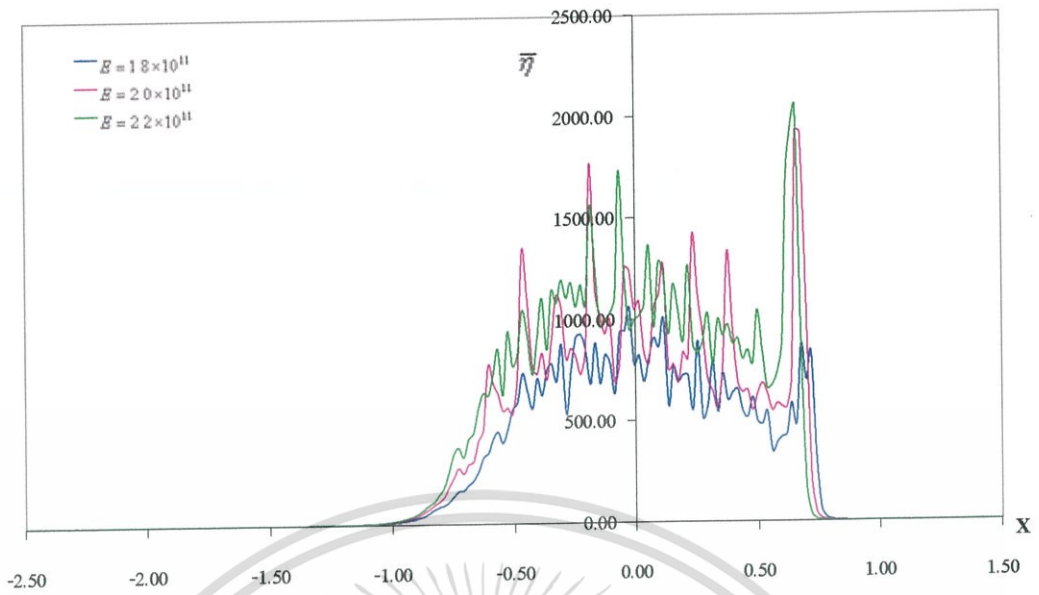


รูปที่ 6.147 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$

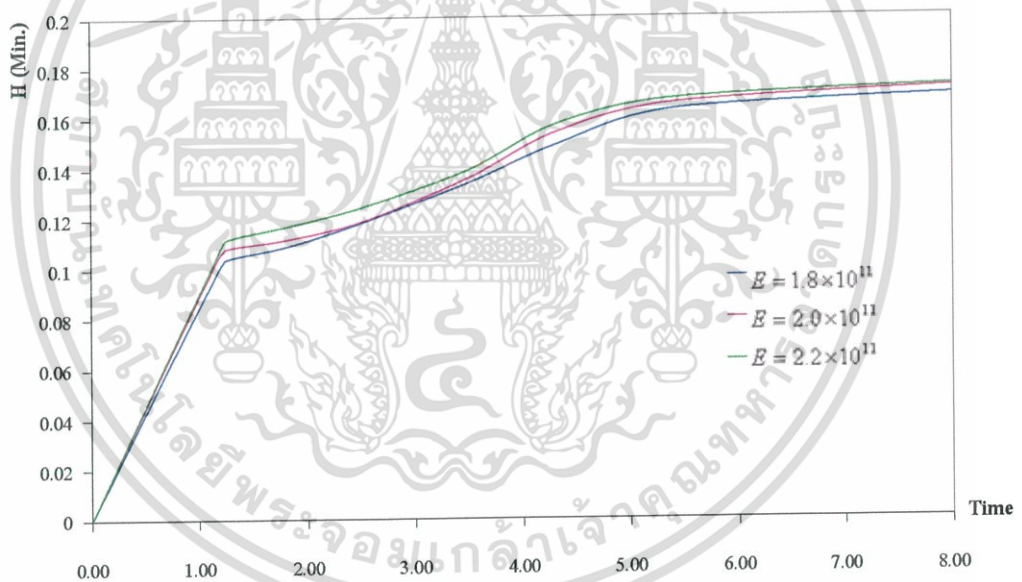


รูปที่ 6.148 กราฟความหนืดที่เวลาไรมิตที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

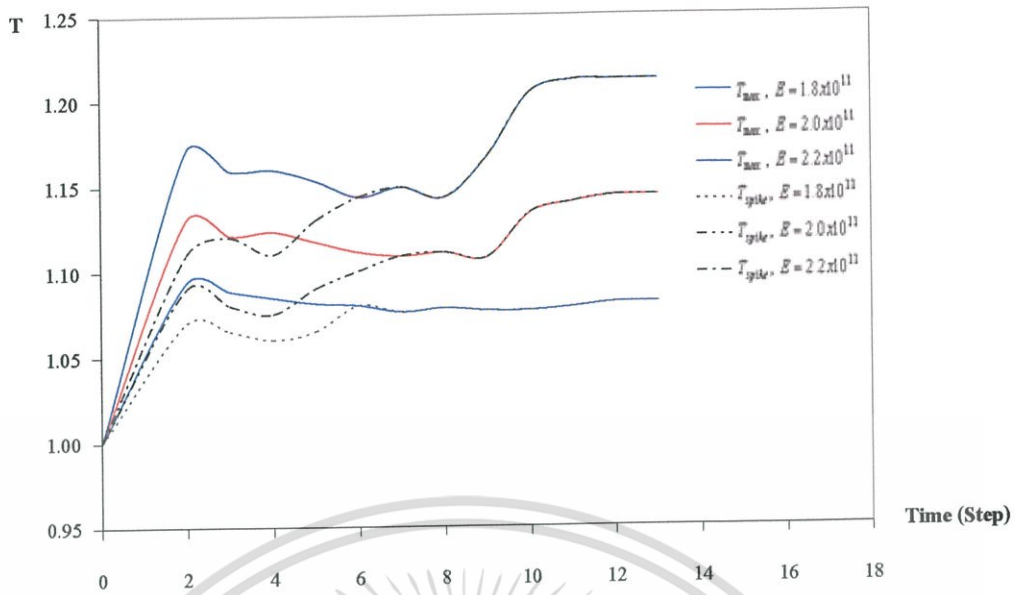


รูปที่ 6.149 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



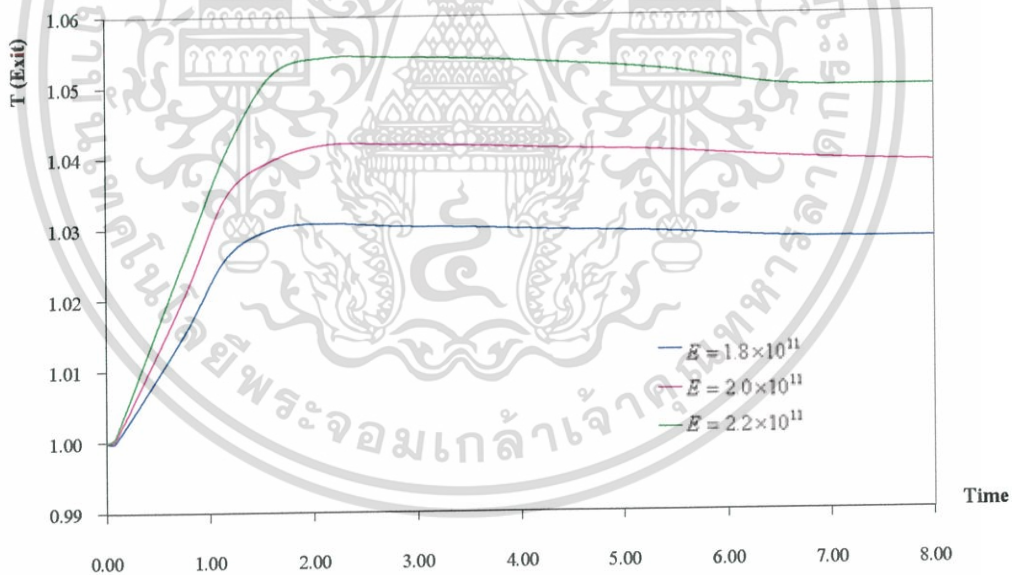
รูปที่ 6.150 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.151 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดยอดคานาแหลมที่เข้าสู่จุดของวัสดุแต่ละชนิด

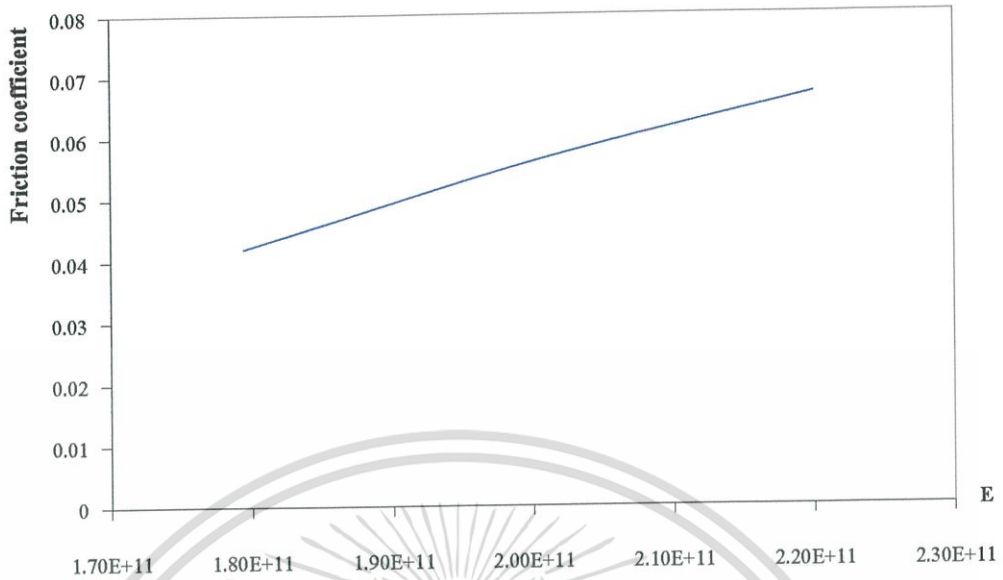
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



รูปที่ 6.152 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมมูลของวัสดุแต่ละชนิด

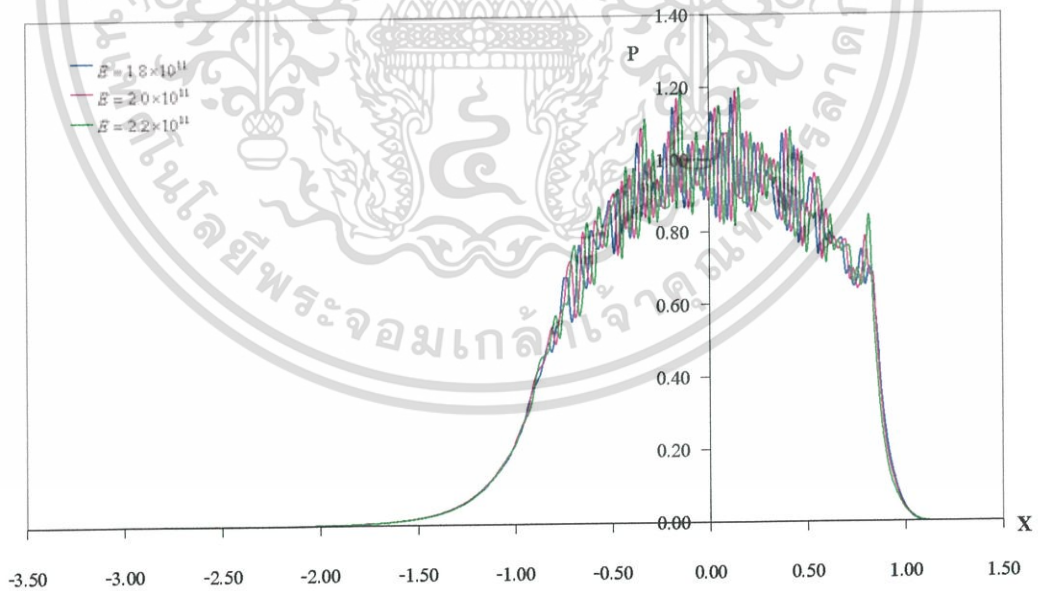
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



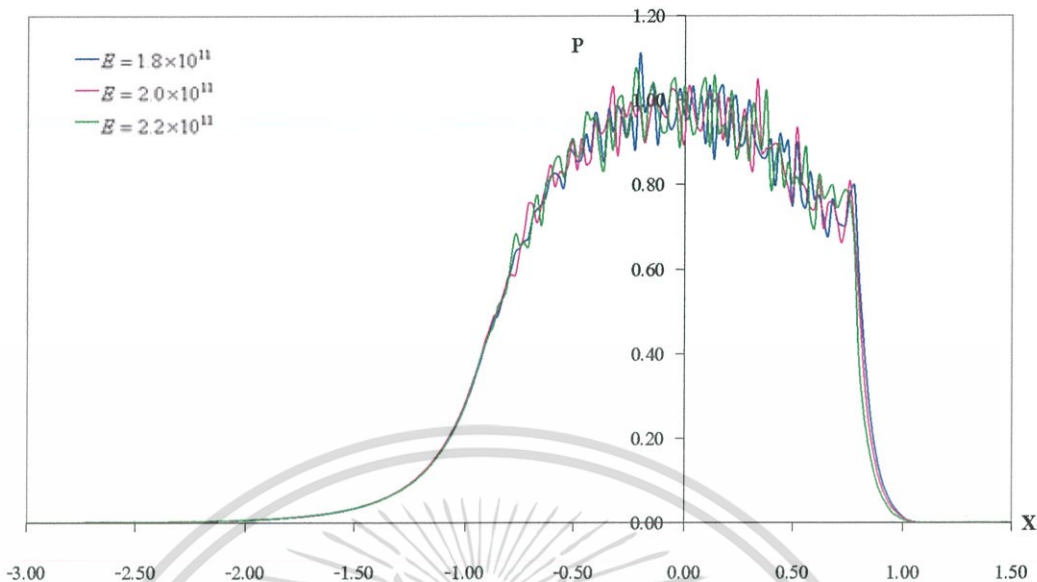
รูปที่ 6.153 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อค่าความแข็งเปลี่ยนแปลง  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

