

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การศึกษาพฤติกรรมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของผิวชิ้นงานสองผิว  
ที่สัมผัสภายใต้แรงกดเป็นเส้นด้วยของไหลชนิดนิวโตเนียน  
ELASTOHYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF TWO SURFACES  
UNDER LINE CONTACT WITH NEWTONIAN FLUIDS

นายกุลภพ โพธิ์หอมศิริ  
นายปรัชญ์ เดชรักษา

วันที่  
10/2/59  
2549

เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... **62338** ..  
วัน,เดือน,ปี..... 16 ส.ค. 2549 ..

→ 101 / 1291  
.b.....  
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของผิวชิ้นงานสองผิว  
ที่สัมผัสภายใต้แรงกดเป็นเส้นด้วยของไหลชนิดนิวโตเนียน  
ELASTOHYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF TWO SURFACES  
UNDER LINE CONTACT WITH NEWTONIAN FLUIDS



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของผิวชิ้นงานสองผิวที่สัมผัสภายใต้แรงกดเป็นเส้น  
ตัวของไหลชนิดนิวโตเนียน

ELASTOHYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF TWO SURFACES UNDER  
LINE CONTACT WITH NEWTONIAN FLUIDS

ผู้จัดทำ

1. นายกุลภพ โพธิ์หอมศิริ รหัสประจำตัว 45010057
2. นายปรัชญ์ เศรษฐรักษา รหัสประจำตัว 45010444

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของผิวชิ้นงานสองผิวที่สัมผัส  
ภายใต้แรงกดเป็นเส้นด้ายของไหลชนิดนิวโตเนียน

นายกุลภพ โพธิ์หอมศิริ 45010057  
นายปรัชญ์ เศษรักษา 45010444  
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2548

**บทคัดย่อ**

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาทฤษฎีของผิวชิ้นงานสองผิวสัมผัสเป็นเส้นหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก สมการเรย์โนลด์และสมการอีลาสติคถูกใช้ในการคำนวณของไหลที่ยุบตัวไม่ได้และของไหลที่ยุบตัวได้ โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน วิธีผลต่างสืบเนื่อง การอินทิเกรต โดยใช้กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สัน กฎสี่เหลี่ยมคางหมู และการแก้สมการเชิงเส้นโดยระเบียบวิธีกำจัดแบบเกาส์ ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ เช่น ความดัน ความหนาฟิล์ม อัตราการไหล จำนวนรอบ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นต้น โดยประมวลผลด้วยโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน ทำการวิเคราะห์ผลของภาวะ ความเร็วบนฟิล์ม น้ำมัน ความหนาฟิล์ม สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราส่วนการไหล แรงเสียดทาน และ อัตราการไหลภายใต้การหล่อลื่นสัมผัสเป็นเส้นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Elastohydrodynamic Characteristics of Two Surfaces under Line Contact with Newtonian Fluids

Kullaphop Phohomsiri

Prach Dejraksa

Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongroj Advisor

### ABSTRACT

This project presents the theoretical characteristics in elastohydrodynamic lubrication of two surfaces in line contact. Reynold's equation and elastic equation are formulated for incompressible and compressible fluids. Finite difference methods, Simpson's 1/3 rule, Newton-Raphson, and Gauss elimination were implemented to calculate the dependent variables such as pressure profile, film thickness profile, flow rate, cycle, and friction coefficient. Computer program was developed using FORTRAN language to calculate the static characteristics of two surfaces in line contact under elastohydrodynamic lubrication. The simulation results show the significant effect of loads, velocities on oil film pressure, film thickness, friction coefficient, slip ratio, shear force and fluid flow rate under elastohydrodynamic lubrication in line contact.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่ล่องลอยสำเร็จไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้คำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และความเข้าใจในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณพุทธา จินครวั และคุณชนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว ห้อง Electro-Mechanical โครงการ สำนักวิจัยเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ให้คำปรึกษาทางด้านโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้ความเอื้อเฟื้อห้องคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลการคำนวณ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักยังคงตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าด้วยใจจริง

กมลภ โพธิ์หอมศิริ  
ปรัชญ์ เดชรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 สารหล่อลื่น	3
2.1 น้ำมันหล่อลื่น	3
2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น	8
2.3 ชนิดของการหล่อลื่น	9
บทที่ 3 ทฤษฎี	11
3.1 คำนิยามของการไหล	11
3.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการจำลอง	13
3.3 การสัมผัสแบบเส้น	13
3.4 สมการเรย์โนลด์	14
3.5 สมการความหนาฟิล์ม	20
3.6 สมการความหนาแน่น	25
3.7 สมการความหนืด	26
3.8 สมการภาวะสมดุล	26
3.9 สมการแรงเสียดทาน	26
3.10 สมการการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารในของไหล	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 4 วิธีเชิงตัวเลข	29
4.1 วิธีผลต่างสี่บเนื้อง	29
4.2 วิธีนิวตัน-ราฟสัน	30
4.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎของซิมป์สันเศษหนึ่งส่วนสาม	30
4.4 ระเบียบวิธีกำจัดแบบเกาส์	31
4.5 การเขียน โปรแกรมเพื่อแก้สมการ	32
บทที่ 5 ผลการคำนวณ	33
5.1 ความเร็วเปลี่ยนแปลง	34
5.2 ภาวะเปลี่ยนแปลง	50
5.3 ค่าอีลาสติกโมดูลัสเปลี่ยนแปลง	66
5.4 ผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	82
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	101
6.1 สรุปผลการคำนวณ	101
6.2 ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารอ้างอิง	102
ภาคผนวก	103
ภาคผนวกแสดงแผนผังการคำนวณของโปรแกรม	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ค่าที่ใช้ในการหาดัชนีความหนัก	7
ตารางที่ 2-2 ค่าสัมประสิทธิ์เสียคทานโดยเฉลี่ย	10
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติสารหล่อลื่น	13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่	
รูปที่ 2-1	ชนิดของการหล่อลื่น	9
รูปที่ 3-1	การเปลี่ยนรูปของอนุภาคของไหล	11
รูปที่ 3-2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน	12
รูปที่ 3-3	แสดงรูปทรงกระบอกสัมผัสแบบไม่เสียดรูป	14
รูปที่ 3-4	แสดงรูปร่างทางเรขาคณิตของฟิล์มน้ำมัน	20
รูปที่ 3-5	แสดงพิกัดเชิงขั้วที่ใช้สำหรับภาวะแบบเส้น $w'_z$ ที่กระทำบนแกน $z$ ในระนาบ $x = 0$	21
รูปที่ 4-1	แสดงขนาดความกว้างระหว่างโหนด	29
รูปที่ 4-2	แสดงการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยกฎของซิมป์สัน 1/3	30
รูปที่ 5-1	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	34
รูปที่ 5-2	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	34
รูปที่ 5-3	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	35
รูปที่ 5-4	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	35
รูปที่ 5-5	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	36
รูปที่ 5-6	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	36
รูปที่ 5-7	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	37
รูปที่ 5-8	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	37
รูปที่ 5-9	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	38
รูปที่ 5-10	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	38
รูปที่ 5-11	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	39
รูปที่ 5-12	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	39
รูปที่ 5-13	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	40
รูปที่ 5-14	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	40
รูปที่ 5-15	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	41
รูปที่ 5-16	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	41
รูปที่ 5-17	กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	42
รูปที่ 5-18	กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 5-19	กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	43
รูปที่ 5-20	กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	43
รูปที่ 5-21	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	44
รูปที่ 5-22	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	44
รูปที่ 5-23	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	45
รูปที่ 5-24	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	45
รูปที่ 5-25	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	46
รูปที่ 5-26	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	46
รูปที่ 5-27	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	47
รูปที่ 5-28	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	47
รูปที่ 5-29	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	48
รูปที่ 5-30	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	48
รูปที่ 5-31	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	49
รูปที่ 5-32	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	49
รูปที่ 5-33	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	50
รูปที่ 5-34	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	50
รูปที่ 5-35	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	51
รูปที่ 5-36	กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	51
รูปที่ 5-37	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	52
รูปที่ 5-38	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	52
รูปที่ 5-39	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	53
รูปที่ 5-40	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	53
รูปที่ 5-41	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	54
รูปที่ 5-42	กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	54
รูปที่ 5-43	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	55
รูปที่ 5-44	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	55
รูปที่ 5-45	กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5-46 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	56
รูปที่ 5-47 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	57
รูปที่ 5-48 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	57
รูปที่ 5-49 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	58
รูปที่ 5-50 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	58
รูปที่ 5-51 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	59
รูปที่ 5-52 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	59
รูปที่ 5-53 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	60
รูปที่ 5-54 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	60
รูปที่ 5-55 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	61
รูปที่ 5-56 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	61
รูปที่ 5-57 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	62
รูปที่ 5-58 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	62
รูปที่ 5-59 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 50 million cycles	63
รูปที่ 5-60 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 100 million cycles	63
รูปที่ 5-61 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 200 million cycles	64
รูปที่ 5-62 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 300 million cycles	64
รูปที่ 5-63 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 400 million cycles	65
รูปที่ 5-64 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $U=1 \times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$ ที่ 500 million cycles	65
รูปที่ 5-65 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 50 million cycles	66
รูปที่ 5-66 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 100 million cycles	66
รูปที่ 5-67 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 200 million cycles	67
รูปที่ 5-68 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 300 million cycles	67
รูปที่ 5-69 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 50 million cycles	68
รูปที่ 5-70 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 100 million cycles	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5-71 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 200 million cycles	69
รูปที่ 5-72 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 300 million cycles	69
รูปที่ 5-73 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 400 million cycles	70
รูปที่ 5-74 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 500 million cycles	70
รูปที่ 5-75 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 50 million cycles	71
รูปที่ 5-76 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 100 million cycles	71
รูปที่ 5-77 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 200 million cycles	72
รูปที่ 5-78 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 300 million cycles	72
รูปที่ 5-79 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 400 million cycles	73
รูปที่ 5-80 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 500 million cycles	73
รูปที่ 5-81 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 50 million cycles	74
รูปที่ 5-82 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 100 million cycles	74
รูปที่ 5-83 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 200 million cycles	75
รูปที่ 5-84 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ $W=3 \times 10^{-5}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 300 million cycles	75
รูปที่ 5-85 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 50 million cycles	76
รูปที่ 5-86 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 100 million cycles	76
รูปที่ 5-87 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 200 million cycles	77
รูปที่ 5-88 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 300 million cycles	77
รูปที่ 5-89 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 400 million cycles	78
รูปที่ 5-90 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 500 million cycles	78
รูปที่ 5-91 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 50 million cycles	79
รูปที่ 5-92 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 100 million cycles	79
รูปที่ 5-93 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 200 million cycles	80
รูปที่ 5-94 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 300 million cycles	80
รูปที่ 5-95 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3 \times 10^{-4}$ , $U=1 \times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 400 million cycles	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้าที่	
รูปที่ 5-96	กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $S=1$ ที่ 500 million cycles	81
รูปที่ 5-97	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	82
รูปที่ 5-98	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=3\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	82
รูปที่ 5-99	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=5\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	83
รูปที่ 5-100	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	83
รูปที่ 5-101	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=3\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	84
รูปที่ 5-102	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=5\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	84
รูปที่ 5-103	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	85
รูปที่ 5-104	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=3\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	85
รูปที่ 5-105	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=5\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	86
รูปที่ 5-106	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=8\times 10^{-6}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	86
รูปที่ 5-107	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	87
รูปที่ 5-108	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=8\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	87
รูปที่ 5-109	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ $W=1\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	88
รูปที่ 5-110	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	88
รูปที่ 5-111	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ $W=4\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	89
รูปที่ 5-112	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ $W=1\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	89
รูปที่ 5-113	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	90
รูปที่ 5-114	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ $W=4\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	90
รูปที่ 5-115	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=180$ GPa, $S=1$	91
รูปที่ 5-116	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 5-117	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=220$ GPa, $S=1$	92
รูปที่ 5-118	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=180$ GPa, $S=1$	92
รูปที่ 5-119	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	93
รูปที่ 5-120	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=220$ GPa, $S=1$	93
รูปที่ 5-121	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=180$ GPa, $S=1$	94
รูปที่ 5-122	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	94
รูปที่ 5-123	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=220$ GPa, $S=1$	95
รูปที่ 5-124	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	95
รูปที่ 5-125	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=2$	96
รูปที่ 5-126	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ $W=3\times 10^{-5}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=3$	96
รูปที่ 5-127	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	97
รูปที่ 5-128	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=2$	97
รูปที่ 5-129	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 40 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=3$	98
รูปที่ 5-130	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=1$	98
รูปที่ 5-131	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=2$	99
รูปที่ 5-132	กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน SAE 90 เมื่อ $W=3\times 10^{-4}$ , $U=1\times 10^{-11}$ , $E=200$ GPa, $S=3$	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$R$	รัศมีของลูกกลิ้ง
$R_u$	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
$\tilde{A}$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$\tilde{B}$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$\tilde{C}$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$\tilde{D}$	ค่าคงที่จากการอินทิเกรต
$E$	โมดูลัสความยืดหยุ่นของผิว
$h$	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งใดๆ (m)
$h_m$	ความหนาฟิล์มที่ซึ่ง $dp/dx = 0$ (m)
$H$	ความหนาฟิล์มไร้มิติ $H = \frac{\pi}{8Rw'} h$
$H_0$	ความหนาฟิล์มต่ำสุด
$\bar{H}$	ความหนืดเฉย้โบลต์ซากล ของน้ำหนักรมาตรฐานที่ $VI = 100$
$K$	ค่าคงที่ในสมการเรย์โนลด์ $K = \frac{\pi^2 U}{16(W')^2}$
$K$	ค่าความนำความร้อน ( $Btuin./hft^2 F$ )
$\bar{L}$	ความหนืดเฉย้โบลต์ซากล ของน้ำหนักรมาตรฐานที่ $VI = 0$
$N$	จำนวนกริดที่แบ่งในการคำนวณ
$p$	ความดัน (Pa)
$P$	ความดันไร้มิติ $P = \frac{p}{P_H}$
$P_H$	ความดันสูงสุดในการสัมผัสของ Hertz (Pa) $P_H = E' \left( \frac{W'}{2\pi} \right)^{0.5}$
$R$	รัศมีของลูกกลิ้ง
$R_u$	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
$S$	อัตราส่วนการลื่นไถล $S = 2 \left( \frac{u_2 - u_1}{u_2 + u_1} \right)$
$u$	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน x (m/s)
$u_1$	ความเร็วของลูกกลิ้ง (m)
$u_2$	ความเร็วของแผ่นเรียบ (m)
$\bar{u}$	ความเร็วเฉลี่ยของลูกกลิ้งกับแผ่นเรียบ $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$ (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$U$	พารามิเตอร์ความเร็วไร้มิติ $U = \frac{\mu_0 \bar{\mu}}{E'R}$
$v$	ความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวแกน $y$ (m/s)
$VI$	ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)
$w$	น้ำหนักที่กระทำกับลูกกลิ้ง (N/m)
$W$	น้ำหนักที่กระทำกับลูกกลิ้งไร้มิติ $W = \frac{w}{ER}$
$x$	โคออร์ดิเนต $x$ (m)
$x_m$	ค่าของโคออร์ดิเนต $x$
$\bar{x}$	ความหนืดเซย์โบล์สากล ของน้ำหนักที่ต้องการหาค่า $VI$
$X$	โคออร์ดิเนต $x$ ไร้มิติ
$X_m$	โคออร์ดิเนต $x$ ไร้มิติที่ $\frac{dp}{dx} = 0$
$y$	โคออร์ดิเนต $y$
$Y$	โคออร์ดิเนต $y$ ไร้มิติ $Y = \frac{y}{h}$
$z$	โคออร์ดิเนต $z$
$z$	ค่าความสูงของผิวหยาบที่จุดอ้างอิง
$Z$	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
$\rho_m$	ความหนาแน่นที่ $\frac{dp}{dx} = 0$ ( $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\gamma$	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความหนืด-อุณหภูมิ ( $1/K$ )
$\psi$	ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของความหนาแน่นของการกระจายความสูง
$\bar{\sigma}$	ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$k$	ค่าแสดงสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด
$N'$	จำนวนรอบ
$\mu_r$	ค่าความหนืดที่อ้างอิง
$\mu_o$	ความหนืดที่จำนวนรอบนั้นๆ
$w'_{az}$	ภาวะที่กระทำต่อแผ่นเรียบ
$w'_{bz}$	ภาวะที่กระทำต่อลูกกลิ้ง
$W'_{az}$	ภาวะไร้มิติที่กระทำต่อแผ่นเรียบ
$W'_{bz}$	ภาวะไร้มิติที่กระทำต่อลูกกลิ้ง
$f'_a$	แรงเค้นเฉือนต่อความยาวด้านกว้างที่กระทำต่อแผ่นเรียบ
$f'_b$	แรงเค้นเฉือนต่อความยาวด้านกว้างที่กระทำต่อลูกกลิ้ง
$F'_a$	แรงเค้นเฉือน ไร้มิติต่อความยาวด้านกว้างที่กระทำต่อแผ่นเรียบ
$F'_b$	แรงเค้นเฉือน ไร้มิติต่อความยาวด้านกว้างที่กระทำต่อลูกกลิ้ง
$\tilde{\sigma}_x$	ระนาบ $x$ ส่วนของความเครียดที่กระทำต่อของแข็ง
$\tilde{\sigma}_y$	ระนาบ $y$ ส่วนของความเครียดที่กระทำต่อของแข็ง
$\tilde{\sigma}_z$	ระนาบ $z$ ส่วนของความเครียดที่กระทำต่อของแข็ง
$U$	อัตราส่วนปัวซอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีไม่ว่าจะเป็นรถยนต์หรือเครื่องจักรสมัยใหม่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรจะทำงานที่ความเร็วสูง รับภาระมาก และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในการออกแบบเครื่องจักรเหล่านี้จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานที่ฟิสิกส์เพื่อเกิดความเสียดทานต่ำสุด สารหล่อลื่นถูกใช้ในเครื่องจักรเพื่อลดการสึกหรอในอุปกรณ์ เช่น กระจกสูบ เพลาลูกเบี้ยว เพลาข้อเหวี่ยง เป็นต้น การพัฒนาการหล่อลื่นให้กับเครื่องจักรก็เป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญในการที่จะช่วยประเทศประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรได้มาก ซึ่งหากเครื่องจักรมีการหล่อลื่นที่ดีก็จะส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมีการสึกหรอลดลง อีกทั้งช่วยลดการเสียดสีในเครื่องจักรลง ทำให้เครื่องจักรใช้พลังงานน้อยลง

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อหาพฤติกรรมของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด แบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของสองผิวที่มีการสัมผัสเป็นแบบเส้น โดยใช้ของไหล 3 ชนิด ได้แก่ SAE 40 SAE 90 และ Advance Ester โดยจะทำการเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่ ภาระที่กระทำ ค่าอีลาสติกโมดูลัสของผิวจำนวนรอบการใช้งาน อัตราส่วนของการลื่นไถล เพื่อที่จะนำมาศึกษาผลที่มีต่อแรงดัน ความหนาฟิล์มและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

### 1.2 บททความวิจัยที่ผ่านมา

ในปี ค.ศ. 1786 Reynolds ได้เขียนสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการไหลและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นและแรงดันของไหลและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น โดยสารหล่อลื่นเป็นแบบนิวโตเนียนเพื่อใช้จำลองการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก และต่อมาในปี ค.ศ. 1896 Hertz ได้ประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเข้ากับสมการเรย์โนลด์ ทำให้งานวิจัยทางด้านอีลาสโตไฮโดรไดนามิกมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก

ต่อมาในปี ค.ศ. 1896 Hertz ได้ทำการพิจารณาความเค้นและการเสียดรูปของรูปทรงวงรีสองอันสัมผัสกัน โดยทั้งสองมีผิวเรียบ โดยประยุกต์ทฤษฎีความยืดหยุ่นเพื่อกำหนดรูปแบบของปัญหาสำหรับการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แบริ่งทรงกลม แบริ่งลูกกลิ้ง เฟืองและลูกเบี้ยว และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสมการเรย์โนลด์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่นในจุดที่มีการสัมผัสกันของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในปี ค.ศ. 1893 Barus ได้แนะนำสูตรสำหรับการหาความหนืดของของไหลที่ขึ้นอยู่กับความดันและในปี ค.ศ. 1966 Roelands ได้ทำการทดลองและพัฒนาสมการที่ใช้ในการหาความหนืดของของไหลที่ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ และในปีเดียวกัน Dowson และ Higginson ได้ทำการศึกษาหาความหนาแน่นของของไหลที่ความดันสูงและได้แนะนำสมการที่ใช้ในการหาความหนาแน่นของของไหลที่ระดับความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาสมการเรย์โนลด์ และสมการทางอีลาสโตไฮโดรไดนามิก เพื่อหาพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่สัมผัสแบบเป็นเส้น โดยพิจารณาถึงความดัน ความหนาฟิล์ม และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำ ความเร็ว จำนวนรอบการใช้งาน อัตราการลื่นไถล และค่าอีลาสติกโมดูลัสของพื้นผิว
2. ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาของสมการ
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน

### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

พัฒนาโปรแกรม สร้างแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทำการศึกษาของผิวชิ้นงานสองผิวสัมผัสเป็นเส้นหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของของไหลนิวโตเนียน ของไหลที่บีบอัดตัวไม่ได้ และของไหลที่บีบอัดตัวได้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคณสมบัติของของไหล 3 ชนิด ได้แก่ Advance Ester SAE 40 และ SAE 90 ซึ่งคาดว่าจะมีประโยชน์คือช่วยในการศึกษาพฤติกรรมทางสถิติ ช่วยให้เป็นแนวทางเลือกสารหล่อลื่นในการหล่อลื่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น (Lubrication) เป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลวและก๊าซ แต่สารหล่อลื่นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี เป็นต้น

#### 2.1 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดี และเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์ และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปโดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่างๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่น

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่ในแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมันแร่มาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีพอและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้คือ

2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้งานหลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะที่ใช้งานเมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมาก ความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้เฉพาะในงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้นและความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของน้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่งและ น้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมูและน้ำมันปลา เป็นต้น

2.1.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกถัน ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซ แก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่ในพวกน้ำมันเตา ไขและยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวเติมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกถันบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศแยกเอาน้ำมันหล่อลื่น

ชนิดใสและชนิดขุ่นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตขางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินิกมักจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้ สูญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนดีพอ

น้ำมันพื้นฐานหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมนั้นสามารถแยกคุณสมบัติได้ 3 พื้นฐานซึ่งขึ้นอยู่กับฐานของน้ำมันปิโตรเลียมที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานดังนี้

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานพาราฟินิก (Paraffinic Base Oil) น้ำมันดิบพาราฟินิกเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

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

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานแนพธินิค (Naphthenic Base Oil) น้ำมันดิบฐานแนพธินิคเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจุดวาบไฟต่ำ
- มีการระเหยตัวต่ำ
- รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอสมควร
- มีจุดไหลเทต่ำ
- มีความถ่วงจำเพาะสูงและรวมตัวกันได้ดี
- มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ
- มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อเผาไหม้จะให้เขม่าที่อ่อนตัว
- การขีดเกาะ โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนดีเป็นบางส่วน
- มีความต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

### 3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบอะโรมาติก (Aromatic Base Oil) คุณสมบัติดังนี้

- มีค่าดัชนีความข้นใตต่ำ
- มีจุดไหลเทต่ำมาก
- ไม่มีไข
- คุณสมบัติทางการหล่อลื่นไม่ดี
- โครงสร้างการจับตัวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร
- คุณสมบัติในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ
- ไม่รักษาคุณสมบัติทางเคมีให้แน่นอน
- มีความต้งจำเพาะสูง

4. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมาอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้คือ

- พวกโพลีแอลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin; PAO) เป็นสารที่มีดัชนีความหนืดสูงมากมีจุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดี ปัจจุบันเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นเพราะราคาถูก และสามารถผลิตได้ง่าย

- พวกเอสเทอร์ (Ester) ไดเอสเทอร์ (Diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (Complex Ester) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้เป็นน้ำมันพื้นฐานในงานที่ต้องทำงานกับสถานะที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงมากๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ของเครื่องบิน ไอพ่น นอกจากนี้พวก ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate Ester) ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

- พวกโพลีไกลคอล (Polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก และน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ เป็นต้น

- พวกซิลิโคน (Silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ

- พวกฮาโลเนตไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน

(Chlorofluorocarbons) หรือสารซีเอฟซี (CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจนเพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความอยู่ตัวเชิงความร้อนดีมาก

- พวกลโพลิฟีนิลอีเทอร์ (Polyphenyl Ether) เป็นสารที่ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงมากถึง 800 องศาเซลเซียส เช่น น้ำมันไฮดรอลิกในยานอวกาศ เนื่องจากมีความอยู่ตัวเชิงความร้อนสูงมากและมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์ได้ด้วย

2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างในตัวเองอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ได้แก่

2.1.2.1 ความหนืด หมายถึงความใสและความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลง่าย แต่เมื่อหล่อลื่นก็จะบางมากด้วย สำหรับน้ำมันที่มีความหนืดสูงยอมไหลยาก แต่จะมีฟิล์มน้ำมันหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ หน่วยวัดความหนืดมีอยู่ด้วยกันหลายระบบแต่ที่นิยมใช้คือเซนติสโตกส์ (Centistokes, cSt)

2.1.2.2 ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงอัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก สำหรับน้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

2.1.2.3 จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วจุดความเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

2.1.2.4 จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำที่สุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรบกวน สำหรับในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นจะต้องเลือกใช้ใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

2.1.2.5 ดัชนีความหนืด (Viscosity Index, VI)ตามธรรมดาแล้วน้ำมันจะมีความหนืดสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำและจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงโดยน้ำมันแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดเพื่อเป็นการกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยถ้าค่าดัชนีความหนืดมีค่าสูงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่ถ้าค่าดัชนีความหนืดต่ำอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $\bar{L}$  คือความหนืดเซย์โบลท์สากล(Saybolt Universal Viscosity, SUV) ของน้ำมันมาตรฐานที่มีค่า  $VI = 0$

$\bar{H}$  คือ ความหนืดเซย์โบลท์สากลของน้ำมันมาตรฐาน ที่มีค่า  $VI = 100$

$\bar{x}$  คือ ความหนืดเซย์โบลท์สากลของน้ำมันที่ต้องการหาค่า  $VI$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUV at 100°C $\bar{x}$	SUV at 38°C		SUV at 100°C $\bar{x}$	SUV at 38°C		SUV at 100°C $\bar{x}$	SUV at 38°C	
	H	L		H	L		H	L
40	93	107	-	-	-	-	-	-
41	109	137	61	443	819	81	810	1674
42	124	167	62	461	857	82	829	1721
43	140	197	63	478	897	83	849	1769
44	157	228	64	496	936	84	868	1817
45	173	261	65	514	976	85	888	1865
46	189	291	66	532	1016	86	907	1914
47	205	325	67	550	1057	87	927	1964
48	222	356	68	568	1098	88	947	2014
49	238	389	69	586	1140	89	966	2064
50	255	422	70	604	1182	90	986	2115
51	272	456	71	623	1225	91	1006	2166
52	288	491	72	641	1268	92	1026	2217
53	308	525	73	660	1311	93	1046	2270
54	322	561	74	678	1355	94	1066	2322
55	339	596	75	697	1399	95	1087	2375
56	356	632	76	716	1444	96	1107	2428
57	374	669	77	734	1489	97	1128	2481
58	391	706	78	753	1534	98	1148	2536
59	408	743	79	772	1580	99	1168	2591
60	426	481	80	791	1627	100	1189	2546

ตารางที่ 2-1 ค่าที่ใช้ในการหาดัชนีความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

1. ช่วยหล่อลื่นฟิล์มหรือเยื่อต่างๆ ของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มน้ำมัน ให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ก็จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2. ช่วยระบายความร้อน คุณสมบัติข้อนี้เป็นสิ่งสำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และระบายความร้อนอื่น เนื่องจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ระบบเกียร์ หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

3. ช่วยรักษาความสะอาดขณะทำงานที่หล่อลื่นก็จะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วยก็จะต้องสามารถล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆ จากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4. ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้ เช่น ก๊าซ ไอเสีย ละอองน้ำ หรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลงและไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5. ช่วยกระจายความสกปรก น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายความสกปรกต่างๆ ที่มีปนในน้ำมันหล่อลื่นอื่นเนื่องจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อให้สิ่งสกปรกต่างๆ เหล่านี้รวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นอนุภาคเหนียว

6. มีสารป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Antioxidant) สารนี้จะช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเครื่องกับออกซิเจนในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันเครื่องจะทำปฏิกิริยาดังกล่าวได้ง่ายและจะทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อเครื่องยนต์

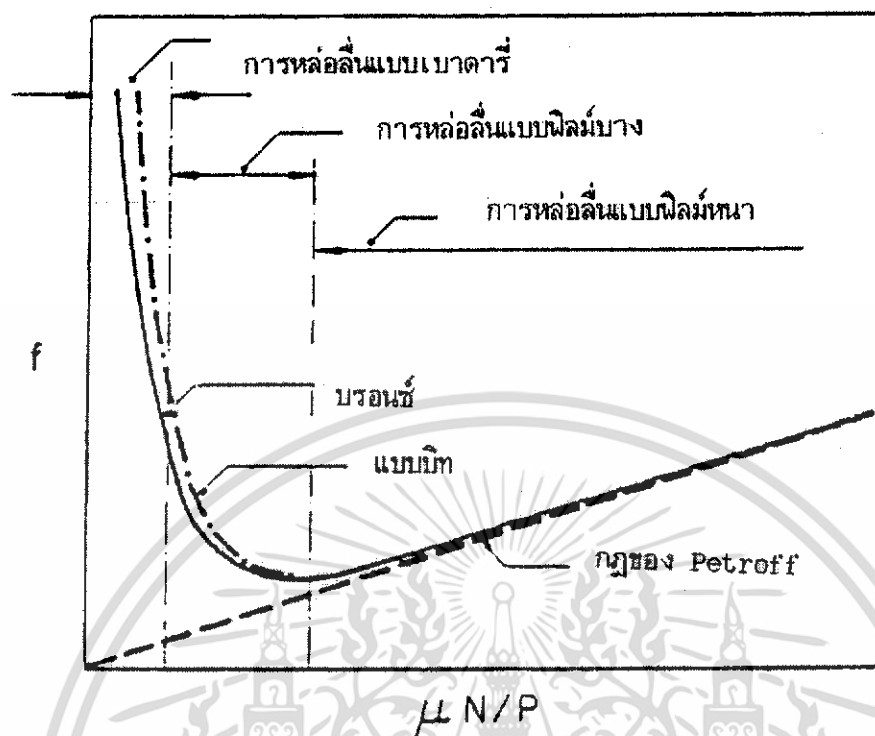
7. มีสารป้องกันการสึกหรอ สารนี้จะช่วยให้ฟิล์มของน้ำมันคงทนต่อแรงเฉือนได้ดี

8. มีสารป้องกันการเกิดฟอง การเกิดฟองน้ำมันเครื่องภายในห้องเพลาค้อเหวี่ยงจะเกิดขึ้นมาเนื่องจากความเร็วสูงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบการหล่อลื่นลดลง สารป้องกันการเกิดฟองจะช่วยทำให้ฟองอากาศละลายตัวได้ง่าย

9. มีสารป้องกันสนิม สารนี้จะช่วยให้น้ำมันเครื่องเป็นตัวเคลือบไม่ให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ทำด้วยเหล็กเป็นสนิมขณะที่เครื่องยนต์หยุดทำงานเป็นเวลานานๆ

10. มีการระเหยตัวต่ำ (Low Volatility) น้ำมันเครื่องที่ดีจะต้องมีจุดวาบไฟสูง ทำให้เกิดการระเหยตัวต่ำและทนต่อความร้อนสูงๆ ได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองน้ำมันเครื่องขณะเครื่องยนต์ทำงาน

11. มีจุดไหลเทต่ำ (Low Pour Point) เพื่อที่จะนำน้ำมันเครื่องไปใช้งานในที่ที่อุณหภูมิต่ำได้



รูปที่ 2-1 ชนิดของการหล่อลื่น

### 2.3 ชนิดของการหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับฟิล์มและสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสถานะการทำงาน จากรูปที่ 2-1 สำหรับกาบรองดินเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน  $f$  และค่า  $\frac{\mu N}{P}$  โดยที่  $\mu$  คือค่าความหนืดของสารหล่อลื่น  $N$  คือความเร็วรอบของเพลลา และ  $P$  คือภาระที่กาบรองดินรับต่อพื้นที่ภาพฉายเรียกภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าที่ค่า  $\frac{\mu N}{P}$  สูงๆ กาบรองดินจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $\frac{\mu N}{P}$  และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า  $\frac{\mu N}{P}$  ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ ถ้าลดค่า  $\frac{\mu N}{P}$  ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นในลักษณะนี้เรียกหล่อลื่นแบบฟิล์มบางและถ้าลดค่า  $\frac{\mu N}{P}$  ให้ต่ำลงไปอีก จากรูปพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าฟิล์มและสารหล่อลื่นบางส่วนจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำลายไป ซึ่งเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบาควารี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของสารหล่อลื่นแบบต่าง ๆ ได้แสดงในตารางที่ 2-2

ชนิดของการหล่อลื่น	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น(ผิวแห้ง)	1.0 - 2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบาควารีหรือแบบฟิล์มบาง	0.05 - 0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

ตารางที่ 2-2 ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานโดยเฉลี่ย

การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวชิ้นงานหนาขณะที่ยังงานเคลื่อนไถลดูกัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของผิวโลหะชิ้นงาน และไม่เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงเป็นชนิดการหล่อลื่นที่ต้องการของผู้ออกแบบเครื่องจักรโดยทั่วไป

การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มบาง ๆ คั่นระหว่างผิวของชิ้นงาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวชิ้นงาน และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น จากรูปที่ 2-1 จะเห็นว่า การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเมื่อค่า  $\frac{\mu N}{P}$  มีค่าต่ำลงฟิล์มสารหล่อลื่นจะบางลง จนกระทั่งยอดขรุขระของผิวชิ้นงานจะแตะสัมผัสกันแล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวชิ้นงาน คุณสมบัติของโลหะชิ้นงานและคุณสมบัติของการสารหล่อลื่นที่ใช้ด้วย การหล่อลื่นแบบเบาควารีในการหล่อลื่นแบบนี้จะพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก ฟิล์มหนาดังแต่  $10^{-4}$  เซนติเมตรถึงความหนาของฟิล์มของสารหล่อลื่นเท่ากับความหนาของโมเลกุลของสารหล่อลื่นเท่านั้น ถ้าชิ้นงานทำงานที่ความเร็วต่ำเกิดการระเหยขึ้น ก็จะทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นบางกว่าความสูงของยอดขรุขระที่ผิวชิ้นงาน และถ้าผิวขรุขระนี้มีสารหล่อลื่นจับเป็นชั้นของโมเลกุล สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีคือ โมเลกุลของสารหล่อลื่นสามารถจับตัวเป็นลูกโซ่ยาว ซึ่งได้แก่ ไชครอน้ำมัน เมื่อใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าการหล่อลื่นแบบนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 เท่านั้น

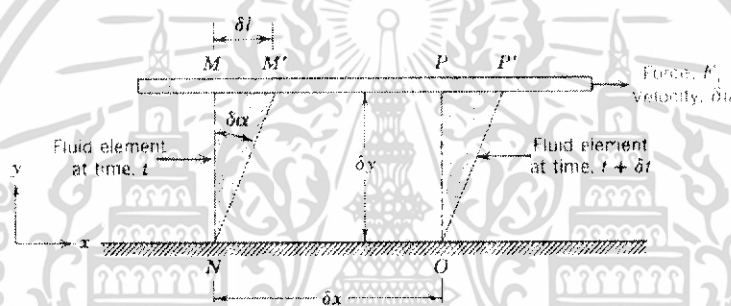
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### 3.1 คำนิยามของการไหล

ของไหลคือสารที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องกันไป ภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนหนึ่งๆ ทั้งนี้ไม่ว่าความเค้นเฉือนนั้นจะมีค่าน้อยเท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นผิวหนึ่งๆ ก็คือแรงย่อยในแนวสัมผัสกับพื้น แรงเฉือนนี้หารด้วยพื้นที่ของพื้นผิวจะเป็นความเค้นเฉือนเฉลี่ยซึ่งกระทำทั่วพื้นผิวนั้น สำหรับความเค้นเฉือนที่จุดหนึ่งๆคือค่าลิมิต (Limiting Value) ของแรงเฉือนต่อพื้นที่ผิว ซึ่งขณะนั้นพื้นที่มีขนาดลดลงเป็นจุด



รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนรูปของอนุภาคของไหล

จากรูปที่ 3-1 ของไหลอยู่ระหว่างแผ่นเรียบคู่ขนานซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อย ( $Y$ ) โดยแผ่นล่างอยู่กับที่และแผ่นบนเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉือน  $F$  พบว่าของไหลในบริเวณระหว่างแผ่นเรียบคู่นี้ถูกกระทำด้วยความเค้นเฉือน  $\frac{F}{A}$  โดยที่  $A$  คือพื้นที่ของแผ่นบน เมื่อแรงเฉือน  $F$  กระทำต่อแผ่นเรียบบนให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง  $U$  จะทำให้ของไหลเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากพื้นที่  $MNOP$  ไปสู่ตำแหน่งใหม่ในพื้นที่  $M'N'O'P'$  ไม่ว่าขนาดของแรงเฉือน  $F$  จะมีค่าน้อยเพียงใดก็ตาม

กำหนดให้ของไหลที่สัมผัสกับผิวของแผ่นเรียบมีความเร็วเท่ากับแผ่นเรียบนั้น (ไม่มีการลื่นไถลที่ผิวของแผ่นเรียบ) อนุภาคของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ขนานไปกับแผ่นเรียบจะมีความเร็ว  $u$  ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ค่าศูนย์ที่แผ่นเรียบล่างจะถึงที่แผ่นเรียบบน จากการทดลอง พบว่าความเค้นเฉือนของของไหลดังกล่าวแปรผันโดยตรงกับอัตราของความเครียดเฉือน (Rate of Shearing Strain) หรือจะกล่าวได้ว่าแรงเฉือน  $F$  นั้นแปรผันตรงกับ  $A$  และ  $U$  และแปรผกผันกับความหนา  $Y$  ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \mu \frac{AU}{Y} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\mu$  คือแฟกเตอร์สัดส่วน (Proportionality Factor) ดังนั้นความเค้นเฉือนคือ อัตราส่วน  $U/Y$  คือความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของเส้น  $ab$  หรืออัตราของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงมุมของของไหลซึ่งเราสามารถเขียนอยู่ในเทอมของ  $\frac{du}{dy}$  แทน  $\frac{U}{Y}$  ได้คือ

