

การหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลมแบบเทอร์โมไฮดรอดนามิกส์ด้วยน้ำมันพืช

THERMOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF JOURNAL BEARING  
WITH VEGETABLE-BASED OIL

อุทาน หนุจันทรแก้ว  
U-THAN NUJUNKAEW

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-623-578-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลมแบบเทอร์โมไฮดรอดนามิกส์ด้วยน้ำมันพืช

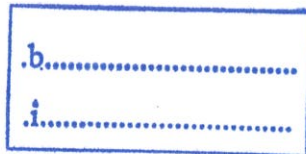
THERMOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF JOURNAL BEARING  
WITH VEGETABLE-BASED OIL



อุทาน หนูจันท์แก้ว

U-THAN NUJUNKAEW

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 49539  
วัน, เดือน, ปี 24 ก.พ. 2547



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-623-578-8

**THERMOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF JOURNAL BEARING  
WITH VEGETABLE-BASED OIL**

**U-THAN NUJUNKAEW**

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

**2003**

**ISBN 974-623-578-8**

**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การหล่อลื่นของแบร็ริงเพลากลมแบบเทอร์โมไฮดรอดนามิกส์ด้วยน้ำมันพืช  
THERMOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF JOURNAL BEARING  
WITH VEGETABLE-BASED OIL






ชื่อนักศึกษา            นายอุทาน            หนูจันทร์แก้ว

รหัสประจำตัว            42062032

ปริญญา                    วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.มงคล      มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.ดร.ชินรัชย์	เชียรพงษ์	
ผศ.สมยศ	จันทเกษม	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 เมษายน 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

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



วันที่.....๒๙.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหล่อลื่นของแบริ่งเพลากลมแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดนามิกส์ ด้วยน้ำมันพืช
นักศึกษา	นายอุทาน หนูจันทร์แก้ว
รหัสประจำตัว	42062032
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาพฤติกรรมทาง สถิตย และ ไดนามิกส์ ของแบริ่งเพลากลมแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดนามิกส์หล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช น้ำมันพืชที่ใช้จะผสมกับสารเติมแต่ง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันพืชที่ได้จากการทดลองโดยนำไปใช้กับ เพาเวอร์ลอมเบล เพื่อใช้ในการศึกษา ในวิทยานิพนธ์นี้เขียนสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานแล้วนำไปคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาพฤติกรรมของกาบรองลื่นเพลากลมจะได้รับการกระจายแรงดัน, ความสามารถในการรับภาระ, การกระจายอุณหภูมิ, สัมประสิทธิ์ของสปริง, สัมประสิทธิ์ของแคมป์ปิ้ง ส่วนในการทดลองจะใช้กาบรองลื่นเพลากลมแบบสั้นที่เปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและน้ำหนักที่มากระทำ ผลของการทดลองที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้เชิงตัวเลข

<b>Thesis Title</b>	THERMOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF JOURNAL BEARING WITH VEGETABLE-BASED OIL
<b>Student</b>	Mr. Uthan Nujunkaew
<b>Student ID.</b>	42062032
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Adviser</b>	Assoc.Prof. Mongkol Mongkolwongroj

### ABSTRACT

This thesis presented the static and dynamic characteristic of thermohydrodynamic journal bearing lubricated with vegetable-based oil. The vegetable-based oil was mixed with additive such as viscosity index improver. The relationship between shear stress and shear strain rate of the vegetable-based oil were obtained experimentally to get the power-law model for this study. Reynolds equations and adiabatic energy equation are formulated to obtain the characteristic of journal bearing numerically. From the results, the pressure distribution, load capacity, temperature distribution, spring coefficients damping coefficients are investigated. Experiment are performed for short bearings under static condition at various speed and load conditions. The experimental results are compared with the numerical results.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับเรื่องพฤติกรรมกรรมาการหล่อตื้นจาก รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณอำพล หนูจันทร์แก้ว และคุณวงเดือน หนูจันทร์แก้ว บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่เป็นผู้ให้กำลังใจ และผู้สนับสนุนในทุก ๆ ด้านด้วยดีเสมอมา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่เป็นคู่อุปถัมภ์ที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ตัวข้าพเจ้าที่สามารถทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้สำเร็จลุล่วงและขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อุทาน หนูจันทร์แก้ว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XXIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 บททความวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 น้ำมันหล่อลื่น.....	7
2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	8
2.1.1 การกลั่น.....	8
2.1.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	8
2.1.3 ไฮโดรไฟนิ่ง.....	8
2.1.4 การแยกไข.....	8
2.1.3 การแยกแอลฟิลท์.....	8
2.2 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์.....	9
2.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์.....	9
2.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์.....	9
2.2.3 โพลีไกลคอลส์.....	9
2.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์.....	9
2.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ.....	9

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่น.....	10
2.3.1 ความหนืด.....	10
2.3.2 ดัชนีความหนืด.....	13
2.3.3 การรวมตัวกับออกซิเจน.....	14
2.3.4 จุดวาบไฟ.....	14
2.3.5 จุดไหลเท.....	14
2.3.6 ตัวเลขความเป็นกลาง.....	15
2.4 สารเคมีเพิ่มคุณภาพ.....	15
2.4.1 สารเพิ่มดัชนีความหนืด.....	15
2.4.2 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันกับอากาศ.....	15
2.4.3 สารช่วยกระจายเขม่าตะกอน.....	16
2.4.4 สารต้านทานการสึกหรอ.....	16
2.4.5 สารป้องกันการเกิดสนิม.....	16
2.4.6 สารช่วยชะล้างทำความสะอาด.....	16
2.4.7 สารลดจุดไหลเท.....	17
2.4.8 สารต้านทานการเกิดฟอง.....	17
บทที่ 3 น้ำมันพืช.....	18
3.1 การผลิตน้ำมันพืชในประเทศ.....	19
3.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช.....	19
3.3 ประเภทของกรดไขมัน.....	20
3.3.1 กรดไขมันอิ่มตัว.....	20
3.3.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว.....	20
3.4 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช.....	21
3.5 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช.....	22
3.6 คุณสมบัติของน้ำมันพืช.....	24
3.6.1 ค่าไอโอดีน.....	24
3.6.2 จุดหลอมเหลว.....	25
3.6.3 ค่าความหนืด.....	25

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.6.4	ค่าซาปอนนิฟิเคชัน.....	26
3.6.5	การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ.....	26
บทที่ 4	รีโอโลยี.....	29
4.1	ความหมายของรีโอโลยี.....	29
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด.....	29
4.2.1	ของไหลนิวโทรเนียน.....	29
4.2.2	ของไหลนอนนิวโทรเนียน.....	29
4.3	เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี.....	31
4.3.1	เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน.....	31
4.4	คุณสมบัติของรีโอโลยีของน้ำมันพืช.....	32
4.4.1	เส้นกราฟการไหลของน้ำมันพืช.....	32
4.4.2	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันพืช.....	35
บทที่ 5	ทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบนอนนิวโทรเนียน.....	39
5.1	สมการโมดิฟายเรย์โนลด์.....	39
5.2	สมการทางไดนามิกส์.....	49
5.3	ภาวะการรองลื่นของกาบรองลื่นและมุมแอดติจูด.....	51
5.4	สมการพลังงาน.....	52
5.5	การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข.....	53
บทที่ 6	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	56
6.1	กาบรองลื่น.....	56
6.2	เพลากลม.....	57
6.3	อุปกรณ์วัดความดัน.....	57
6.4	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	58
6.5	อุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน.....	58
6.6	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์.....	59
6.7	การประกอบกาบรองลื่นเข้ากับเพลาและการติดตั้งอุปกรณ์วัด.....	59

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.8 การปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น.....	60
6.9 ลักษณะของกาบรองลื่น.....	60
6.10 ลักษณะของเพลากลม.....	61
6.11 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า.....	61
6.12 น้ำมันพีชทดสอบ.....	62
บทที่ 7 วิธีการทดลอง.....	63
7.1 ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี.....	63
7.2 ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	64
7.2.1 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....	64
7.2.2 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน.....	65
7.2.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน.....	65
7.3 ขั้นตอนการทดลองหาพฤติกรรมกาบรองลื่นด้วยน้ำมันพีชในกาบรองลื่น.....	66
บทที่ 8 ผลการทดลอง.....	68
บทที่ 9 เปรียบเทียบผลการทดลองกับทางทฤษฎี.....	85
9.1 การกระจายความดันในฟิล์มน้ำมัน.....	85
9.2 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน.....	104
9.3 ความสามารถในการรับภาระการหล่อลื่นของกาบรองลื่น.....	123
9.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของกาบรองลื่นเพลากลม.....	124
บทที่ 10 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	133
10.1 บทสรุป.....	133
10.2 ข้อเสนอแนะ.....	134
เอกสารอ้างอิง.....	135

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก.กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer.....	137
ภาคผนวก ข.กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple.....	139
ภาคผนวก ค.กราฟแสดง Calibration curve ของ Gap sensor.....	142
ภาคผนวก ง.คุณสมบัติของน้ำมันทดสอบ.....	143
ภาคผนวก จ.แสดงผังไดอะแกรมของการคำนวณ.....	145
ภาคผนวก ช.ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	154

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่าง ๆ .....	11
2.2 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม.....	11
2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม.....	12
2.4 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์.....	13
2.5 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม.....	13
3.1 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช.....	19
3.2 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ.....	20
3.3 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช.....	21
3.4 แสดงปริมาณของสารโทโคฟีโนลในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ.....	23
3.5 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช.....	25
3.6 แสดงจุดหลอมเหลวของน้ำมันพืช.....	25
3.7 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันพืชของน้ำมันพืช.....	25
3.8 แสดงค่าซาปอเนนิฟิเคชันของน้ำมันพืช.....	26

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การกลั่นน้ำมันดิบ.....7
2.2	ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น.....8
2.3	หลักการของความหนืด.....10
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น.....12
2.5	การหาค่าดัชนีความหนืด.....14
3.1	แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม.....24
3.2	การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ.....27
3.3	การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ.....28
3.4	การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ.....28
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือน.....30
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์กับอัตราความเครียดเฉือน.....31
4.3	เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน.....31
4.4	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันถั่วเหลือง.....32
4.5	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนัก.....33
4.6	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก.....33
4.7	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์ม.....34
4.8	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนัก.....34
4.9	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก.....35
4.10	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่างๆ .....35
4.11	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 0.2% โดยน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ.....36
4.12	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 1% โดยน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ.....36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันปาล์ม ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่างๆ .....37
4.14	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันปาล์ม ผสม ZDTP 0.2% โดยน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ.....37
4.11	เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 1% โดยน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ.....38
5.1	การไหลของฟิล์มน้ำมันผ่านช่องว่างระหว่างเพลากับกาบรองลื่น.....39
5.2	แสดงระบบพิกัดโคออร์ดิเนตของฟิล์มน้ำมันในกาบรองลื่นเพลากลม.....40
5.3	แสดงแรงกระทำบนก้อนปริมาตรสี่เหลี่ยม.....40
5.4	แสดงแรงที่กระทำบนกาบรองลื่น.....51
5.5	แสดงการแบ่งกริดบนพื้นผิวของกาบรองลื่น.....53
6.1	แสดงตำแหน่งของการติดตั้ง Pressure transducer และ Thermocouple.....56
6.2	แสดงลักษณะของเพลากลม.....57
6.3	แสดงอุปกรณ์ Pressure Transducer.....57
6.4	แสดงอุปกรณ์ Thermocouple.....58
6.5	แสดงอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน Gap sensor.....58
6.6	อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์.....59
6.7	แสดงการประกอบกาบรองลื่นเข้ากับเพลาและติดตั้งอุปกรณ์วัด.....59
6.8	แสดงการปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น.....60
6.9	แสดงลักษณะของกาบรองลื่น.....60
6.10	แสดงลักษณะของเพลากลม.....61
6.11	แสดงเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า.....61
7.1	แสดงผังไดอะแกรมของอุปกรณ์ Rheology lab test.....63
7.2	แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....64
7.3	แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....65
7.4	แสดงการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มน้ำมัน (Gap sensor).....66
7.5	แสดงผังไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....67





## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.19	แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของภาวะที่มากกระทำกับเพลลาที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเอียงศูนย์กลางของเพลลาที่กัปการรองลื่นของน้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ =200 rpm และ ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm L/D=0.5.....80
8.20	แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของภาวะที่มากกระทำกับเพลลาที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเอียงศูนย์กลางของเพลลาที่กัปการรองลื่นของน้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ =600 rpm และ ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm L/D=0.5.....81
8.21	แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของภาวะที่มากกระทำกับเพลลาที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเอียงศูนย์กลางของเพลลาที่กัปการรองลื่นของน้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ =800 rpm และ ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm L/D=0.5.....81
8.22	แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของภาวะที่มากกระทำกับเพลลาที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเอียงศูนย์กลางของเพลลาที่กัปการรองลื่นของน้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ =200 rpm และ ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm L/D=0.5.....82
8.23	แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของภาวะที่มากกระทำกับเพลลาที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเอียงศูนย์กลางของเพลลาที่กัปการรองลื่นของน้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ =600 rpm และ ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm L/D=0.5.....83
8.24	แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของภาวะที่มากกระทำกับเพลลาที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเอียงศูนย์กลางของเพลลาที่กัปการรองลื่นของน้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ =800 rpm และ ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm L/D=0.5.....83
9.1	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ C = 0.1 N = 200 rpm และ L/D=1 ของน้ำมันถั่วเหลือง.....85
9.2	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ C = 0.1 N = 600 rpm และ L/D=1 ของน้ำมันถั่วเหลือง.....86
9.3	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ C = 0.1 N = 800 rpm และ L/D=1 ของน้ำมันถั่วเหลือง.....86
9.4	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ C = 0.1 N = 200 rpm และ L/D=1 ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%.....87

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.5	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%.....87
9.6	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%.....88
9.7	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%.....88
9.8	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%.....89
9.9	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%.....89
9.10	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์ม.....90
9.11	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์ม.....90
9.12	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์ม.....91
9.13	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....91
9.14	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....92

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.15	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....92
9.16	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....93
9.17	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....93
9.18	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....94
9.19	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....95
9.20	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง .....95
9.21	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....96
9.22	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 0.2%.....96
9.23	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%.....97
9.24	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 0.2%.....97

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.25	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%.....98
9.26	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%.....98
9.27	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%.....99
9.28	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์ม.....99
9.29	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์ม.....100
9.30	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์ม.....100
9.31	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....101
9.32	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....101
9.33	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....102
9.34	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....102

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.35	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....103
9.36	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....103
9.37	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....104
9.38	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....105
9.39	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....105
9.40	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 0.2 %.....106
9.41	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 0.2 %.....106
9.42	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 800$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 0.2 %.....107
9.43	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 200$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 1%.....107
9.44	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 600$ rpm และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง ผสม ZDTP 1%.....108



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.56	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....114
9.57	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....115
9.58	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสมZDTP0.2 %.....115
9.59	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสมZDTP0.2 %.....116
9.60	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสมZDTP0.2 %.....116
9.61	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสมZDTP 1%.....117
9.62	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสมZDTP 1%.....117
9.63	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอนุหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี $C = 0.1$ mm $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันถั่วเหลืองผสมZDTP 1%.....118
9.64	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์ม.....118
9.65	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์ม.....119
9.66	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์ม.....119

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.67	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....120
9.68	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....120
9.69	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%.....121
9.70	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 200$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....121
9.71	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 600$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....122
9.72	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีที่ $C = 0.1$ $N = 800$ rpm และ $L/D=0.5$ ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%.....122
9.73	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับภาระการรองรับกับอัตราส่วน การเอียงศูนย์ของเพลลาที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น.....123
9.74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับภาระการรองรับกับอัตราส่วน การเอียงศูนย์ของเพลลาที่ใช้ น้ำมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น.....124
9.75	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วน การเอียงศูนย์ของเพลลาที่ $C=0.1$ และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....125
9.76	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วน การเอียงศูนย์ของเพลลาที่ $C=0.1$ และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....125
9.77	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วน การเอียงศูนย์ของเพลลาที่ $C=0.1$ และ $L/D=1$ ของน้ำมันถั่วเหลือง.....126



## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

B	ค่าสัมประสิทธิ์ของแคมป์
c	ระยะเคลียร์เลนทในแนวรัศมี
D	เส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลา
e.	ระยะเยื้องศูนย์กลาง(eccentricity)ของเพลลา
h	ความหนาของฟิล์มน้ำมัน
h.	ความหนาต่ำสุดของฟิล์มน้ำมัน
K	ค่าสัมประสิทธิ์ของสปริง
R	รัศมีของเพลลา
T	อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน
T'	อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันในรูปไร้มิติ, $T' = (\beta(T-T_0))$
E	อัตราการเยื้องศูนย์กลาง = $\frac{e}{c}$
L	ความยาวของกาบรองคลื่น
m	viscosity consistency
n	power law index
N	ความเร็วรอบการหมุนของเพลลา
P	ความดันของฟิล์มน้ำมัน
P'	ความดันของฟิล์มน้ำมันในรูปไร้มิติ, $P' = \frac{c^2}{6\mu\mu RN} P$
U	ความเร็วที่ผิวของเพลลา
W	ภาระที่กระทำบนกาบรองคลื่น
W.	ภาระที่กระทำบนกาบรองคลื่นในรูปไร้มิติ, $W' = \frac{c^2}{6\mu\mu R^2 LN} W$
$\beta$	viscosity-temperature index
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์ของสารหล่อลื่น
$\theta$	พิกัดตามแนวเส้นรอบวงของเพลลาวัดจากจุดที่มีความหนาฟิล์มมากที่สุด
X	พิกัดตามแนวแกน x
Z	พิกัดตามแนวแกน z
$\phi$	มุมแอตติจูด (attitude angle)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมน้ำมันพืชจัดเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญทางเศรษฐกิจ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง รวมทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมที่สนับสนุนอุตสาหกรรมอื่น ทำให้เกิดการจ้างงานและสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชย่อมส่งผลกระทบต่อภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรม

ประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งปัจจุบันรัฐบาลได้หันมาส่งเสริมและสนับสนุนภาคอุตสาหกรรมจึงทำให้ภาคเกษตรมีบทบาททางเศรษฐกิจน้อยลง ขณะที่อุตสาหกรรมมีความสำคัญมากขึ้นมีการนำเครื่องจักรและเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้มากขึ้นต้องใช้พลังงานมากขึ้นต้องบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้บางอย่างจำเป็นต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ

ในช่วงปี พ.ศ. 2517-2525 หมวดน้ำมันเชื้อเพลิงมีมูลค่าการนำเข้าเป็นอันดับแรกเพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงานรวมทั้งน้ำมันหล่อลื่นก็มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนข้างมาก น้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานและทำให้การสึกหรอของผิวสัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องจักรลดลง รวมทั้งช่วยระบายความร้อน ซึ่งมีความสำคัญมากในวงการอุตสาหกรรม คาดว่าในประเทศไทยตลาดน้ำมันหล่อลื่นจะมีการเจริญเติบโตขึ้นในอัตราร้อยละ 7- 8 ต่อปี ( จาก ฐานเศรษฐกิจ,2541 ) จึงส่งผลให้ความต้องการน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ( Base-oil ) ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มสูงตามไปด้วย

ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากผลิตมาจาก น้ำมันแร่ (Mineral oil) ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นเหล่านี้เมื่อนำมาใช้และมีการเปลี่ยนถ่ายเมื่อหมดสภาพ น้ำมันหล่อลื่นที่หมดสภาพเหล่านี้มักจะไม่ได้รับการกำจัดที่ถูกต้องจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการย่อยสลายยากจึงทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำน้ำมันพืชที่มีการผลิตอย่างแพร่หลายภายในประเทศมาศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ในการหล่อลื่นของแบร์ริงเพลากลมแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ โดยใช้น้ำมันพืชเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) และได้ทำการเติมสารเพิ่มคุณภาพ (Additive) ลงไปเพื่อให้มีคุณสมบัติบางอย่างเพิ่มขึ้น และลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

## 1.2 บทควมวิจัยที่ผ่านมา

ในราวปี ค.ศ. 1886 Reynolds [1] ได้นำเสนอทฤษฎีการหล่อลื่น หรือสมการเรย์โนลด์สำหรับสารหล่อลื่นที่เป็นนิวโตเนียนขึ้นเป็นครั้งแรก ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวนี้บ่งว่าเป็นประโยชน์อย่างมาก ต่อการวิเคราะห์และการคำนวณหาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของกาบรองลื่นชนิดต่างๆ ในเวลาต่อมาวิวัฒนาการเกี่ยวกับสารหล่อลื่นได้มีการพัฒนาและวิจัยเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่น การพัฒนาให้สารหล่อลื่นมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ตลอดจนการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นให้สามารถทำงานภายใต้สภาวะต่างๆ ได้ เป็นต้น ในการปรับปรุงคุณภาพของสารหล่อลื่นที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่ การผสมสารเพิ่มคุณภาพ (additives) ประเภทต่างๆ ลงไป สารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้ในการเพิ่มค่าความหนืดในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปมักเป็นสารเพิ่มคุณภาพประเภทโพลีเมอร์ ซึ่งได้แก่ โพลีไอโซบิวทีลีน (Polyisobutylene, PIB) และโอลีฟินโคโพลีเมอร์ (Olefin Copolymer, OCP) เป็นต้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อผสมสารเพิ่มคุณภาพประเภทโพลีเมอร์ลงไปในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นนั้นมีคุณสมบัติเป็น Non-Newtonian จึงทำให้สมการที่นำเสนออยู่เดิม ไม่สามารถที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามนำเสนอสมการการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian กันอย่างมากมายดังต่อไปนี้

Horowitz H.H และ Steider F.E [2] ได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่น ที่ผสมสาร VI Improver และได้นำเสนอสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์สำหรับกาบรองลื่นเพลากลมแบบความยาวจำกัด (Finite Width) โดยในการศึกษาได้พิจารณาให้สมการความหนืดขึ้นอยู่กับฟังก์ชันลอการิทึมของความเค้นเฉือน และได้ใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการแก้สมการเรย์โนลด์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่น เช่น การกระจายความดันของฟิล์มน้ำมันที่หล่อลื่นด้วยทั้งสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian พร้อมกับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นทั้งสองชนิด โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

Tanner R.I [3] ได้นำเสนอทฤษฎีการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของกาบรองลื่นเพลากลมแบบสั้นสำหรับสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian โดยใช้สมการ Power Law และพิจารณาให้สารหล่อลื่นเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ และอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Condition) เพื่อศึกษาผลของความเสียดทานที่มีต่อการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian

Safar Z.S [6] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมสัจฉัยของกาบรองลื่นที่มีความยาวมาก (Infinitely Long) ที่หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian โดยใช้สมการ Power Law และได้ทำการสมมุติความเร็วให้อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียล เพื่อให้ได้สมการเรย์โนลด์สำหรับหาค่าการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมัน และค่าภาระของกาบรองลื่น จากผลการศึกษาเชิงทฤษฎีพบว่าที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางต่างๆ ค่าดัชนีเลขยกกำลัง (Power Law Index) จะมีผลต่อค่าการกระจายความดัน โดยเมื่อค่าดัชนีเลขยกกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการกระจายความดันมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อค่าดัชนีเลขยกกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นค่าภาระของกาบรองลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Tanner R.I [4] ได้ทำการศึกษาหาพฤติกรรมสัจฉัยของสารหล่อลื่นที่เป็น Non-newtonian ในกาบรองลื่นเพลากลมแบบยาวมาก (Infinitely Long) โดยใช้สมการ Cubic shear stress และพิจารณาให้ความดันรวมทั้งสมการการไหลสามารถกระจายอยู่ในรูปของอนุกรมเลขยกกำลัง (Power Series) เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian โดยประมาณ 22.5 เปอร์เซ็นต์

Wada S. และ Hayashi H. [5] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นที่เป็นนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก (Pseudo-Plastic) ในกาบรองลื่นเพลากลม โดยใช้สมการ Cubic Shear Stress ในการศึกษาได้แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกได้ทำการศึกษเชิงทฤษฎี ซึ่งจากการศึกษาเชิงทฤษฎี พบว่าพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียนมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของกาบรองลื่น โดยพบว่าที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางเดียวกันค่าการกระจายความดันฟิล์มน้ำมัน รวมทั้งความสามารถในการรับภาระการรองลื่นของกาบรองลื่น มีค่าต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่เป็นนิวโตเนียนภายใต้ความหนืดเริ่มต้นเดียวกัน และในส่วนที่สองได้ทำการศึกษาเชิงการทดลอง โดยได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดความหนืดชนิดแกนหมุน (Rotational Viscometer) เพื่อหาเส้นโค้งการไหล (Flow Curve) ของสารหล่อลื่นที่ผสมสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index Improver) ซึ่งได้แก่ สารโพลีไอโซบิวทีลีน (PIB) โดยทำการผสมลงไปในน้ำมันสปินเดิล (Spindle) ในอัตราส่วน 0.3% , 1% และ 2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการวัดพบว่าสารหล่อลื่นดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก จากนั้นจึงได้ทำนำสารดังกล่าวไปทดสอบในกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง ที่ความเร็วรอบการหมุนของเพลากับ 308 รอบต่อนาที จากการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองให้ผลใกล้เคียงกับทางทฤษฎี

Mongkolwongrojn M. และ Arunmetta A. [7] ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการหล่อลื่นในกาบรองลื่นเพลากลมโดยใช้สารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งในการศึกษาได้ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Based Oil) และได้ผสมสารโพลีไอโซบิวทีลีน (Polyisobutylene, PIB) สารไดเอสเตอร์ (Diester) รวมทั้งน้ำมันซิลิโคนลงในน้ำมันถั่วเหลือง เพื่อเพิ่มค่าความหนืด และป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันพืชกับอากาศรวมทั้งเพื่อป้องกันการเกิดฟองในน้ำมันพืชด้วย จากนั้นจึงทำการทดลองหาเส้นโค้งการไหล (Flow Curve) ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพดังกล่าว ซึ่งจากกราฟของเส้นโค้งการไหลพบว่าน้ำมันดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็น Non-Newtonian แบบไดลาแตนท์ (Dilatant) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ Cubic Shear Stress ในการศึกษาได้ทำการศึกษาที่ค่า Radial Clearance Ratio เท่ากับ 0.004 จากการศึกษาทางทฤษฎีที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆพบว่าที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง เท่ากับ 0.6 ค่าการกระจายความดันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และที่ 0.8 ค่าการกระจายความดันมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

Mongkolwongrojn M. ,Nujunkaew U.และFoungjaroen V. [11] ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นเพลากลมแบบ Thermohydrodynamic โดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น โดยผสมสารโพลีไอโซบิวทีลีน (Polyisobutylene, PIB) โดยการประมาณโมเดลทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการ Power Law Model โดยทำการศึกษาที่ค่าอัตราส่วนของ เส้นผ่าศูนย์กลางของเพลาลและความยาวของกาบรองลื่นที่ค่า 0.5 และใช้ค่าระยะห่างระหว่างเพลาลและกาบรองลื่นมีค่า 0.08 และ 0.1 ตามลำดับจากการศึกษาทางทฤษฎีพบว่าที่ค่า Radial Clearance เท่ากับ 0.1 จะให้ค่าการกระจายความดันสูงกว่าที่ค่า Radial Clearance เท่ากับ 0.08

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบ
- 2 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear strain rate ของน้ำมันพืชที่ผสมสารซิงค์ไดอัลไคลด์ไดไตรโอฟอสเฟต (ZDTP)
- 3 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการกระจายความดันและค่าการกระจายอุณหภูมิภายในชั้นฟิล์มน้ำมันของกาบรองลื่นเพลากลม
- 4 ทำการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาการหล่อลื่นของเบริงเพลากลมแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ด้วยน้ำมันพืช
- 5 ทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายความดันและค่าการกระจายอุณหภูมิภายในชั้นฟิล์มน้ำมันของกาบรองลื่นเพลากลมระหว่างการคำนวณและการทดลอง

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ที่นำมาผสมกับสาร ซิงค์ไดอัลไธโอไฟอสเฟต ( zinc dialkyl dithiophosphates , ZDTP ) เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช
2. ทำการทดสอบหาค่าความหนืดของน้ำมันพืชที่นำมาเติมสารเพิ่มคุณภาพด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer) ในห้อง Lubrication Lab ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ไฟไนท์ลิฟเฟอร์เรนซ์แก้สมการ Modified Reynold's เพื่อศึกษาการหล่อลื่นของเบร้งเพลากลมแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ด้วยน้ำมันพืชที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ
4. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ และทำการทดลองน้ำมันพืชที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพแล้ว

#### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบ โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพ ซิงค์ไดอัลไธโอไฟอสเฟต ( zinc dialkyl dithiophosphates , ZDTP ) เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมัน
2. ทำการศึกษาค่าความหนืดของน้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)
3. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ และทำการทดสอบน้ำมันพืชที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพโดยใช้เป็นสารหล่อลื่นในการหล่อลื่นเบร้งเพลากลมแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ด้วยน้ำมันพืช
4. ทำการบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบ และเปรียบเทียบกับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ไฟไนท์ลิฟเฟอร์เรนซ์แก้สมการ Modified Reynold's

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ในด้านเศรษฐกิจงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางภาคเกษตรที่นอกจากจะนำมาบริโภคทั่วไปแล้วอาจนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ โดยอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจภายในประเทศ
2. ในด้านสิ่งแวดล้อมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วสามารถที่จะย่อยสลายได้ง่ายกว่าน้ำมันแร่และไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งบรรพประมาณในการบำบัดน้อยกว่าก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

3. เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีคุณค่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรมากสามารถที่จะตอบสนองอุตสาหกรรมภายในประเทศได้ และทำให้เกิดการจ้างงานมากขึ้นภายในประเทศ

4. เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่เป็นสาเหตุให้ประเทศไทยต้องเสียเปรียบดุลการค้ากับต่างประเทศ

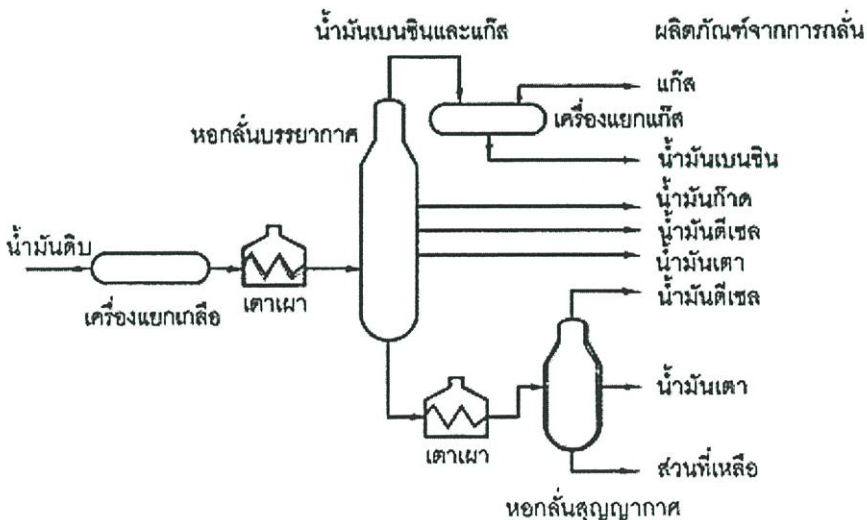
## บทที่ 2

# น้ำมันหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมายซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi-Solid) และ ของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กันสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด และรองลงมาคือสารกึ่งแข็ง ได้แก่ จาระบี

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะสามารถแยกผิวของวัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรับแรงที่กระทำได้มากของเหลวที่นำมาทำเป็นสารหล่อลื่นมีทั้ง น้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่ (Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil) ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้น้ำจะมีการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด

ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานซึ่งเป็นขั้นตอนการกลั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในโรงกลั่น และทำให้บริสุทธิ์ ขั้นตอนที่สองคือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งเป็นขั้นตอนการผสมน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานด้วยกันเองเพื่อให้ได้ความหนืดตามที่ต้องการกับการเติมสารเคมีเพิ่มคุณภาพ เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งาน



รูปที่ 2.1 การกลั่นน้ำมันดิบ

## 2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Lube Base Stock)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเป็นส่วนที่เราแยกจากหอกลั่นน้ำมันดิบ แล้วกลั่นต่อในหอกลั่นสุญญากาศ หลังจากนั้นเราทำให้น้ำมันหล่อลื่นบริสุทธิ์และมีคุณภาพดีขึ้นด้วยการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ดังนี้

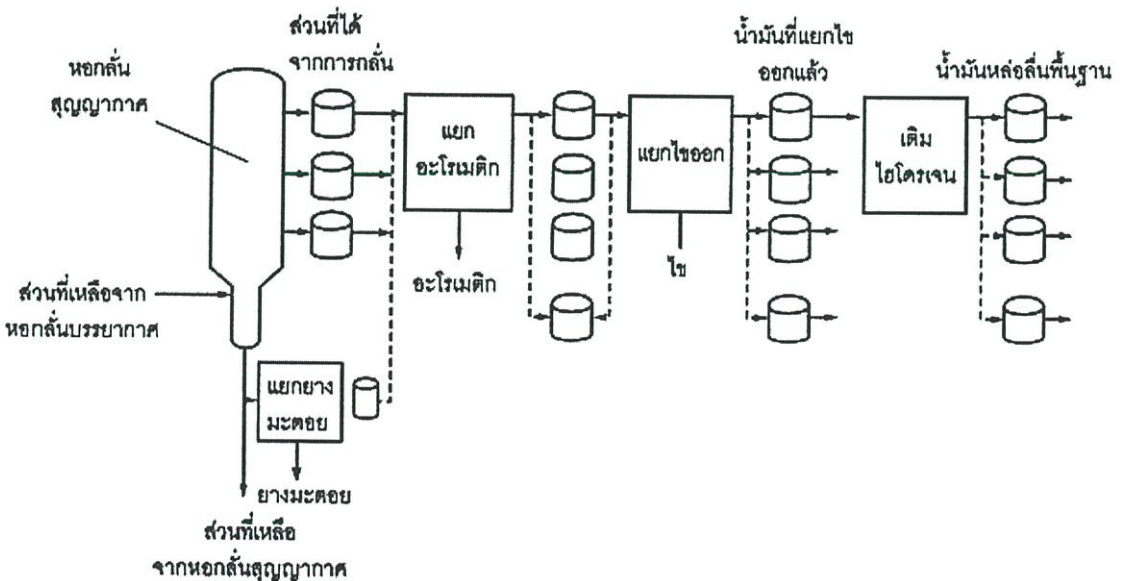
2.1.1 การกลั่น (Distillation) ในโรงกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงเราจะแยกเชื้อเพลิงต่างๆ ออกด้วยหอกลั่นบรรยากาศสำหรับในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่น เราเอาส่วนที่เหลือไปผ่านหอกลั่นสุญญากาศเพื่อให้สามารถกลั่นน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเป็นส่วนที่หนักกว่าได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก

2.1.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) โดยมากใช้ฟีนอลเป็นตัวทำละลายในการสกัดสารจำพวกอะโรมาติก เพื่อทำให้น้ำมันมีดัชนีความหนืดสูงขึ้นเสถียรและไม่รวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย

2.1.3 ไฮโดรไฟนิง (Hydrofining) คือกรรมวิธีเติมไฮโดรเจนเพื่อแปลงรูปโมเลกุลของสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน กรด และ ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ทำให้น้ำมันมีสีสวยขึ้น สีคงตัวได้นาน เขม่าลดลงและอายุการใช้งานยาวนาน

2.1.4 การแยกไขออก (Dewaxing) เพื่อให้มีจุดไหลเทต่ำสามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.1.5 การแยกแอสฟัลท์ (Asphalt Separation) คือการแยกสารจำพวกยางมะตอยออกจากน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 2.2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

## 2.2 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ (Synthetic Oil)

น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น

โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการทางเคมีจึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้างโมเลกุลตามที่ต้องการได้

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่สามารถแบ่งได้ 5 กลุ่มคือ

2.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (Synthesized hydrocarbons) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟินโอลิโกเมอร์ (Olefin Oligomers), อัลคิลเตตระอะโรมาติก (Alkylated Aromatics) และโพลีบิวทีนส์ (Polybutenes) ข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคงมีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

2.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (Organic Esters) เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยาน และใช้ในระบบไฮดรอลิกเป็นต้น เอสเทอร์ อินทรีย์ที่ใช้กันอยู่มีสองชนิด ชนิดแรกคือไดเบสิกเอซิดเอสเทอร์ (Dibasic Acid Esters) บางครั้งเรียกว่าไดเอสเทอร์ (Diester) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิด (Dibasic Acid) กับโมโนไฮดรอลแอลกอฮอล์ (Monohydric Alcohol) อีกชนิดหนึ่งก็คือโพลีโอลเอสเทอร์ (Polyol Esters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโพลีไฮดรอลแอลกอฮอล์ (Polyhydric Alcohol) กับโมโนเบสิกเอซิด (Monobasic Acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่คือมีความมั่นคงที่อุณหภูมิสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2.2.3 โพลีไกลคอลส์ (Polyglycols) เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำเหมาะสำหรับสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate Esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ

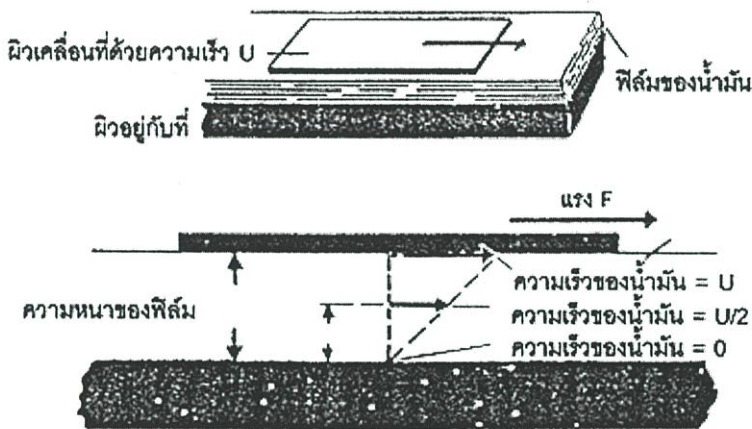
2.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นได้แก่ซิลิโคนซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก และมีจุดไหลเทต่ำ

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่คือสามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่คือใช้ได้ทั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าน้ำมันแร่นอกจากนั้น น้ำมันสังเคราะห์บางประเภท ยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่นผสมเข้ากันกับน้ำได้และไม่ติดไฟเป็นต้น

## 2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติบางอย่างอยู่ในตัวแล้ว คุณสมบัติที่สำคัญนั้นได้แก่

2.3.1 ความหนืด (Viscosity) ความหนืดคือความต้านทานการไหลของน้ำมันความหนืดหรือความข้นใสเป็นคุณสมบัติสำคัญของน้ำมันมีการแปรผันกลับกับอุณหภูมิของน้ำมันถ้าอุณหภูมิค่าน้ำมันจะขึ้นให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่หนาและถ้าอุณหภูมิสูงน้ำมันจะใสให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บางหน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบ และอุณหภูมิที่วัดก็แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 หลักการของความหนืด

หลักการของความหนืดที่แสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็ว สม่่าเสมอฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ที่ผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำมันหลาย ๆ ชั้น ชั้นที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่  $U$  ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว  $U$  ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรง ( $F$ ) ที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนั้นก็คือ แรงที่เอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมัน และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืดดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)

สำหรับในระบบหน่วยเอสไอแล้วความหนืดจะมีหน่วยเป็นปาสคาล.วินาที ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) หรือ ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ) การเปลี่ยนหน่วยระหว่างระบบหน่วยทั้งสามคือ

1 Pa.s	=	1000 cP
1 reyn	=	$6.89 * 10^6$ cP
1 reyn	=	6890 Pa.s

ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่างๆ

ประเทศ หรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการวัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	Centistoke (cSt)	40 °C และ 100 °C
2. สหรัฐอเมริกา	Saybolt Universal Second(SUS หรือ SSU)	100°F และ 210°F
3. สหราชอาณาจักร	Redwood No.1 (RW1)	70°F, 100°F, 140°F และ 200°F
4. เยอรมัน	Engler ( °E)	20 °C, 50 °C และ 100 °C

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าในน้ำมันหล่อลื่นจะประกอบด้วย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้กันส่วนใหญ่มักได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียมอันได้แก่พาราฟินิก (Paraffinic) และแนฟทีนิก (Naphthenic) เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบซึ่งตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติค่าความหนืดและค่าดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้มาจากปิโตรเลียม

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม[17]

Molecular weight	Viscosity, mPa.s		Viscosity index
	40 °C	100 °C	
Paraffinic petroleum based oil			
450	48.0	5.9	96
576	144.3	12.2	99
700	523	27.4	91
Naphthenic petroleum based oil			
349	49.9	5.1	23
383	131.4	8.3	8
400	485	15.5	-42

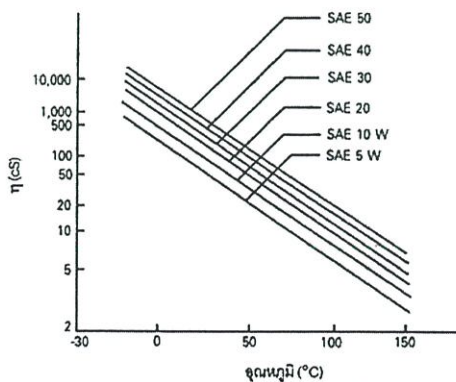
ในการที่จะเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทใดนั้นควรที่จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้นๆด้วย เช่นความหนืดความหนาแน่นจุดไหลเทรวมทั้งความ

สามารถในการดำเนินการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ดีอีกด้วยและทางค่านราคาเป็นต้น ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

คุณสมบัติ	Paraffinic	Naphthenic
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง
จุดไหลเท	สูง	ต่ำ
การต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน	ไม่ดี	ไม่ดี
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายประเภท หลายชนิด ซึ่งจะมีชื่อเรียกกันต่างๆแล้วแต่ผู้ผลิตจะกำหนดขึ้น ในการเลือกที่จะใช้น้ำมันหล่อลื่นประเภทใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้จะนำไปใช้กับงานประเภทใด หากต้องการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมควรเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ไม่จำเป็นต้องมีค่าดัชนีความหนืดสูงมากนัก และถ้าหากต้องการนำมาใช้กับเครื่องยนต์ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง ซึ่งก็คือค่าความหนืดจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิมากนัก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีค่าดัชนีความหนืดสูงนั่นเอง นอกจากนี้จะมีค่าดัชนีความหนืดสูงแล้ว ยังจะต้องมีคุณสมบัติอื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่นจะต้องไม่เกิดการกัดกร่อนต่อชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบการหล่อลื่น รวมทั้งจะต้องมีอายุการใช้ที่ยาวนาน เป็นต้น ดังนั้นทางสมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineers) หรือที่เรียกกันว่า SAE จึงได้กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับความหนืดของน้ำมันของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ และในอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ ตารางที่ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น

ตารางที่ 2.4 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์

SAE viscosity no.	Viscosity in cSt ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ )			
	0 °F (-18 °C)		210 °F (100 °C)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
<b>Crankcase oils</b>				
5W	—	869	—	—
10W	1,303	2,606	—	—
20W	2,606	10,423	—	—
20W			5.73	9.62
30W			9.62	12.93
40W			12.93	16.77
50W			16.77	22.68

ตารางที่ 2.5 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม

Grade identification (ISO VG)	Midpoint viscosity [ $\mu\text{m}^2/\text{s}$ (cSt) at 40°C]	Viscosity limits [ $\mu\text{m}^2/\text{s}$ (cSt) at 40°C]	
		Minimum	Maximum
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.0	11
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.8	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

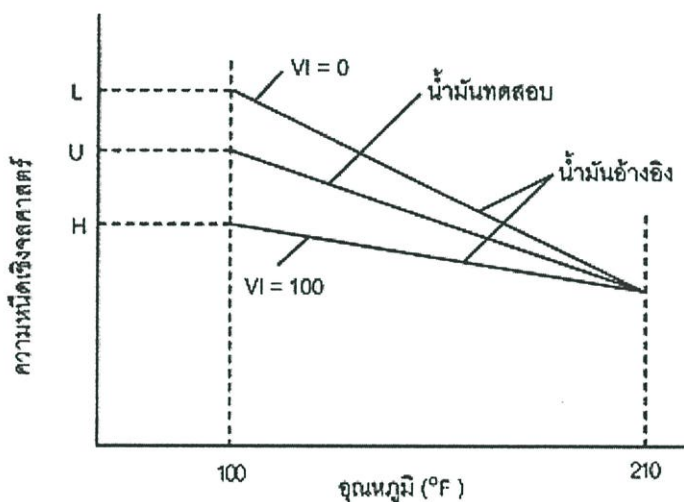
2.3.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) ดัชนีความหนืดคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดสูงจะเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อย เมื่ออุณหภูมิการใช้งานเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำน้ำมันมักมีความหนืดสูงทำให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเคลื่อนไหวลำบากแต่พอใช้งานสักพักหนึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดกลับลดต่ำลงมาก ทำให้เครื่องจักรสึกหรอ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่จะหาดัชนี

ความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100 การหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำได้โดยการหาความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นตามสมการ

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (2.1)$$

VI = ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)

ค่า L, U, และ H ให้ดูตามรูปที่ 6



รูปที่ 2.5 การหาค่าดัชนีความหนืด

2.3.3 การรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) น้ำมันปิโตรเลียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดเป็นสารประเภทกรดเหนียวคล้ายแลคเกอร์ซึ่งไม่ช่วยในการหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องรวมตัวกับออกซิเจนได้ยากหรือรวมกันได้ช้า โดยทั่วไปแล้วภายใต้อุณหภูมิใช้งานสูง ๆ อัตราการรวมตัวกับออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถจะตรวจสอบได้โดยการวัดค่า Neutralization, Pentane Insoluble, Toluene Insoluble

2.3.4 จุดวาบไฟ (Flash Point) จุดวาบไฟคืออุณหภูมิของน้ำมันได้รับความร้อนจนเป็นไอแล้วลุกวาบเมื่อถูกเปลวไฟแต่เปลวไฟจะเกิดเพียงไม่นาน ในแง่ของน้ำมันหล่อลื่นถ้าน้ำมันมีจุดวาบไฟต่ำจะทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการระเหยมากจึงต้องมีการเติมเพิ่มบ่อยและยังมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัยอีกด้วย

2.3.5 จุดไหลเท (Pour Point) จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังสามารถไหลได้ ไว (Wax) ที่มีอยู่ในเนื่อน้ำมันจะแข็งตัว (Crystallize) เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหลเทของน้ำมันนั้น ทำให้

น้ำมันไหลได้ยาก ในการใช้น้ำมันในที่อุณหภูมิต่ำมาก เช่นห้องเย็นหรือโรงน้ำแข็ง หรือในฤดูหนาวต้องใช้น้ำมันที่มีจุดไหลต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน

2.3.6 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutrallization Number) น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรด อยู่เล็กน้อยซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้นสภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้

## 2.4 สารเคมีเพิ่มคุณภาพ (Additives)

ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานล้วนๆ มักจะมีคุณสมบัติไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพลงไป ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

Ranny [14] ได้แบ่งชนิดของสารเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำมันเครื่องไว้ดังนี้

- ก) สารเพิ่มดัชนีความหนืด
- ข) สารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
- ค) สารช่วยกระจายเขม่าตะกอน
- ง) สารต้านทานการสึกหรอ
- จ) สารป้องกันการเกิดสนิม
- ฉ) สารช่วยชะล้างทำความสะอาด
- ช) สารลดจุดไหลเท

### 2.4.1 สารเพิ่มดัชนีความหนืด

สารเพิ่มดัชนีความหนืด เป็นสารที่ใช้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างๆกัน สารเพิ่มดัชนีความหนืดที่ใช้กัน ได้แก่

1. Polyisobutylene
2. Polymethacrylate
3. Styrene based polyester
4. Styrene based copolymer

### 2.4.2 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation)

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเป็นสารที่ใช้หน่วงหรือต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ ไม่ให้ทำปฏิกิริยากับน้ำมัน โดยเฉพาะที่ อุณหภูมิสูงๆ สารที่ใช้ได้แก่

1. Zinc Dithiophosphate
2. Phenate Sulfide
3. Phospho Sulfide
4. Aromatic Amine
5. Sulfurized Esters
6. Hindered Phenol

#### 2.4.3 สารช่วยกระจายเขม่าตะกอน (Dispersants)

สารช่วยกระจายเขม่าตะกอนนี้ สารชนิดนี้จะทำหน้าที่คอยจับสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอมที่ปนอยู่ในน้ำมันให้รวมตัวกันอยู่ที่กันอย่างน้ำมัน ในรูปของตะกอนน้ำมันหรือวานิชสารที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แก่

1. Polyisobutenyl Succinimide
2. Polyisobutenyl Succinic ester

#### 2.4.4 สารต้านทานการสึกหรอ

สารต้านทานการสึกหรอ เป็นสารที่ช่วยลดการสึกหรอ ที่เกิดจากการกัดกร่อน สารที่ใช้กันส่วนมากได้แก่

1. Zinc Dithiophosphate
2. Dithiocarbamate
3. Alkaline Detergent

#### 2.4.5 สารป้องกันการเกิดสนิม

สารป้องกันการเกิดสนิม ที่ใช้กันได้แก่

1. Alkaline detergent
2. Alkenylsuccinic acid
3. Alkylate phenoxy alkalene oxide

#### 2.4.6 สารช่วยชะล้างทำความสะอาด (Detergents)

สารช่วยชะล้างทำความสะอาด จะทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของคราบตะกอนที่เกิดขึ้น สารที่ใช้ได้แก่

1. Sulfonate
2. Phenate
3. Phosphonate
4. Salicylate

#### 2.4.7 สารลดจุดไหลเท (Pour Point Depressants)

สารลดจุดไหลเทเป็นสารที่ใช้ควบคุมการเกิดเป็นขี้ผึ้ง (Wax) ในน้ำมันโดยเฉพาะในที่อุณหภูมิต่ำๆ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นไม่แข็งตัว สารพวกนี้ได้แก่

1. Polymethacrylate
2. Styrene based Polyester
3. Crosslinked Alkyl Phenols
4. Alkyl Naphthalene

#### 2.4.8 สารต้านทานการเกิดฟอง (Anti-Foaming Agents)

สารต้านทานการเกิดฟองนี้ มีหน้าที่ขจัดขวงหรือลดการเกิดฟองทั้งที่เกิดจากน้ำมันและจากสารเพิ่มคุณภาพตัวอื่น โดยจะทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของสารหล่อลื่น สารพวกนี้ได้แก่

1. Silicone
2. Polycrylates

### บทที่ 3

## น้ำมันพืช

น้ำมันพืชถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำมาประยุกต์ใช้และเป็นที่ทราบกันว่า น้ำมันพืชไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม กรณีที่การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่สนใจ และเริ่มมีการนำน้ำมันพืชมาเป็นสารหล่อลื่นป้องกันการสึกหรอแต่คุณสมบัติเหล่านี้ยังคงสภาพที่ไม่แน่นอนดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้จึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สาร Zinc Dialkyldithiophosphates (ZDTP) ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติต่อต้านการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศให้กับน้ำมันพืช

ถั่วเหลืองเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญของโลก เนื่องจากเมล็ดถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทางทั้งการบริโภคเมล็ดและน้ำมัน การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร การใช้เมล็ดและกากถั่วเหลืองเป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองยังสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อีก เช่น สีทาบ้าน พลาสติก กระดาษ และกาว เป็นผลให้ความต้องการใช้ถั่วเหลืองในการบริโภค และอุตสาหกรรมต่างๆ ขยายตัวมาโดยตลอด โดยผลผลิตถั่วเหลืองเฉลี่ย 5 ปีย้อนหลัง (ปี 2539/40 - 2543/44) มีประมาณ 157.02 ล้านตัน หรือ คิดเป็น ร้อยละ 55.95 ของปริมาณการผลิตพืชน้ำมันที่สำคัญของโลก นับเป็นปริมาณผลผลิตสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณผลผลิตพืชน้ำมันที่สำคัญชนิดอื่นๆ เช่น ฝ้ายเรพซิดและถั่วลิสง

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น จัดอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศ บริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุด คือจังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและตรัง โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 และรองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และ 15.89 ของพื้นที่ปลูกทั้งประเทศตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผลตอบแทนการปลูกปาล์มน้ำมันดีกว่าการปลูกพืชชนิดอื่นเช่น ยางพาราและการทำนาข้าว จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกประกอบกับมีโครงการเปลี่ยนพื้นที่ปลูกปาล์มทั่วประเทศ คาดว่าปริมาณความต้องการน้ำมันปาล์มภายในเพิ่มขึ้นมากทั้งนี้เพราะราคาน้ำมันปาล์มในตลาดโลกมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้ความแตกต่างของราคาภายในและภายนอกประเทศไม่จูงใจให้มีการลักลอบเข้ามาบริโภคโดยในปี 2539 ส่วนแบ่งของน้ำมันปาล์มต่อการบริโภครวมของโลกเท่ากับร้อยละ 15.42 เพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 17.81

### 3.1 การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ

ในระยะเวลาที่ผ่านมาผลผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทยมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อย ต่อมาได้มีการนำเอาเครื่องจักรมาช่วยในการผลิตทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้มากขึ้น สำหรับผลผลิตของน้ำมันพืชจากตารางที่ 3 จะพบว่าในปี พ.ศ. 2524 มีทั้งสิ้น 100,000 เมตริกตัน ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดได้แก่ น้ำมันปาล์ม รองลงมาได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 3.1 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช

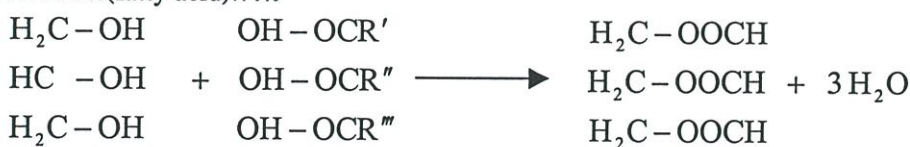
(หน่วย:เมตริกตัน)

ชนิดของน้ำมันพืช	ผลผลิต*		
	2542	2543	2544
น้ำมันมะพร้าว	14,965	19,000	14,000
น้ำมันถั่วลิสง	3,028	14,000	12,000
น้ำมันรำข้าว	10,288	16,500	14,000
น้ำมันถั่วเหลือง	6,104	13,200	11,000
น้ำมันเมล็ดนุ่น	1,979	6,200	5,000
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	5,455	3,000	2,500
น้ำมันปาล์ม	12,000	16,000	20,000
น้ำมันละหุ่ง	2,704	13,000	17,000
อื่นๆ	4,000	5,500	5,000
รวม/เฉลี่ย	60,523	106,400	100,000

\*ที่มา : ฝ่ายวิชาการ ธนาคารแห่งประเทศไทย

### 3.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกลีเซอรอล(glycerol) กับกรดไขมัน(fatty acid)ดังนี้



กลีเซอรอล

กรดไขมัน

ไตรกลีเซอไรด์

เมื่อ R',R'',R''' = โข่ของกรดไขมัน

### 3.3 ประเภทของกรดไขมัน

กรดไขมันเป็นสารซึ่งประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ต่ออยู่กับโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain) โมเลกุลของกรดไขมันอาจมีการจับกันระหว่างธาตุของคาร์บอนทั้ง 1 บอนด์ และ 2 บอนด์ โดยพวกที่มี 1 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated) พวกที่มี 2 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated)

#### 3.3.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acids)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (Double Bond) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งคาร์บอนแต่ละตัวบนสายโซ่จะต่ออยู่กับไฮโดรเจนอย่างน้อย 2 ตัวหากในน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มาก จะทำให้น้ำมันพืชนั้นเป็นไขมันตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัวนี้ได้แก่กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic Acid) กรดลอริก (Lauric) และกรดไมริสติก (Myristic) เป็นต้น โครงสร้างของกรดไขมันเหล่านี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

#### 3.3.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acids)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่โซ่ไฮโดรคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่ตั้งแต่ 1 คู่พันธะขึ้นไป ซึ่งตำแหน่งของพันธะคู่ของกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไปโดยถ้ามีพันธะเดียวคั่นอยู่ระหว่างพันธะคู่จะเรียกพันธะแบบนี้ว่า พันธะเดี่ยวสลับคู่ (Conjugate Double Bond) ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังนี้



ตารางที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ

ชื่อของกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน	สูตรโครงสร้าง
กรดลอริก (Lauric)	C 12	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$
กรดไมริสติก (Myristic)	C 14	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$
กรดปาล์มมิติก (Palmitic)	C16	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$
กรดสเตียริก (Stearic)	C18	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$
กรดโอเลอิก (Oleic)	C18:1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลิโนเลอิก (Linoleic)	C18:2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลิโนลีนิก (Linolenic)	C18:3	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

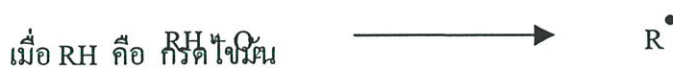
ตารางที่ 3.3 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช[14,17]