### 6.1.3.3 กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบโมเดล 3 และแผ่นเพลทโมเดล 4

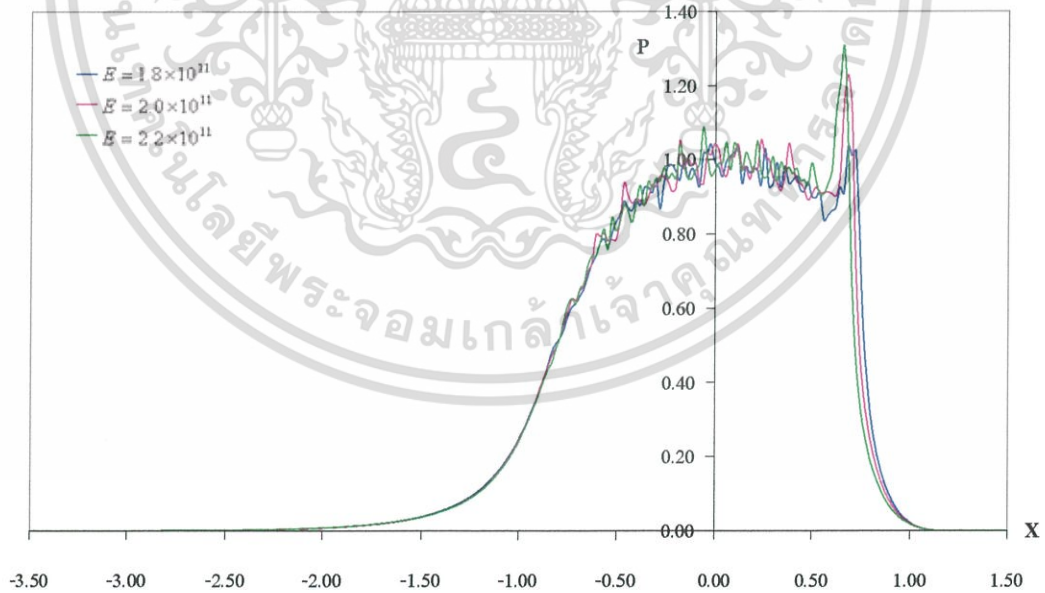


รูปที่ 6.154 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

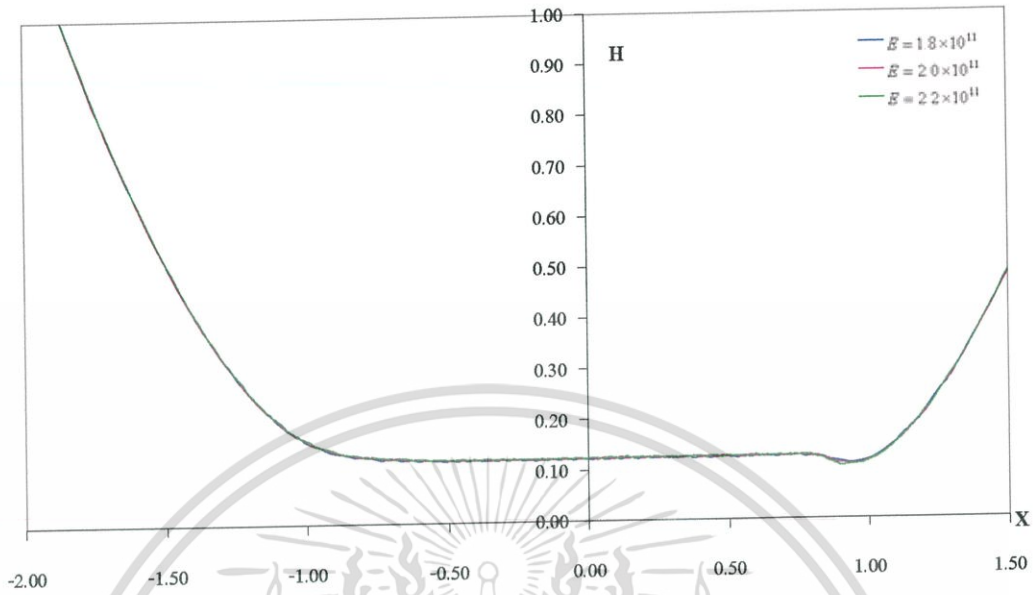


รูปที่ 6.155 กราฟความดันที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

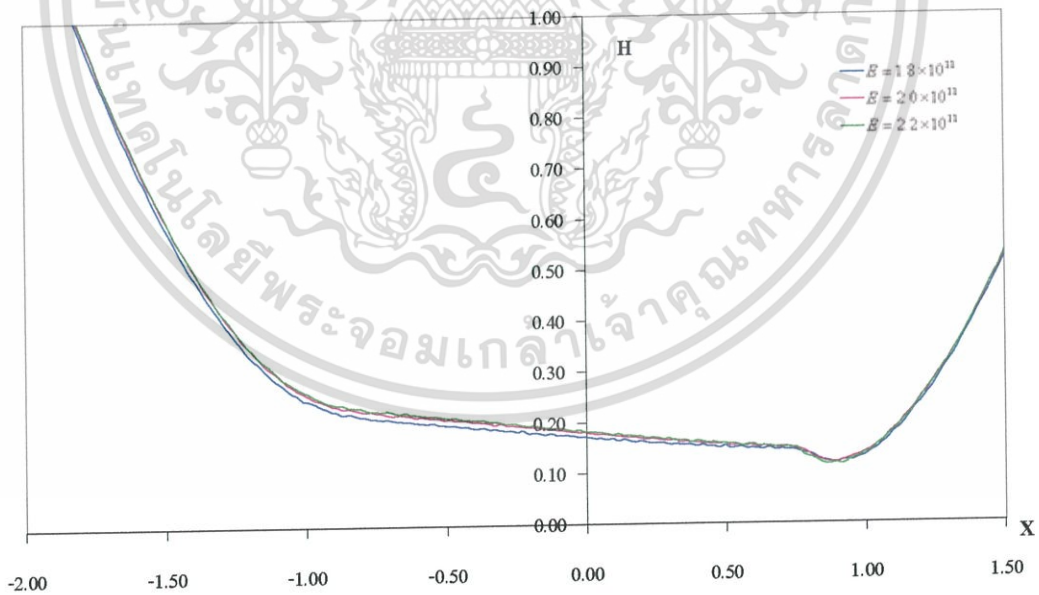


รูปที่ 6.156 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

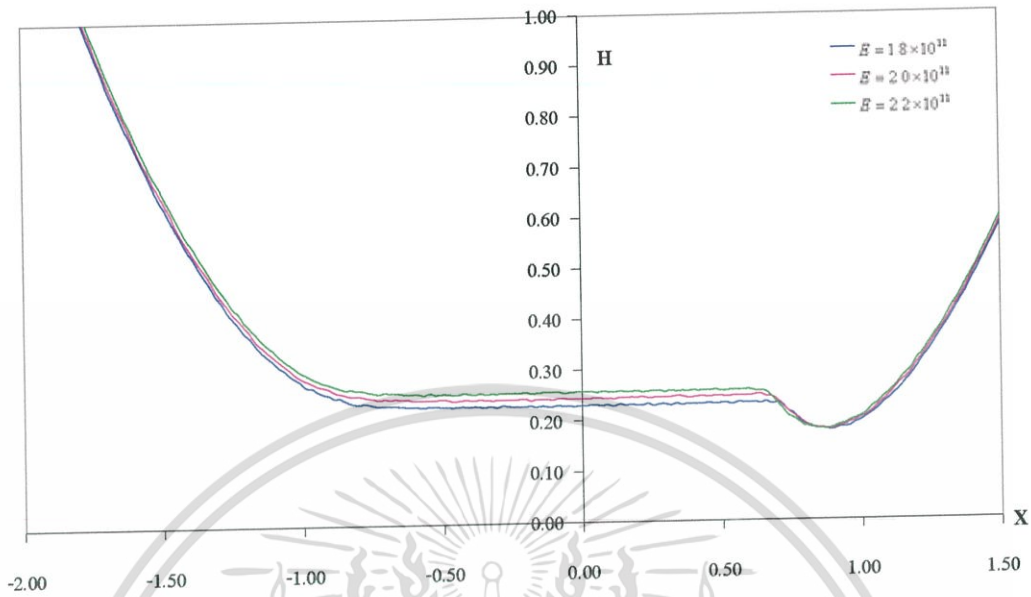


รูปที่ 6.157 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

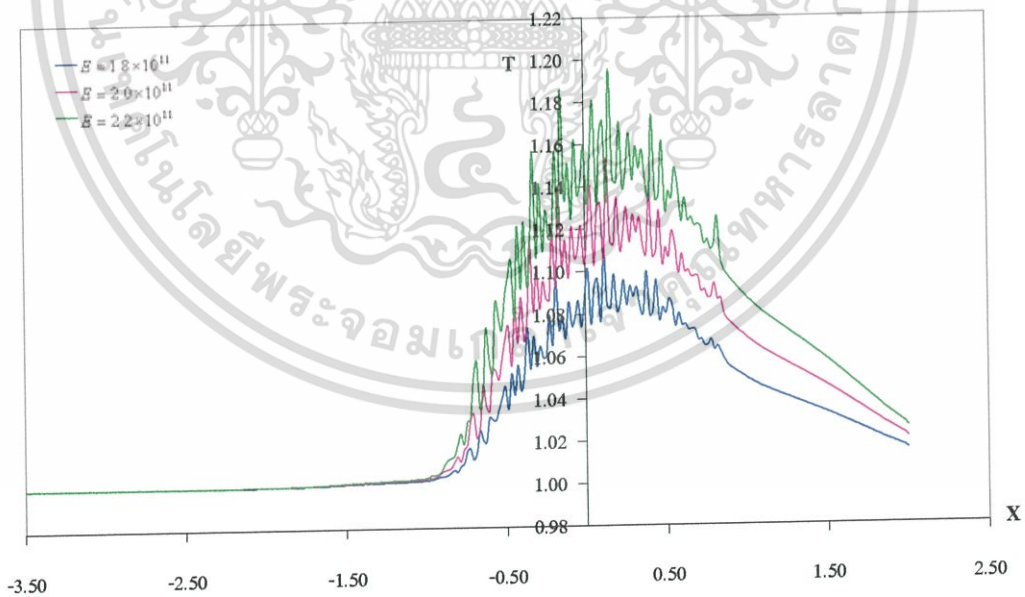


รูปที่ 6.158 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

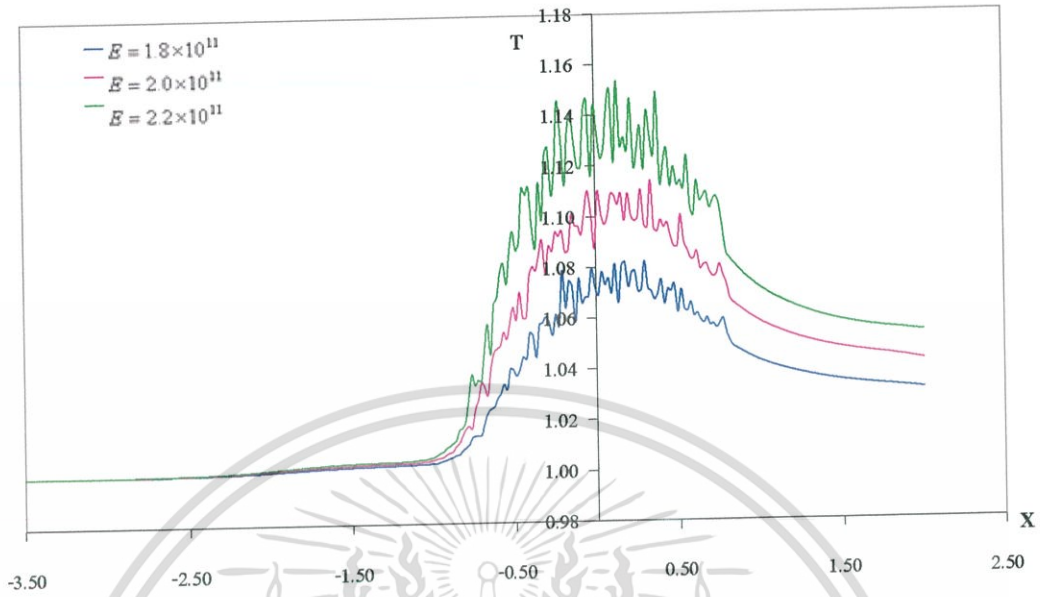


รูปที่ 6.159 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

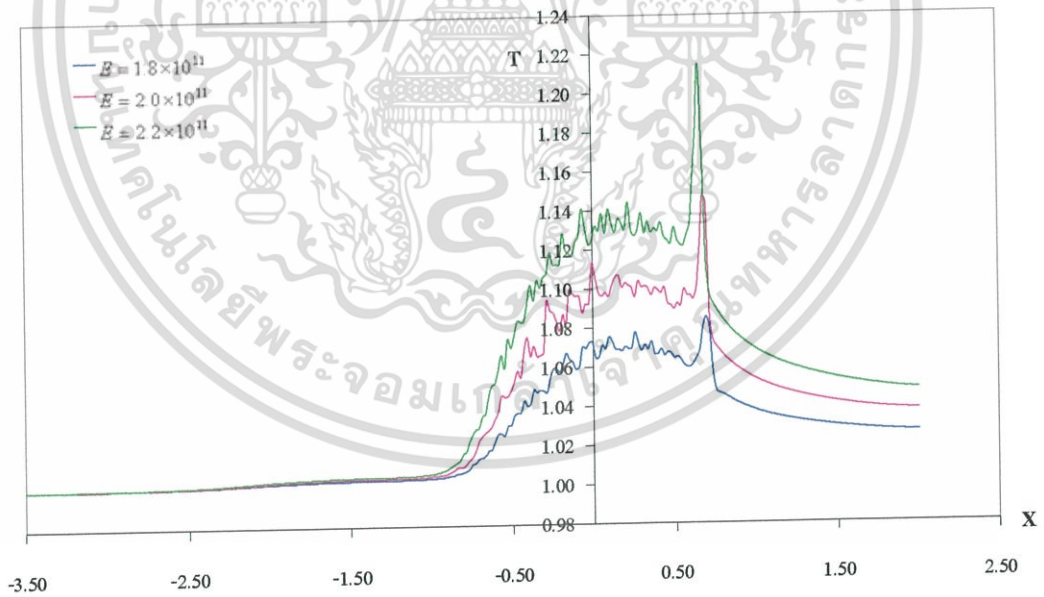


รูปที่ 6.160 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

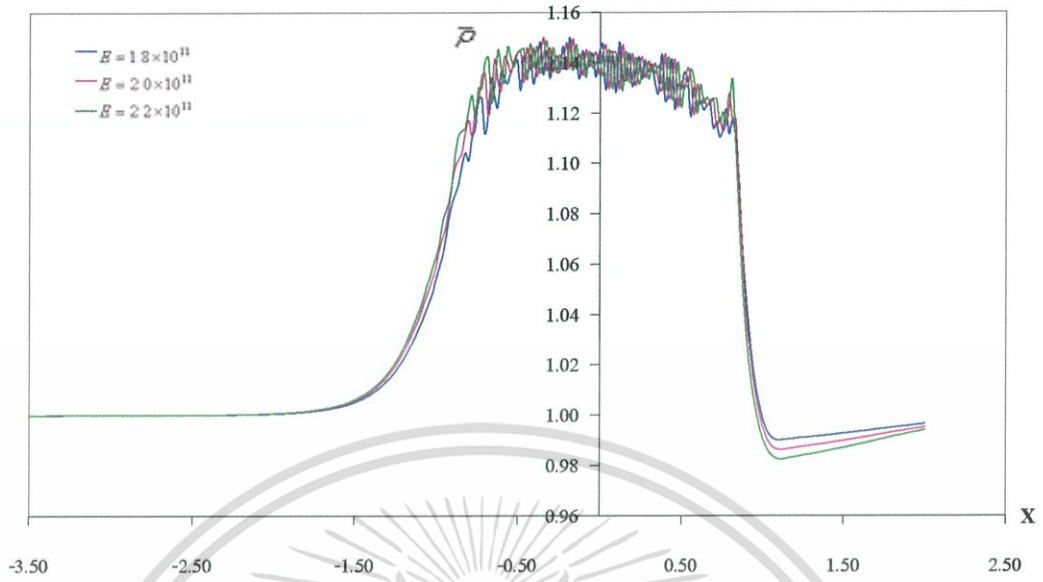


รูปที่ 6.161 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

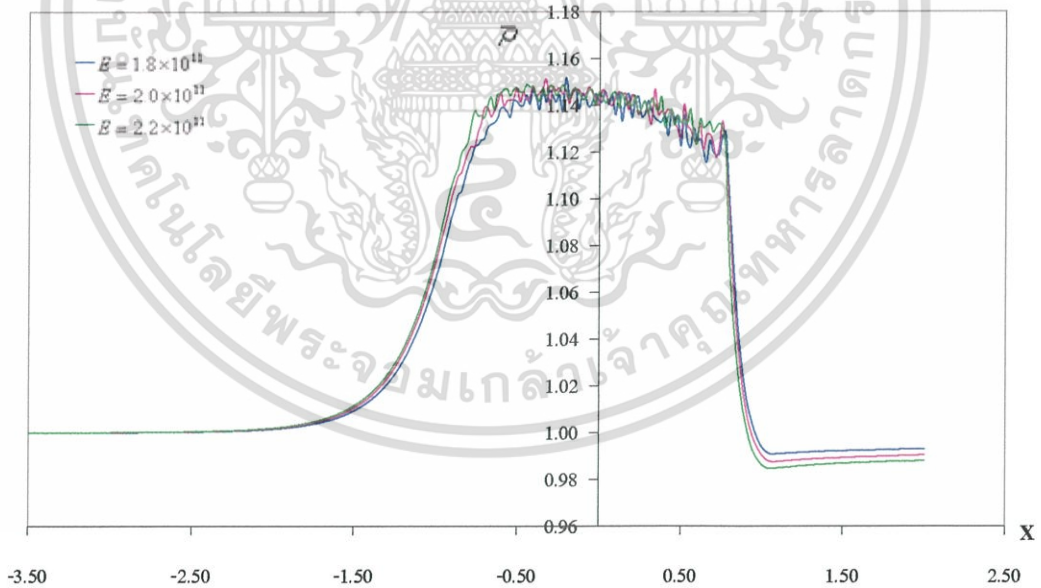


รูปที่ 6.162 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

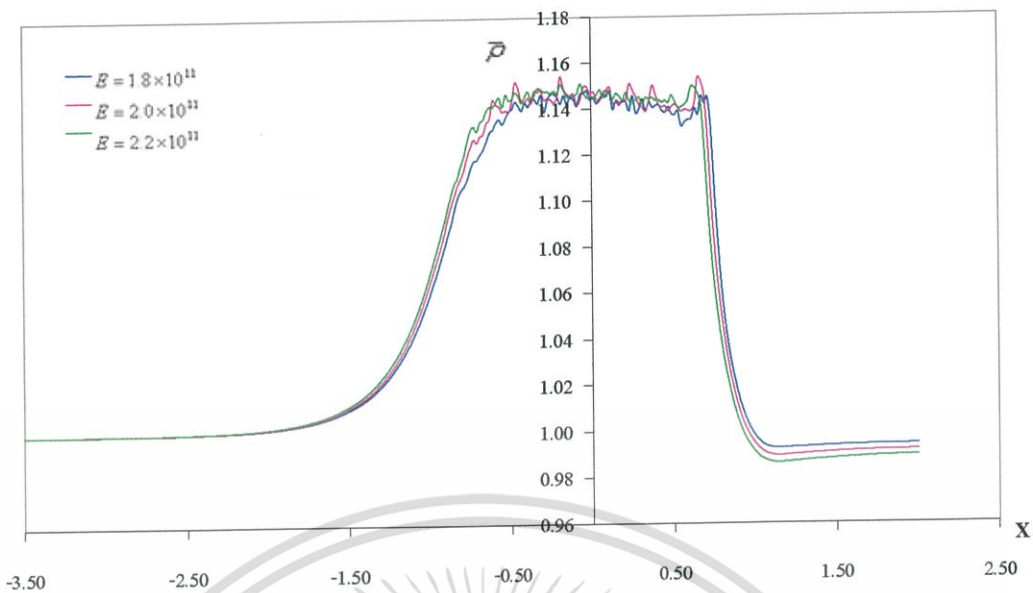


รูปที่ 6.163 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

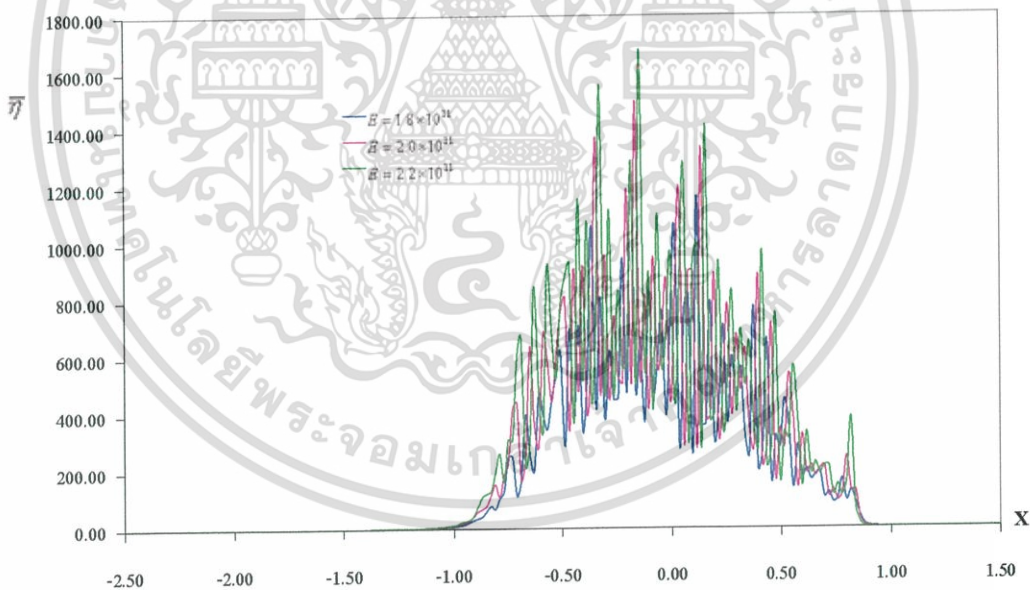


รูปที่ 6.164 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

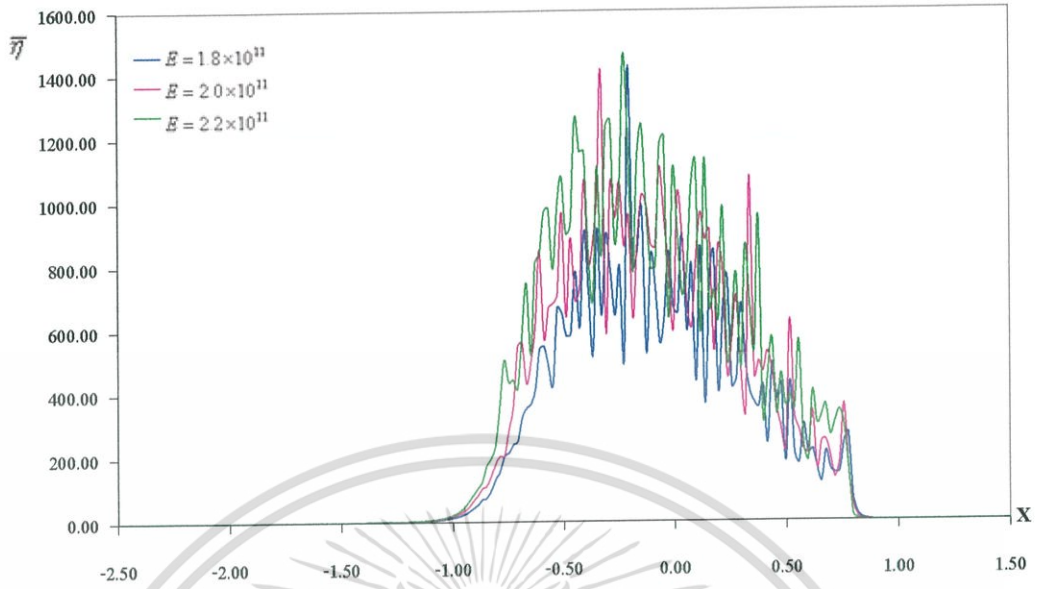


รูปที่ 6.165 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

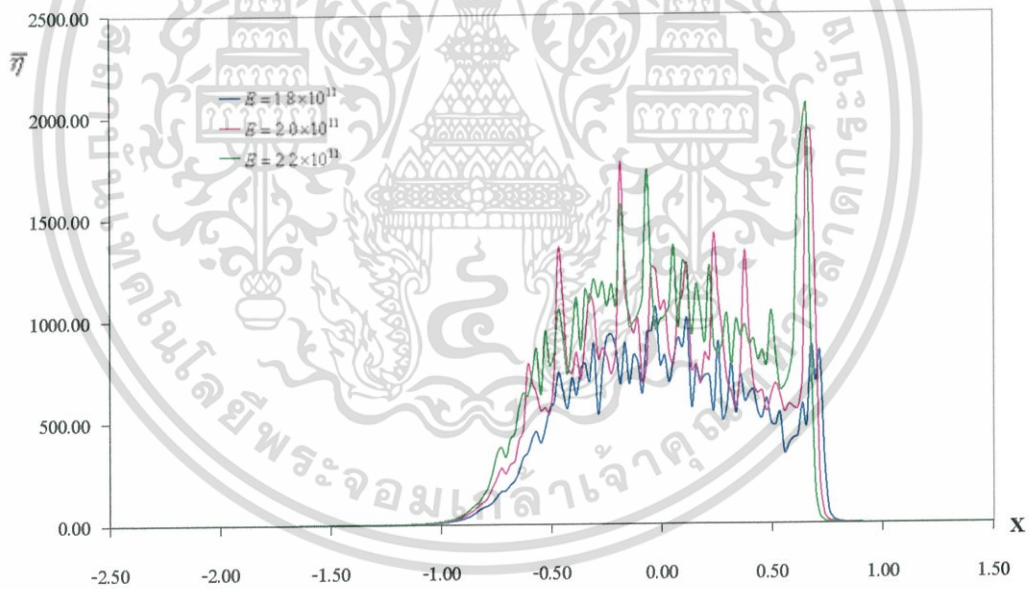


รูปที่ 6.166 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

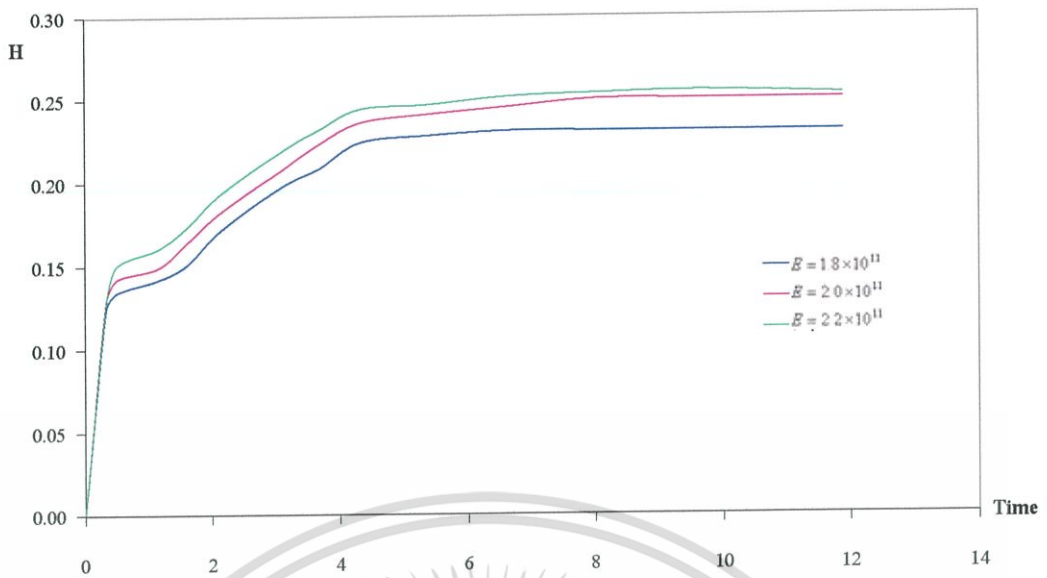


รูปที่ 6.167 กราฟความหนืดที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



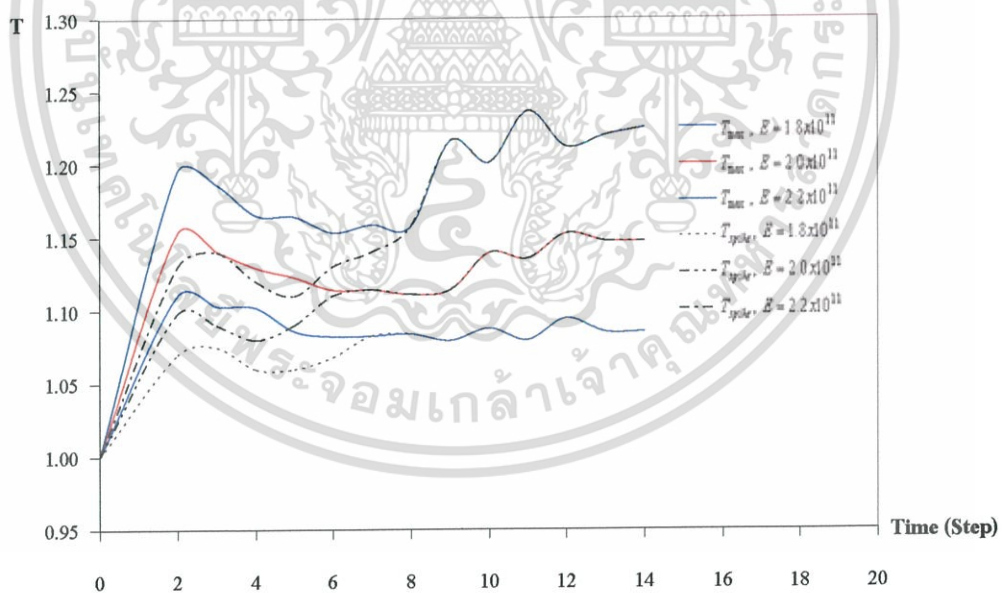
รูปที่ 6.168 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.169 กราฟความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด

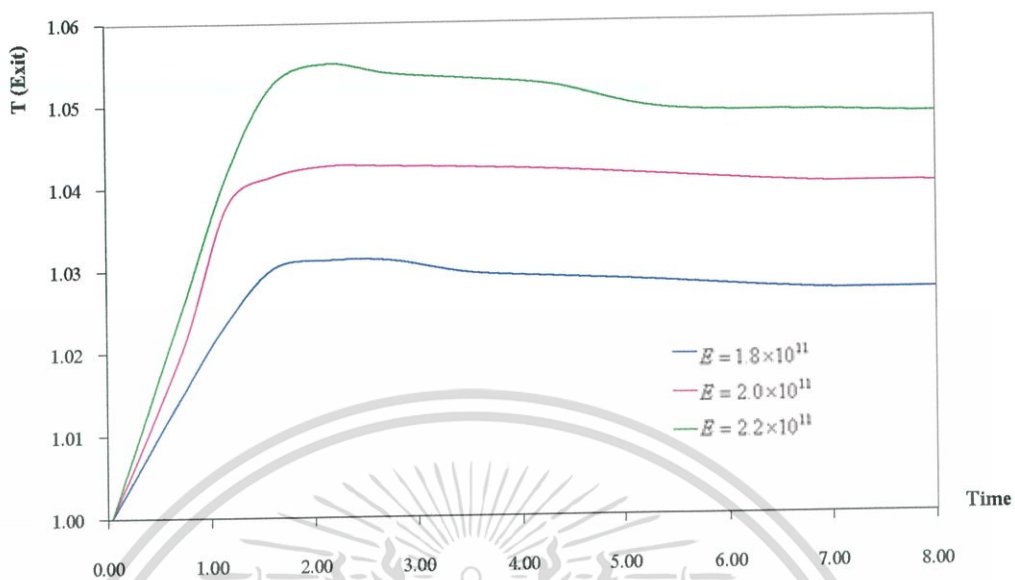
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



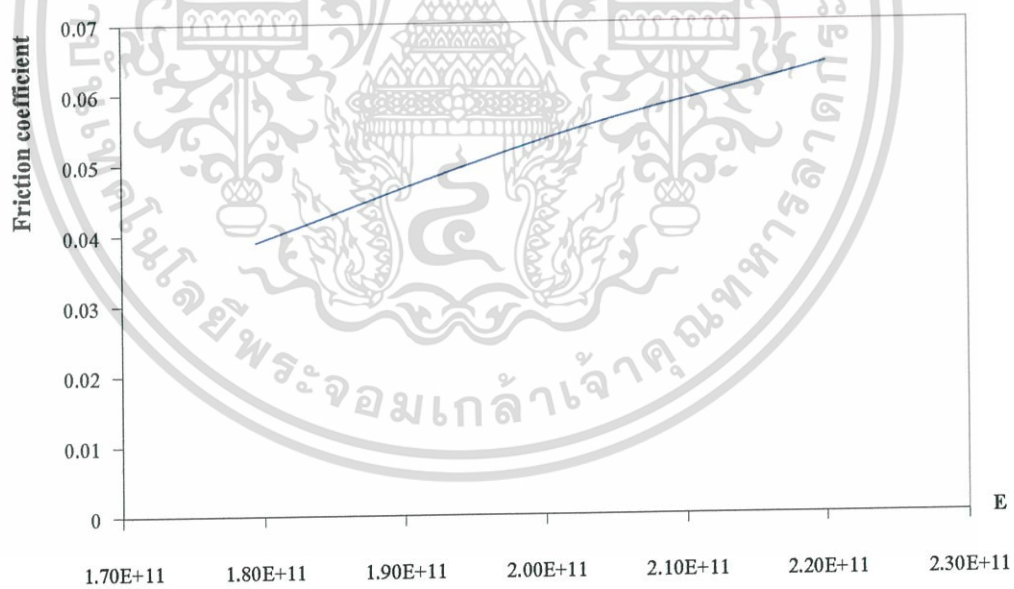
รูปที่ 6.170 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละ

ชนิดเมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.171 กราฟอุณหภูมิที่จุดทางออกที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



รูปที่ 6.172 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลของวัสดุแต่ละชนิด  
เมื่อ  $U = 2 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากคิวยหายที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเตอโรไดนามิกส์

- กรณีผิวเรียบ : เมื่อวัสดุมีค่าความโมดูลัสสูงขึ้น

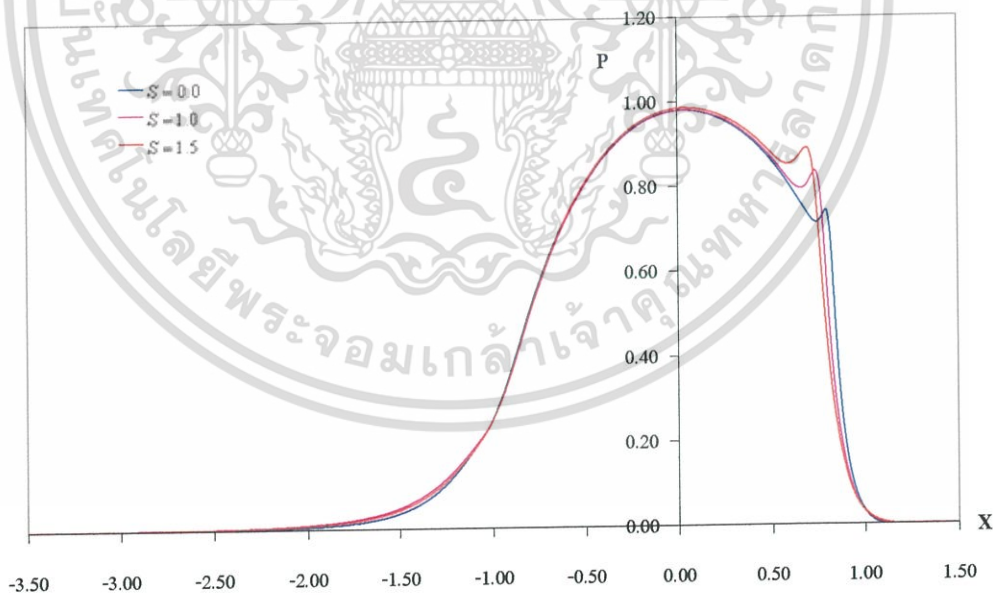
จากกราฟรูปที่ 6.116-6.134 จะพบว่าเมื่อวัสดุมีค่าโมดูลัสสูงขึ้น ค่าความดันที่จุดศูนย์กลางที่มีการสัมผัสจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่ใกล้บริเวณทางออกจะมีผลทำให้ค่าความดันเกิดยอดหนาแน่นแหลมขึ้นมาสูงที่สุดเมื่อค่าวัสดุมีค่าสูงและกราฟความหนาฟิล์มจะมีค่าหนาที่สุด ขณะที่ความหนาฟิล์มมีค่ามากที่สุดจะส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นตาม และสำหรับค่าความหนาแน่นและความหนืดจะมีค่าสูงที่สุดที่จุดศูนย์กลาง แต่เมื่อได้รับการเสียดสีทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืดที่ทางออกลดลง

- กรณีคิวยหาย : เมื่อวัสดุมีค่าความโมดูลัสสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 6.135-6.172 จะพบว่าความหยาบจะมีผลต่อความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นน้อย แต่จะมีผลต่ออุณหภูมิและความหนืดของสารหล่อลื่นมาก ทำให้รูปร่างของอุณหภูมิและความหนืดมีพฤติกรรมที่มีผลของความหยาบมาก

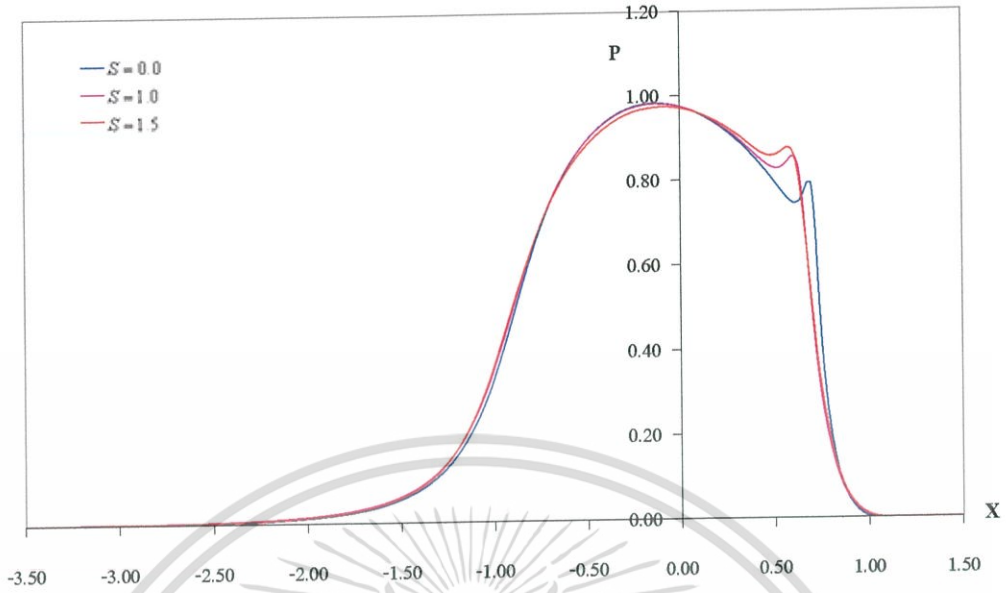
## 6.1.4 สลิป-สไลด์

### 6.1.4.1 กรณีโรลเลอร์และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ

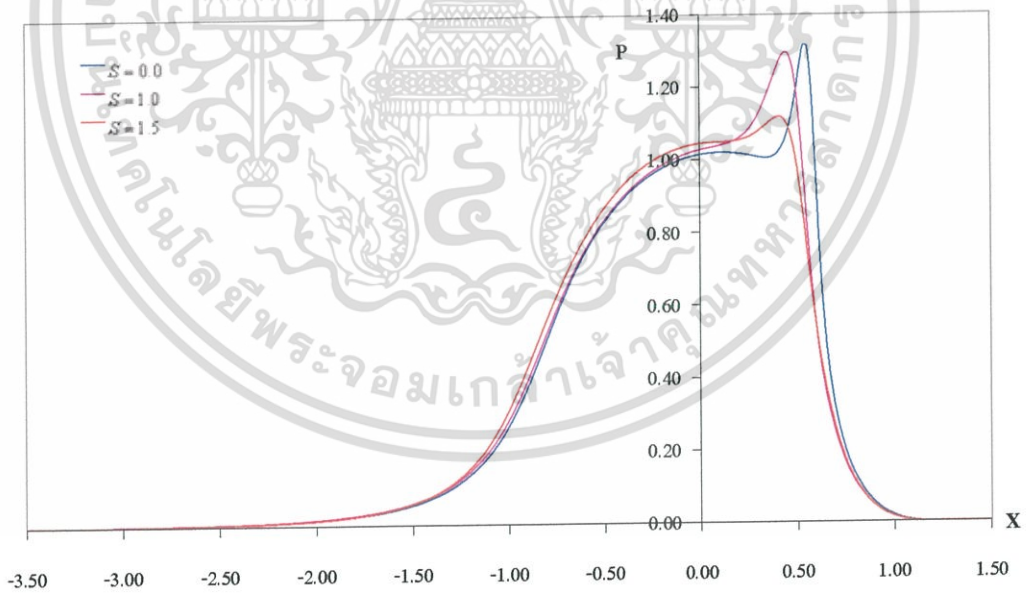


รูปที่ 6.173 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

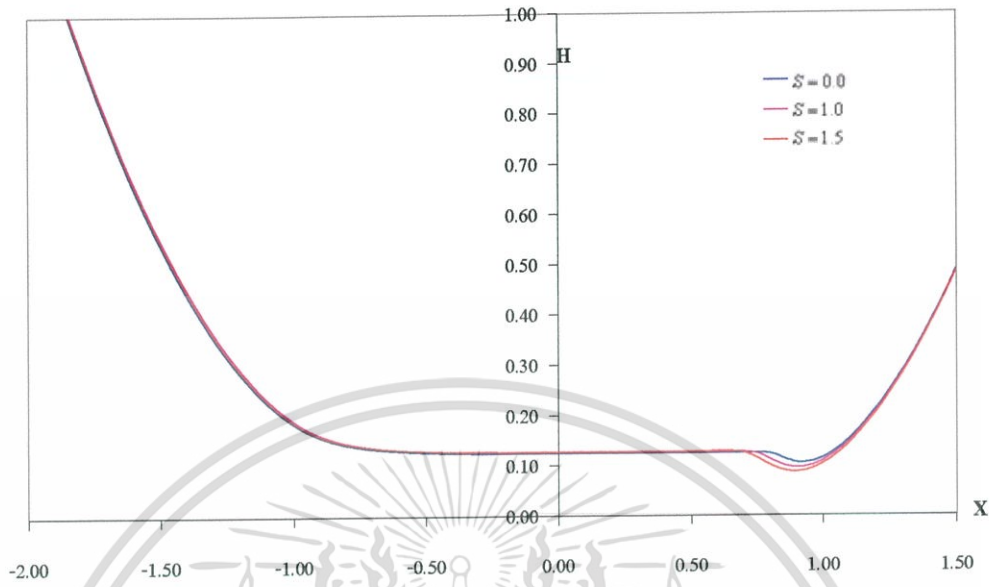


รูปที่ 6.174 กราฟความดันที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

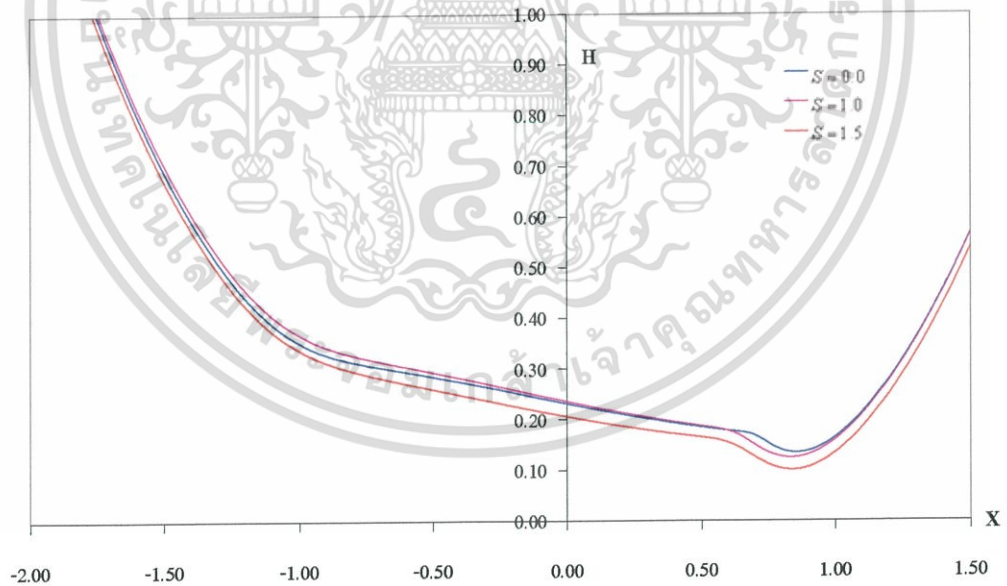


รูปที่ 6.175 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

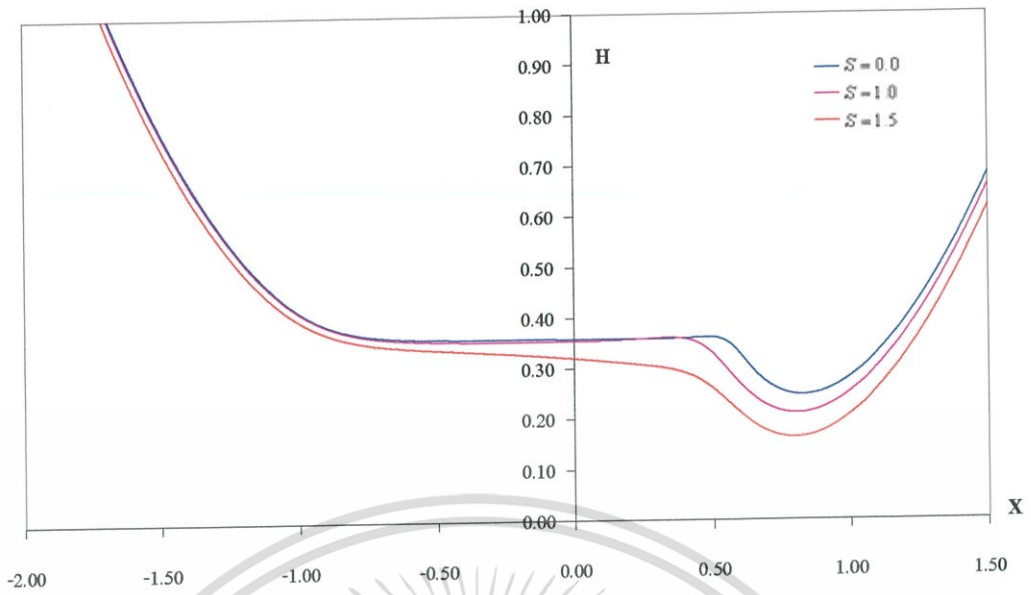


รูปที่ 6.176 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

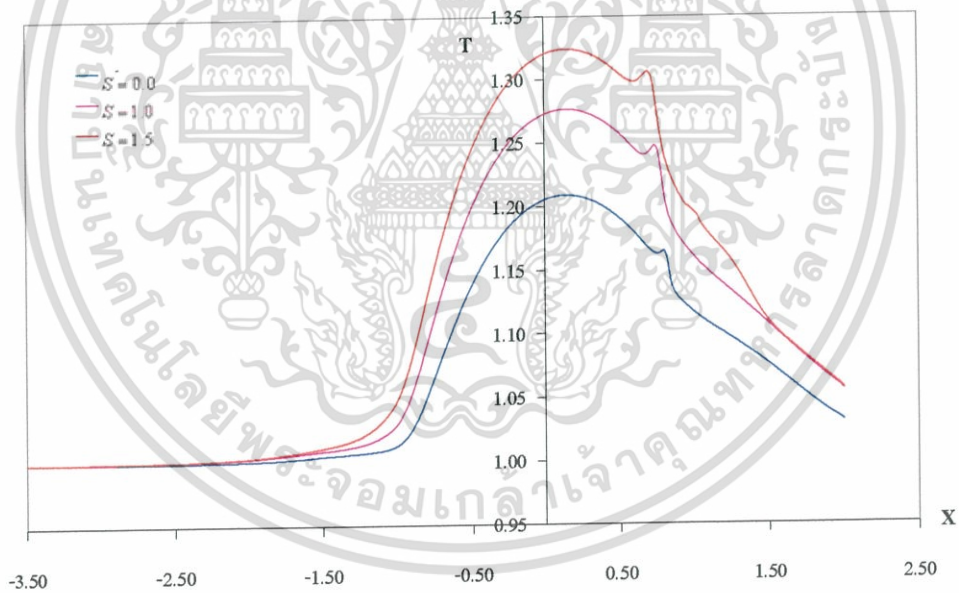


รูปที่ 6.177 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

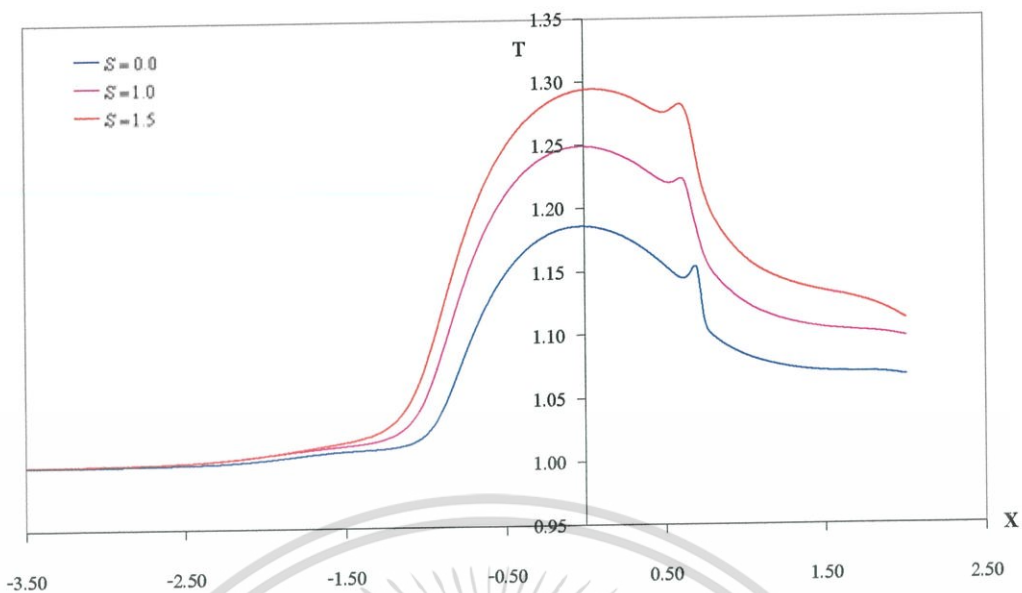


รูปที่ 6.178 กราฟความหนาฟิล์มสภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