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.2)$$

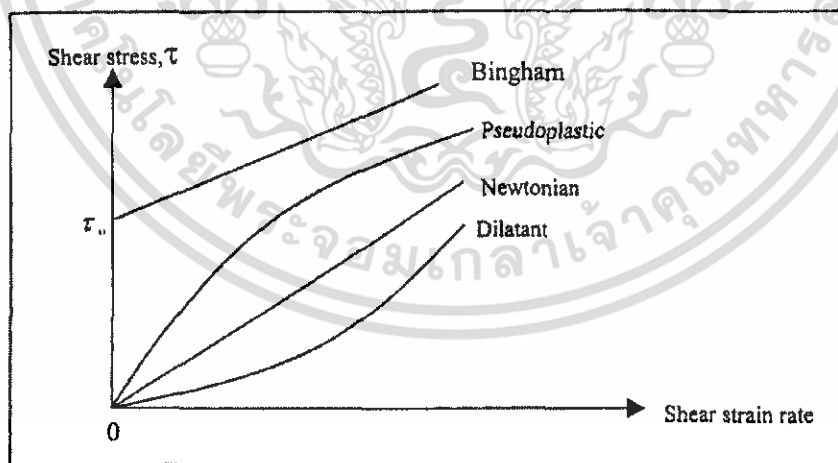
จากสมการที่ (3.2) เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's Law of Viscosity) ของไหลที่มีพฤติกรรมดังสมการที่ (3.2) เราเรียกว่าของไหลแบบนิวตันเนียน

โดยที่  $\tau$  คือค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress)

$\mu$  คือค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity)

$\frac{du}{dy}$  คืออัตราความเครียดเฉือน (Shear Strain Rate)

ดังนั้นจะเห็นว่าสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน ( $\tau$ , Shear Stress) กับความเครียดเฉือน ( $\frac{du}{dy}$ , Shear Strain Rate) จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลที่มีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามสมการที่ (3.2) เราเรียกว่าของไหลนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian Fluid) จากรูปที่ 3-2 จะพบว่าของไหลนิวโทเนียนนั้นให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  และ  $\frac{du}{dy}$  อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น และของไหลนอนนิวโทเนียนจะให้ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของพลาสติกพบว่าพลาสติกเป็นของไหลนอนนิวโทเนียน ตัวอย่าง ของไหลที่เป็นของไหลแบบนิวโทเนียน เช่น ก๊าซและของเหลวใส ในขณะที่ตัวสารไฮโดรคาร์บอนจำพวก Thick, Long-Chained Hydrocarbons อาจจัดว่าเป็นของไหลนอนนิวโทเนียน

### 3.2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองจะใช้สารหล่อลื่นทั้งหมด 3 ชนิดด้วยกันคือ

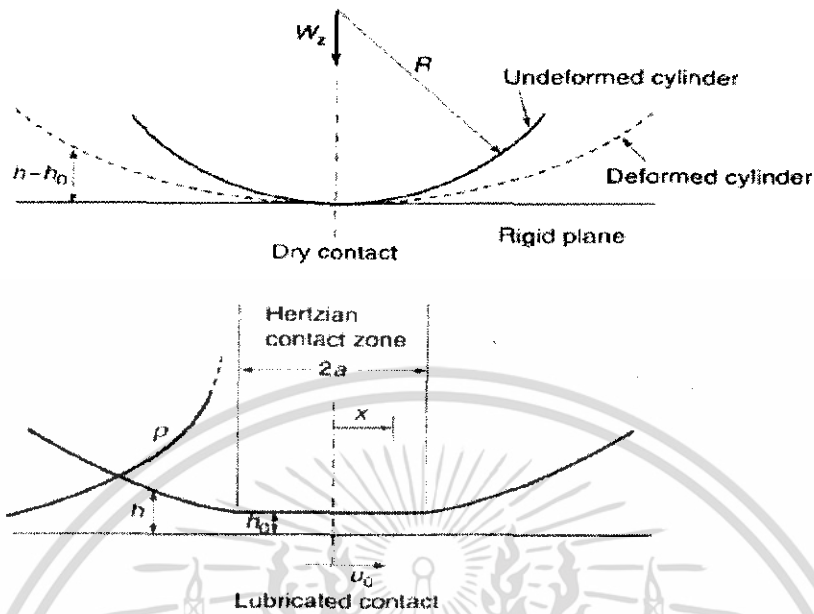
1. Advance Ester
2. SAE 40
3. SAE 90

สารหล่อลื่น	$T_0 [K^{\circ}]$	$\eta_0 [Pa.s]$	Z
Advance Ester	422	0.00206	0.48
SAE 40	303	0.146731	0.55085
SAE 90	303	0.184903	0.54390

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติสารหล่อลื่น

### 3.3 การสัมผัสแบบเส้น (Line Contact)

เมื่อทรงกระบอกสัมผัส ไม่เสียดรูป (Rigid Cylinder Contact) ค่าความหนืดคงที่ (Isoviscous) ทรงกระบอกแข็งเคลื่อนที่บนผิวระนาบ ในทิศทางแกน x ภายใต้สภาวะคงที่ โดยสมมติว่าทั้งทรงกระบอกและแผ่นเรียบมีความยาวมาก ดังนั้นการไหลของสารหล่อลื่นไหลไปในทิศทางเดียวคือทิศทางตามแนวแกน x สารหล่อลื่นที่ใช้ปริมาตรคงที่ รูปที่ 3-3 จะเขียนสมการเรย์โนลด์อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3-3 แสดงรูปทรงกระบอกสัมผัสแบบไม่เสียดรูป

### 3.4 สมการเรย์โนลด์

สมการอนุพันธ์ที่รวมการกระจายความดันในสารหล่อลื่นฟิล์มน้ำมัน คือ สมการเรย์โนลด์ สมการเรย์โนลด์ได้จากสมการนาเวียร์-สโตกส์และสมการความต่อเนื่องที่ประยุกต์จากหลักของกฎทรงมวล

สมมติฐานในการเขียนสมการเรย์โนลด์

- 1) ไม่คิดแรงภายนอกที่กระทำต่อสารหล่อลื่น เช่น ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของสารหล่อลื่น แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) แรงดันที่เกิดขึ้นในของไหลหรือสารหล่อลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแกนความหนาของของไหล ซึ่งหมายความว่าฟิล์มของสารหล่อลื่นนั้นบางมาก
- 3) การไหลของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่นที่มีผิวโค้งนั้น ถูกสมมติว่าเป็นการไหลในแกนตรงไม่คิดผลเนื่องจากผิวโค้งของกาบรองลื่น
- 4) ไม่เกิดการสิ้นเปลืองของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่น ดังนั้นสารหล่อลื่นที่แตะจับผิวกาบรองลื่นหรือเพลลาจะมีความเร็วเท่ากับผิวกาบรองลื่นหรือผิวเพลลา
- 5) สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid)
- 6) การไหลของสารหล่อลื่นเป็นการไหลอย่างเป็นระเบียบซึ่งเรียกรว่าการไหลแบบลามินาร์ (Laminar)
- 7) ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่น เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นบางมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจากวิเคราะห์ลำดับของขนาดในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ไม่พิจารณาเทอมของ  $h_0/l_0$  หรือ  $h_0/b_0$  และเหลือ order 1

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

เงื่อนไขที่สภาวะคงตัว ความดันเป็นฟังก์ชันของ  $x$  และ  $y$  เท่านั้น อินทิเกรตสมการ (3.3) และ (3.4) ให้ผลทั่วไปสำหรับการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{z}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tilde{A}}{\eta} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{z}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tilde{C}}{\eta} \quad (3.6)$$

ซึ่ง  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{C}$  เป็นค่าคงที่การจากอินทิเกรต

ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตรงข้ามกับฟิล์มบาง (ทิศทาง  $z$ ) เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งสูงขึ้นในบางปัญหาของแบร์ริง

อินทิเกรตสมการ (3.5) และ (3.6) ได้ส่วนประกอบความเร็วเป็น

$$u = \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \tilde{A} \frac{z}{\eta} + \tilde{B} \quad (3.7)$$

$$v = \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \tilde{C} \frac{z}{\eta} + \tilde{D} \quad (3.8)$$

สมมติว่าพื้นผิวของแข็งของไหลไม่มีการเลื่อนไหล เงื่อนไขของความเร็วที่ขอบเป็น

1.  $z = 0, u = u_b, v = v_b$
2.  $z = h, u = u_a, v = v_a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a และ b เป็นพื้นผิวบน (ส่วนโค้ง) และพื้นผิวล่าง (ระนาบ) ตามลำดับ ดังนั้น  $u_a, v_a$  และ  $w_a$  เป็นความเร็วที่พื้นผิวบนในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ และ  $u_b, v_b$  และ  $w_b$  เป็นความเร็วที่พื้นผิวล่างในทิศทางเช่นเดียวกัน

เงื่อนไขที่ขอบประยุกต์กับสมการ (3.7) และ (3.8) การเปลี่ยนแปลงความเร็วและส่วนประกอบความเร็ว มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left( \frac{2z-h}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{u_b - u_a}{h} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \left( \frac{2z-h}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{v_b - v_a}{h} \quad (3.10)$$

$$u = -z \left( \frac{h-z}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + u_b \frac{h-z}{h} + u_a \frac{z}{h} \quad (3.11)$$

$$v = -z \left( \frac{h-z}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial y} + v_b \frac{h-z}{h} + v_a \frac{z}{h} \quad (3.12)$$

ค่าความเค้นเฉือนของความหนืดกระทำกับของแข็งได้แก่

$$\tau_{xz} = \eta \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.13)$$

$$\tau_{yz} = \eta \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.14)$$

ขนาดของ  $\partial w/\partial x$  และ  $\partial w/\partial y$  พิจารณาให้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับ  $\partial u/\partial z$  และ  $\partial v/\partial z$  ดังนั้นสมการ (3.13) และ (3.14) ลดรูปได้ดังนี้

$$\tau_{xz} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.15)$$

$$\tau_{yz} = \eta \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.16)$$

และความเค้นเฉือนความหนืดที่กระทำผิวของแข็งจากสมการ (3.9) และ (3.10) สามารถลดรูปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\tau_{zx})_{z=0} = \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\eta(u_b - u_a)}{h} \quad (3.17)$$

$$(-\tau_{zx})_{z=h} = -\left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=h} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta(u_b - u_a)}{h} \quad (3.18)$$

$$(\tau_{zy})_{z=0} = \left( \eta \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=0} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\eta(v_b - v_a)}{h} \quad (3.19)$$

$$(-\tau_{zy})_{z=h} = -\left( \eta \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=h} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta(v_b - v_a)}{h} \quad (3.20)$$

เครื่องหมายลบของความเค้นเฉือนความหนืดแสดงว่าอยู่ตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่

อัตราการไหลของปริมาตรต่อหน่วยความกว้างในทิศทาง x และ y

$$q'_x = \int_0^h u dz \quad (3.21)$$

$$q'_y = \int_0^h v dz \quad (3.22)$$

แทนสมการ (3.11) และ (3.12) ในสมการ (3.21) และ (3.22) จะได้

$$q'_x = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_a + u_b}{2} h \quad (3.23)$$

$$q'_y = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v_a + v_b}{2} h \quad (3.24)$$

สมการความต่อเนื่องในรูปอินทิเกรต

$$\int_0^h \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right] dz = 0 \quad (3.25)$$

กฎของการอินทิเกรต

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} [f(x, y, z)] dz = -f(x, y, z) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_0^h f(x, y, z) dz \right] \quad (3.26)$$

สมมติให้  $\rho$  เป็นความหนาแน่นกระทำเฉลี่ยเหนือฟิล์ม เทอมของ  $u$  ในสมการความต่อเนื่องรูปอินทิเกรตได้

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dz = -(\rho u)_{z=h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h \rho u dz \right) = -\rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \int_0^h u dz \right) \quad (3.27)$$

เช่นกัน สำหรับเทอม  $v$

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dz = -\rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \int_0^h v dz \right) \quad (3.28)$$

อินทิเกรตเทอมของ  $w$  จะได้

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dz = \rho (w_a - w_b) \quad (3.29)$$

ดังนั้นอินทิเกรตสมการความต่อเนื่องจะได้

$$h \frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \int_0^h u dz \right) - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \int_0^h v dz \right) + \rho (w_a - w_b) = 0 \quad (3.30)$$

อินทิเกรตสมการความต่อเนื่องจะได้อัตราการไหลของปริมาตรต่อหน่วยความกว้าง ( $q'_x$  และ  $q'_y$ ) ดังสมการ (3.23) และ (3.24) ได้สมการเรย์โนลด์รูปทั่วไป

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\rho h (u_a + u_b)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\rho h (v_a + v_b)}{2} \right] + \rho (w_a - w_b) - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.31)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวราบ  $w_a = u_a \partial h / \partial x + v_a \partial h / \partial y$  และ  $w_b = 0$  สมการเรย์โนลด์ในสมการ (3.31) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\bar{u} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12\bar{v} \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} \quad (3.32)$$

ซึ่ง

$$\bar{u} = \frac{u_a + u_b}{2} = \text{constant} \quad \bar{v} = \frac{v_a + v_b}{2} = \text{constant}$$

สมการดังกล่าวใช้กับสารหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก และสารหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก คุณสมบัติของของไหลจะไม่เปลี่ยนแปลงผ่านแปรงอย่างเห็นได้ชัด เพราะฉะนั้นอาจพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ เช่นเดียวกันสำหรับสารหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก การเคลื่อนที่แบบลูกกลิ้งจะให้  $\bar{v}$  เป็นศูนย์ ดังนั้นค่าที่สอดคล้องกับสมการเรย์โนลด์คือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\bar{u}\eta_0 \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.33)$$

สมการ (3.32) ไม่เพียงใช้กับคุณสมบัติของของไหลที่เปลี่ยนแปลงในทิศทาง  $x$  และ  $y$  เท่านั้น แต่ยังใช้กับผิวแปรงที่มีความยาวอนันต์ในทิศทาง  $y$  การรูดด้านข้างหรือการไหลในทิศทาง  $y$  สัมพันธ์กับเทอมที่สองในสมการ (3.32) และ (3.33) ถ้าความดันในชั้นสารหล่อลื่นเป็นฟังก์ชันกับ  $x$  และ  $y$  ปัญหาในสมการ (3.32) จะไม่พบในการวิเคราะห์ห้อยันัก

จากสมมติฐานการหล่อลื่นที่ไม่คิดการรูดด้านข้าง (เนื่องจากลูกกลิ้งและแผ่นเรียบมีความยาวมาก) ดังนั้นสมการเรย์โนลด์สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12\bar{u} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \quad (3.34)$$

อินทิเกรตสมการเรย์โนลด์ตลอดระยะ  $x$  จะได้

$$\frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} = \frac{12\bar{u}}{h^2} + \frac{\tilde{A}}{\rho h^3} \quad (3.35)$$

โดยมีเงื่อนไขที่ขอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dp}{dx} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad x = x_m \quad \rho = \rho_m \quad h = h_m$$

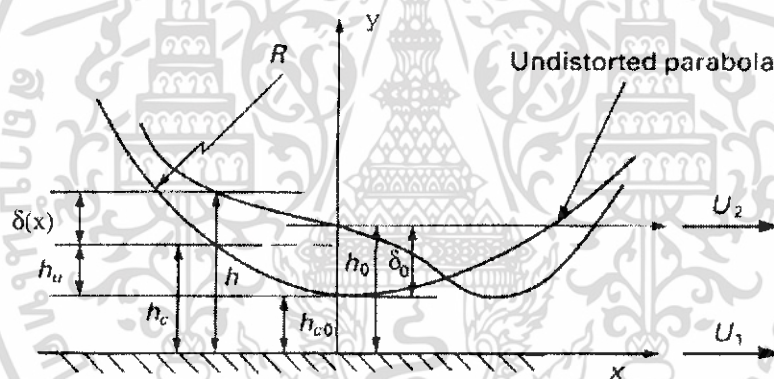
จะได้  $\bar{A} = -12\bar{u}\rho_m h_m$

แทนค่าในสมการ (3.34) จะได้

$$\frac{dp}{dx} = 12\bar{u}\eta \frac{\rho h - \rho_m h_m}{\rho h^3} \quad (3.36)$$

ตัวแปรที่ห้อย m เป็นค่าที่จุด  $x = x_m$

### 3.5 สมการความหนาฟิล์ม



รูปที่ 3-4 แสดงรูปร่างทางเรขาคณิตของฟิล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 3-4 สมมติว่าส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงรูปสามารถประมาณว่ามีรูปร่างเป็นพาราโบลา ดังนั้น ความหนาฟิล์มน้ำมันสำหรับปัญหาทางอีลาสโตไฮโดรไดนามิกเขียนได้ดังนี้

$$h(x) = h_{c0} + h_u(x) + \delta(x) \quad (3.37)$$

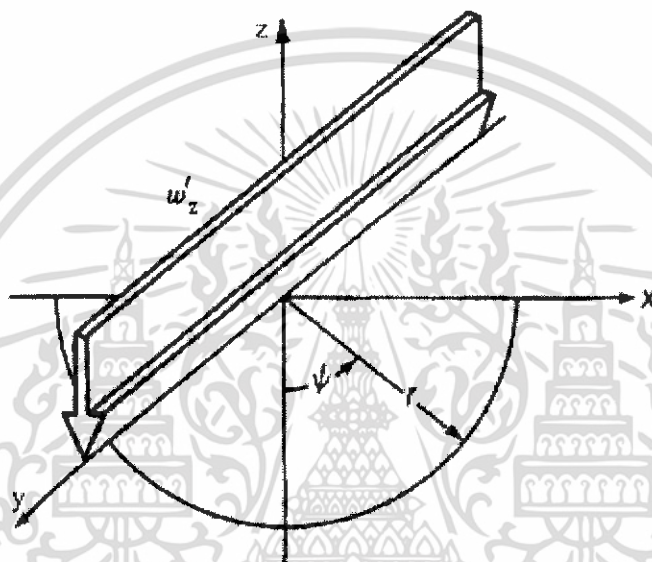
เมื่อ  $h_{c0}$  เป็นความหนาของฟิล์มน้ำมันที่จุดกำเนิดเมื่อผิวสัมผัสไม่เปลี่ยนรูป เป็นช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่มีรูปร่างไม่เสียรูปและแผ่นเรียบ ถ้ากำหนดให้ มีรูปร่างเป็นพาราโบลาคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_u = \frac{x^2}{2R} \quad (3.38)$$

เมื่อ  $R$  คือรัศมีของผิวสมมูล ดังนั้นสมการ (3.37) จะเป็น

$$h(x) = h_{c0} + \frac{x^2}{2R} + \delta(x) \quad (3.39)$$



รูปที่ 3-5 แสดงพิกัดเชิงขั้วที่ใช้สำหรับภาวะแบบเส้น  $w'_z$  ที่กระทำบนแกน  $z$  ในระนาบ  $x = 0$

จากรูปที่ 3-5 เงื่อนไขของภาวะแบบเส้น (Line Load) ในปัญหาสองมิติและเงื่อนไขความสมดุลคือ

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = 0 \quad (3.41)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (\sigma_x + \sigma_z) = 0 \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.40) ถึง (3.42) อาจแก้ปัญหาได้โดยใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าความเค้น ฟังก์ชันของ  $x$  และ  $y$  และแสดงเทอมของความเค้นคือ

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad \sigma_z = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \tau_{xz} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \quad (3.43)$$

พารามิเตอร์  $\phi$  เป็นค่าของฟังก์ชัน Airy Stress ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการ (3.40) และ (3.41) ในขณะที่สมการ (3.42) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial z^4} = 0 = \nabla^4 \phi \quad (3.44)$$

ในปัญหาส่วนใหญ่ของภาวะแบบเส้นจะพิจารณาในระบบพิกัดเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 3-5 ดังนั้นสมการ (3.40) และ (3.41) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\psi}}{\partial \psi} + \frac{\sigma_r - \sigma_\psi}{r} = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\psi}}{\partial \psi} + \frac{\partial \tau_{r\psi}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\psi}}{r} = 0 \quad (3.46)$$

ความเค้นในสมการ (3.43) สามารถเขียนอยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว คือ

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi^2} \quad \sigma_\psi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \quad \tau_{r\psi} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \right) \quad (3.47)$$

สมการ (3.44) สำหรับพิกัดเชิงขั้วจะเป็น

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \psi^2} \right) \left( \frac{\partial \phi^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi^2} \right) = 0 \quad (3.48)$$

ปัญหาสำหรับภาวะแบบเส้นดังรูปที่ 3-5 จะแก้ได้โดยใช้ฟังก์ชันความเค้น Boussinesq ให้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_h = -\frac{w'_z r \psi}{\pi} \sin \psi \quad (3.49)$$

แทนสมการ (3.49) ลงในสมการ (3.47) ได้

$$\sigma_r = -\frac{2w'_z \cos \psi}{\pi r} \quad \sigma_\psi = 0 \quad \tau_{r\psi} = 0 \quad (3.50)$$

สมการ (3.49) สามารถเขียนให้อยู่ในพิกัดฉากจะได้

$$\phi_h = -\frac{w'_z x}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{z} \quad (3.51)$$

ความเค้นในพิกัดฉากคือ

$$\sigma_x = -\frac{2w'_z x^2 z}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (3.52)$$

$$\sigma_z = -\frac{2w'_z z^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (3.53)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{2w'_z xz^2}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (3.54)$$

จากกฎของฮุก (Hooke's Law) องค์ประกอบความเครียดของของแข็งคือ

$$\tilde{e}_x = \frac{\partial \delta_x}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (3.55)$$

$$\tilde{e}_y = \frac{\partial \delta_y}{\partial y} = 0 = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad (3.56)$$

$$\tilde{e}_z = \frac{\partial \delta_z}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{\epsilon}_{xz} = \frac{\partial \delta_x}{\partial z} + \frac{\partial \delta_z}{\partial x} = \frac{\tau_{xz}}{G_s} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xz} \quad (3.58)$$

เมื่อ  $G_s$  คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุจากสมการ (3.58) เมื่อใช้ประมาณความเครียดคือ

$$\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z) \quad (3.59)$$

แทนค่าลงในสมการ (3.55) และสมการ (3.56) จะได้

$$\tilde{\epsilon}_x = \frac{\partial \delta_x}{\partial x} = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_x - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \sigma_z \quad (3.60)$$

$$\tilde{\epsilon}_z = \frac{\partial \delta_z}{\partial z} = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_z - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \sigma_x \quad (3.61)$$

อินทิเกรตสมการ (3.60) และสมการ (3.61) โดยใช้สมการ (3.52) และสมการ (3.53) ได้

$$\delta_x = -\frac{w'_z}{\pi} \left[ \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{E} \tan^{-1}\left(\frac{x}{z}\right) - \frac{(1+\nu)xz}{E(x^2+z^2)} \right] + \tilde{A}(z) \quad (3.62)$$

$$\delta_z = -\frac{w'_z}{\pi} \left\{ \frac{1-\nu^2}{E} \left[ \ln(x^2+z^2) - \frac{z^2}{x^2+z^2} \right] + \frac{\nu(1+\nu)x^2}{E(x^2+z^2)} \right\} + \tilde{B}(x) \quad (3.63)$$

โดยสมมาตรแล้ว  $-\delta(-x) = \delta(x)$  ดังนั้น  $\tilde{A}(z)$  สมการ (3.58) นั้นอาจใช้ในการหาค่าของ  $\tilde{\epsilon}$  โดยการแทนค่าสมการ (3.54), (3.62) และ (3.63) เข้าไปในสมการ (3.58) แล้วให้

$$\frac{\partial \tilde{B}(x)}{\partial x} = 0 \quad (3.64)$$

ในที่นี้หมายความว่า  $\tilde{\epsilon}$  เป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับจุด  $x$  แต่จะขึ้นอยู่กับจุดซอร์ส  $\bar{r}$  ในกรณีนี้จะเลือกที่จุดกำหนดค่าของ  $\tilde{\epsilon}$  จะทำการหาได้โดยความสัมพันธ์ของตำแหน่งของซอร์สและตำแหน่งของจุดข้อมูล ในปัญหาแบบลูกกลิ้งบนแผ่นเลื่อนจะพิจารณาว่าลูกกลิ้งมีความยาวมาก ดังนั้นจะมีการเปลี่ยนรูปตามทิศทางของภาระ

เพียงแนวเดียว นั่นคือ  $\delta = \delta_y$  จากสมการ (3.63) ให้การเปลี่ยนรูปในช่วงขีดหุ่นที่จุด  $x$  ใดๆ บนพื้นผิว ( $y=0$ ) ดังนั้น

$$\delta = -\frac{2}{\pi E} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} p \ln(x-x')^2 dx' \quad (3.65)$$

แทนค่าสมการ (3.65) ลงในสมการ (3.39) จะได้สมการความหนาของฟิล์มน้ำมันคือ

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2R} - \frac{2}{\pi E} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} p \ln(x-x')^2 dx' \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} p &= p_H P & p_H &= E' \left( \frac{W'}{2\pi} \right)^{0.5} \\ h &= \frac{8RW'}{\pi} H & w &= E' RW' \\ x &= bX & b &= R \left( \frac{8W'}{\pi} \right)^{0.5} \\ y &= hY & y &= \frac{8RW'}{\pi} HY \\ \mu &= \mu_0 \bar{\mu} & \rho &= \rho_0 \bar{\rho} \\ u &= \bar{u} u^* & S &= 2 \left( \frac{u_2 - u_1}{u_2 + u_1} \right) \\ \bar{u} &= \left( \frac{u_2 + u_1}{2} \right) & \frac{1}{E'} &= \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \end{aligned} \quad (3.67)$$

แทนสมการ (3.67) ลงในสมการ (3.66) จะได้สมการความหนาฟิล์มในรูปไร้มิติคือ

$$H_i = H_0 + \frac{X_i^2}{2} - \frac{1}{2\pi} \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} P \ln(X - X')^2 dX' \quad (3.68)$$

### 3.6 สมการความหนาแน่น

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นคือมวลต่อหน่วยปริมาตรของของไหล สำหรับสารหล่อลื่นเมื่อความดันที่กระทำต่อสารหล่อลื่นมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้สารหล่อลื่นมีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_i = \rho_0 \left( 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_i} \right) \quad (3.69)$$

$$\bar{\rho}_i = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H P_i}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_i} \quad (3.70)$$

### 3.7 สมการความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลง เมื่อความดันมีการเปลี่ยนแปลง

$$\bar{\eta}_i = \exp \left\{ \left[ \ln(\eta_0) + 9.67 \right] \left[ -1 + \left( 1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_i \right)^z \right] \right\} \quad (3.71)$$

### 3.8 สมการภาวะสมดุล

ค่าความดันที่คำนวณได้จากสมการเรย์โนลด์์ ต้องตรวจสอบกับภาวะที่กระทำว่าอยู่ในสภาวะสมดุลหรือไม่ ดังสมการต่อไปนี้

$$w = \int_m^{out} p_i dx \quad (3.72)$$

สามารถทำให้อยู่ในรูปไร้มิติได้ดังนี้

$$\int_m^{out} P_i dX = \frac{\pi}{2} \quad (3.73)$$

### 3.9 สมการแรงเสียดทาน

จากสมการแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวด้านกว้างกระทำต่อแผ่นเรียบด้านล่าง

$$f'_a = \int_{z=0} (\tau) dx = \int \left( \eta \frac{du}{dz} \right)_{z=0} dx \quad (3.74)$$

แต่

$$\eta \frac{du}{dz} = \frac{2z-h}{2} \frac{dp}{dx} - \frac{\eta(u_a - u_b)}{h} \quad (3.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (3.75) ลงใน (3.74) เมื่อ  $z = 0$

$$f'_a = - \int \left[ \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} + \frac{\eta(u_a - u_b)}{h} \right] dx \quad (3.76)$$

แปลงให้อยู่ในรูปไร้มิติ โดยใช้สมการ(3.67)

$$F'_a = \frac{f'_a}{E'R_x} = - \frac{W'_{hx}}{2} - \left( \frac{u_a - u_b}{u_a + u_b} \right) U \left( \frac{\pi}{2W'} \right)^{1/2} \int \frac{\bar{\eta}}{H_r} dX_r \quad (3.77)$$

และสมการแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวด้านกว้างกระทำต่อลูกกิ้ง สามารถเขียนได้เป็น

$$f'_b = \int (\tau)_{z=h} dx = \int \left( \eta \frac{du}{dz} \right)_{z=h} dx \quad (3.78)$$

ทำให้อยู่ในรูปไร้มิติ โดยใช้สมการ(3.67)

$$F'_b = \frac{f'_b}{E'R_x} = \frac{W'_{bx}}{2} - \left( \frac{u_a - u_b}{u_a + u_b} \right) U \left( \frac{\pi}{2W'} \right)^{1/2} \int \frac{\bar{\eta}}{H_r} dX_r \quad (3.79)$$

เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

$$F'_a - F'_b + W'_{hx} = 0 \quad (3.80)$$

และ

$$W'_{az} - W'_{bz} = 0 \quad (3.81)$$

และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลูกกิ้ง

$$\mu = - \frac{F'_a}{W'} \quad \mu = - \frac{F'_a}{W'} = \frac{-F'_b + W'_{hx}}{W'} \quad (3.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10 สมการการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารในของไหล

$$\mu_0 = \mu_r(1 + K^{N'}) \quad (3.83)$$

- เมื่อ  $K$  คือ ค่าแสดงสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด  
 $N'$  คือ จำนวนรอบ  
 $\mu_r$  คือ ค่าความหนืดที่อ้างอิง  
 $\mu_0$  คือ ค่าความหนืดที่จำนวนรอบนั้น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีเชิงตัวเลข

ปัญหาทางอีลาสโตไฮโดรไดนามิก เป็นสมการเชิงอนุพันธ์และไม่เชิงเส้นสูง การแก้ปัญหาก็ทำได้ยาก ดังนั้นจึงนำวิธีเชิงตัวเลขมาช่วยแก้ปัญหา และวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ ได้แก่

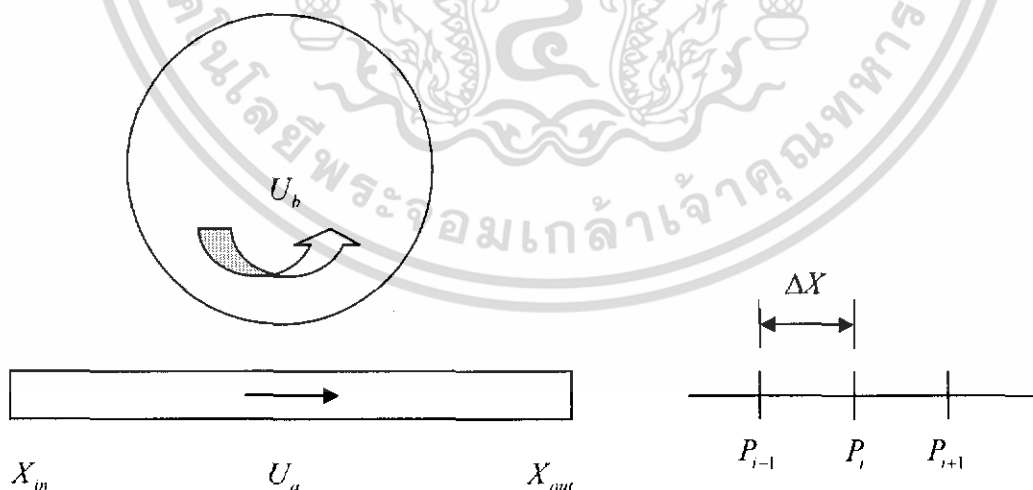
1. วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม
2. วิธีนิวตัน-ราฟสัน
3. กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สัน
4. ระเบียบวิธีกำจัดแบบเกาส์

#### 4.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

จากสมการเรย์โนลด์สมิตที่ใช้แก้หาความดันที่โหนดต่างๆ

$$\tilde{f}_i = H_i^3 \left( \frac{dp}{dx} \right)_i - K \bar{\mu} \left( H_i - \frac{\bar{\rho}_m H_m}{\bar{\rho}_i} \right) = 0 \quad (4.1)$$

สามารถแก้โดยพิจารณาดังรูป



รูปที่ 4-1 แสดงขนาดความกว้างระหว่างโหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการเรย์โนลด์ส์เราจะแทนค่าด้วยผลต่างสืบเนื่องแบบข้างหน้า (Forward Difference)

$$\tilde{f}_i = H_i^3 \left( \frac{P_{i+1} + P_i}{X_{i+1} - X_i} \right)_i - K\bar{\mu} \left( H_i - \frac{\bar{P}_m H_m}{\bar{\rho}_i} \right) = 0 \tag{4.2}$$

เมื่อแทนค่า  $i$  เป็นค่าหมายเลขโหนดต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง N จะได้ระบบสมการไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[A]\{P\} = [B] \tag{4.3}$$

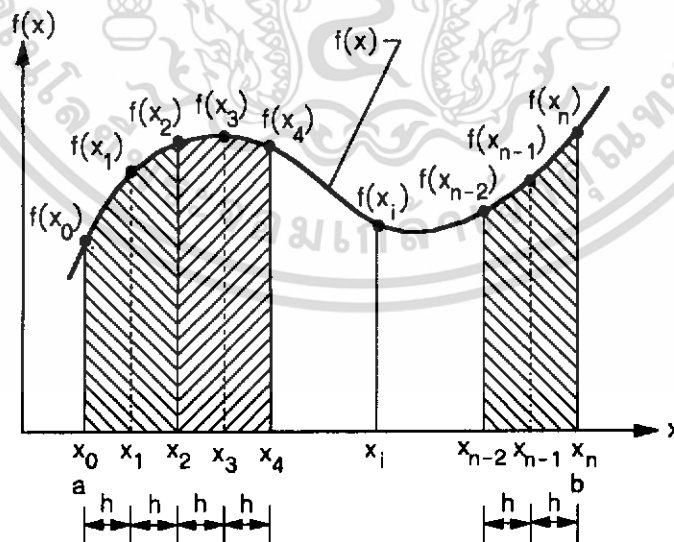
และแก้ระบบสมการด้วยวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination Method)

#### 4.2 วิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากสมการนิวตัน-ราฟสัน จะเห็นว่าแต่ละ โหนดที่พิจารณาจะมีรูปแบบดังนี้

$$\left[ \frac{\partial f_i}{\partial \rho_m H_m} \right]^0 [\Delta(\rho_m H_m)]^0 + \sum_{j=2}^N \left( \frac{\partial f_i}{\partial P_{r,j}} \right) (\Delta P_{r,j})^n + \left( \frac{\partial f_i}{\partial H_{r,o}} \right) (\Delta H_{r,o})^n = -f_i^0 \tag{4.4}$$

#### 4.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎของซิมป์สันสามส่วน



รูปที่ 4-2 แสดงการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎของซิมป์สัน 1/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{h}{3} \left( f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{i=2,4,6,\dots}^{n-2} f(x_i) + f(x_n) \right) \quad (4.5)$$

จากสมการที่รับภาระไร้มิติ สามารถเขียนโดยใช้กฎของซิมป์สัน 1/3

$$I = \int P dx = \frac{h}{3} \left( P(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{n-1} P(x_i) + 2 \sum_{i=2,4,6,\dots}^{n-2} P(x_i) + P(x_n) \right) \quad (4.6)$$

#### 4.4 ระเบียบวิธีกำจัดแบบเกาส์

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{r,0}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{r,0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_N}{\partial H_{r,0}} \\ 0 & C_1 & \dots & C_N & 0 \end{bmatrix}^0 \begin{Bmatrix} \Delta(\rho_m H_{r,m}) \\ \Delta(P_{r,2}) \\ \vdots \\ \Delta(P_{r,N}) \\ \Delta(H_{r,0}) \end{Bmatrix}^n = \begin{Bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ \vdots \\ -f_N \\ \Delta W' \end{Bmatrix}^0 \quad (4.7)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial f_i}{\partial H_0} = 3H_{r,i}^2 (P_{i+1} - P_i) - \Delta X \bar{K} \eta_i \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial (\rho_m H_{r,m})} = \frac{\Delta X \bar{K}}{\rho_i} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial P_j} = H_{r,i}^3 (\delta(i+1,j) - \delta(i,j)) + (P_{i+1} - P_i) (3H_{r,i}^2) \left( \frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) - \Delta X \bar{K} \left[ \eta_i \left( \frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) + H_{r,i} \left( \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} \right) \right] \quad (4.10)$$

$$- \eta_i \left[ \frac{\rho_i \Delta \rho_m H_m - \rho_m H_m \frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}}{\rho_i^2} - \frac{\rho_m H_m \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j}}{\rho_i} \right] \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\frac{\partial H_i}{\partial P_j}$ ,  $\frac{\partial \eta_{ii}}{\partial P_j}$ ,  $\frac{\partial p_i}{\partial P_j}$  จะหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} = -\frac{\Delta X}{2\pi} \ln \left\{ \left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_i \right| \left| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_i \right| \right\} \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} = \exp \left\{ [\ln \eta_0 + 9.67] \left[ -1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^{z_i} \right] \right\} [\ln \eta_0 + 9.67] (z_i) (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^{z_i - 1} (5.1 \times 10^{-9} p_H) \delta(i,j) \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial P_j} = \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H \delta(i,j)}{(1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_{r,i})^2} \quad (4.14)$$

สมการแสดงการสมมุติแรงดันเริ่มต้นในการคำนวณ จะให้มีการกระจายแรงดันแบบเฮิร์ท ดังนี้

$$P_{r,i} = \sqrt{1 - X^2} \quad (4.15)$$

#### 4.5 การเขียนโปรแกรมเพื่อแก้สมการ

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังต่อไปนี้

ค่าความเร็ว  $U = 1 \times 10^{-11}, 3 \times 10^{-11}, 5 \times 10^{-11}$

ค่าโหลดคงที่  $W = 8 \times 10^{-6}, 3 \times 10^{-5}, 8 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-4}, 3 \times 10^{-4}, 4 \times 10^{-4}$

ค่าอีลาสติกโมดูลัส  $E = 180, 200, 220$  GPa

ค่าความหนืดสัมบูรณ์  $\eta_0 = 0.026, 0.146731, 0.184903$  Pa.s

ค่าดัชนีแรงดัน - ความหนืด  $z = 0.48, 0.550085, 0.5439$

ช่วงการคำนวณ  $-2.5 \leq X \leq 2$

จำนวนโหนดที่ใช้  $N = 250$

ค่าความผิดพลาดในการคำนวณ  $1.0 \times 10^{-4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการคำนวณ

ในการจำลองพฤติกรรมของการหล่อขึ้นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก ซึ่งในการจำลองจะจำลองกรณี  
ที่ลูกกลิ้งหมุนอยู่บนแผ่นเรียบที่มีการเคลื่อนที่ จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 1. ลูกกลิ้ง

ค่ารัศมี (Equivalent Radius, m) : R 0.02565

อีลาสติกโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, Pa) : E  $1.6 \times 10^{11}$ ,  $1.8 \times 10^{11}$ ,  $2.0 \times 10^{11}$ ,  $2.0 \times 10^{11}$

#### 2. แผ่นเรียบ

อีลาสติกโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, Pa) : E  $1.6 \times 10^{11}$ ,  $1.8 \times 10^{11}$ ,  $2.0 \times 10^{11}$ ,  $2.0 \times 10^{11}$