No. of carbon atoms	Name of acid	Coconut oil	Palm kernel oil	Palm oil	Cotton-seed oil	Rape-seed oil	Tallow (beef)	Tallow (mutton)	Lard	Soybean oil
<b>Saturated Acids</b>										
12	Lauric	44-51	47-52	...	...	...	...	...	...	...
14	Myristic	13-19	14-18	0.5-3	1	1	3-6	4-10	1-2	1
16	Palmitic	8-11	7-9	32-45	26-31	1-5	25-37	24-38	22-31	10
18	Stearic	1-3	1-3	4-7	3-5	1-3	14-29	15-30	16-24	2
Total (typical)		92	81	40-50	28-35	3-8	50-55	52-57	35-40	13
<b>Unsaturated Acids</b>										
<b>Monounsaturated</b>										
18	Oleic	5-8	11-19	38-53	19-26	14-38	26-50	38-48	38-44	29
<b>Diunsaturated</b>										
18	Linoleic	1.0-2.5	0.5-2	6-12	37-50	10-22	1-3	...	4-9	51
22	Erucic	...	...	...	...	40-64	...	...	...	...
<b>Triunsaturated</b>										
18	Linolenic	...	...	...	...	8-12	...	...	1-2	7
Total (typical)		8	19	50-60	60-70	92-97	44-52	40-50	60-65	87

### 3.4 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เช่นเดียวกับไฮโดรคาร์บอน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain Reaction) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

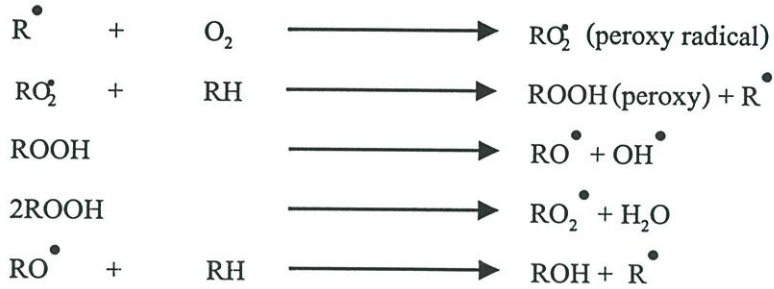
- 1) ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดอนุมูลอิสระ หรือที่เรียกว่า Radical Chain Reaction



$\text{R}^\bullet$  คือ alkyl radical

$\text{RO}_2^\bullet$  คือ alkylperoxy radical

- 2) ขั้นตอนแพร่กระจาย (Propagation) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระ หรือ Free Radical จับกับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็น เปอร์ออกซิไดส์ (Peroxy Radical) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรดไขมัน (RH) เพื่อเกิดเป็น เปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระตัวใหม่ ( $\text{R}^\bullet$ ) ซึ่งสามารถจับโมเลกุลของออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ในอากาศได้อีก ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกว่า ออกซิเจน หรือ RH จะหมดไป ส่วนสารเปอร์ออกไซด์ที่ได้จะเป็นสารที่ไม่เสถียรซึ่งจะสลายตัวได้ง่าย สารเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเป็นตัวทำให้เกิดตะกอน (Sludge) หรือ ยางเหนียว (Gum) ในน้ำมันพืช



- 3) ขั้นสิ้นสุด (Terminal) ของปฏิกิริยา เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระ หรือ Free Radical เข้าทำปฏิกิริยากันเอง ได้สารที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Nonradical Products) ซึ่งเกิดจาก
- ก. อนุมูลอิสระของ Peroxy Radicals ( $RO_2^\bullet$ ) เข้าทำปฏิกิริยากันเองดังนี้



- ข. เกิดการ cross terminal ของ alkyl radical ( $R^\bullet$ ) กับ peroxy radicals ( $RO_2^\bullet$ ) ดังนี้



- ค. เกิดการทำปฏิกิริยากันเอง ของ alkyl radical ( $R^\bullet$ ) ด้วยกันเองดังนี้



### 3.5 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช

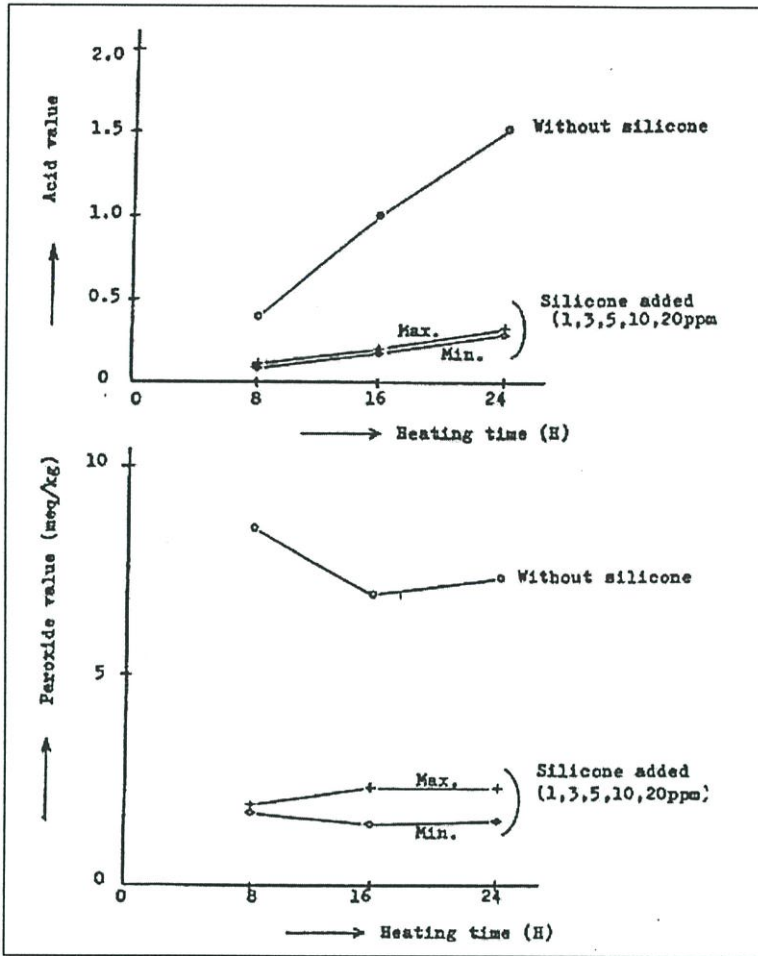
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าในน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโมเลกุลมาก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพยายามหาสารที่จะมาช่วยยับยั้งหรือ หน่วงให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันเกิดได้ช้าลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย

โดยปรกติในน้ำมันพืชจะมีสารต้านทานการเกิดออกซิไดเซชันอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชด้วย เช่น สารโทโคฟีรอล (Tocopherol) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งในน้ำมันพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของสารมากน้อยไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณของสารโทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

	Tocopherols (mg/kg)						
	$\alpha$ -T	$\beta$ -T	$\gamma$ -T	$\delta$ -T	Total	$\alpha$ -T <sub>3</sub>	$\gamma$ -T <sub>3</sub>
Anchovy					60		
Capelin					45		
Cocoa butter	11		170	17		2	
Coconut				4		20	
Corn	134	18	412	39			
Cottonseed	573	40	317	10			
Ground nut	169	5	144	13			
Lard	7					2	
Menhaden					30		
Olive	93		7				
Palm	279		61			274	398
Rape	70	16	178	7			
Safflower	477		44	10			
Sesame	12	6	244	32			
Soyabean	116	34	737	275			
Sunflower	608	17	11				

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันพืชนั้นอาจถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเพิ่มเข้าไปในน้ำมันพืชด้วย สารที่เติมเข้าไปจะไปยับยั้ง หรือเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) ซึ่งอาจเป็นขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) หรือในขั้นตอนการแพร่กระจาย (Propagation) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันนั้น ดังนั้นในสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป รูปที่ 3.1 แสดงผลของการใช้น้ำมันซิลิโคน (Silicone) เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันใส่ลงในน้ำมันปาล์ม [5] จากรูปจะเห็นว่าปริมาณของกรด และค่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ได้ใส่น้ำมันซิลิโคนและจากการวิจัยของ Freeman[4] พบว่าการผสมน้ำมันซิลิโคนลงไปในน้ำมันพืชยังสามารถป้องกันการเกิดฟองได้ด้วยซึ่งโดยปกติจะใช้ในปริมาณน้อยโดยประมาณ 1-2 ppm.



รูปที่ 3.1 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม

### 3.6 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

#### 3.6.1 ค่าไอโอดีน (Iodine Number)

ค่าไอโอดีน คือจำนวนกรัมของไอโอดีนซึ่งถูกดูดซับไว้ด้วยไขมัน 100 กรัม ซึ่งค่าไอโอดีนนี้ยังสามารถแสดงถึงความอิ่มตัวมากน้อยของกรดไขมันในน้ำมันพืช และการแห้งตัว (Drying) ได้มากหรือน้อยของน้ำมันพืชแต่ละชนิดอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่นถ้าน้ำมันพืชใดมีค่าไอโอดีนสูง (ประมาณ 160-230) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทแห้งเร็ว (Dry Oil) และถ้ามีค่าไอโอดีนปานกลาง (ประมาณ 125-150) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทกึ่งแห้งเร็ว (Semi-Drying Oil) แต่ถ้ามีค่าไอโอดีนต่ำ (น้อยกว่า 120) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทไม่แห้งเร็ว (Non-Drying Oil) ซึ่งค่าไอโอดีนได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	ค่าไอโอดีน
น้ำมันมะพร้าว	7.5 - 10
น้ำมันถั่วเหลือง	120-141

### 3.6.2 จุดหลอมเหลว (Melting point)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งได้แก่จุดหลอมเหลวซึ่งจากตารางที่ 3.6 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มมีจุดหลอมเหลวสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มปรากฏเป็นไข ที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  ส่วนน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ  $25^{\circ}$  และ  $-16^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 3.6 แสดงจุดหลอมเหลว ของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	จุดหลอมเหลว, $^{\circ}\text{C}$
น้ำมันปาล์ม	$35^{\circ}\text{C}$
น้ำมันถั่วเหลือง	$16^{\circ}\text{C}$

### 3.6.3 ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหลหากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดต่ำก็จะไหลได้ง่ายและให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บาง ส่วนในน้ำมันพืชที่มีค่าความหนืดสูงก็จะให้ชั้นฟิล์มที่หนากว่า ค่าความหนืดของน้ำมันพืชในแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด, mPa.s		
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม
25	51.7	52.3	73.3
40	31.7	33.4	34.6
60	18.5	20	22.6
80	11.1	12.9	8.93
100	9.5	9.09	4.66

### 3.6.4 ค่าซาปอนนิฟิเคชัน (Saponification Number)

ค่าซาปอนนิฟิเคชันคือจำนวนมิลลิกรัมของโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้ในการทำให้น้ำมันหรือไขมันหนัก 1 กรัม กลายเป็นสบู่ ค่าซาปอนนิฟิเคชันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนพันธะคู่ (Double Bond) ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวว่ามีอยู่มากหรือน้อย เช่น ถ้าค่าซาปอนนิฟิเคชันมีค่าสูงก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่น้อย ในทางกลับกันถ้าค่าซาปอนนิฟิเคชันมีค่าต่ำก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก ซึ่งค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืช

ชนิดน้ำมันพืช	ค่าซาปอนนิฟิเคชัน
น้ำมันมะพร้าว	246 – 265
น้ำมันปาล์ม	190 – 195
น้ำมันถั่วเหลือง	190 – 197

### 3.6.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ (Absorption)

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าในน้ำมันพืชจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมัน (Fatty Acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้ว (Polar Group) ซึ่งก็คือส่วนของ  $-\text{COOH}$  และหมู่ที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar Group) คือส่วนของ  $-\text{CH}_3$  ซึ่งการมีขั้วของกรดไขมันในน้ำมันพืชนี้จะมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการยึดเกาะของกรดไขมันกับผิวของโลหะ กลไกการยึดเกาะของกรดไขมันนี้เราเรียกว่า การดูดซับ (Absorption) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

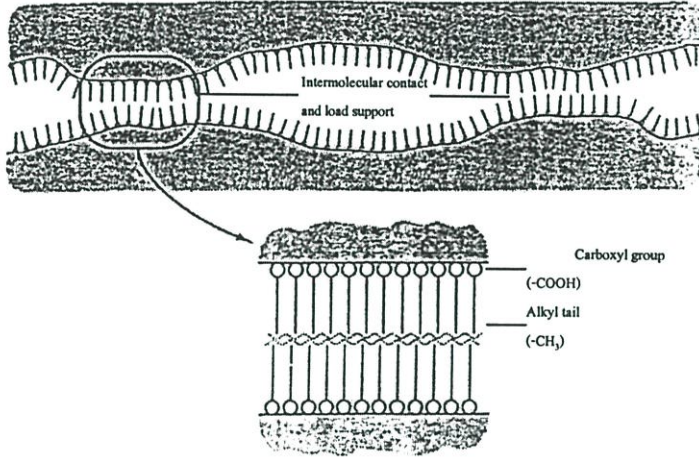
#### 3.6.5.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Absorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการที่หมู่ที่มีขั้ว ( $-\text{COOH}$ ) หันเข้าหาผิวโลหะอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ หรือที่เรียกกันว่าแรงวานเดอร์วาลส์ (Vander Walls) ในขณะที่ขั้วที่ไม่มีขั้ว ( $-\text{CH}_3$ ) หันเข้าหาส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลพวกเดียวกันทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลของกรดไขมันตลอดพื้นผิวโลหะ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนี้จะขึ้นอยู่กับขั้ว (Polar) โมเลกุลของกรดไขมันชนิดนั้นๆ ด้วย

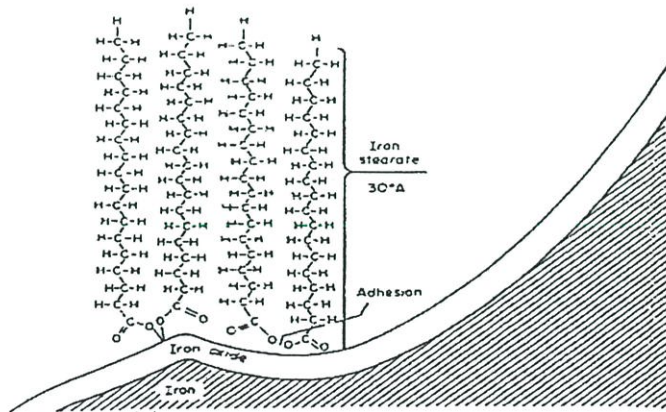
#### 3.6.5.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Absorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันกับโลหะ ซึ่งจะได้สารประกอบของโลหะ หรือที่เรียกว่าออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยากันของกรดสเตียริก (Stearic Acid) กับโลหะที่เป็นเหล็ก จะก่อให้เกิดสารประกอบของโลหะที่เรียก

ว่าเหล็กสเตียเรท (Iron Stearate) และสปูของโลหะ หรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นว่าการดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นของสปูโลหะซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ (Surface Layer) ล้อมรอบผิวโลหะนั้นไว้

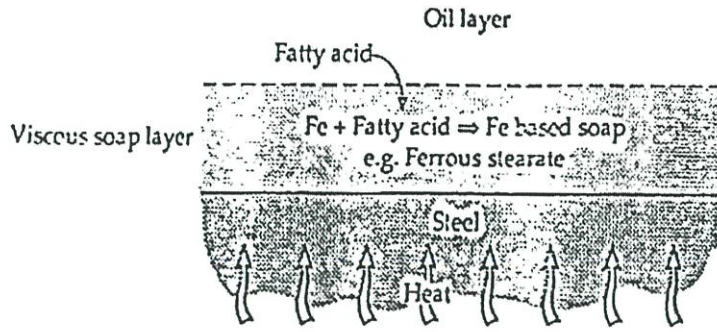


รูปที่ 3.2 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ



รูปที่ 3.3 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ

การดูดซับทางเคมีนี้อาจจะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 3.4 ได้แสดงให้เห็นว่า การดูดซับทางเคมีนี้จะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะ ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆตลอดรอบพื้นผิวของโลหะ



รูปที่ 3.4 การสร้างชั้นของสบู่ออกของกรดไขมันบนผิวโลหะ

## บทที่ 4

# รีโอโลยี (Rheology)

### 4.1 ความหมายของรีโอโลยี

รีโอโลยีเป็นวิชาที่เกี่ยวกับการไหลโดยมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ ความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด เป็นต้น

### 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเฉือน และความเค้นเฉือนแล้ว เราสามารถแบ่งของไหลออกเป็น 2 ประเภท คือ

#### 4.2.1 ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian Fluid)

เราจะเรียกของไหลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรง หรือเป็นเชิงเส้นกับอัตราความเครียดเฉือนว่าของไหลนิวโตเนียน ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.1)$$

สมการที่ (4.1) เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's Law of Viscosity) โดยที่  $\tau$  คือความเค้นเฉือน (Shear Stress) และ  $\frac{du}{dy}$  คือ อัตราความเครียดเฉือน (Shear Strain Rate) ส่วน  $\mu$  คือค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่น  $\rho$  และความหนืดจลน์  $\nu$  ได้ดังนี้

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.2)$$

#### 4.2.2 ของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid)

ของไหลนอนนิวโตเนียนจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการต่างๆ ได้ดังนี้

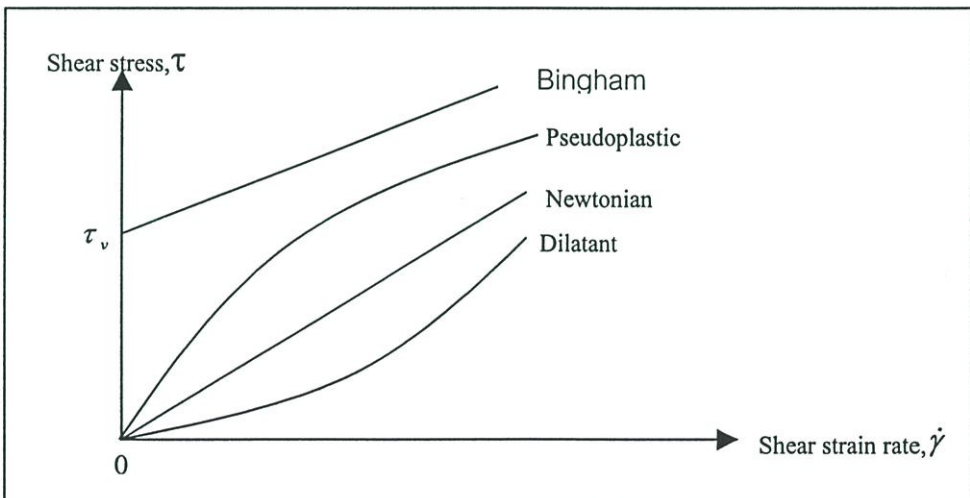
$$\tau = m \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (4.3)$$

$$\tau + k\tau^3 = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.4)$$

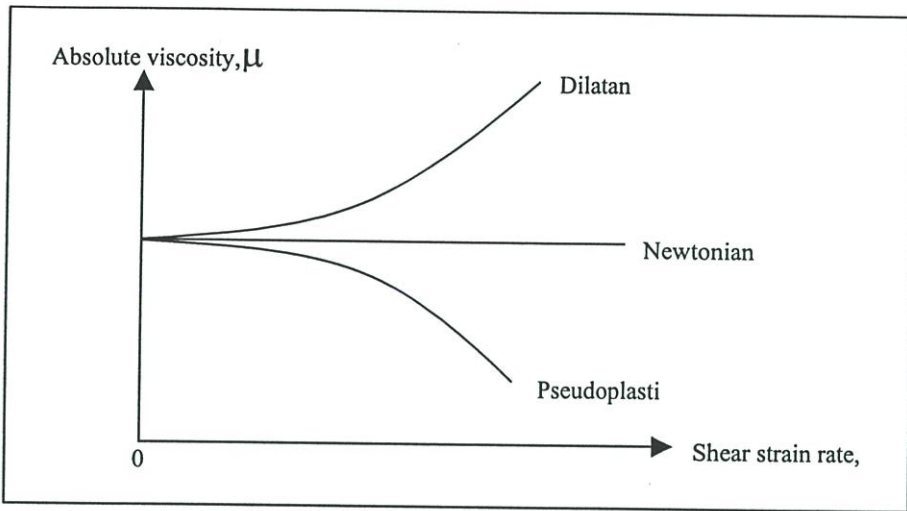
$$\tau = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (4.5)$$

ในสมการที่ (4.3) ถ้า  $n = 1$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และถ้า  $n > 1$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์ (Dilatant) หรือ ถ้า  $n < 1$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) ส่วนในสมการที่ (4.4) ถ้า  $k = 0$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และ ถ้า  $k > 0$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) หรือ ถ้า  $k < 0$  ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์ (Dilatant)

ถ้ารับสมการที่ (4.5) เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าของไหลชนิดพลาสติกบิงแฮม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราการความเครียดเฉือนเป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับของไหลนิวโตเนียนแต่จะต่างกับสารหล่อลื่นนิวโตเนียนตรงที่ค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นของของไหลไม่เริ่มต้นที่ศูนย์ซึ่งเราเรียกค่าความเค้นเฉือนที่จุดเริ่มต้นนี้ว่าความเค้นเฉือนที่จุดคราก (Yield Point)  $\tau_y$  โดย ถ้า  $\tau_y = 0$  จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นนิวโตเนียน



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการความเครียดเฉือน

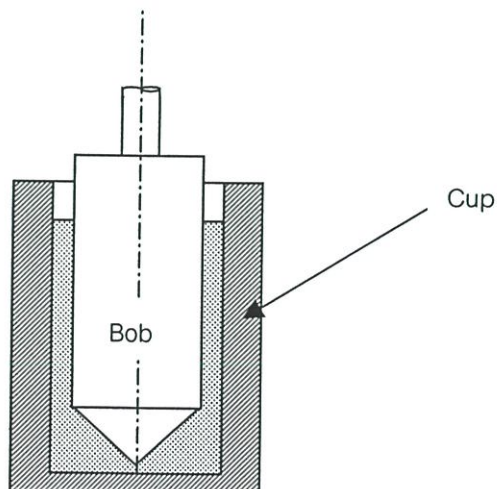


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์กับอัตราความเครียดเฉือน

### 4.3 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี

เครื่องมือวัดทางรีโอ โลยีที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งในการเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงได้แก่ชนิดของของไหลที่จะนำมาทดสอบด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการใช้เครื่องมือวัดทางรีโอ โลยีกับจารบี ควรที่จะใช้กับเครื่องวัดความหนืดแบบกรวยบนแผ่นระนาบ (Cone and Plate Viscometer) เป็นต้นเครื่องมือวัดทางรีโอ โลยีที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่ เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)

#### 4.3.1 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)



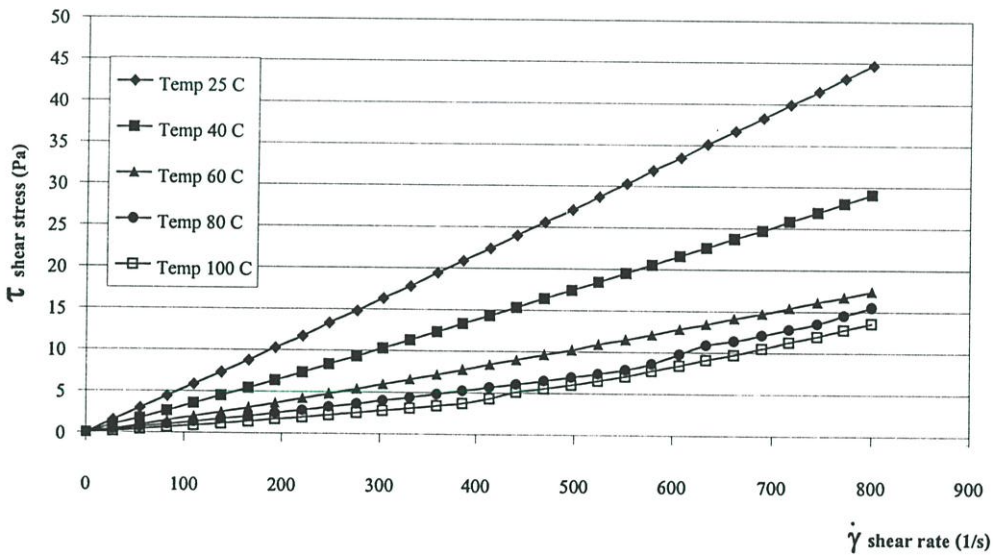
รูปที่ 4.3 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer) นี้จะประกอบไปด้วยทรงกระบอกสองอันที่มีรัศมีต่างกัน โดยทรงกระบอกอันในจะเป็นท่อทรงกระบอกตันที่หมุนอยู่ภายในท่อทรงกระบอกกลวงซึ่งอยู่กับที่ในการใช้งานจะใส่ของเหลวลงไประหว่างช่องว่างของท่อทรงกระบอกทั้งสอง เมื่อท่อทรงกระบอกอันในหมุนจะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ภายใต้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของทรงกระบอกอันในและเกิดอัตราความเครียดเฉือนเกิดขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือน สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นกราฟแสดงการไหล (Flow Curve) ได้

## 4.4 คุณสมบัติทางรีโอโลยีของน้ำมันพืช

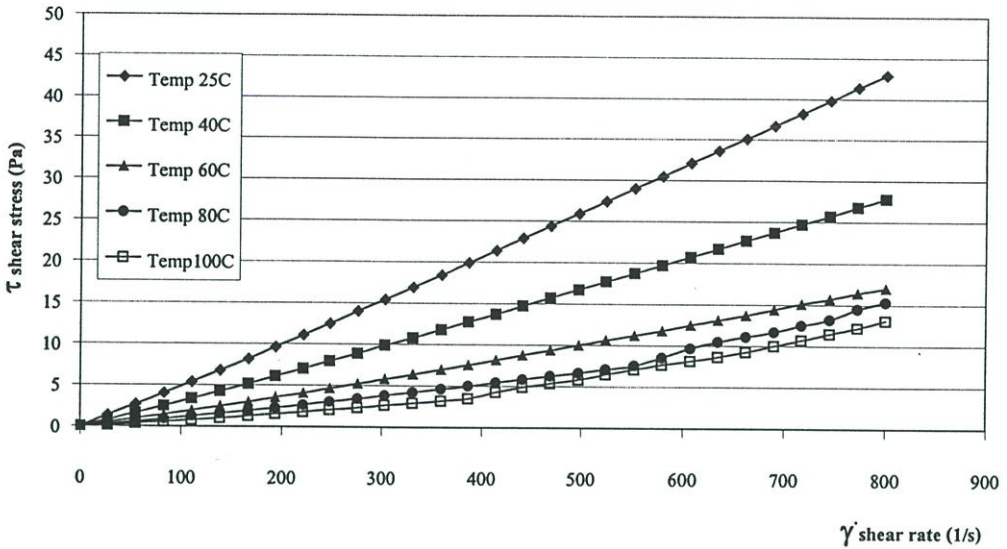
### 4.4.1 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันพืช

#### 4.4.1.1 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันถั่วเหลือง



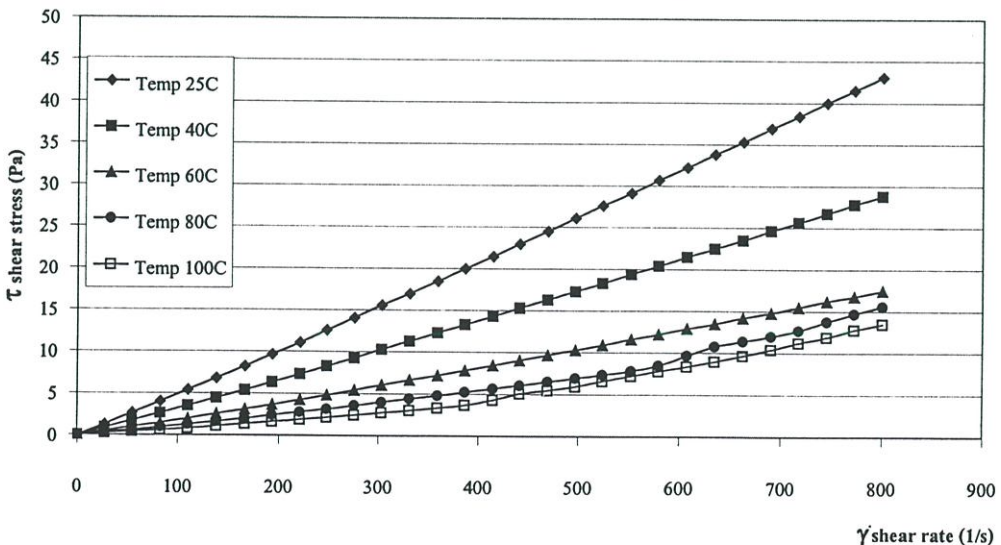
รูปที่ 4.4 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันถั่วเหลือง

4.4.1.2 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนัก เพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ระหว่างค่า shear stress กับ shear rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