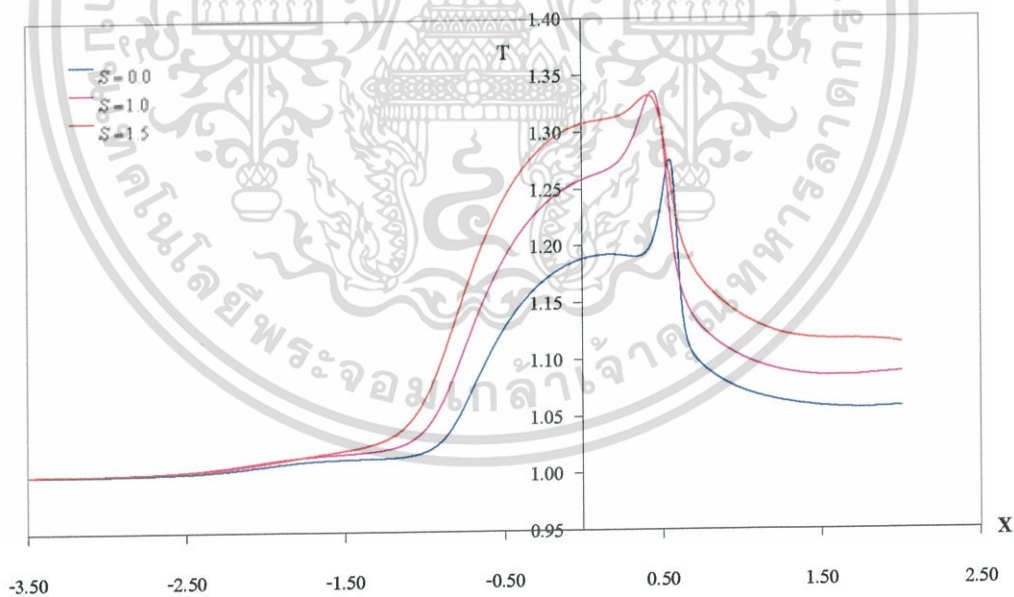


รูปที่ 6.179 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

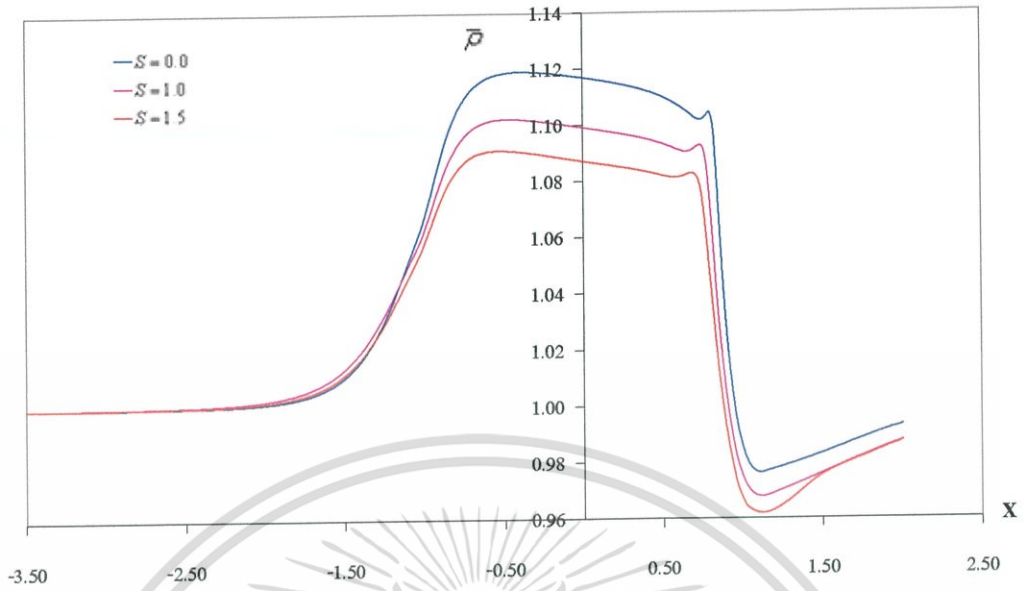


รูปที่ 6.180 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

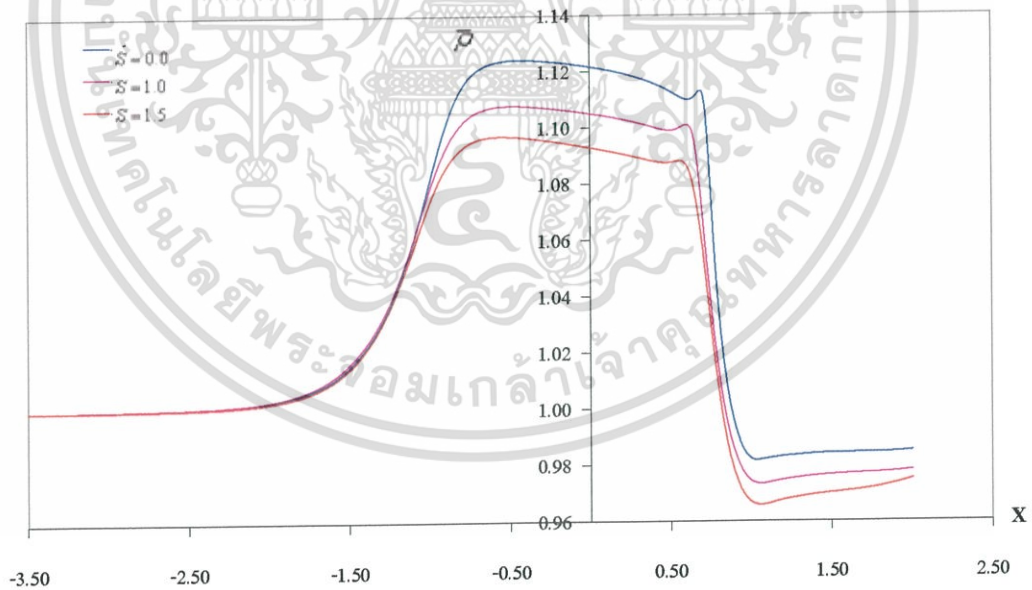


รูปที่ 6.181 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

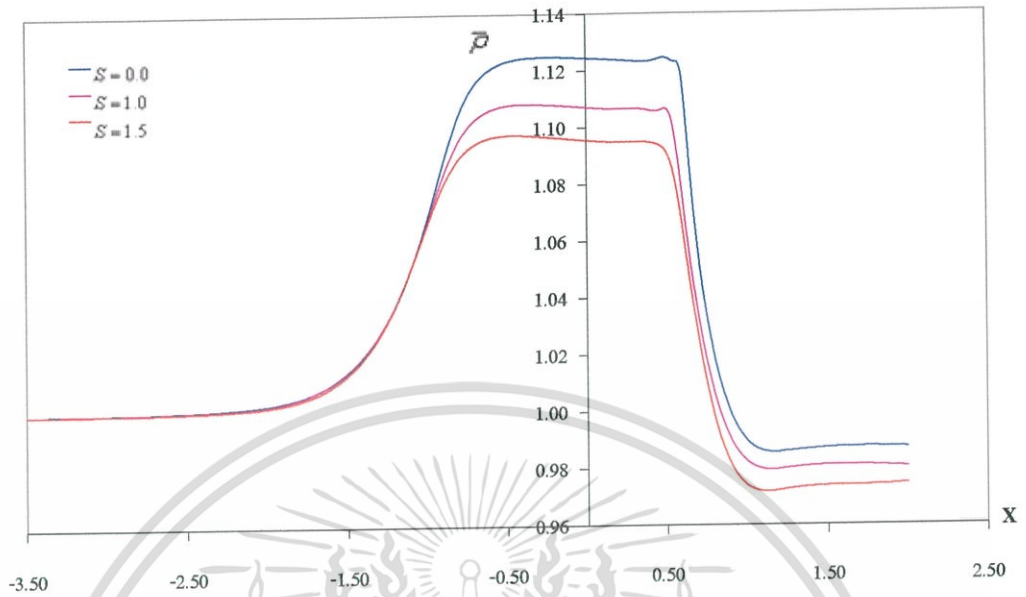


รูปที่ 6.182 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

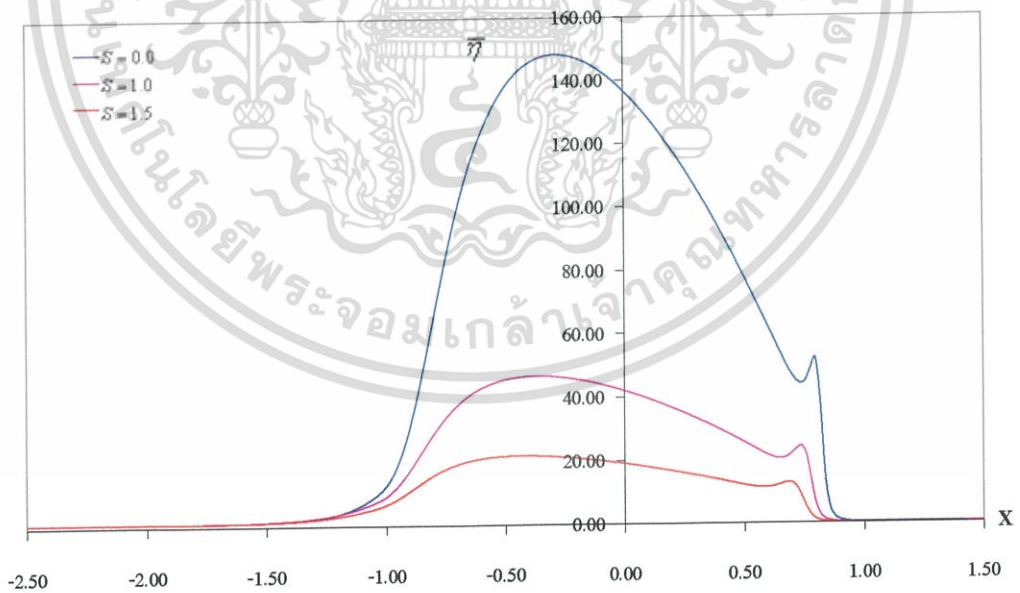


รูปที่ 6.183 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

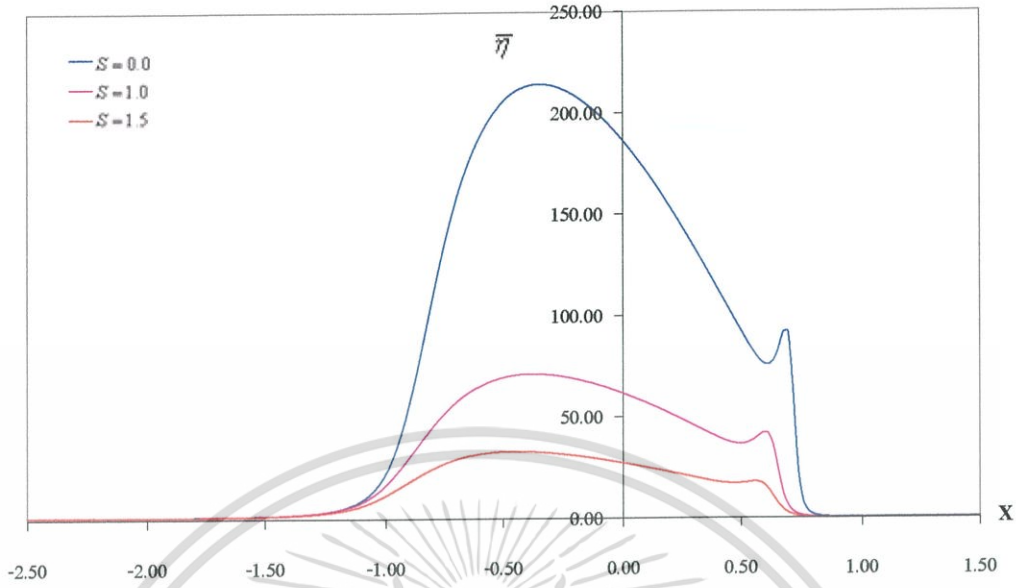


รูปที่ 6.184 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

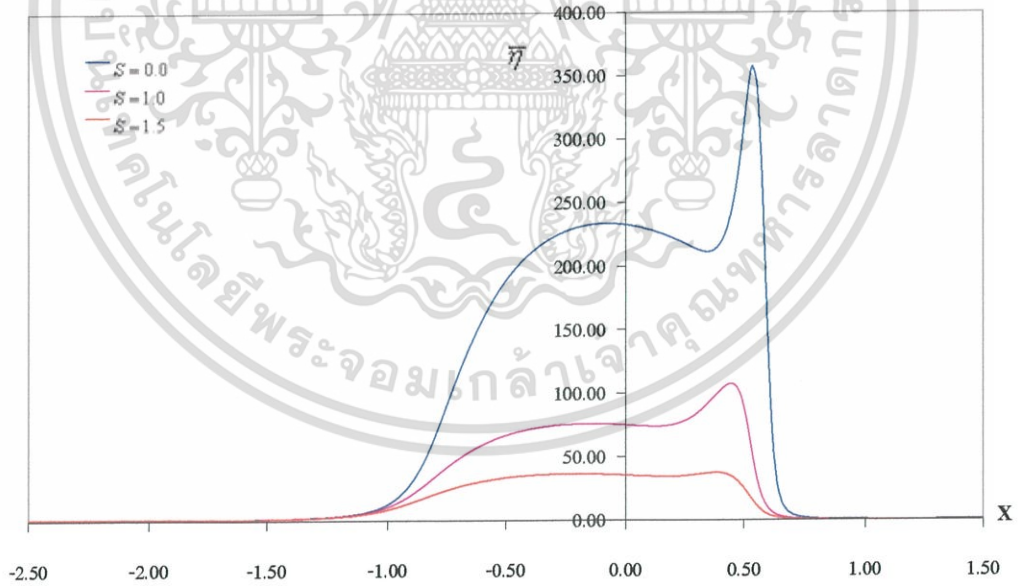


รูปที่ 6.185 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

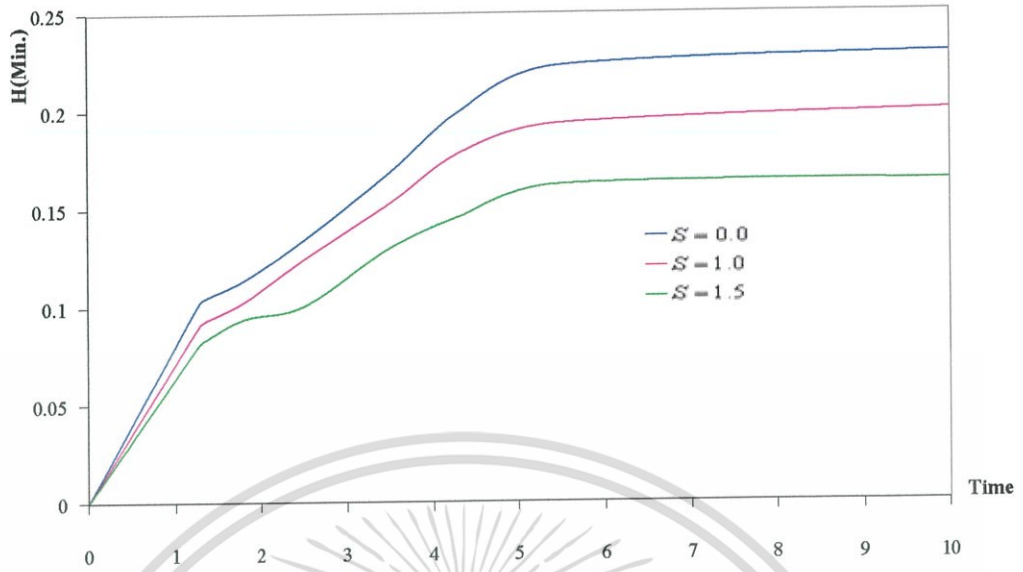


รูปที่ 6.186 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

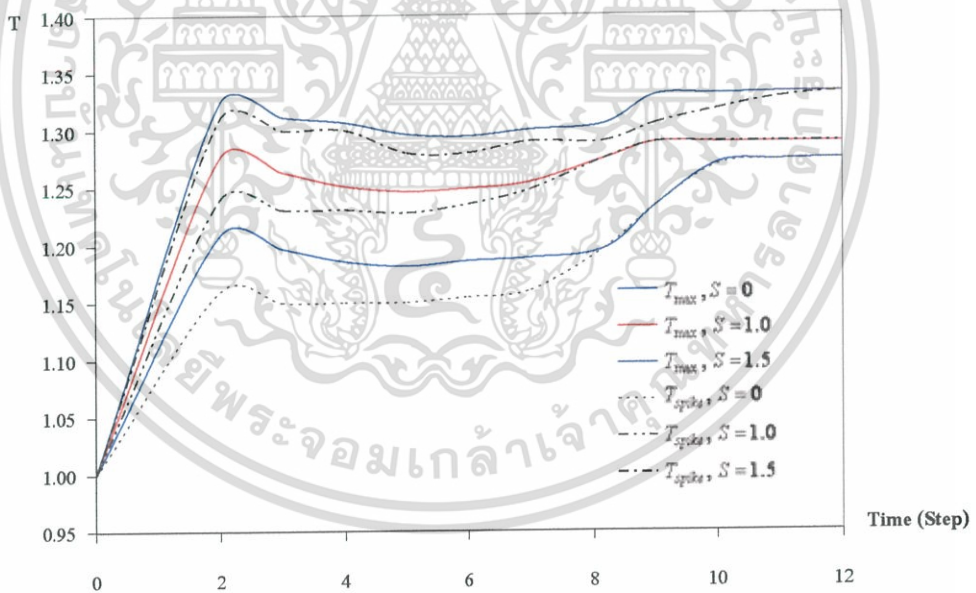


รูปที่ 6.187 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

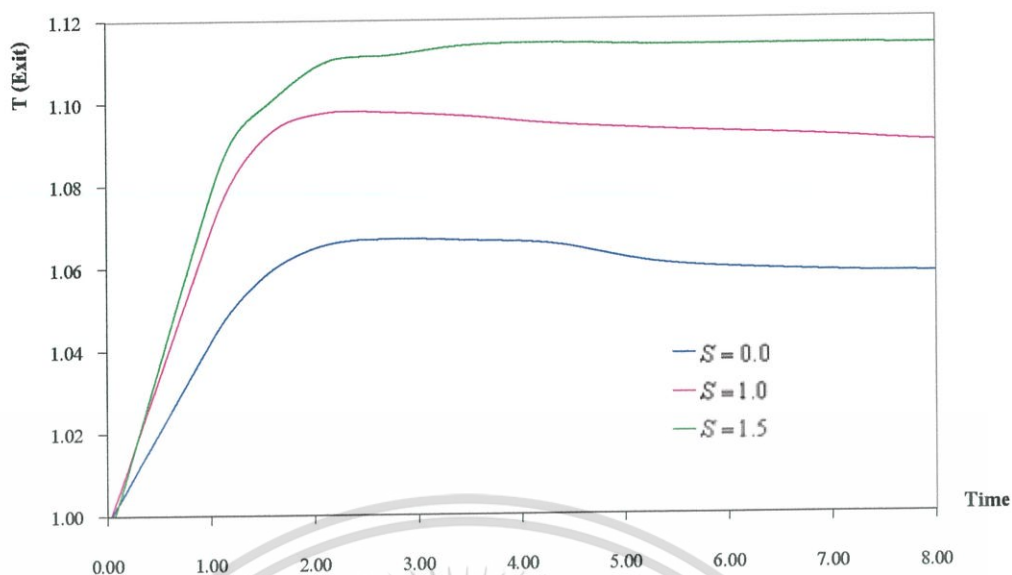


รูปที่ 6.188 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อนไถลต่างกัน  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

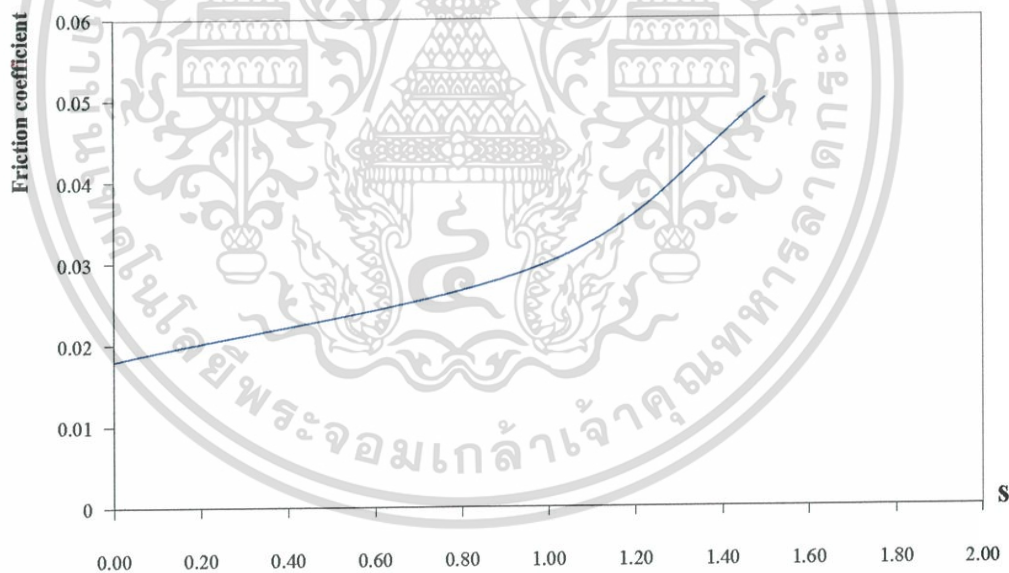


รูปที่ 6.189 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อนไถลต่างกัน  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



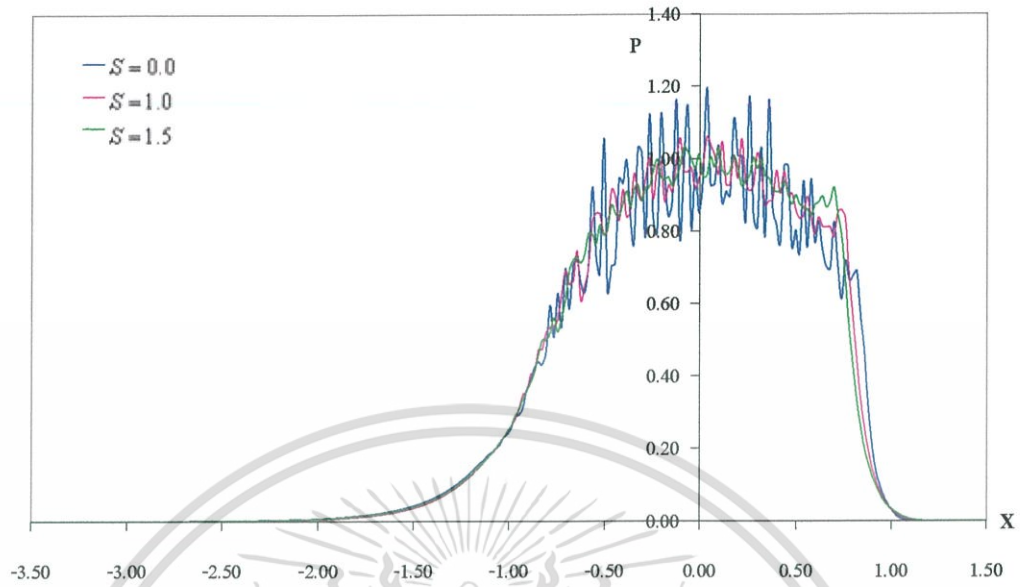
รูปที่ 6.190 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่ทางออกที่เข้าสู่จุดที่การเลื่อน ไกลต่างกัน  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



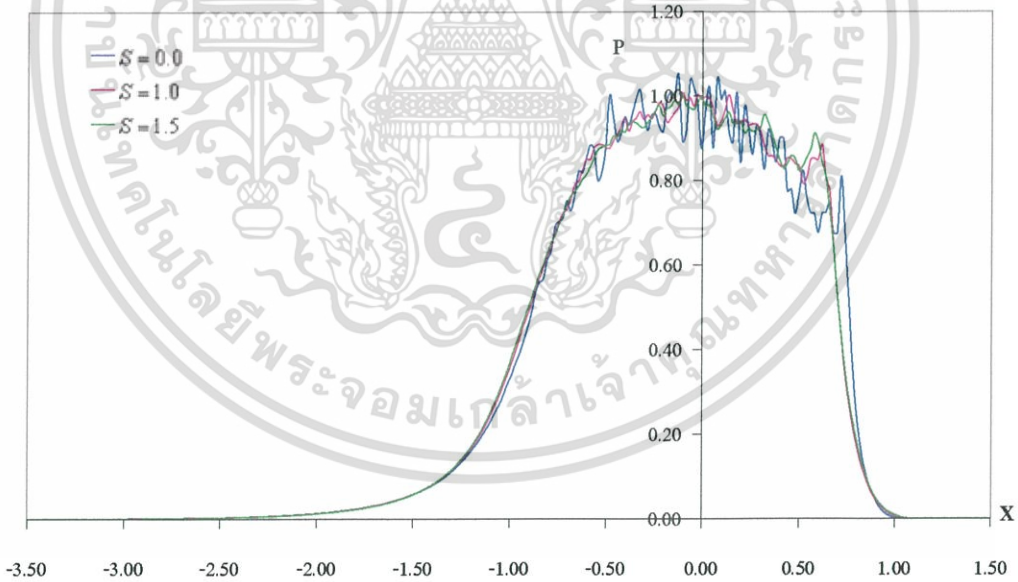
รูปที่ 6.191 กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เข้าสู่จุดสมดุลที่การเลื่อน ไกลต่างกัน  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.4.2 กรณีโรลเลอร์มีผิวหยาบโมเดล 3 และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ

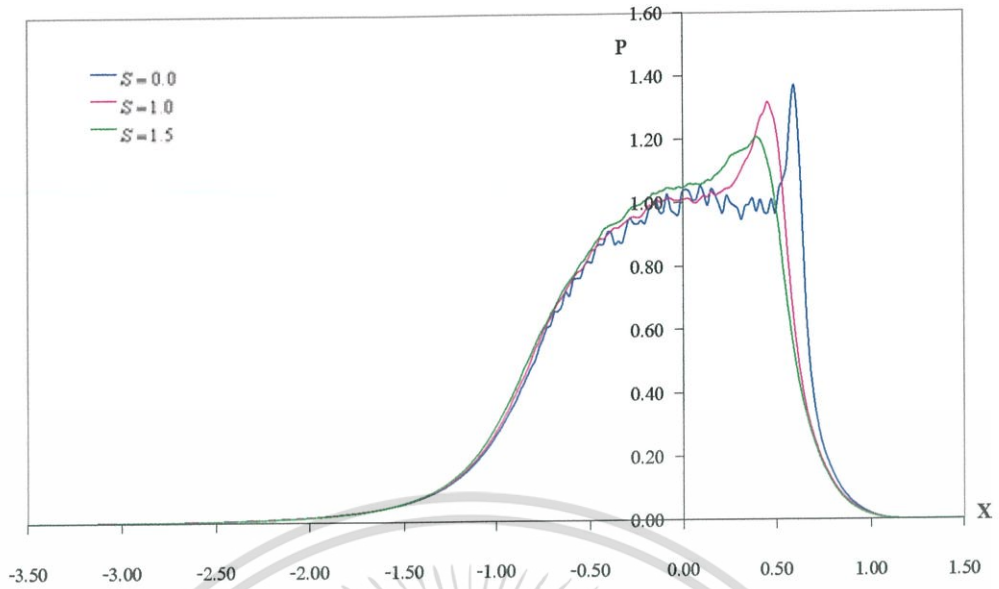


รูปที่ 6.192 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

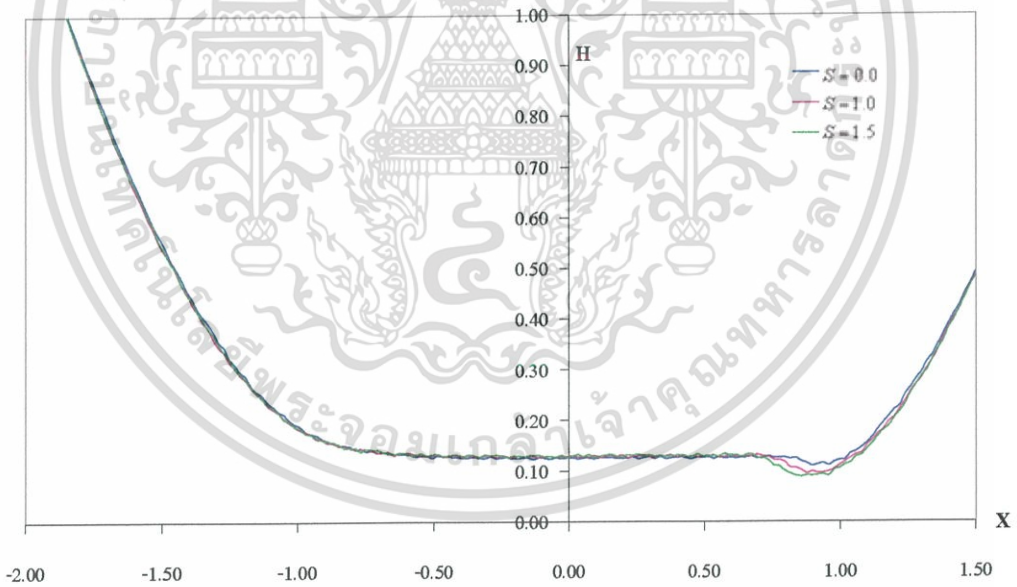


รูปที่ 6.193 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

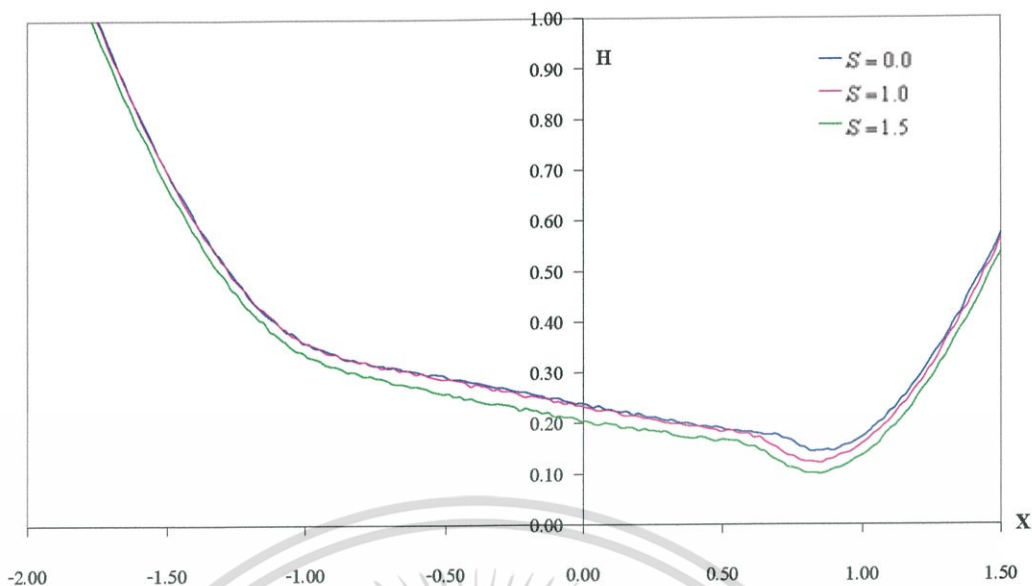


รูปที่ 6.194 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

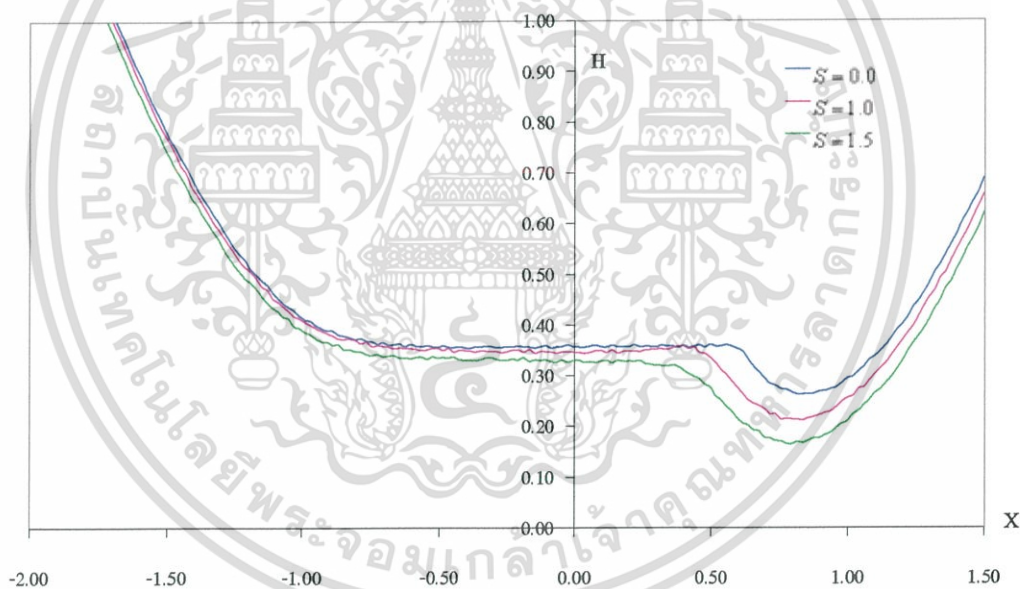


รูปที่ 6.195 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

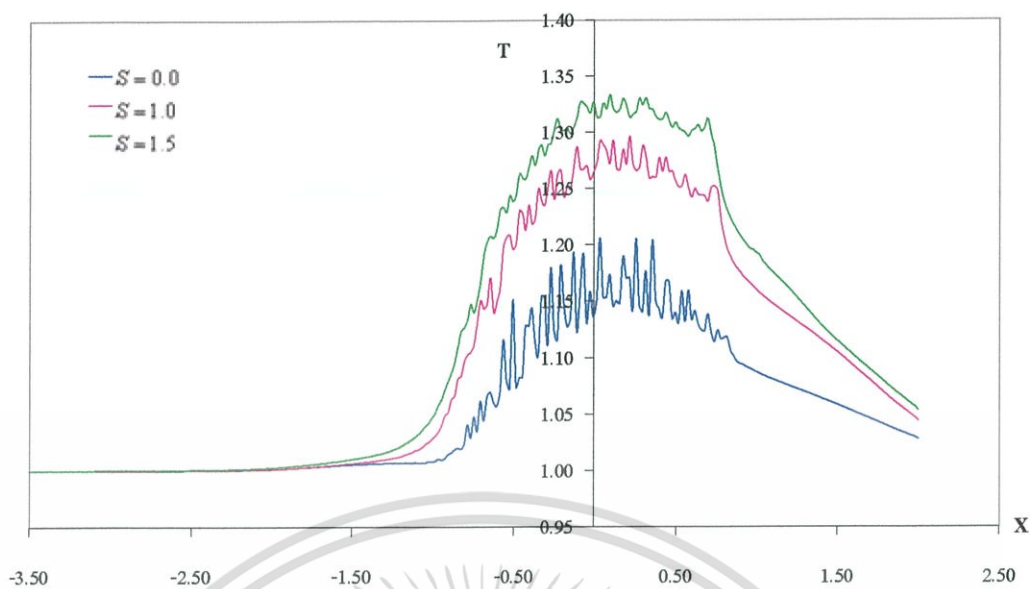


รูปที่ 6.196 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

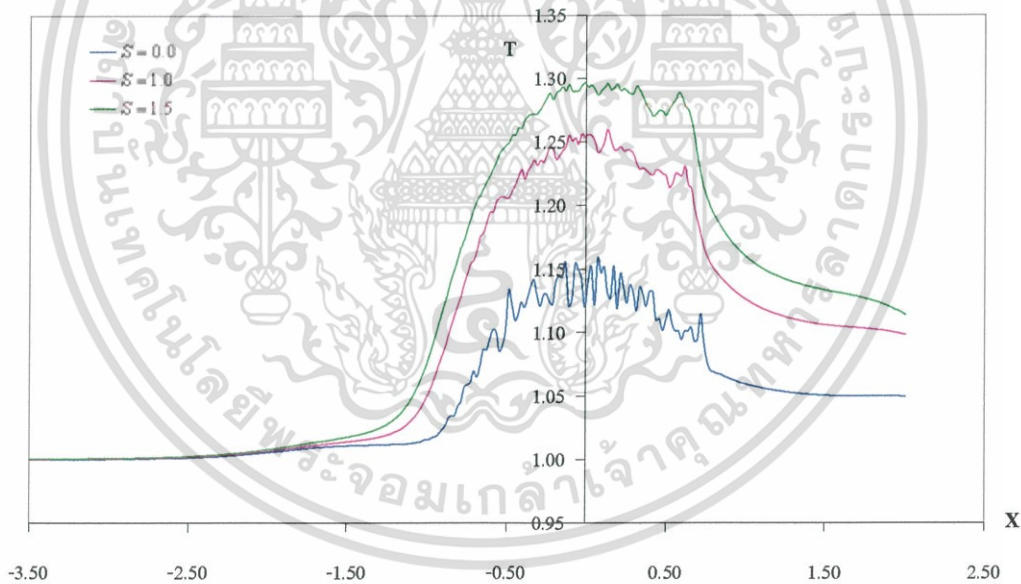


รูปที่ 6.197 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

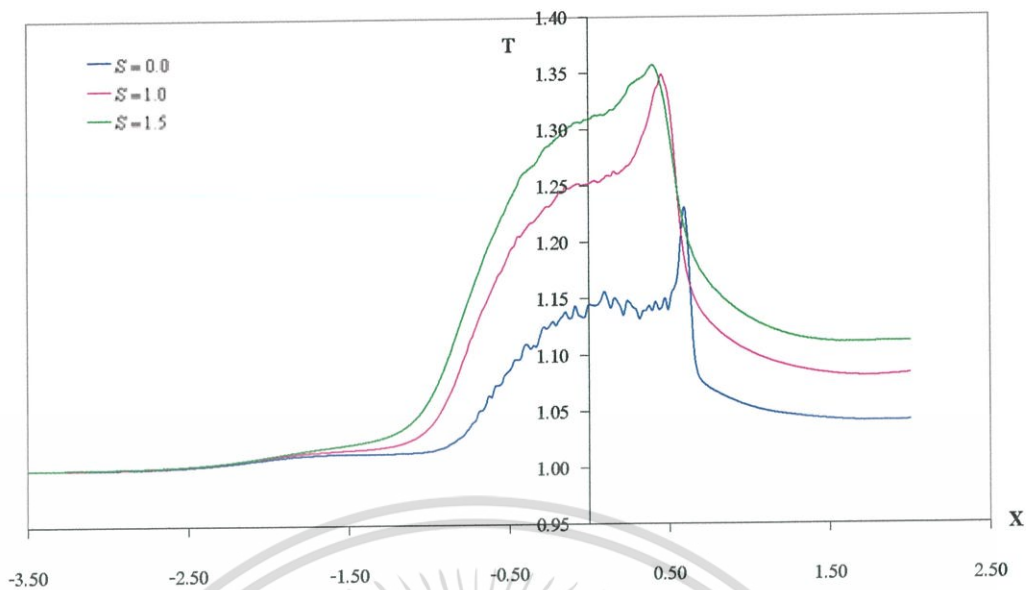


รูปที่ 6.198 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

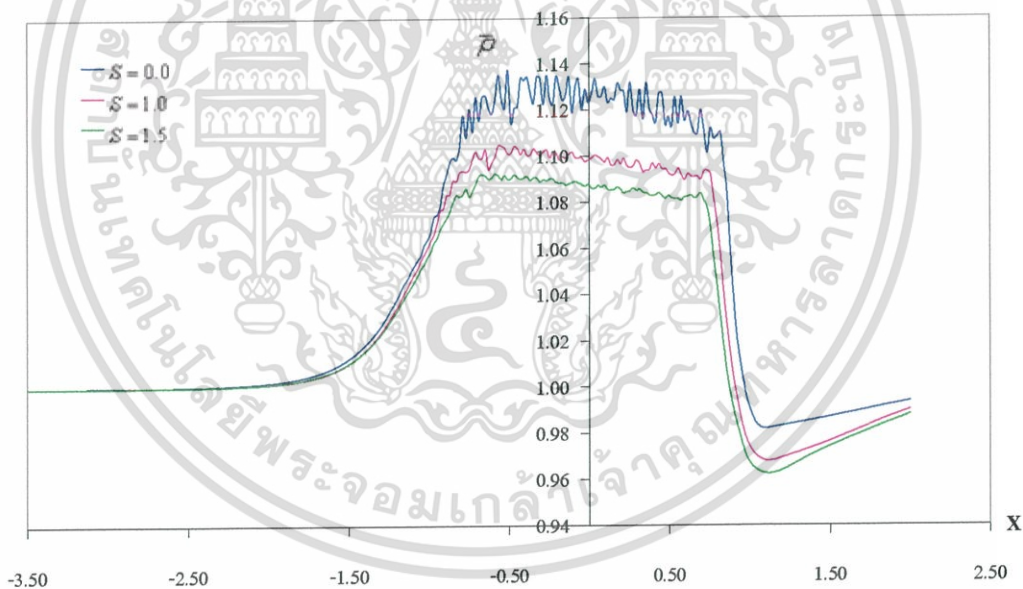


รูปที่ 6.199 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

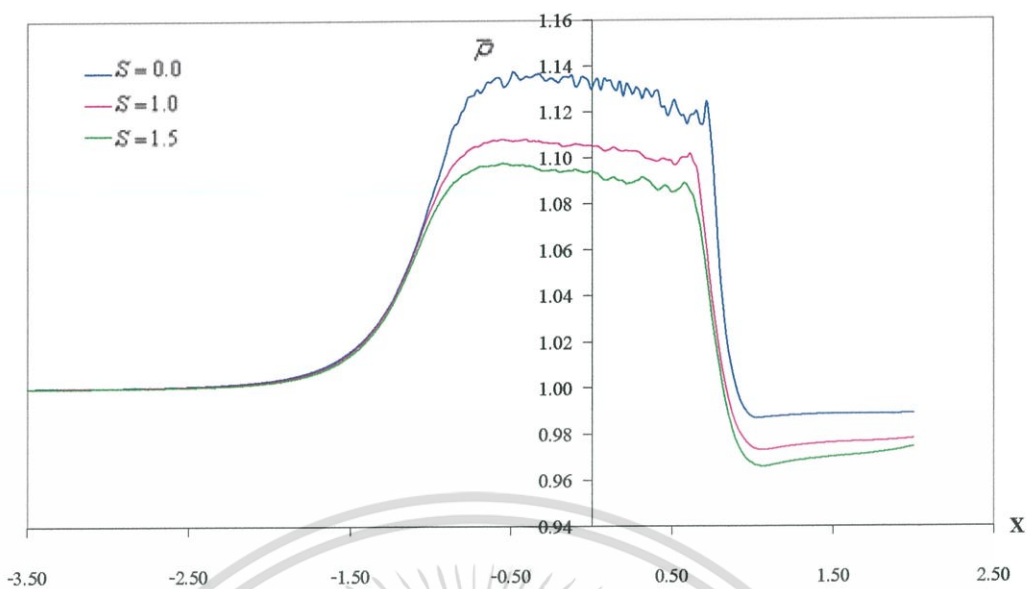


รูปที่ 6.200 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

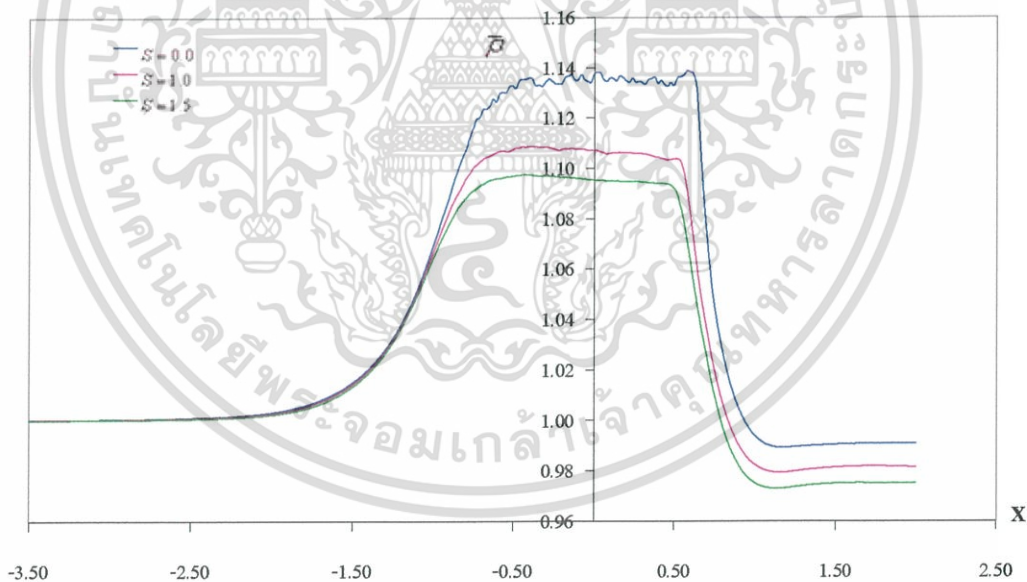


รูปที่ 6.201 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

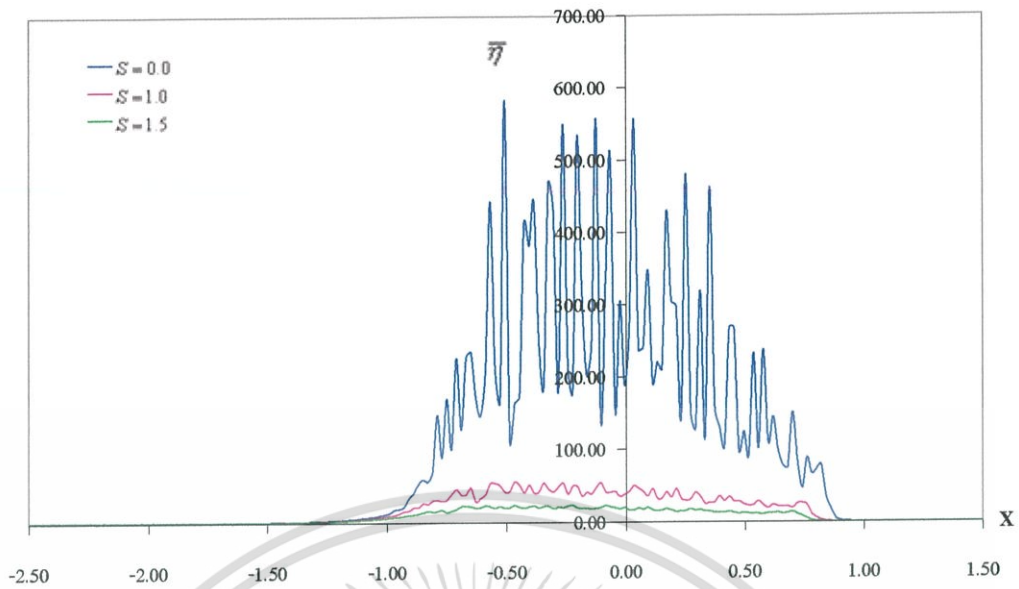


รูปที่ 6.202 กราฟความหนาแน่นที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