#### 3. สารหล่อลื่น

3.1 SAE 40

3.2 SAE 90

3.3 Advance Ester

ในการจำลองจะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลง  
ค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปใน สภาวะสถิตย์และพลศาสตร์

1. ความเร็ว  $U = 1.0 \times 10^{-11}$ ,  $3.0 \times 10^{-11}$ ,  $5.0 \times 10^{-11}$

2. ค่าภาระในการกระทำ สำหรับ Advance Ester :  $W = 8.0 \times 10^{-6}$ ,  $3.0 \times 10^{-5}$ ,  $8.0 \times 10^{-5}$

SAE 40 :  $W = 1.0 \times 10^{-4}$ ,  $3.0 \times 10^{-4}$ ,  $4.0 \times 10^{-4}$

SAE 90 :  $W = 1.0 \times 10^{-4}$ ,  $3.0 \times 10^{-4}$ ,  $4.0 \times 10^{-4}$

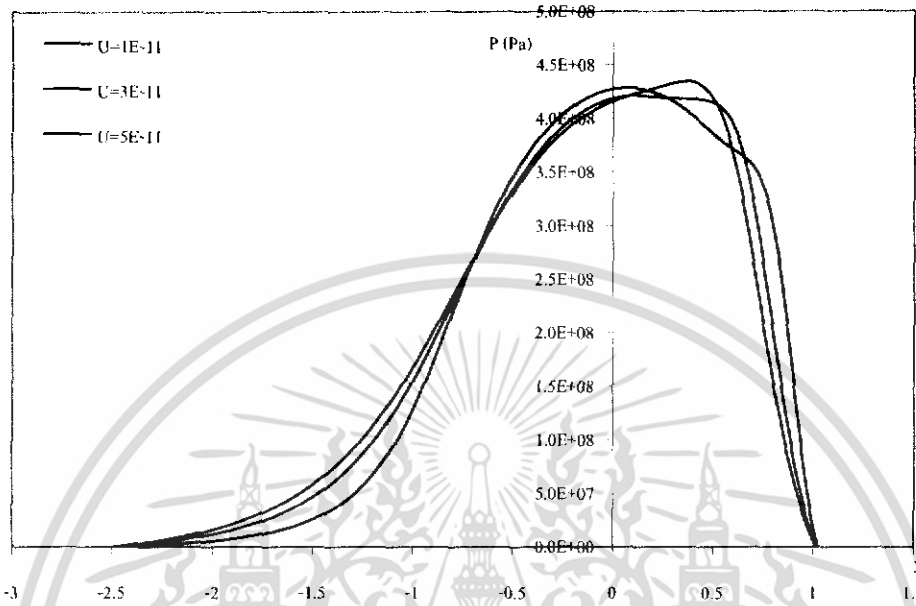
3. อัตราการคืนเด้ง  $S = 1.0, 2.0, 3.0$

4. ค่าสารหล่อลื่น (ตารางที่ 3-1)

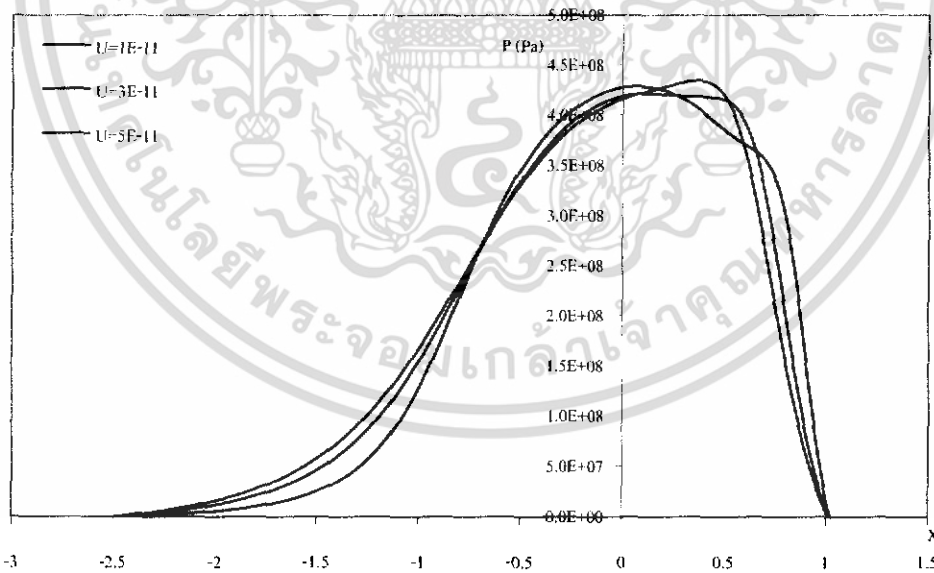
5. ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ  $E = 1.8 \times 10^{11}$ ,  $2.0 \times 10^{11}$ ,  $2.2 \times 10^{11}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ความเร็วเปลี่ยนแปลง

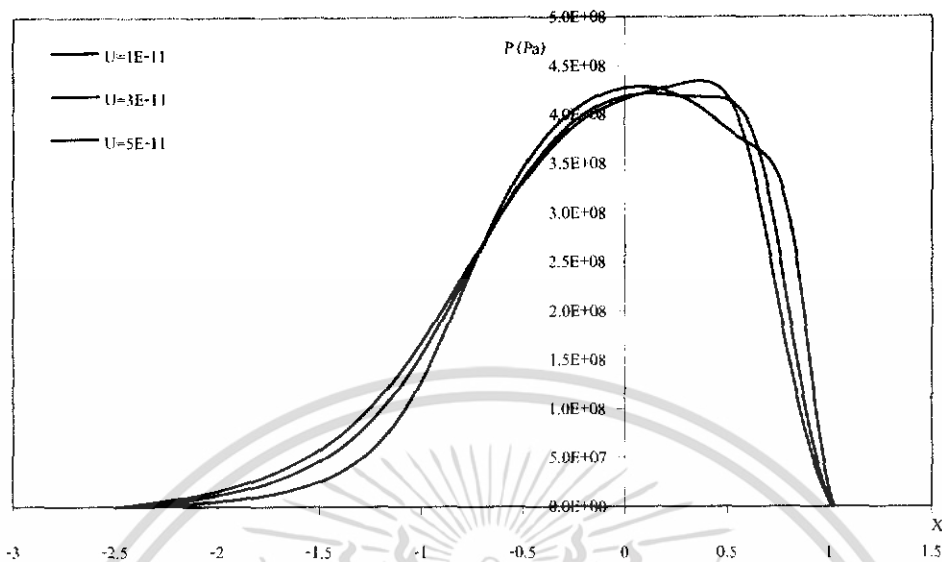


รูปที่ 5-1 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50million cycles

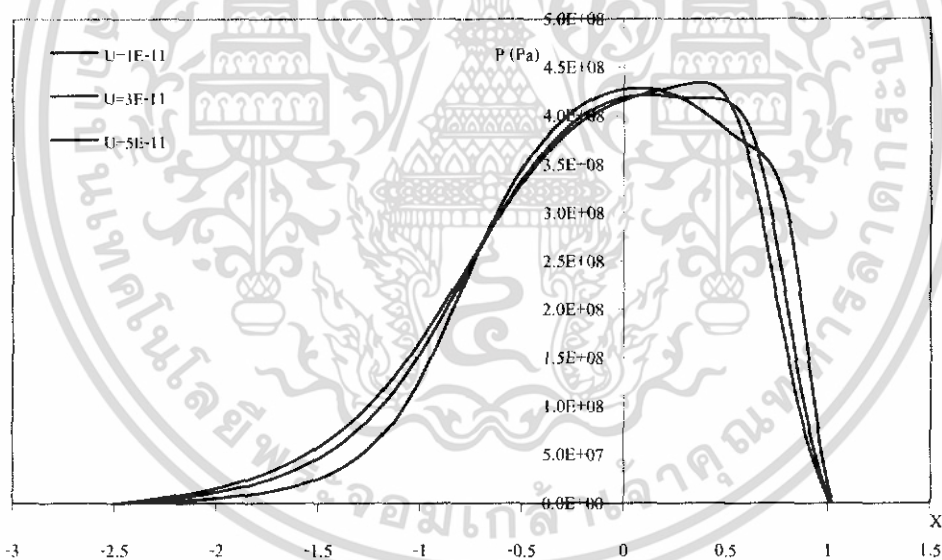


รูปที่ 5-2 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

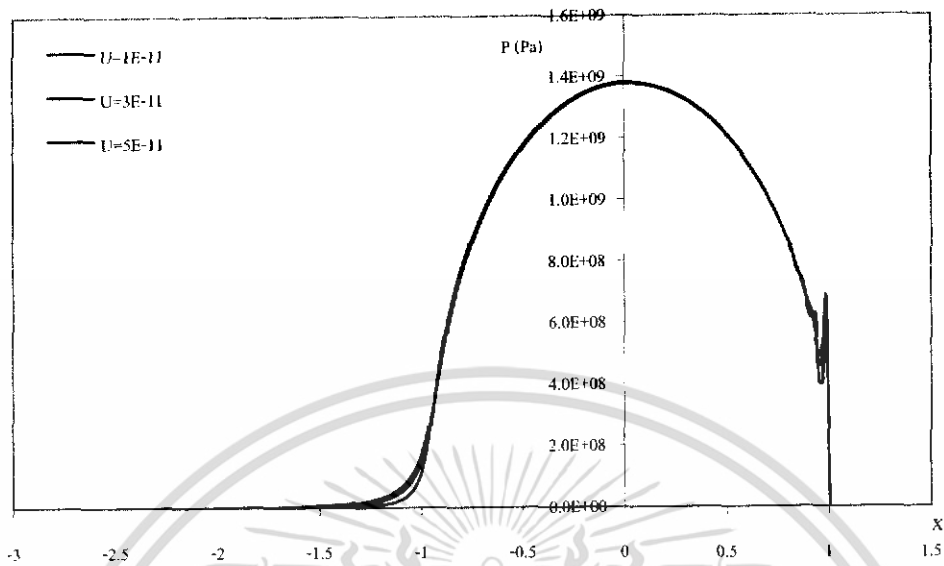


รูปที่ 5-3 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200million cycles

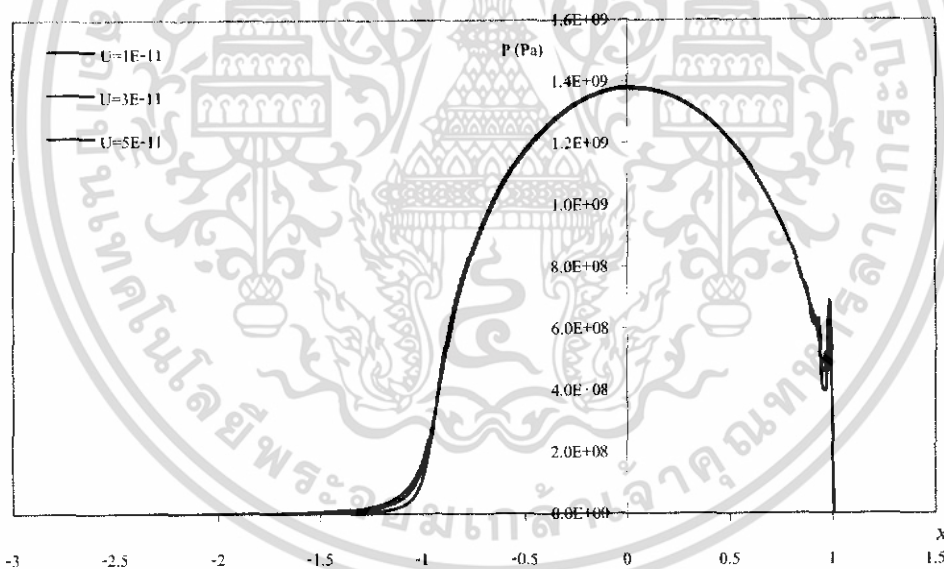


รูปที่ 5-4 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

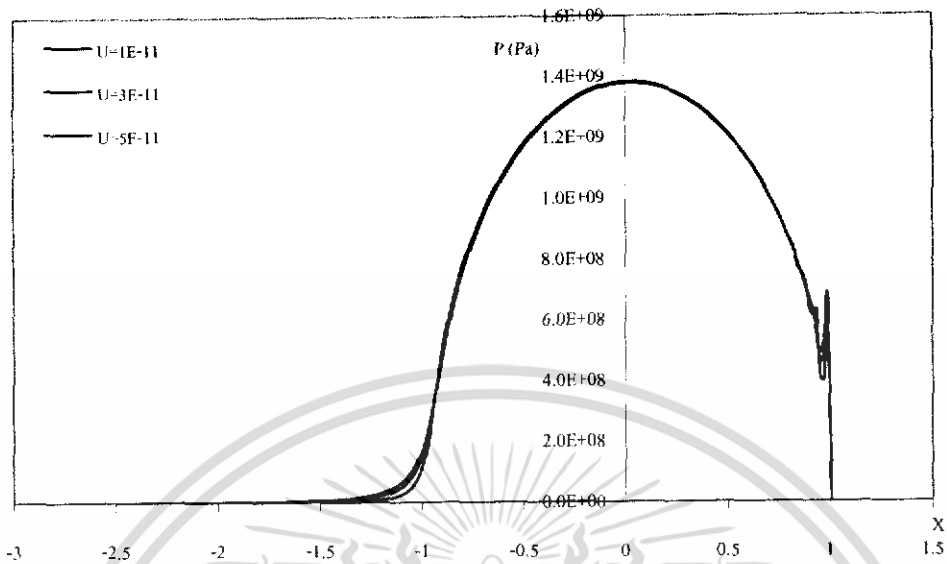


รูปที่ 5-5 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-7}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50million cycles

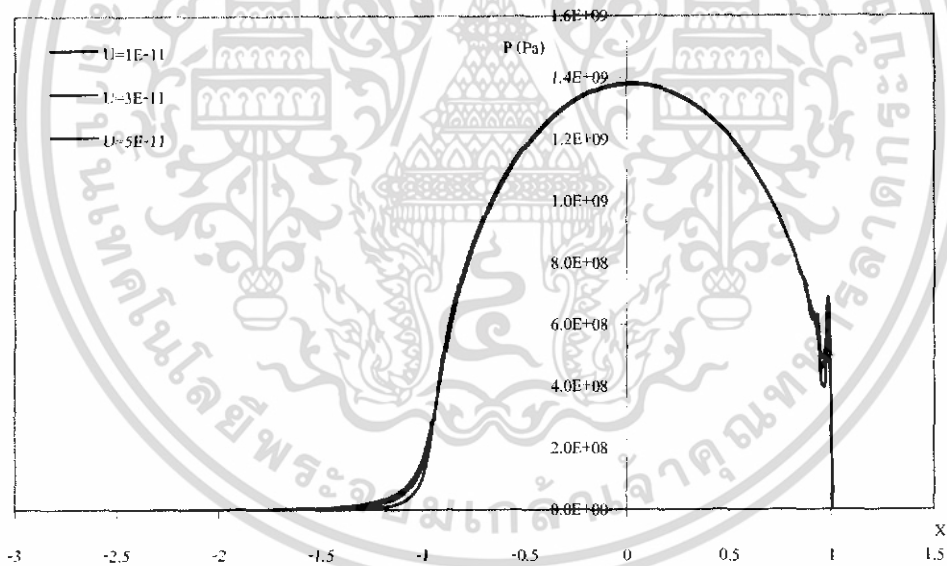


รูปที่ 5-6 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-7}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

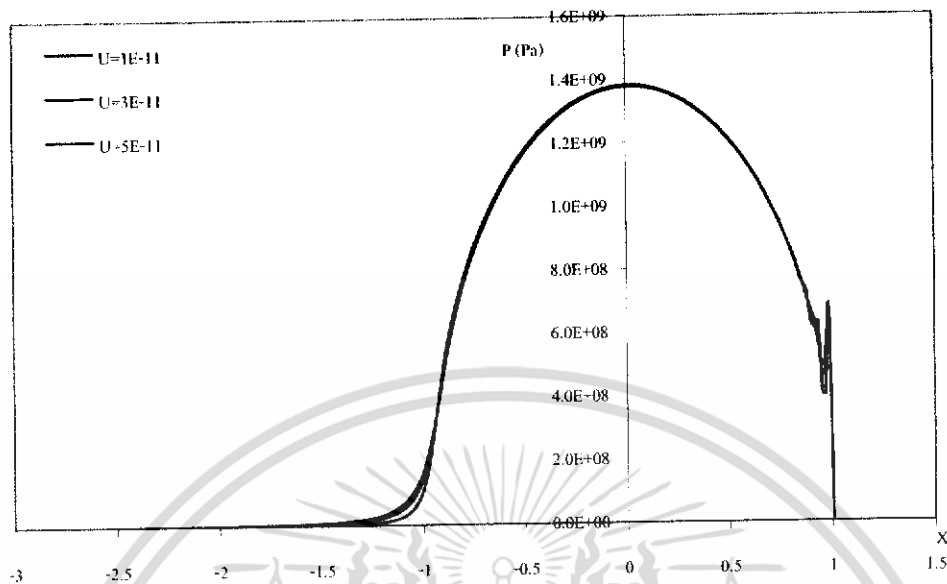


รูปที่ 5-7 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200million cycles

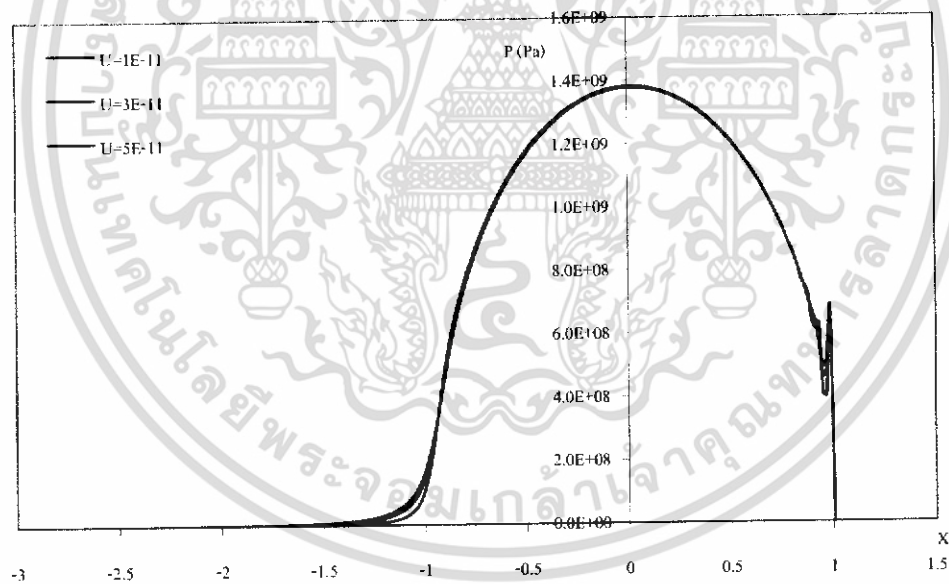


รูปที่ 5-8 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

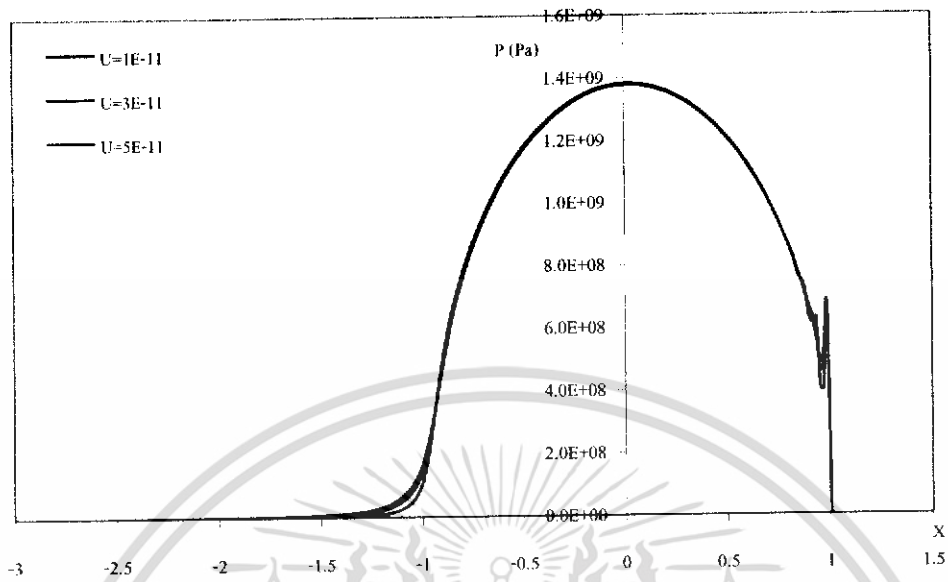


รูปที่ 5-9 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400million cycles

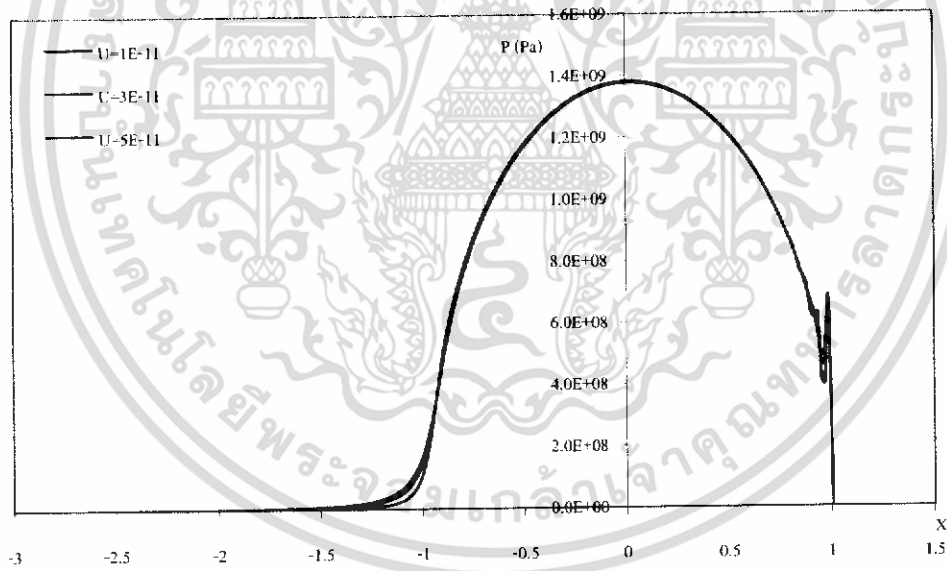


รูปที่ 5-10 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

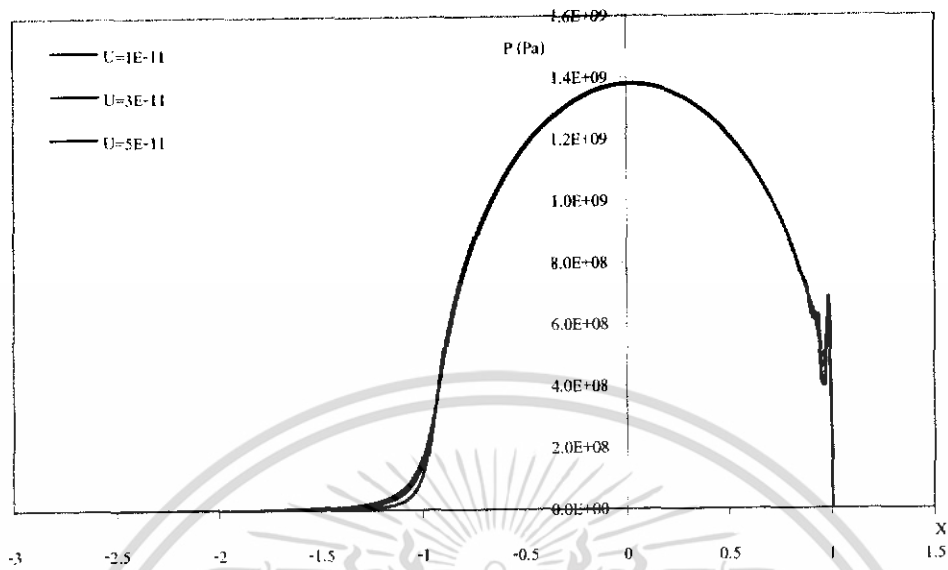


รูปที่ 5-11 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50million cycles

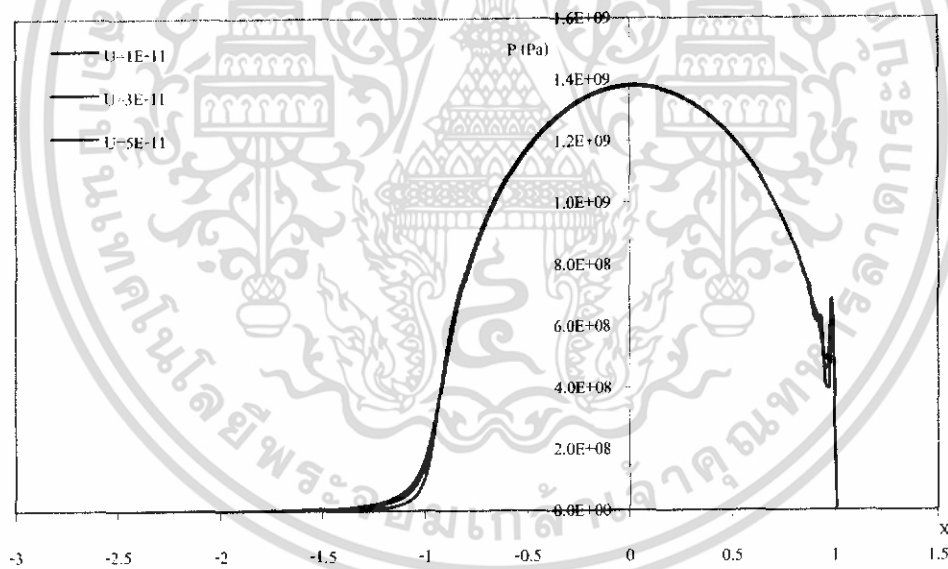


รูปที่ 5-12 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

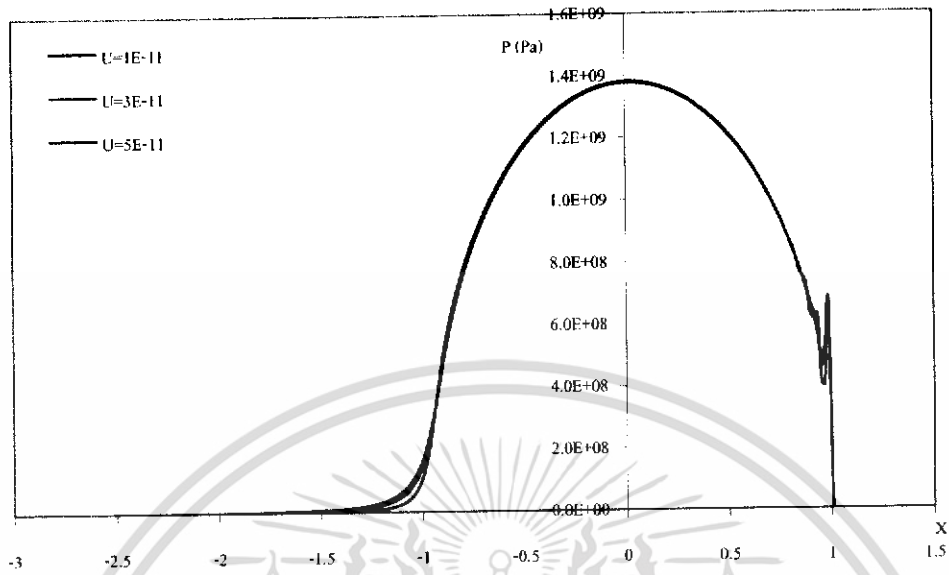


รูปที่ 5-13 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200million cycles

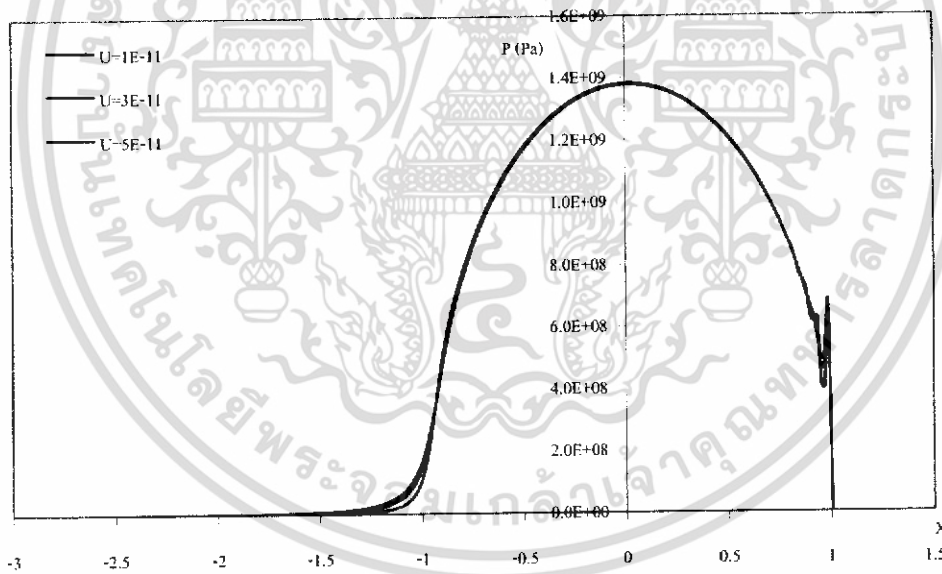


รูปที่ 5-14 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

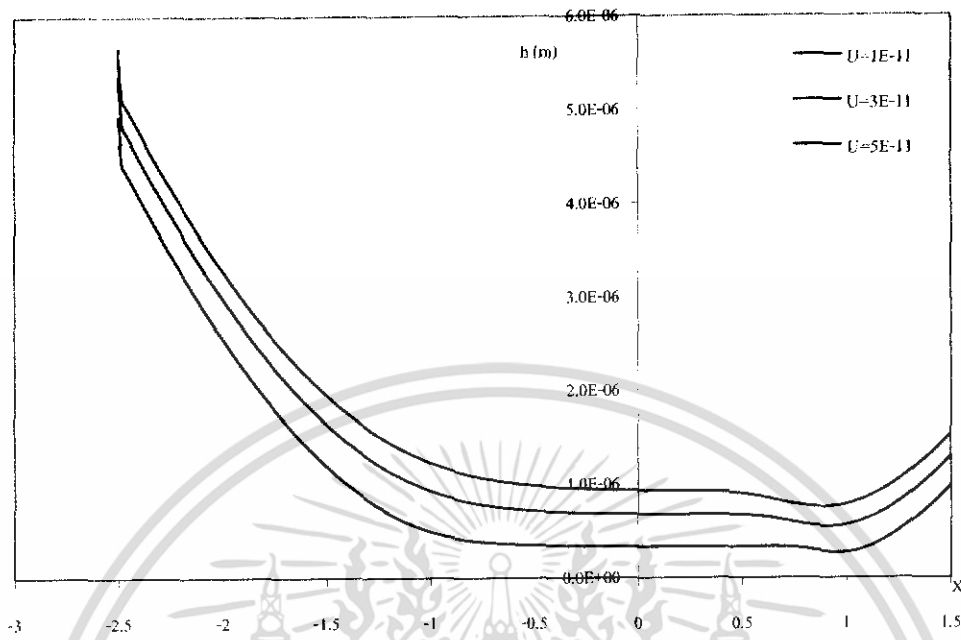


รูปที่ 5-15 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400million cycles

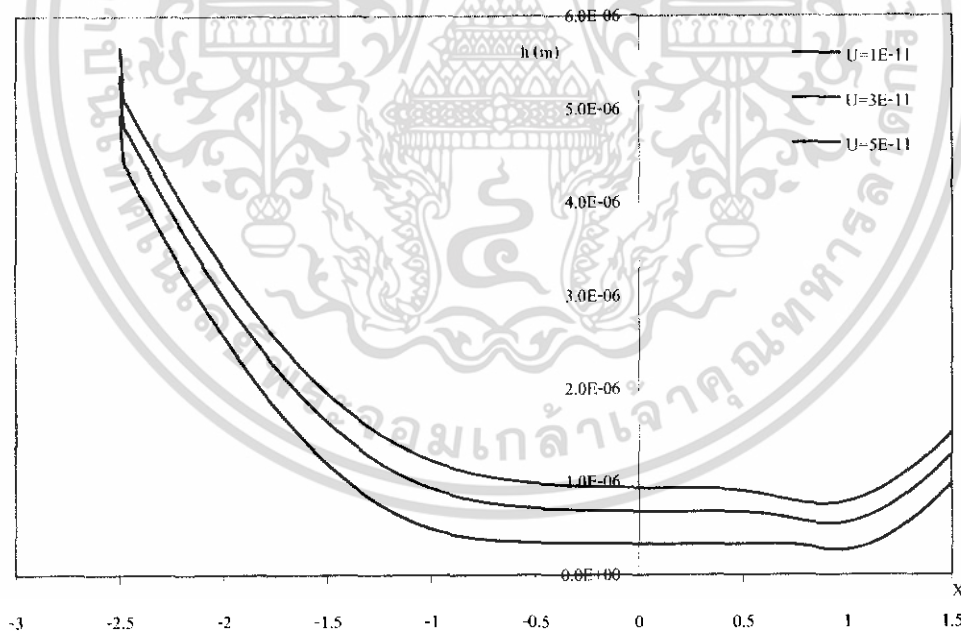


รูปที่ 5-16 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

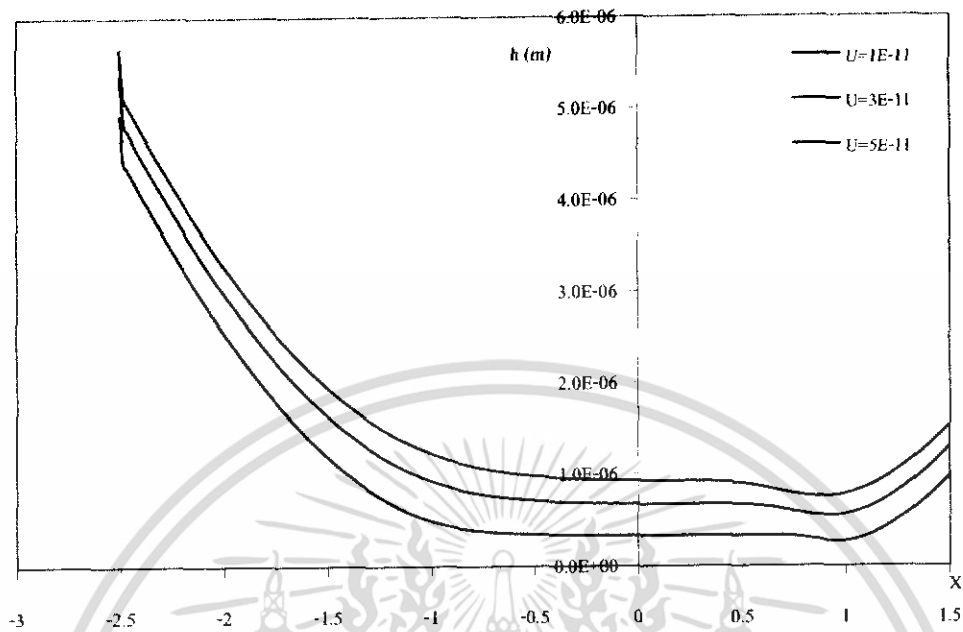


รูปที่ 5-17 กราฟความหนาที่ลดลงของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50million cycles

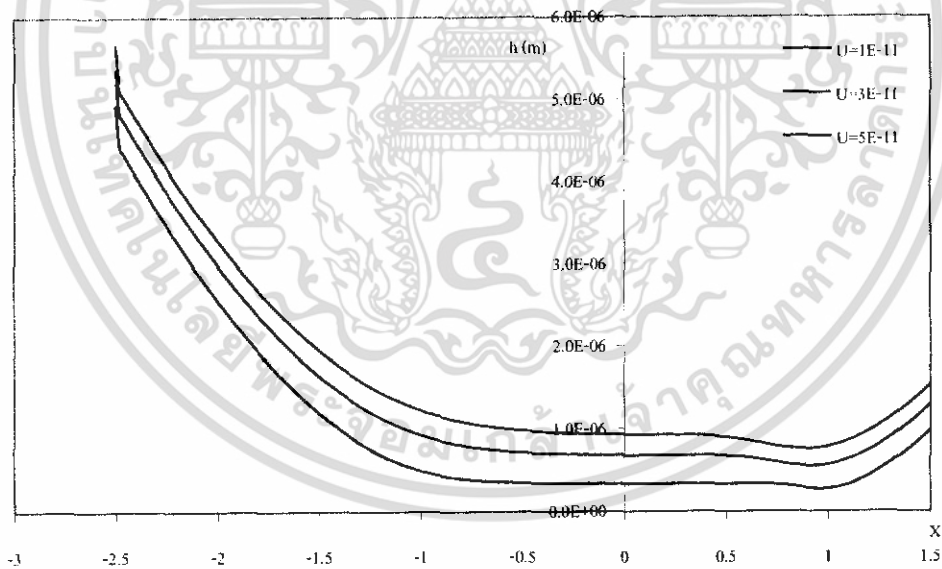


รูปที่ 5-18 กราฟความหนาที่ลดลงของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

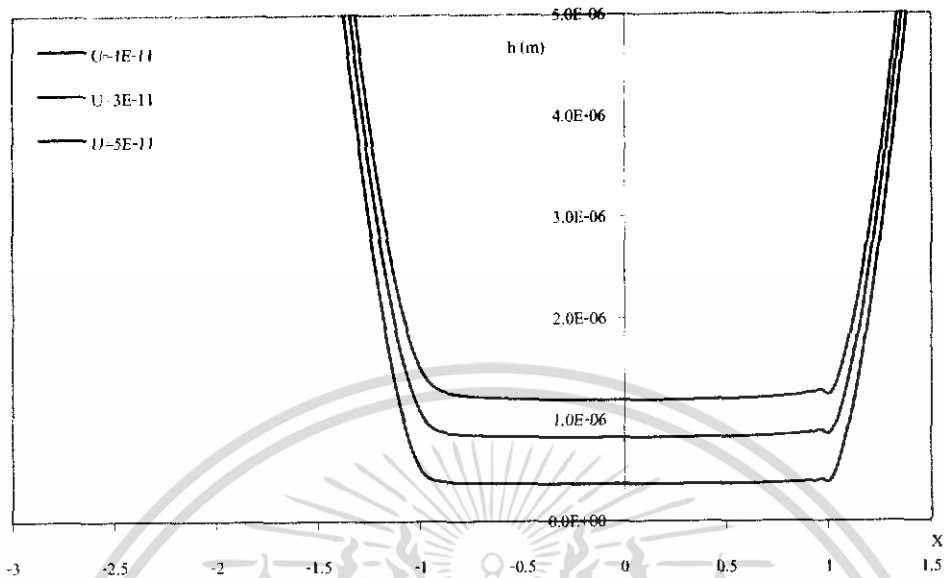


รูปที่ 5-19 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200million cycles