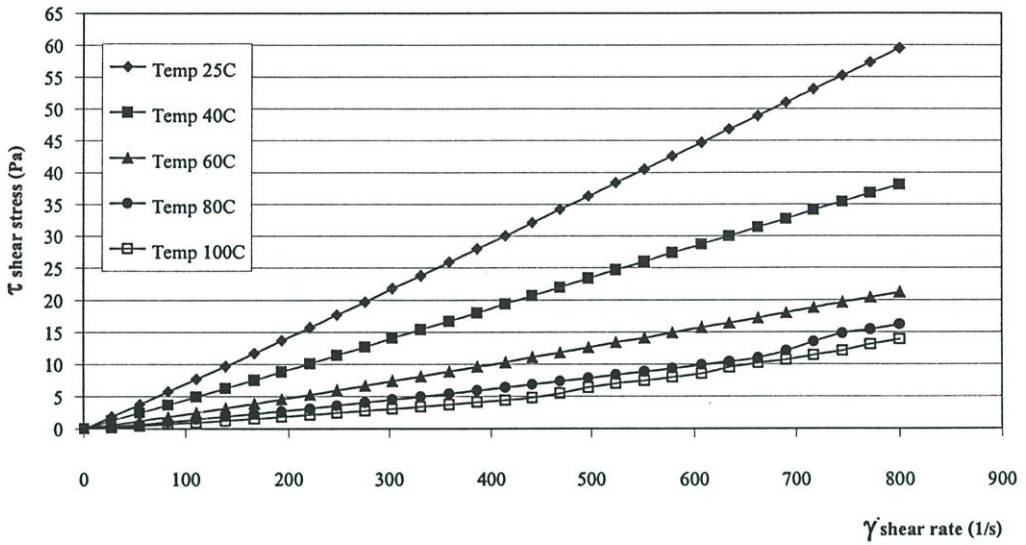
รูปที่ 4.5 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนัก

4.4.1.3 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก เพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



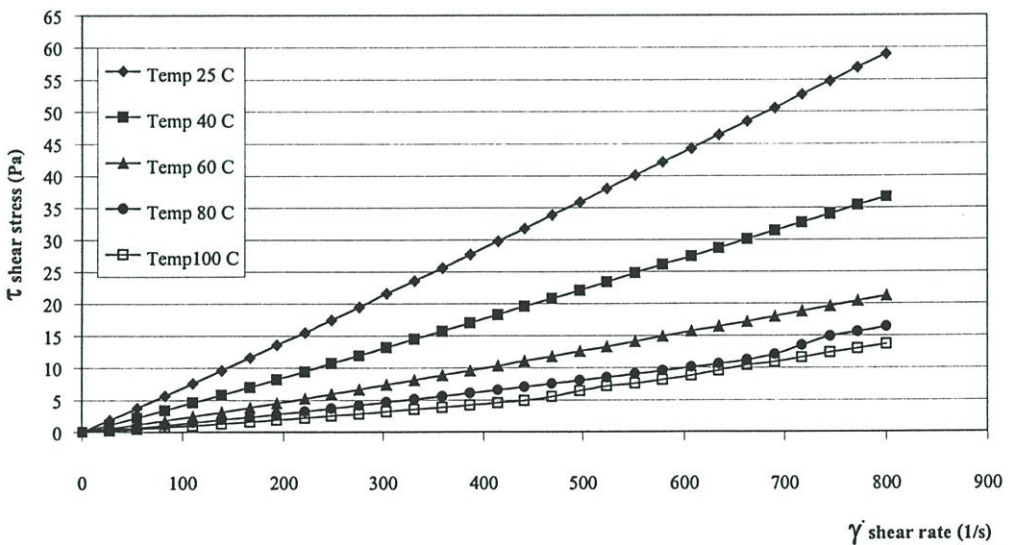
รูปที่ 4.6 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันถั่วเหลืองผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.1.4 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันปาล์ม



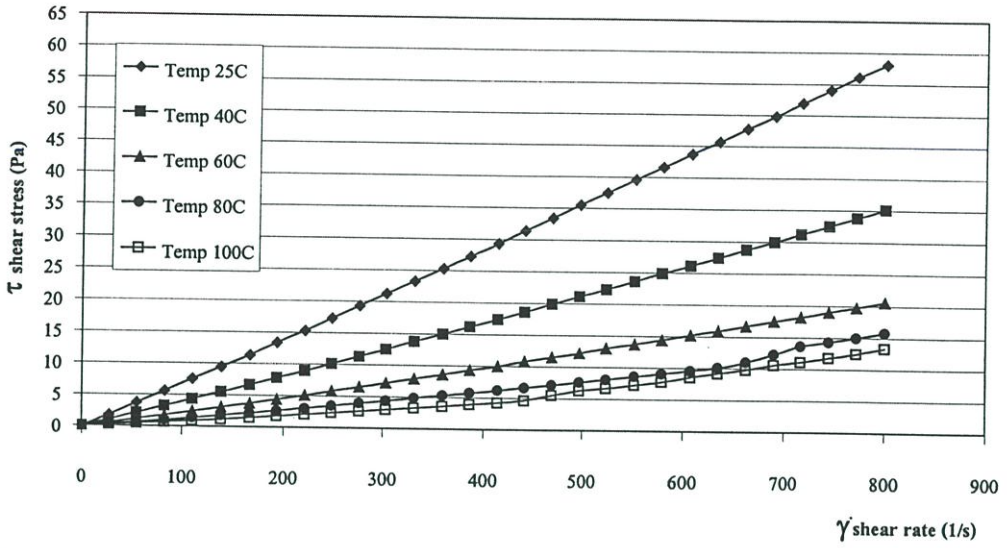
รูปที่ 4.7 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์ม

4.4.1.5 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนัก เพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.8 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนัก

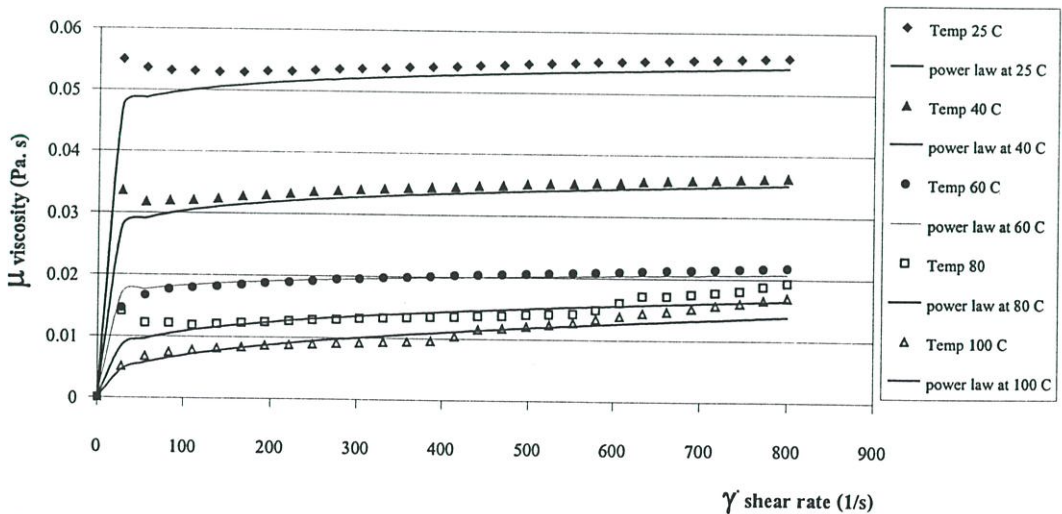
4.4.1.6 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก

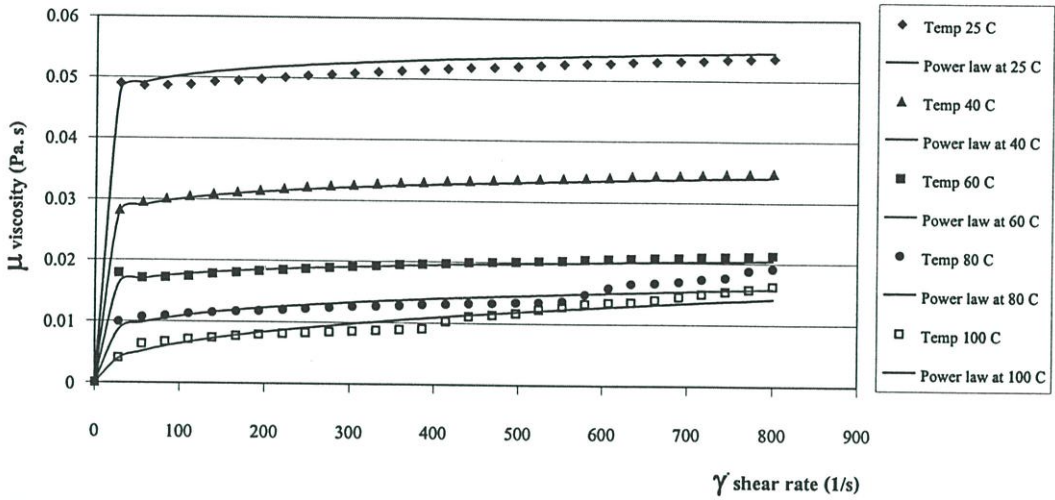
4.4.2 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันพืช

4.4.2.1 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดของน้ำมันถั่วเหลือง



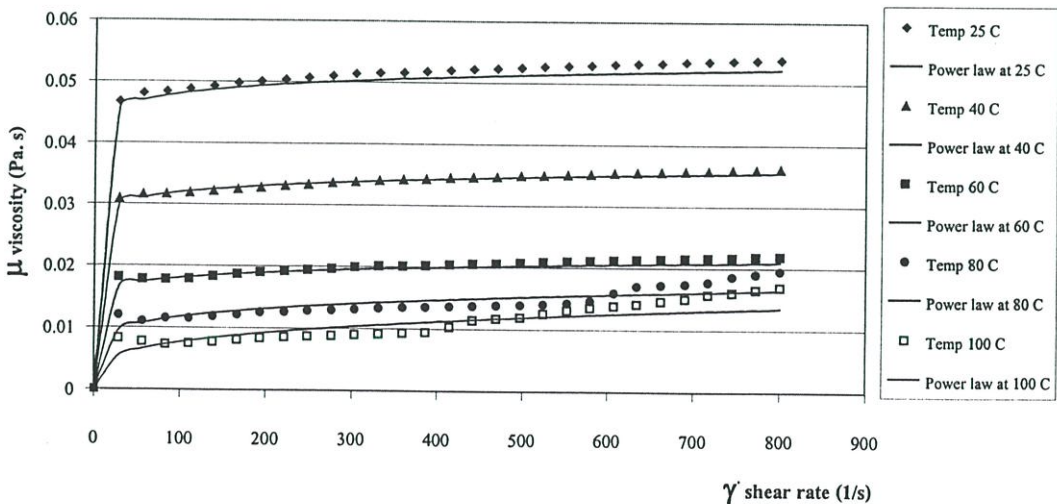
รูปที่ 4.10 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

4.4.2.2 เส้นกราฟแสดงความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสาร ZDTP 0.2% โดย น้ำหนักเพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนระหว่างค่า Viscosity กับ Shear Rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



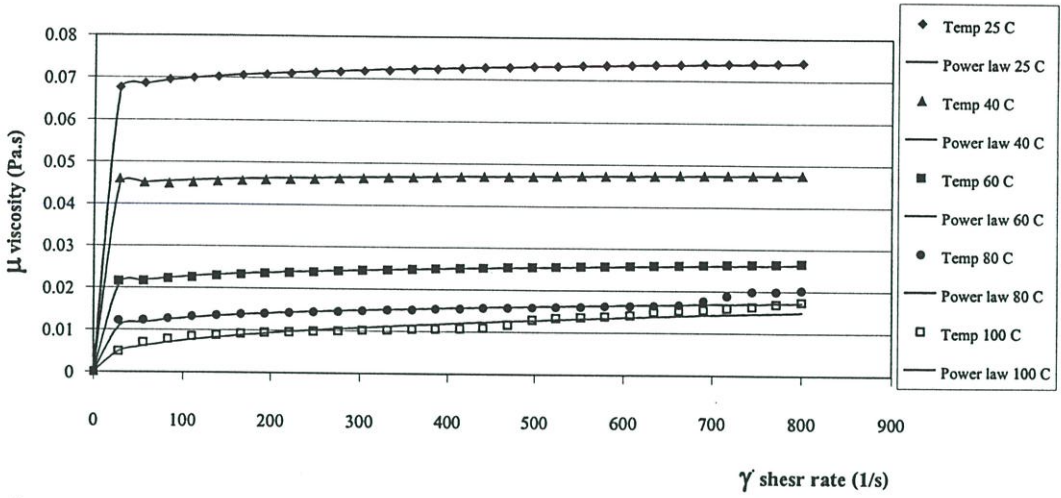
รูปที่ 4.11 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราการความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2% ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

4.4.2.3 เส้นกราฟแสดงความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสาร ZDTP 1% โดย น้ำหนักเพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนระหว่างค่า Viscosity กับ Shear Rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



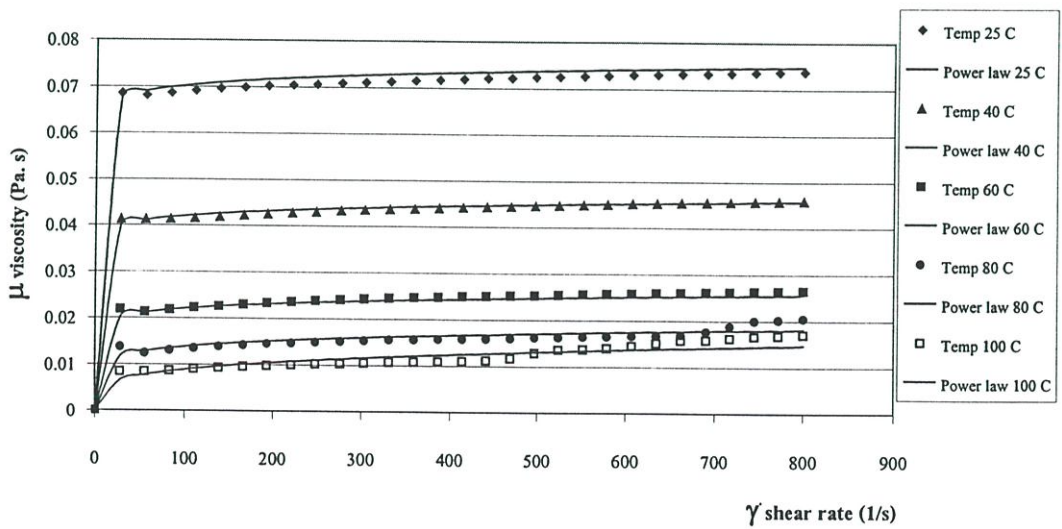
รูปที่ 4.12 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราการความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1% ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

4.4.2.4 เส้นกราฟแสดงความหนืดของน้ำมันปาล์ม



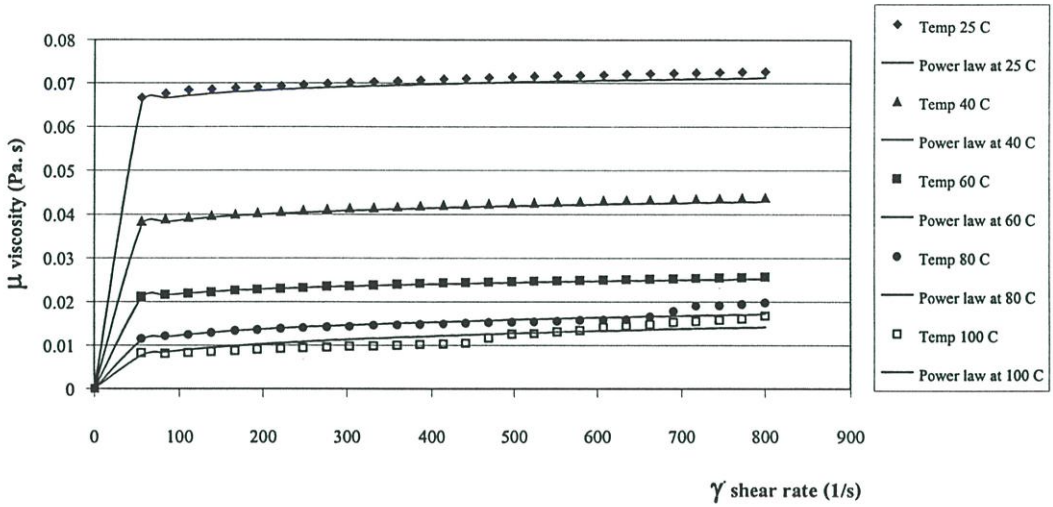
รูปที่ 4.13 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันปาล์มที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

4.4.2.5 เส้นกราฟแสดงความหนืดของน้ำมันปาล์มที่ผสมสาร ZDTP 0.2% โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนระหว่างค่า Viscosity กับ Shear Rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2% ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

4.4.2.6 เส้นกราฟแสดงความหนืดของน้ำมันปาล์มที่ผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนระหว่างค่า Viscosity กับ Shear Rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

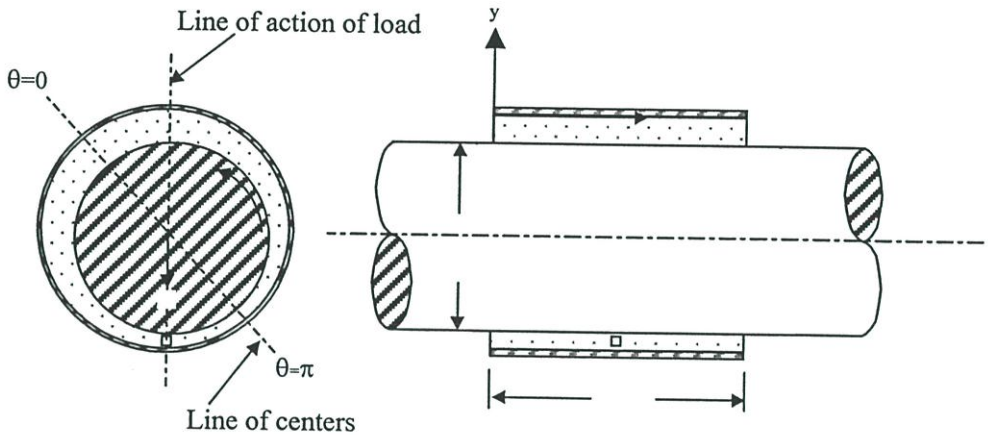


รูปที่ 4.12 เส้นกราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1% ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ

## บทที่ 5

# ทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบนอนนิวโตเนียน

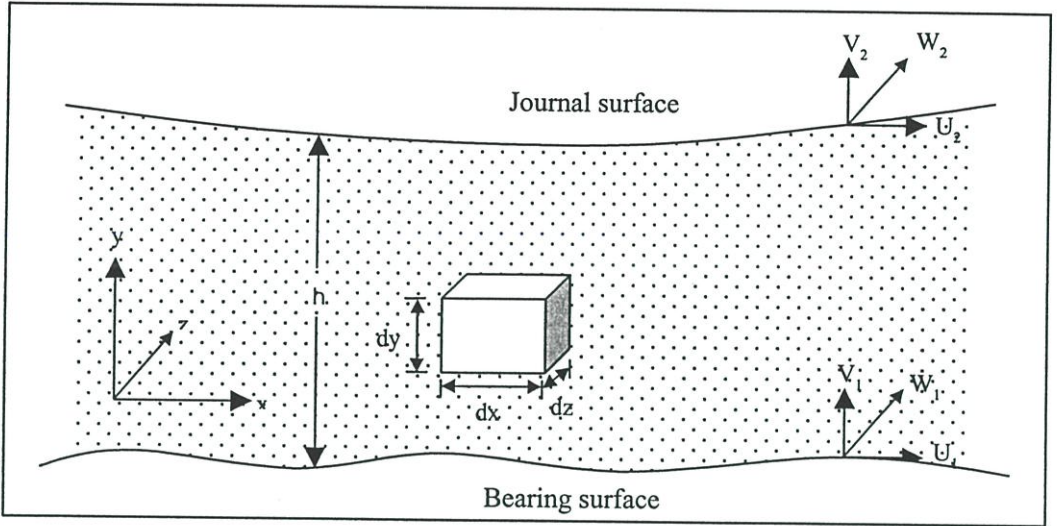
### 5.1 สมการโมดิฟายเรย์โนลด์



รูปที่ 5.1 การไหลของฟิล์มน้ำมันผ่านช่องว่างระหว่างเพลากับการรองลื่น

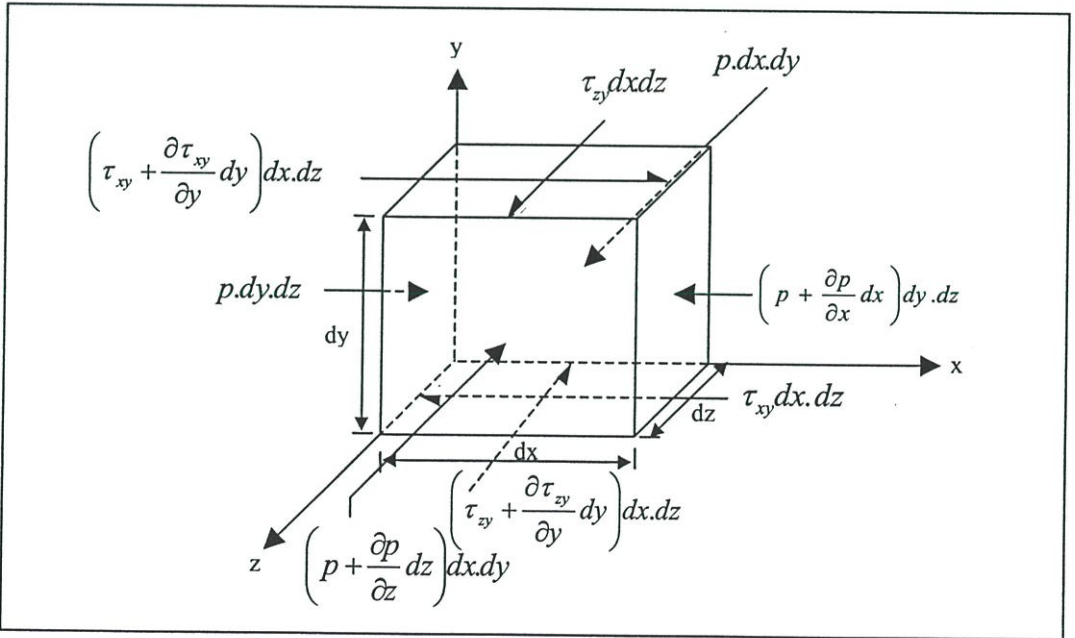
สมการที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันของการรองลื่นเพลากลม มีข้อสมมุติฐานดังนี้

1. ของไหลที่หล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียน(Non-Newtonian)
2. ของไหลที่เป็นสารหล่อลื่นอัดตัวไม่ได้และเป็นการไหลแบบลาร์มิน่า
3. อุณหภูมิที่ผิวของเพลและการรองลื่นมีค่าคงที่
4. ไม่คิดผลขอแรงโน้มถ่วงของโลก และแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนฟิล์มน้ำมัน
5. ไม่คิดความดันของฟิล์มน้ำมันในแกน  $y$  เนื่องจากฟิล์มน้ำมันบางมาก
6. ไม่มีการลื่นไถลของสารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัส
7. ไม่คิดแรงเฉื่อยของของไหล เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม Pressure gradient รวมทั้งไม่คิดความเร่งที่เกิดจากการไหลผ่านผิวโค้ง
8. ไม่คิดถึงผลของความโค้งของกาเพลต่อค่าต่างๆ เนื่องจากความหนาของชั้นน้ำมันมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรัศมีของเพลและกาเพล



รูปที่ 5.2 แสดงระบบพิกัด โคออร์ดิเนตของฟิล์มน้ำมันในกาบรองลื่นเพลากลม

พิจารณาก่อนทรงปริมาตรสี่เหลี่ยมของฟิล์มน้ำมันในกาบรองลื่นซึ่งอยู่ภายใต้แรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงแรงกระทำบนก้อนปริมาตรสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 5.3 สมการสมดุลของแรงในแนวแกน x :

$$p \cdot dx \cdot dz + \left( \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx \cdot dz = \tau_{xy} dx \cdot dz + \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz$$

หรือ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (5.1)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการสมดุลของแรงในแนวแกน z :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \quad (5.2)$$

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตันเราจะได้ว่า

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5.3)$$

$$\tau_{zy} = \mu \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด กับอัตราความเครียดเฉือน และอุณหภูมิสามารถเขียนอยู่ในรูปยกกำลัง (Power Law) ได้ดังนี้

$$\mu = mI^{\frac{(n-1)}{2}} \exp[-\beta(\tau - \tau_i)] \quad (5.5)$$

เมื่อ I คือ Second invariant of strain rate ซึ่งหาได้จาก

$$I = \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (5.6)$$

สำหรับสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติเป็นนิวโตเนียน ค่า n จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าค่า n มีค่าน้อยกว่า 1 สารหล่อลื่นดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเป็น ซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) และถ้า n มีค่ามากกว่า 1 สารหล่อลื่นดังกล่าวจะแสดงคุณสมบัติเป็น ไดลาแตนท์ (Dilatant)

แทนสมการ (5.3) และ (5.4) ลงใน (5.1) และ (5.2) ตามลำดับ จะได้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (5.8)$$

ให้เกรเดียนความดันคือ

$$\nabla p = \varepsilon \nabla \pi \quad (5.9)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนเกรเดียนความดันในแนวแกน  $x$  และ  $z$  ได้ดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial \pi}{\partial x} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial \pi}{\partial z} \quad (5.11)$$

จากวิธี Perturbation [16] ให้ ความเร็วย่อย  $u$  และ  $w$  สามารถเขียนอยู่ในเทอมของ Small Perturbation Parameter,  $\varepsilon$  ได้ดังนี้

$$u = u_0 + \varepsilon u_1 \quad (5.12)$$

$$w = w_0 + \varepsilon w_1 \quad (5.13)$$

แทนสมการ (5.12) และ (5.13) ลงในสมการ (5.6) โดยไม่คิดเทอม  $\varepsilon^2$  เราจะได้

$$I = I_0 + \varepsilon I_1 \quad (5.14)$$

เมื่อ

$$I_0 = \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \quad (5.15)$$

$$I_1 = 2 \left[ \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial w_1}{\partial y} \right) \right] \quad (5.16)$$

เนื่องจาก  $\mu$  ขึ้นอยู่กับค่า  $I$  ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของ  $\mu$  ในเทอมของ  $\mathcal{E}$  ได้ดังนี้

$$\mu = \mu_0 + \mathcal{E} \mu_1 \quad (5.17)$$

เมื่อ

$$\mu_1 = I_1 \left( \frac{\partial u}{\partial I} \right)_{I_0} \quad (5.18)$$

แทนสมการ (5.16) ลงในสมการ (5.18) เราจะได้

$$\mu_1 = 2 \left[ \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial w_1}{\partial y} \right) \right] \left( \frac{\partial u}{\partial I} \right)_{I_0} \quad (5.19)$$

แทนสมการ (5.12) และสมการ (5.17) ลงในสมการ (5.7) แล้วตัดเทอมของ  $\mathcal{E}^2$  เราจะได้

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) + \mathcal{E} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_1 \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) \right] = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.20)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการ (5.20) กับสมการ (5.10) จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_1 \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) = \frac{\partial \pi}{\partial x} \quad (5.22)$$

ทำนองเดียวกัน แทนสมการ (5.11) และ (5.17) ลงในสมการ (5.8) โดยไม่คิดเทอม  $\mathcal{E}^2$  แล้วจึงทำการเปรียบเทียบกับสมการ (5.11) เราจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial w_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_1 \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) = \frac{\partial \pi}{\partial z} \quad (5.24)$$

เมื่อ  $u_0$  และ  $u_1$  คือ ความเร็วย่อยอันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง (Zero and First-Order Velocity) ในแนวแกน  $x$   
 $w_0$  และ  $w_1$  คือ ความเร็วย่อยอันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง (Zero and First-Order Velocity) ในแนวแกน  $z$

กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) ในรูปที่ 5.2 ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} u_0 = U_1 \quad \text{ที่} \quad y = 0 \\ u_0 = U_2 \quad \text{ที่} \quad y = h \end{array} \right\} \quad (5.25a)$$

$$\left. \begin{array}{l} w_0 = W_1 \quad \text{ที่} \quad y = 0 \\ w_0 = W_2 \quad \text{ที่} \quad y = h \end{array} \right\} \quad (5.25b)$$

อินทิเกรตสมการ (5.21) เทียบกับ  $y$  สองครั้ง โดยใช้เงื่อนไขขอบในสมการที่ (5.25a) จะได้

$$u_0 = \frac{U_2 y}{h} + \left( 1 - \frac{y}{h} \right) U_1 \quad (5.26)$$

ในทำนองเดียวกัน อินทิเกรตสมการ (5.23) เทียบกับ  $y$  สองครั้ง โดยใช้เงื่อนไขที่ขอบในสมการที่ (5.25b) จะได้

$$w_0 = (W_2 - W_1) \frac{y}{h} + W_1 \quad (5.27)$$

แทนสมการ (5.26) และสมการ (5.27) ลงในสมการ (5.22) และสมการ (5.24) จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_1 \frac{\partial (U_2 - U_1)}{h} \right) = \frac{\partial \pi}{\partial x} \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_0 \frac{\partial w_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_1 \frac{\partial (W_2 - W_1)}{h} \right) = \frac{\partial \pi}{\partial z} \quad (5.29)$$