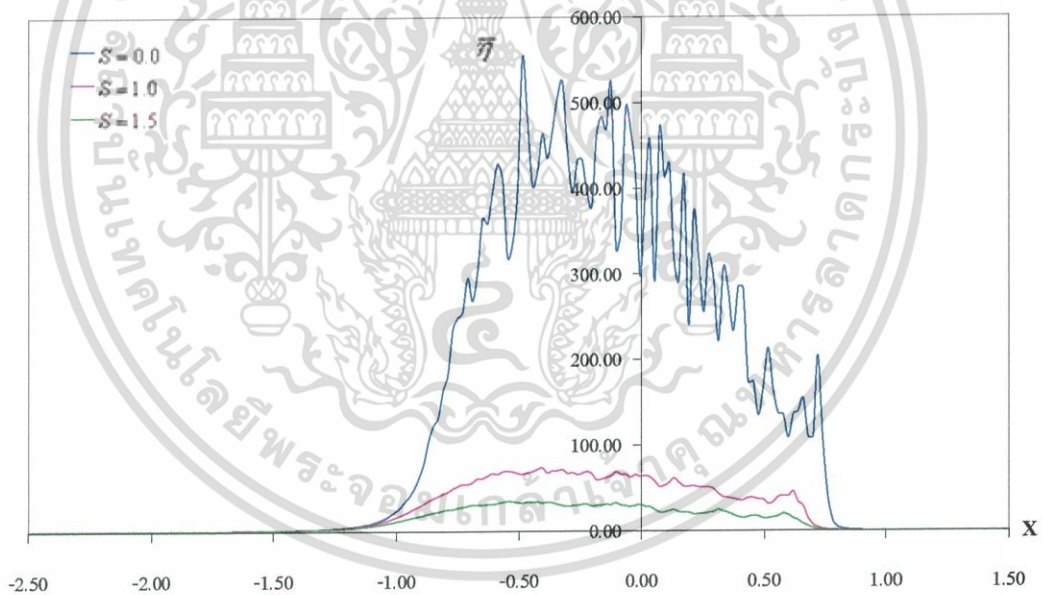


รูปที่ 6.203 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

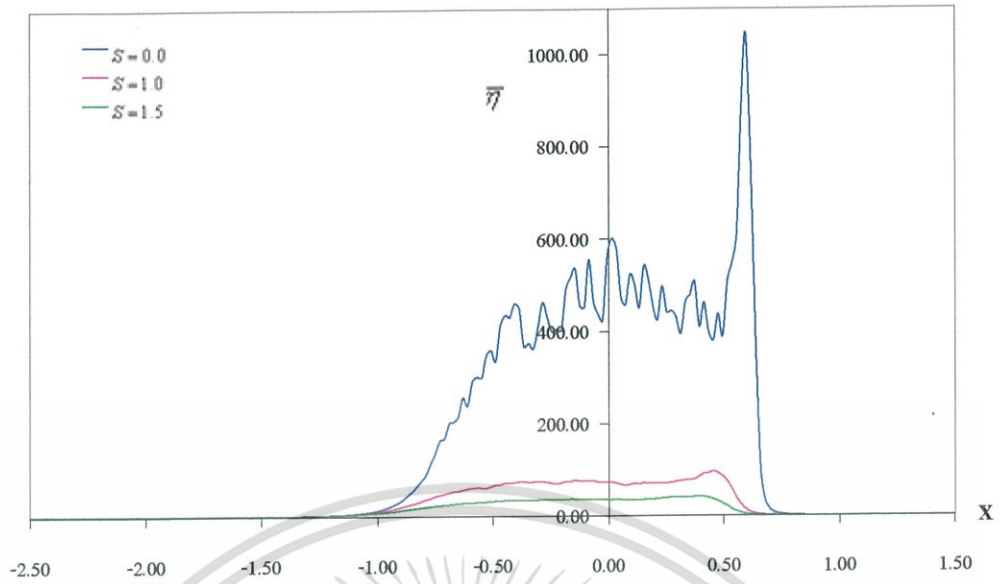


รูปที่ 6.204 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

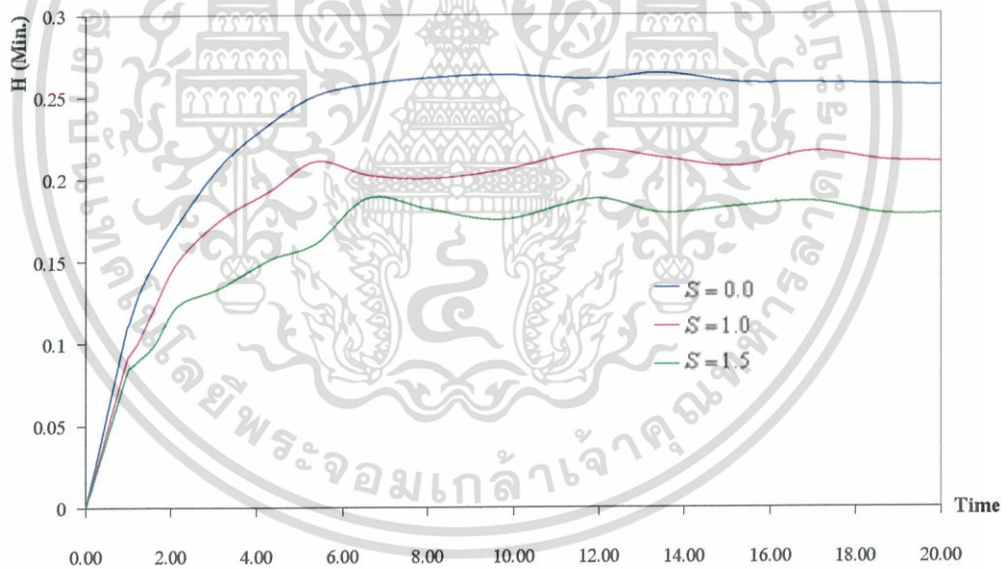


รูปที่ 6.205 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

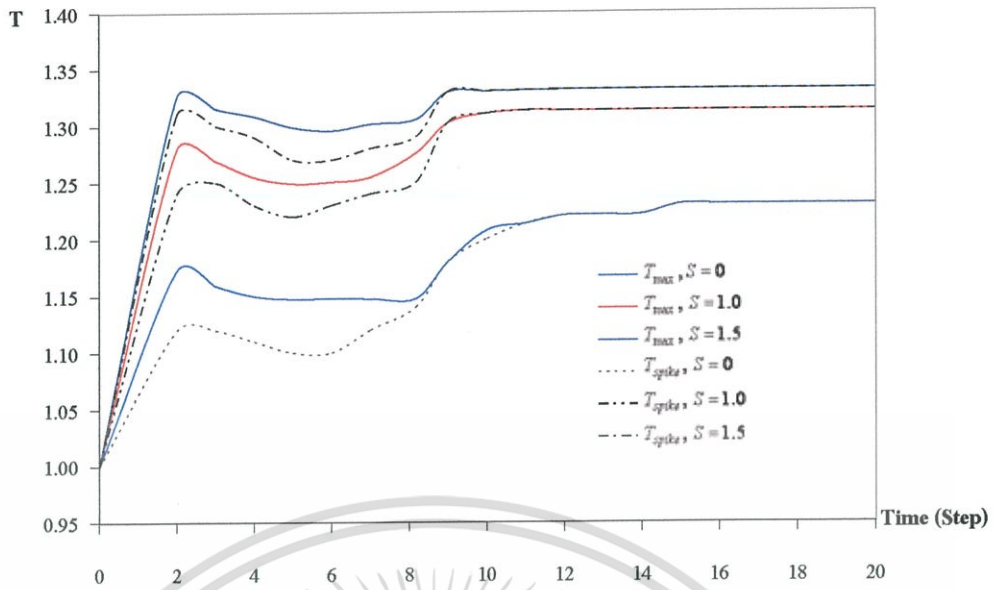


รูปที่ 6.206 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

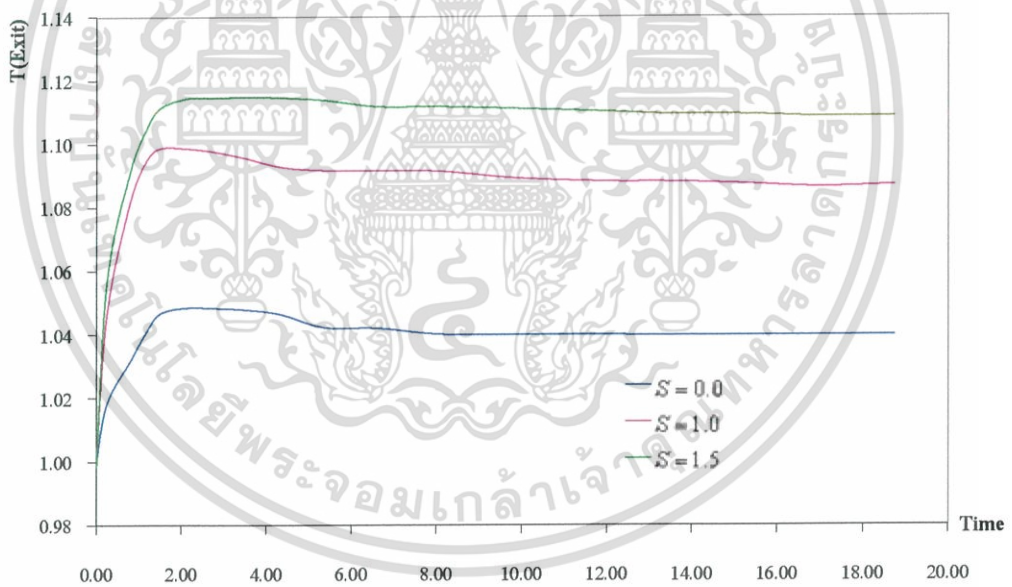


รูปที่ 6.207 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลที่แต่ละภาวะที่กระทำ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



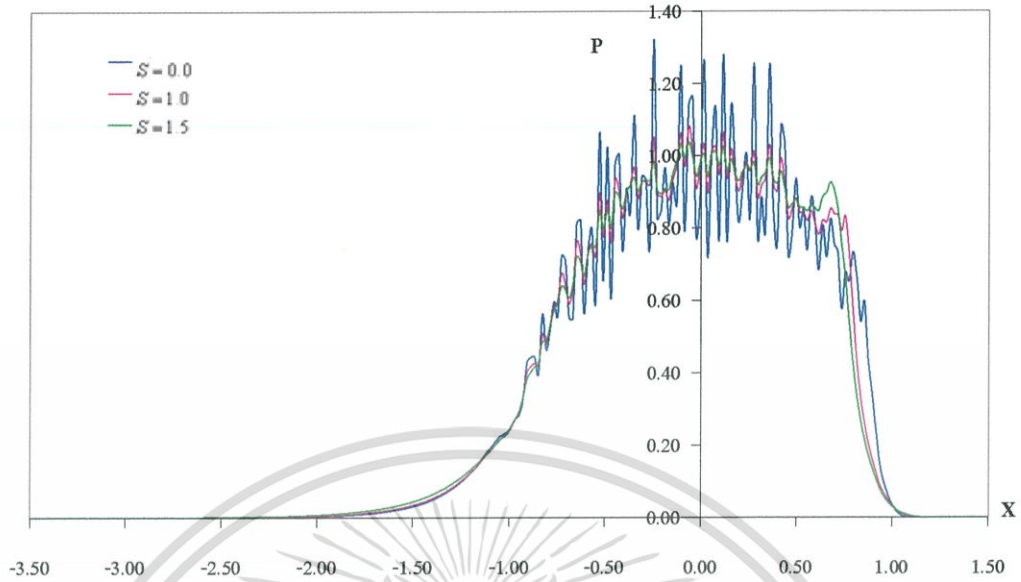
รูปที่ 6.208 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละภาวะที่กระทำ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40



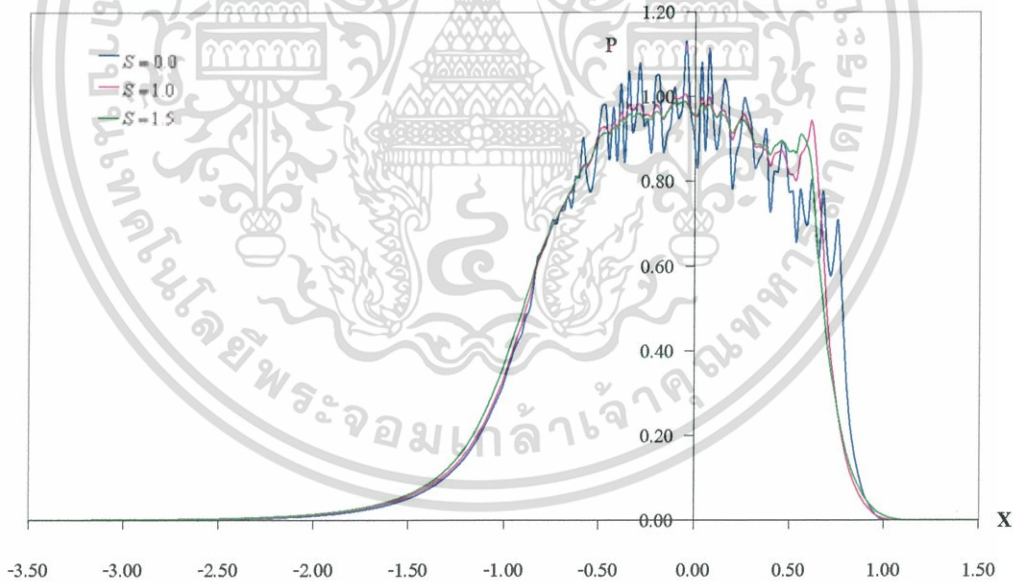
รูปที่ 6.209 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่ทางออกที่เข้าสู่จุดสมมูลที่แต่ละภาวะที่กระทำ  
เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.4.3 กรณีโรลเลอร์มีผิวเรียบ และแผ่นเพลทโมเดล 4

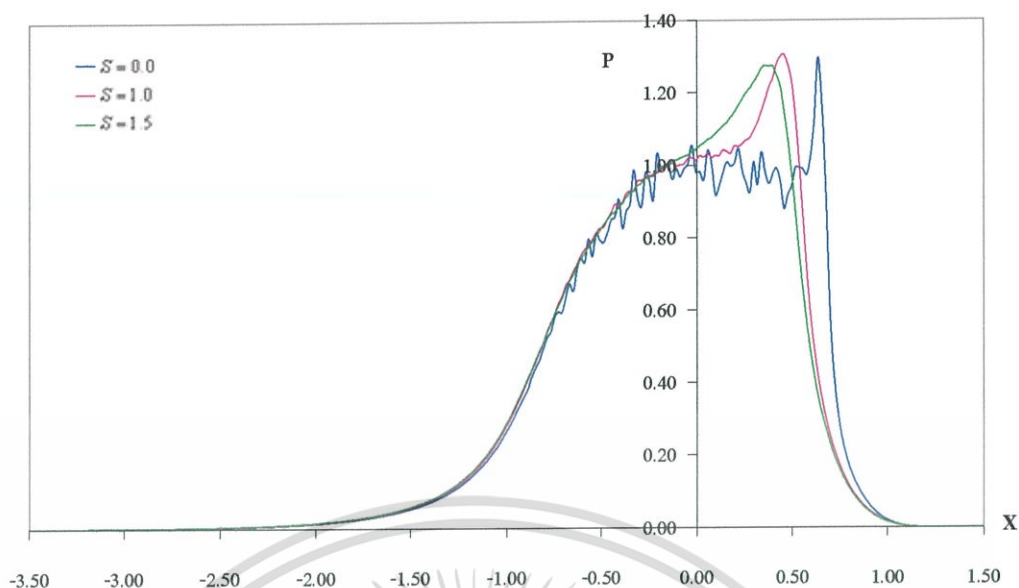


รูปที่ 6.210 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

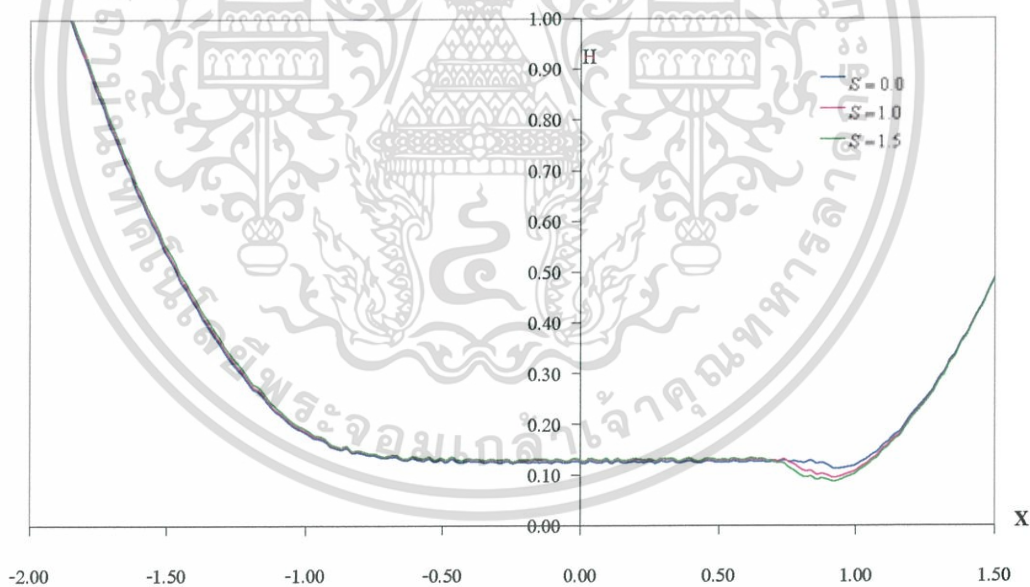


รูปที่ 6.211 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

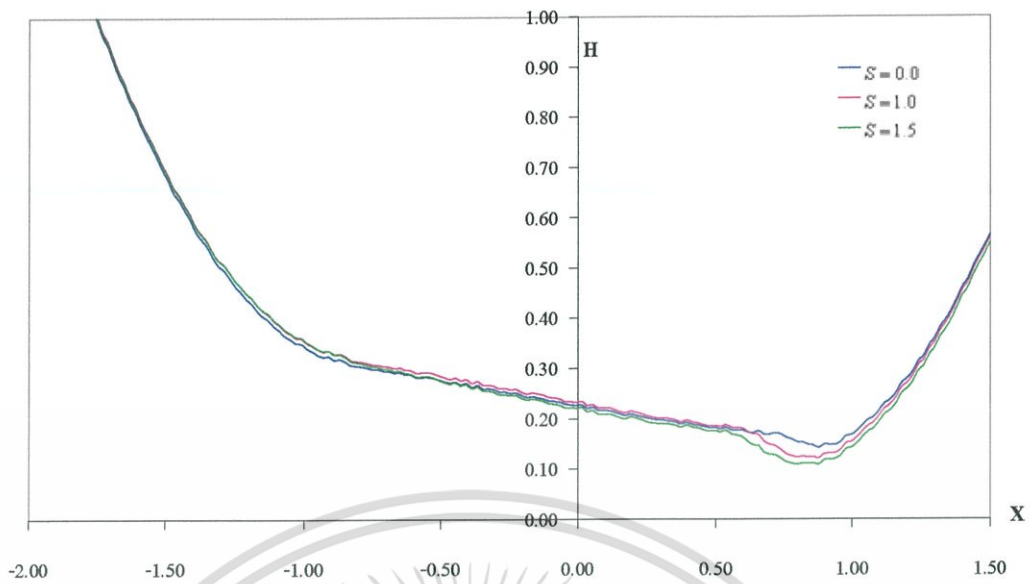


รูปที่ 6.212 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

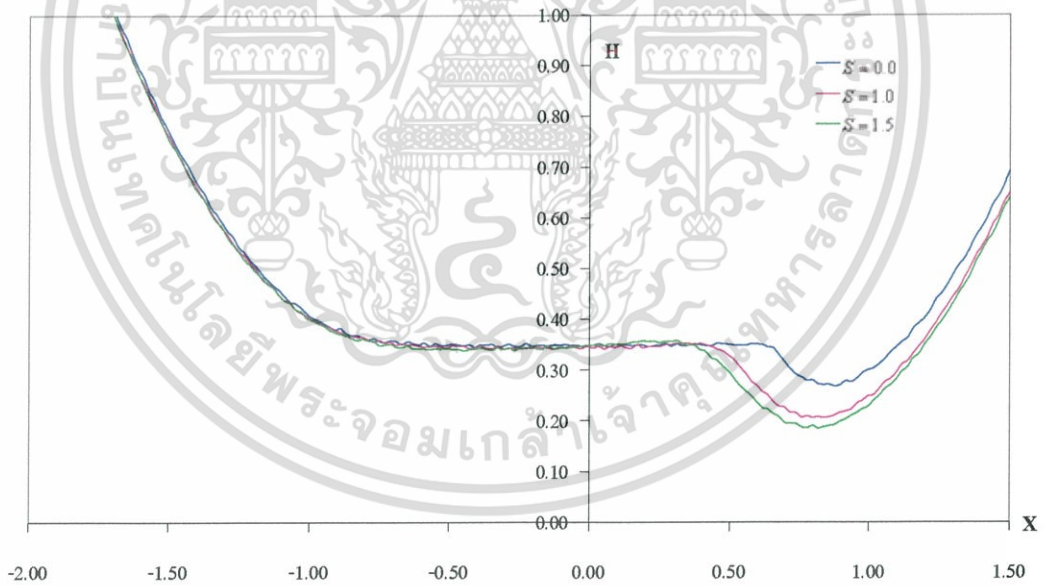


รูปที่ 6.213 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

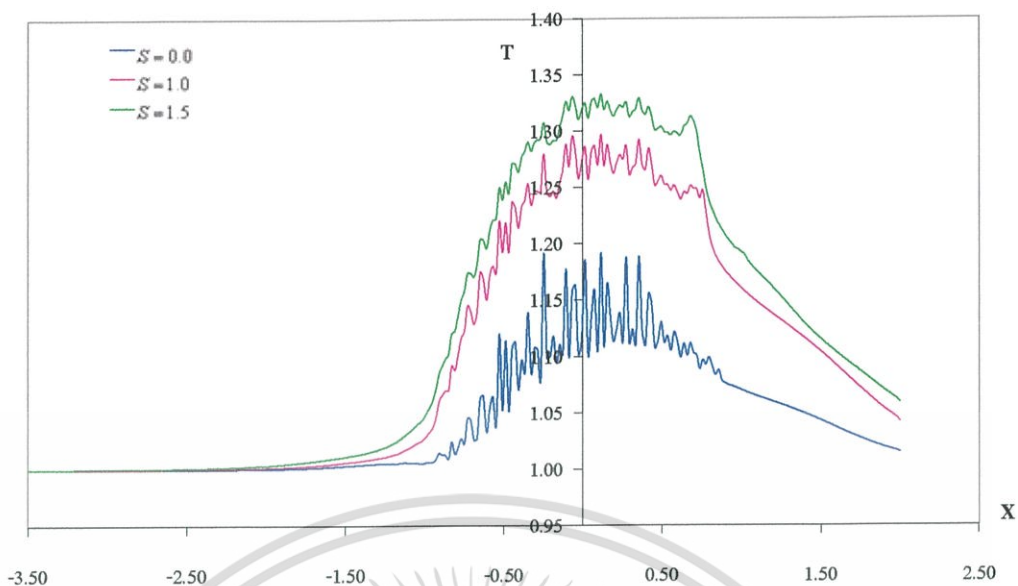


รูปที่ 6.214 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

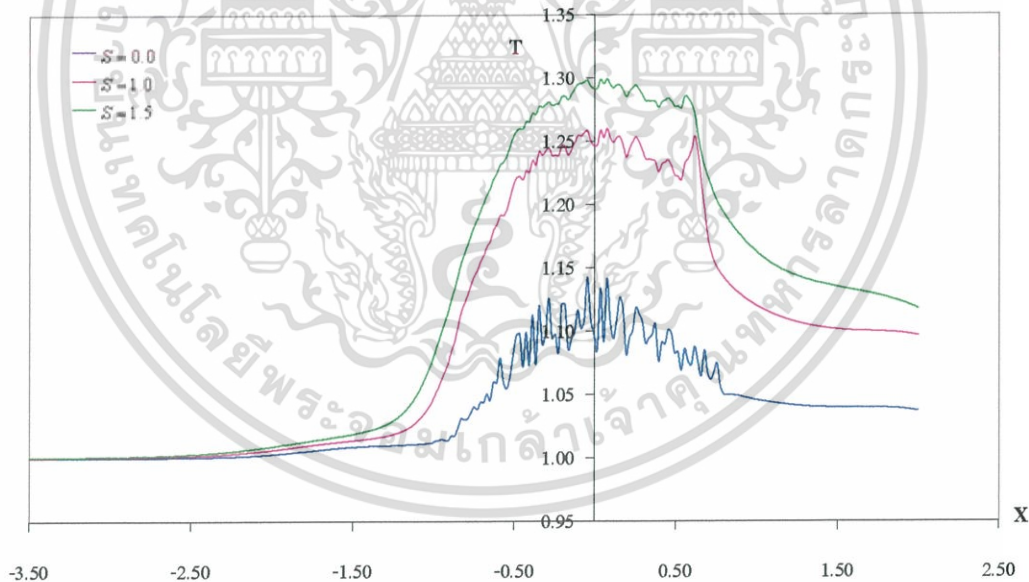


รูปที่ 6.215 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

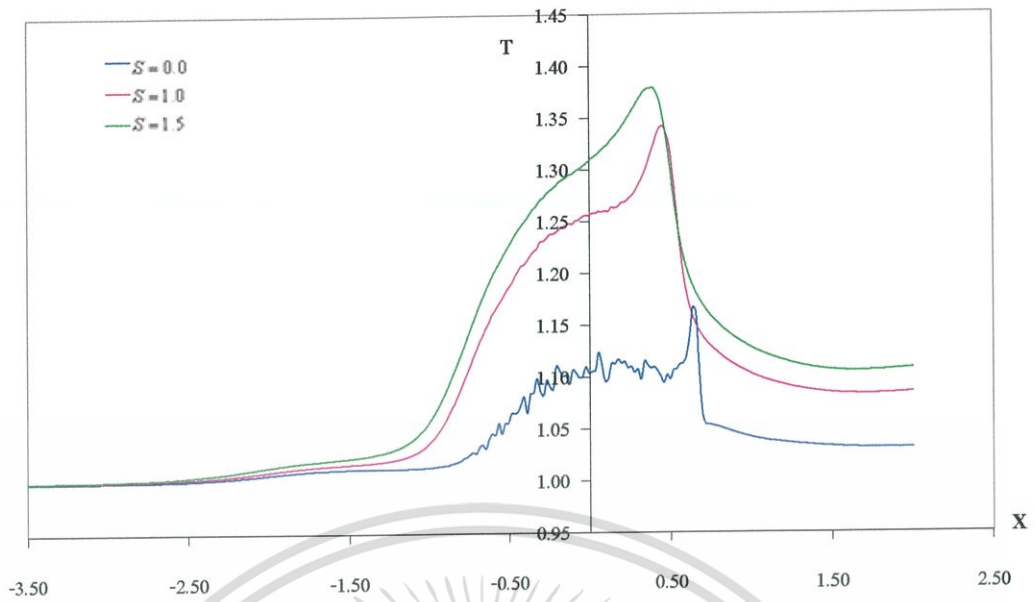


รูปที่ 6.216 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

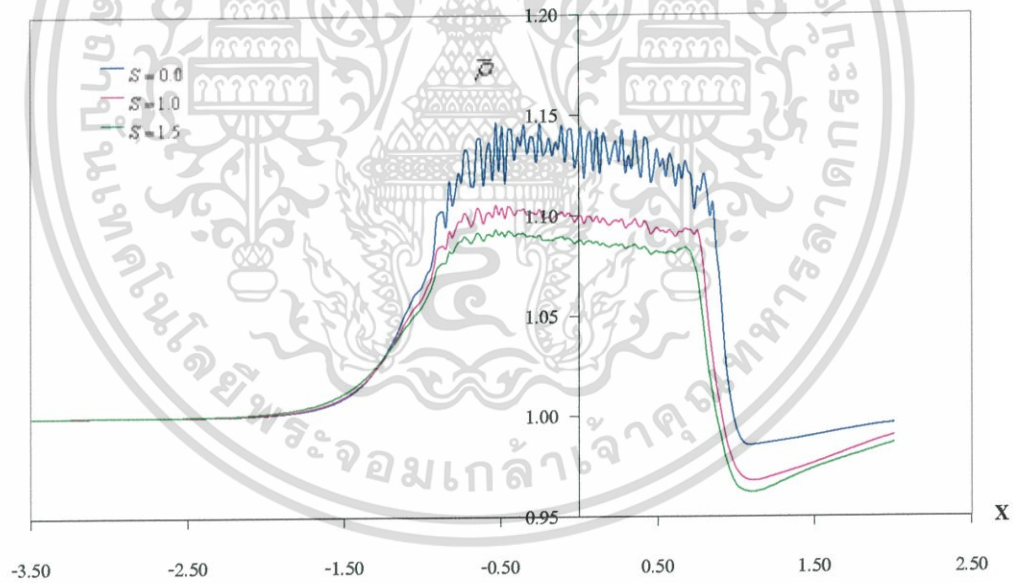


รูปที่ 6.217 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

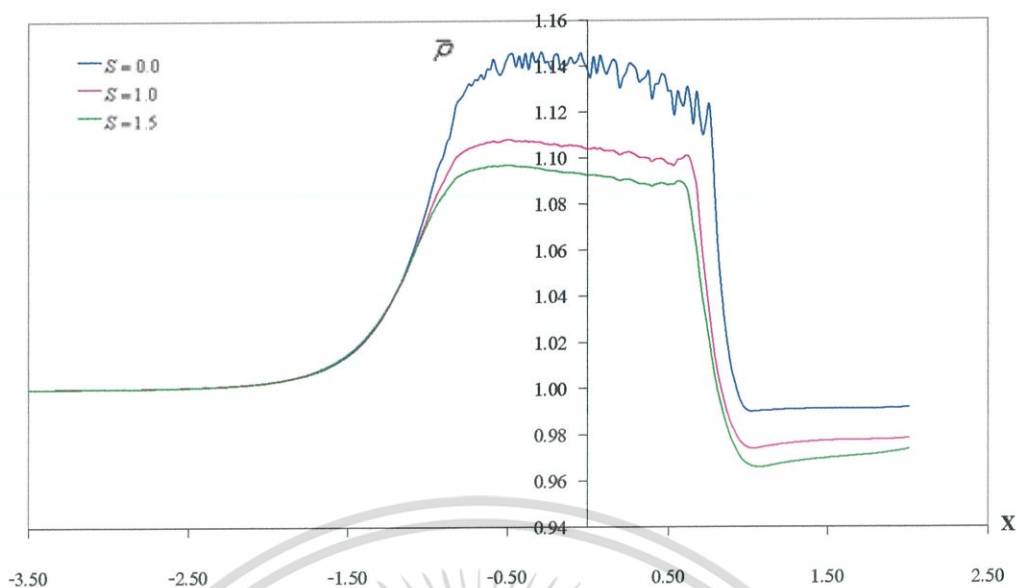


รูปที่ 6.218 กราฟอุณหภูมิที่สถานะสมดุลเมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

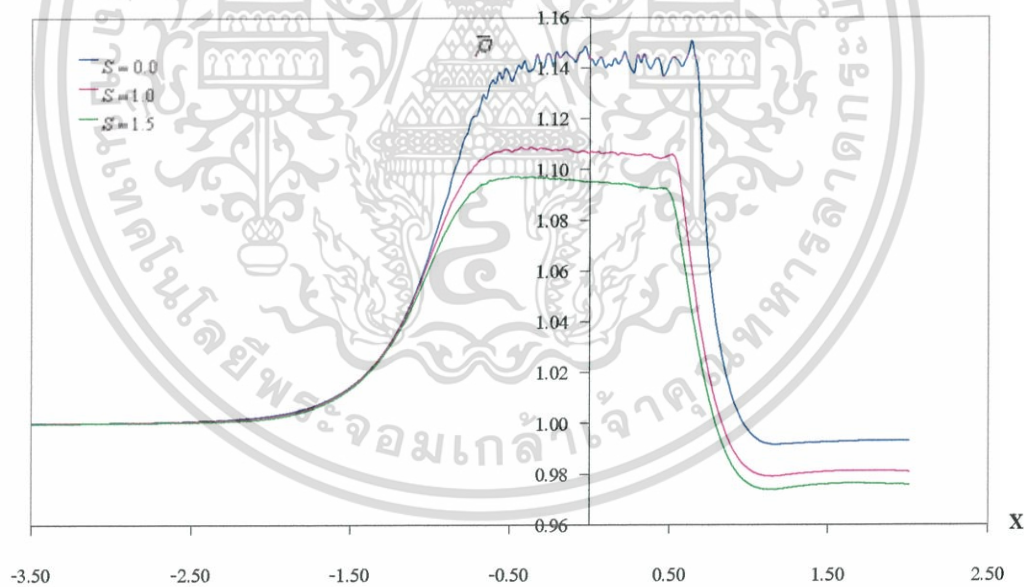


รูปที่ 6.219 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรต์ที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

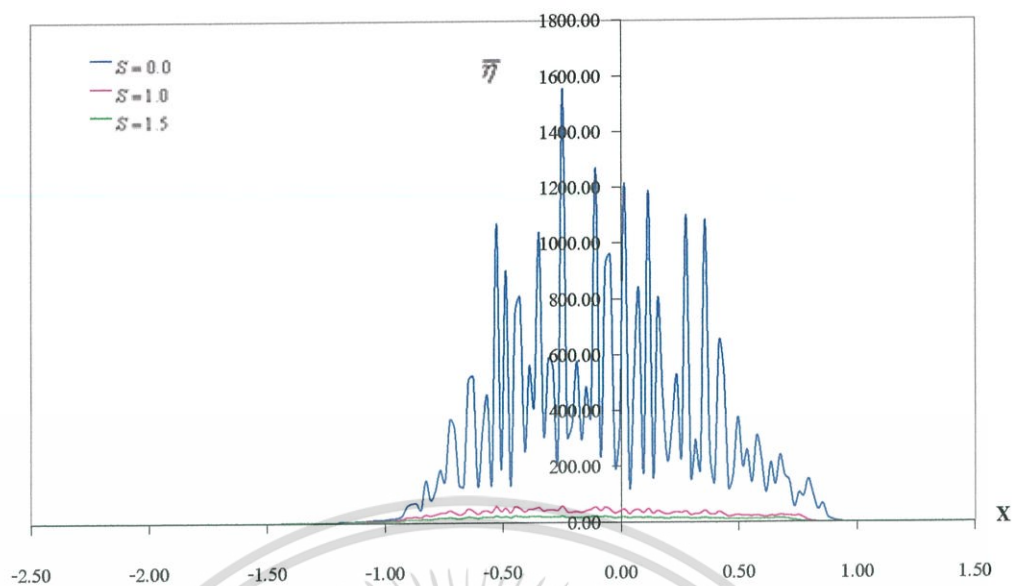


รูปที่ 6.220 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไรต์ที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