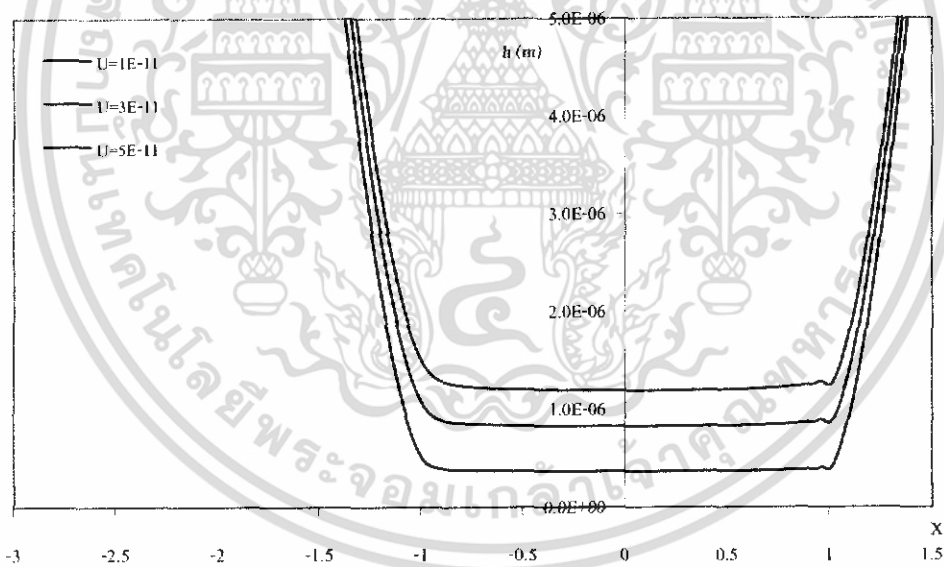


รูปที่ 5-20 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

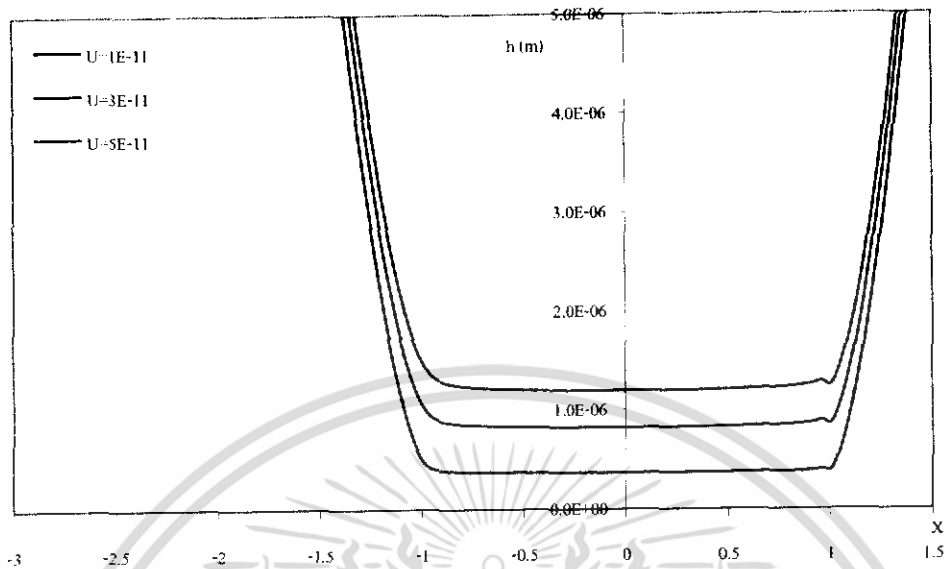


รูปที่ 5-21 กราฟความหนาที่สึกของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50million cycles

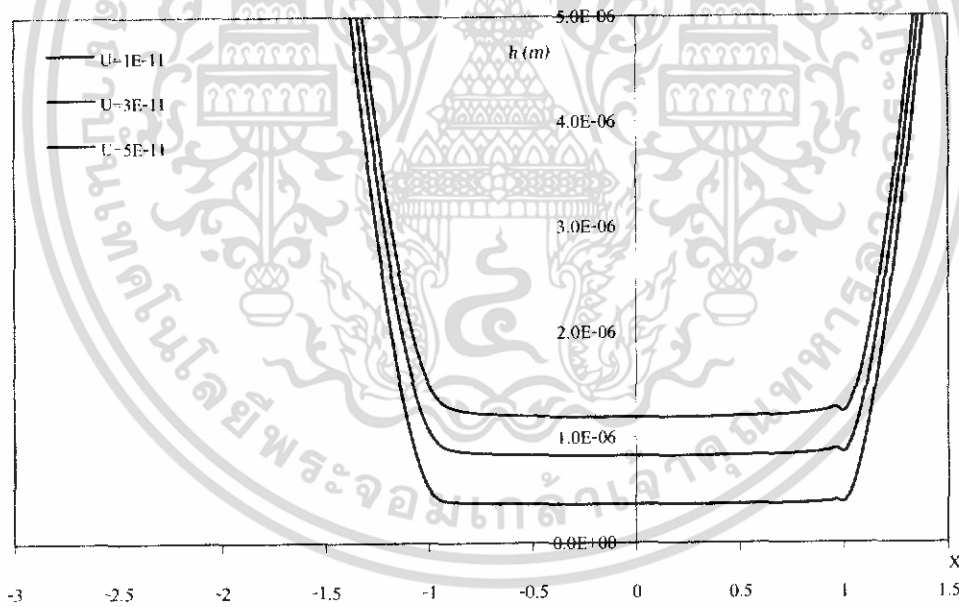


รูปที่ 5-22 กราฟความหนาที่สึกของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

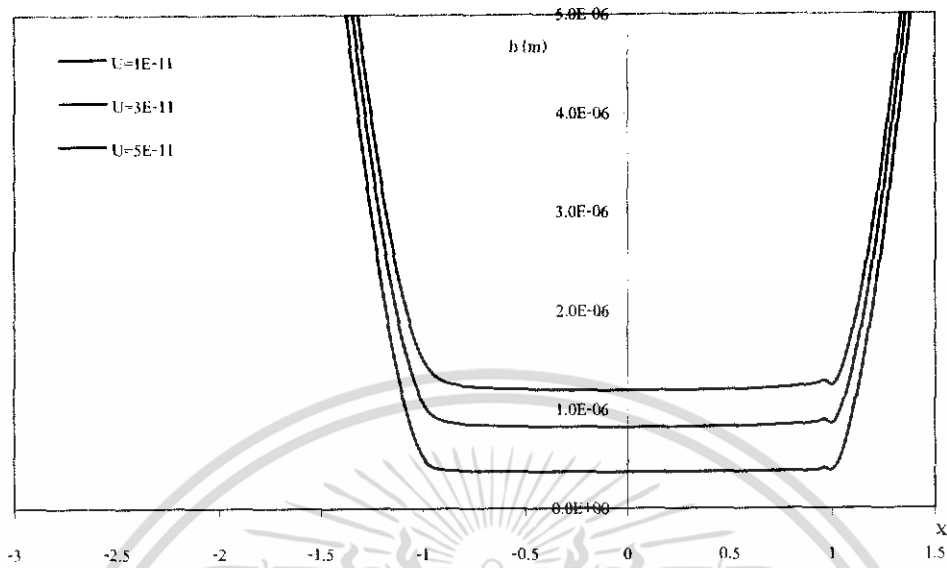


รูปที่ 5-23 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200million cycles

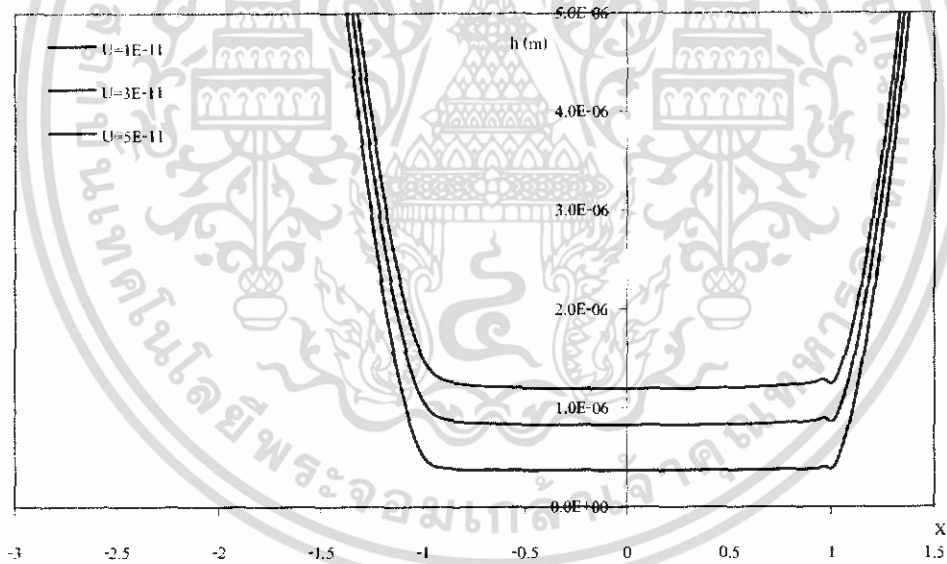


รูปที่ 5-24 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

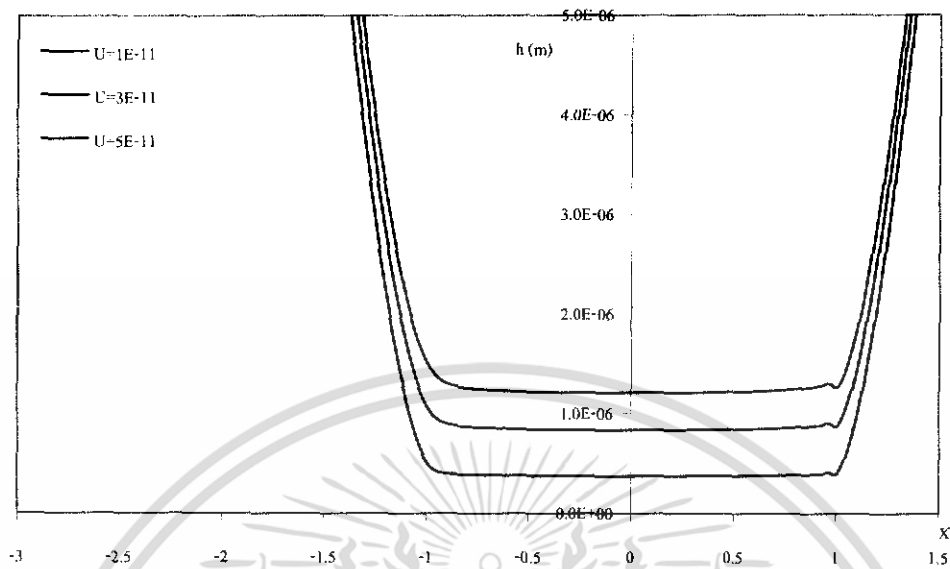


รูปที่ 5-25 กราฟความหนาที่ล้อมของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400million cycles

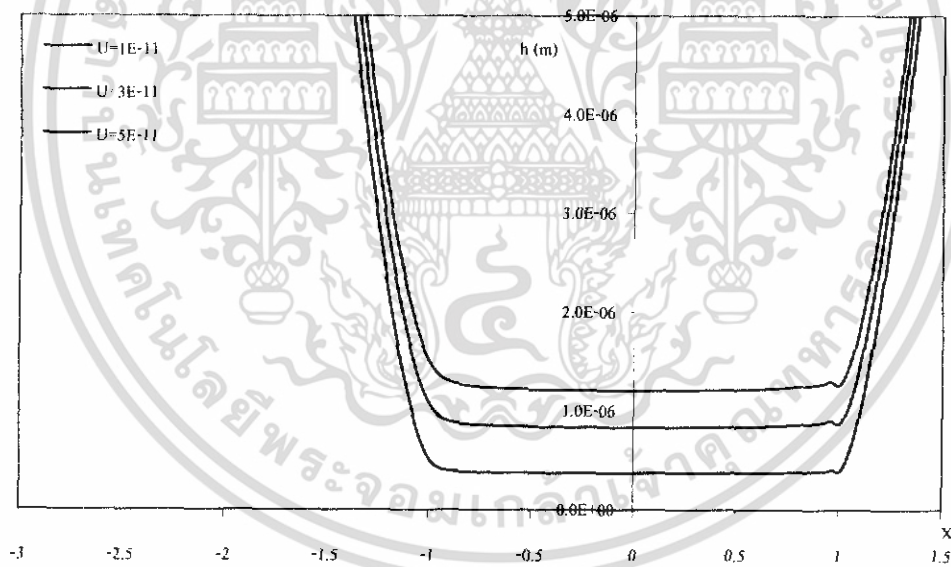


รูปที่ 5-26 กราฟความหนาที่ล้อมของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

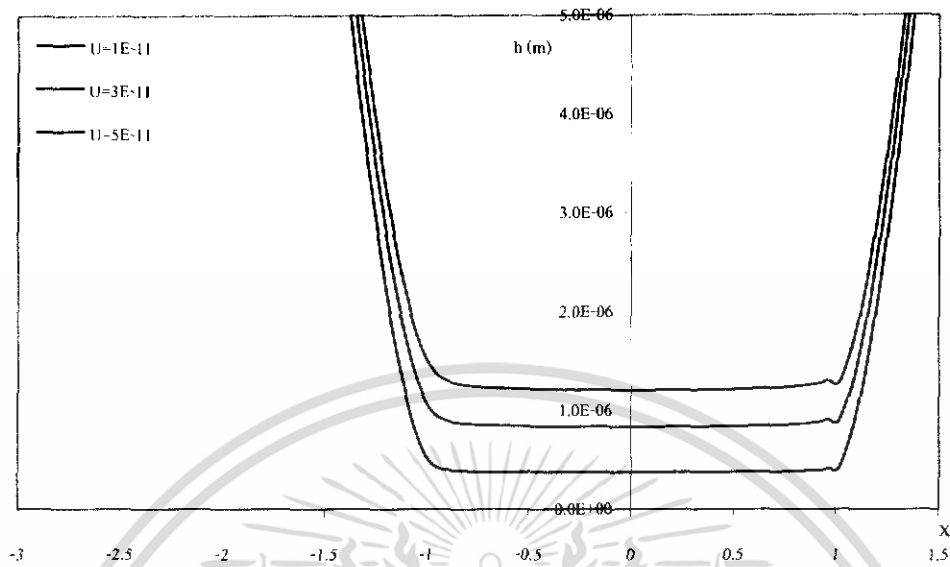


รูปที่ 5-27 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200$  GPa,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

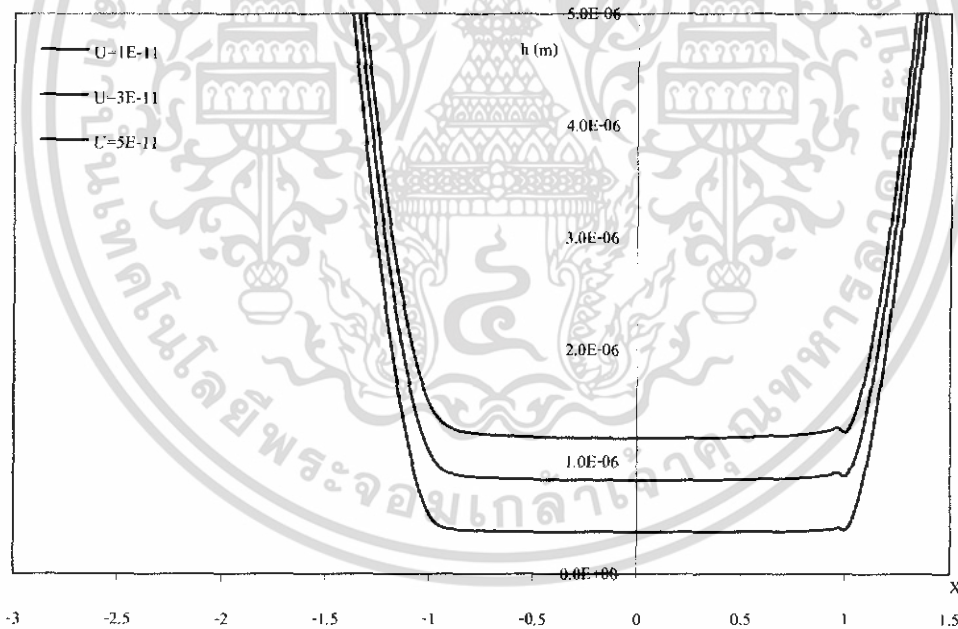


รูปที่ 5-28 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200$  GPa,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

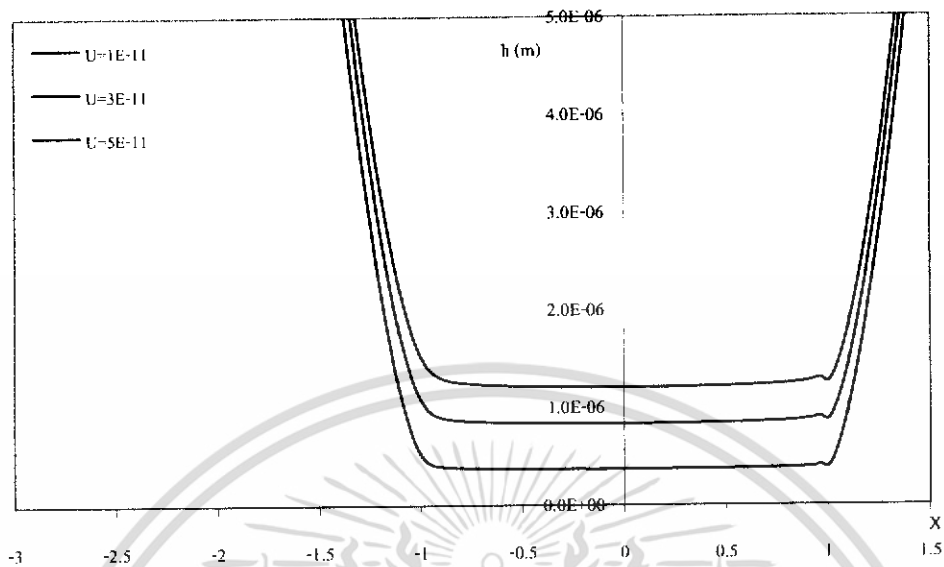


รูปที่ 5-29 กราฟความหนาที่ล้นของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

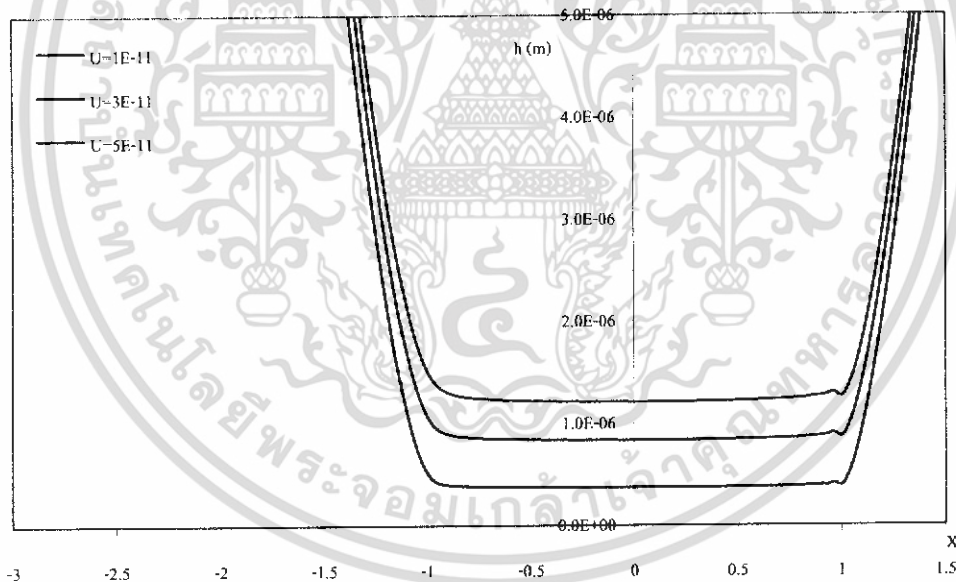


รูปที่ 5-30 กราฟความหนาที่ล้นของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



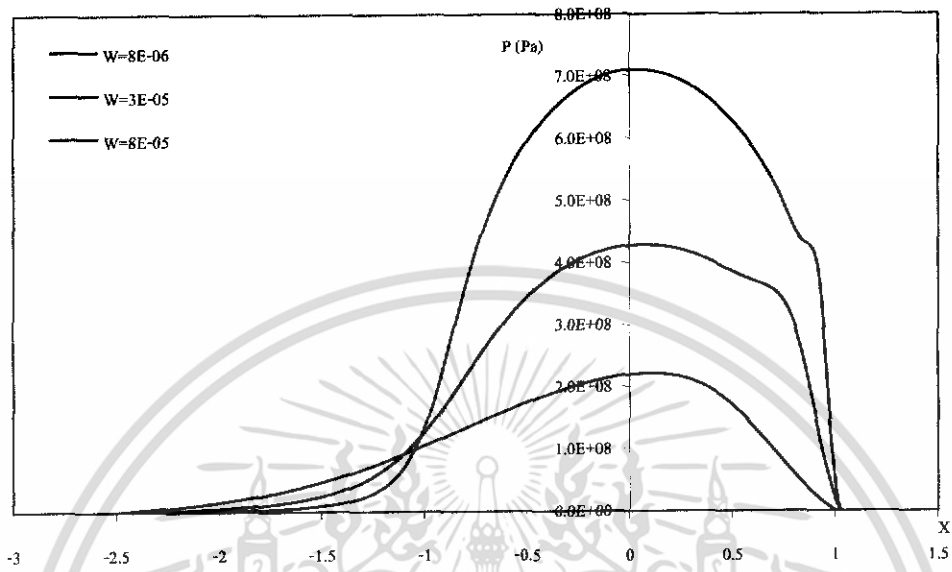
รูปที่ 5-31 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-7}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles



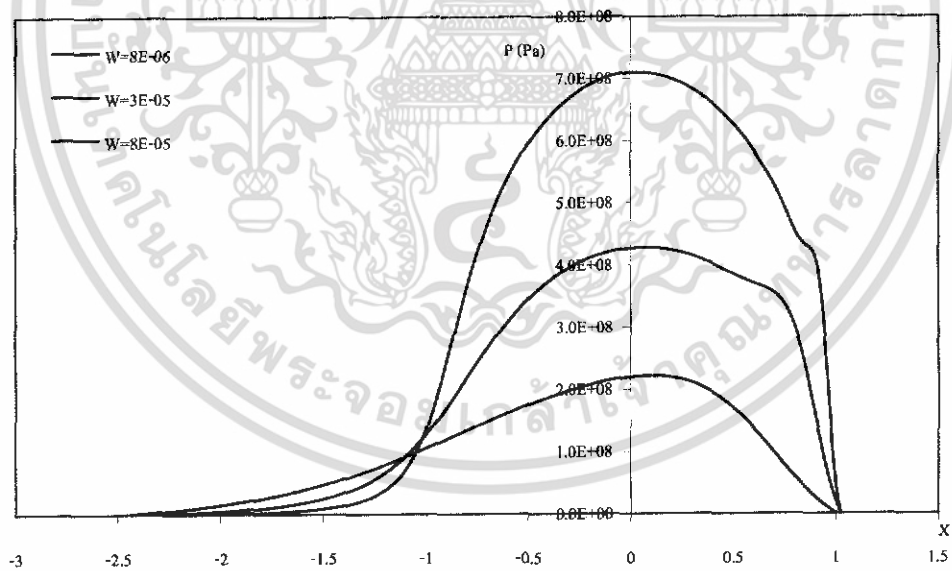
รูปที่ 5-32 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-7}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การเปลี่ยนแปลง