แทนสมการ (5.19) ลงในสมการ (5.28) และสมการ (5.29) แล้วทำการจัดเทอม และย้ายข้างเราจะได้

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \pi}{\partial x} - \frac{2 \frac{U_2 - U_1}{h} \left( \frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{W_2 - W_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) \frac{\partial \mu^*}{\partial I}}{\mu_0^2 \left( 1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln I^{0.5}} \right)} \quad (5.30)$$

$$\frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \pi}{\partial z} - \frac{2 \frac{W_2 - W_1}{h} \left( \frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{W_2 - W_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) \frac{\partial \mu^*}{\partial I}}{\mu_0^2 \left( 1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln I^{0.5}} \right)} \quad (5.31)$$

แล้วทำการอินทิเกรตสมการ (5.30) และ (5.31) เทียบกับ  $y$  สองครั้ง จะได้

$$u_1 = -\frac{y}{2}(y-h) \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \quad (5.32)$$

$$w_1 = -\frac{y}{2}(y-h) \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \quad (5.33)$$

แทนสมการ (5.26), (5.32) และ (5.27), (5.33) ลงในสมการ (5.12) และ (5.13) ตามลำดับ จะได้

$$u = \left\{ U_1 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) + \frac{y}{h} U_2 \right\} + \varepsilon \left\{ -\frac{y(y-h)}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right\} \quad (5.34)$$

$$w = \left\{ W_1 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) + \frac{y}{h} W_2 \right\} + \varepsilon \left\{ -\frac{y(y-h)}{2} \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \right\} \quad (5.35)$$

ในที่นี้ให้

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U \\
 U_1 &= 0 \\
 W_1 &= 0 \\
 W_2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5.36}$$

แทนสมการ (5.30), (5.31) และ (5.36) ลงในสมการ (5.34) และ (5.35) จะได้

$$\begin{aligned}
 u = U_1 \left(1 - \frac{y}{h}\right) + \frac{y}{h} U_2 - \frac{y(y-h)}{2\mu_0} \left\{ 1 - \frac{2 \frac{(U_2 - U_1)^2}{h^2} \frac{\partial \mu^*}{\mu_0 \partial I}}{\left(1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln I^{0.5}}\right)} \right\} \frac{\partial p}{\partial x} \\
 + \frac{y(y-h)}{2\mu_0} \left\{ \frac{2 \frac{(U_2 - U_1)(W_2 - W_1)}{h^2} \frac{\partial \mu^*}{\mu_0 \partial I}}{\left(1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln I^{0.5}}\right)} \right\} \frac{\partial p}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{5.37}$$

$$\begin{aligned}
 w = W_1 \left(1 - \frac{y}{h}\right) + \frac{y}{h} W_2 + \frac{y(y-h)}{2\mu_0} \left\{ \frac{2 \frac{(U_2 - U_1)(W_2 - W_1)}{h^2} \frac{\partial \mu^*}{\mu_0 \partial I}}{\left(1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln I^{0.5}}\right)} \right\} \frac{\partial p}{\partial x} \\
 - \frac{y(y-h)}{2\mu_0} \left\{ 1 - \frac{2 \frac{(W_2 - W_1)^2}{h^2} \frac{\partial \mu^*}{\mu_0 \partial I}}{\left(1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln I^{0.5}}\right)} \right\} \frac{\partial p}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{5.38}$$

สำหรับการไหลในสองมิติ เราจะสามารถเขียนสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0
 \tag{5.39}$$

อินทิเกรตสมการที่ (5.39) เทียบกับ  $y$  ตลอดความหนาของฟิล์ม จาก 0 ถึง  $h$  จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^h u dy \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \int_0^h w dy \right) = - \int_0^v dv \quad (5.40)$$

เทอมทางด้านขวาของสมการ (5.40) เกิดจากแรงกดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ในแนวตั้งฉากกับผิวของเพลลา เป็นผลทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งหาได้จาก

$$V = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.41)$$

แทนสมการ (5.41) ลงในสมการ (5.40) จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} q_x + \frac{\partial}{\partial z} q_z = -V \quad (5.42)$$

เมื่อ  $q_x$  และ  $q_z$  คืออัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแนวแกน  $x$  และ  $z$  ซึ่งหาได้จาก

$$q_x = \int_0^h u dy \quad (5.43)$$

$$q_z = \int_0^h w dy \quad (5.44)$$

แทนค่า  $u$  จากสมการ (5.37) ลงในสมการ (5.43) จะได้

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{h^{n+2}}{12U^{n-1}} \frac{1}{mn} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.45)$$

ในทำนองเดียวกัน แทนค่า  $w$  จากสมการ (5.38) ลงในสมการ (5.44) จะได้

$$q_z = - \frac{h^{n+2}}{12mU^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.46)$$

แทนสมการ (5.45) และ (5.46) ลงในสมการ (5.42) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ -\frac{h^{n+2}}{12 U^{n-1}} \frac{1}{mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ -\frac{h^{n+2}}{12 m U^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U h}{2} \right) - V \quad (5.47)$$

เอา  $nU^{n-1}$  คูณตลอดทั้งสองข้างจะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{h^{n+2}}{12 mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{h^{n+2}}{12 m} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = \frac{U^n}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + nU^{n-1} V \quad (5.48)$$

โดยที่  $U$  คือ ความเร็วที่ผิวของเพลต ส่วน  $m$  คือ Viscosity Consistency และ  $n$  คือ Power Law Index ค่าดัชนีเลขยกกำลังตามลำดับซึ่งหาได้จากเส้นโค้งการไหล (Flow Curve) ที่ได้จากการทดลอง

เมื่อ  $h$  คือ ความหนาของฟิล์มน้ำมัน ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$h = C(1 + \varepsilon \cos \theta) \quad (5.49)$$

สมการ(5.48)เรียกว่าสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ ซึ่งใช้ในการคำนวณหาการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันของกาวร่องเส้นเพลตกลมและสามารถเขียนอยู่ในรูปไร้มิติ (Dimensionless) ได้ โดยกำหนดกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{x}{R} \\ z &= \frac{z}{L} \\ \dot{p} &= \frac{C^{n+1}}{mnU^n R} p \\ \dot{h} &= \frac{h}{C} \end{aligned} \right\} \quad (5.50)$$

- เมื่อ  $\dot{p}$  = ความดันฟิล์มน้ำมันในรูปไร้มิติ  
 $L$  = ความยาวของกาบรองลื่น  
 $C$  = ระยะเคลือบเลนส์  
 $R$  = รัศมีของเพลลา  
 $m$  = ความหนืดของฟิล์มน้ำมัน (Viscosity Consistency)  
 $n$  = ค่าดัชนีเลขยกกำลัง (power Law Index)

ภายใต้สภาวะคงตัวหรือที่สภาวะความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นเราสามารถตัดเทอม  $V$  ในสมการที่(5.48)ออก และเมื่อทำการแทนกลุ่มตัวแปรในสมการที่ (5.50) ลงไปเราจะได้ สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ในรูปไร้มิติ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^{n+2} \frac{\partial \dot{p}}{\partial \theta} \right) + n \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left( h^{n+2} \frac{\partial \dot{p}}{\partial z} \right) = 6mn \left( \frac{u}{c} \right)^{n-1} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (5.51)$$

## 5.2 สมการทางไดนามิกส์

ในการศึกษาพฤติกรรมของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นในกาบรองลื่นเพลลาขณะเครื่องจักรกำลังทำงานจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในชั้นฟิล์มน้ำมัน ดังนั้นฟิล์มน้ำมันของสารหล่อลื่นเปรียบเสมือนสปริงและแดมปีง ซึ่งจะช่วยลดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรขณะที่เพลลาหมุนเคลื่อนที่อยู่

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{h^{n+2}}{\bar{m}} \frac{\partial \dot{p}}{\partial \theta} \right) + \frac{n}{4} \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^{n+2}}{\bar{m}} \frac{\partial \dot{p}}{\partial z} \right) = n \frac{\partial h}{\partial \theta} + n \frac{D}{U^n} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (5.52)$$

ภาระที่กาบรองลื่นรับเนื่องจากแรงดันของสารหล่อลื่นสามารถแบ่งย่อยเป็น  $W_{\epsilon\epsilon}$  และ  $W_{\phi\phi}$  ดังแสดงในสมการที่ (5.53) และ (5.54)

$$W_{\epsilon\epsilon} = - \int_0^1 \int_0^\pi P \cos \theta d\theta dz \quad (5.53)$$

$$W_{\phi\phi} = \int_0^1 \int_0^\pi P \sin \theta d\theta dz \quad (5.54)$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงได้จากสมการที่ (5.55),(5.56),(5.57),(5.58) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์ได้จากสมการที่ (5.59),(5.60),(5.61),(5.62)

$$K_{\epsilon\epsilon} = \frac{w_{\epsilon\epsilon} [(\epsilon_0 + \Delta\epsilon), 0, \phi_0, 0] - w_{\epsilon\epsilon} [(\epsilon_0 - \Delta\epsilon), 0, \phi_0, 0]}{2\Delta\epsilon} \quad (5.55)$$

$$K_{\epsilon\phi} = \frac{w_{\epsilon\epsilon} [(\epsilon_0 + \Delta\epsilon), 0, \phi_0, 0] - w_{\epsilon\epsilon} [(\epsilon_0 - \Delta\epsilon), 0, \phi_0, 0]}{2\Delta\phi} \quad (5.56)$$

$$K_{\phi\phi} = \frac{w_{\phi\phi} [\epsilon_0, (\phi_0 + \Delta\phi), 0, 0] - w_{\phi\phi} [\epsilon_0, (\phi_0 - \Delta\phi), 0, 0]}{2\Delta\phi} \quad (5.57)$$

$$K_{\phi\epsilon} = \frac{w_{\phi\phi} [\epsilon_0, (\phi_0 + \Delta\phi), 0, 0] - w_{\phi\phi} [\epsilon_0, (\phi_0 - \Delta\phi), 0, 0]}{2\Delta\epsilon} \quad (5.58)$$

$$B_{\epsilon\epsilon} = \frac{w_{\epsilon\epsilon} [\epsilon_0, \phi_0, \Delta\dot{\epsilon}, 0] - w_{\epsilon\epsilon} [\epsilon_0, \phi_0, (-\Delta\dot{\epsilon}), 0]}{2\Delta\dot{\epsilon}} \quad (5.59)$$

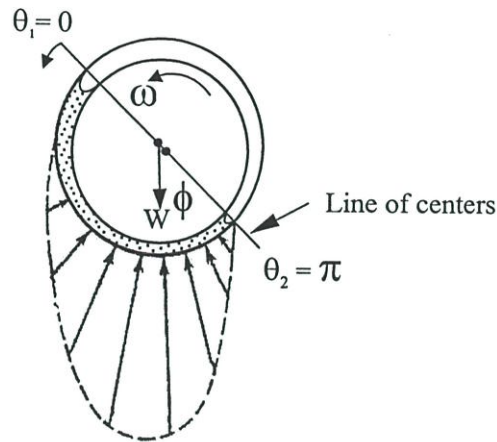
$$B_{\epsilon\phi} = \frac{w_{\epsilon\epsilon} [\epsilon_0, \phi_0, \Delta\dot{\epsilon}, 0] - w_{\epsilon\epsilon} [\epsilon_0, \phi_0, (-\Delta\dot{\epsilon}), 0]}{2\Delta\dot{\phi}} \quad (5.60)$$

$$B_{\phi\phi} = \frac{w_{\phi\phi} [\epsilon_0, \phi_0, 0, \Delta\dot{\phi}] - w_{\phi\phi} [\epsilon_0, \phi_0, 0, (-\Delta\dot{\phi})]}{2\Delta\dot{\phi}} \quad (5.61)$$

$$B_{\phi\epsilon} = \frac{w_{\phi\phi} [\epsilon_0, 0, 0, \Delta\dot{\phi}] - w_{\phi\phi} [\epsilon_0, 0, 0, (-\Delta\dot{\phi})]}{2\Delta\dot{\epsilon}} \quad (5.62)$$

### 5.3 ภาวะการรอนต์นของกาบรอนต์นและมูมแอตติจูด

หลังจากคำนวณหาค่าการกระจายความดันฟิล์มน้ำมันแล้ว เราสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดจากความดันของฟิล์มน้ำมันที่กระทำกับกาบรอนต์น ซึ่งก็คือภาวะที่กาบรอนต์นรองรับอันเนื่องมาจากแรงดันของฟิล์มน้ำมันนั่นเอง โดยแรงที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยแรงในแนวขนานและในแนวตั้งฉากกับเส้น Line of Centers (ดังแสดงในรูปที่ 5.5) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการอินทิเกรตความดันเทียบกับพื้นที่รอบเพลาได้ดังนี้



รูปที่ 5.4 แสดงแรงที่กระทำบนกาบรอนต์น

$$W_r = - \int_0^L \int_{\theta_1}^{\theta_2} pR \cos \theta \, d\theta \, dz \quad (5.63)$$

$$W_t = \int_0^L \int_{\theta_1}^{\theta_2} pR \sin \theta \, d\theta \, dz$$

จากสมการที่ (5.63) เราสามารถเขียนอยู่ในรูปปริมาตรได้ดังนี้

$$\dot{W}_r = - \int_0^L \int_{\theta_1}^{\theta_2} \dot{p} R \cos \theta \, d\theta \, dz \quad (5.64)$$

$$\dot{W}_t = \int_0^L \int_{\theta_1}^{\theta_2} \dot{p} R \sin \theta \, d\theta \, dz$$

ดังนั้นขนาดของภาระที่กาบรองลื่นรับเนื่องจากแรงดันของฟิล์มน้ำมันสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{W} = \sqrt{(\dot{W}_t)^2 + (\dot{W}_r)^2} \quad (5.65)$$

และมุมแอตติจูดของกาบรองลื่นเพลากลมสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_r} \right) \quad (5.66)$$

#### 5.4 สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.67)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (5.67) ตลอดความหนาของฟิล์มน้ำมันและจากการอินทิเกรตจะได้ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\rho c_p \int_0^h \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy - \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) = \int_0^h u \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy + \int_0^h w \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy \quad (5.68)$$

$$\int_0^h \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy = h \left( u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + w_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \quad (5.69)$$

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \frac{1}{h} \int_0^h u dy = \frac{u}{2} - \frac{h^{n+1}}{12m\nu^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \\ w_m &= \frac{1}{h} \int_0^h w dy = \frac{u}{2} - \frac{h^{n+1}}{12m\nu^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \\ T_m &= \frac{1}{h} \int_0^h T dy \end{aligned} \right\} \quad (5.70)$$

ในการนำความร้อน (Heat Conduction) จากฟิล์มน้ำมันไปยังเพลลา (Journal) และผิวกาบเพลลา (Bearing Surface) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นไปตามข้อสมมุติที่ให้เพลลาและกาบรองลื่นเป็นการหุ้มฉนวนโดยสมบูรณ์ในสมการที่ (5.71)

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0 \quad (5.71)$$

จากการสมดุลของแรงในฟิล์มน้ำมันเราจะได้

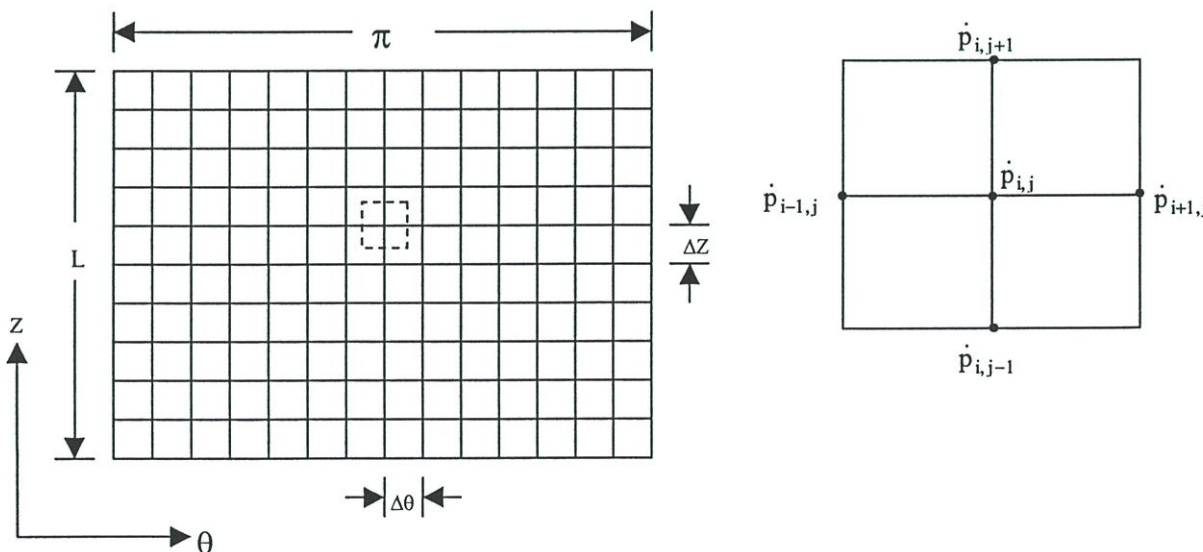
$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5.72)$$

จากสมการที่ (5.68) จะได้

$$\rho c_p \left[ \left( \frac{uh}{2} - \frac{h^{n+2}}{12m\nu^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial x} - \left( \frac{h^{n+2}}{12m\nu^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right] = \left. \begin{aligned} m \left( \frac{u}{c} \right)^{n-1} \left[ \left( \frac{hu}{2} - \frac{h^{n+2}}{12m\nu^{n-1}} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{h^{n+2}}{12m\nu^{n-1}} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.73)$$

### 5.5 การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข

ในสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเลือกใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ สำหรับแก้สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ เพื่อคำนวณหาค่าการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมัน



รูปที่ 5.5 แสดงการแบ่งกริดบนพื้นผิวของกบรองคลื่น

เมื่อทำการคลี่พื้นผิวของกาบรองลื่นออกโดยพิจารณาในช่วง  $(0 < \theta < \pi)$  แล้วทำการแบ่งออกเป็นสี่เหลี่ยมเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยมีขนาดของกริดตามแนวแกน  $\theta$  และตามแนวแกน  $Z$  เท่ากับ  $\Delta\theta$  และ  $\Delta z$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.5

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (5.51) จะได้

$$(n+2)h^{n+1} \frac{\partial h}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \dot{p}}{\partial \theta} \right) + h^{n+2} \frac{\partial^2 \dot{p}}{\partial \theta^2} + \frac{n}{4} \left( \frac{D}{L} \right)^2 h^{n+2} \frac{\partial^2 \dot{p}}{\partial z^2} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (5.74)$$

จากวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference scheme) โดยใช้ central difference approximation ดังนั้นในรูปที่ 5.5 เราสามารถเขียนรูปแบบของความดันที่จุดต่อต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{p}}{\partial \theta} &= \frac{\dot{p}_{i+1,j} - \dot{p}_{i-1,j}}{2(\Delta\theta)} \\ \frac{\partial^2 \dot{p}}{\partial \theta^2} &= \frac{\dot{p}_{i+1,j} - 2\dot{p}_{i,j} + \dot{p}_{i-1,j}}{(\Delta\theta)^2} \\ \frac{\partial^2 \dot{p}}{\partial z^2} &= \frac{\dot{p}_{i,j+1} - 2\dot{p}_{i,j} + \dot{p}_{i,j-1}}{(\Delta z)^2} \\ h &= 1 + \varepsilon(\cos \theta) \\ \frac{\partial h}{\partial \theta} &= -\varepsilon(\sin \theta) \end{aligned} \quad (5.75)$$

เมื่อ  $i$  และ  $j$  แทนจุดกริด (Grid Point) บนผิวกาบรองลื่นในทิศทางตามแนวแกน  $\theta$  และแกน  $Z$  ตามลำดับ

แทนสมการที่(5.75) ลงในสมการ (5.74) แล้วทำการจัดเทอมใหม่ และย้ายข้าง เราจะได้สมการการกระจายความดันในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference form) ที่จุด  $(i, j)$  ใดๆ ได้ ดังนี้

$$\dot{p}_{i,j} = \frac{(n+2) \frac{\partial h}{\partial \theta} \left[ \frac{\dot{p}_{i+1,j} - \dot{p}_{i-1,j}}{2(\Delta\theta)} \right] + \left[ \frac{\dot{p}_{i+1,j} + \dot{p}_{i-1,j}}{(\Delta\theta)^2} \right] + \frac{n}{4} \left( \frac{D}{L} \right)^2 \left[ \frac{\dot{p}_{i,j+1} + \dot{p}_{i,j-1}}{(\Delta z)^2} \right] - \frac{1}{h^{n+2}} \frac{\partial h}{\partial \theta}}{\left[ \frac{2}{(\Delta\theta)^2} + \frac{n}{2} \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{1}{(\Delta z)^2} \right]} \quad (5.76)$$

จากการศึกษาของซอมเมอร์เฟลด์ (Sommerfeld) พบว่าความดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดภายในฟิล์มน้ำมันซึ่งอยู่ระหว่างเพลากับกาบรองลื่น สามารถแบ่งออกเป็นสองโซน โดยโซนแรกเป็น

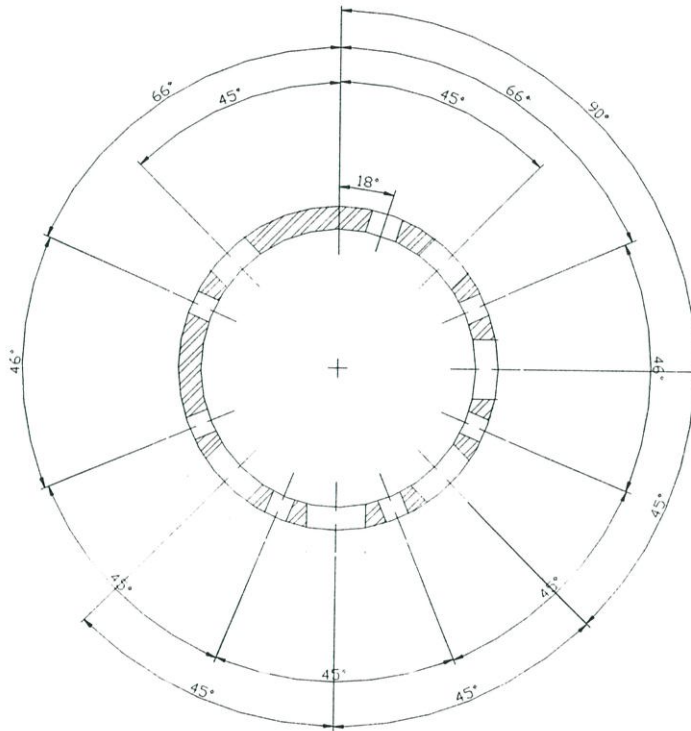
โซนที่ความดันมีค่าเป็นบวก หรือที่เรียกว่า Full film zone ซึ่งโดยปกติจะเกิดอยู่ในช่วง  $(0 < \theta < \pi)$  ส่วนโซนที่สองเป็นโซนที่ความดันมีค่าเป็นลบหรือที่เรียกว่า Cavitation zone จะเกิดอยู่ในช่วง  $(\pi < \theta < 2\pi)$  โดยปกติในการคำนวณหาการกระจายความดันฟิล์มน้ำมันนั้น ส่วนใหญ่มักพิจารณาในโซนที่ความดันมีค่าเป็นบวก ซึ่งอยู่ในช่วง  $(0 < \theta < \pi)$  หรือที่เรียกว่า ฮาล์ฟ-ซอมเมอร์เฟลด์ (half-Sommerfeld condition) [12] ดังนั้นในการคำนวณเพื่อหาการกระจายความดันฟิล์มน้ำมันเราสามารถหาได้จากการแก้สมการที่(5.76) โดยใช้เงื่อนไขขอบความดันของ ฮาล์ฟ-ซอมเมอร์เฟลด์ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{p}(\theta, 0) &= 0 & \dot{p}(\theta, 1) &= 0 \\ \dot{p}(0, z) &= 0 & \dot{p}(\pi, z) &= 0 \end{aligned} \tag{5.78}$$

## บทที่ 6

### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้การทดลอง

#### 6.1 กาบรองลื่น (Bearing)



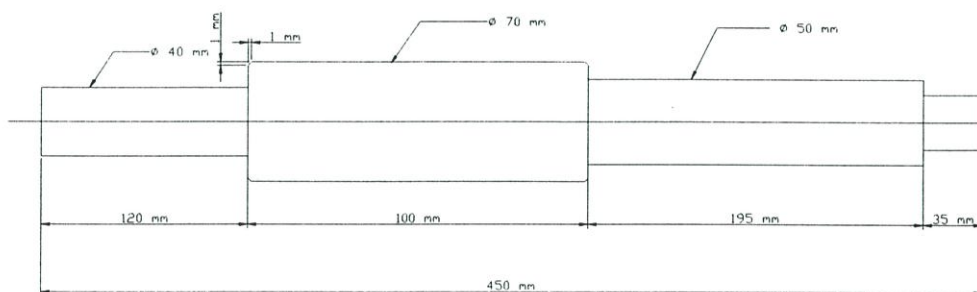
รูปที่ 6.1 แสดงตำแหน่งของการติดตั้ง Pressure transducer และ Thermocouple บนกาบรองลื่น

กาบรองลื่นที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 ขนาด โดยแต่ละขนาดได้ทำการเจาะรูและทำเกลียว สำหรับใช้ในการติดตั้ง Pressure transducer จำนวน 4 ตัว Thermocouple จำนวน 6 ตัว และ Gap sensor จำนวน 2 ตัว กาบรองลื่นที่ใช้ในแต่ละขนาดทำมาจากเพลาทองเหลืองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) กาบรองลื่นแบบเต็มวง ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 70.2 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 70 มิลลิเมตร
- 2) กาบรองลื่นแบบเต็มวง ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 70.2 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 35 มิลลิเมตร

## 6.2 เฟลากลม(Journal)

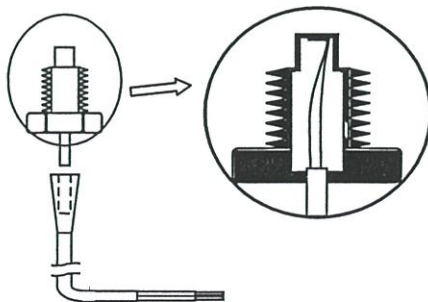
เฟลากลมที่ใช้เป็นเจอร์นัลในการทดลองนี้ ทำมาจากเหล็กเฟลากลมแล้วเอามากถึง จากนั้นจึงทำการเจียรนัยผิวในช่วงที่ใช้งานให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 70 มิลลิเมตร มีความยาวที่ใช้งาน 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะของเฟลากลม

## 6.3 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Transducer)

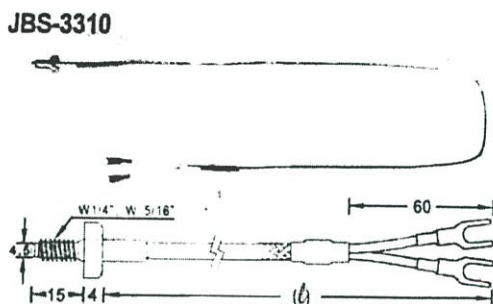
Pressure Transducer เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจาก Strain Gage โดยนำเอา Strain Gage ติดไว้บนแผ่นสแตนเลสบางๆ แล้วจึงนำเอาแผ่นสแตนเลสไปติดไว้ที่ปลายท่อที่ทำจากท่อสแตนเลสโดยให้ตัว Strain Gage อยู่ด้านในของท่อเพื่อไม่ให้ตัว Strain Gage รับโหลด หรือ ความดันโดยตรง ซึ่งในการนำ Pressure Transducer ไปใช้งานนั้นเมื่อเราทำการใส่โหลดหรือ ความดันให้กับแผ่นสแตนเลสที่ติด Strain Gage แล้วจะทำให้ เส้นโลหะเล็กๆภายในตัว Strain Gage เกิดการยืดตัวออก ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของ Strain Gage เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังนั้นเราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโหลด หรือ ความดันที่กระทำต่อ Strain Gage กับค่าสเตรน (Strain Value) ได้