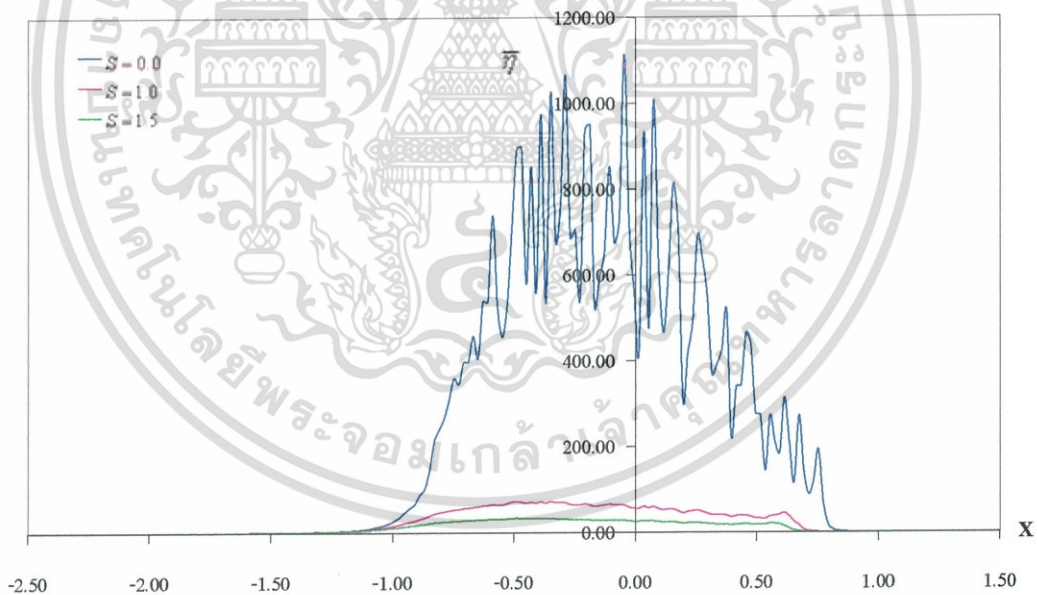


รูปที่ 6.221 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

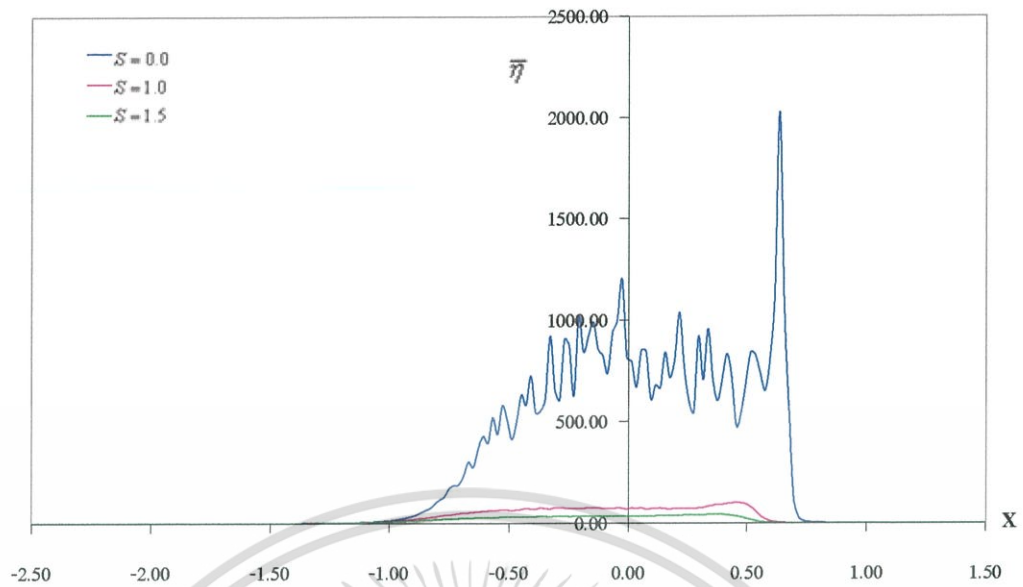


รูปที่ 6.222 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$



รูปที่ 6.223 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $SAE40$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.224 กราฟความหนืดที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 4 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ , SAE40

ผลจากผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบออสซิลโตไฮโครไดนามิกส์

- กรณีผิวเรียบ : อัตราการสลิป สไลด์สูงขึ้น

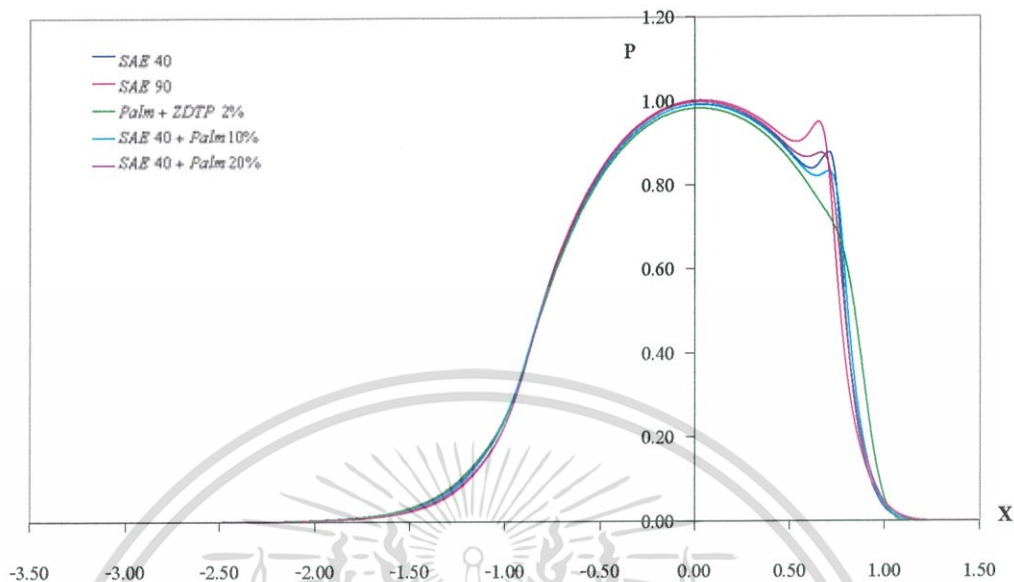
จากกราฟรูปที่ 6.173-6.191 จะพบว่าเมื่ออัตราการเลื่อนไถลสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความดันมีลักษณะของยอดคานาแหลมที่ทางออกแตกต่างกันไป คือเมื่อค่าสลิปสูงจะทำให้ยอดคานาใหญ่และกว้างสาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีมาก และจะส่งผลให้อุณหภูมิที่จุดสัมผัสมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าความหนืดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นพบว่าเมื่อการสลิปสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนืดและความหนาแน่นลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสลิปที่สูงจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง

กรณีผิวหยาบ : อัตราการสลิป สไลด์สูงขึ้น

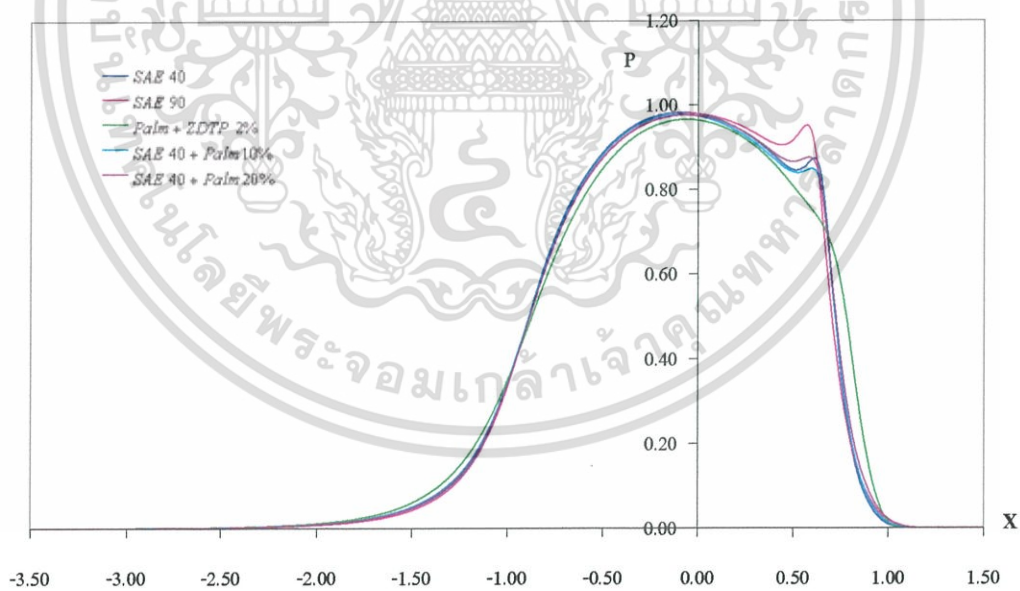
จากกราฟรูปที่ 6.192-6.224 กรณีที่ผิวหยาบจะพบว่าอัตราการสลิปมีผลต่อพฤติกรรมของค่าอุณหภูมิ, ความหนืดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นเป็นอย่างมากเนื่องจากว่าเมื่อการสลิปมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหยาบมีผลต่อพฤติกรรมลดลงเนื่องจากการหักล้างกันของยอดผิวหยาบระหว่างโรลเลอร์กับแผ่นเพลทแต่หากการเคลื่อนที่สัมผัสที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเห็นผลชัด

## 6.1.5 สารหล่อลื่น

### 6.1.5.1 กรณีโรลเลอร์และแผ่นเพลทมีผิวเรียบ

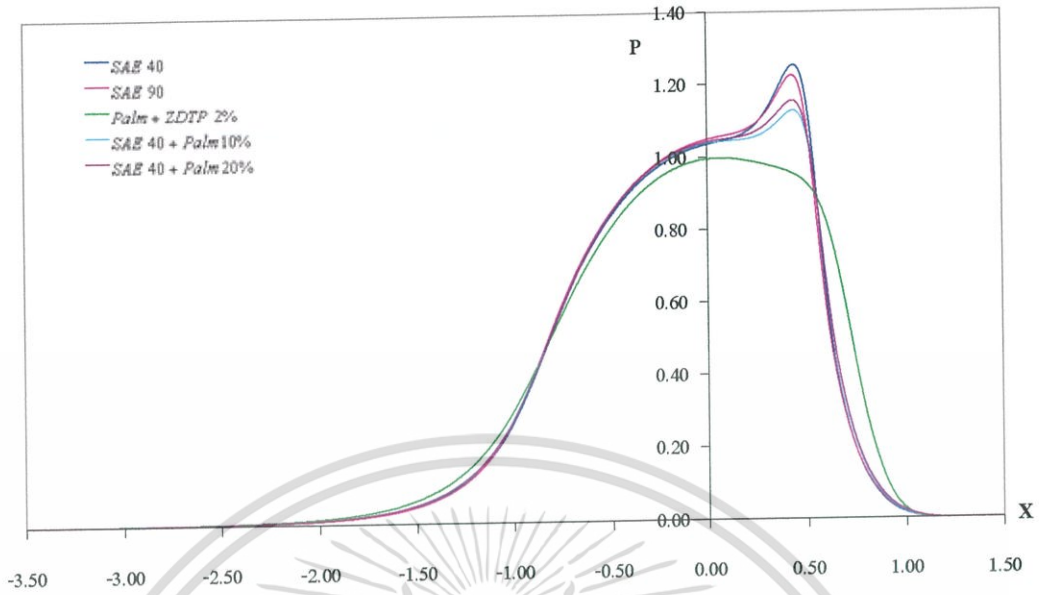


รูปที่ 6.225 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

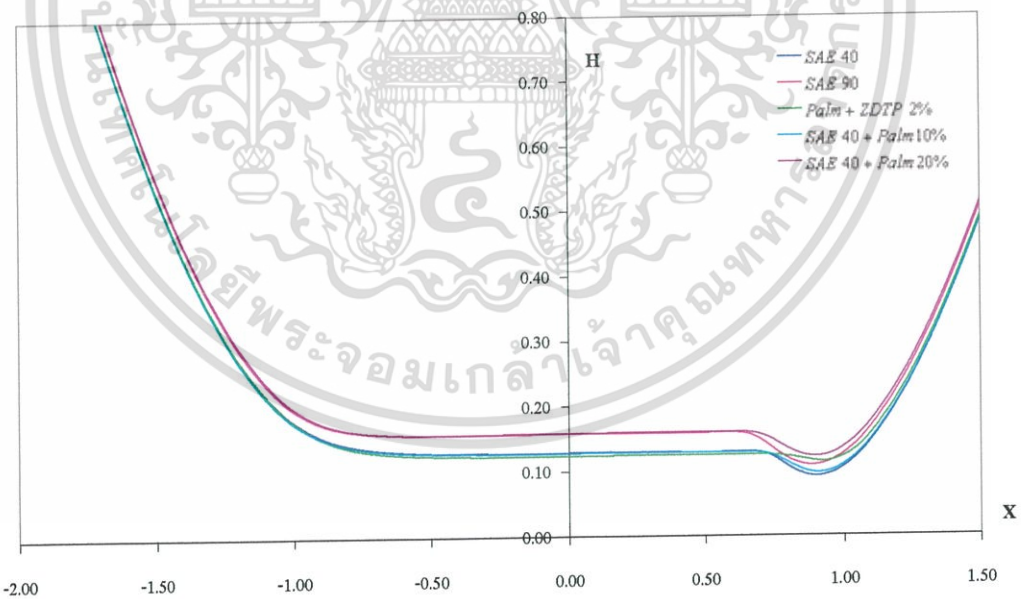


รูปที่ 6.226 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

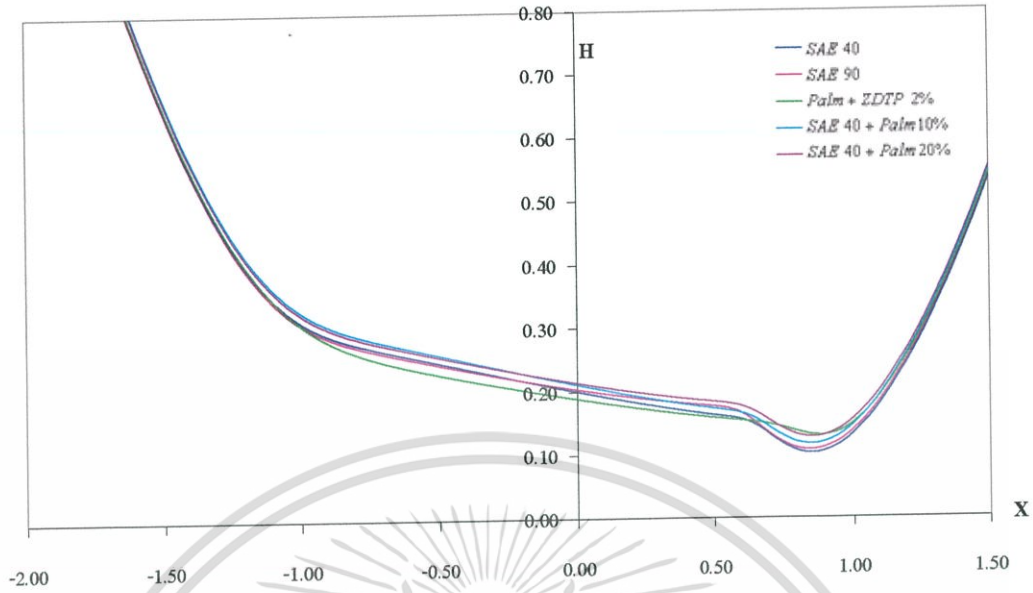


รูปที่ 6.227 กราฟความดันที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

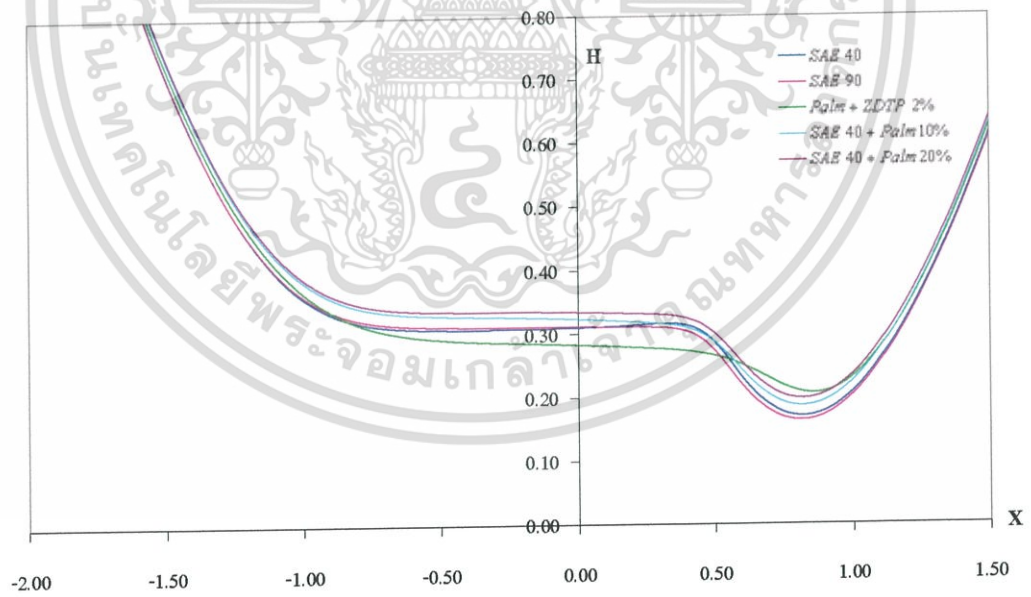


รูปที่ 6.228 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

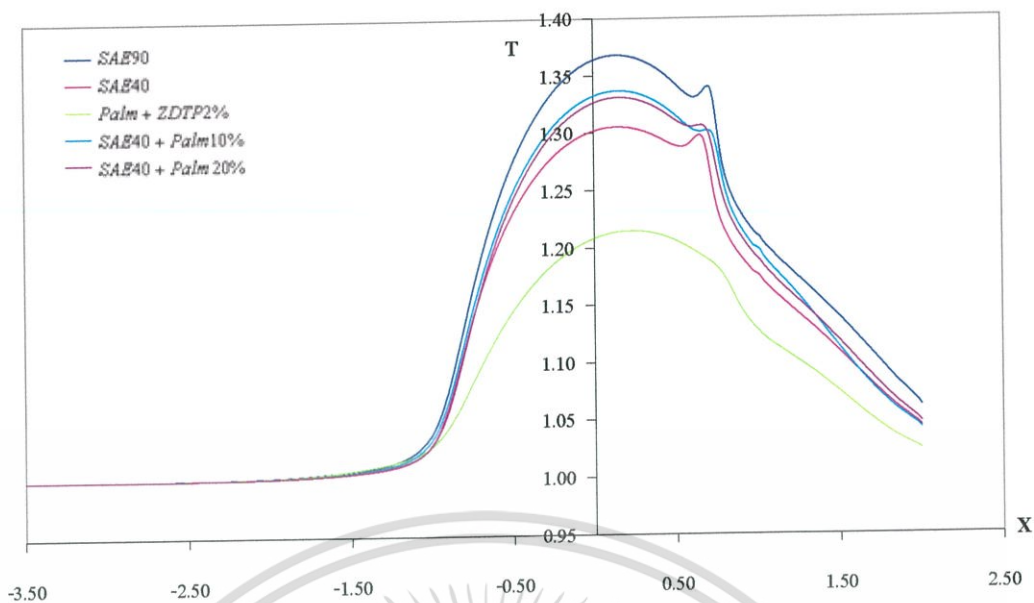


รูปที่ 6.229 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

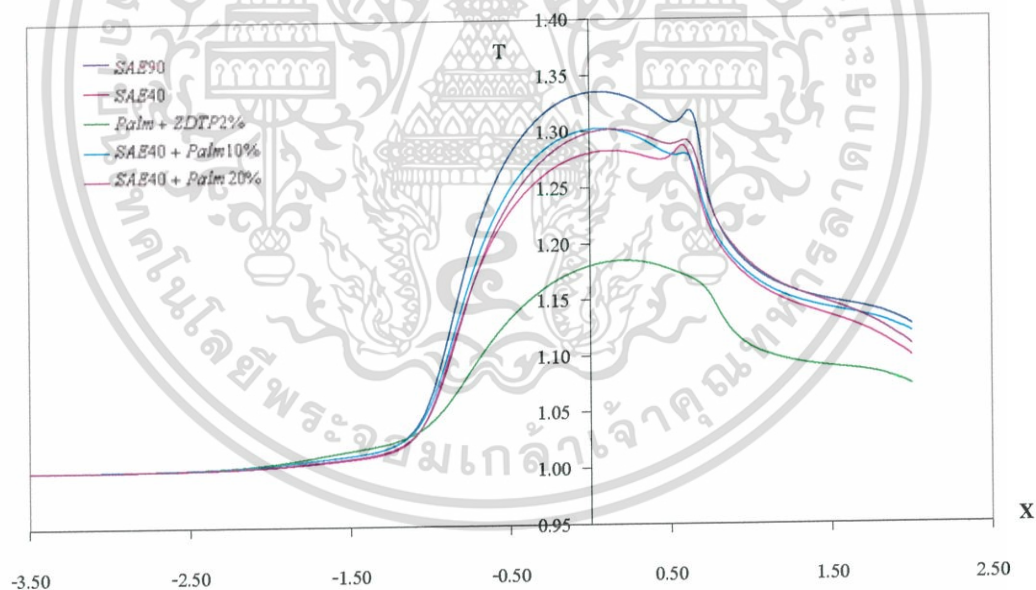


รูปที่ 6.230 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

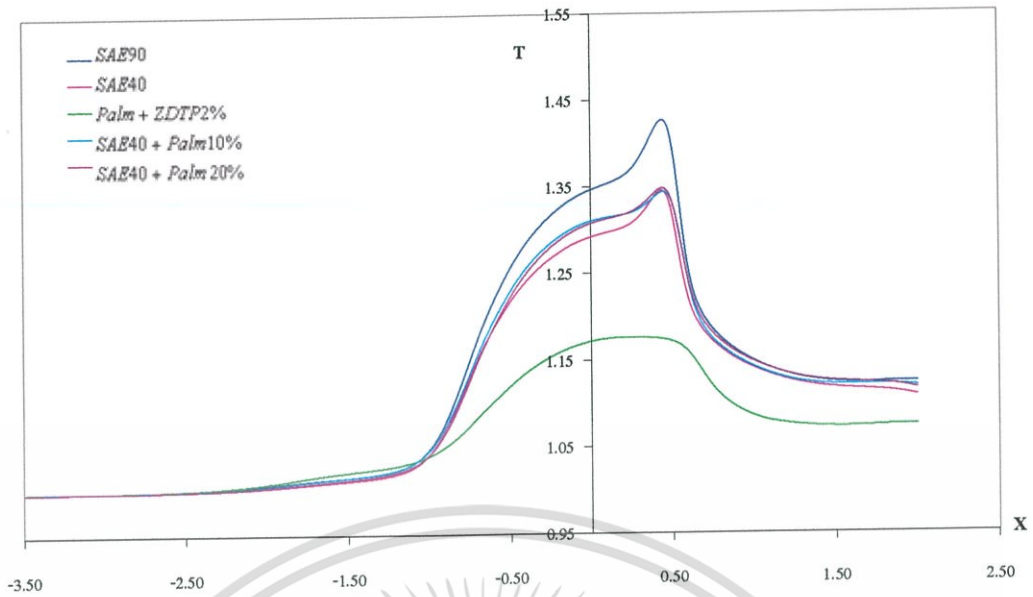


รูปที่ 6.231 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

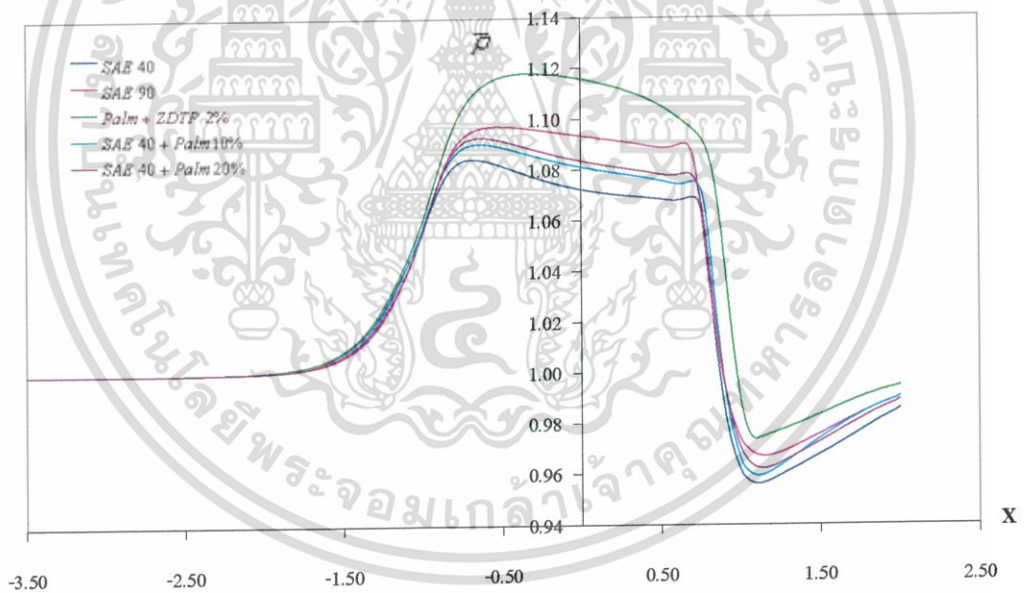


รูปที่ 6.232 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

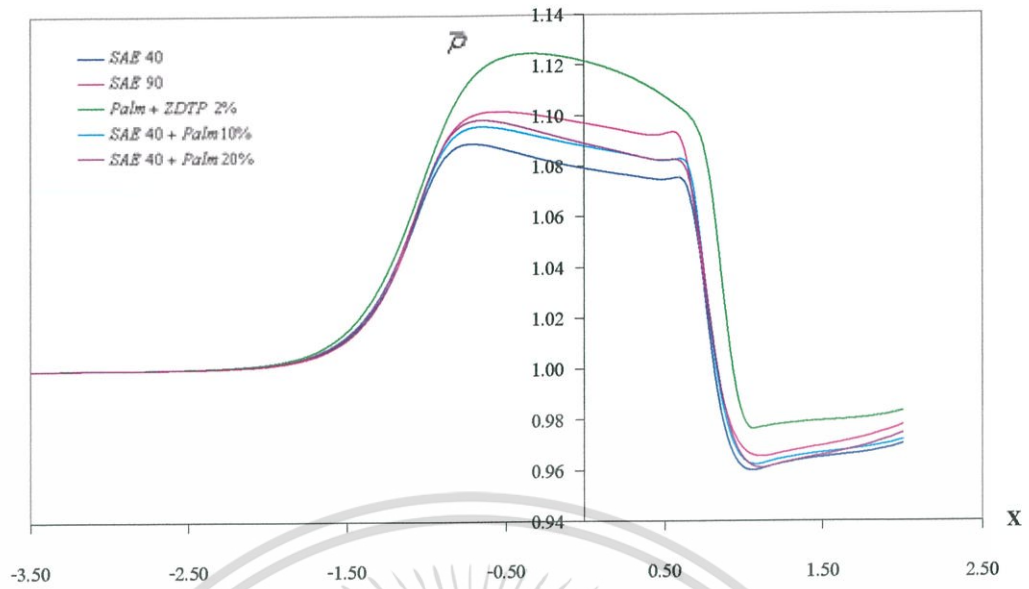


รูปที่ 6.233 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

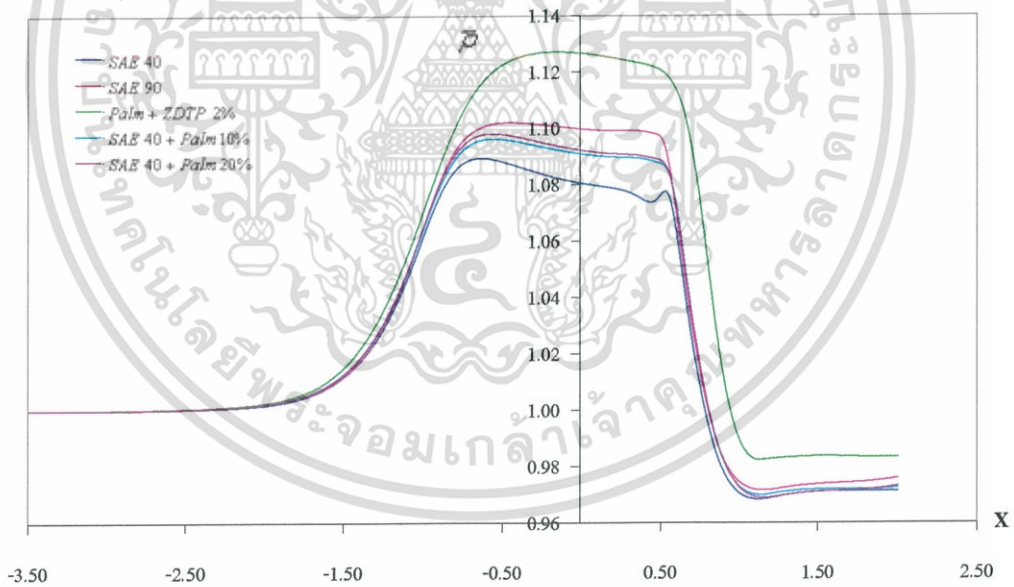


รูปที่ 6.234 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

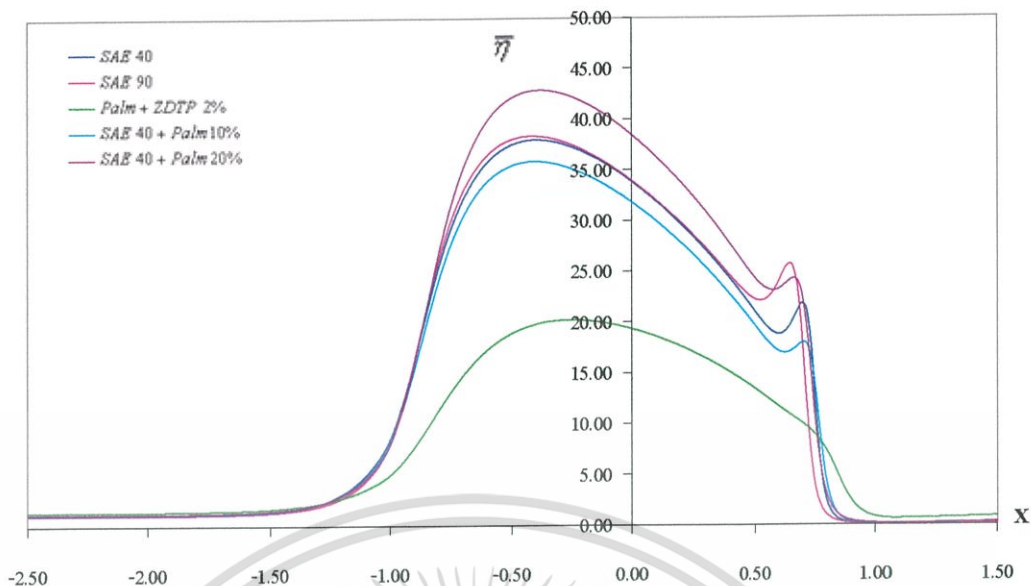


รูปที่ 6.235 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

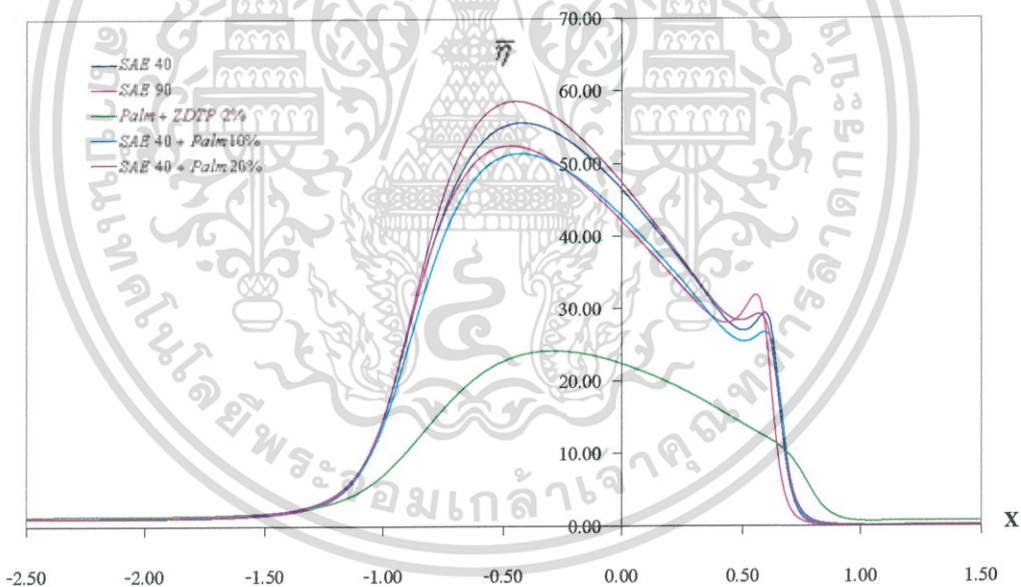


รูปที่ 6.236 กราฟความหนาแน่นที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

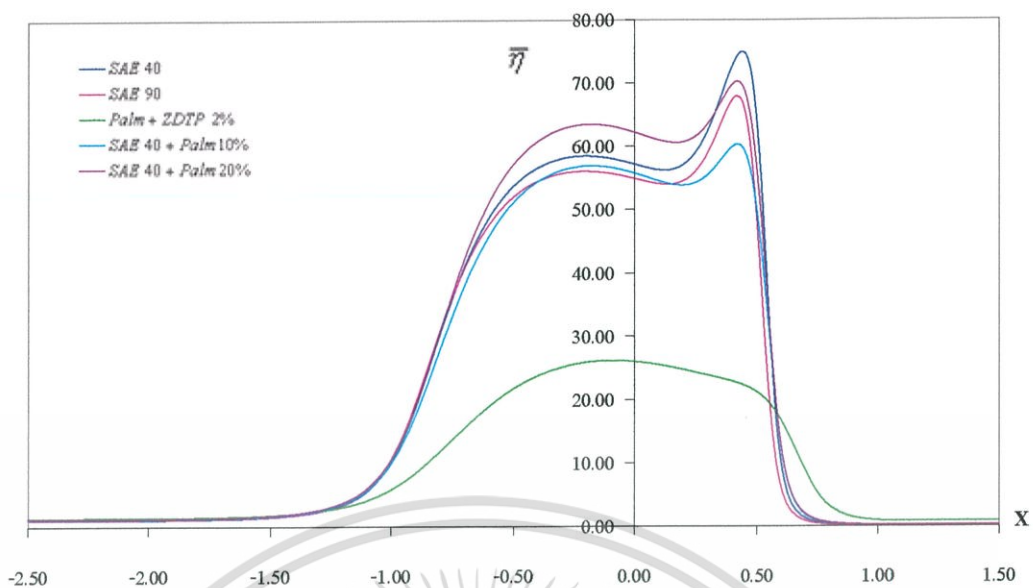


รูปที่ 6.237 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

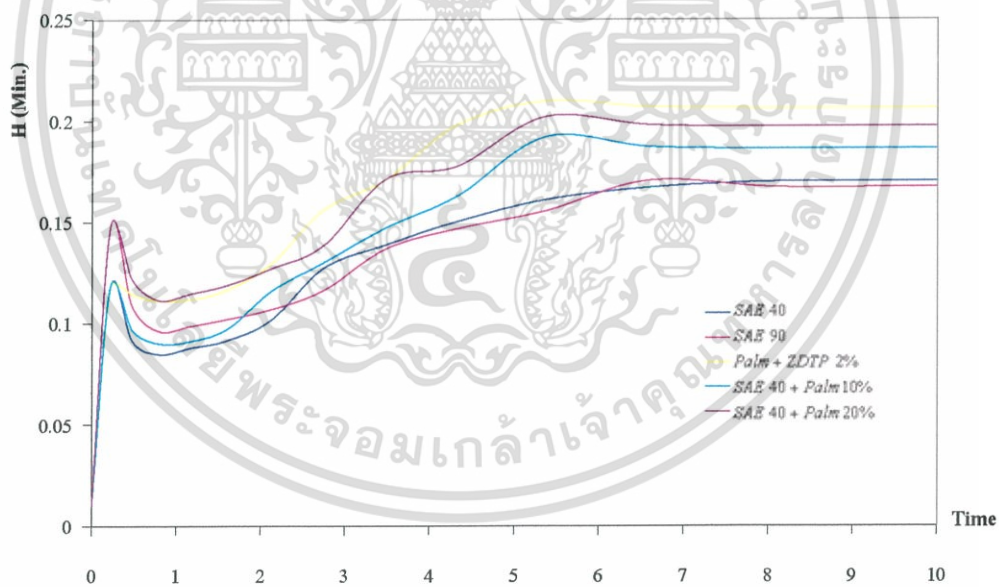


รูปที่ 6.238 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

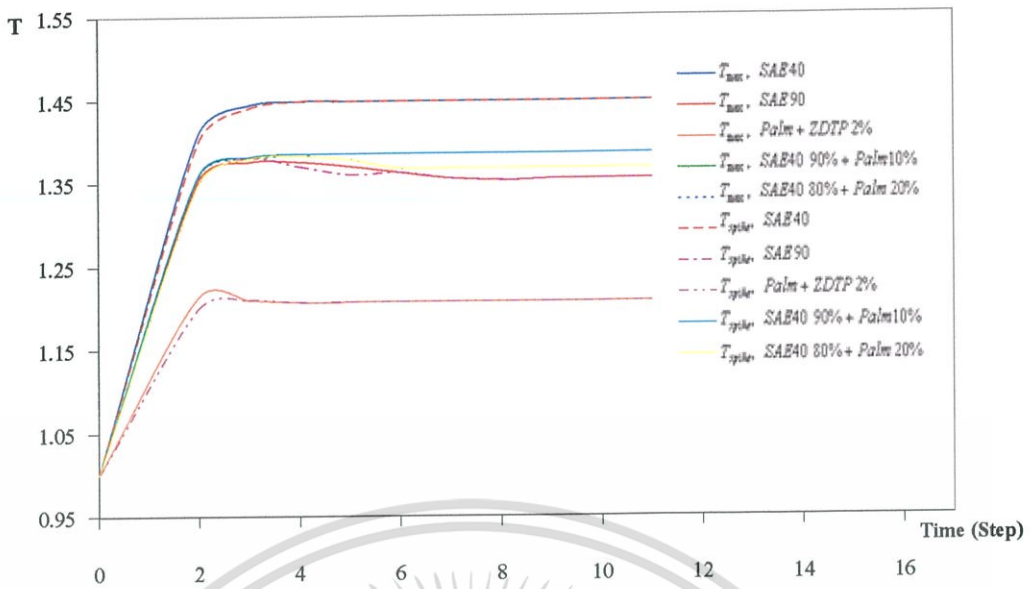


รูปที่ 6.239 กราฟความหนืดที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$