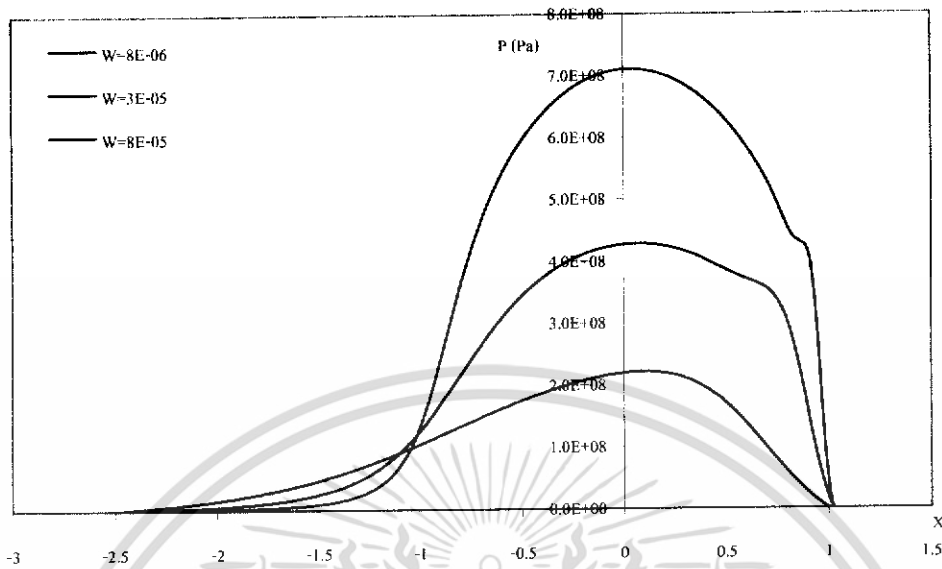


รูปที่ 5-33 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

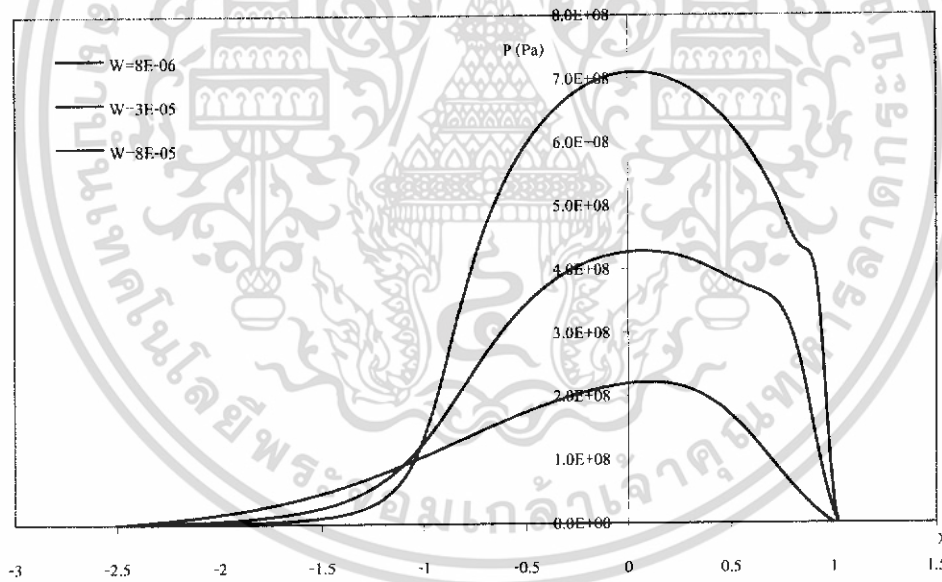


รูปที่ 5-34 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

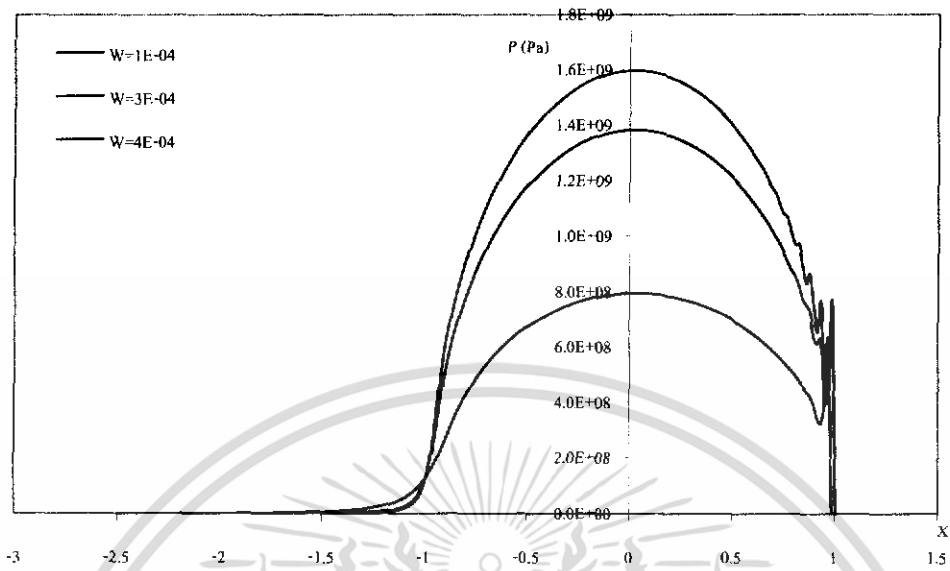


รูปที่ 5-35 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

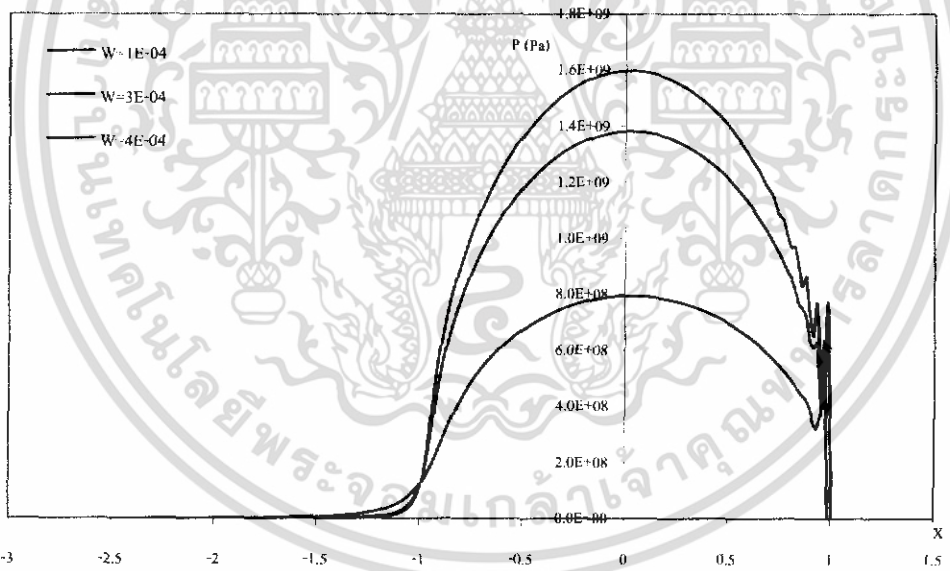


รูปที่ 5-36 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

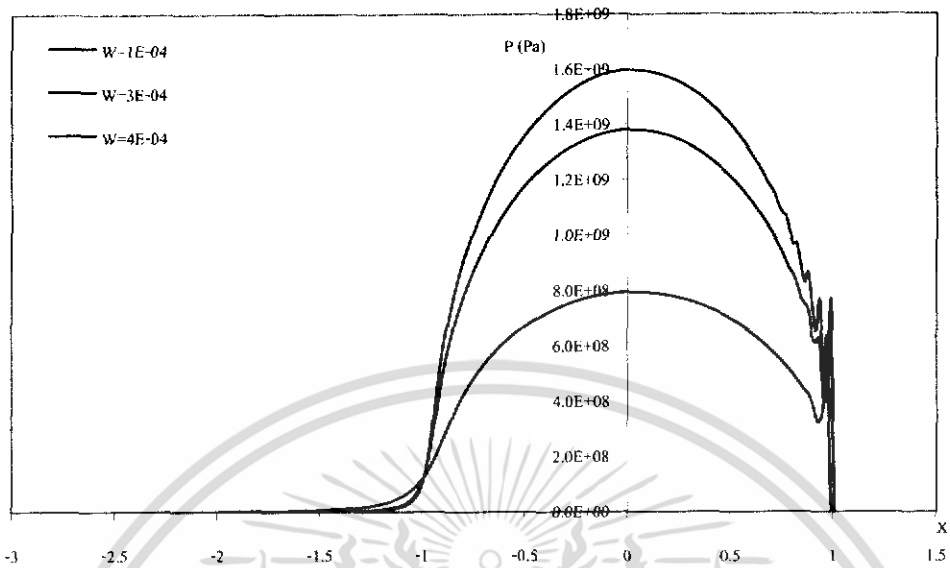


รูปที่ 5-37 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

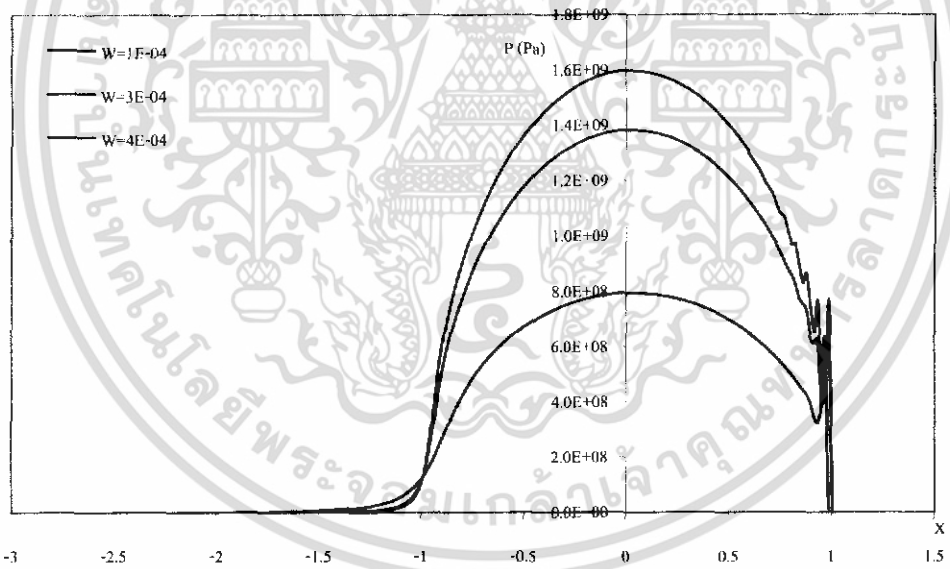


รูปที่ 5-38 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

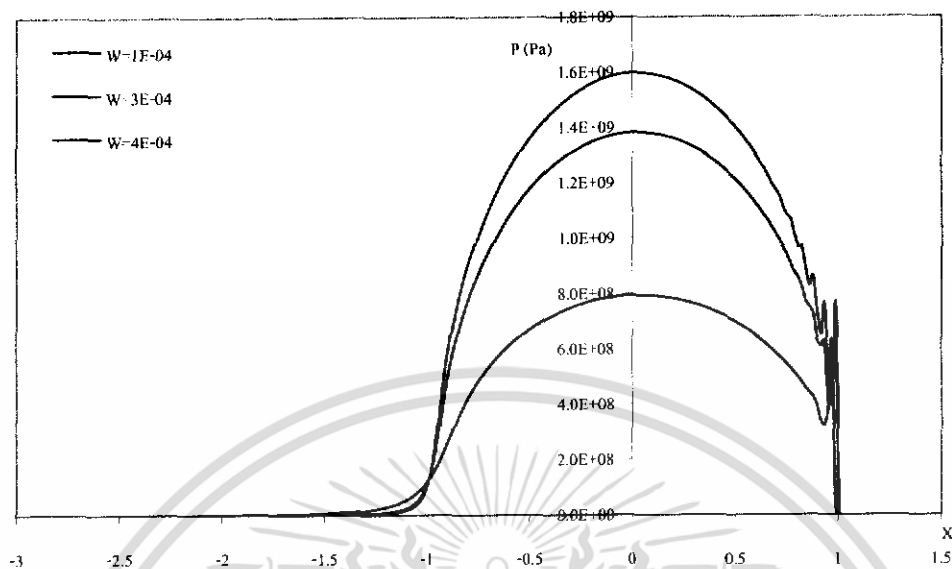


รูปที่ 5-39 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

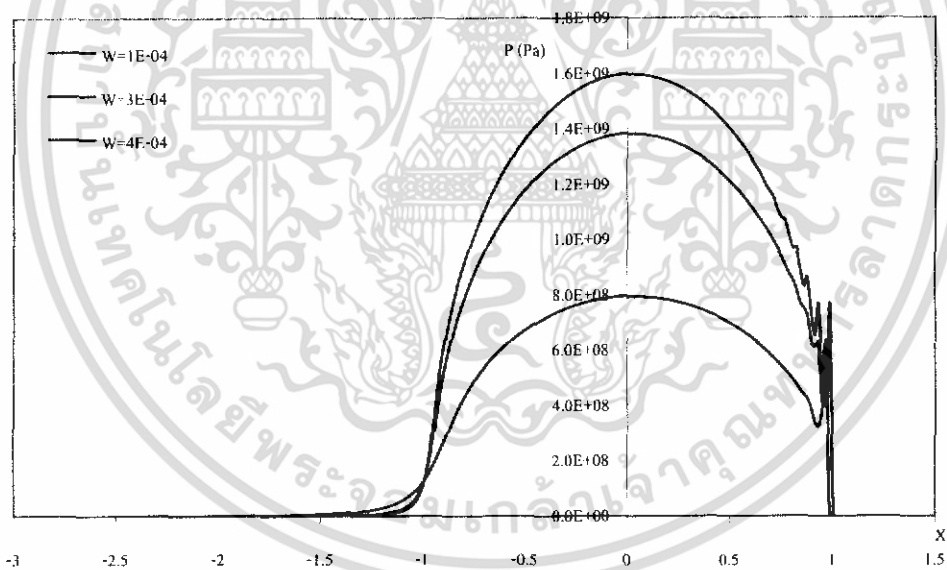


รูปที่ 5-40 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

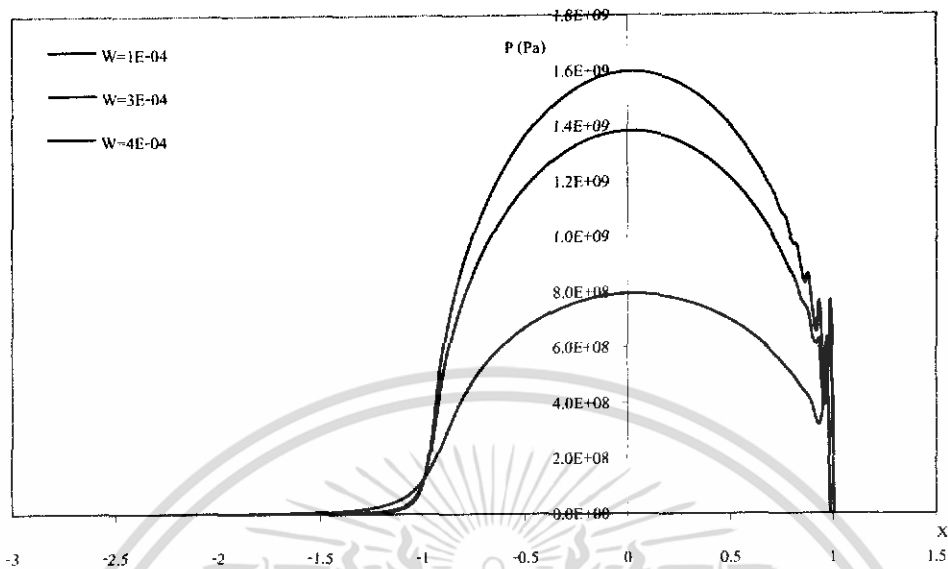


รูปที่ 5-41 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

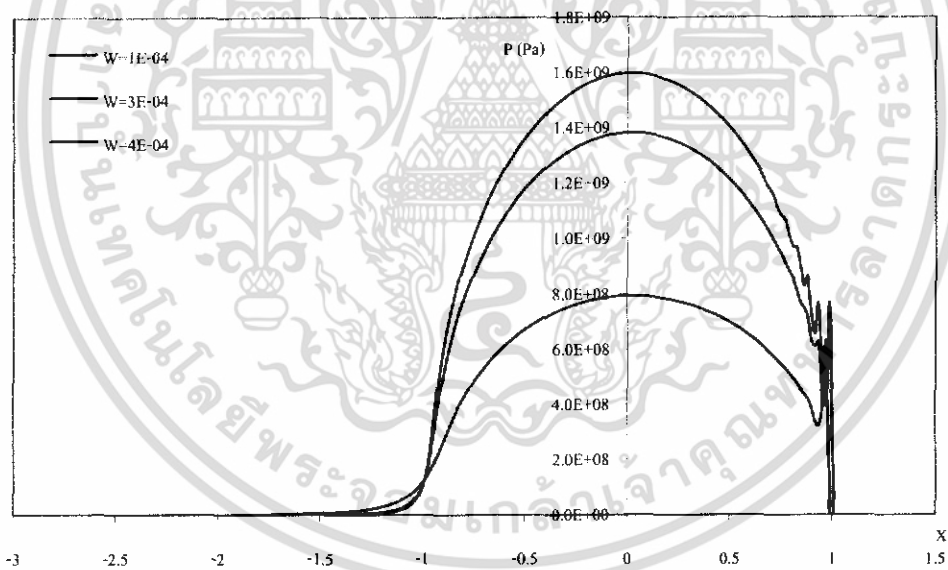


รูปที่ 5-42 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

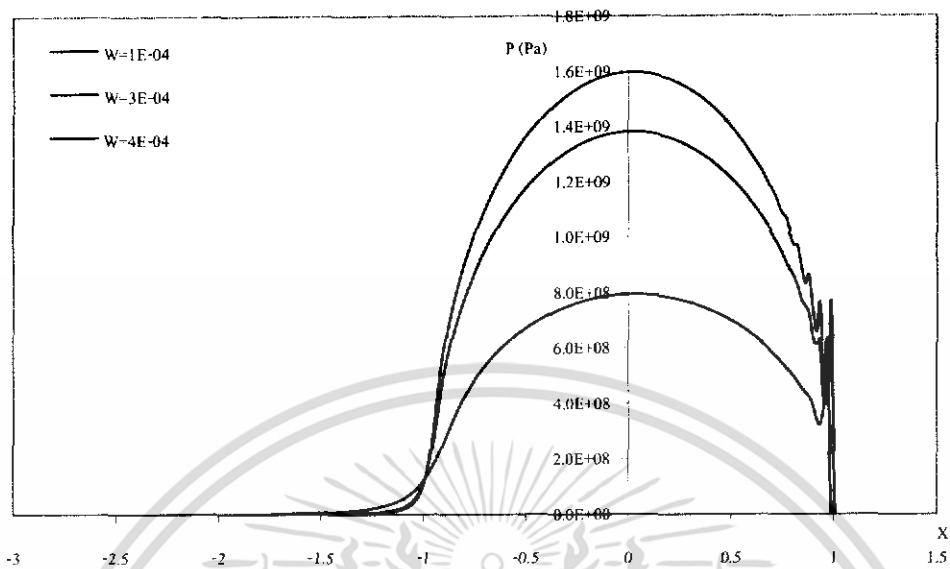


รูปที่ 5-43 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

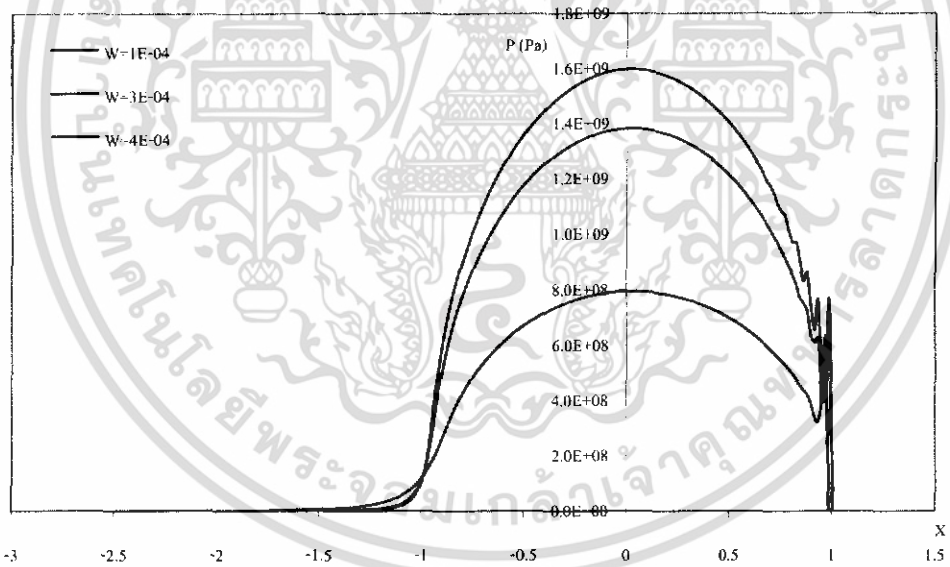


รูปที่ 5-44 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

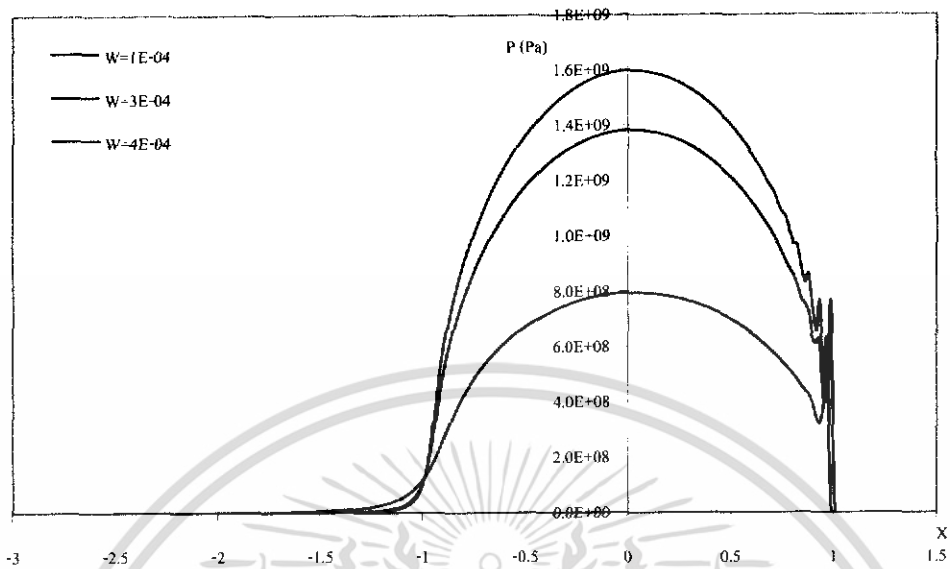


รูปที่ 5-45 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

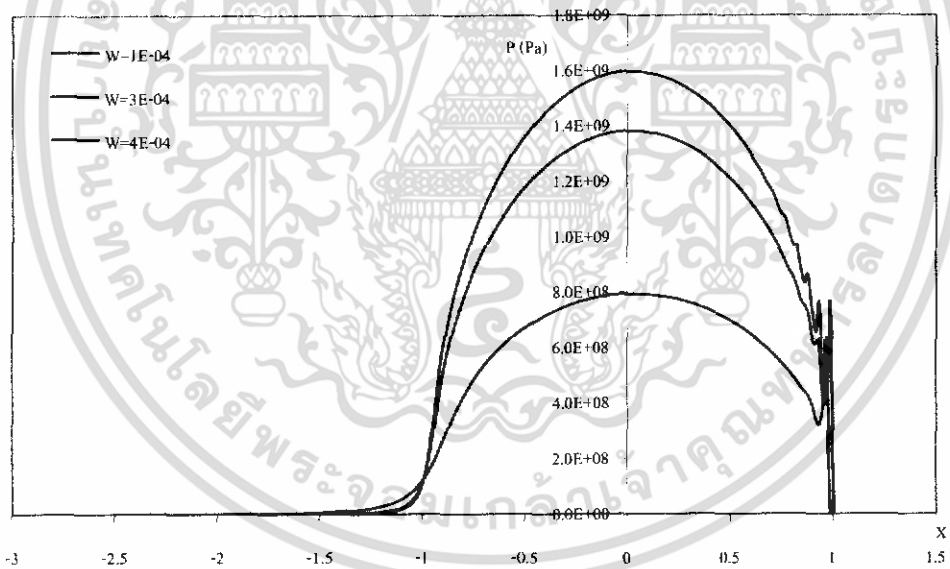


รูปที่ 5-46 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

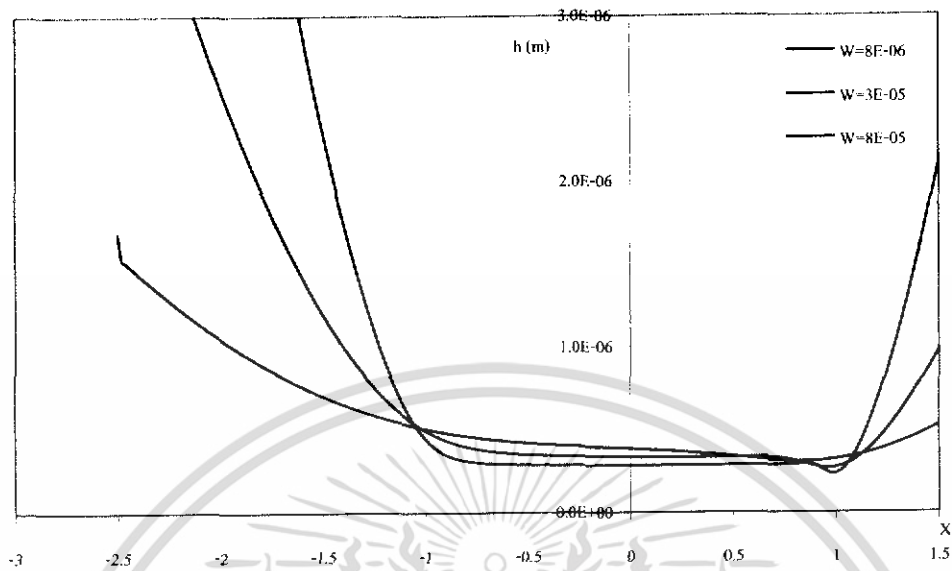


รูปที่ 5-47 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

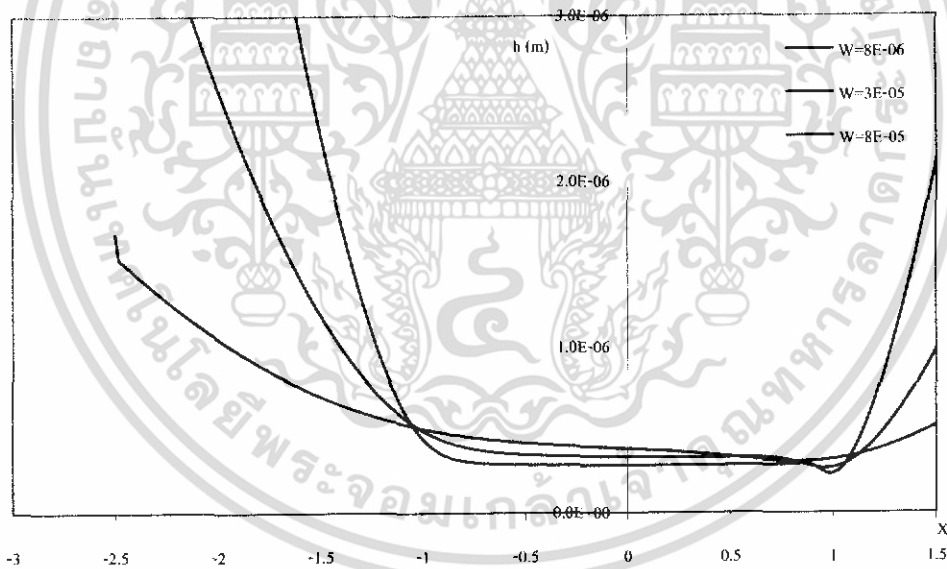


รูปที่ 5-48 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

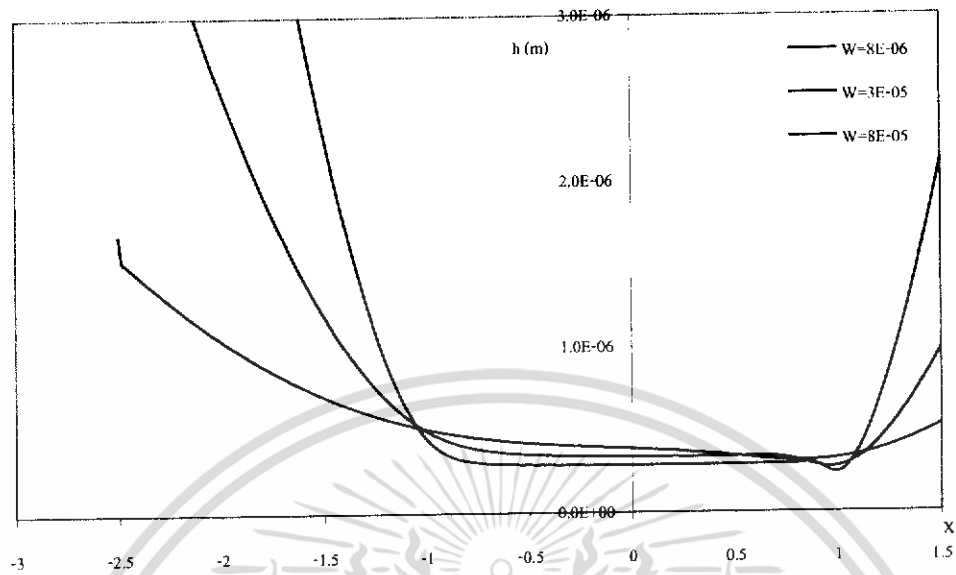


รูปที่ 5-49 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

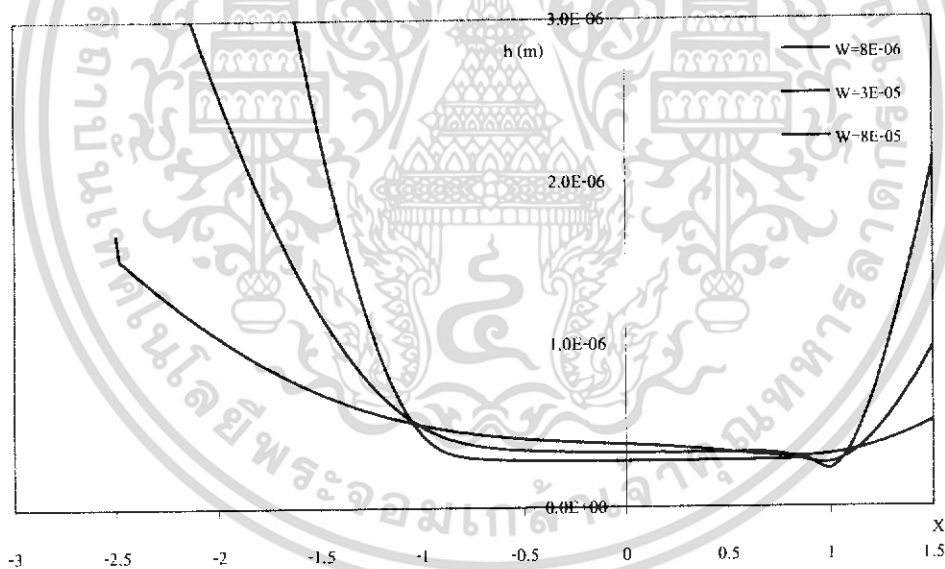


รูปที่ 5-50 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

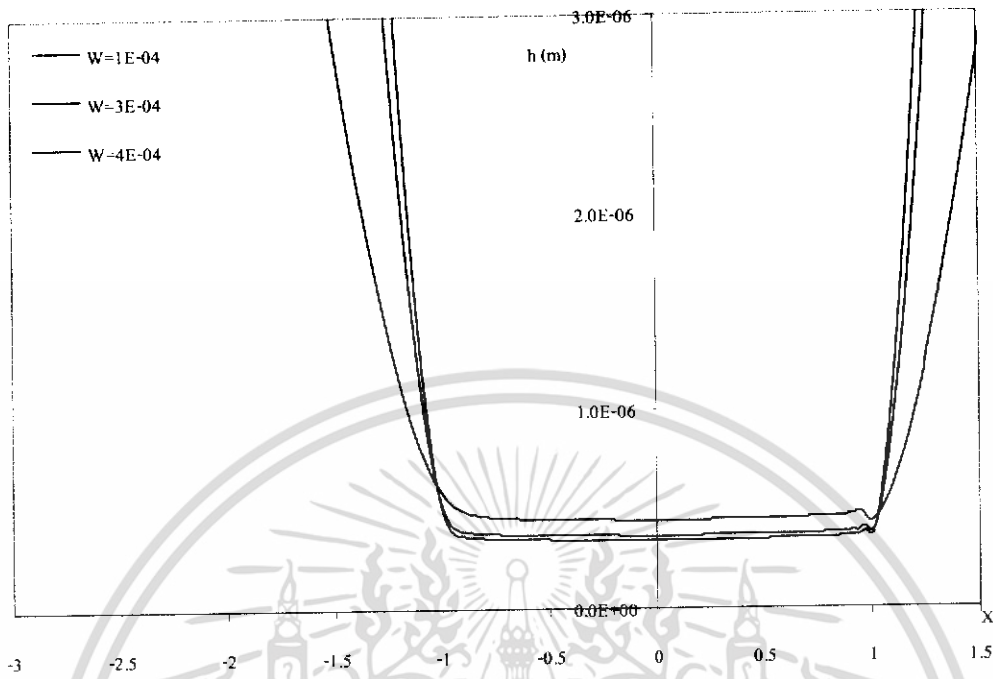


รูปที่ 5-51 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

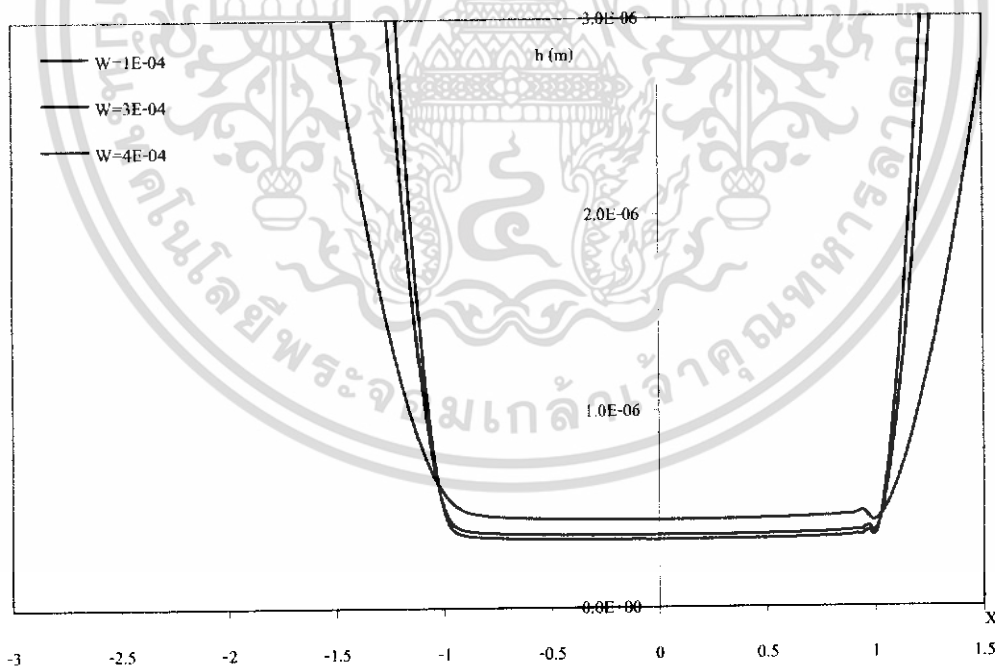


รูปที่ 5-52 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

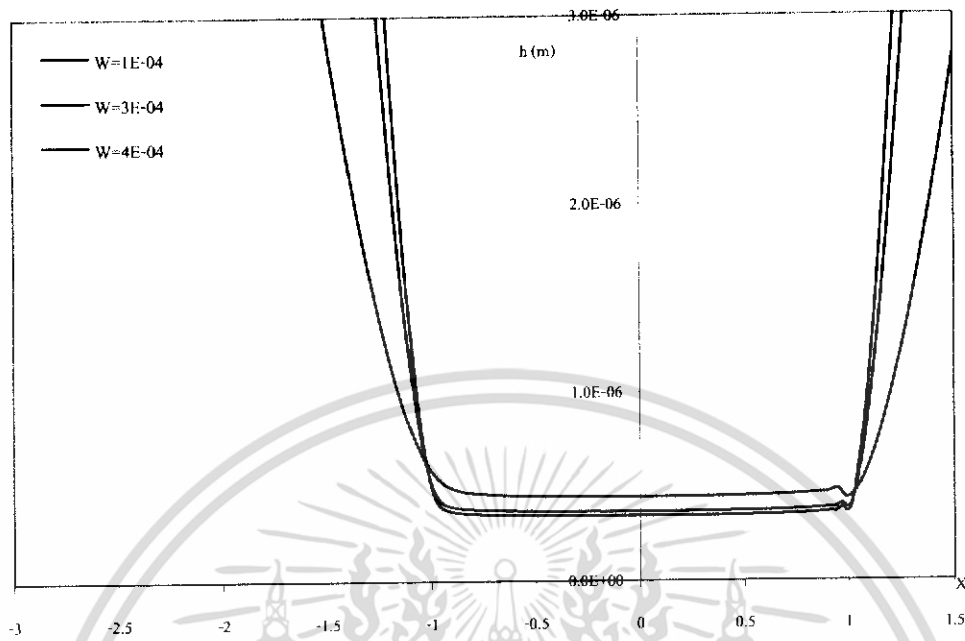


รูปที่ 5-53 กราฟความหนาที่ล้นของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

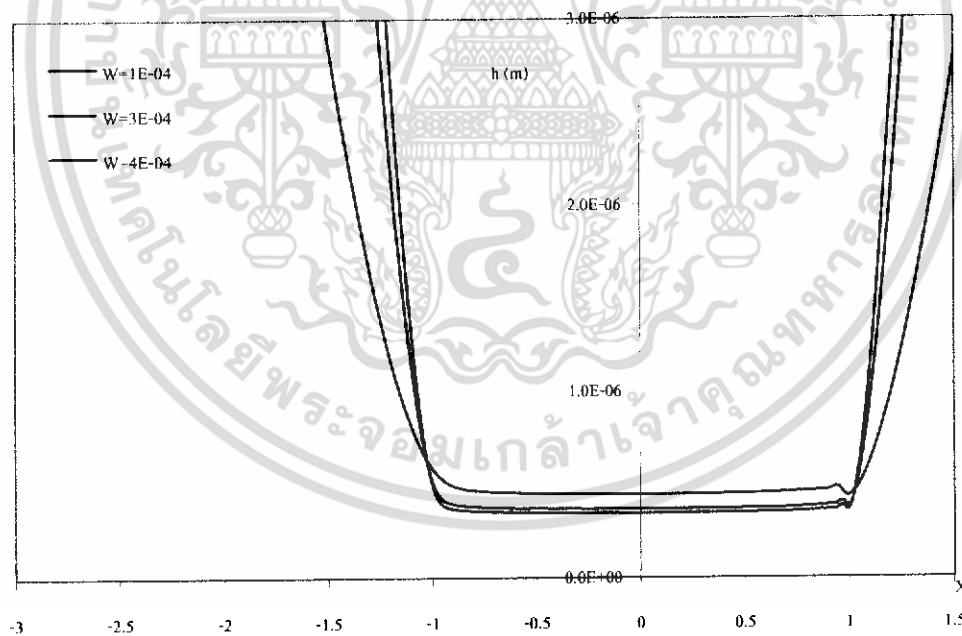


รูปที่ 5-54 กราฟความหนาที่ล้นของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

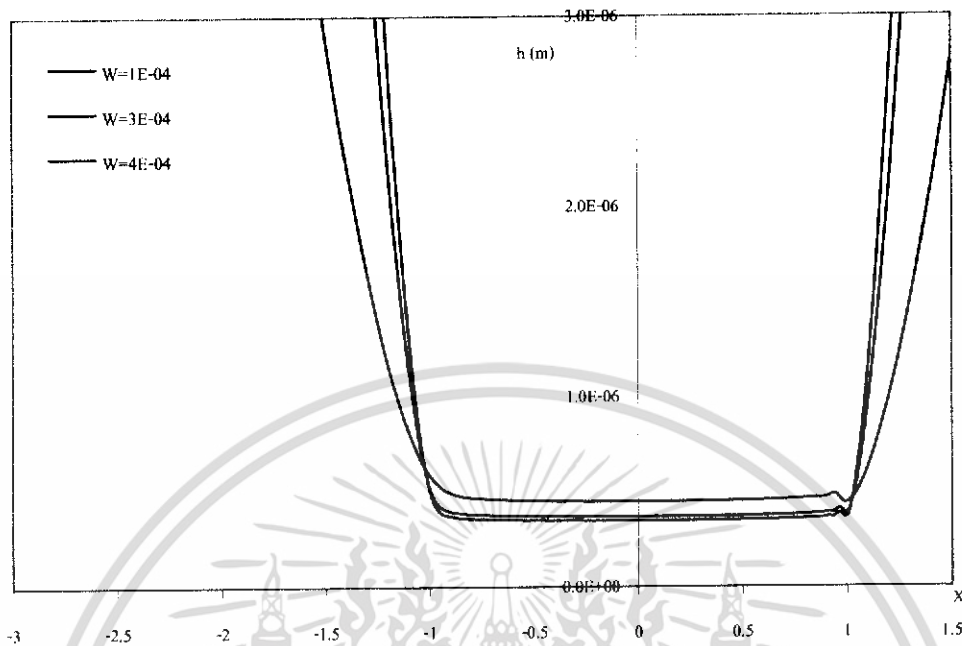


รูปที่ 5-55 กราฟความหนาที่เต็มของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

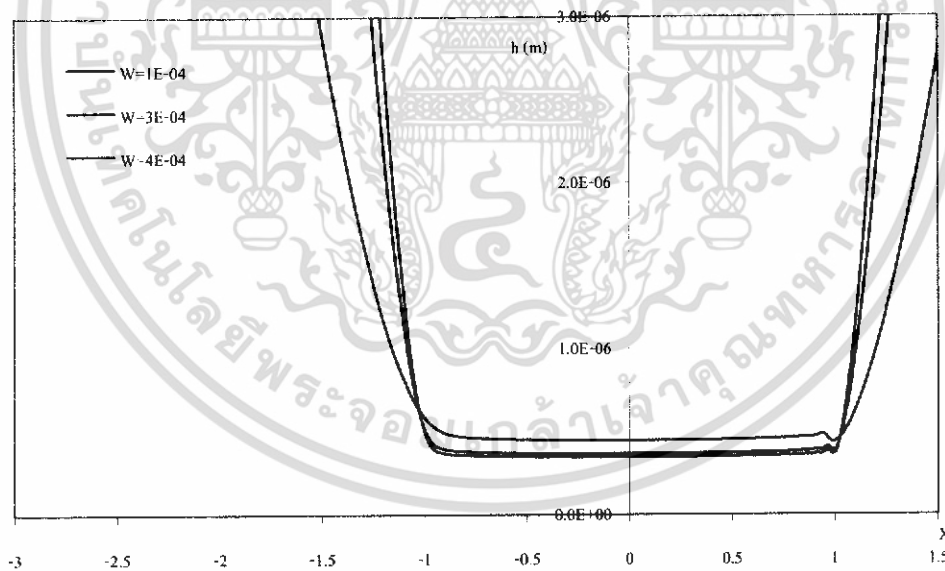


รูปที่ 5-56 กราฟความหนาที่เต็มของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

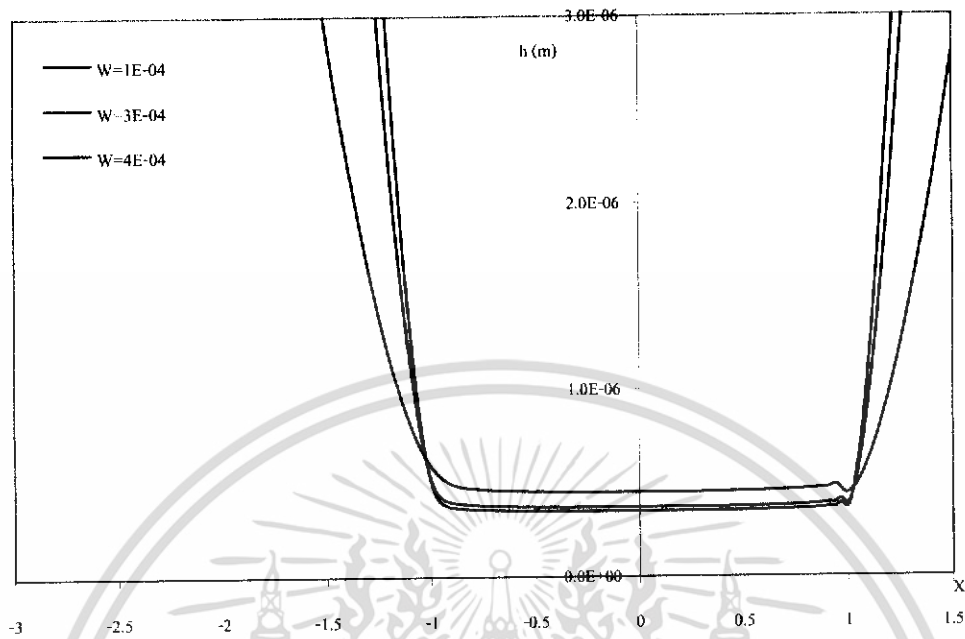


รูปที่ 5-57 กราฟความหนาที่ล้มของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

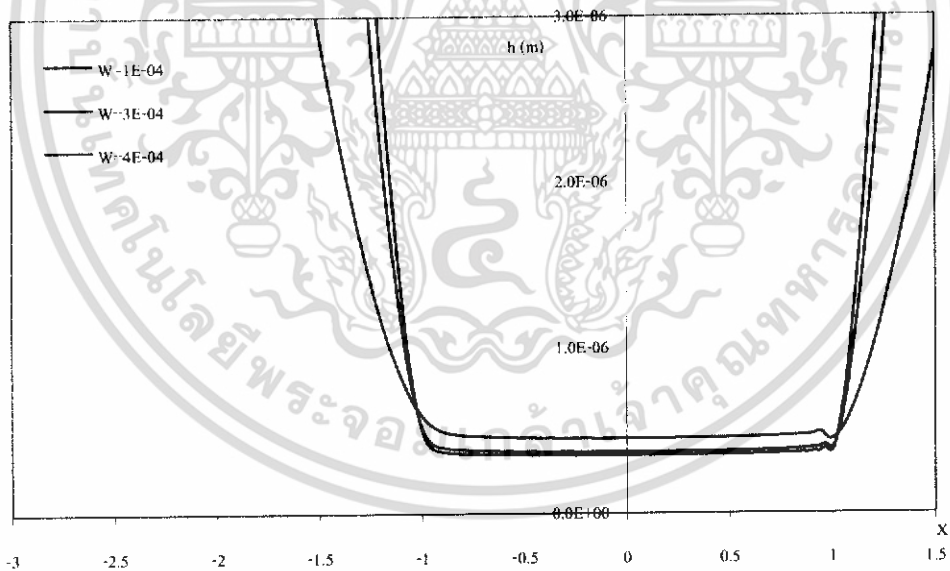


รูปที่ 5-58 กราฟความหนาที่ล้มของ SAE 40 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

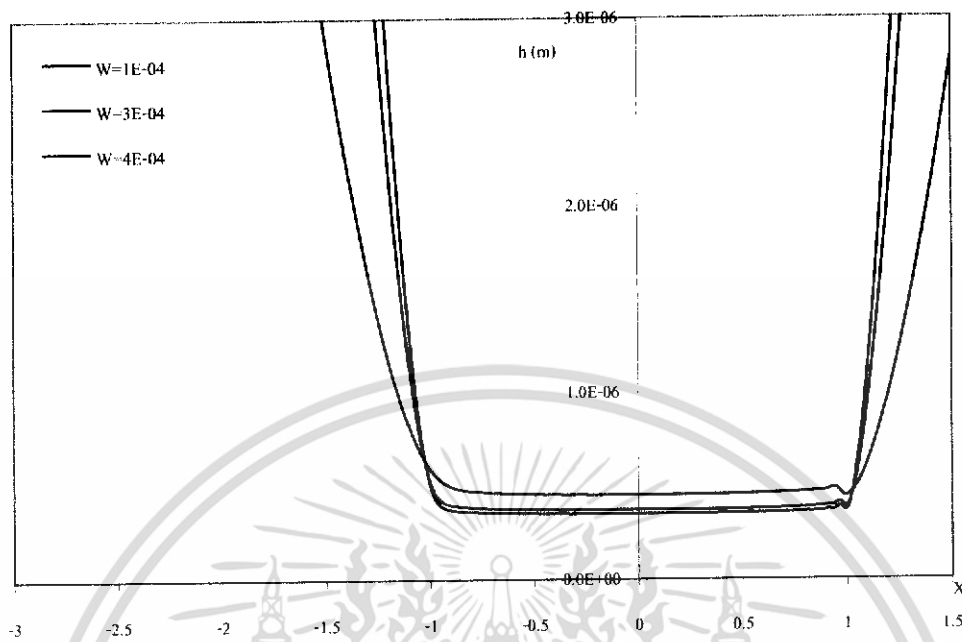


รูปที่ 5-59 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

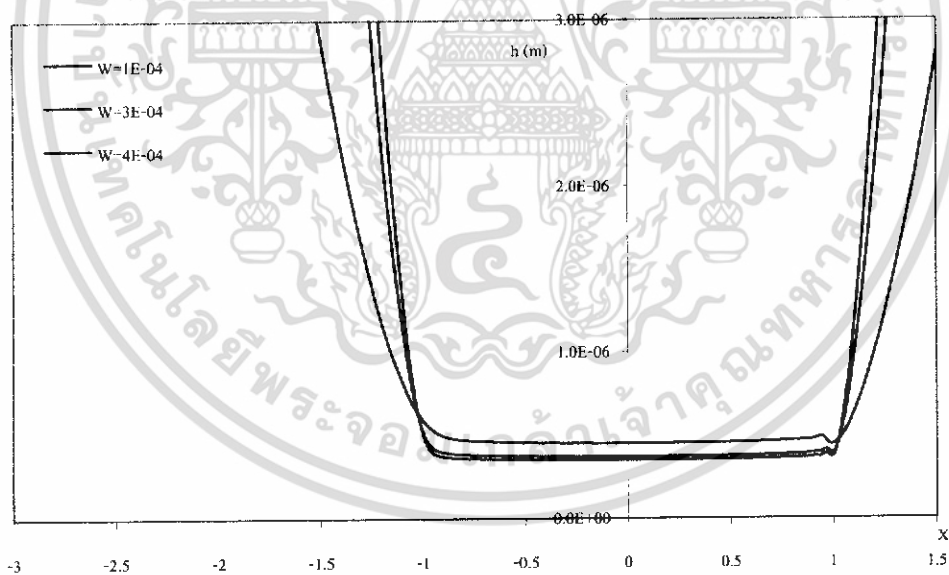


รูปที่ 5-60 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

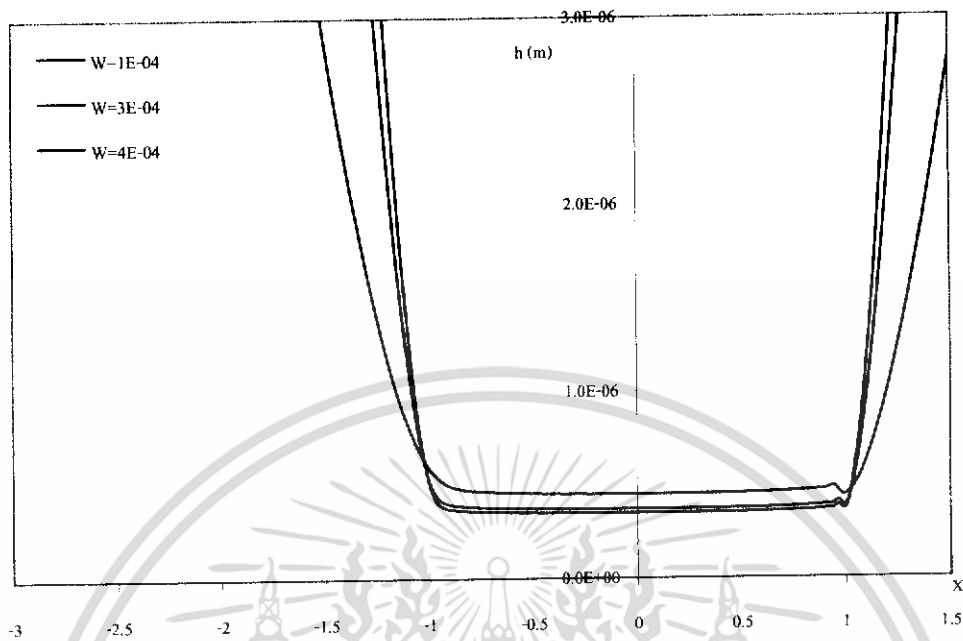


รูปที่ 5-61 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200$  GPa,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

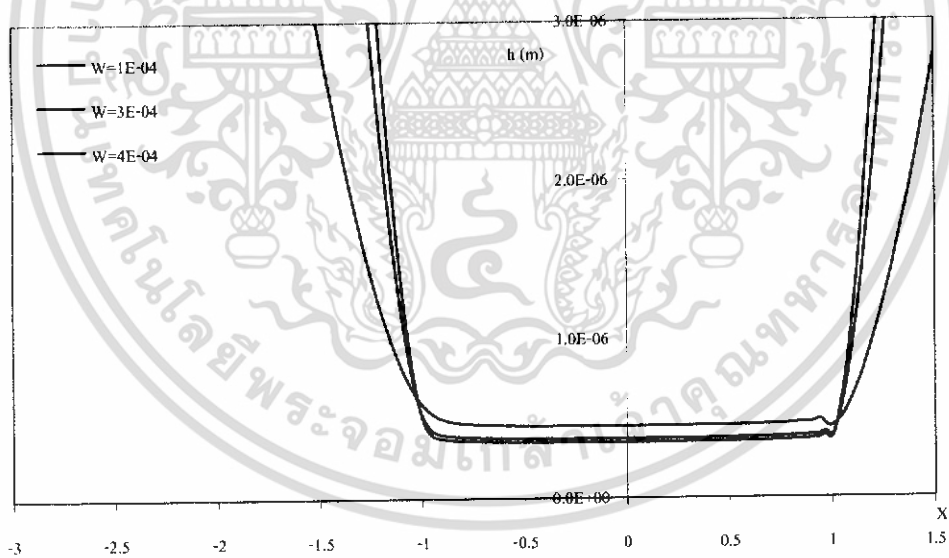


รูปที่ 5-62 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200$  GPa,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