รูปที่ 6.3 แสดงอุปกรณ์ Pressure Transducer

## 6.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

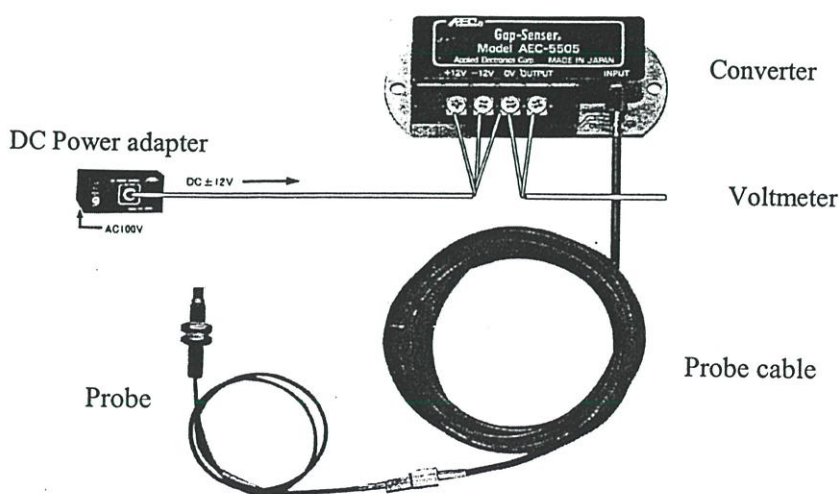
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดอุณหภูมิจะประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดนำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเป็นจุดที่นำไปใช้วัดอุณหภูมิ (Hot Junction) และปลายอีกด้านเป็นจุดที่ใช้สำหรับอ้างอิง (Cold Junction) เมื่อจุดเชื่อมนี้ได้รับความร้อนก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของความร้อนขึ้นซึ่งขนาดและขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิแตกต่างที่ปลายทั้งสองและขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาต่อเชื่อมกันด้วย



รูปที่ 6.4 แสดงอุปกรณ์ Thermocouple

## 6.5 อุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน (Gap Sensor)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน หรือระยะห่างระหว่างเพลากลมกับกบารองเลื่อน ในการทดลองนี้ได้แก่ Gap Sensor ยี่ห้อ AEC รุ่น AEC 5505 สามารถใช้วัดในช่วง 0-0.2 มิลลิเมตรใช้กับแหล่งจ่ายไฟขนาด 12 โวลต์ (DC) 40 มิลลิแอมป์ (mA) มีลักษณะและส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 6.5



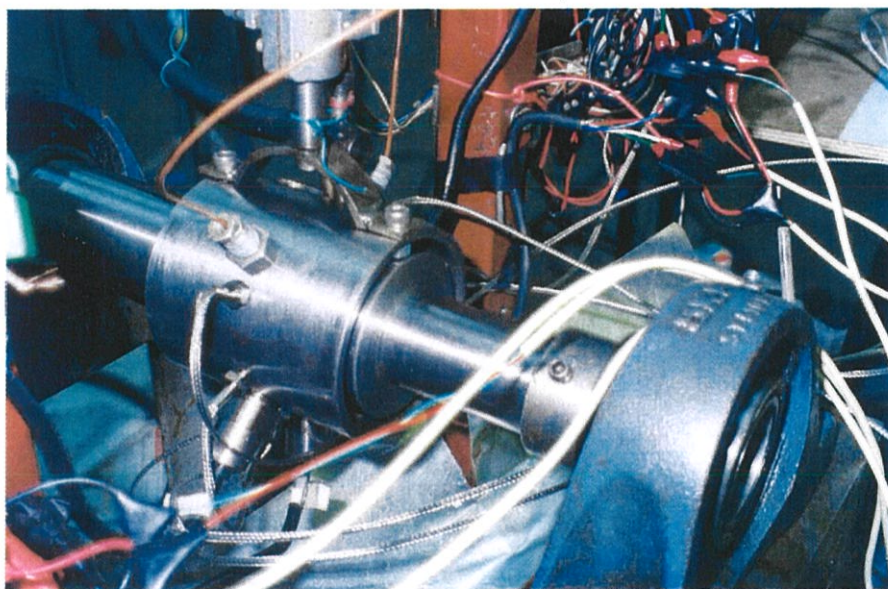
รูปที่ 6.5 แสดงอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน Gap Sensor

## 6.6 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์



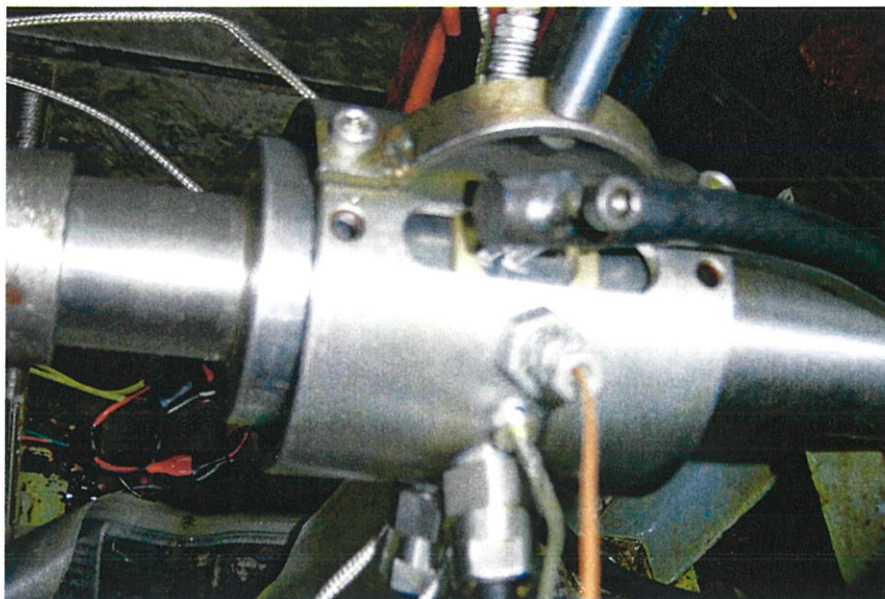
รูปที่ 6.6 แสดงอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์

## 6.7 การประกอบภาครองชิ้นเข้ากับเฟลาและการติดตั้งอุปกรณ์วัด



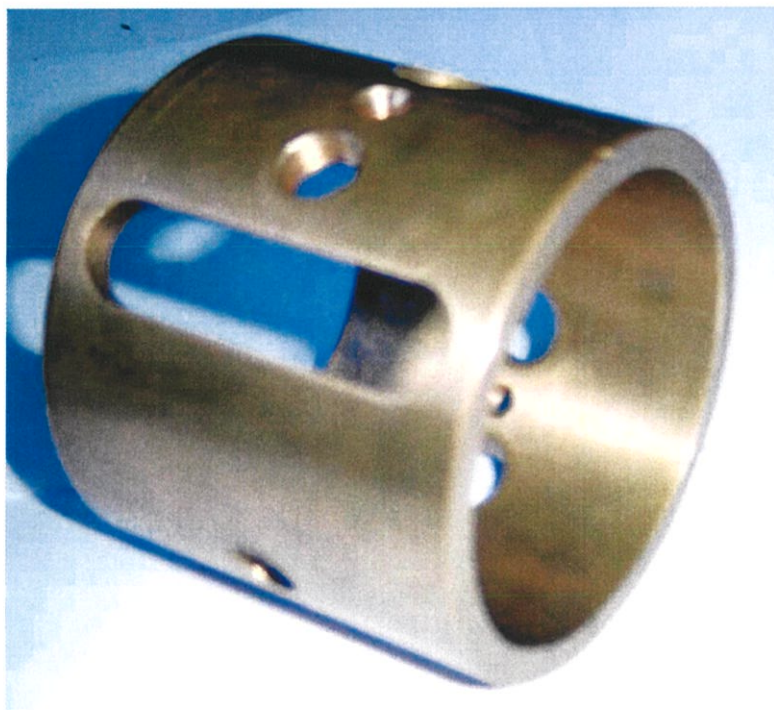
รูปที่ 6.7 แสดงการประกอบภาครองชิ้นเข้ากับเฟลาและติดตั้งอุปกรณ์วัด

## 6.8 การปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น



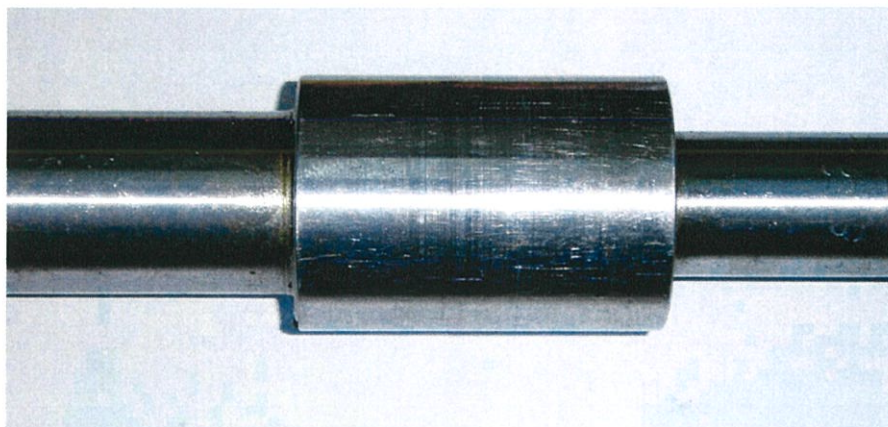
รูปที่ 6.8 แสดงการปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น

## 6.9 ลักษณะของกาบรองลื่น



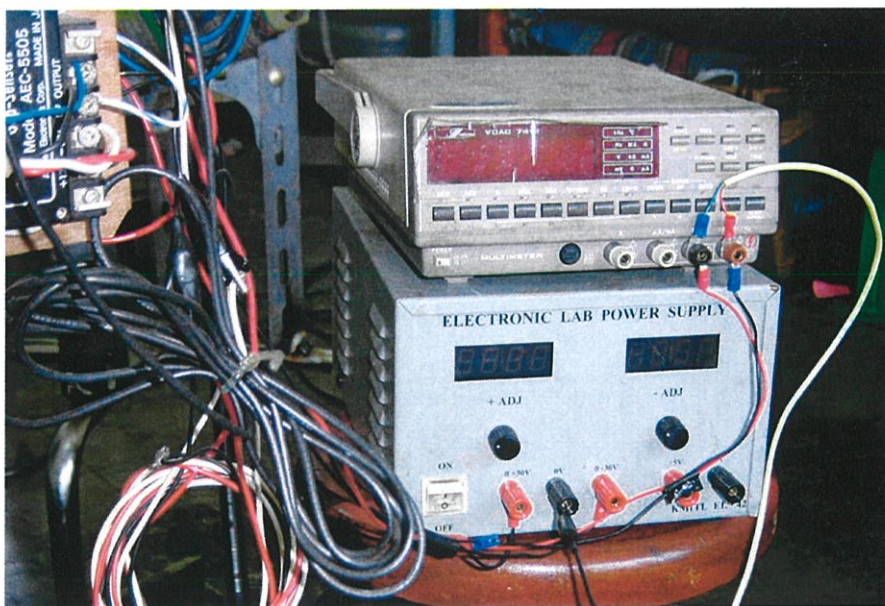
รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะของกาบรองลื่น

## 6.10 ลักษณะของเพลากลม



รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะของเพลากลม

## 6.11 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 6.11 แสดงเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า

## 6.6 น้ำมันพืชทดสอบ

น้ำมันทดสอบที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refining Process) แล้ว แต่ยังไม่ผ่านกระบวนการเติมสาร Antioxidant น้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบนี้ ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม โดยจะทำการเติมสาร Zincdialkyldithiophosphates (ZDTP) เป็นสารเพิ่มคุณภาพ (Additive)

น้ำมันถั่วเหลือง

น้ำมันถั่วเหลือง ผสมสาร ZDTP 0.2 % โดย น้ำหนัก

น้ำมันถั่วเหลือง ผสมสาร ZDTP 1% โดย น้ำหนัก

น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์ม ผสมสาร ZDTP 0.2 % โดย น้ำหนัก

น้ำมันปาล์ม ผสมสาร ZDTP 1 % โดย น้ำหนัก

## บทที่ 7

### วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด และขั้นตอนการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชในกาบรองลื่นเพลากลม

#### 7.1 ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี (Rheology Lab Test)

การทดลองทางรีโอโลยีเพื่อหาเส้นกราฟแสดงการไหล (Flow Curve) หรือเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) ของน้ำมันทดสอบโดยน้ำมันพืชที่ใช้ในการทดลองนี้มี 6 ประเภทดังนี้

น้ำมันถั่วเหลือง

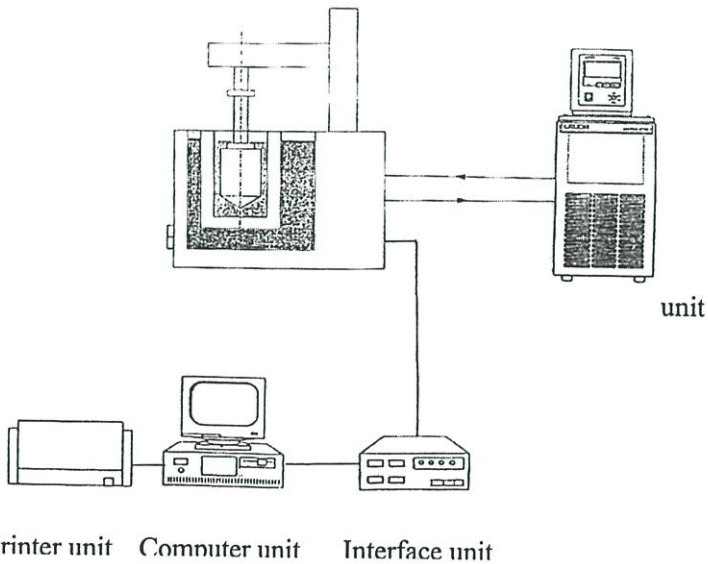
น้ำมันถั่วเหลืองผสมสาร ZDTP 0.2%

น้ำมันถั่วเหลืองผสมสาร ZDTP 1%

น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 0.2%

น้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 1%



รูปที่ 7.1 แสดงผังโคอะแกรมของอุปกรณ์ Rheology lab test

## 7.2 ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

### 7.2.1 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์สำหรับวัดความดันของฟิล์มน้ำมันที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้คือ Pressure Transducer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจาก Strain Gage ในการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ Pressure Transducer เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตรน (Strain Value) กับค่าความดันนี้ ได้ทำการติดตั้งหัว Prob ของ Pressure Transducer เข้ากับเครื่อง Dead Weight Tester แล้วต่อปลายสายของ Pressure Transducer เข้ากับ Power Supply และ Multimeter เพื่ออ่านค่า ดังแสดงในรูปที่ 7.2 จากนั้นจึงทำการใส่ก้อนน้ำหนักที่มีขนาดเทียบเท่ากับความดัน  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  ลงบน Dead weight tester แล้วจึงทำการบันทึกค่าที่อ่านได้จาก Multimeter แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างค่า สเตรน (Strain Value) กับค่าความดัน

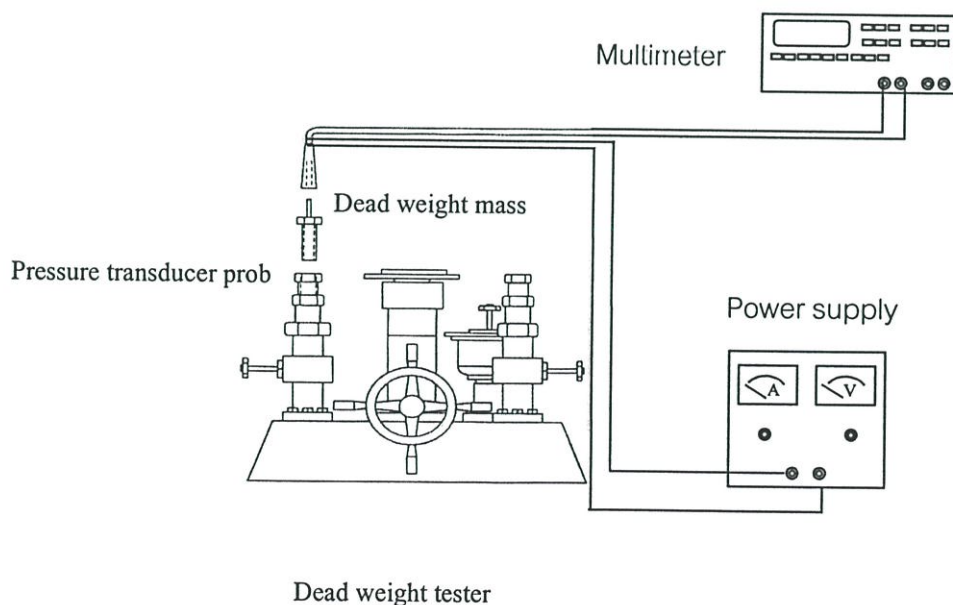
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันได้แสดงในรูปที่ 7.2 ซึ่งจะประกอบด้วย

7.2.1.1 Dead Weight tester

7.2.1.2 Dead Weight mass

7.2.1.3 Multimeter

7.2.1.4 Power Supply



รูปที่ 7.2 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

### 7.2.2 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน (Thermocouple)

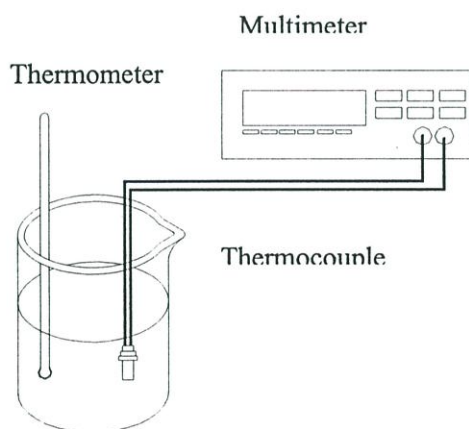
เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ในการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ Thermocouple จะทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับ Thermometer โดยบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Voltmeter แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage กับ อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermometer ดังรูปที่ 7.3

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันได้แสดงในรูปที่ 7.3 ซึ่งจะประกอบด้วย

#### 7.2.2.1 Thermocouple

#### 7.2.2.2 Thermometer

#### 7.2.2.3 Multimeter

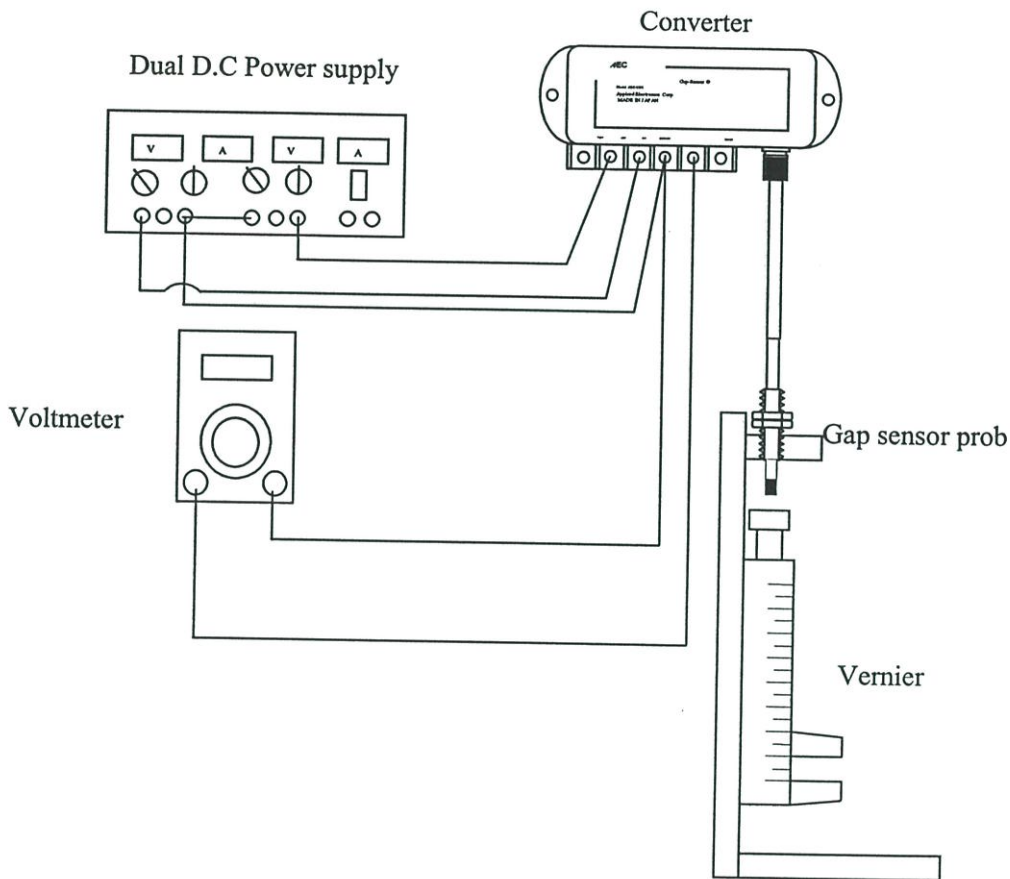


รูปที่ 7.3 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

### 7.2.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน (Gap Sensor)

เครื่องมือสำหรับวัดความหนาของฟิล์มน้ำมันที่อยู่ระหว่างกาบรองลื่นกับเพลากลมที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้คือ Gab Sensor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดระยะการขจัดโดยไม่ต้องมีการสัมผัสของหัวโพรบ (Prob) กับพื้นผิววัตถุเป้าหมาย(target object) ในการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ Gab Sensor นี้ จะทำการติดตั้งหัว Probe เข้ากับตัวยึดเพื่อไม่ให้หัวโพรบเกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างการสอบเทียบค่า ดังแสดงในรูปที่ 7.4 โดยให้หัวโพรบอยู่บนผิววัตถุเป้าหมาย จากนั้นจึงทำการเลื่อนวัตถุเป้า

หมายให้เคลื่อนที่ไปแล้วจึงทำการบันทึกค่าที่อ่านได้โดยการอ่านจากเครื่องโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage กับ ระยะขจัด (Displacement)



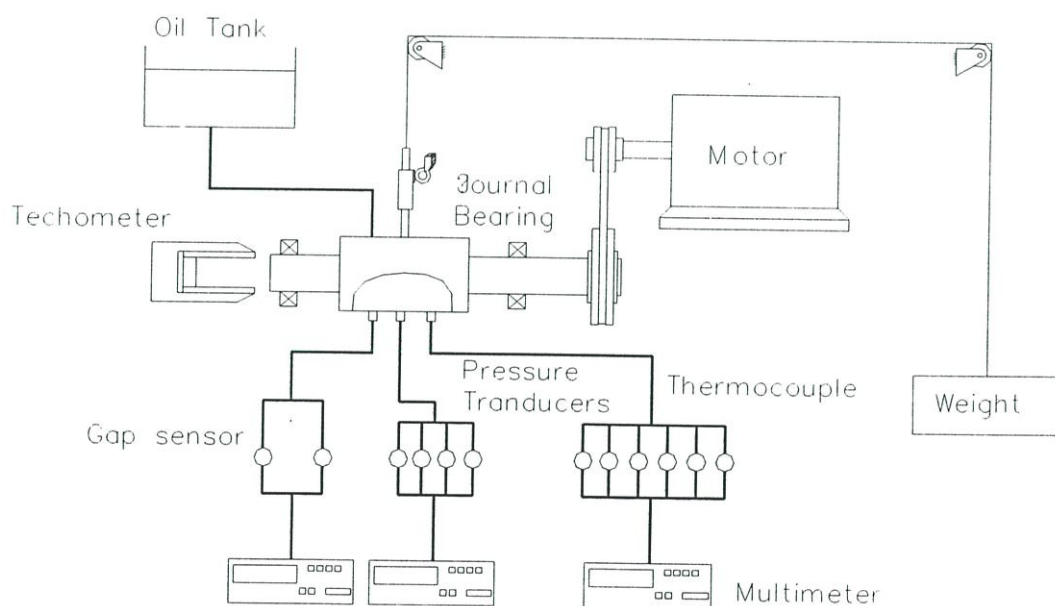
รูปที่ 7.4 แสดงการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มน้ำมัน (Gap Sensor)

### 7.3 ขั้นตอนการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชในกาบรองลื่นเพลากลม

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองหาพฤติกรรมสถิตซ์ของการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชในกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวงภายใต้สภาวะคงตัว ในห้อง Lubrication Laboratory ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กาบรองลื่นเพลากลม (Journal Bearing) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าอัตราส่วนของ  $L/D$  เท่ากับ 1 , 0.5 ในการทดลองได้ทดลองที่ค่าเคลียเลนซ์ 0.1 mm. แต่ละอัตราส่วน  $L/D$  ทำการทดสอบที่ภายใต้ภาระ 3 ค่า คือที่ค่าภาระ 10 , 20 และ 30 กิโลกรัม โดยที่แต่ละภาระจะแบ่งการทดสอบที่ความเร็วรอบ 3 ค่า คือที่ค่าความเร็วรอบ 200 , 600 และ 800 รอบต่อนาที ฉะนั้นสำหรับน้ำมันทดสอบ 1 ตัวอย่างจะมีสภาวะการทดสอบ 18

สภาวะ ตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบมีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ซึ่งในแต่ละตัวอย่างก็จะมีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยในการทดสอบในแต่ละสภาวะได้กระทำที่สภาวะคงตัว(steady state) และได้ทดสอบในสภาพการทำงานภายใต้อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงประมาณ 25-27 องศาเซลเซียส ซึ่งมีวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 7.5
2. เทน้ำมันพืชทดสอบที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพแล้วลงในถังจ่ายน้ำมัน (Oil Tank)
3. ใส่น้ำหนักหรือภาระโดยการแขวนก้อนน้ำหนักให้น้ำหนักรวมเท่ากับ 10 , 20 และ 30 กิโลกรัม
4. เปิดวาล์วให้น้ำมันไหลจากถังจ่ายน้ำมันไปยังหัวจ่ายน้ำมัน
5. เปิดสวิตช์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ แล้วปรับปุ่มควบคุมความเร็วของตัว Inverter ให้หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 200 , 600 , 800 รอบ/นาที โดยอ่านจาก Techometer
6. รอจนกระทั่งค่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) แล้วจึงทำการจดบันทึกค่า
7. นำผลที่ได้จากการทดลองไปพล็อตกราฟ



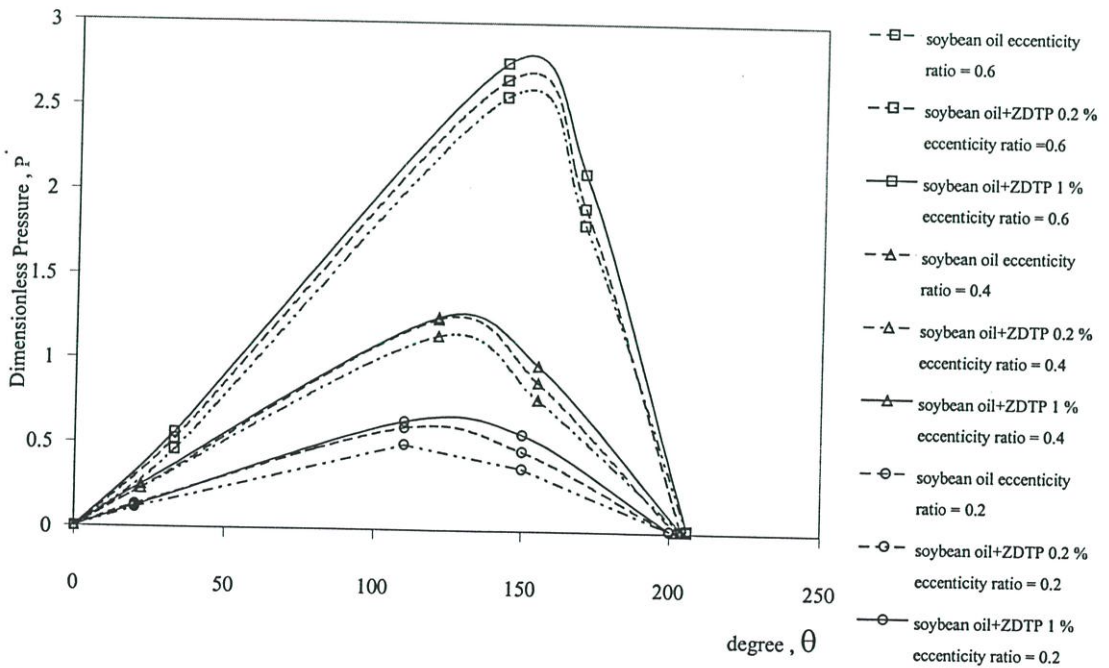
รูปที่ 7.5 แสดงผังไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