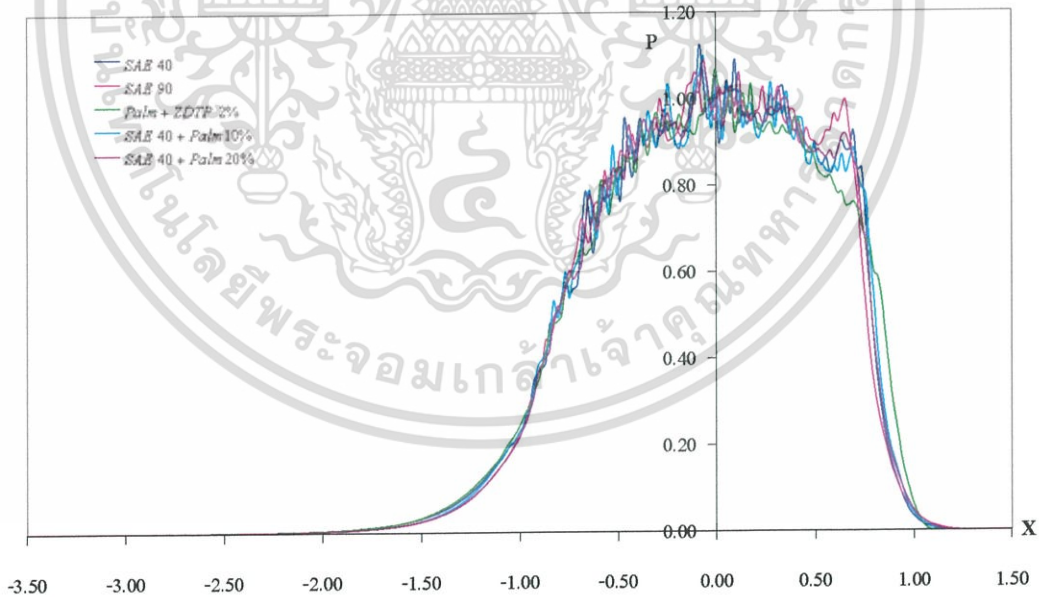
รูปที่ 6.240 กราฟความหนาฟิล์มที่จุดที่น้อยที่สุดที่เข้าสู่จุดสมดุลของแต่ละภาวะที่กระทำ  
เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



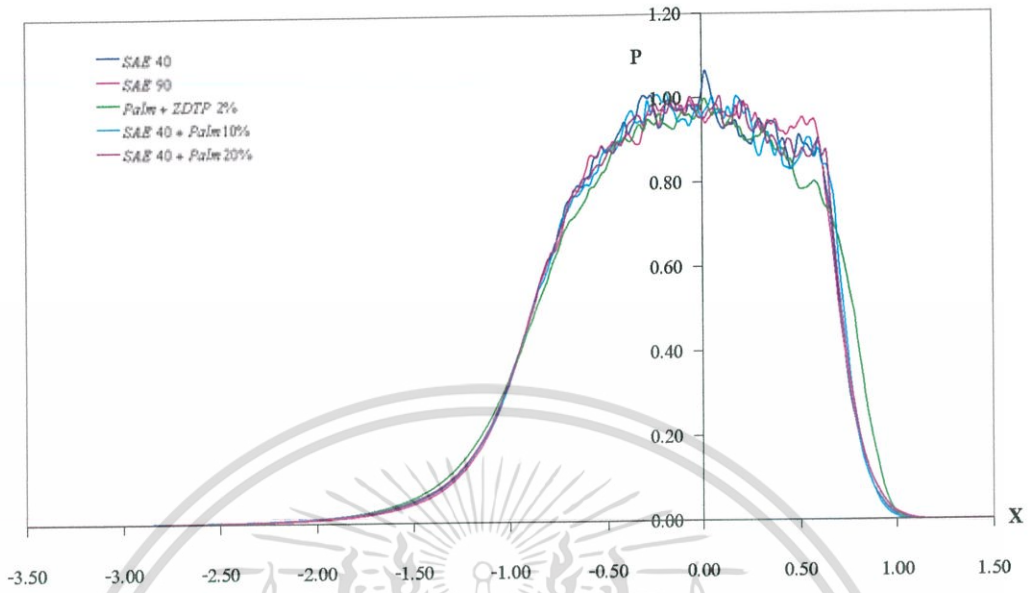
รูปที่ 6.241 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงสุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมมูลที่สารหล่อลื่นแต่ละชนิด เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

6.1.5.1 กรณีโรลเลอร์มีโมเดล 3 และแผ่นเพดที่มีโมเดล 4

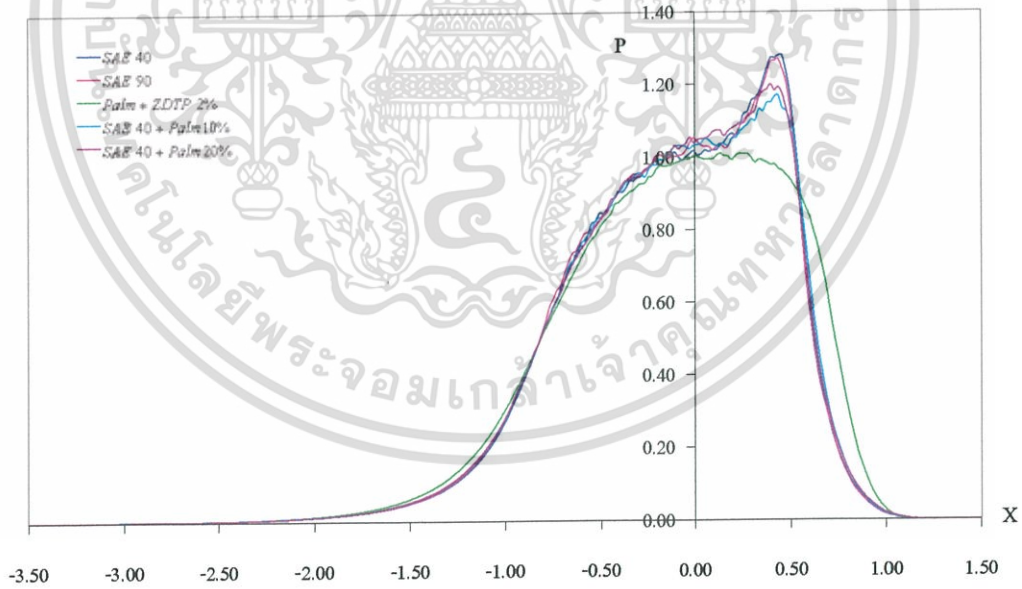


รูปที่ 6.242 กราฟความดันที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

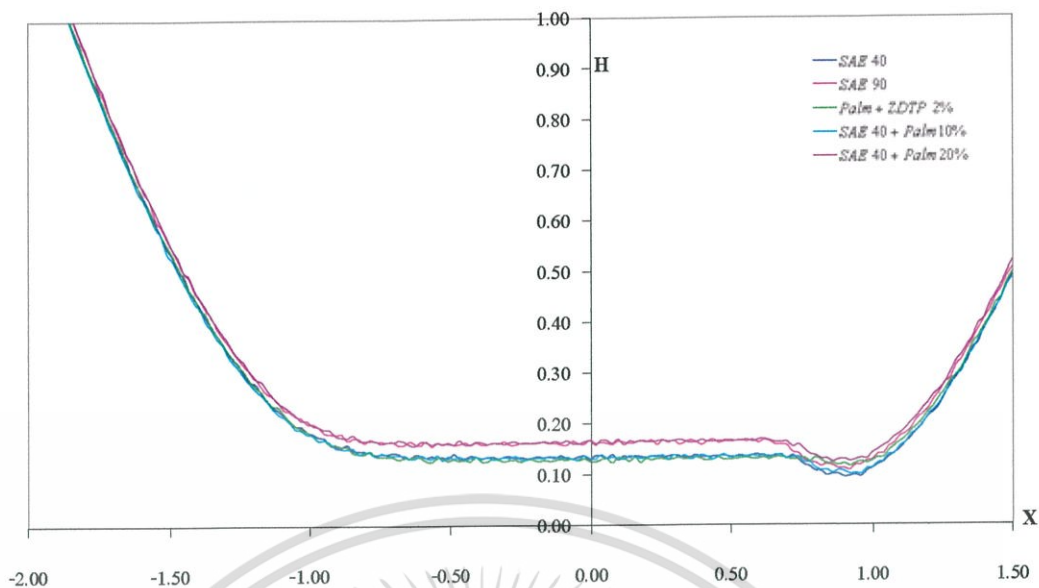


รูปที่ 6.243 กราฟความดันที่เวลาเริ่มต้นที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

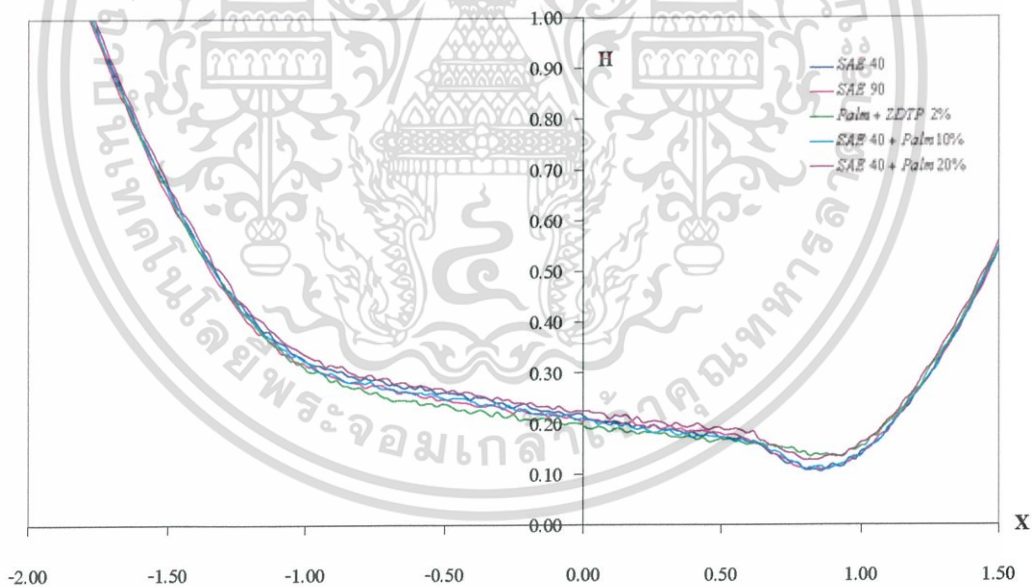


รูปที่ 6.244 กราฟความดันที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

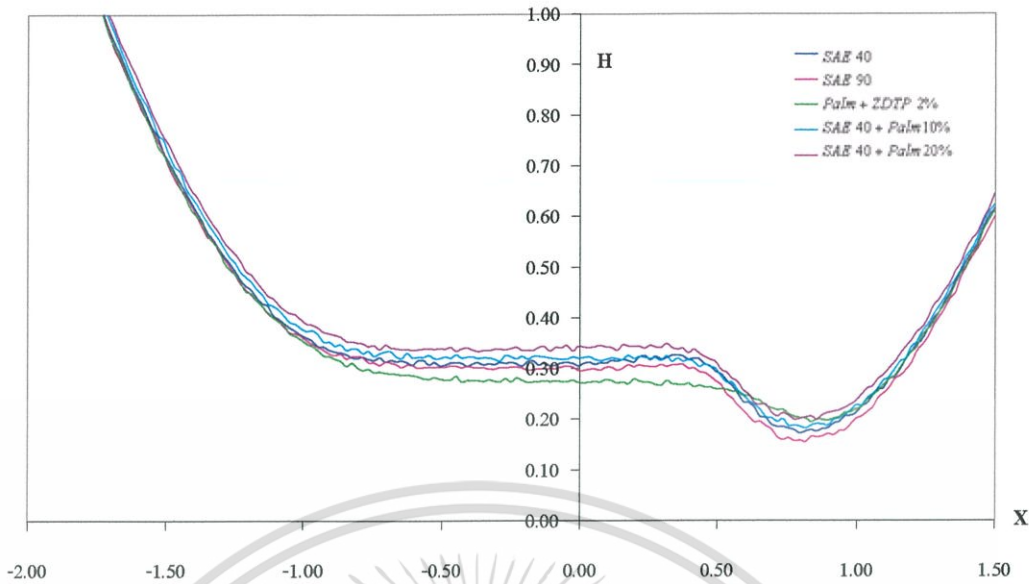


รูปที่ 6.245 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

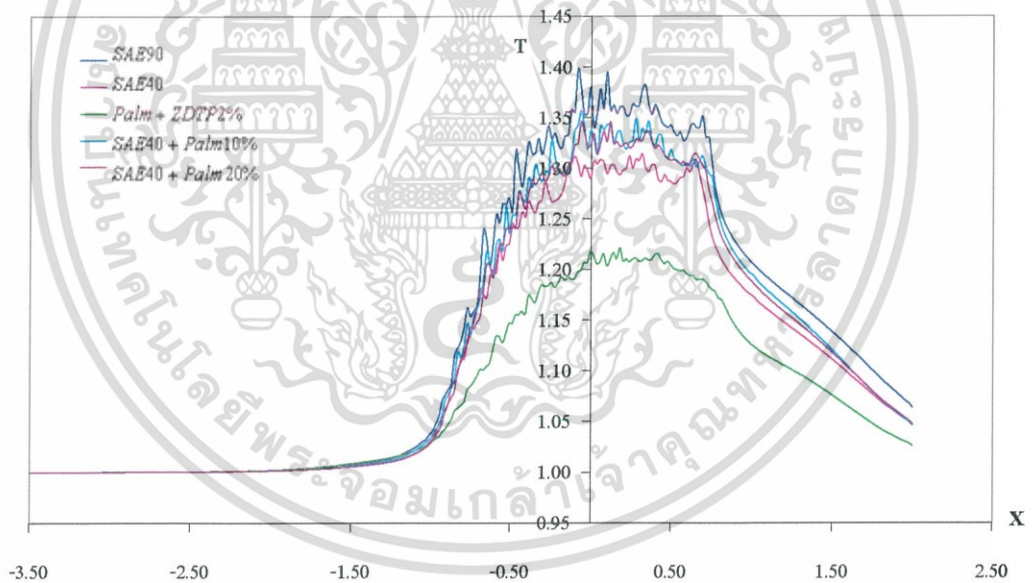


รูปที่ 6.246 กราฟความหนาฟิล์มที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

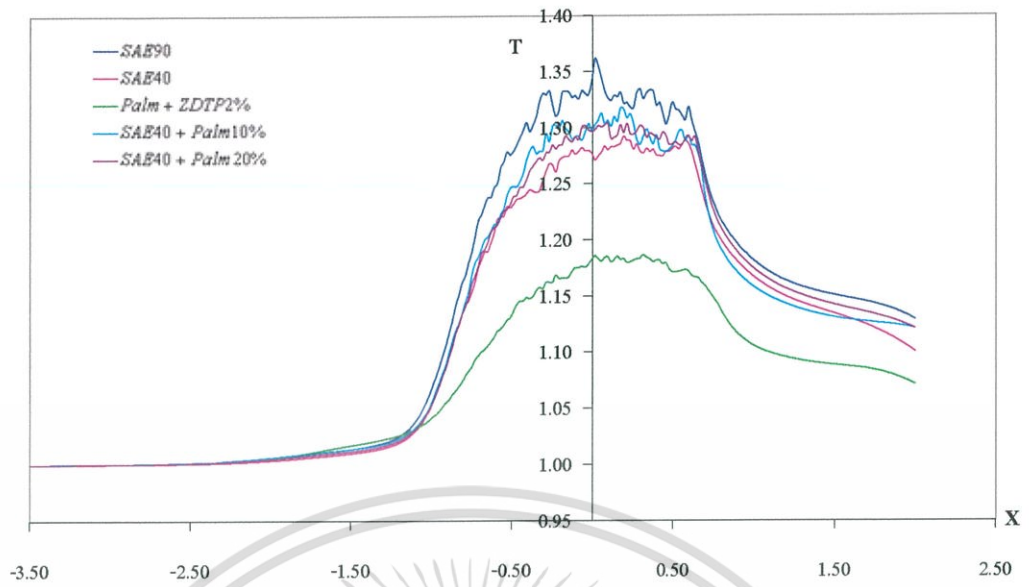


รูปที่ 6.247 กราฟความหนาฟิล์มที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

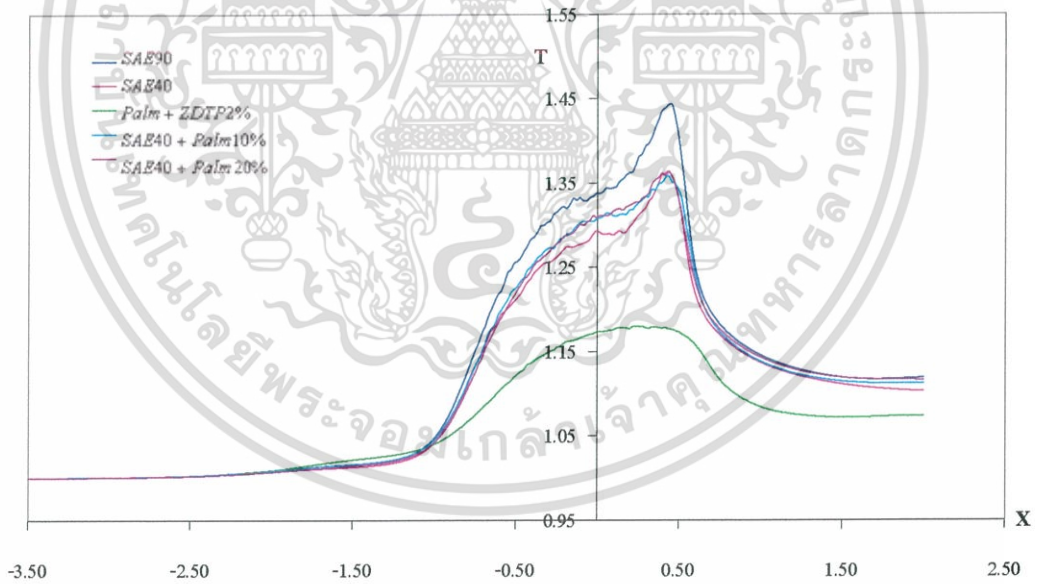


รูปที่ 6.248 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

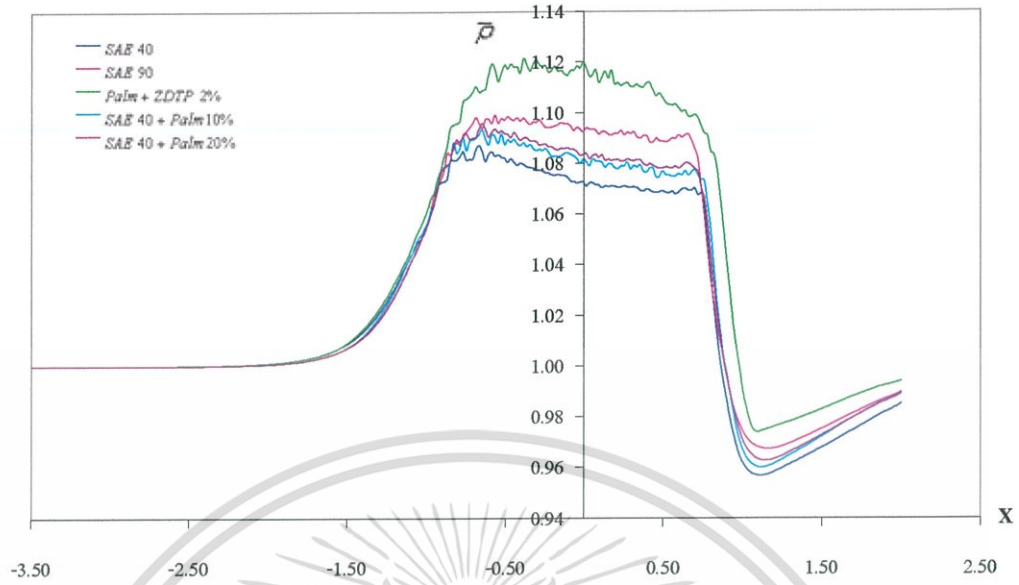


รูปที่ 6.249 กราฟอุณหภูมิที่เวลาไรต์ที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

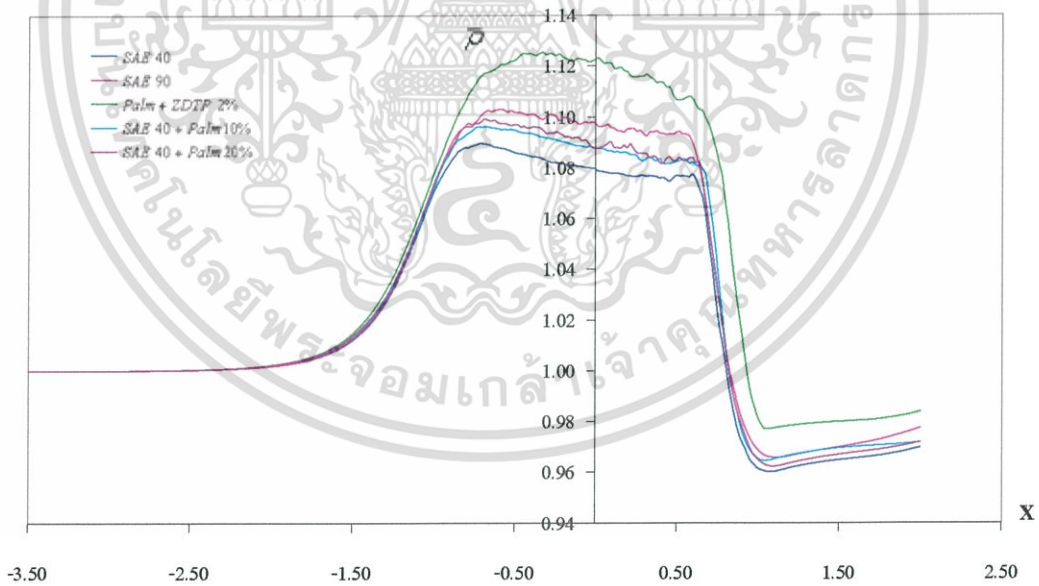


รูปที่ 6.250 กราฟอุณหภูมิที่สภาวะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

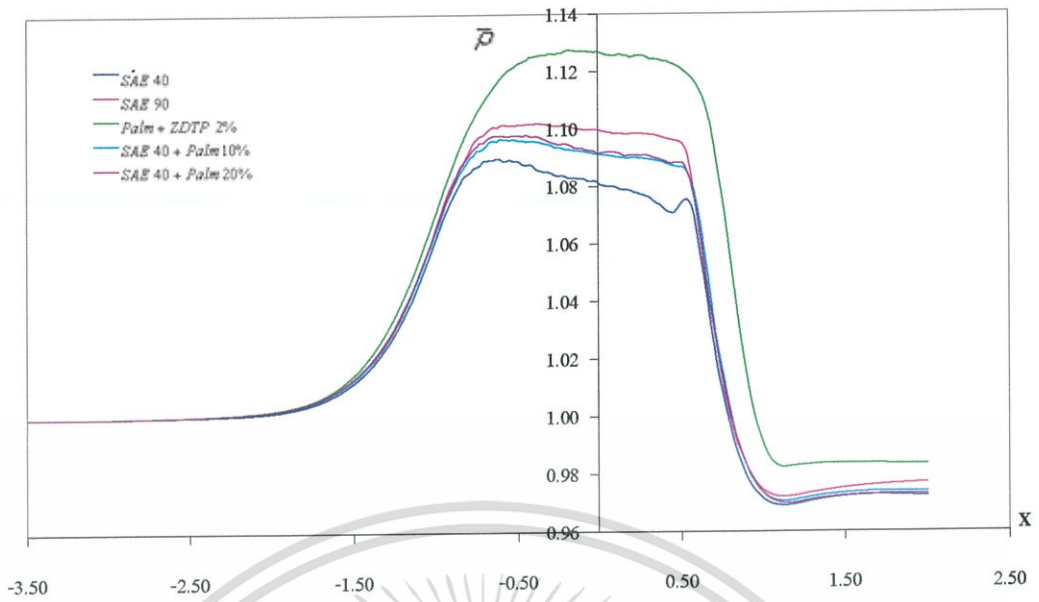


รูปที่ 6.251 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

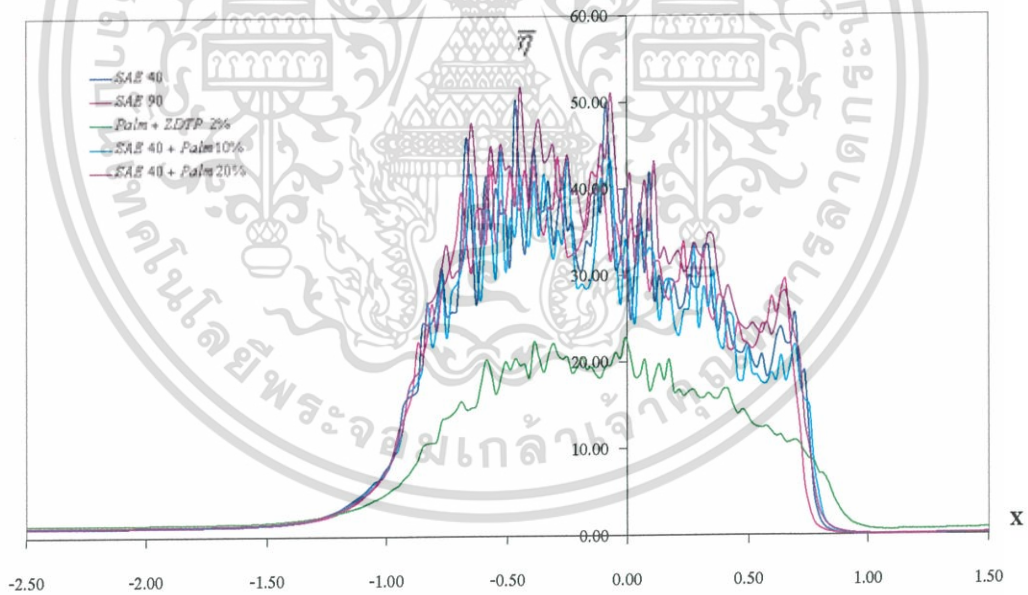


รูปที่ 6.252 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

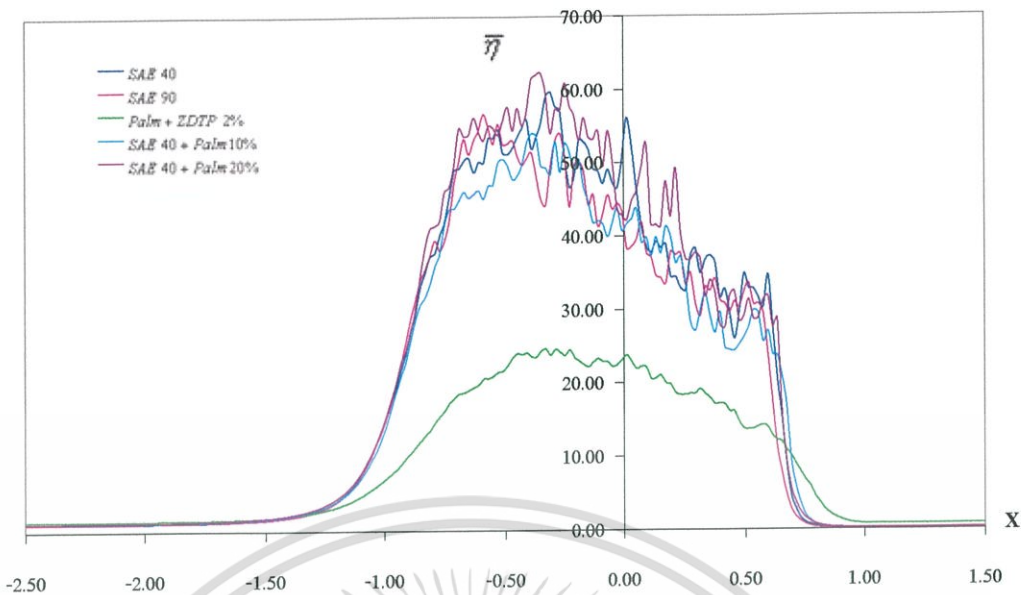


รูปที่ 6.253 กราฟความหนาแน่นที่สถานะสมดุล เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

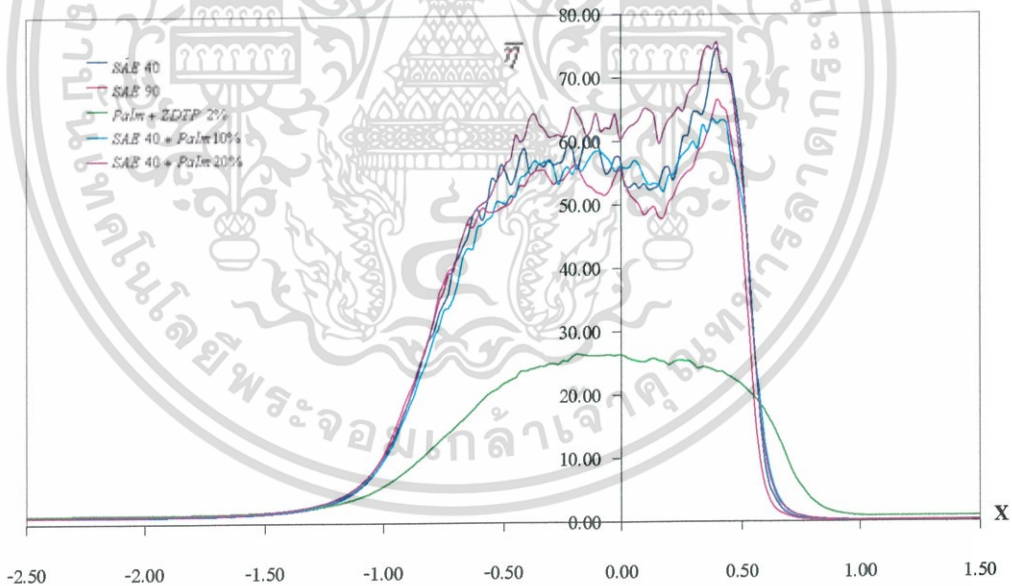


รูปที่ 6.254 กราฟความหนาแน่นที่เวลาไร้มิติที่ 1 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

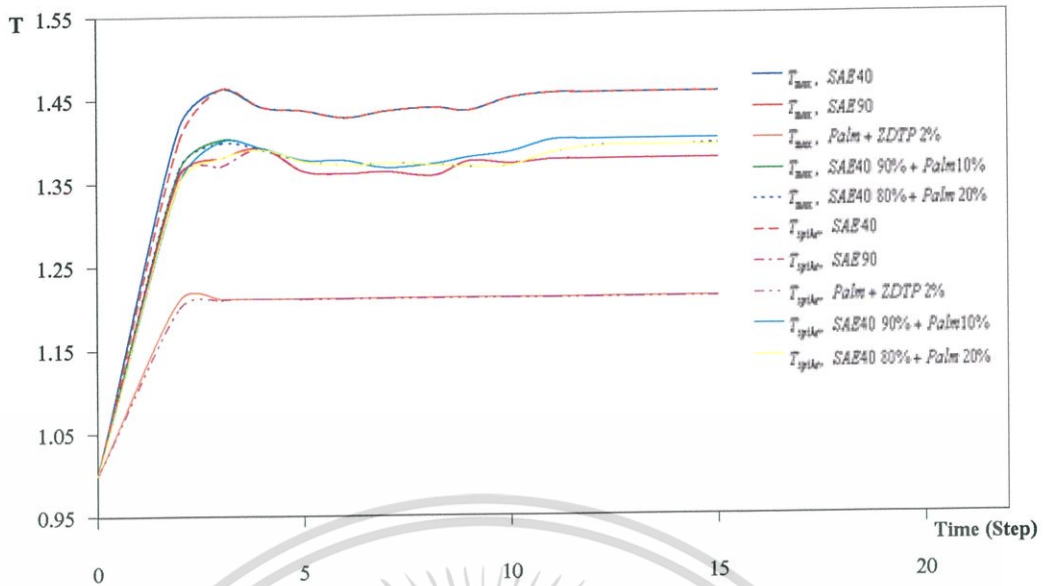


รูปที่ 6.255 กราฟความหนืดที่เวลาไร้มิติที่ 5 เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$



รูปที่ 6.256 กราฟความหนืดที่สภาวะไร้มิติ เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.257 กราฟอุณหภูมิที่จุดที่สูงที่สุดและที่จุดยอดหนามแหลมที่เข้าสู่จุดสมดุลที่สารหล่อลื่นแต่ละชนิด เมื่อ  $U = 3 \times 10^{-11}$ ,  $W = 5 \times 10^{-5}$ ,  $S = 1.5$

ผลจากผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์

- กรณีผิวเรียบ : เมื่อสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลง

จากกราฟรูปที่ 6.225-6.242 จะพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหล่อลื่นจะทำให้ความดันที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ SAE 90 จะมีค่าความดันต่ำสุด แต่จะมียอดหนามแหลมสูงสุด เนื่องจากว่าฟิล์มสารหล่อลื่นจะหนาสุดและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าสารชนิดอื่นๆ ในขณะที่เดียวกันจะส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะสูงและทำให้ค่าความหนืดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นลดลง ส่วน Palm จะให้ค่าฟิล์มของสารหล่อลื่นบางสุดเนื่องจากความหนืดต่ำ

- กรณีผิวหยาบ : เมื่อสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลง

จากกราฟรูปที่ 6.243-6.257 จะพบว่าความหยาบจะมีผลต่อความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นมากเนื่องจากสารหล่อลื่นบางชนิดเช่น น้ำมัน Palm มีค่าความหนืดต่ำจึงทำให้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยและอุณหภูมิไม่สูงมากนักเนื่องจากฟิล์มบาง และจะสังเกตได้ว่าค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงๆ จะมีผลของผิวหยาบมาก

## บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผลการคำนวณ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีซิสไดนามิกส์ที่พิจารณาถึงผลของผิวสัมผัสรวมอยู่ด้วย การคำนวณเชิงตัวเลขทำได้โดยอาศัยวิธีนิวตันราฟสัน และวิธีมัลติกริดมัลติเลเวลร่วมกันในการแก้สมการเรย์โนลด์สประยุกต์และสมการพลังงานในสถานะสถิตย์และพลวัต จากการจำลองพฤติกรรมสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 7.1.1 พฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีซิสไดนามิกส์

7.1.1.1 เมื่อค่าความเร็วในการสัมผัสสูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นสูงขึ้น ความดันลดลง อุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดและความหนาแน่นลดลง ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลมากขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น

7.1.1.2 ค่าภาระในการกระทำต่อทรงกระบอกสูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นลดลง ความดันสูงขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนืดและความหนาแน่นสูงขึ้น ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลน้อยลงและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น

7.1.1.3 ค่าโมดูลัสของทรงกระบอกและแผ่นราบเรียบสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นสูงขึ้น ความดันลดลง อุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดและความหนาแน่นลดลง ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลมากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น

7.1.1.4 ค่าอัตราการสลิป-สไลด์มากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของสารหล่อลื่นสูงขึ้น แต่จะทำให้ความหนืดและความหนาแน่นลดลง ความดันมากขึ้นและความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นลดลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลมากขึ้น

7.1.1.5 สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะส่งผลให้ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นสูงและความดันต่ำ และอุณหภูมิจะสูง ความหนาแน่นจะต่ำแต่ความหนืดจะสูง

7.1.1.6 ค่าผลทางความร้อนจะมีผลต่อพฤติกรรมของความหนืดของสารหล่อลื่นน้อยกว่าผลจากความดันที่เกิดขึ้น

7.1.1.7 ค่าผลทางความร้อนจะมีผลต่อพฤติกรรมของความหนาแน่นของสารหล่อลื่นมากกว่าผลจากความดันที่เกิดขึ้น