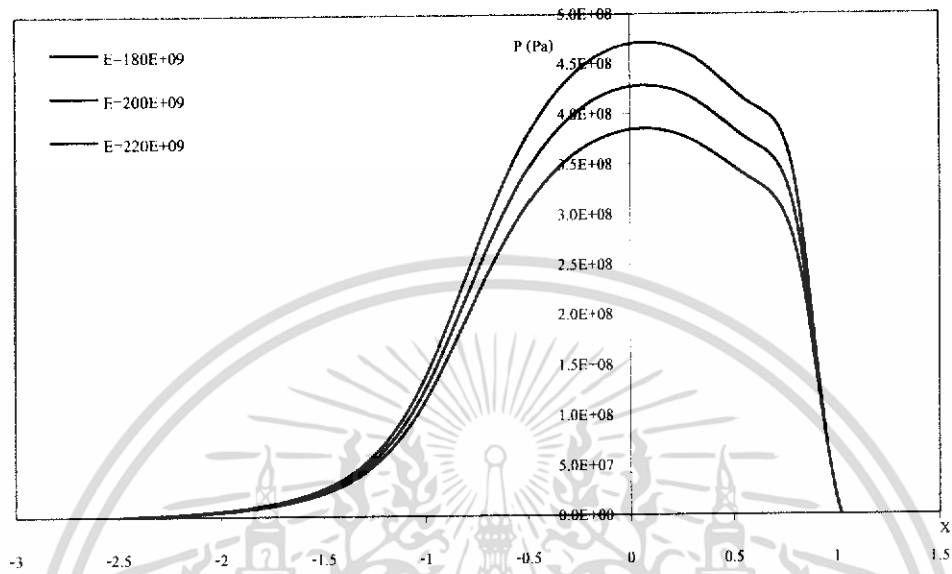
รูปที่ 5-63 กราฟความหนาที่ล้นของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles



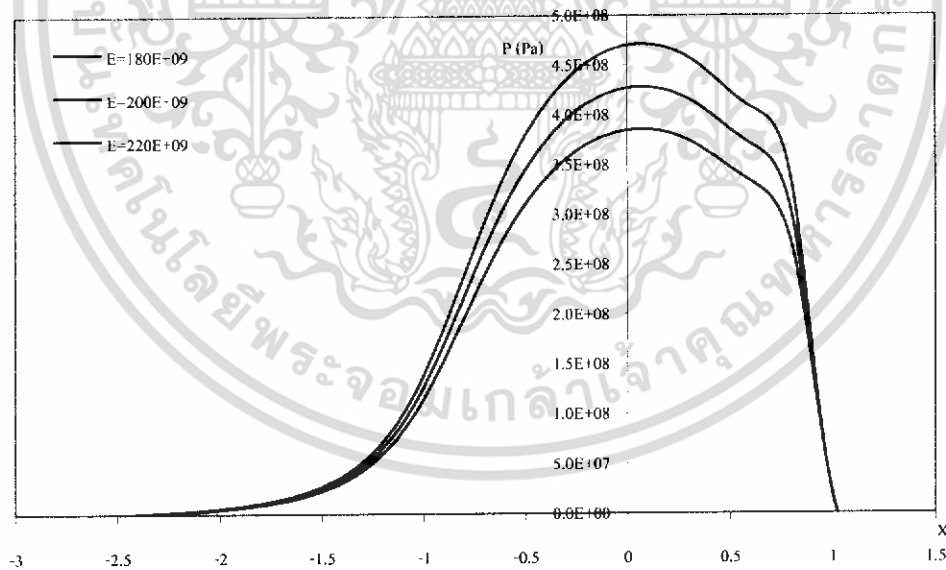
รูปที่ 5-64 กราฟความหนาที่ล้นของ SAE 90 เมื่อ  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ค่าอีลาสติคโมดูลัสเปลี่ยนแปลง

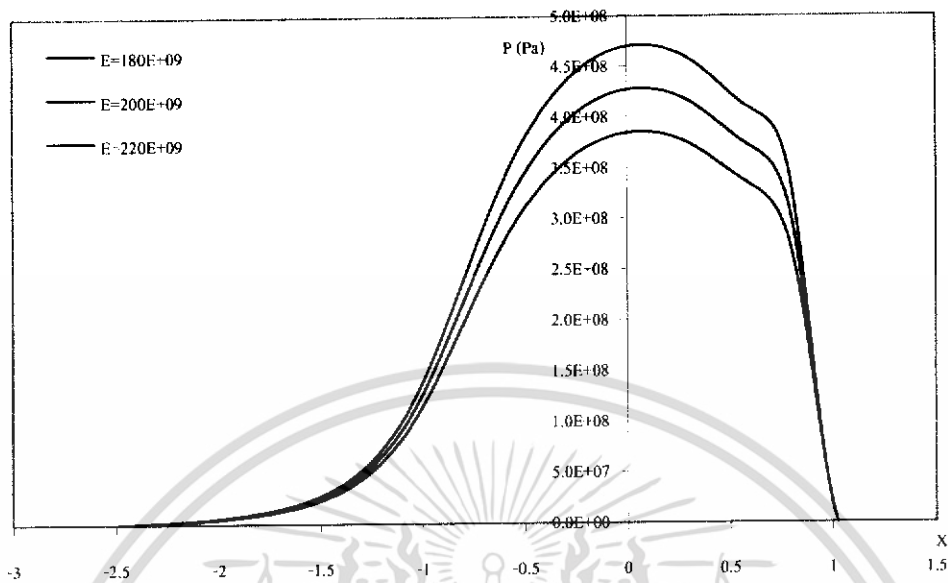


รูปที่ 5-65 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

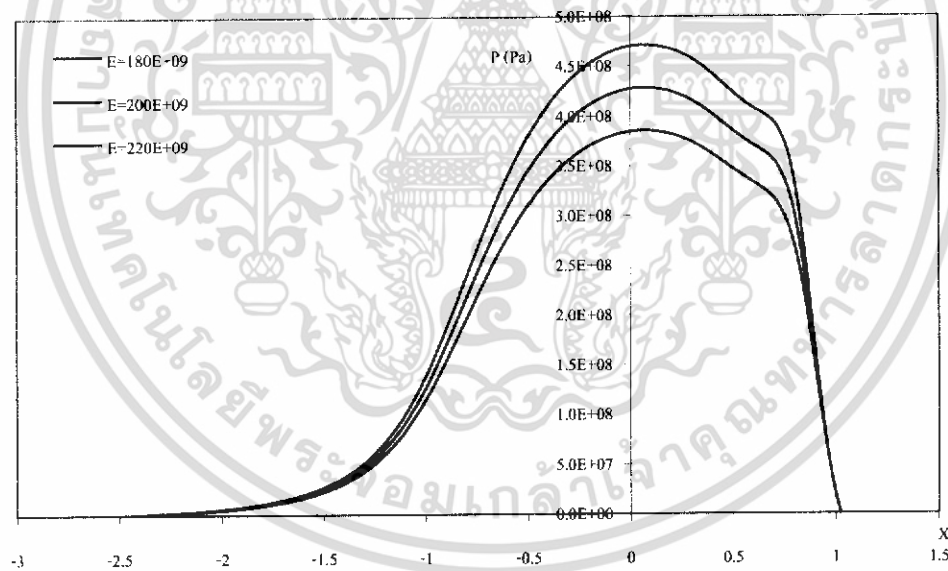


รูปที่ 5-66 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

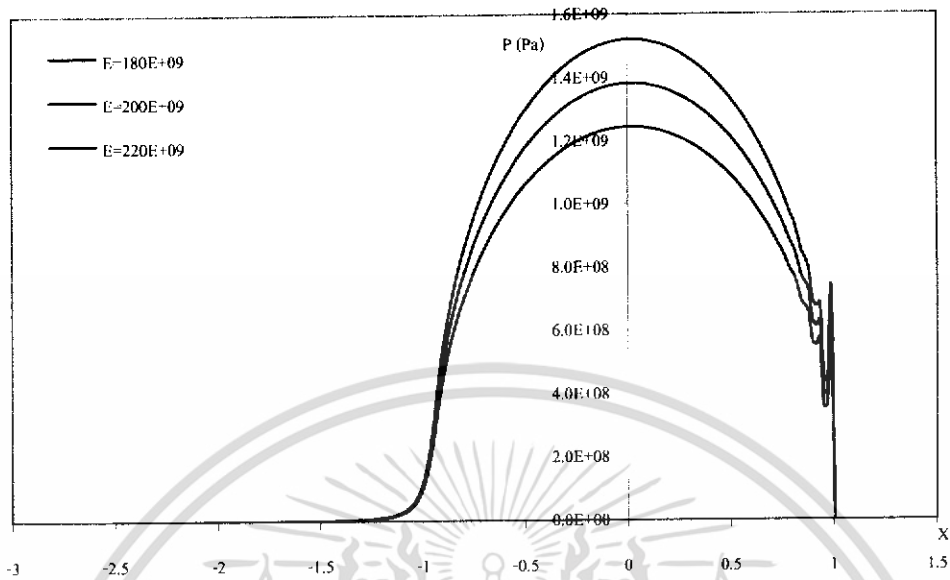


รูปที่ 5-67 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

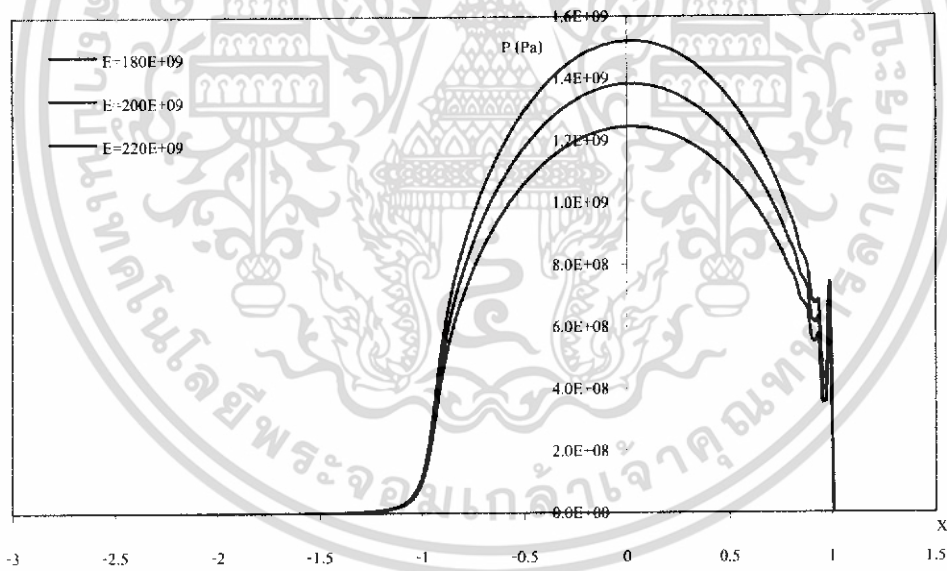


รูปที่ 5-68 กราฟความดันของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

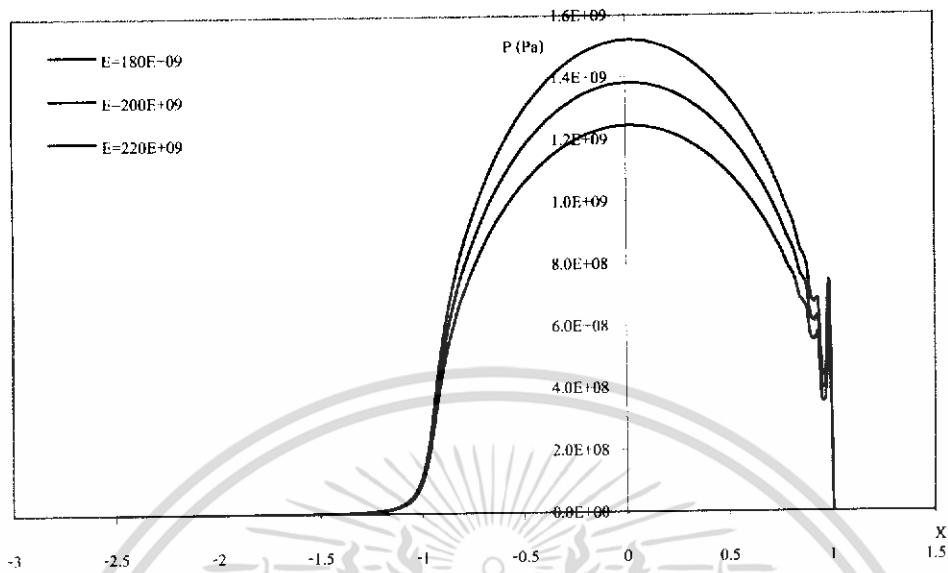


รูปที่ 5-69 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles



รูปที่ 5-70 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

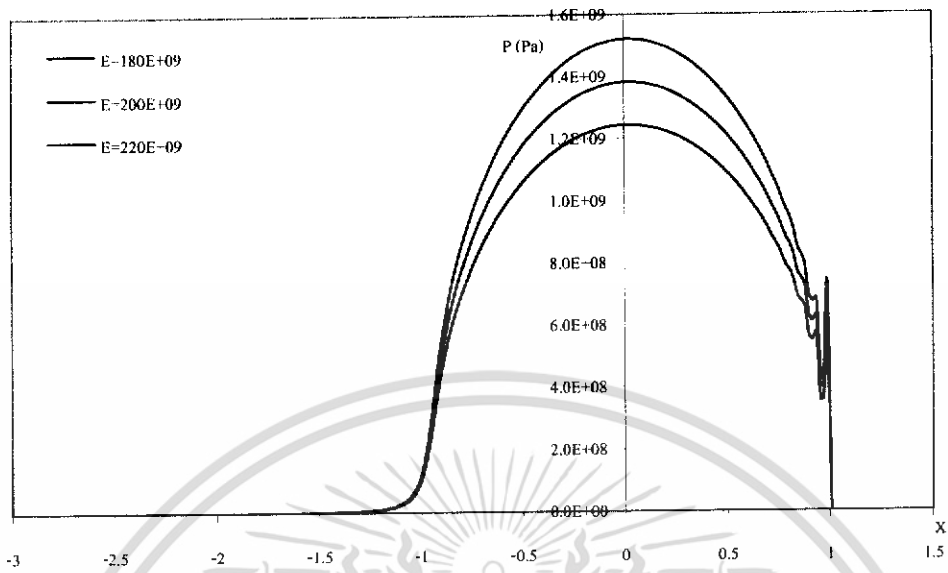
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



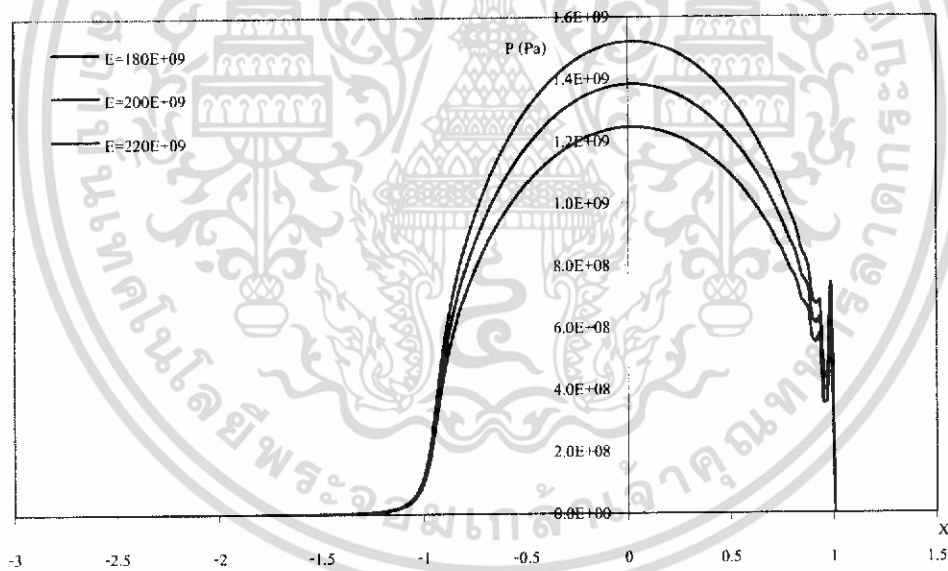
รูปที่ 5-71 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

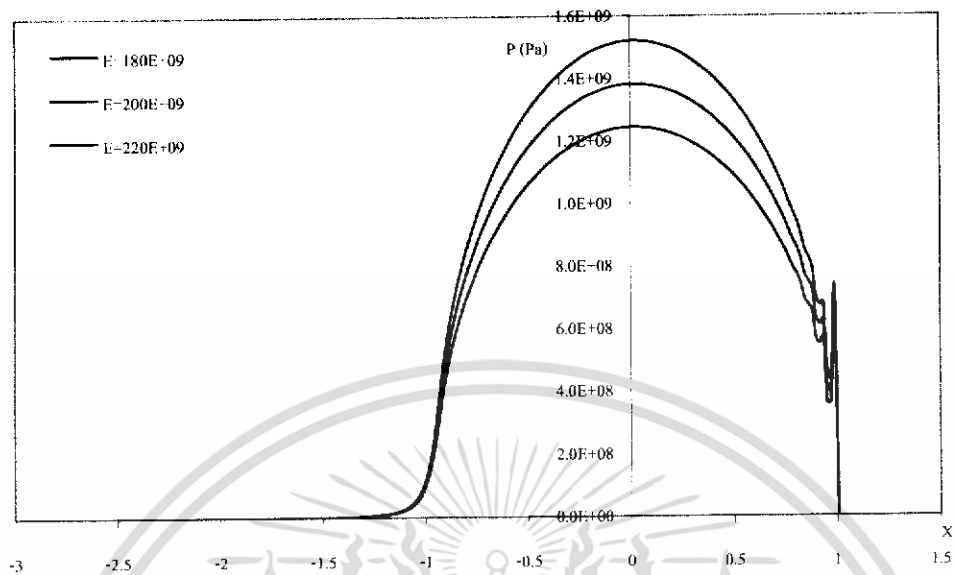


รูปที่ 5-73 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

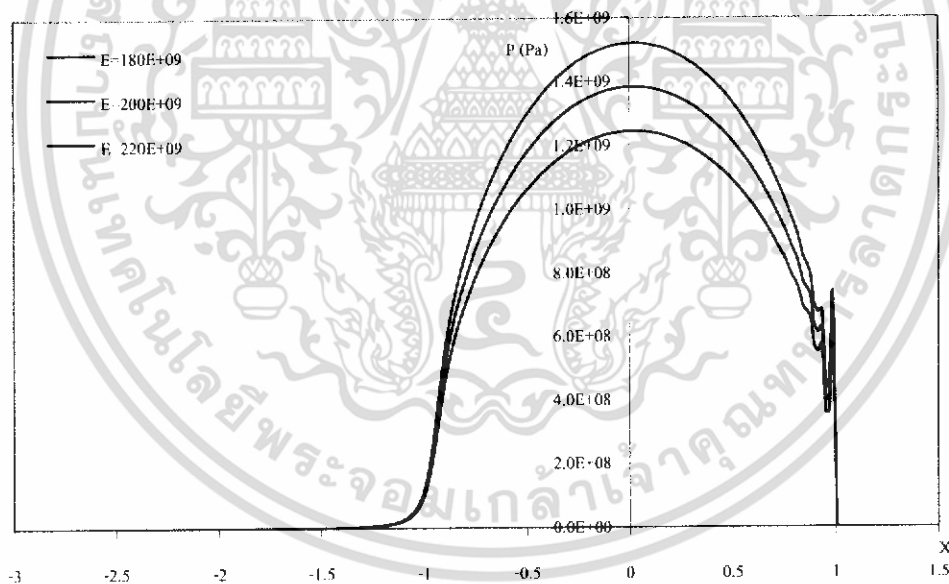


รูปที่ 5-74 กราฟความดันของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

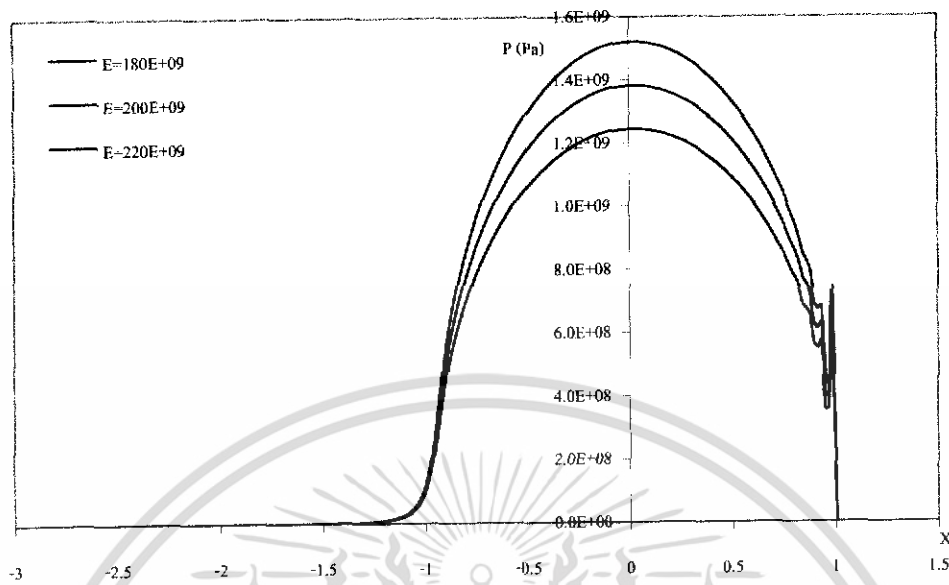


รูปที่ 5-75 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

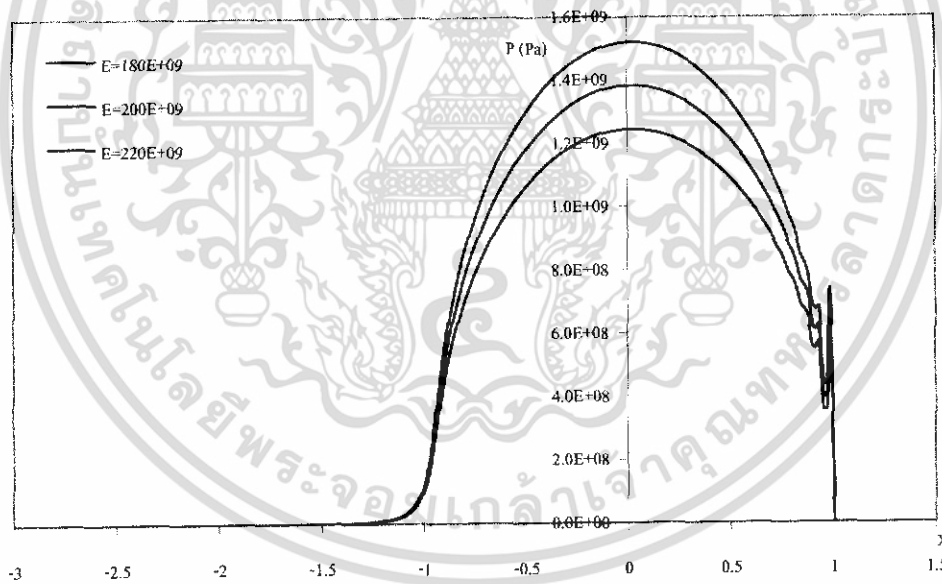


รูปที่ 5-76 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

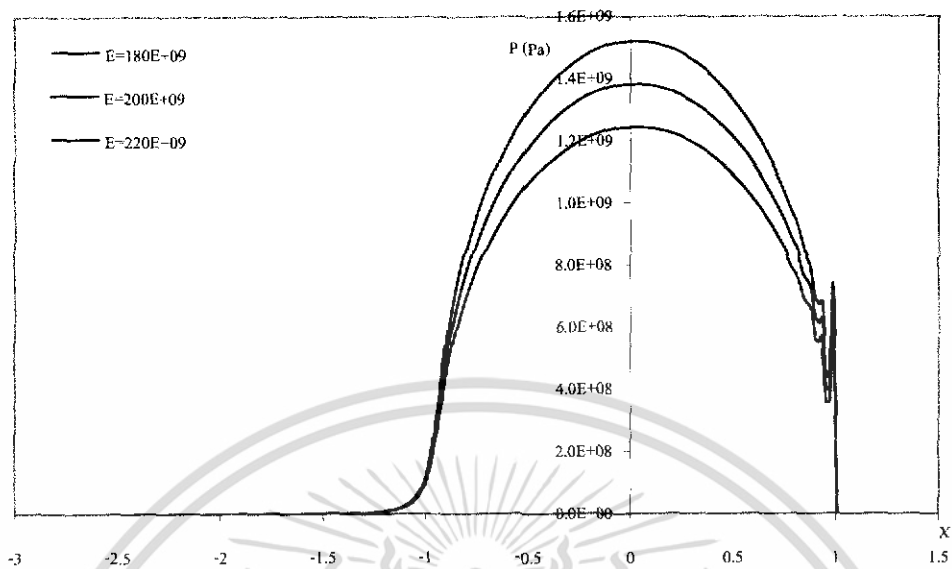


รูปที่ 5-77 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

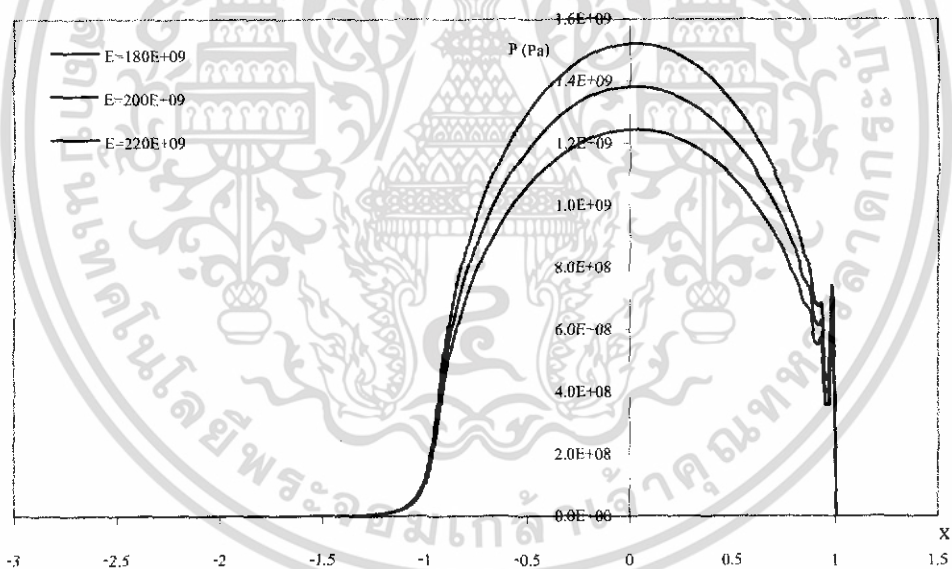


รูปที่ 5-78 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

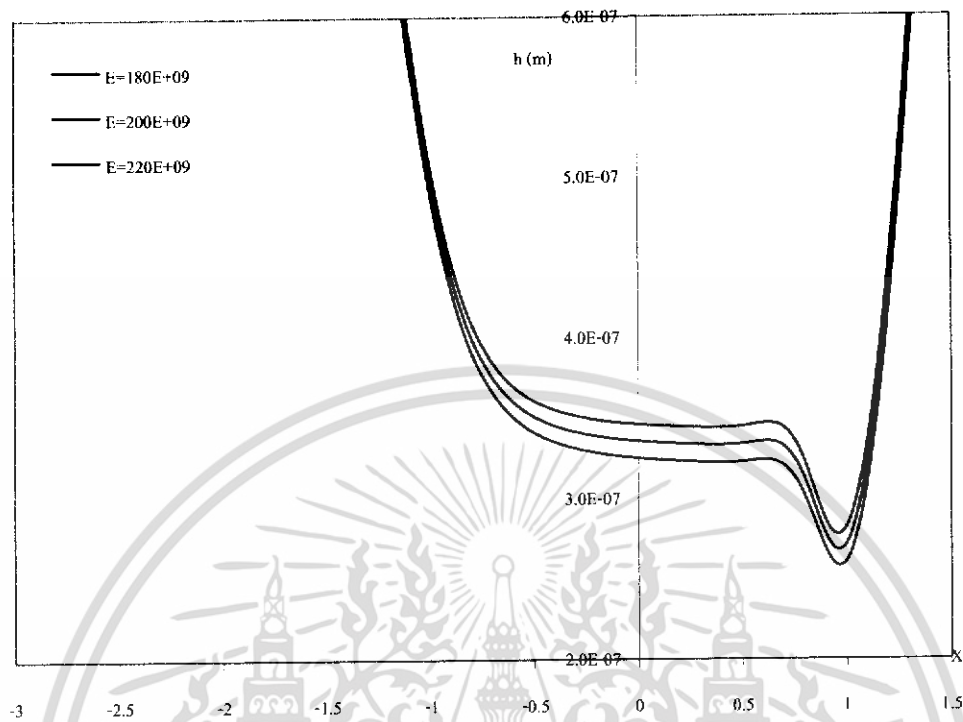


รูปที่ 5-79 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

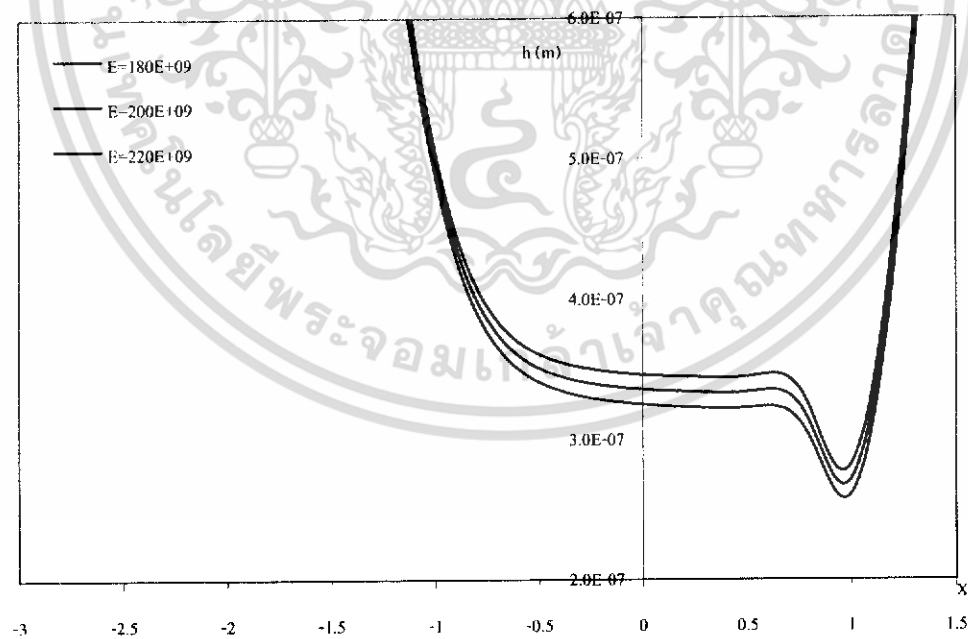


รูปที่ 5-80 กราฟความดันของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

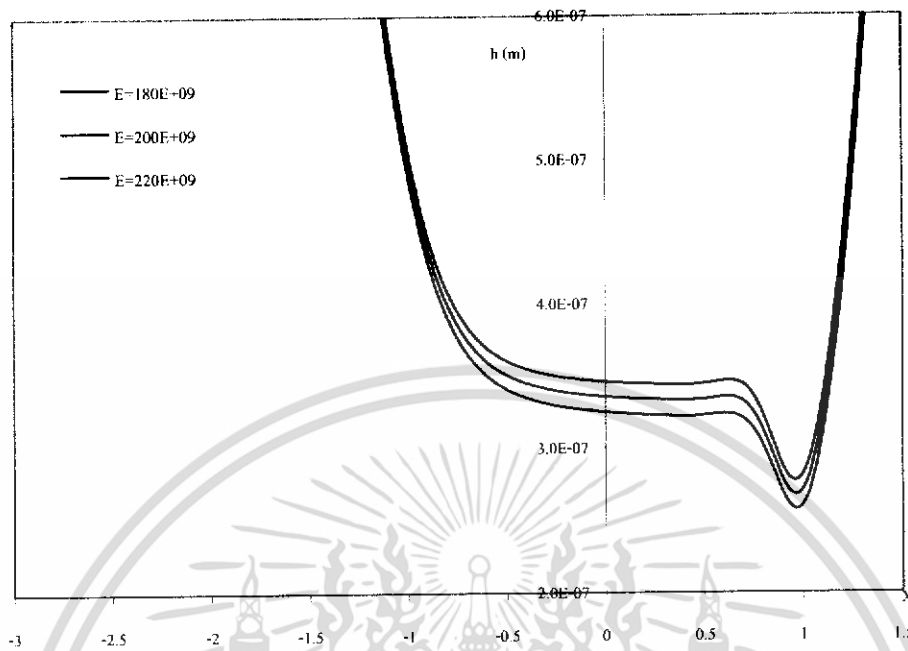


รูปที่ 5-81 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

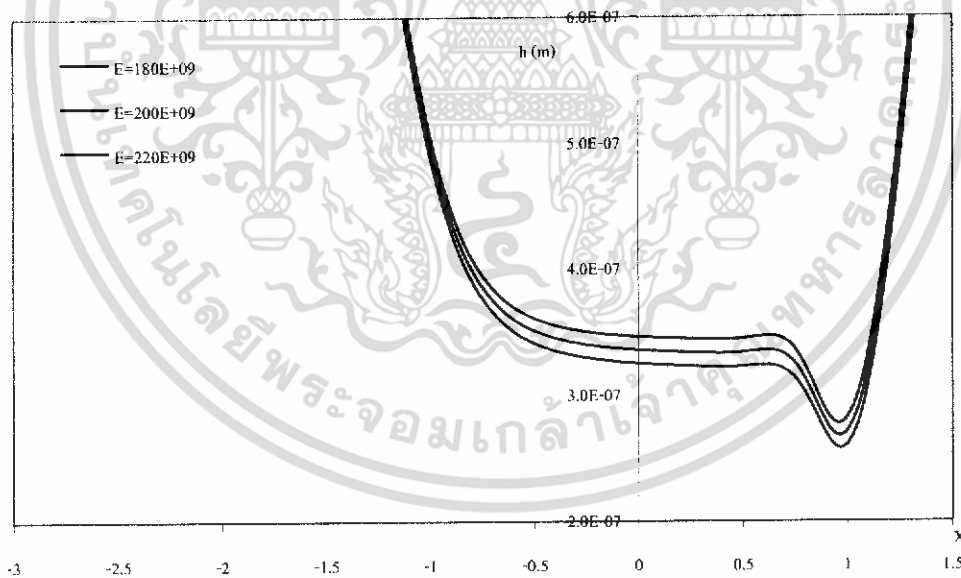


รูปที่ 5-82 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

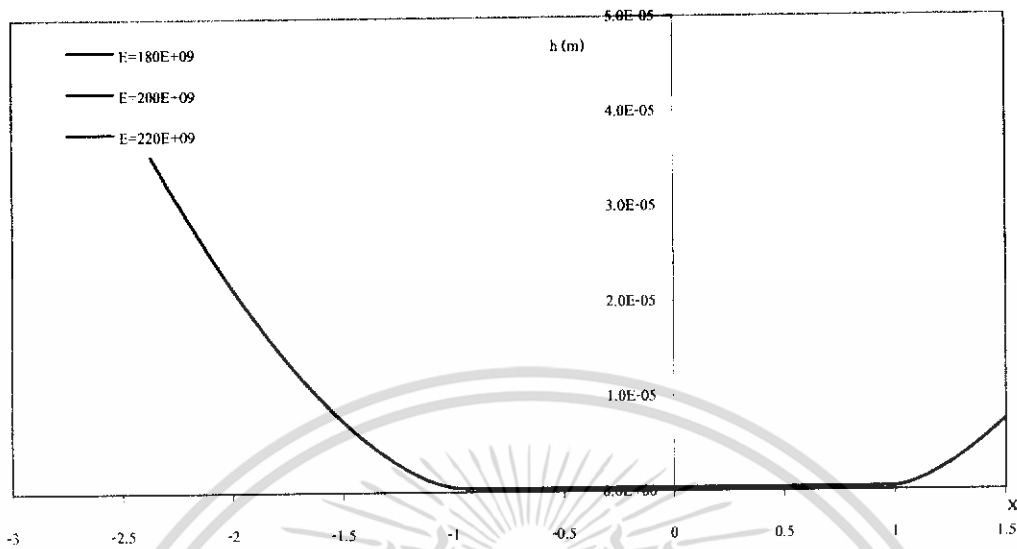


รูปที่ 5-83 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

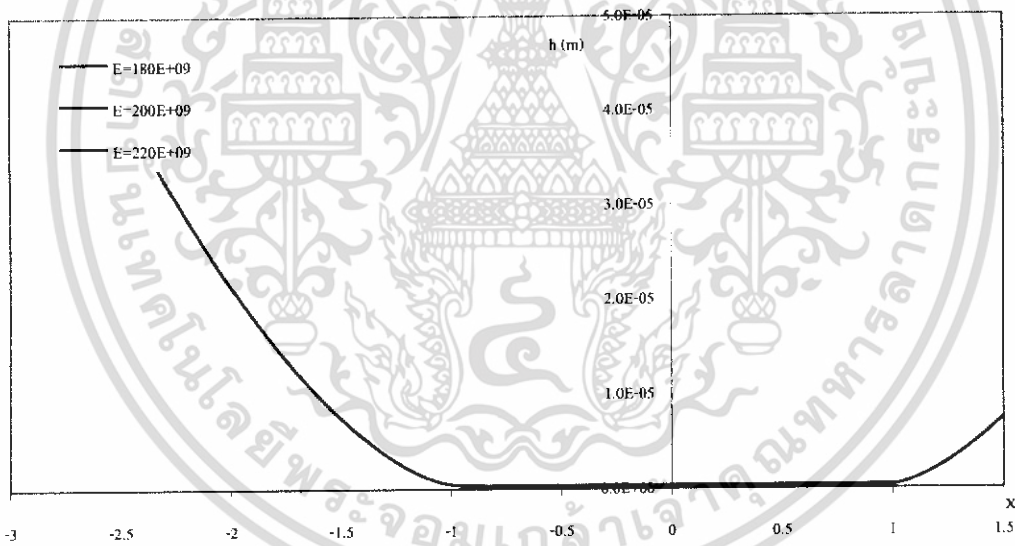


รูปที่ 5-84 กราฟความหนาฟิล์มของ Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