## บทที่ 8

### ผลการทดลอง

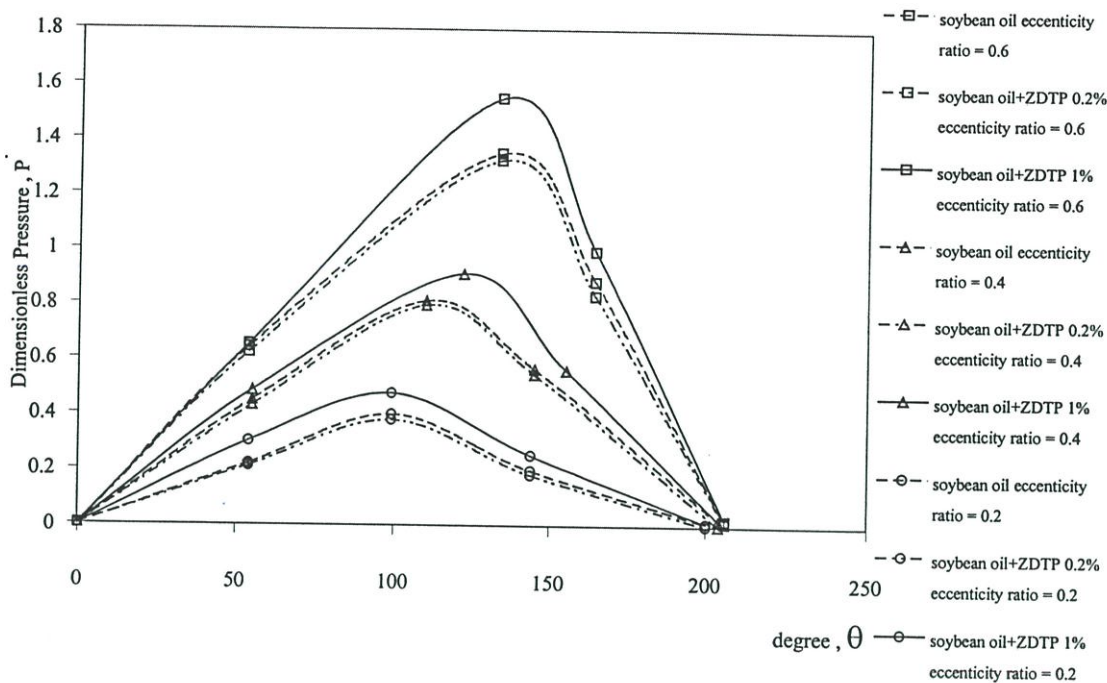
การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง ที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช โดยน้ำมันพืชที่ใช้ในการทดสอบ มี 2 ชนิดได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม โดยเติมสารเพิ่มคุณภาพประเภท ไดอัลไคลด์ไดไทรโอฟอสเฟต (dialkyldithiophosphates, ZDTP) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันพืชเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ ในการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่นได้ใช้กาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง ซึ่งขณะที่เพลามุนด้วยความเร็วคงที่บนฟิล์มน้ำมันซึ่งถูกรองรับด้วยกาบรองลื่นจะมีความดันเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะความดันที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อลักษณะพฤติกรรมของความดันในฟิล์มน้ำมันมีดังนี้

1. พฤติกรรมความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น
2. ความเร็วของเพลามีผลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น
3. ภาวะที่มากกระทำกับเพลาก็ทำให้เกิดพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับกาบรองลื่น

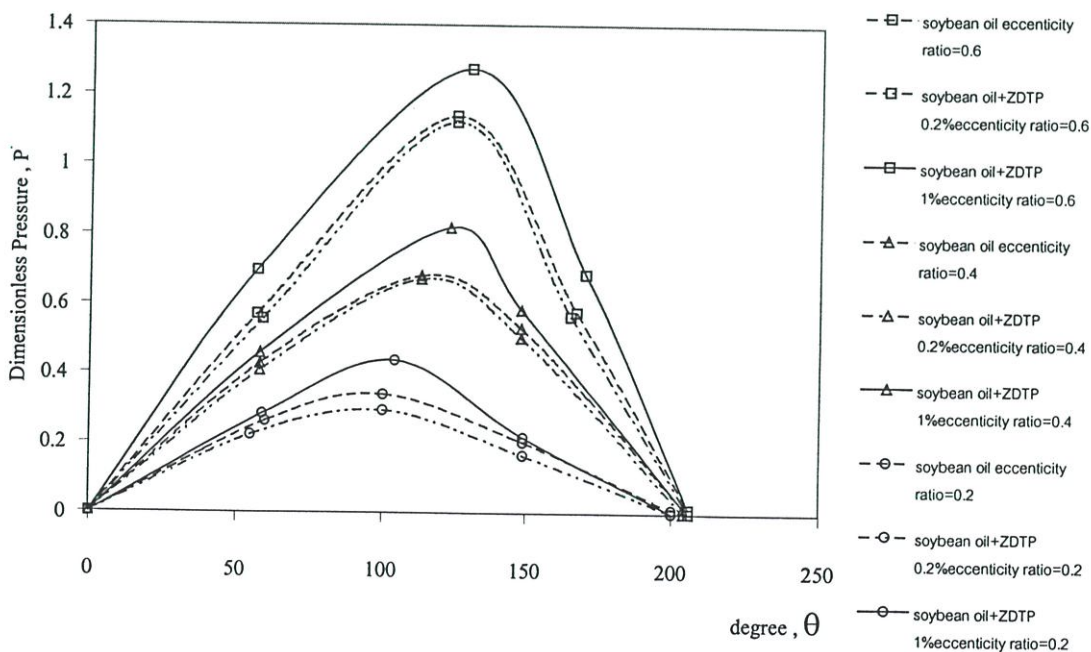


รูปที่ 8.1 แสดงผลพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับกาบรองลื่นของ น้ำมันถั่วเหลืองที่

ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 1$

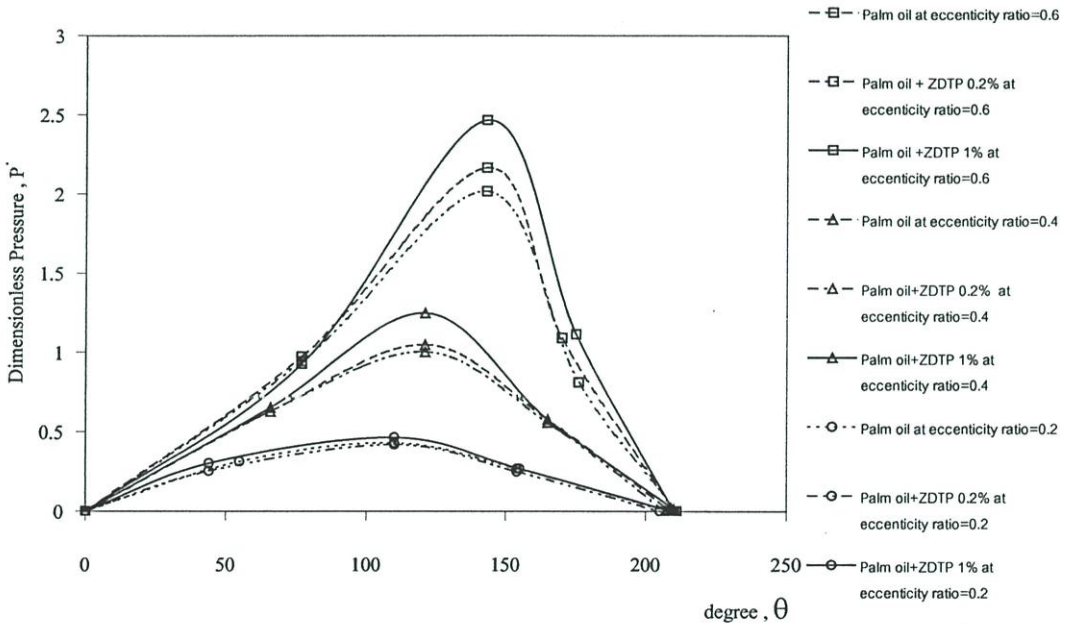


รูปที่ 8.2 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 1

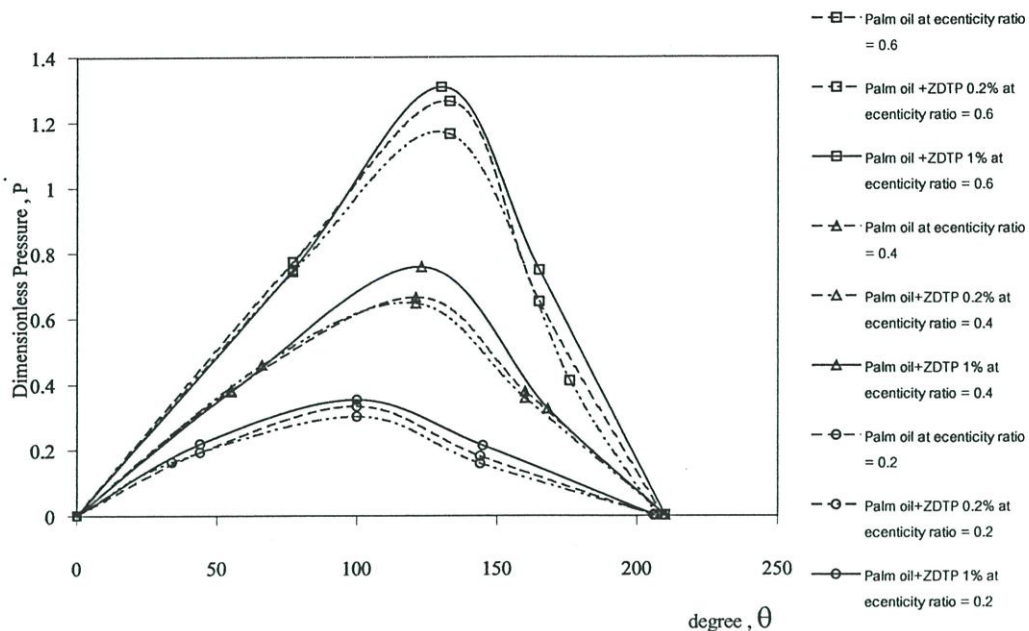


รูปที่ 8.3 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 1

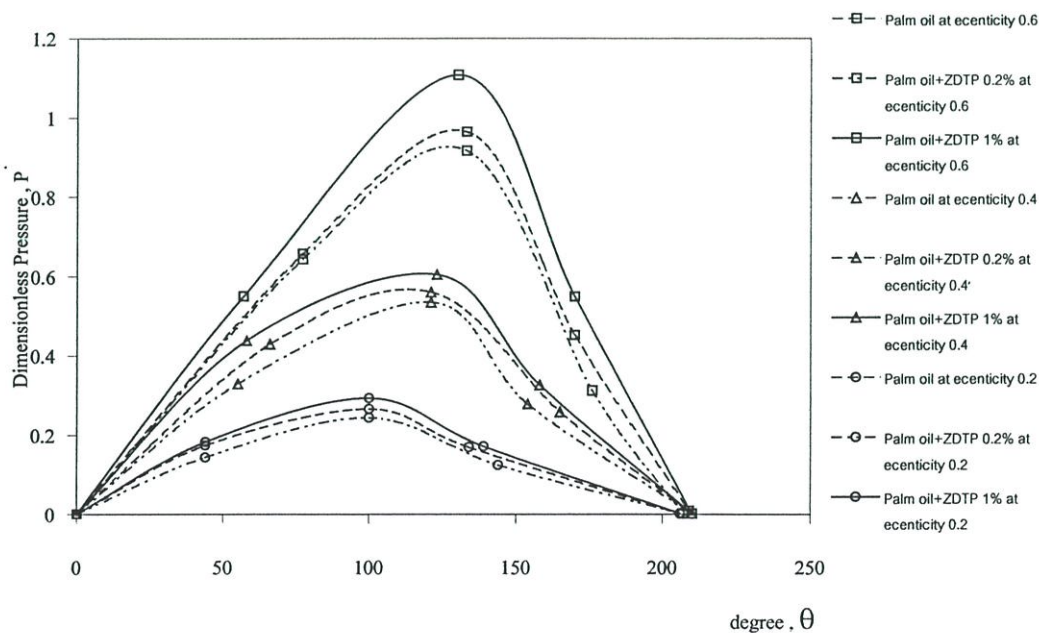
ในรูปที่ 8.1 – 8.3 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับที่มีผลต่อค่าการกระจายความดันในรูปไร้มิติ (Dimensionless Pressure, P) ระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ที่  $L/D = 1$  และอัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.2 , 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ



รูปที่ 8.4 แสดงผลพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่ ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 1$

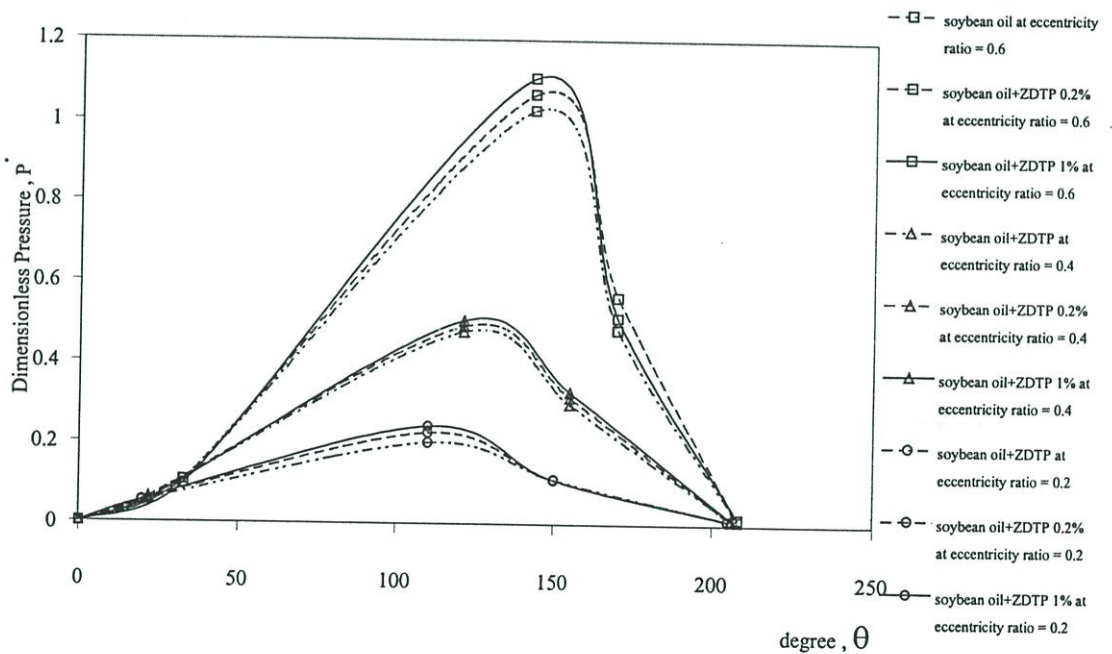


รูปที่ 8.5 แสดงผลพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่  
 ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 1



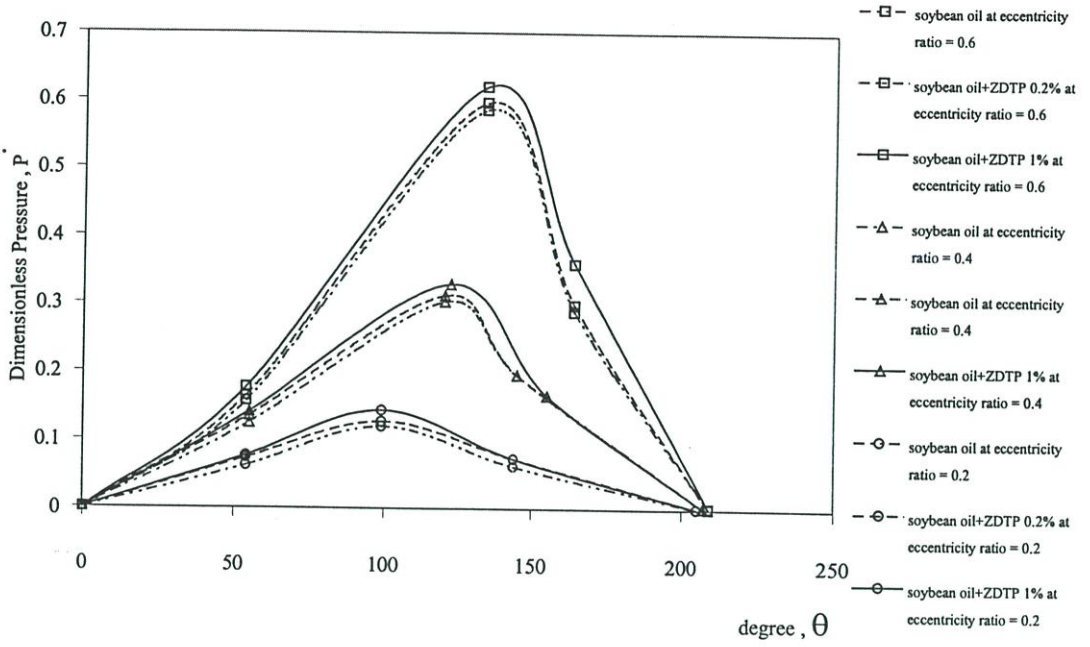
รูปที่ 8.6 แสดงผลพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่  
 ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 1

ในรูปที่ 8.4 – 8.6 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของการเอียงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับที่มีผลต่อค่าการกระจายความดันในรูปไร้มิติ (Dimensionless Pressure, P) ระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ที่ค่า  $L/D = 1$  และอัตราเอียงศูนย์กลาง 0.2, 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเอียงศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่ อัตราการเอียงศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันปาล์ม ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ

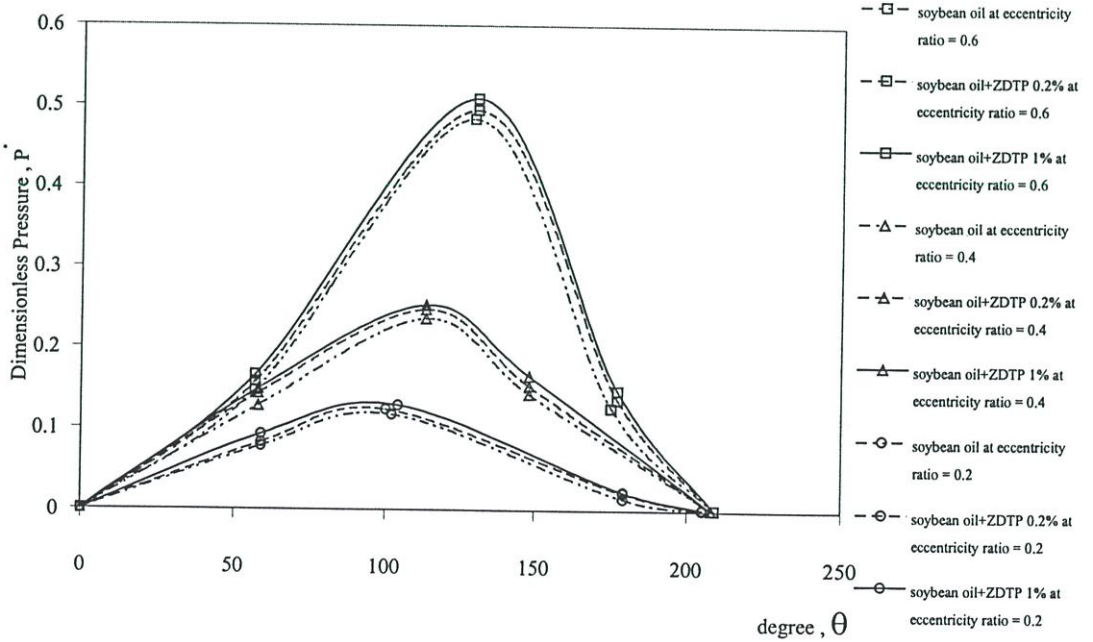


รูปที่ 8.7 แสดงผลพฤติกรรมเอียงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่

ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$

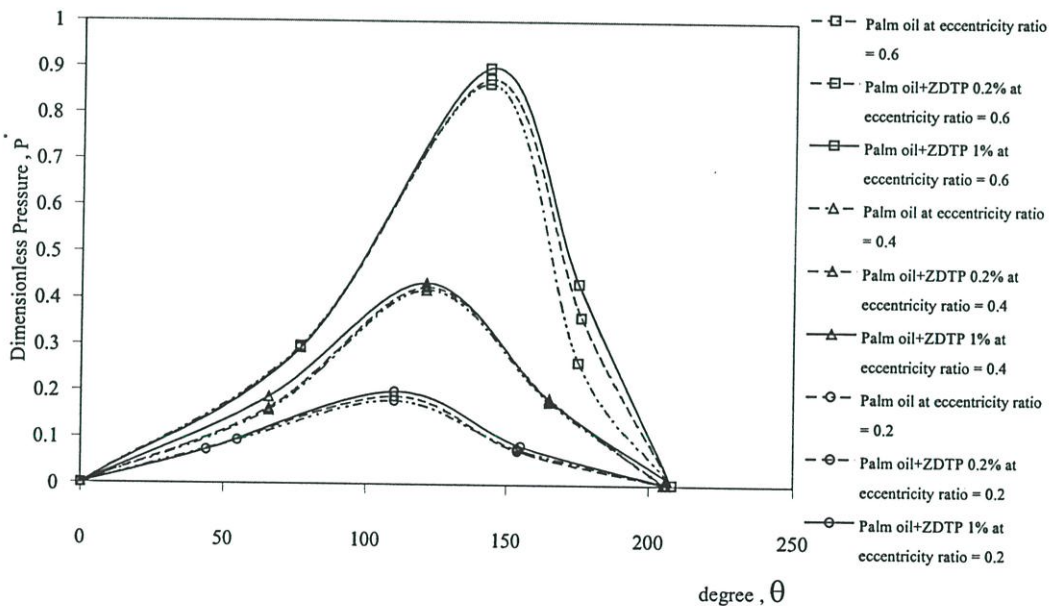


รูปที่ 8.8 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่  
ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$



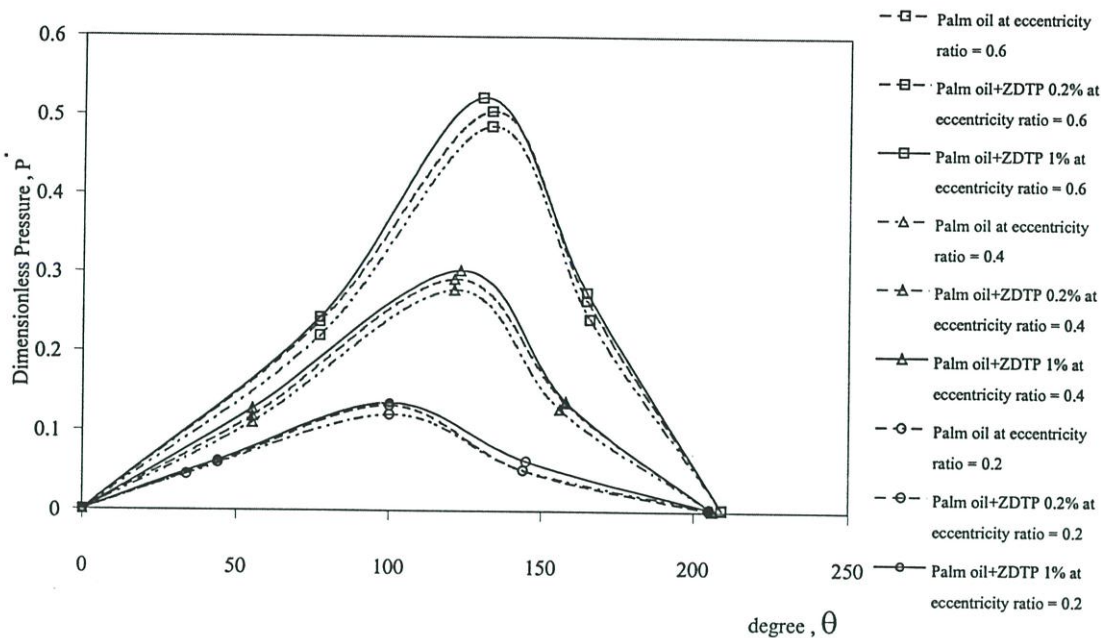
รูปที่ 8.9 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่  
ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$

ในรูปที่ 8.7 – 8.9 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับที่ส่งผลต่อค่าการกระจายความดันในรูปไร้มิติ (Dimensionless Pressure, P) ระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ที่  $L/D = 0.5$  และอัตราการเชิงศูนย์กลาง 0.2, 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเชิงศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่อัตราการเชิงศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ



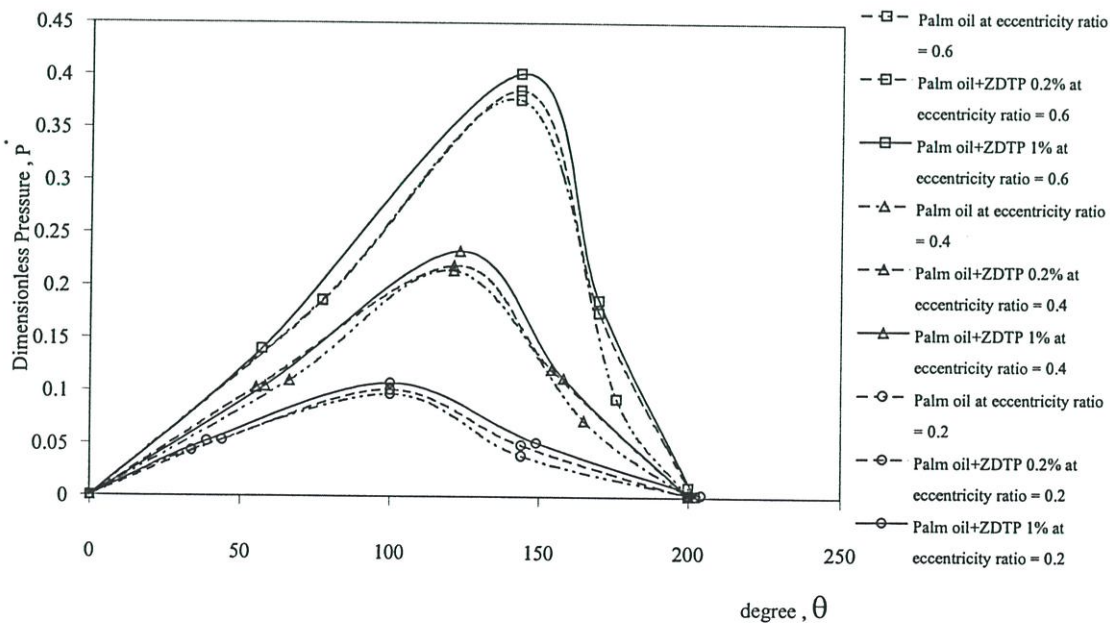
รูปที่ 8.10 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่

ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$



รูปที่ 8.11 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่

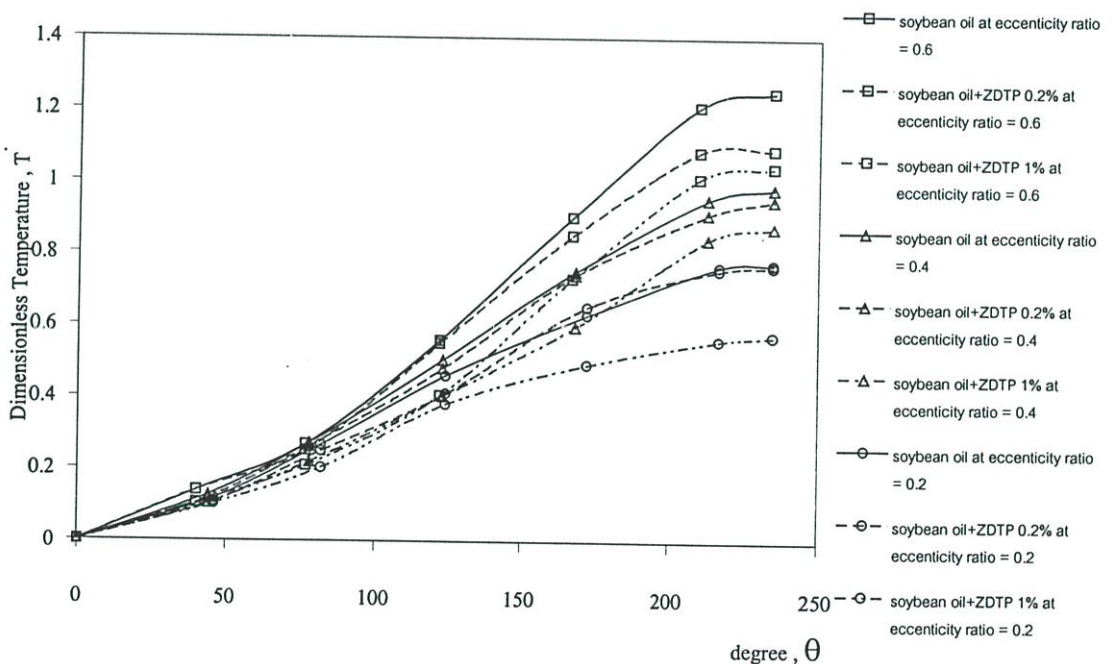
ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$