#### 7.1.2 ผลของผิวหยาบที่มีต่อพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีซิสไดนามิกส์

7.1.2.1 ผิวหยาบจะมีผลต่อความหนาฟิล์มคือจะทำให้ความหนาฟิล์มมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7.1.2.2 ผิวหยาบจะมีผลต่ออุณหภูมิคือทำให้ค่าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น
- 7.1.2.3 ผิวหยาบจะมีผลมากในกรณีที่ความหนาฟิล์มบาง
- 7.1.2.4 ผิวหยาบจะมีผลมากในกรณีที่ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัสต่ำ
- 7.1.2.5 ผิวหยาบจะมีผลมากในกรณีที่วัสดุมีค่าความแข็งสูง
- 7.1.2.6 ผิวหยาบจะมีผลมากในสารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำ
- 7.1.2.7 ผิวหยาบจะมีผลมากในช่วงแรกของเวลาที่เปลี่ยนแปลงและลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาฟิล์มเพิ่มมากขึ้นตามเวลา
- 7.1.2.8 ผิวหยาบจะใช้เวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลมากกว่ากรณีผิวเรียบ
- 7.1.2.9 ผิวหยาบจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าผิวเรียบ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คำนวณ โดยมีข้อสมมุติฐานให้มีการสัมผัสระหว่างโรลเลอร์กับเพลทมีลักษณะเป็นแบบเส้นซึ่งถือว่าผลของการไหลตามแนวแกนน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของการไหลตามการหมุนของโรลเลอร์กับเพลท เมื่อพิจารณาถึงผิวสัมผัสที่มีค่าความหยาบรวมอยู่จะส่งผลต่อการไหลของสารหล่อลื่น ดังนั้นในการทำวิจัยในอนาคตควรพิจารณาการสัมผัสเป็นแบบพื้นผิวสองมิติเพื่อให้พฤติกรรมที่จำลองมีความใกล้เคียงกับสภาวะความเป็นจริงมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Bernard J. Hamrock. Fundamental of Fluid Film Lubrication. New York: McGraw – Hill, Inc 1994.
- [2] Gohar R., Elastohydrodynamics. New York: JOHN WILEY & SONS, Inc1988.
- [3] Bhattacharjee R.C. and Dast N.C. “Power law fluid model incorporated into elastohydrodynamic lubrication theory of line contact.” Tribology International, vol. 29, 1996. pp. 405-413.
- [4] Osborn K.F. and Sadeghi F. “Time Dependent Line EHD Lubrication Using the Multigrid/Multilevel Technique.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 114, January 1992. pp. 68-74.
- [5] Okamura H. “A contribution to the numerical analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication.” Tribology of Reciprocating Engines. D. Dowson et al. (eds) Butterworth, Guilford, England, pp.313-320.
- [6] Venner C.H. and Ten Napal W.E. “Surface Roughness Effects in an EHL Line Contact.” Tran. ASME, Journal of Tribology, vol. 114, July 1992. pp. 616-662.
- [7] Xiaolan Ai, Herbert S. Cheng. “A Transient EHL Analysis for Line Contacts with Measured Surface Roughness Using Multigrid Technique.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 116, July 1994. pp. 549-558.
- [8] Khonsari M.M. and Hua D.Y. “Thermal Elastohydrodynamic Analysis Using a Generalized Non-Newtonian Formulation With Application to Bair-Winer Constitutive Equation.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 116, July 1994. pp. 37-46.
- [9] Kumar Punit, Jain S.C. and Ray S. “Thermal EHL of Rough Rolling/Sliding Line Contacts Using a Mixture of Two Fluids at Dynamic Loads.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 124, October 2002. pp. 709-715.
- [10] Salehizadeh H. and Saka N. “Thermal non-Newtonian elastohydrodynamic lubrication of rolling line contacts.” Tran. ASME. Journal of Tribology, 1991, vol. 113 pp. 481-491.
- [11] Levy H. and Lessman F. Finite differential equations. New York: Dover, Inc1992.
- [12] Richard L. and Burden. Numerical analysis. Boston: PWS, Inc 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Rong-Tsong Lee , Chao-Ho Hsu and Wen-Feng Kuo. “Multilevel solution for thermal elastohydrodynamic lubrication of rolling/sliding circular contacts.” *Tribology International*, vol. 28, No. 8. pp. 541-552, 1995.
- [14] William L. Briggs, Van Emaen Henson and Steve F. McCormick. *A Multigrid Tutorial*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Inc. 2002.
- [15] Booser E. and Richard ed. **Tribology data handbook**. Boca Raton: CRC Press, c1997.
- [16] เกษม ธรรมโกศล “อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



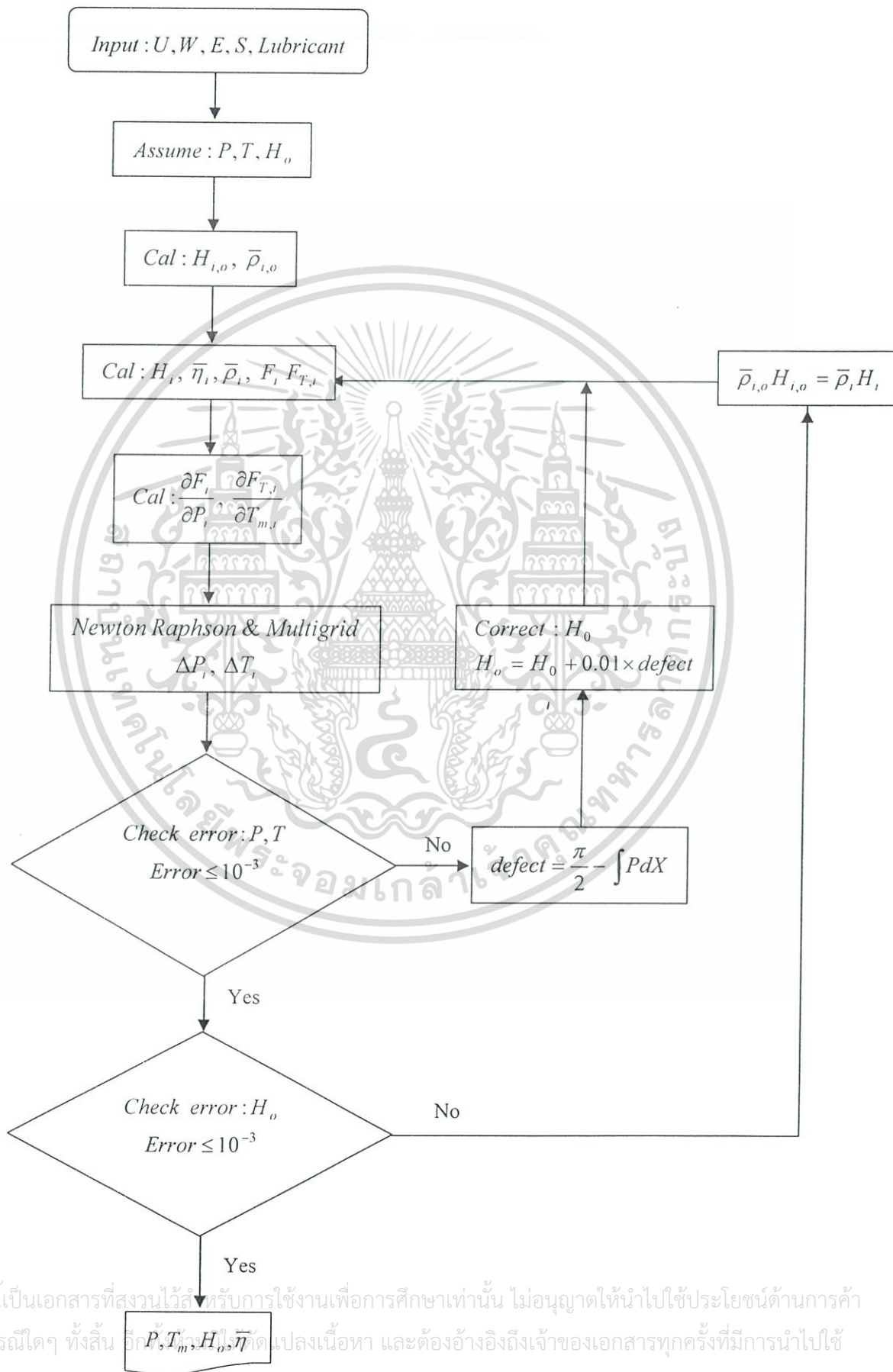
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

Flow Chat Program



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง  $P, T_m, H_0, \eta$  ที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



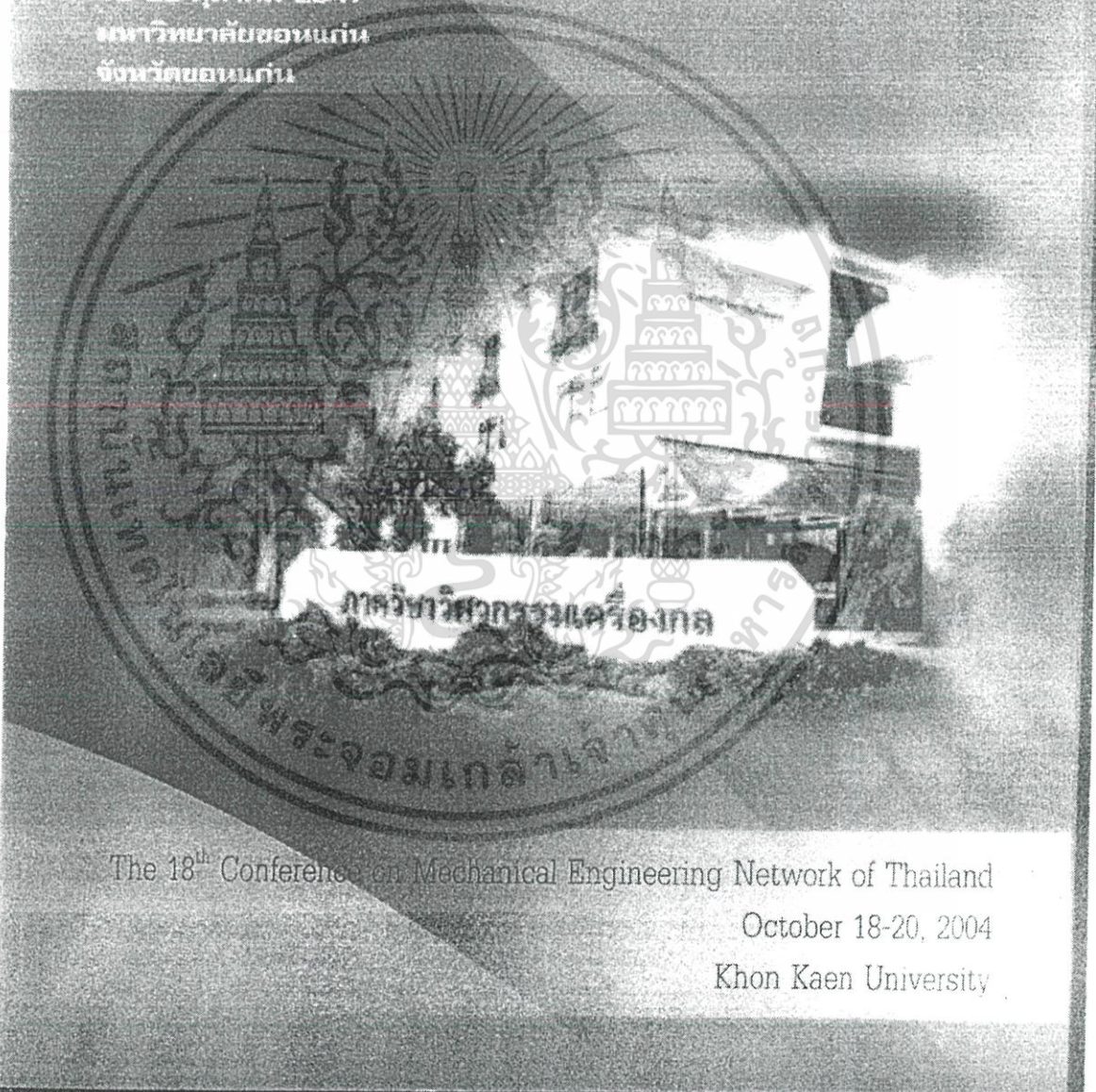
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทคัดย่อ

Abstract



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๘  
 ๑๘-๒๐ ตุลาคม ๒๕๔๗  
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
 จังหวัดขอนแก่น



The 18<sup>th</sup> Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand

October 18-20, 2004

Khon Kaen University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## พฤติกรรมแบบสถิตย์ของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของการสัมผัสแบบเส้น Static Characteristics of Elastohydrodynamic Lubrication under Line Contact

สมนึก ยะวงษ์<sup>1</sup>, มงคล มงคลวงศ์โรจน์<sup>2</sup>, เมธี ลิ้มกุล<sup>3</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: s5060606@kmitl.ac.th<sup>1</sup>, Kmmongko@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

Somnuk Yawong<sup>1</sup>, Mongkol Mongkolwongrojn<sup>2</sup>, Matee Limkul<sup>3</sup>

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

Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: s5060606@kmitl.ac.th<sup>1</sup>, Kmmongko@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมทางสถิตย์ของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น โดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และวิธีนิวตันราฟสันร่วมกันในการแก้สมการเรย์โน้ตประยุกต์สำหรับการสัมผัสแบบเส้นและสารหล่อลื่นจะมีพฤติกรรมเป็นแบบนิวทอนเนียน โดยในการจำลองจะศึกษาถึงผลของความเร็วมอเตอร์ที่กระทำ, ความหนืดของสารหล่อลื่นและวัสดุที่ใช้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองพบว่า เมื่อความเร็ว, ความหนืดและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความดันของสารหล่อลื่นที่จุดสัมผัสมีค่าลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันถ้าเพิ่มภาระในการกระทำมากขึ้นจะส่งผลให้ความดันที่จุดสัมผัสสูงขึ้นความหนาฟิล์มลดลงและเมื่อเพิ่มค่าภาระที่กระทำหรือความเร็วในการหมุนจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น ซึ่งลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นหลังจากที่ผ่านจุดศูนย์กลางของการสัมผัสมาแล้วจะเกิดยอดแหลมสูงขึ้นมาและลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งค่าความดันจะสูงที่สุดและความหนาฟิล์มจะบางที่สุด

### Abstract

This paper presents the static characteristics of elastohydrodynamic lubrication under sliding line contact of two surfaces. The modified Reynolds equation and elastic equation were formulated for compressible Newtonian fluid between the surfaces. The finite differences with Newton's Raphson methods were used to calculate the static characteristics of the elastohydrodynamic lubrication. Pressure profile, film thickness profile and friction coefficient were calculated at various loads speed and surface material used. The results, show that the pressure increases significantly but the film thickness decreases due to the increase of viscosity at high load and high elastic modulus materials. The coefficient of friction

increase with the increase of load and speed. At severe condition the film pressure will be increase to approach the Hertzian contact pressure. At constant loads and velocity, the film pressure increases gradually at lubricant inlet and reaches the maximum pressure to form pressure spike at minimum film thickness.

### 1. บทนำ

ในการหล่อลื่นอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์จะใช้สมการเรย์โน้ตประยุกต์, สมการความหนาฟิล์มที่พิจารณาการเปลี่ยนรูปของวัสดุ, สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนืดกับความดัน และสมการบานซ์การในการแก้สมการ สมการเรย์โน้ตดั้งเดิมที่ (1) เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายการเกิดความดันของของไหลในขณะที่ของไหลไหลเป็นแผ่นบางโดยที่ของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กตามทิศทางการไหล ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดความดันขึ้นในของไหล ในกรณีนี้ได้ประยุกต์สมการเรย์โน้ตกับสภาวะการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง จะได้สมการเรย์โน้ตประยุกต์ดังนี้ [1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12\bar{u} \left( \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ทำการอินทิเกรตจะได้

$$\therefore \frac{\partial p}{\partial x} = 12\bar{u} \eta \left( \frac{\rho h - \rho_m h_m}{\rho h^3} \right) \quad (2)$$

ทำสมการ (2) ให้เป็นตัวแปรแบบไร้หน่วย เมื่อ

$$p = P_H P_r \quad \rho = \rho_0 \bar{\rho} \quad \eta = \eta_0 \bar{\eta}$$

$$U = \frac{\eta_0 \bar{u}}{E'R} \quad G = \xi E' \quad W = \frac{w_z}{E'R}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = R_r \left( \frac{8W}{\pi} \right)^{1/2} X \quad h = \frac{8R_x W}{\pi} H_r$$

$$\rho_H = E \left( \frac{W}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-v_a^2}{2} + \frac{1-v_b^2}{2} \right)$$

จะได้สมการเรย์โน้ตประยุกต์แบบไร้หน่วยดังนี้

$$\therefore \left( \frac{dP_r}{dX_r} \right)_i = \bar{K} \eta_i \left( \frac{\bar{\rho}_i H_{r,i} - \bar{\rho}_m H_{r,m}}{\rho_i H_{r,i}^3} \right), \quad \bar{K} = \frac{3U\pi^2}{4(W)^2} \quad (3)$$

**2. การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข**

ในการแก้สมการ (3) เป็นการพิจารณาปัญหาแบบ 1 มิติ ซึ่งจะแบ่งกริดของการสัมผัสออก 320 กริด เพื่อจะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference scheme) แบบ Forward approximation ในการแก้สมการ โดยจะกำหนดให้จุดเริ่มที่  $X_{min} = -4.5$  และจุดสุดท้ายที่  $X_{max} = 1.5$  เราสามารถเขียนรูปแบบของความดันที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\left( \frac{\partial P}{\partial X} \right)_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} \quad (4)$$

ในสมการเรย์โน้ตประยุกต์เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการเชิงตัวเลขได้โดยในเอกสารนี้จะพิจารณาเลือกใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อแก้สมการหาค่าการกระจายความดันของน้ำมันที่เกิดจากการสัมผัส ทำการจัดรูปสมการ (3) ใหม่ ดังนี้

$$\therefore \bar{f}_i = H_{r,i}^3 (P_{i+1} - P_i) - \bar{K} \Delta \eta_i \left( H_{r,i} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) = 0 \quad (5)$$

สมการความหนาฟิล์มที่รวมผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบยืดหยุ่นซึ่งเป็นฟังก์ชันของความดันดังนี้ [2]

$$H_{r,i} = H_{r,0} + \frac{X_i^2}{2} - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{j=1}^N P_j \ln \left( \left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_j \right) \quad (6)$$

สมการความหนืดที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามความดัน ดังนี้

$$\bar{\eta}_i = \exp \left\{ \ln(\eta_0) + 9.67 \left[ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,i})^i \right] \right\} \quad (7)$$

สมการความหนาแน่นที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามความดัน ดังนี้

$$\bar{\rho}_i = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,i}}{1 + 1.7 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,i}} \quad (8)$$

สมการแสดงการบาลานซ์ภาวะ

$$\int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} P_r dX = \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

จากสมการนิวตัน - ราฟสัน จะเห็นว่าแต่ละโหนดที่พิจารณาจะมีรูปแบบดังนี้

$$\left[ \frac{\partial f_i}{\partial \rho_m H_m} \right] [\Delta(\rho_m H_m)]^i + \sum_{j=2}^N \left( \frac{\partial f_i}{\partial P_{r,j}} \right) (\Delta P_{r,j})^j + \left( \frac{\partial f_i}{\partial H_{r,0}} \right) (\Delta H_{r,0})^i = -f_i^0 \quad (10)$$

ค่าคงที่ในการบาลานซ์ภาวะแบบไร้หน่วย จะหาได้ดังนี้

$$\int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} (\Delta P_r)^n dX = \frac{\pi}{2} - \int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} (P_r)^j dX_r$$

$$= \frac{\pi}{2} - \sum_{j=2}^N C_j (\Delta P_{r,i})^j \quad (11)$$

จากสมการ (5), (6), (7), (8) และ (9) ก็จะสามารถแก้สมการหาตัวแปรที่ไม่ทราบได้คือ

$$\rho_m H_{r,m}, H_{r,0}, P_{r,i}$$

นำตัวแปรต่างๆ มาแทนในสมการของเรย์โน้ตและแก้สมการด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

$$(\rho_m H_{r,m})^n = (\rho_m H_{r,m})^0 + [\Delta(\rho_m H_{r,m})]^n$$

$$P_{r,j}^n = P_{r,j}^0 + (\Delta P_{r,j})^n \quad (12)$$

$$H_{r,0}^n = H_{r,0}^0 + (\Delta H_{r,0})^n$$

จัดรูปแบบเมทริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{r,0}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{r,0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_N}{\partial H_{r,0}} \\ 0 & C_1 & \dots & C_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta(\rho_m H_{r,m}) \\ \Delta(P_{r,2}) \\ \vdots \\ \Delta(P_{r,N}) \\ \Delta(H_{r,0}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ \vdots \\ -f_N \\ \Delta W \end{bmatrix} \quad (13)$$

เมื่อ  $\frac{\partial f_i}{\partial H_{r,0}} = 3H_{r,i}^2 (P_{i+1} - P_i) - \Delta X \bar{K} \eta_i \quad (14)$

$\frac{\partial f_i}{\partial(\rho_m H_{r,m})} = \frac{\Delta X \bar{K}}{C(\rho_m H_{r,m})} = \frac{\Delta X \bar{K}}{\rho_i} \quad (15)$

$\frac{\partial f_i}{\partial P_{r,j}} = H_{r,i}^3 (\delta(i+1,j) - \delta(i,j)) + (P_{i+1} - P_i) (3H_{r,i}^2) \left( \frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_{r,j}} \right) - \Delta X \bar{K} A \quad (16)$

เมื่อ  $A = \left[ \eta_i \left( \frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_{r,j}} \right) + H_{r,i} \left( \frac{\partial \eta_i}{\partial P_{r,j}} \right) - \eta_i \left[ \frac{\rho_i \Delta \rho_m H_m - \rho_m H_m \frac{\partial \rho_i}{\partial P_{r,j}}}{\rho_i^2} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \frac{\partial \eta_i}{\partial P_{r,j}} \right] \right]$

โดยที่  $\frac{\partial H_i}{\partial P_j}, \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j}, \frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}$  จะหาได้ดังนี้  $\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_{r,j}} = -\frac{\Delta X}{2\pi} \ln \left( \left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_j \right) \quad (17)$

$\frac{\partial \eta_i}{\partial P_{r,j}} = \exp \left\{ \ln(\eta_0) + 9.67 \left[ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,i})^i \right] \right\} \left\{ \ln \eta_0 + 9.67 \left[ Z_j \left( 1 + 5.1 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,i} \right)^{i-1} \left( 5.1 \times 10^{-9} \rho_H \right) \delta(i,j) \right] \right\} \quad (18)$

$\frac{\partial \rho_i}{\partial P_{r,j}} = \frac{0.6 \times 10^{-9} \rho_H \delta(i,j)}{(1 + 1.7 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,i})^2} \quad (19)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

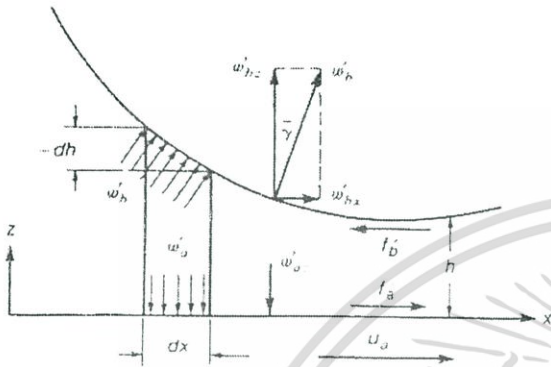
สมการแสดงการสมมุติความดันเริ่มต้นในการคำนวณ จะให้มีการกระจายความดันแบบเอิร์ท [4] ดังนี้

$$P_{r,i} = \sqrt{1 - X^2} \tag{20}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังนี้

$$P = 0 \text{ ที่ } X_{in}$$

$$P = 0 \cdot \frac{dP}{dX} = 0 \text{ ที่ } X_{out} \tag{21}$$



รูปที่ 1 แสดงแรงเฉือนและภาวะที่กระทำต่อวัสดุ

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าแรงเฉือนที่กระทำต่อทรงกระบอกและพื้นต่อหน่วยความกว้างตั้งสมการ (22)

$$f_a = \int (\tau)_{z=0} dx = \int \left( \eta \frac{du}{dz} \right)_{z=0} dx \tag{22}$$

โดยที่

$$\eta \frac{du}{dz} = \frac{2z - h}{2} \frac{dp}{dx} \frac{\eta(u_a - u_b)}{h} \tag{23}$$

ดังนั้น จากสมการ (22) จะได้ว่า

$$f_a = - \int \left[ \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} + \frac{\eta(u_a - u_b)}{h} \right] dx \tag{24}$$

และแรงในแนวเฉียงจะหาได้ดังนี้

$$w_{bx} = \int h \frac{dp}{dx} dx \tag{25}$$

ทำให้สมการ (25) เป็นแบบไร้มิติ จะได้

$$W_{bx} = \frac{w_{bx}}{ER_x} = 2 \left( \frac{2W}{\pi} \right)^{3/2} \int H_r \frac{dP_r}{dX_r} dX_r \tag{26}$$

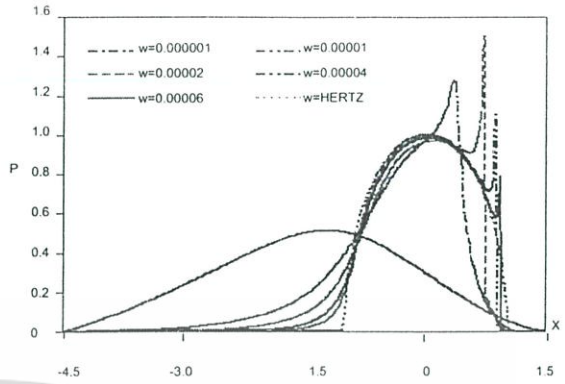
ทำสมการ (24) ให้เป็นแบบไร้มิติจะได้

$$F_a = \frac{f_a}{ER_x} = - \frac{W_{bx}}{2} - \left( \frac{u_a - u_b}{u_a + u_b} \right) U \left( \frac{\pi}{2W} \right)^{1/2} \int \frac{\bar{\eta}}{H_r} dX_r \tag{27}$$

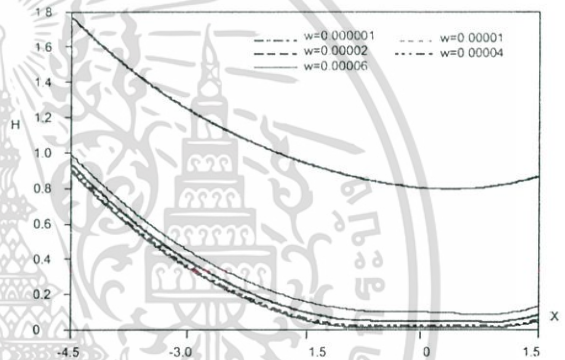
ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของทรงกระบอกจะหาได้ดังนี้

$$\mu = - \frac{F_a}{W} \tag{28}$$

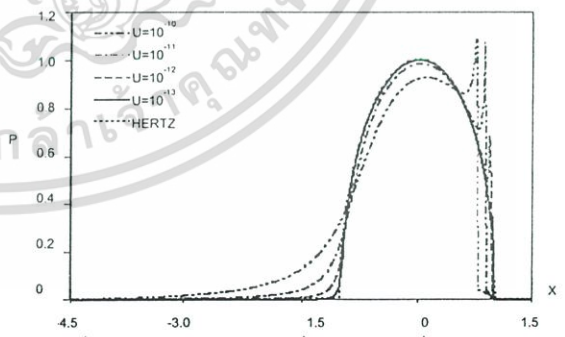
### 3. วิเคราะห์ผลจากการจำลอง



รูปที่ 2 การกระจายความดันเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วคงที่,  $U = 1 \times 10^{-11}$

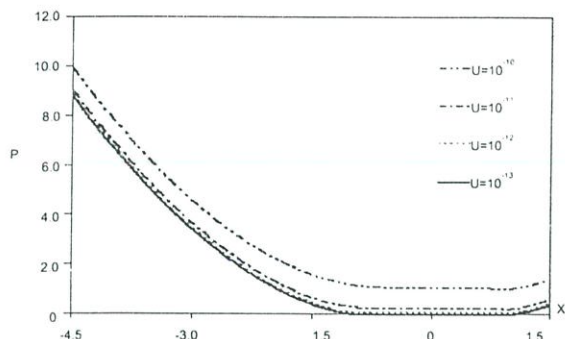


รูปที่ 3 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อภาวะที่กระทำเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วคงที่,  $U = 1 \times 10^{-11}$

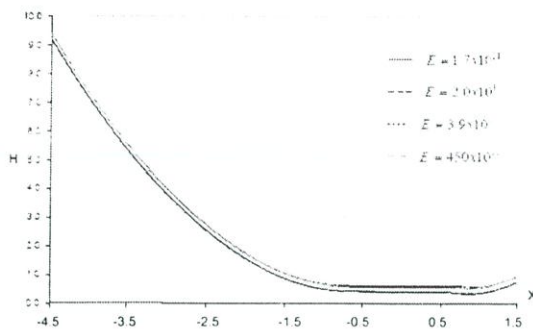


รูปที่ 4 การกระจายความดันเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงและค่าภาวะคงที่,  $W = 4 \times 10^{-5}$

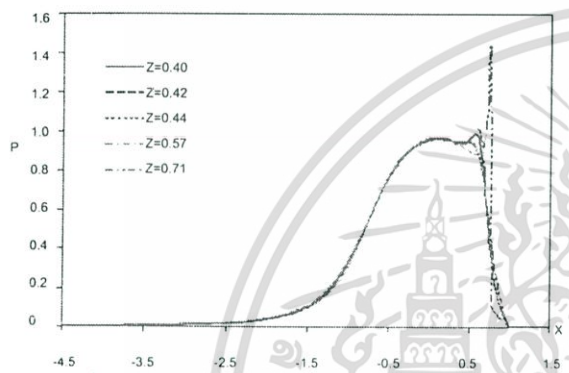
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



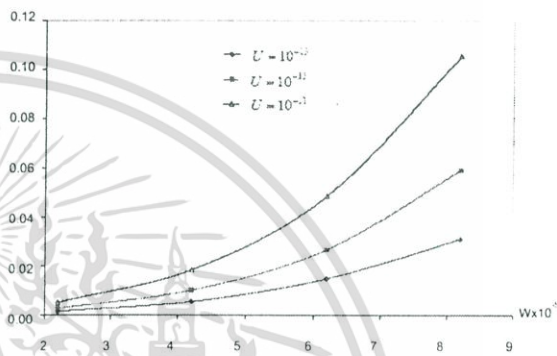
รูปที่ 5 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง และค่าการคงที่,  $W = 4 \times 10^{-5}$



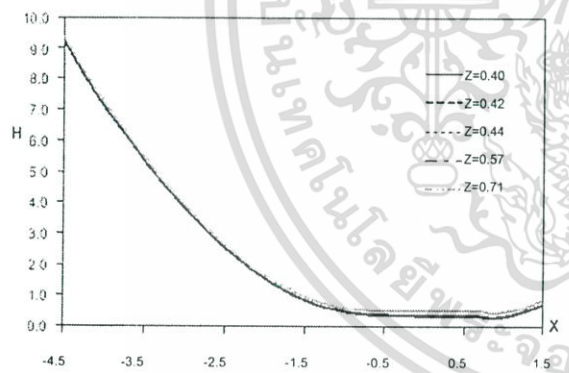
รูปที่ 9 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อค่าวัสดุเปลี่ยนแปลง



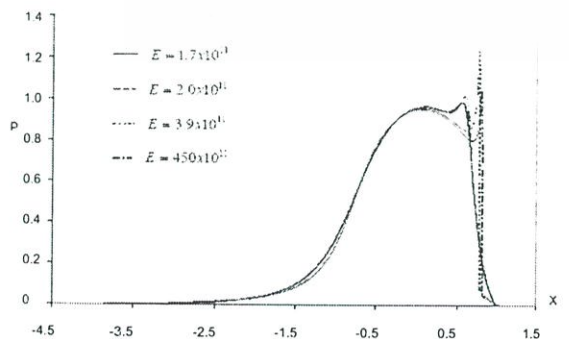
รูปที่ 6 การกระจายความดันเมื่อความหนืดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 10 ค่าความเร็วและภาวะที่กระทำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



รูปที่ 7 การกระจายความหนาฟิล์มเมื่อความหนืดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 8 การกระจายความดันเมื่อค่าวัสดุเปลี่ยนแปลง

- กำหนดข้อมูลเริ่มต้น
- ค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงและค่าการคงที่ (ศึกษาผลจากความเร็ว)  $U = 10^{-10}, 10^{-11}, 10^{-12}, 10^{-13}$   
 $W = 4 \times 10^{-5}$
  - ค่าการเปลี่ยนแปลงและค่าความเร็วคงที่ (ศึกษาผลจากภาวะ)  $W = 10^{-6}, 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-5}$   
 $U = 1 \times 10^{-11}$
  - ค่าความหนืดเปลี่ยนโดยค่าความเร็วและภาวะคงที่  $z_1 = 0.4, 0.42, 0.44, 0.57, 0.71$   
 $U = 10^{-11}, W = 2 \times 10^{-5}$
  - ค่าวัสดุเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเร็วและภาวะคงที่  $E = 170 \times 10^{11}, 200 \times 10^{11}, 390 \times 10^{11}, 450 \times 10^{11}$   
 $U = 1 \times 10^{-11}, W = 2 \times 10^{-5}$
  - ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยภาวะและความเร็วเปลี่ยนแปลง  $U = 10^{-11}, 10^{-12}, 10^{-13}$   
 $W = [2 \times 10^{-5}, 8 \times 10^{-5}]$
- ค่าวัสดุของโลหะผสม  $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$   
 ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ของ C-ether  $\eta_0 = 0.029$   
 ค่าดัชนีความดัน - ความหนืด ของ C-ether  $z_1 = 0.57$   
 ค่าความผิดพลาด  $= 10^{-6}$   
 ขอบเขตการคำนวณ  $X_a = -4.5, X_b = 1.5$   
 จำนวนโนดที่ใช้  $N = 320 \therefore \Delta X = 0.01875$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการแก้มการเรย์โน้ดประยุกต์ที่จำลองการสัมผัสของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง โดยมีการหล่อเส้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ จากกราฟรูปที่ 4 ความดันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเข้าไปใกล้จุดศูนย์กลางของการสัมผัสและจะลดลงเมื่อผ่านจุดศูนย์กลางของการสัมผัส แต่บริเวณใกล้ทางออกจะเกิดความดันสูงอีกครั้งและลดลงอย่างรวดเร็ว (Pressure Spike) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของทรงกระบอกและการเปลี่ยนความเร็วจะเห็นว่าเมื่อขนาดของความเร็วลดลงจะทำให้ความดันมีค่าสูงขึ้นขณะเดียวกัน ขนาดของความหนาฟิล์มก็จะลดลง และยอดแหลมของความดันที่เกิดขึ้นตอนทางออกก็ลดลงเช่นกัน และเมื่อทำการลดขนาดความเร็วลงเรื่อยๆ จะทำให้ความหนาของฟิล์มบางมากและลักษณะการกระจายของความดันก็จะคล้ายกับลักษณะการสัมผัสแบบเอิร์ท ดังรูปที่ 5 และจากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าที่ภาวะน้อยๆ จะมีการกระจายความดันที่ไม่สูงนักและไม่เกิดความดันขึ้นที่ทางออกขณะเดียวกันความหนาของฟิล์มก็จะหนาคล้ายกับการหล่อเส้นแบบไฮโดรไดนามิกส์ เนื่องจากว่าไม่มีการเสียรูปของทรงกระบอกและเมื่อทำการเปลี่ยนค่าภาวะที่กระทำต่อทรงกระบอกให้สูงขึ้นก็จะมีผลทำให้ลักษณะของการกระจายความดันมีค่าสูงขึ้นและความหนาของฟิล์มก็จะบางมาก ที่ค่าภาวะ  $W = 6 \times 10^{-5}$  ลักษณะการกระจายของความดันที่ได้จะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเอิร์ท สำหรับค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความดันลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะมากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้นและภาวะมากขึ้น สำหรับรูปที่ 6 และ 7 เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด เมื่อความหนืดสูงขึ้นค่าความดันจะลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะหนาขึ้น และรูปที่ 8 และ 9 เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมากขึ้น ค่าความดันจะเพิ่มขึ้นและความหนาฟิล์มจะลดลง สำหรับรูปที่ 10 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้นตามค่าภาวะและความเร็วที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นฟิล์มมากขึ้นจึงทำให้แรงเสียดทานมากขึ้นจากการเปรียบเทียบผลที่จำลองได้กับผลการจำลองของดอร์สัน[3] ก็ มีลักษณะพฤติกรรมที่คล้ายกัน

#### 4. บทสรุป

ค่าภาวะจะมีผลต่อขนาดของความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น เมื่อค่าภาวะมีค่าสูงๆก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นมากขึ้น และลักษณะการกระจายของความดันจะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเอิร์ท

1. ค่าความเร็วในการหมุนของทรงกระบอกก็จะมีผลต่อขนาดของความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นเมื่อค่าความเร็วลดลงก็จะทำให้ความหนาฟิล์มบางลงและความดันเพิ่มขึ้นและลักษณะการกระจายของความดันจะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเอิร์ท
2. ค่าความดันจะลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะมากขึ้น เมื่อค่าความหนืดและวัสดุเพิ่มขึ้น
3. ค่าความดันจะลดลงแต่ความหนาฟิล์มจะมากขึ้นเมื่อค่าโมดูลัสของวัสดุมากขึ้น

4. ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะมากขึ้นเมื่อความเร็วและภาวะที่กระทำมีค่าสูงขึ้น
5. ในการคำนวณทางเชิงตัวเลขจะเข้าสู่ค่าตอบซ้ำหากขนาดของภาวะที่กระทำสูง,ค่าความเร็วต่ำ,ค่าความหนืดต่ำ และค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำ

#### 5. สัญลักษณ์

$a$	ของแข็ง a (Plate)
$b$	ของแข็ง b (Roller)
$C_f$	ค่าแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ในสมการ (11)
$E'$	ค่าโมดูลัสสัมบูรณ์ของวัสดุ, $Pa.(N/m^2)$
$E_a$	ค่าโมดูลัสของวัสดุ a, $Pa.(N/m^2)$
$E_b$	ค่าโมดูลัสของวัสดุ b, $Pa.(N/m^2)$
$F'_a$	แรงแบบไร้มิติที่กระทำกับของแข็ง a
$f'_a$	แรงที่กระทำกับของแข็ง a, $N$ .
$G$	ตัวแปรไร้มิติของวัสดุ, $\xi E'$
$H_{r,o}$	ค่าคงที่ของแบบไร้หน่วยสำหรับการสัมผัสแบบเส้น
$H_{r,i}$	ค่าความหนาฟิล์มแบบไร้มิติที่ตำแหน่ง i
$h$	ค่าความหนาฟิล์ม, $m$ .
$\bar{K}$	ค่าคงที่, $3\pi^2 U/4(W')^2$
$P_{r,i}$	ค่าความดันแบบไร้หน่วย
$P_H$	ค่าความดันสูงสุดของเซอร์เซียน $Pa.(N/m^2)$
$p$	ค่าความดัน $Pa.(N/m^2)$
$R_x$	คาร์คมี่สัมผัส ในทิศทางแกน $x, m$ .
$U$	ค่าความเร็วของการสัมผัสแบบไร้หน่วย, $\eta_0 \bar{u}/(E R_x)$
$\bar{u}$	ค่าความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $X, (u_a + u_b)/2, m/s$ .
$u_a$	ค่าความเร็วที่ผิวสัมผัส a, $m/s$ .
$u_b$	ค่าความเร็วที่ผิวสัมผัส b, $m/s$ .
$v$	อัตราส่วนของผิวของ
$W'$	ค่าภาวะที่กระทำแบบไร้หน่วย, $w_z / E' R_x$
$W'_{bx}$	ค่าภาวะที่กระทำต่อของแข็ง b แบบไร้หน่วย
$w_z$	ค่าภาวะที่กระทำในแนวตั้งฉากต่อหน่วยความกว้าง, $N/m$ .
$X_{r,i}$	ค่าแนวแกน $X$ แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบเส้น
$X_{r,min}$	ค่าแนวแกน $X$ แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบเส้นที่จุดเริ่มคำนวณกริด $X_{r,min} = -4.5$
$X_{r,max}$	ค่าแนวแกน $X$ แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบเส้นที่จุดเริ่มคำนวณกริด $X_{r,max} = 1.5$
$z$	ค่าแนวแกนความสูงจากผิวสัมผัส a ไปยังผิว b
$z_1$	ค่าดัชนีของความหนืด - ความดัน แบบไร้มิติ
$\xi$	ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด - ความดัน, $m^2 / N$
$\rho$	ค่าความหนาแน่น, $N \cdot s^2 / m^4$
$\rho_m$	ค่าความหนาแน่น เมื่อ $dP/dX = 0, Ns^2 / m^4$
$H_m$	ค่าความหนาฟิล์มแบบไร้หน่วย สำหรับการสัมผัสแบบเส้น เมื่อ $dP/dX = 0$

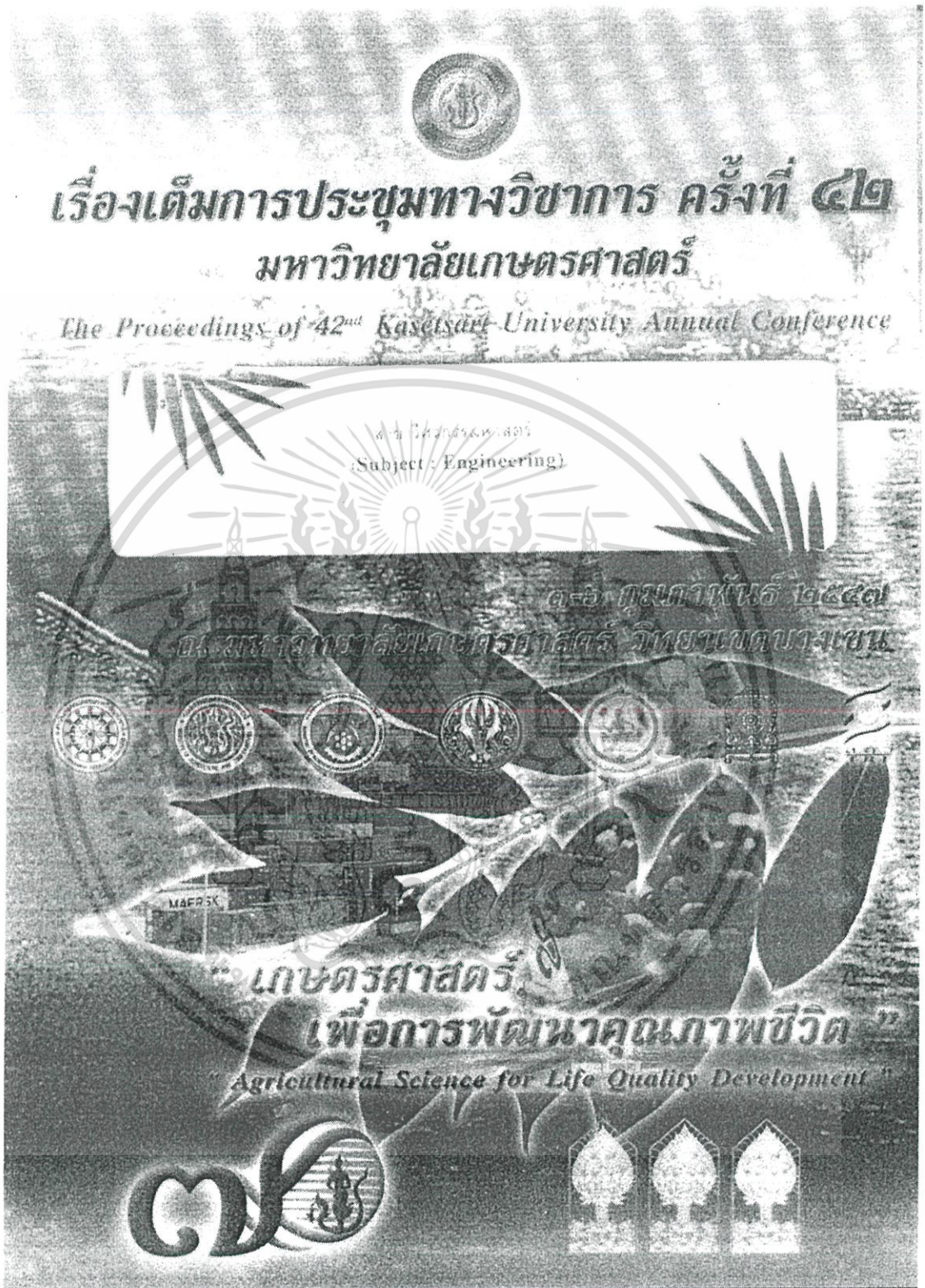
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\rho_0$	ค่าความหนาแน่น เมื่อ $P = 0, N.s^2 / m^4$
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นแบบไร้หน่วย $\rho / \rho_0$
$\eta_0$	ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ที่ $P = 0$ และ ค่าอุณหภูมิคงที่ $Pa.s$ (or $N.s / m^2$ )
$\eta$	ค่าความหนืดสัมบูรณ์, $Pa \cdot s$
$\bar{\eta}$	ค่าความหนืดสัมบูรณ์แบบไร้มิติ $\frac{\eta}{\eta_0}$
$\Delta X$	ค่าช่วงความยาวที่แบ่งแนวแกน $X$
$\mu$	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$\delta(i, j)$	ค่าคงที่จากการเปรียบเทียบแรงดัน ถ้า $i = j, \delta = 1$ และ $i \neq j, \delta = 0$
$\tau$	ค่าความเค้นเฉือน, $Pa$ .

### เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] Bernard J. Hamrock, "Fundamentals of fluid film lubrication", 1994
- [2] H. Okamura, "A Contribution to the Numerical Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication", Tribology of Reciprocating Engines. D.Dowson et al. (eds) Butterworths, Guilford, England, pp 313-320, 1982
- [3] Dawson, D., and Higison, G.R., Elastohydrodynamic Lubrication, "The Fundament of Roller and Gear Lubrication". Pergamon Oxfor, 1996
- [4] Bernard J. Hamrock and Jacobson, B.O. "Elastohydrodynamic Lubrication of Line Contacts". ASLE Trans., vol. 24, no.4, pp.275-287.1984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง Elastohydrodynamic Lubrication of Cylindrical Roller in Line Contact

มงคล มงคลวงศ์โรจน์ , สมนึก ยะวงษ์

Mongkol Mongkolwongrojn, Somnuk Yawong

### บทคัดย่อ

การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์เป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง โดยจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบยืดหยุ่นของวัสดุ ในบทความนี้ได้ใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และวิธีการของนิวตัน-กราฟส์ในการแก้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์ในการสัมผัสแบบสไลด์แห้งผิวผิว พิจารณาอุณหภูมิคงที่และคิดความหนาแน่นของสารหล่อลื่นเป็นแบบไม่คงที่ ซึ่งผลจากการแก้สมการพบว่าไหลที่กระทำและความเร็วของการหมุนของทรงกระบอกจะมีผลต่อค่าการกระจายแรงดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น คือเมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้น และลักษณะของการกระจายของแรงดันจะเข้าไปกึ่งกลางของเฮิร์ตเซียนมากและความหนาของฟิล์มก็จะบางมาก และเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นก็จะมีผลทำให้ความหนาฟิล์มเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งลักษณะของแรงดันที่เกิดขึ้นหลังจากที่ผ่านจุดศูนย์กลางของการสัมผัสมาแล้วจะเกิดยอดหนามแหลมสูงขึ้นมาและลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งค่าแรงดันจะสูงที่สุดและความหนาฟิล์มจะบางที่สุด

### ABSTRACT

Elastohydrodynamic lubrication is defined as thin film lubrication considering the elastic deformation of material under contact stress. This paper presents the application of finite difference and Newton Raphson method to calculate the Reynolds equation of a cylindrical roller on flat surface numerically. The lubricant is a compressible fluid and operated at isothermal condition. Calculation results show that the film pressure of the lubricants in line contact under elastohydrodynamic lubrication is decreased when the increase of load, on the other hand, the film thickness will be increase as the velocity increase. At severe conditions, the film pressure will be increased approach the Hertzian contact pressure. At constant load and velocity the film pressure increase gradually at lubricant inlet and reach the maximum pressure to form pressure spike at minimum film thickness.

Keyword: Elastohydrodynamics line contact, Reynolds equation

M. Mongkolwongrojn kmmong@kmitl.ac.th

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎี

ในการหล่อลื่นฮิสเทอโรไดนามิกส์จะใช้สมการเรย์โนลด์์ประยุกต์, สมการความหนาฟิล์มที่พิจารณาการเปลี่ยนรูปของวัสดุ, สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนืดกับแรงดัน และสมการบาลานซ์ไหลในการแก้สมการ สมการเรย์โนลด์์ดังสมการที่ (1) เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายการเกิดแรงดันของของไหล ในขณะที่ของไหลไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางโดยที่ฟิล์มของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงตามทิศทางการไหล ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นในของไหล ในกรณีนี้ได้ประยุกต์สมการเรย์โนลด์์กับสภาวะการหล่อลื่นแบบฮิสเทอโรไดนามิกส์ของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง จะได้สมการเรย์โนลด์์ประยุกต์ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12\bar{u} \left( \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \right) \tag{1}$$

ทำการอินทิเกรตจะได้

$$\therefore \frac{\partial p}{\partial x} = 12\bar{u} \eta \left( \frac{\rho h - \rho_m h_m}{\rho h^3} \right) \tag{2}$$

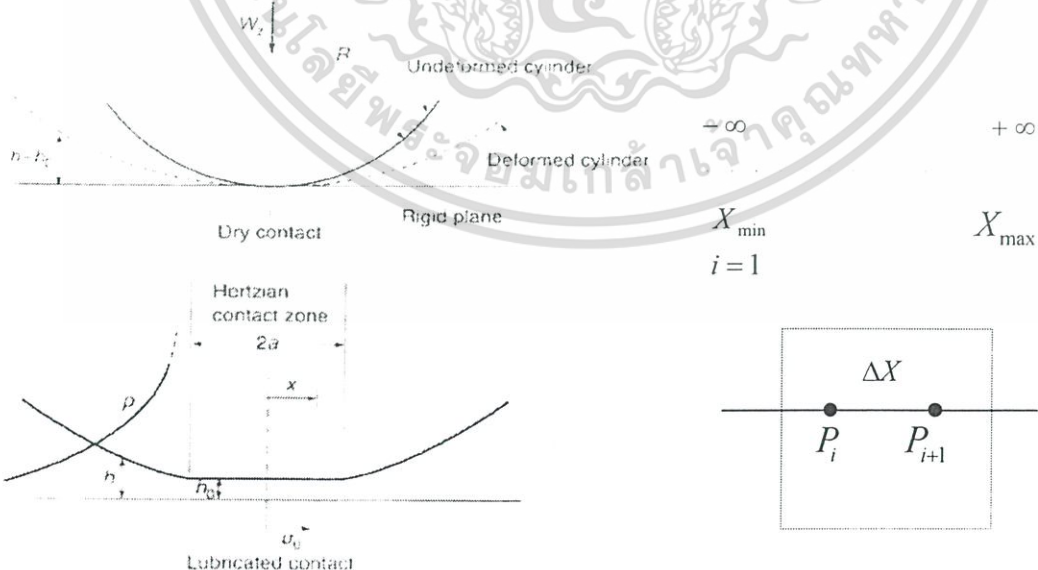
ทำสมการ (2) ให้เป็นตัวแปรแบบไร้นหน่วย เมื่อ

$$\begin{aligned} p &= p_H P_r & \rho &= \rho_0 \bar{\rho} & \eta &= \eta_0 \bar{\eta} & U &= \frac{\eta_0 \bar{u}}{E'R} & G &= \xi E' \\ x &= R_x \left( \frac{8W'}{\pi} \right)^{1/2} X_r & h &= \frac{8R_x W'}{\pi} H_r & p_H &= E' \left( \frac{W'}{2\pi} \right)^{1/2} & W' &= \frac{w_z}{E'R} \end{aligned}$$

จะได้สมการเรย์โนลด์์ประยุกต์แบบไร้นหน่วย ดังนี้

$$\therefore \left( \frac{dP_r}{dX_r} \right)_i = \bar{K} \bar{\eta}_i \left( \frac{\bar{\rho}_i H_{r,i} - \bar{\rho}_m H_{r,m}}{\rho_i H_{r,i}^3} \right), \bar{K} = \frac{3U\pi^2}{4(W')^2} \tag{3}$$

การกระจายแรงดันจะพิจารณาดังนี้



รูปที่ 1 ลักษณะการสัมผัสของโรลเลอร์กับพื้นผิวราบและแสดงการแบ่งกริดบนพื้นผิวของการสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข

จากรูปที่ 1 แสดงการแบ่งกริดของการสัมผัสซึ่งจะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference scheme) โดยใช้ Forward difference approximation ดังนั้นในรูปที่ 2 เราสามารถเขียนรูปแบบของความดันที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} \quad (4)$$

ในสมการเรย์โนลด์ประยุกต์เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้โดยในเอกสารนี้จะพิจารณาเลือกใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อแก้สมการหาค่าการกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดจากการสัมผัส ได้ดังนี้

ทำการจัดรูปสมการ (4) ใหม่ ดังนี้

$$\therefore \bar{f}_i = H_{r,i}^3 (P_{i+1} - P_i) - \bar{K} \Delta \eta_i \left( H_{r,i} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) = 0 \quad (5)$$

สมการความหนาฟิล์มที่รวมผลจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงดันดังนี้

$$H_{r,i} = H_{r,0} + \frac{X_i^2}{2} - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{j=1}^i P_j \ln \left( \frac{X_{j+1} + X_j}{2} - X_i, \left| \frac{X_{j-1} + X_j}{2} - X_i \right| \right) \quad (6)$$

สมการความหนืดที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน ดังนี้

$$\bar{\eta}_i = \exp \left[ \ln(\eta_0) + 9.67 \left[ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^2 \right] \right] \quad (7)$$

สมการความหนาแน่นที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน ดังนี้

$$\rho_i = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P_{r,i}}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_{r,i}} \quad (8)$$

สมการแสดงการบาลานซ์ไหล

$$\int_{X_{r,\min}}^{X_{r,\max}} P_r dX = \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

จากสมการนิวตัน - ราฟสัน จะเห็นว่าแต่ละโหนดที่พิจารณาจะมีรูปแบบดังนี้

$$\left[ \frac{\partial f_i}{\partial \rho_m H_m} \right]^n [\Delta(\rho_m H_m)]^n + \sum_{j=2}^N \left( \frac{\partial f_i}{\partial P_{r,j}} \right) (\Delta P_{r,j})^n + \left( \frac{\partial f_i}{\partial H_{r,0}} \right) (\Delta H_{r,0})^n = -f_i^n \quad (10)$$

ค่าคงที่ในการบาลานซ์ไหลแบบไร้หน่วย จะหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \int_{X_{r,\min}}^{X_{r,\max}} (\Delta P_r)^n dX &= \frac{\pi}{2} - \int_{X_{r,\min}}^{X_{r,\max}} (P_r)^0 dX_r \\ &= \frac{\pi}{2} - \sum_{j=2}^N C_j (\Delta P_{r,j})^n \end{aligned} \quad (11)$$

จากสมการ (5) , (6) , (7) , (8) และ (9) ก็จะสามารถแก้สมการหาตัวแปรที่ไม่ทราบได้คือ

$$\rho_m H_{r,m} , H_0 , P_{r,i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัวแปรต่างๆ มาแทนในสมการของเรย์โนลด์และแก้สมการด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

$$\begin{aligned}(\rho_m H_{r,m})^n &= (\rho_m H_{r,m})^0 + [\Delta(\rho_m H_{r,m})]^n \\ P_{r,j}^n &= P_{r,j}^0 + (\Delta P_{r,j})^n \\ H_{r,o}^n &= H_{r,o}^0 + (\Delta H_{r,o})^n\end{aligned}\quad (12)$$

จัดรูปแบบเมทริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{r,0}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{r,0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,2}} & \frac{\partial f_N}{\partial H_{r,0}} \\ 0 & C_1 & \dots & C_N & 0 \end{bmatrix}^0 \begin{Bmatrix} \Delta(\rho_m H_{r,m})^n \\ \Delta(P_{r,2}) \\ \vdots \\ \Delta(P_{r,N}) \\ \Delta(H_{r,o}) \end{Bmatrix}^n = \begin{Bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ \vdots \\ -f_N \\ \Delta W' \end{Bmatrix}^0 \quad (13)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial f_i}{\partial H_0} = 3H_{r,i}^2 (P_{i+1} - P_i) - \Delta X \bar{K} \eta_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial (\rho_m H_{r,m})} = \frac{\Delta X \bar{K}}{\rho_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial P_j} = H_{r,i}^3 (\delta(i+1, j) - \delta(i, j)) + (P_{i+1} - P_i) \left( 3H_{r,i}^2 \left( \frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) - \Delta X \bar{K} A \right) \quad (16)$$

$$A = \left[ \eta_i \left( \frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) + H_{r,i} \left( \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} \right) - \eta_i \left[ \frac{\rho_i \Delta \rho_m H_m - \rho_m H_m \frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}}{\rho_i^2} - \frac{\rho_m H_m \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j}}{\rho_i} \right] \right]$$

โดยที่  $\frac{\partial H_i}{\partial P_j}$ ,  $\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j}$ ,  $\frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}$  จะหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} = -\frac{\Delta X}{2\pi} \ln \left\{ \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \middle| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_j \right\} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} = \exp \left\{ [\ln \eta_0 + 9.67] \left[ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^i \right] \right\} [\ln \eta_0 + 9.67] (z_1) (1 + \quad (18)$$

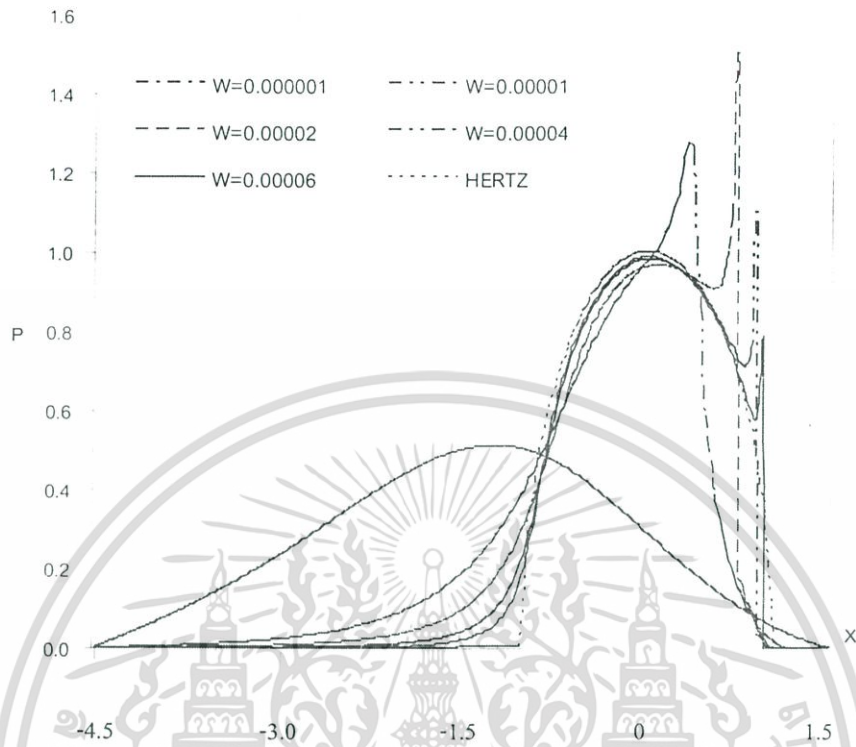
$$5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^{i-1} (5.1 \times 10^{-9} p_H) \delta(i, j)]$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial P_j} = \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H \delta(i, j)}{(1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^2} \quad (19)$$

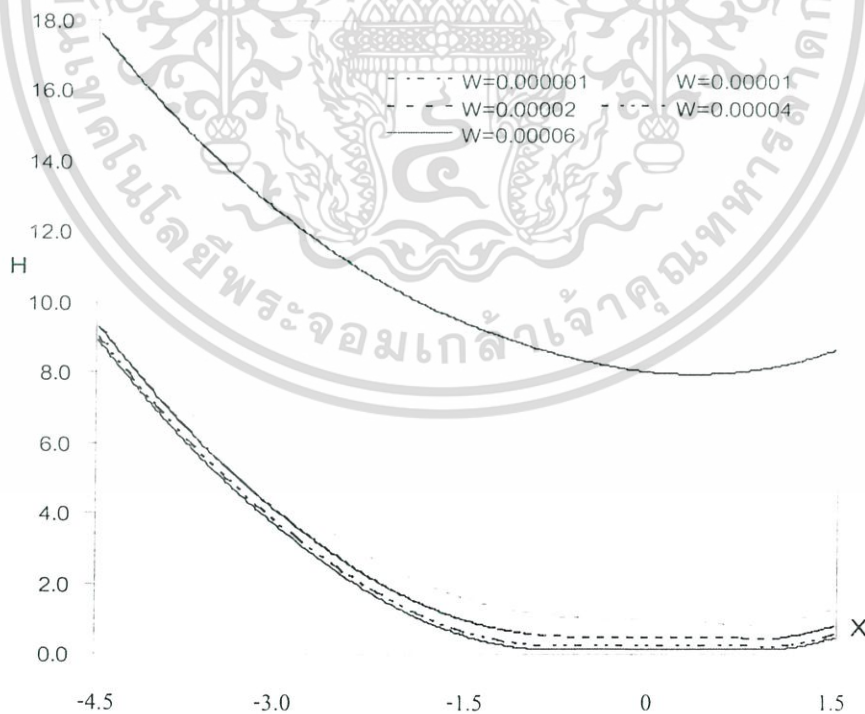
สมการแสดงการสมมุติแรงดันเริ่มต้นในการคำนวณ จะให้มีการกระจายแรงดันแบบเอิร์ท ดังนี้

$$P_{r,i} = \sqrt{1 - X^2} \quad (20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

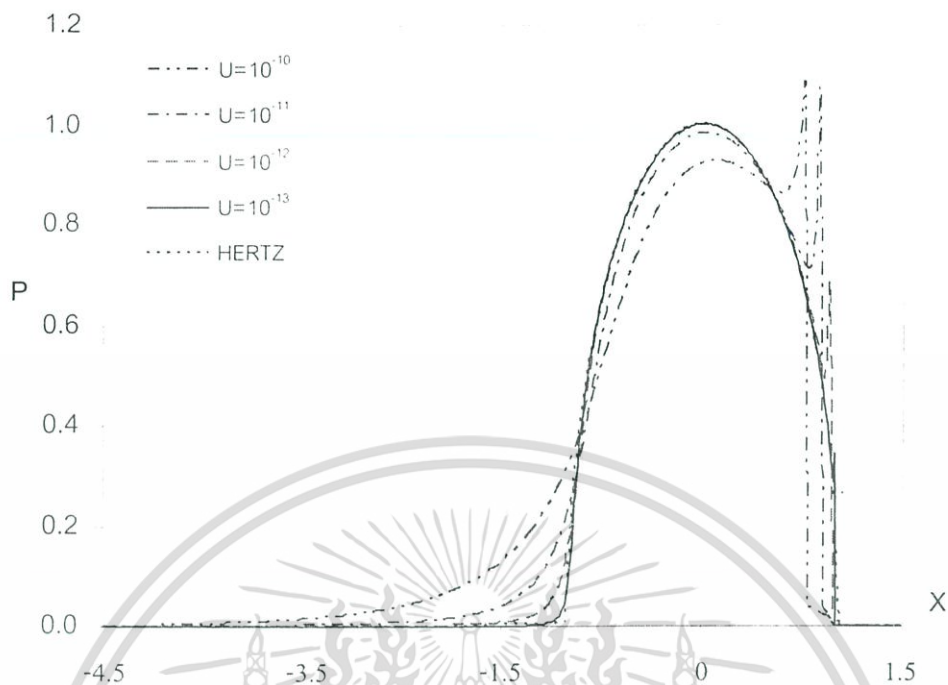


รูปที่ 2 แสดงลักษณะการกระจายความดัน

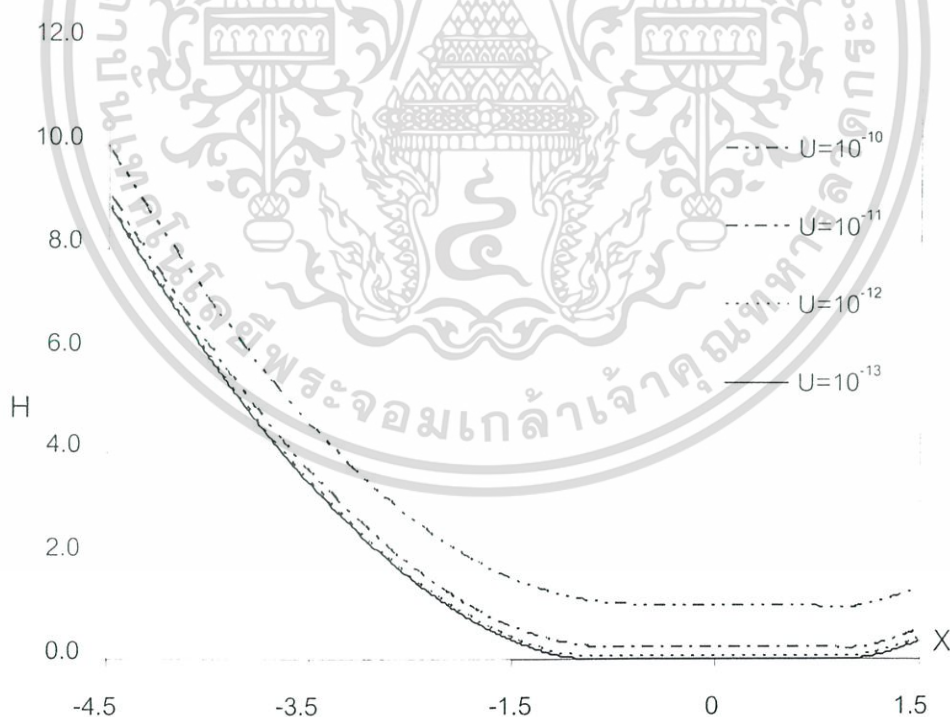


รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงลักษณะการกระจายความดัน



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการกระจายความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิเคราะห์ผลจากการจำลอง (Analysis of simulation result)

### กำหนดข้อมูลเริ่มต้น

ค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงและค่าไหลคงที่ (ศึกษาผลจากความเร็ว)

$$U = 10^{-10}, 10^{-11}, 10^{-12}, 10^{-13}$$

$$W = 4 \times 10^{-5}$$

ค่าไหลเปลี่ยนแปลงและค่าความเร็วคงที่ (ศึกษาผลจากไหล)

$$W = 10^{-6}, 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-5}$$

$$U = 1 \times 10^{-11}$$

ค่าวัสดุของโลหะผสม  $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ .

ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของ C-ether  $\eta_o = 0.029$

ค่าดัชนีแรงดัน - ความหนืด ของ C-ether  $z_1 = 0.57$

ค่าความผิดพลาด  $= 10^{-6}$

ขอบเขตการคำนวณ  $X_a = -4.5, X_b = 1.5$

จำนวนโนดที่ใช้  $N = 320 \therefore \Delta X = 0.01875$

จากการแก้สมการเรย์โนลด์์ประยุกต์ที่จำลองการสัมผัสของวัตถุทรงกระบอกสัมผัสเป็นเส้นตรง โดยมีการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีติกไฮโดรไดนามิกส์ จากผลที่ได้ในกราฟรูปที่ 4 แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเข้าไปใกล้จุดศูนย์กลางของการสัมผัสและจะลดลงเมื่อผ่านจุดศูนย์กลางของการสัมผัส แต่ก็จะมีบางส่วนบริเวณใกล้ทางออกจะเกิดแรงดันสูงอีกครั้งและลดลงอย่างรวดเร็ว (Pressure Spike) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของทรงกระบอกและจากการเปลี่ยนความเร็วจะเห็นว่าเมื่อขนาดของความเร็วลดลงจะทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้น ขณะเดียวกัน ขนาดของความหนาฟิล์มก็จะลดลง และยอดแหลมของแรงดันที่เกิดขึ้นตอนทางออกก็ลดลงเช่นกัน และเมื่อทำการลดขนาดความเร็วลงเรื่อยๆ จะทำให้ความหนาของฟิล์มบางมากและลักษณะการกระจายของแรงดันก็จะคล้ายกับลักษณะการสัมผัสแบบเฮิร์ท ดังรูปที่ 4 และจากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าที่ไหลน้อยๆ จะมีการกระจายแรงดันที่ไม่สูงนักและไม่เกิดแรงดันขึ้นที่ทางออกขณะเดียวกันความหนาของฟิล์มก็จะหนาคล้ายกับการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ เนื่องจากว่าไม่มีการเสียรูปของทรงกระบอกและเมื่อทำการเปลี่ยนค่าไหลที่กระทำต่อทรงกระบอกให้สูงขึ้นก็จะมีผลทำให้ลักษณะของการกระจายแรงดันมีค่าสูงขึ้นและความหนาของฟิล์มก็จะบางมาก ที่ค่าไหล  $W = 6 \times 10^{-5}$  ลักษณะการกระจายของแรงดันที่ได้จะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเฮิร์ท

### บทสรุป (Conclusion)

1. ค่าไหลจะมีผลต่อขนาดของแรงดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น เมื่อค่าไหลมีค่าสูงๆ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นมากขึ้น และลักษณะการกระจายของแรงดันจะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเฮิร์ท
2. ค่าความเร็วในการหมุนของทรงกระบอกก็จะมีผลต่อขนาดของแรงดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น เมื่อค่าความเร็วลดลงก็จะทำให้ความหนาฟิล์มบางลงและความดันเพิ่มขึ้นและลักษณะการกระจายของแรงดันจะคล้ายกับของการสัมผัสแบบเฮิร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในการคำนวณทางเชิงตัวเลขจะเข้าสู่คำตอบซ้ำหากขนาดของไหลลัดที่กระทำสูงและค่าความเร็วต่ำ  
**สัญลักษณ์**

$E'$	ค่ายังโมดูลัส, $Pa.(N/m^2)$
$G$	ตัวแปรไร้หน่วยของวัสดุ, $\zeta E'$
$H_{r,o}$	ค่าคงที่ของความหนาฟิล์มแบบไร้หน่วยสำหรับการสัมผัสแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
$\bar{K}$	ค่าคงที่, $3\pi^2 U / 4(W')^2$
$P_{r,i}$	ค่าแรงดันแบบไร้หน่วย
$P_H$	ค่าแรงดันสูงสุดของเฮอร์เซียน $Pa.(N/m^2)$
$R_H$	ค่ารัศมีที่สัมผัส ในทิศทางแกน X, m.
$U$	ค่าความเร็วของการสัมผัสแบบไร้หน่วย, $\eta_0 \bar{u} / (E' R_x)$
$\bar{u}$	ค่าความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน X, $(u_a + u_b) / 2, m/s$ .
$W'$	ค่าไหลลัดที่กระทำแบบไร้หน่วยสำหรับการสัมผัสแบบเส้น, $w_z / E' R_x$
$w_z$	ค่าไหลลัดที่กระทำในแนวตั้งจากต่อหน่วยความกว้าง, $N/m$ .
$X_R$	ค่าแนวแกน X แบบไร้หน่วยของการสัมผัสแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
$z_1$	ค่าดัชนีของความหนืด - แรงดัน เป็นค่าคงที่ของตัวแปรไร้หน่วย
$\zeta$	ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด - แรงดัน, $m^2 / N$
$\rho_m$	ค่าความหนาแน่น เมื่อ $dP / dX = 0, N.s^2 / m^4$
$H_m$	ค่าความหนาฟิล์มแบบไร้หน่วย สำหรับการสัมผัสแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อ $dP / dX = 0$
$\rho_0$	ค่าความหนาแน่น เมื่อ $P = 0, N.s^2 / m^4$
$\bar{\rho}$	ความหนาแน่นแบบไร้หน่วย $\rho / \rho_0$
$\eta_0$	ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ที่ $P = 0$ และ ค่าอุณหภูมิคงที่ $Pa.s$ (or $N.s / m^2$ )
$\Delta X$	ค่าช่วงความยาวที่แบ่งแนวแกน X

**เอกสารอ้างอิง (Reference)**

- Bernard J. Hamrock, Fundamentals of fluid film lubrication, 1994
- H. Okamura, A Contribution to the Numerical Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication", Tribology of Reciprocating Engines. D.Dowson et al. (eds) Butterworths, Guilford, England, pp 313-320, 1982
- Dawson, D., and Higison, G.R., Elastohydrodynamic Lubrication, The Fundament of Roller and Gear Lubrication. Pergamon Oxfor, 1996
- Bernard J. Hamrock and Jacobson, B.O. Elastohydrodynamic Lubrication of Line Contacts. ASLE Trans., vol. 24, no.4, pp.275-287.1984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายสุทธินันท์ ศรีรัตวาทย์
วัน เดือน ปีเกิด	20 พฤษภาคม 2520
สถานที่อยู่	บ้านเลขที่ 26 หมู่ 1 ต.น้ำหมัน อ.ท่าปลา จ.อุตรดิตถ์ 53150
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2543-2544	ตำแหน่ง วิศวกรเครื่องกล บริษัทเอเชียมอเตอร์ เซอร์วิส เซนเตอร์ จำกัด
พ.ศ. 2544-2545	ตำแหน่ง ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายซ่อมบำรุง บริษัทเครื่องจักรกลการเกษตรไทย จำกัด
ปัจจุบัน	ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย ReCCIT สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ตำแหน่ง ที่ปรึกษาฝ่ายวิศวกร บริษัท เค ที เอส ซี จำกัด
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	
2547	พฤติกรรมแบบสติกซ์ของการหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรได นามิกส์ของการสัมผัสแบบเส้น (งานประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18)
2547	การหล่อขึ้นแบบอิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ของวัตถุ ทรงกระบอกที่สัมผัสเป็นแบบเส้น (งานประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้