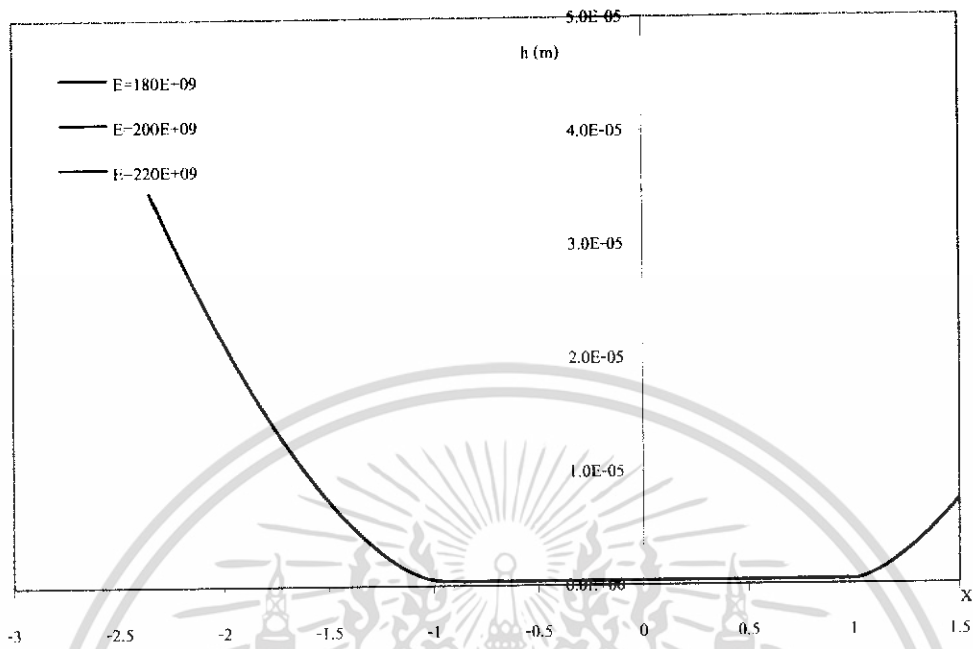


รูปที่ 5-85 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

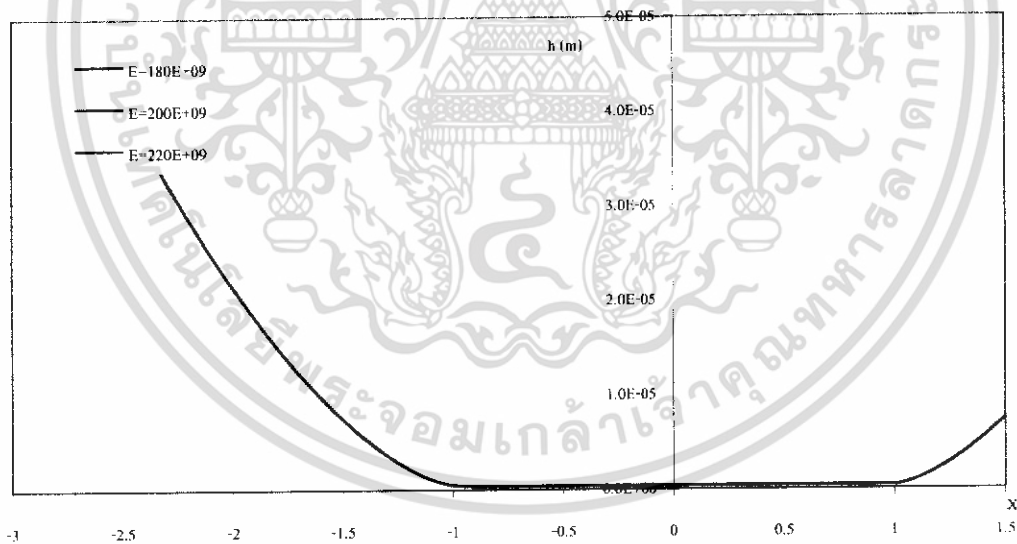


รูปที่ 5-86 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

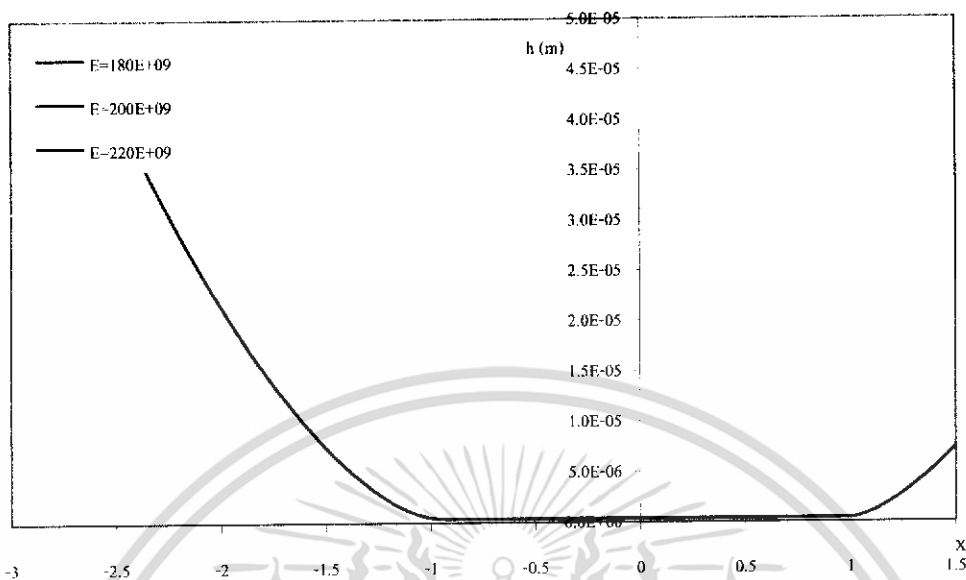


รูปที่ 5-87 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

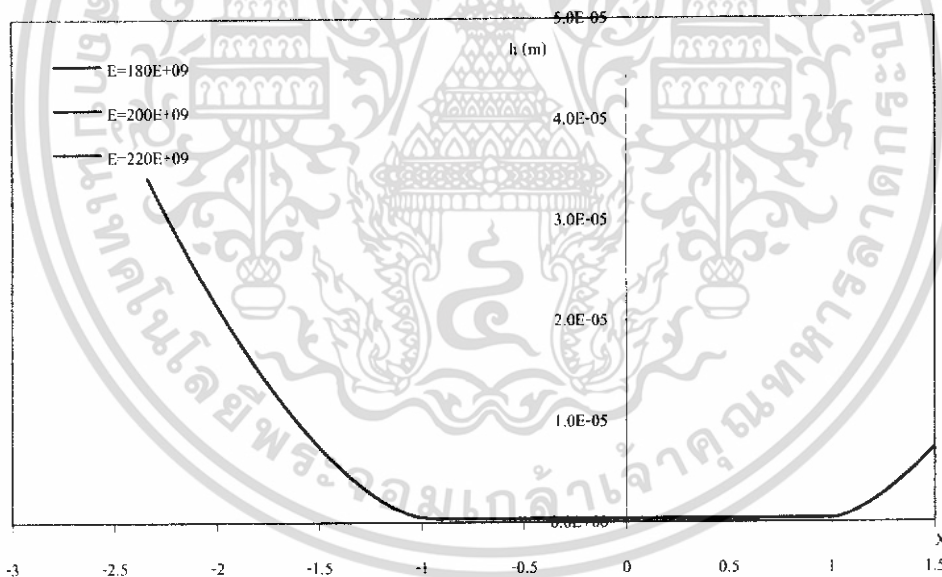


รูปที่ 5-88 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

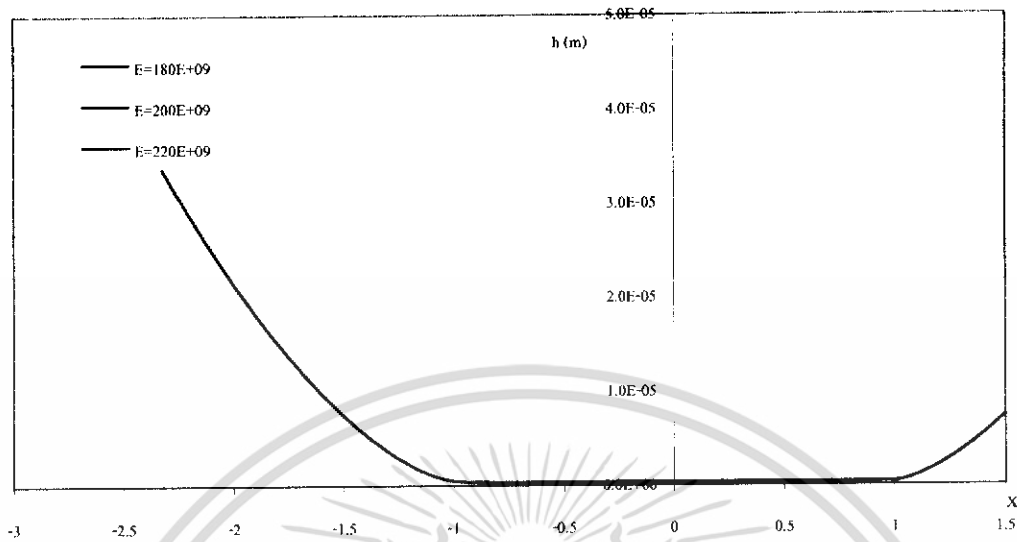


รูปที่ 5-89 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

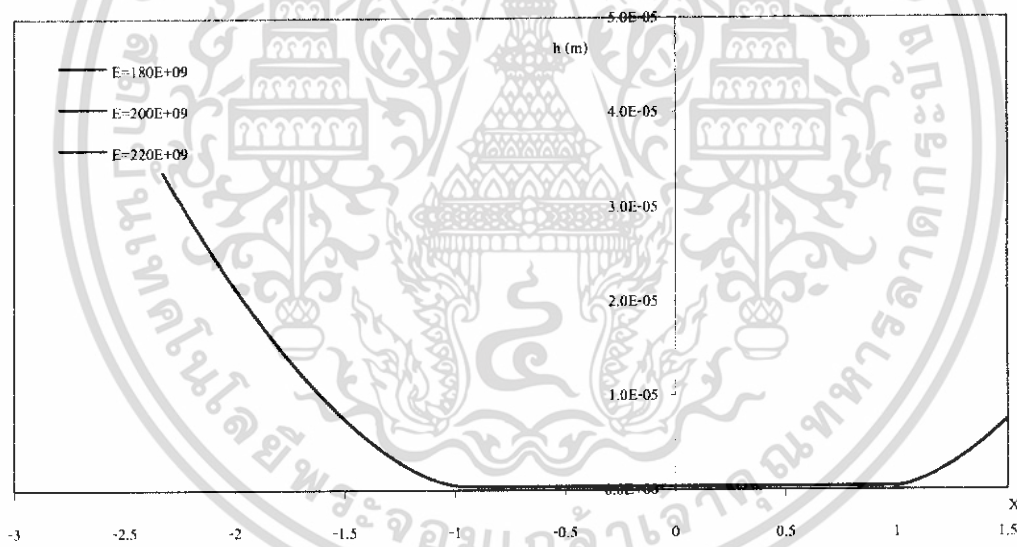


รูปที่ 5-90 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

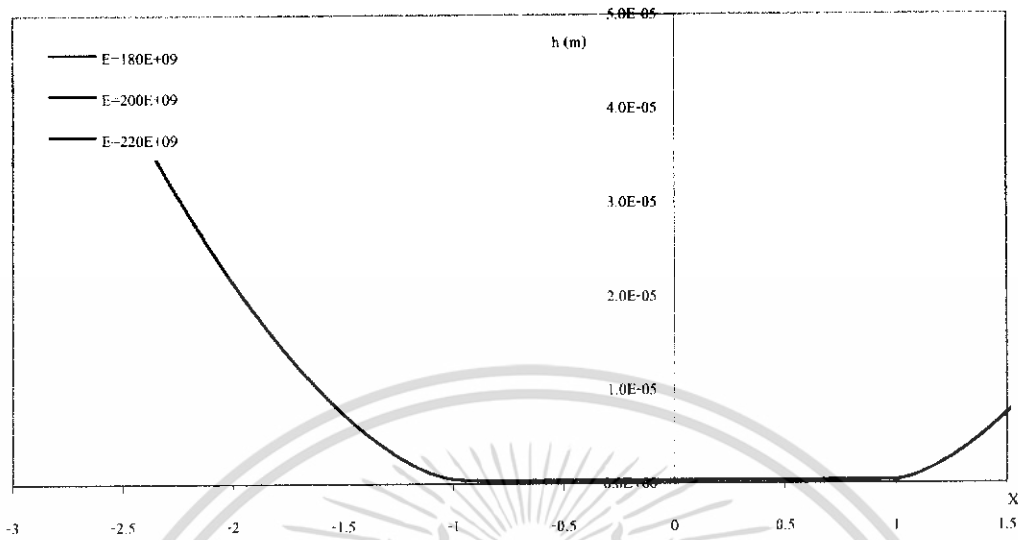


รูปที่ 5-91 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 50 million cycles

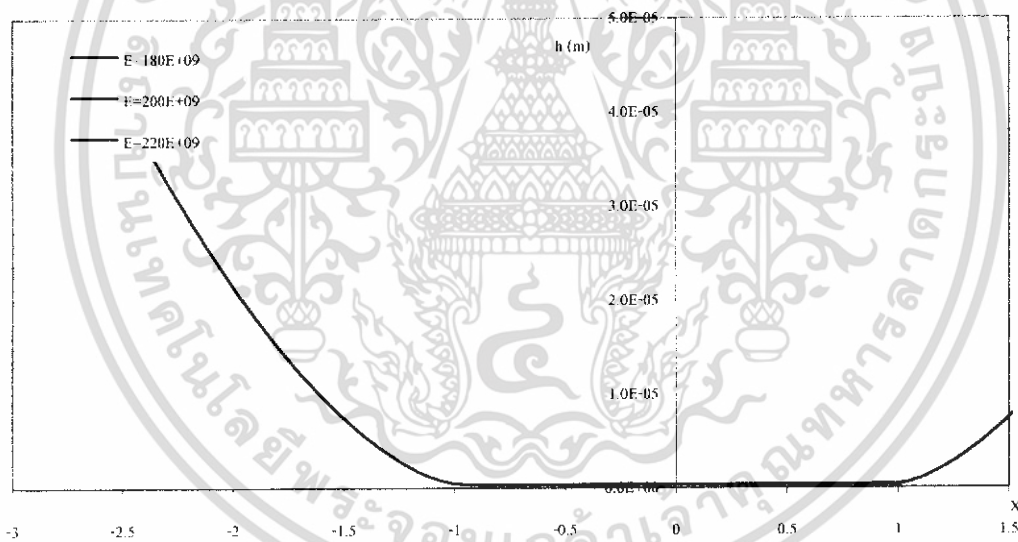


รูปที่ 5-92 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 100 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

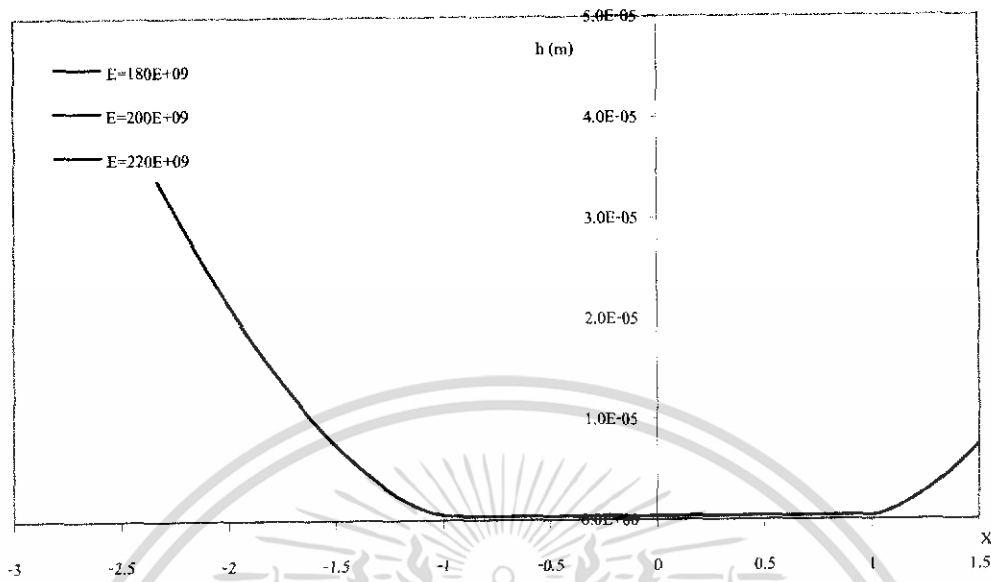


รูปที่ 5-93 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 200 million cycles

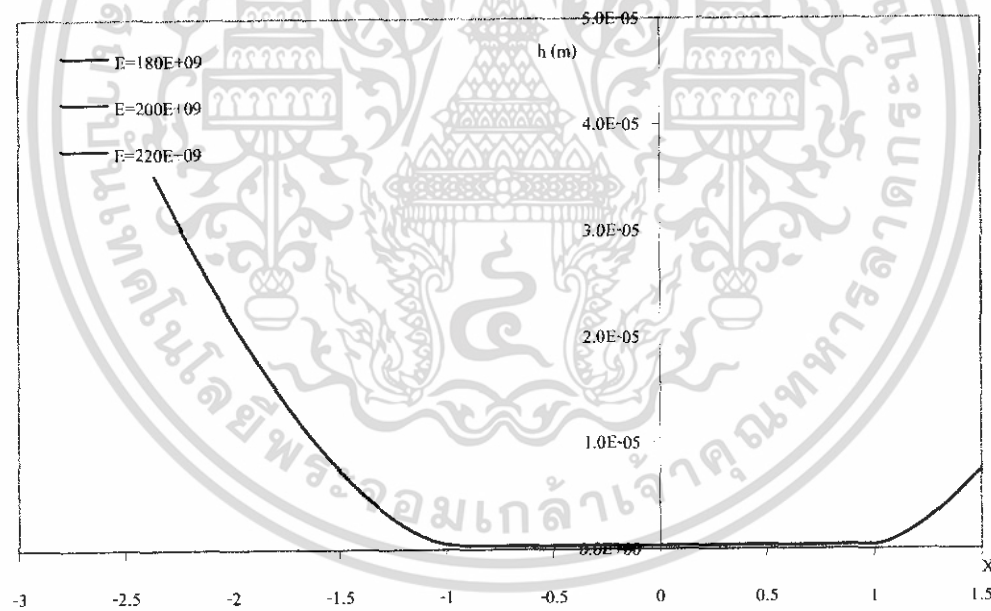


รูปที่ 5-94 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 300 million cycles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-95 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 400 million cycles

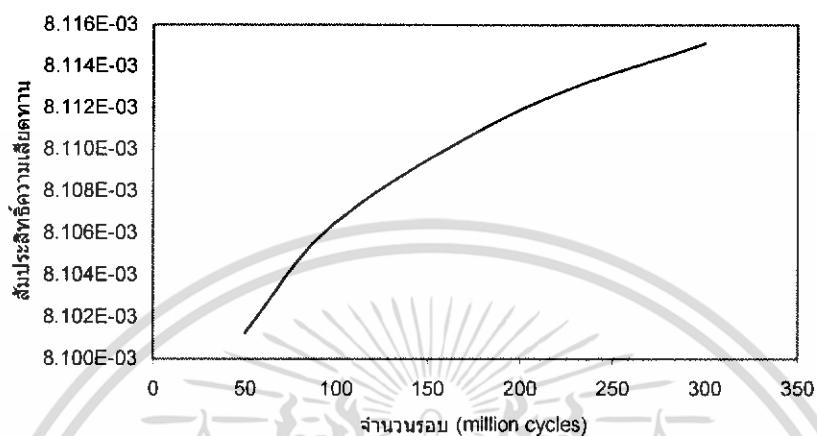


รูปที่ 5-96 กราฟความหนาฟิล์มของ SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $S=1$  ที่ 500 million cycles

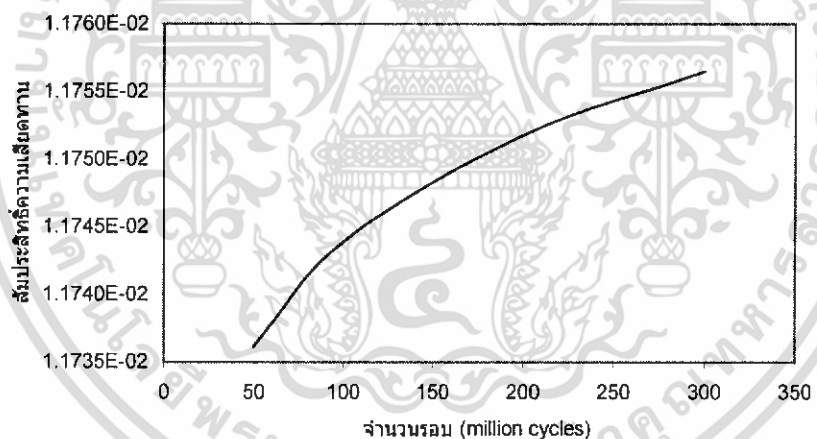
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลของสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

### 5.4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

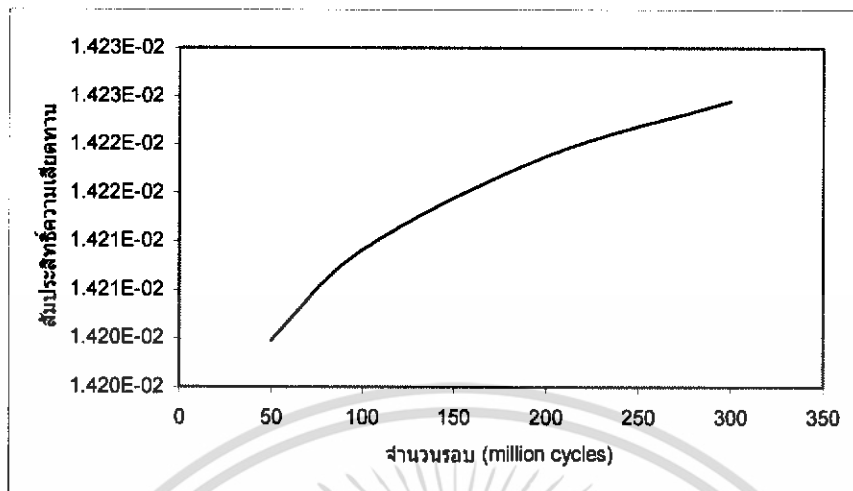


รูปที่ 5-97 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200$  GPa,  $S=1$

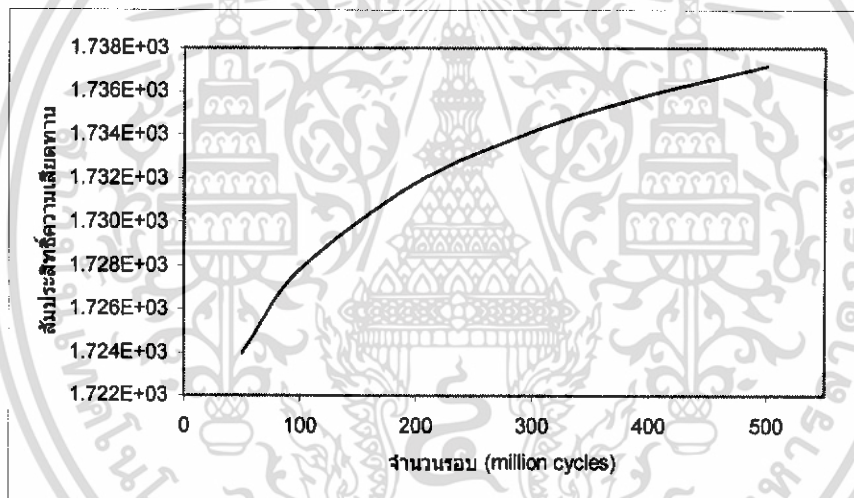


รูปที่ 5-98 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $U=3 \times 10^{11}$ ,  $E=200$  GPa,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

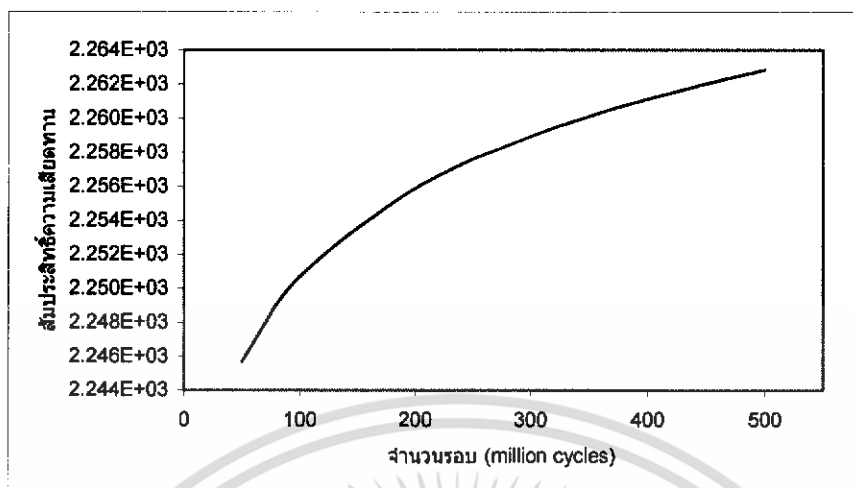


รูปที่ 5-99 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^3$ ,  $U=5 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

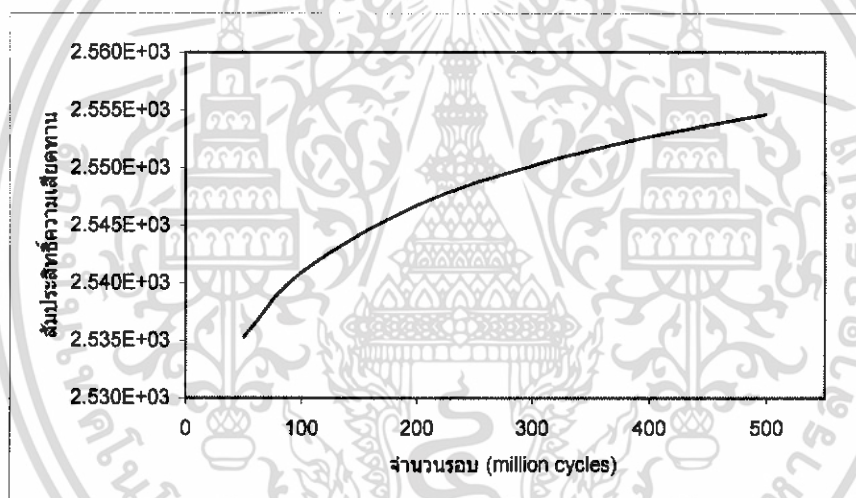


รูปที่ 5-100 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

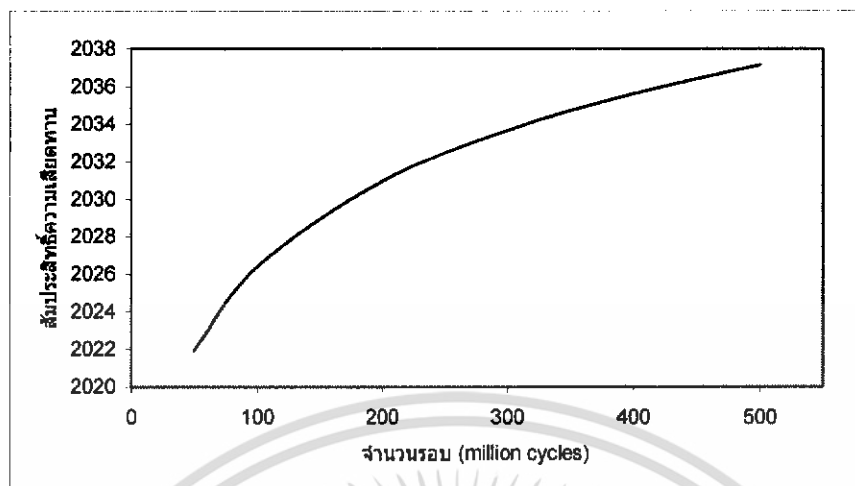


รูปที่ 5-101 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=3 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

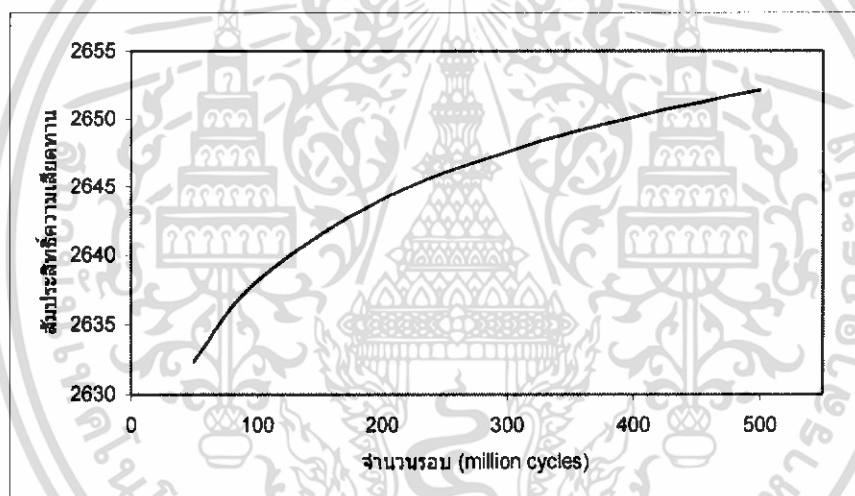


รูปที่ 5-102 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=5 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

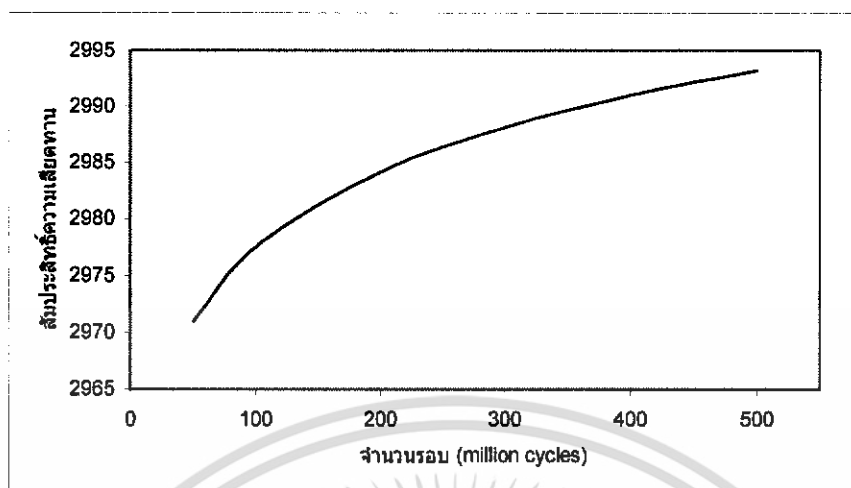


รูปที่ 5-103 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$



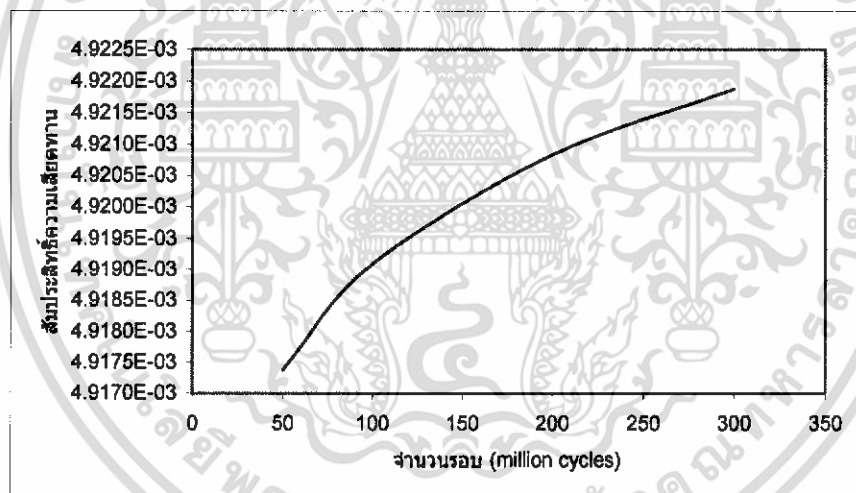
รูปที่ 5-104 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=3 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



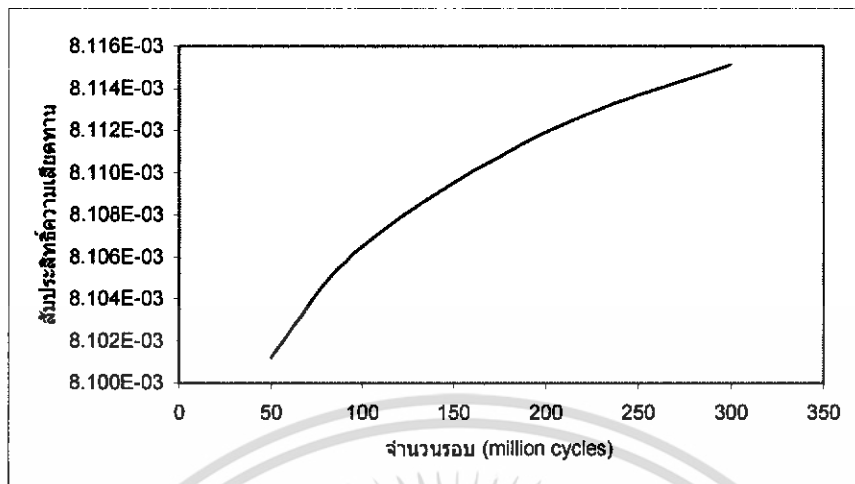
รูปที่ 5-105 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=5 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

#### 5.4.2 ผลของภาวะเปลี่ยนแปลง

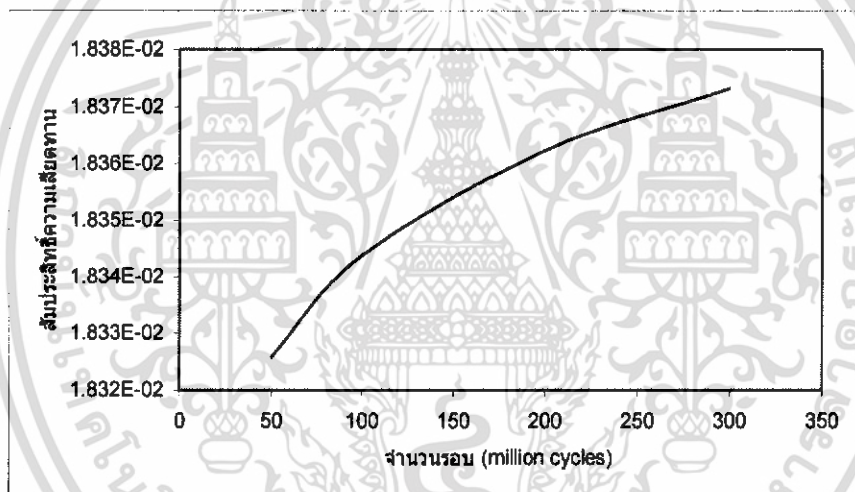


รูปที่ 5-106 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=8 \times 10^{-6}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

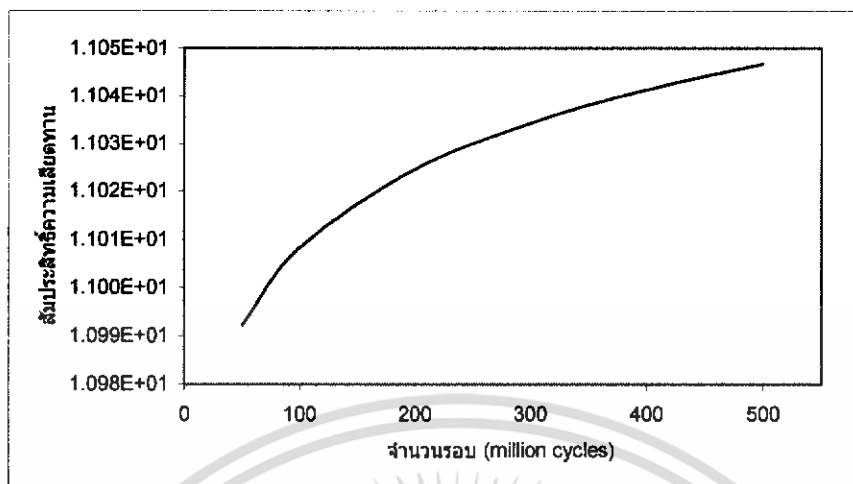


รูปที่ 5-107 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

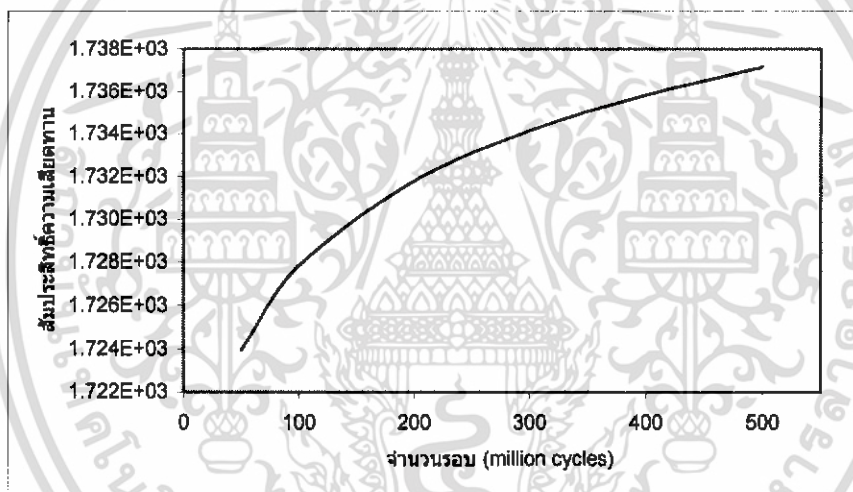


รูปที่ 5-108 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ  $W=8 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

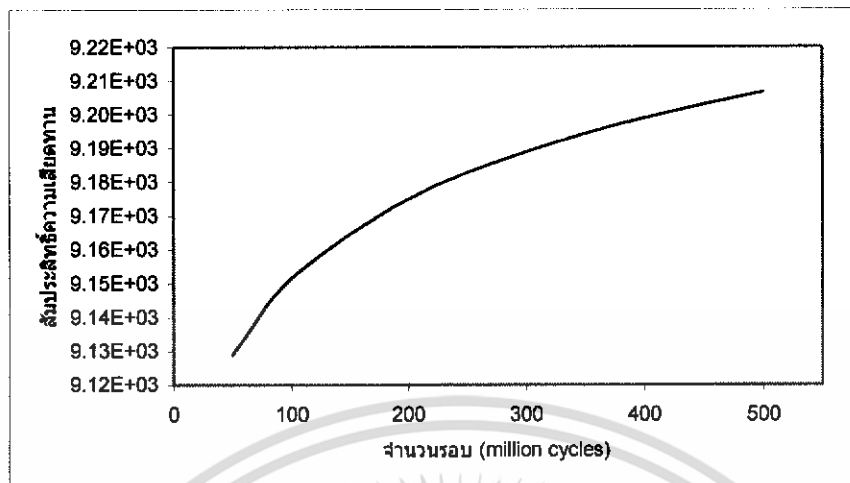


รูปที่ 5-109 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นตทาน SAE 40 เมื่อ  $W=1 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

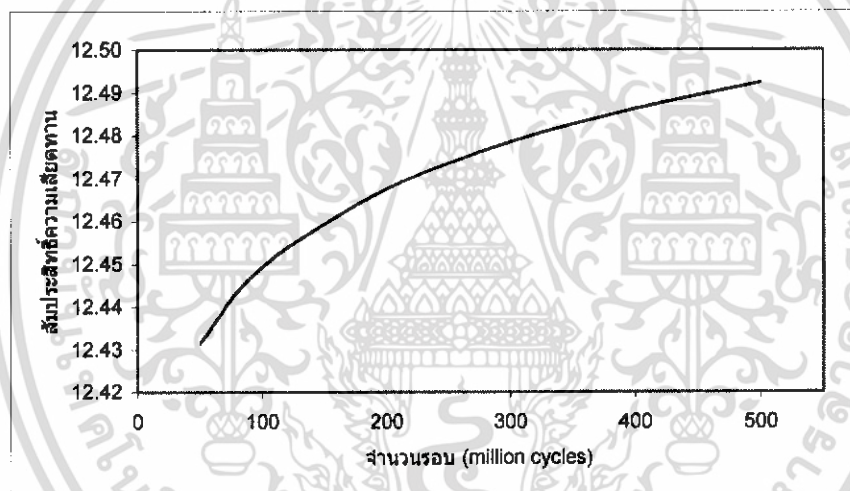


รูปที่ 5-110 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นตทาน SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

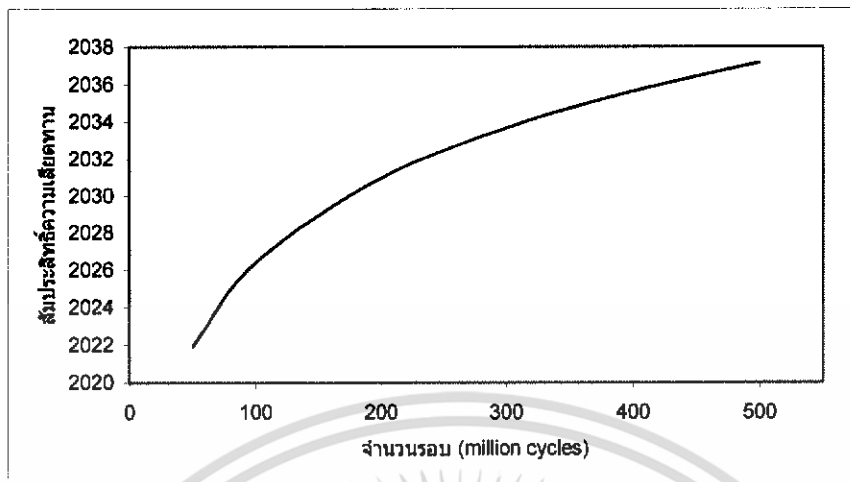


รูปที่ 5-111 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=4 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

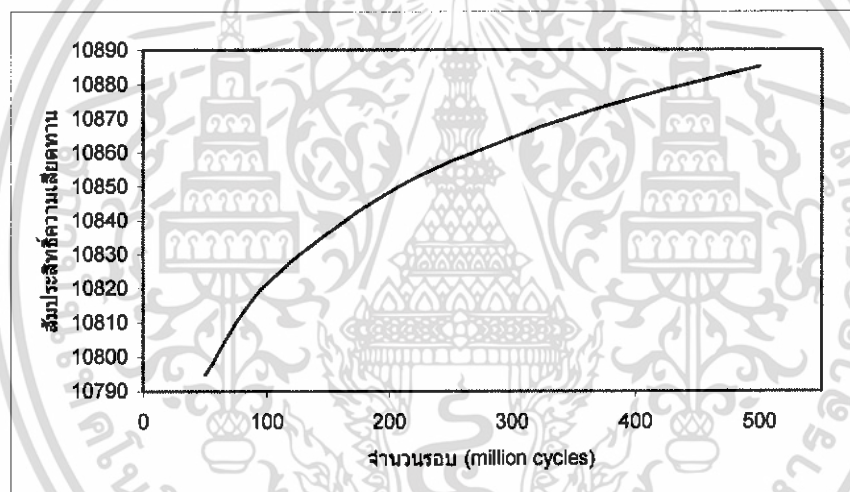


รูปที่ 5-112 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=1 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



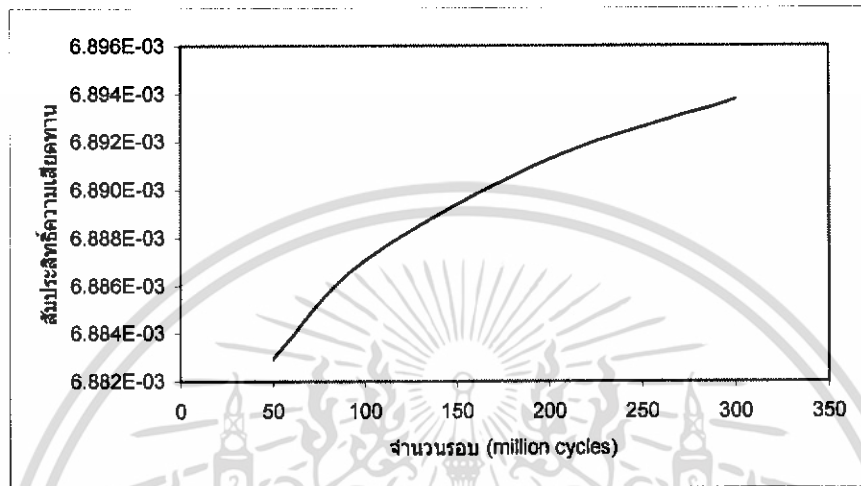
รูปที่ 5-113 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$



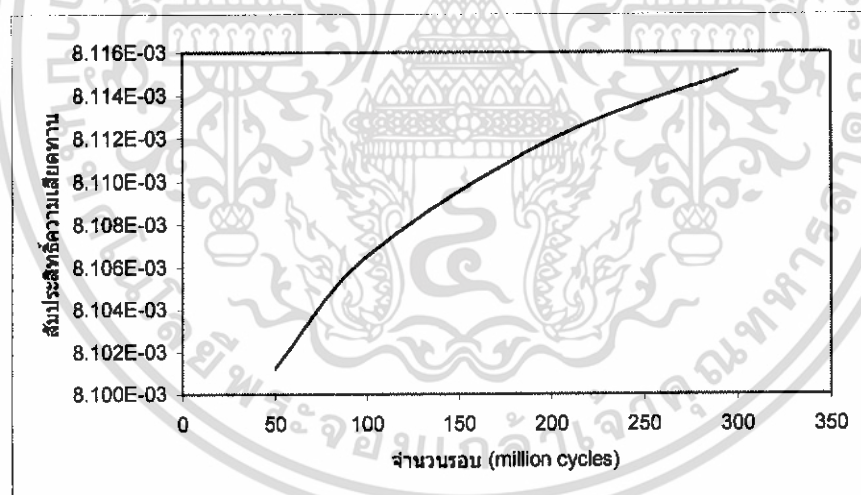
รูปที่ 5-114 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=4 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.4.3 ผลของค่าอัตราตึงโมดูลัสเปลี่ยนแปลง

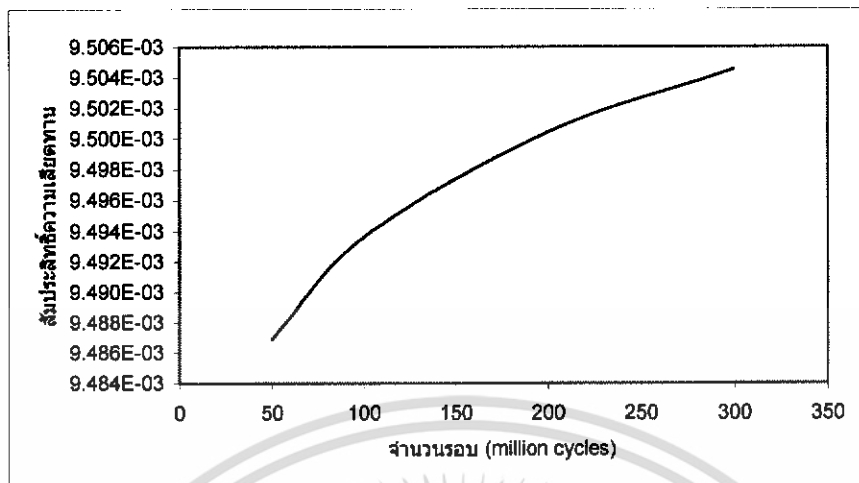


รูปที่ 5-115 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=180 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

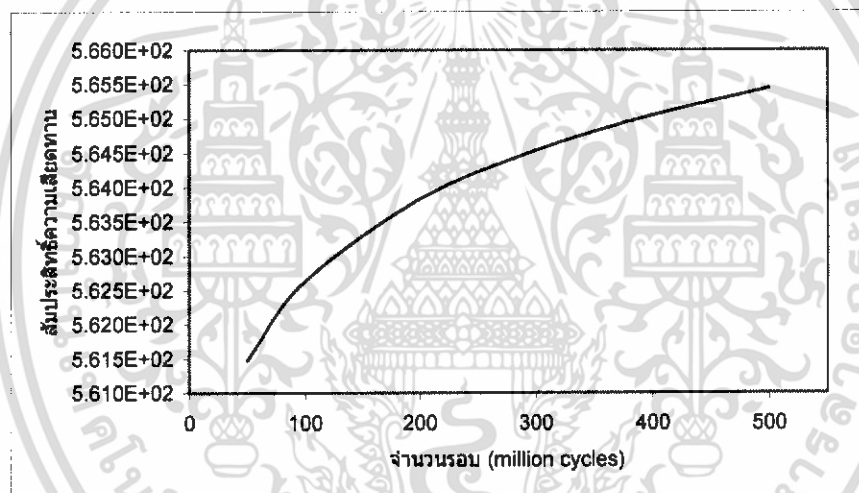


รูปที่ 5-116 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

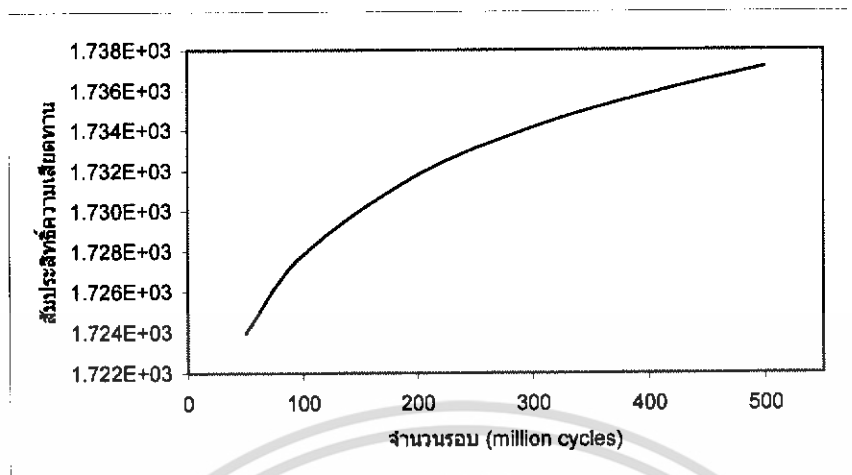


รูปที่ 5-117 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=220 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

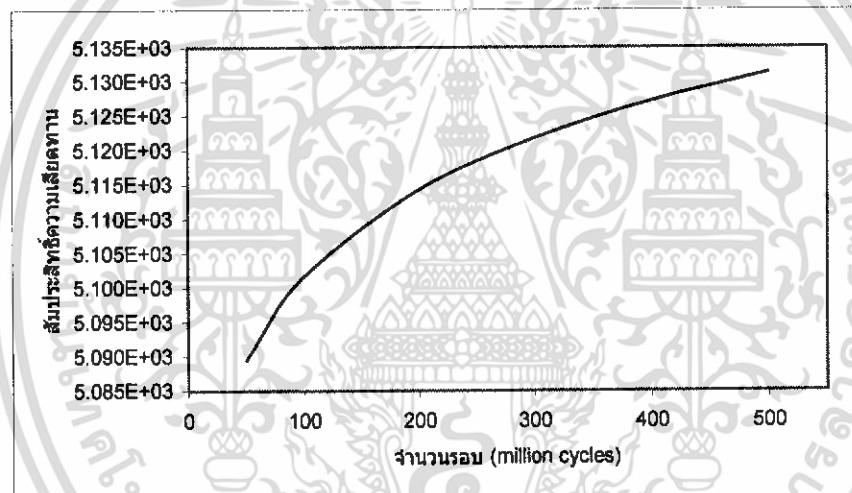


รูปที่ 5-118 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=180 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

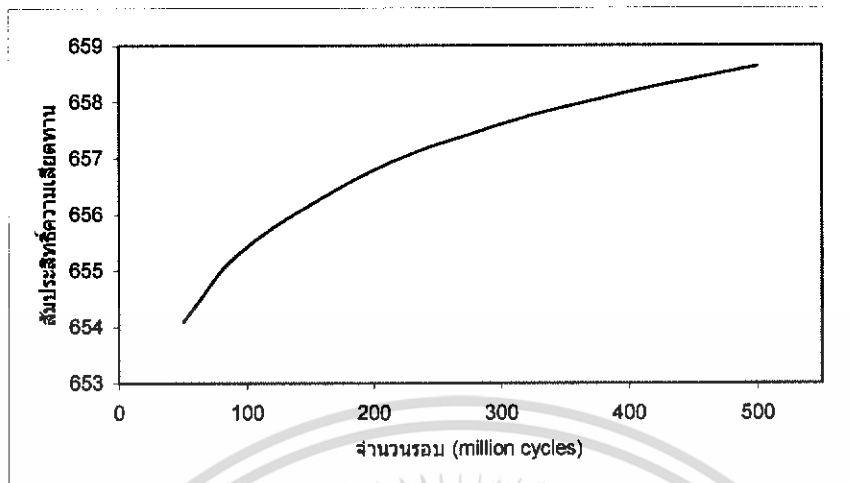


รูปที่ 5-119 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

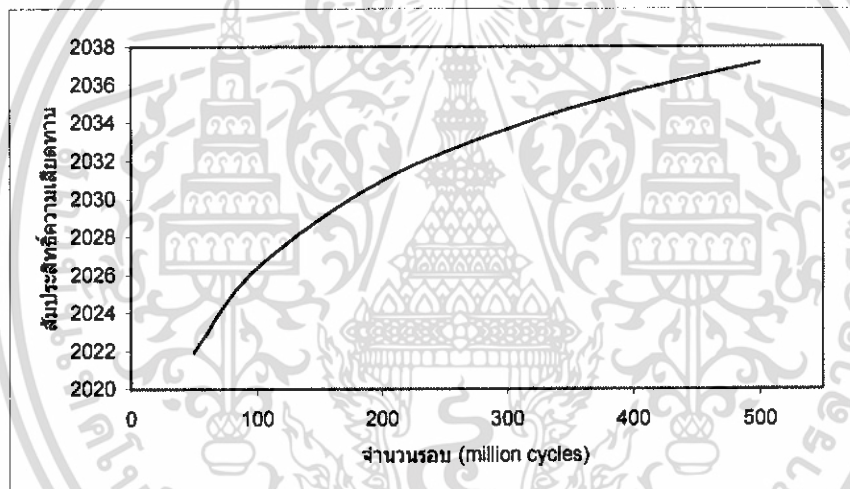


รูปที่ 5-120 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้นความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=220 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

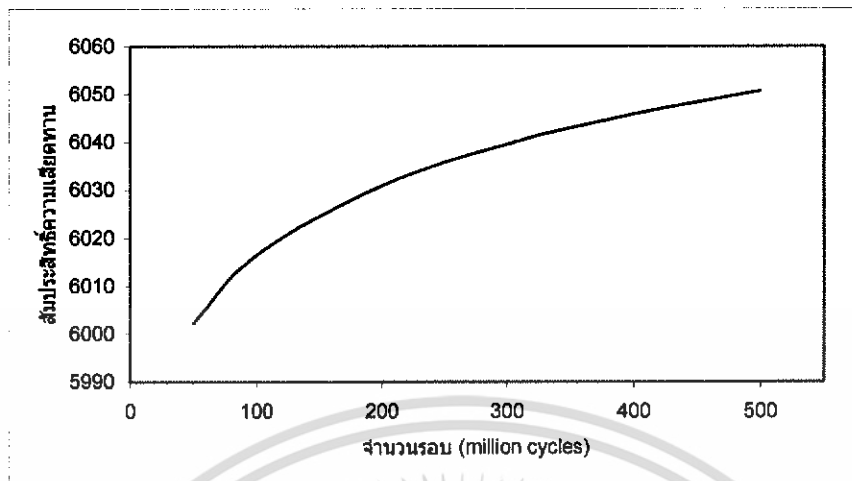


รูปที่ 5-121 กราฟสัมประสิทธิ์ความเคียดทาน SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=180 \text{ GPa}$ ,  $S=1$



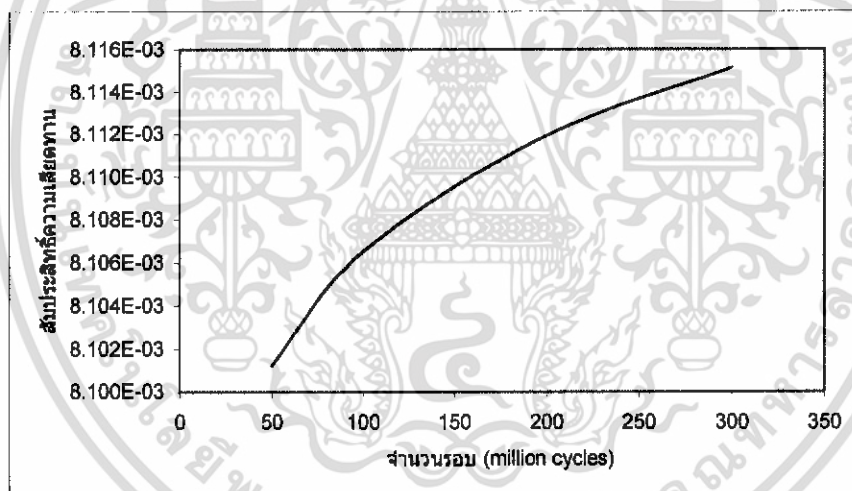
รูปที่ 5-122 กราฟสัมประสิทธิ์ความเคียดทาน SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



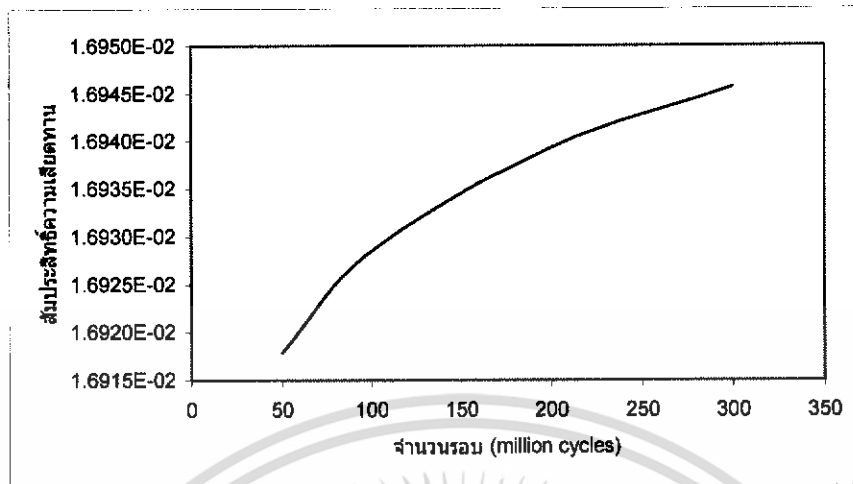
รูปที่ 5-123 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=220 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

#### 5.4.4 ผลของอัตราการลื่นไถลเปลี่ยนแปลง

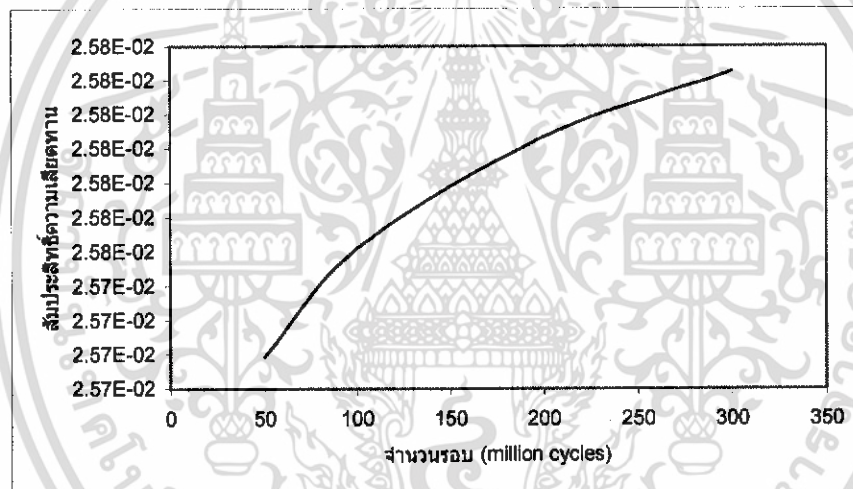


รูปที่ 5-124 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^{-5}$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

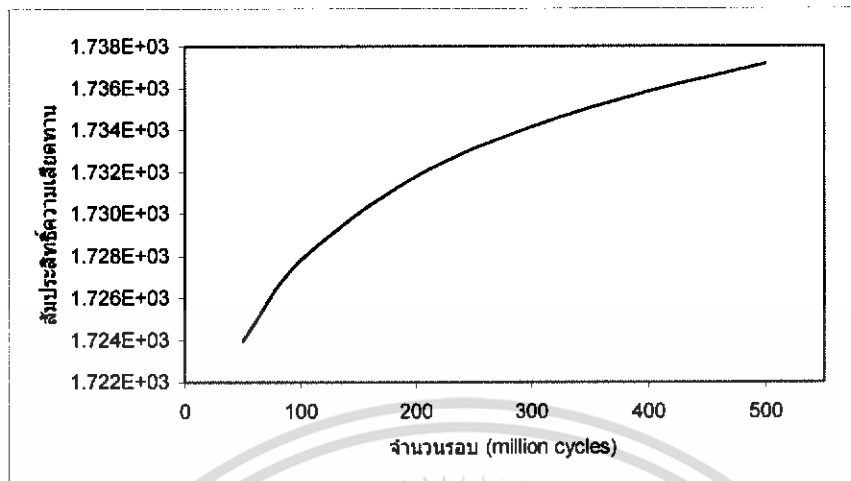


รูปที่ 5-125 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=2$

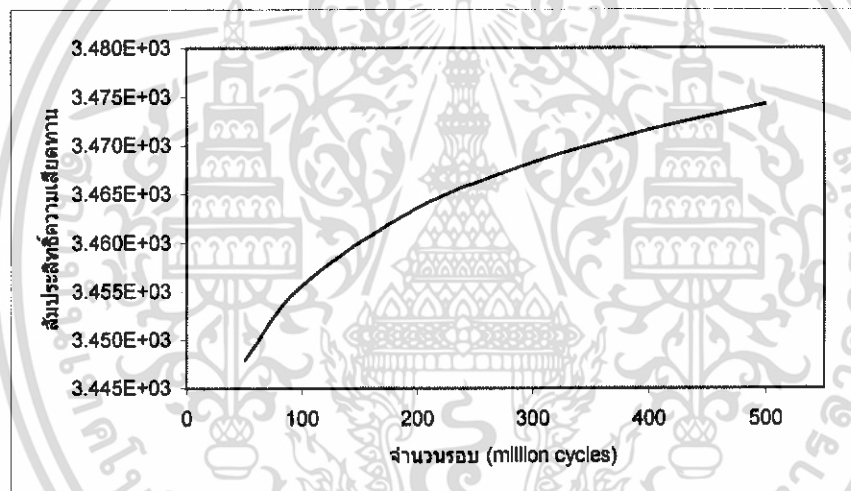


รูปที่ 5-126 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Advance Ester เมื่อ  $W=3 \times 10^5$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

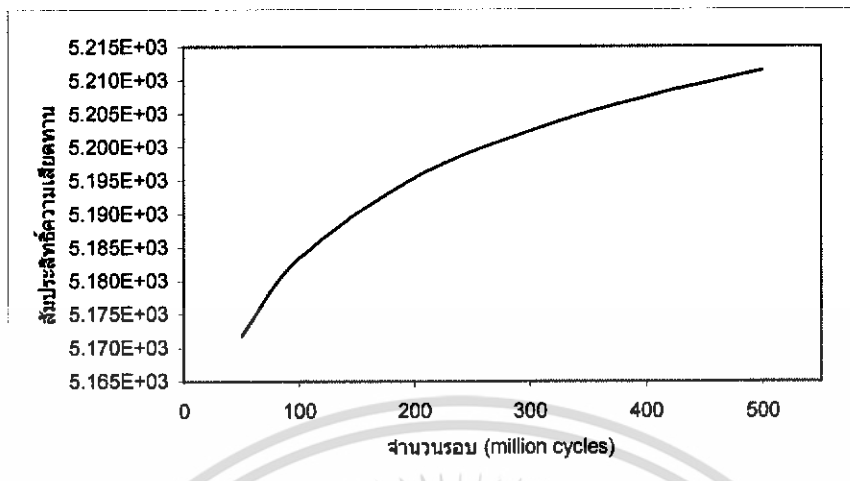


รูปที่ 5-127 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

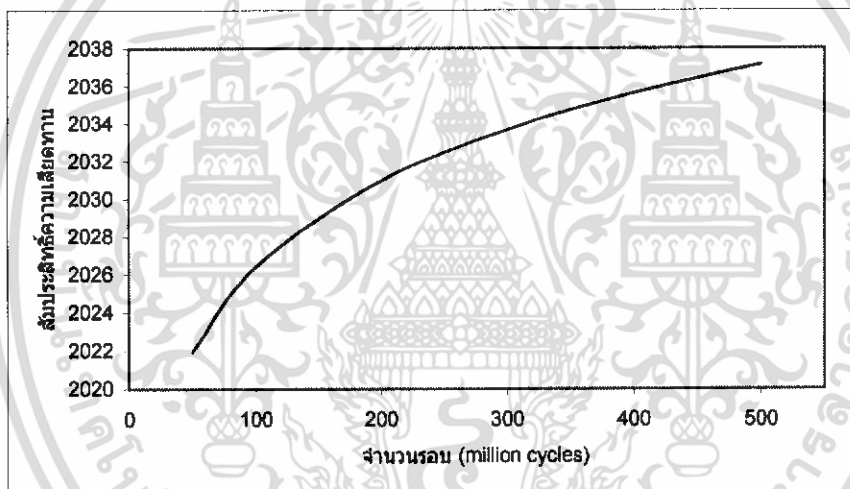


รูปที่ 5-128 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

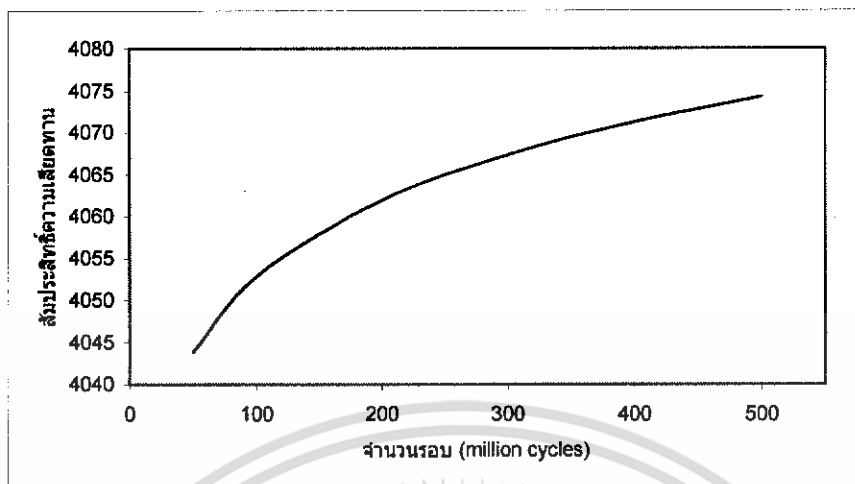


รูปที่ 5-129 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 40 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=3$

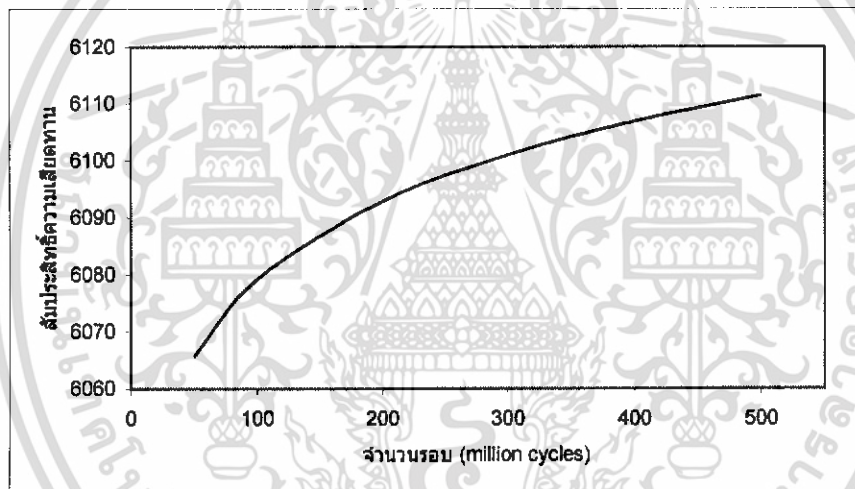


รูปที่ 5-130 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหาย SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^{-4}$ ,  $U=1 \times 10^{-11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-131 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้น SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=2$



รูปที่ 5-132 กราฟสัมประสิทธิ์ความเค้น SAE 90 เมื่อ  $W=3 \times 10^4$ ,  $U=1 \times 10^{11}$ ,  $E=200 \text{ GPa}$ ,  $S=3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 5-1 ถึง 5-32 แสดงการกระจายความดันของ สาร Advance Ester, SAE40 และ SAE 90 ที่ความเร็วต่างๆ มีค่าสูงขึ้น เมื่อมีความเร็วสูงขึ้นช่วงการเข้าของน้ำมันจะส่งผลค่าของความดันมีค่าต่ำลงและความดันจะมีค่าที่ลดลง เนื่องมาจากความหนาฟิล์มสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าลดลงด้วยและจากกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกับเวลาจะพบว่าเมื่อความเร็วสูงขึ้นการเข้าสู่จุดสมดุลจะใช้เวลามากกว่ากรณีที่ความเร็วต่ำ

จากกราฟรูปที่ 5-33 ถึง 5-64 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มของ สาร Advance Ester, SAE 40 และ SAE 90 ที่ภาระสูงขึ้น ค่าความดันจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องมาจากความหนาฟิล์มจะลดลง ที่ใกล้บริเวณทางออกจะมีผลทำให้ค่าความดันเกิดขอดหนามแหลมขึ้นมาสูงที่สุดเมื่อค่าภาระสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 5-65 ถึง 5-96 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มของ สาร Advance Ester, SAE 40 และ SAE 90 จะพบว่าเมื่อวัสดุมีค่าโมดูลัสสูงขึ้น ค่าความดันที่จุดศูนย์กลางที่มีความสัมพันธ์จะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่ใกล้บริเวณทางออกจะมีผลทำให้ค่าความดันเกิดขอดหนามแหลมขึ้นมาสูงที่สุดเมื่อค่าวัสดุมีค่าสูงสุดและกราฟความหนาฟิล์มจะหนาที่สุด

จากกราฟรูปที่ 5-97 ถึง 5-105 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ สาร Advance Ester, SAE 40 และ SAE 90 โดยเมื่อจำนวนรอบมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้นเรื่อยและเมื่อความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 5-106 ถึง 5-114 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ สาร Advance Ester, SAE 40 และ SAE 90 โดยเมื่อจำนวนรอบมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้นเรื่อยและเมื่อภาระสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 5-115 ถึง 5-123 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสาร Advance Ester, SAE 40 และ SAE 90 โดยเมื่อจำนวนรอบมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้นเรื่อยและเมื่อความโมดูลัสสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

จากกราฟรูปที่ 5-124 ถึง 5-132 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสาร Advance Ester, SAE 40 และ SAE 90 โดยเมื่อจำนวนรอบมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้นเรื่อย และเมื่ออัตราส่วนการเดิน โกลสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการคำนวณ

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีติกโตไฮโดรไดนามิก ที่พิจารณาถึงผิวของการสัมผัส ซึ่งจะอาศัยการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน และวิธีผลต่างสืบเนื่อง ร่วมกันในการแก้สมการเรย์โนลด์ จากการศึกษาของเราจะสรุปผลต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

##### 6.1.1 พฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีติกโตไฮโดรไดนามิก

6.1.1.1) เมื่อค่าความเร็วในการสัมผัสสูงขึ้นจะทำให้ผลของความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นที่นำมาจำลองพฤติกรรมมีค่าสูงขึ้น ความดันลดลง ความหนืด ความหนาแน่นลดลง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

6.1.1.2) ค่าภาระในการกระทำต่อทรงกระบอกสูงขึ้นจะทำให้ผลของความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นมีค่าลดลง ความดันสูงขึ้น ค่าความหนืดและความหนาแน่นลดลง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

6.1.1.3) ค่าโมดูลัสของทรงกระบอกและแผ่นเรียบสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นลดลง ความดันสูงขึ้น ค่าความหนืดและความหนาแน่นลดลง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น

6.1.1.4) ค่าอัตราการลื่นไถลมากขึ้นจะทำให้ความหนืดและความหนาแน่นลดลง ความดันมากขึ้น และความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นลดลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น

6.1.1.5) สารหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดสูงจะทำให้ผลของความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นสูงและความดันต่ำ และอุณหภูมิจะสูง ความหนาแน่นจะต่ำแต่ความหนืดจะสูง

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้คำนวณ โดยมีข้อสมมติฐานให้มีการสัมผัสระหว่างโรตเตอร์กับแผ่นเรียบมีลักษณะสัมผัสกันเป็นแบบเส้นซึ่งถือว่าผลของการไหลตามแนวแกนน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของการไหลตามการหมุนของโรตเตอร์กับแผ่นเรียบ และไม่คิดความหยาบของพื้นผิว ดังนั้นการพัฒนาในอนาคตควรมีการคิดผลของความหยาบเพื่อให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและควรที่จะมีการจำลองการสัมผัสในรูปแบบอื่นๆ อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

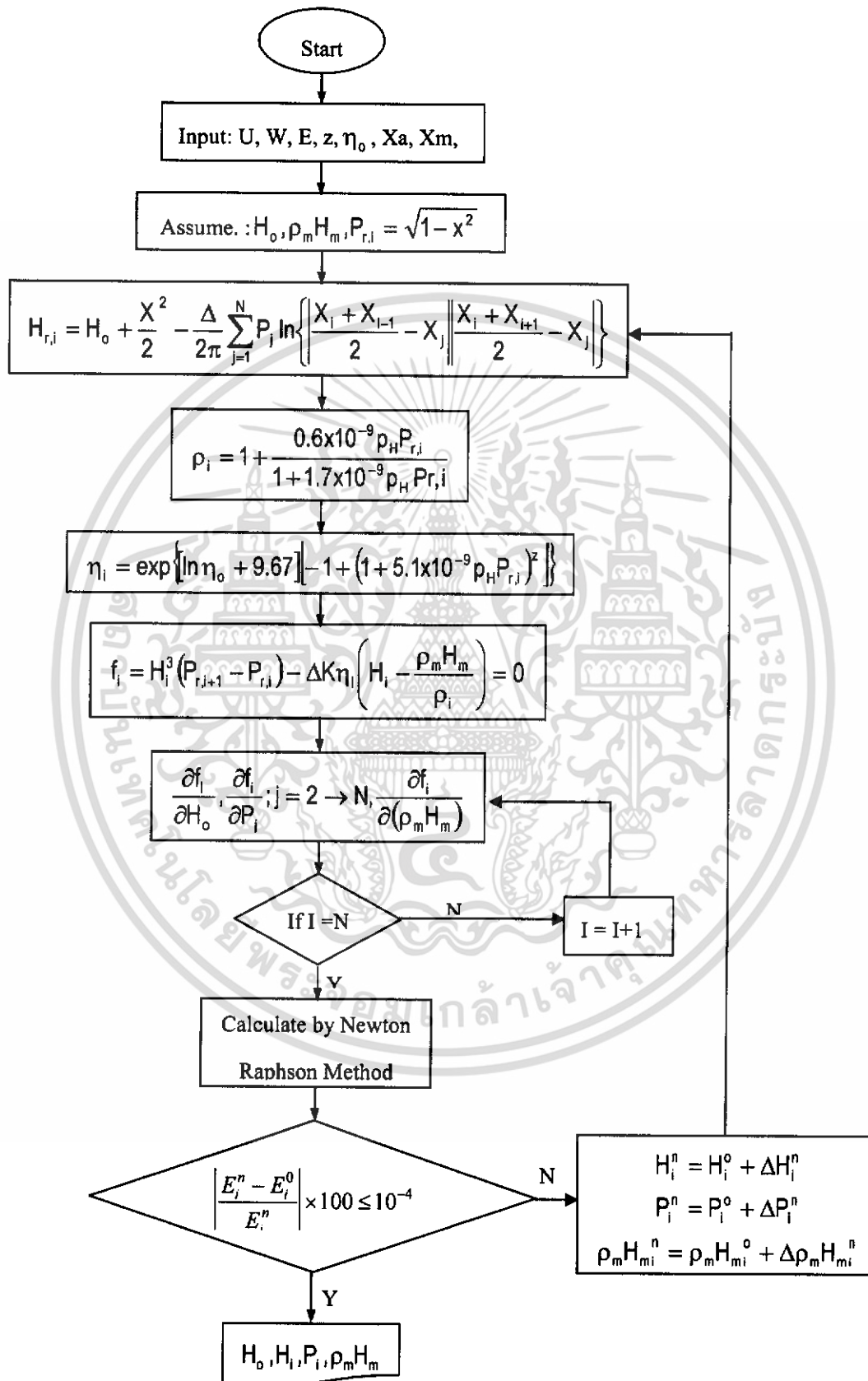
- [1] Bernard J. Hamrock, "Fundamental of Fluid Film Lubrication", International Edition, McGraw-Hill, Singapore 1994.
- [2] เกษม ธรรมโกศล, "อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [3] สุทรินันท์ ศรีรัตยาวงศ์, "อิทธิพลของความหนืดของผิวต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกของสองผิวที่มีการสัมผัสแบบเป็นเส้น", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [3] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, "ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [4] ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์, ปานเพชร จินินทร, "เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น", บ.ซี เอ็ดดูเคชั่น จก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก แสดงแผนผังการคำนวณของโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้