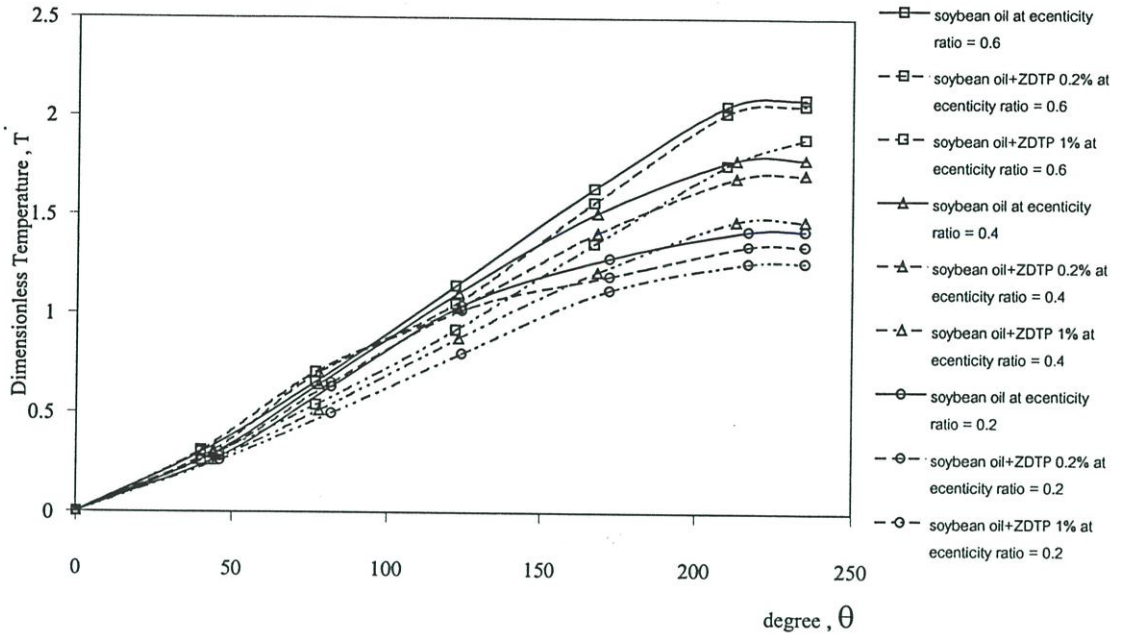
รูปที่ 8.12 แสดงผลพฤติกรรมการเชิงศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่

ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$

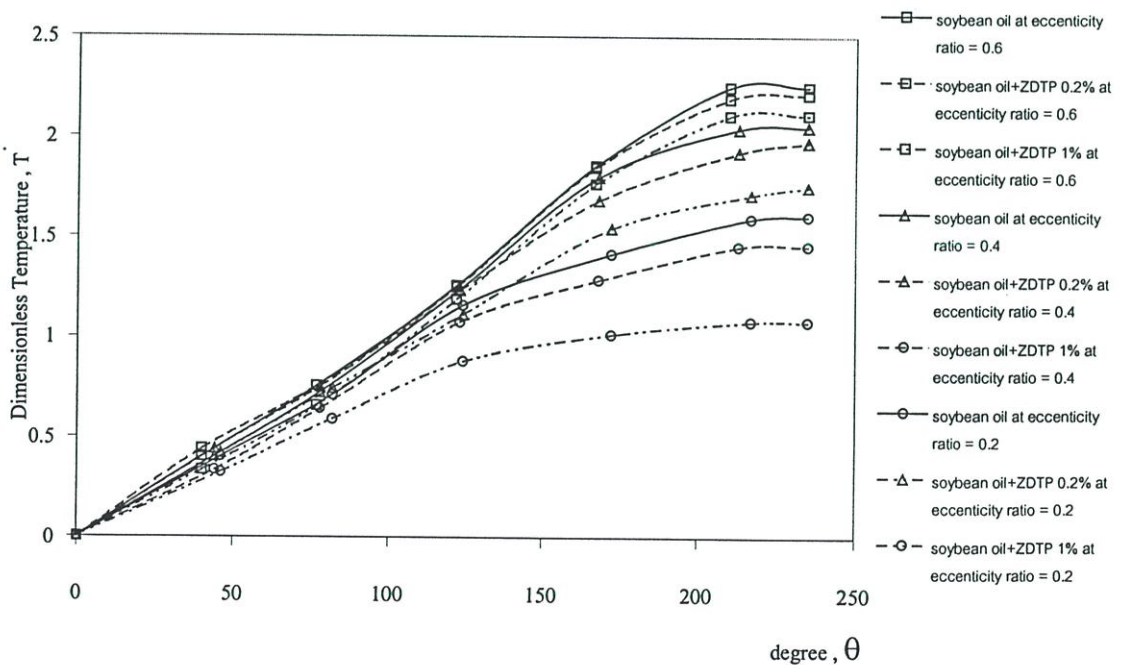
ในรูปที่ 8.10 – 8.12 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองลื่นที่มีผลต่อค่าการกระจายความดันในรูปไร้มิติ (Dimensionless Pressure, P) ระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ที่ค่า  $L/D = 0.5$  และอัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.2, 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันปาล์ม ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ



รูปที่ 8.13 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลที่เกิดขึ้นจากการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองลื่นของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 1$

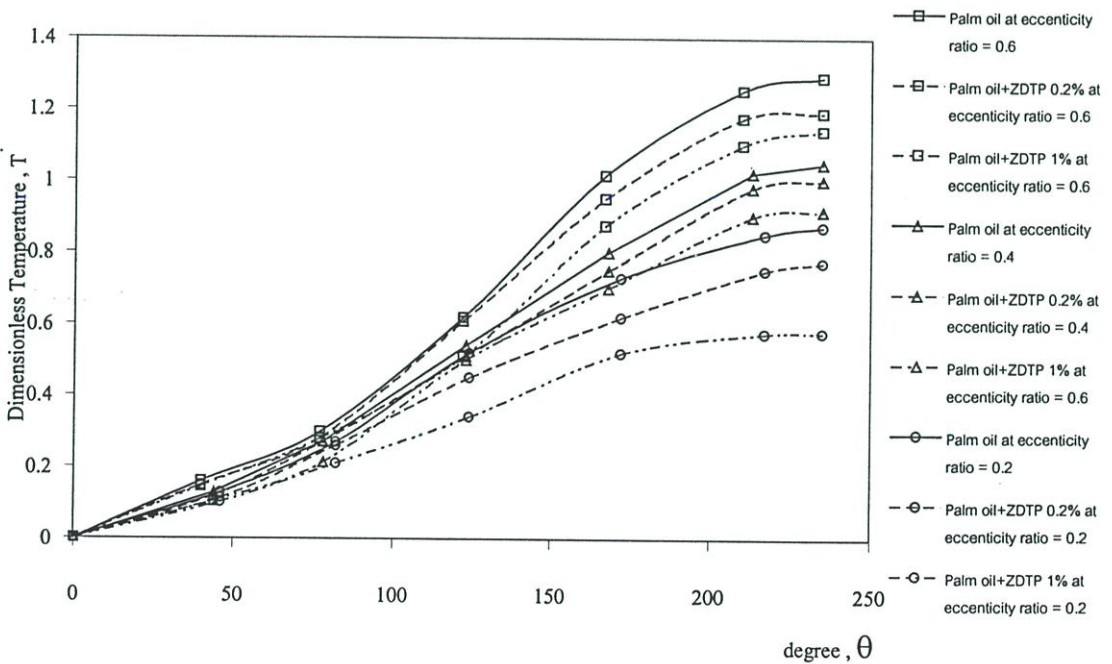


รูปที่ 8.14 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเอียง ศูนย์ของเพลลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 1$

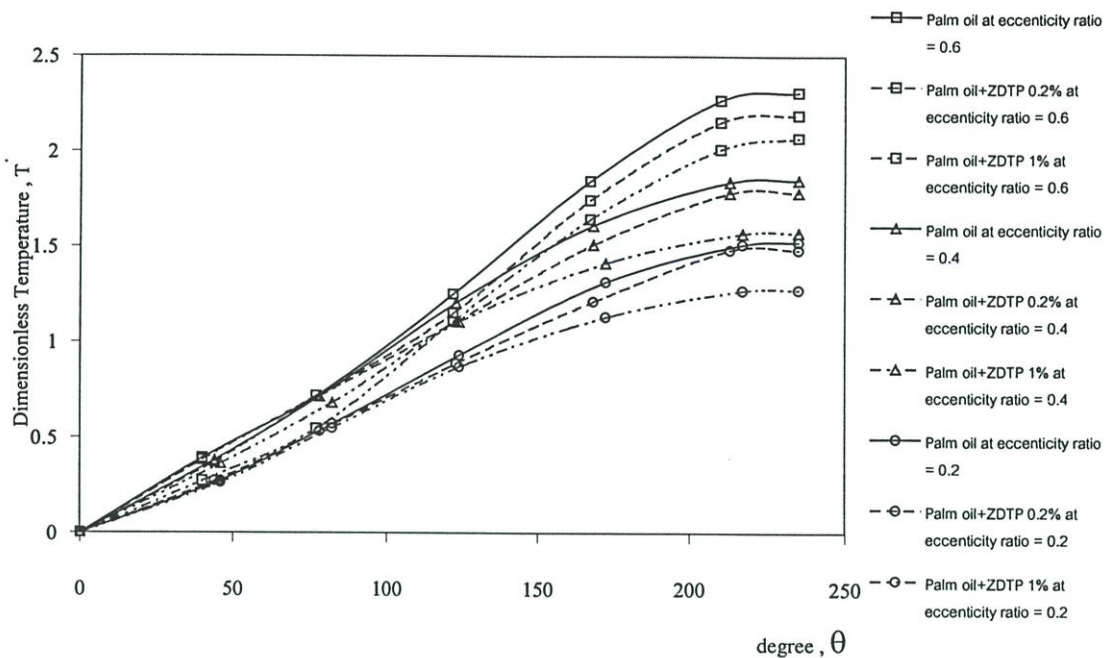


รูปที่ 8.15 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเอียง ศูนย์ของเพลลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 1$

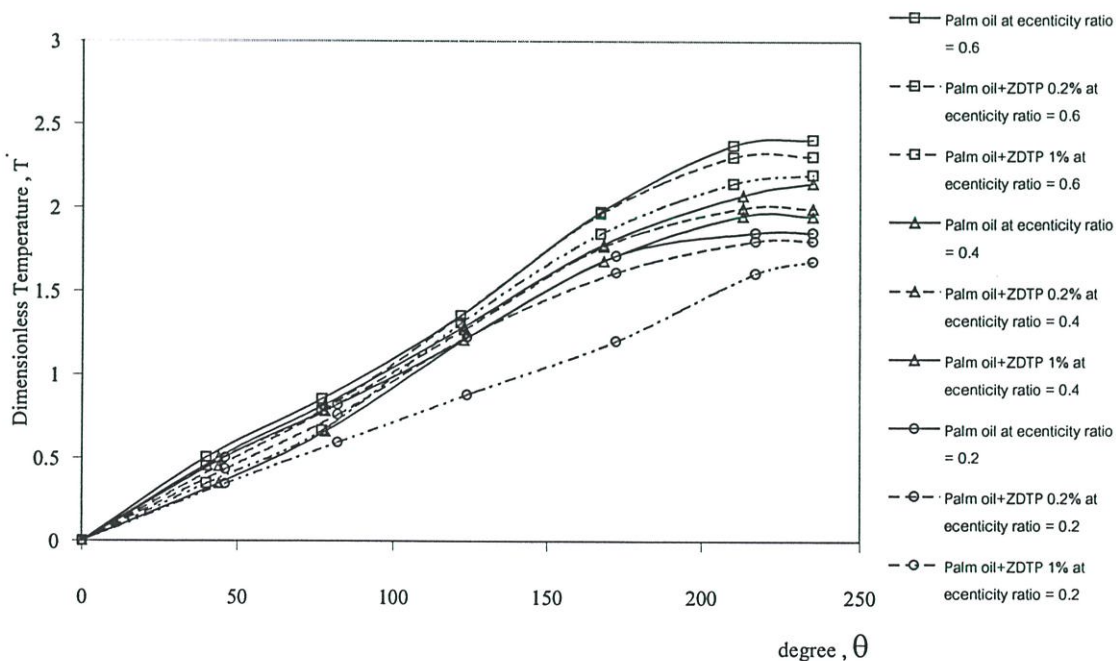
ในรูปที่ 8.13 – 8.15 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรอลื่นที่มีผลต่อค่าการกระจายอุณหภูมิในรูปไร้มิติ (Dimensionless Temperature,  $T$ ) ระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.2 , 0.4 และ 0.6 พบว่าที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าที่ อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ



รูปที่ 8.16 แสดงพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลที่เกิดขึ้นจากการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรอลื่นของ น้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ = 200 rpm  
ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 1$

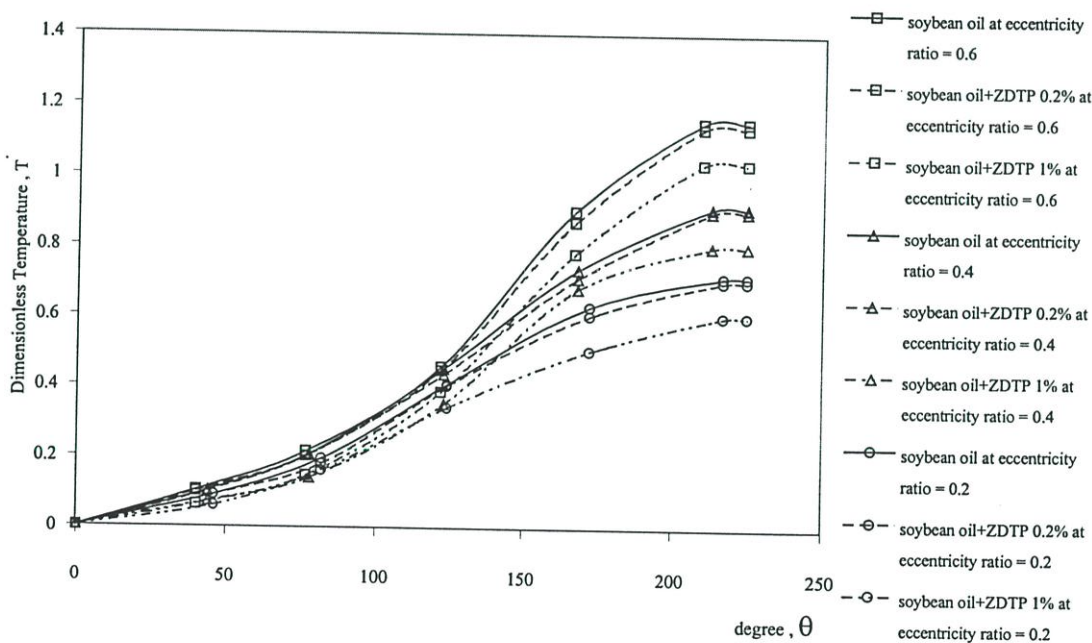


รูปที่ 8.17 แสดงพฤติกรรมกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลลากับการรองลิ้นของ น้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ = 600 rpm  
ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 1

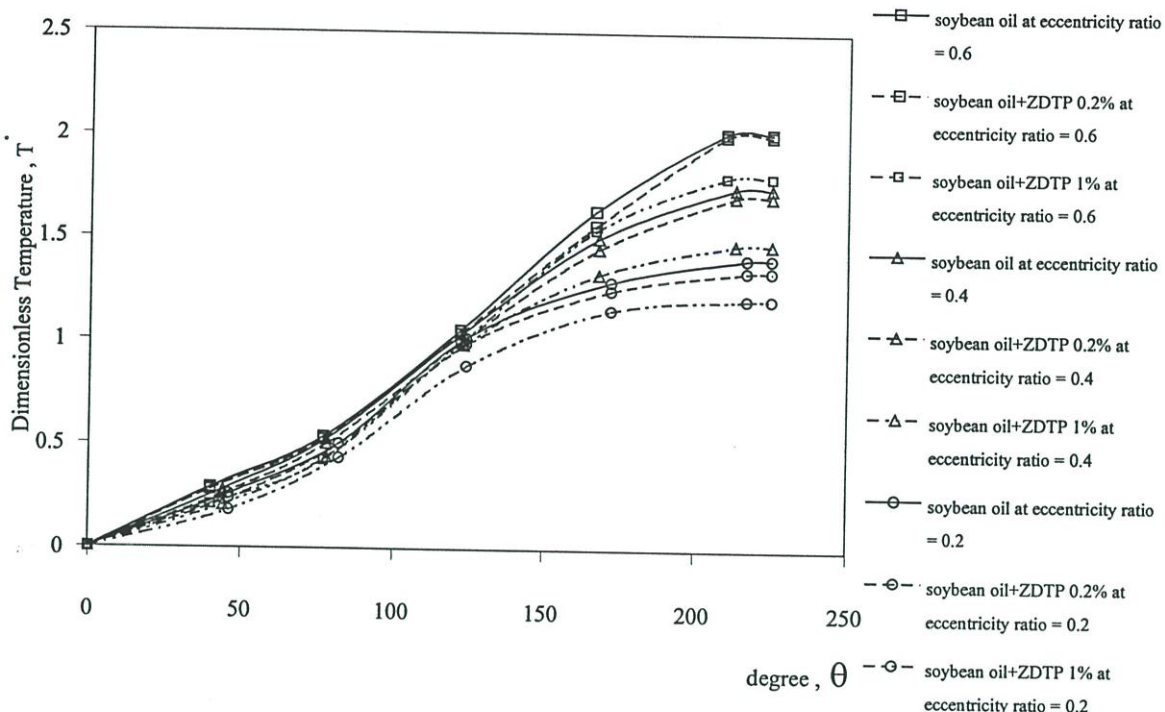


รูปที่ 8.18 แสดงพฤติกรรมกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลลากับการรองลิ้นของ น้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ = 800 rpm  
ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 1

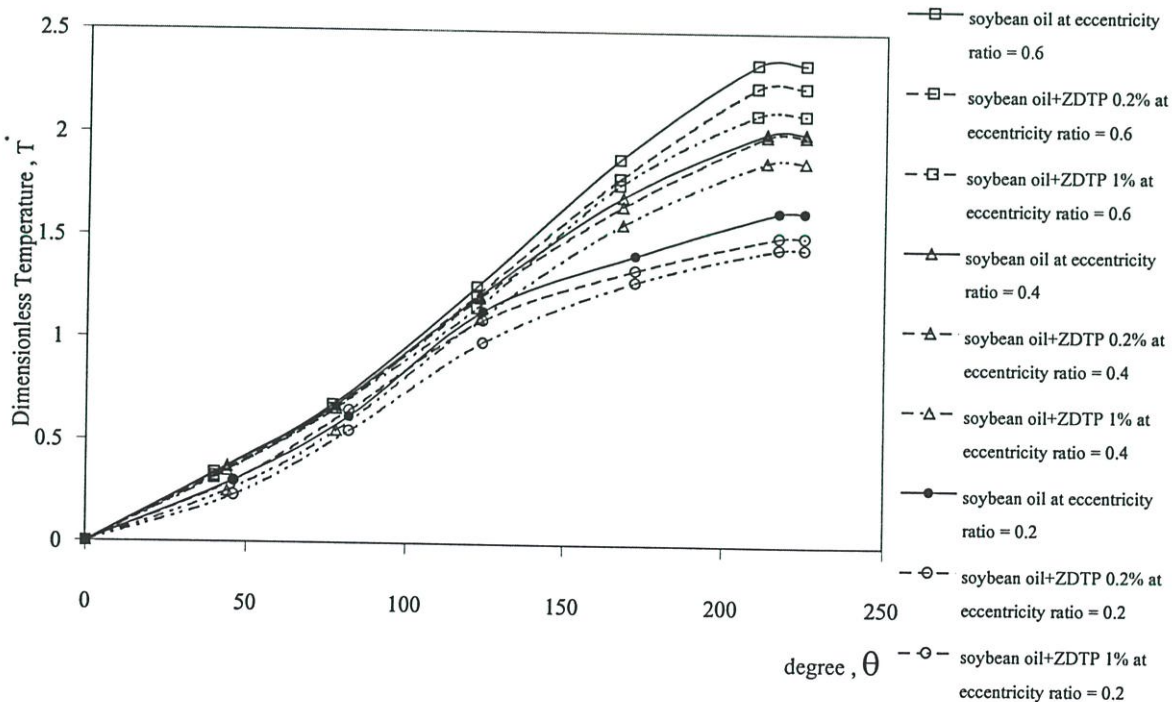
ในรูปที่ 8.16 – 8.18 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับที่มีผลต่อค่าการกระจายอุณหภูมิในรูปไร้มิติ (Dimensionless Temperature,  $T$ ) ระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ค่า  $L/D = 1$  ที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.2, 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันปาล์ม ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ



รูปที่ 8.19 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลที่เกิดขึ้นจากการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$

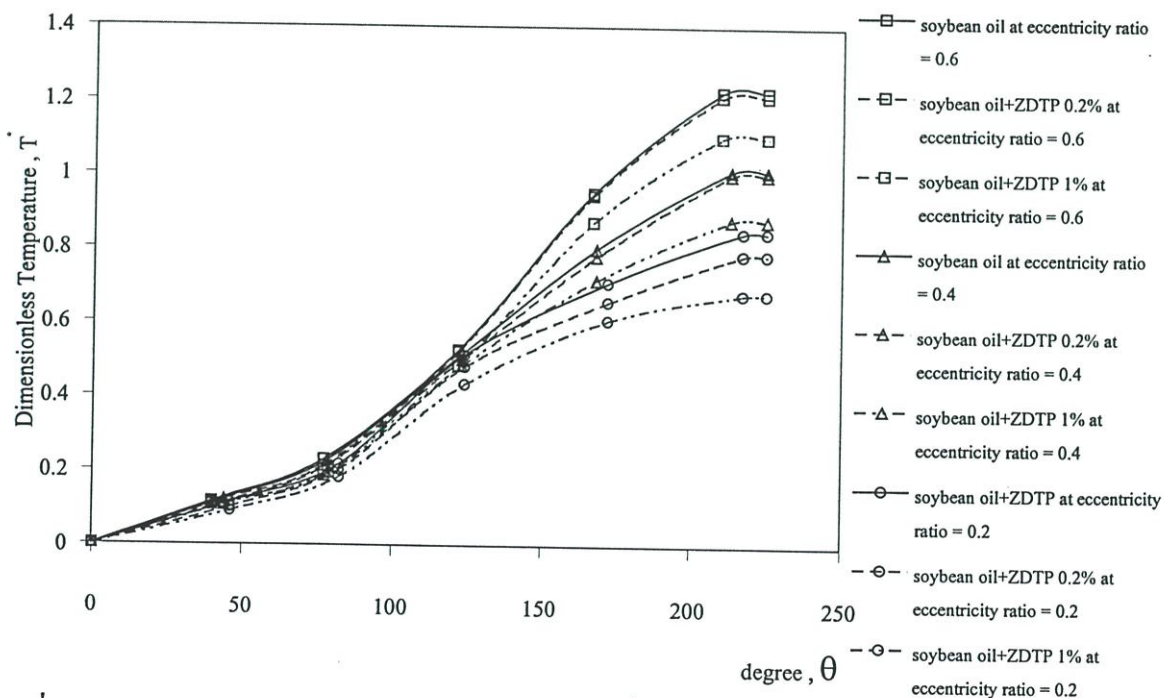


รูปที่ 8.20 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเอียง ศูนย์ของเพลลากับการรองลิ้นของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 0.5

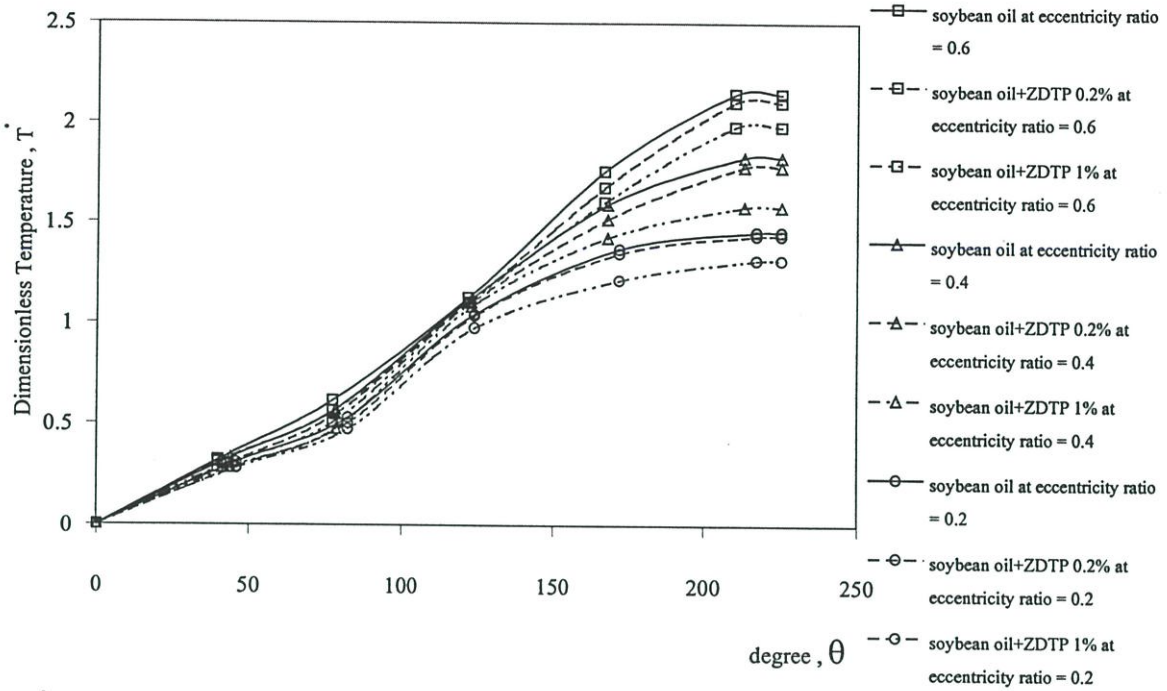


รูปที่ 8.21 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเอียง ศูนย์ของเพลลากับการรองลิ้นของ น้ำมันถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 0.5

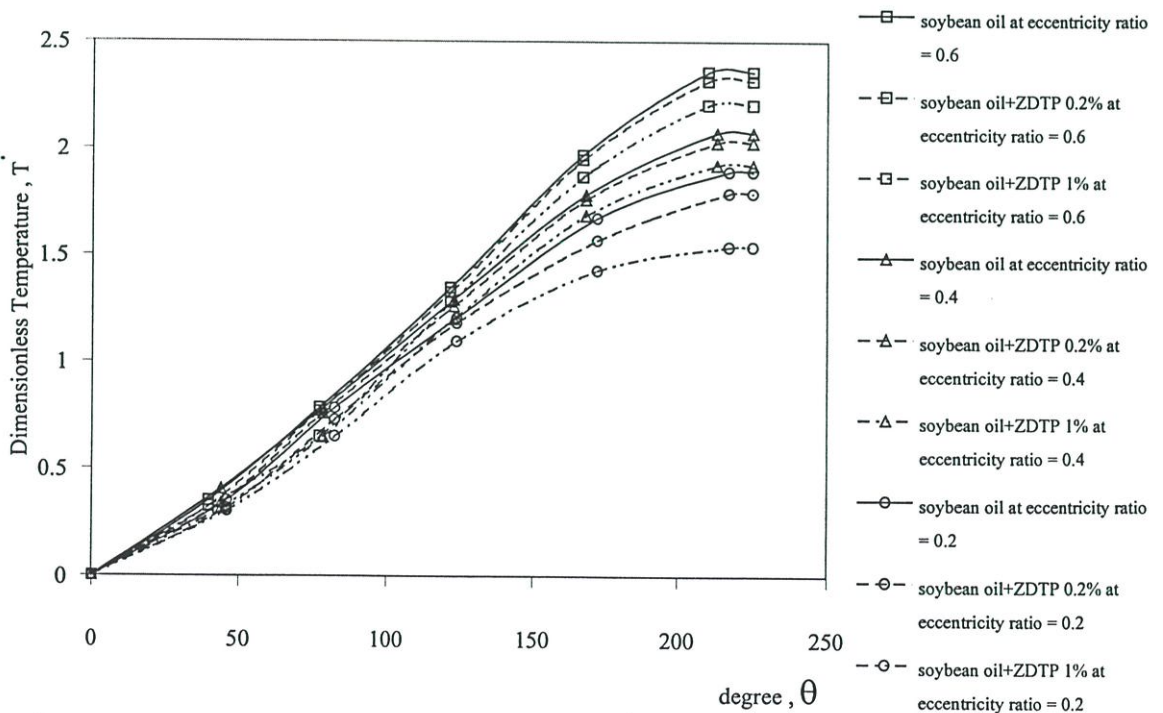
ในรูปที่ 8.19 – 8.21 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับลื่นที่มีผลต่อค่าการกระจายอุณหภูมิในรูปไร้มิติ (Dimensionless Temperature, T) ระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ค่า  $L/D = 0.5$  ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.2, 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าที่ อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ



รูปที่ 8.22 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลาก่ที่เกิดพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองรับลื่นของ น้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ = 200 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ  $L/D = 0.5$



รูปที่ 8.23 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเอียง ศูนย์ของเพลลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ = 600 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 0.5



รูปที่ 8.24 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของเพลลาที่เกิดพฤติกรรมการเอียง ศูนย์ของเพลลากับการรองรับของ น้ำมันปาล์มที่ความเร็วรอบ = 800 rpm ค่าเคลียร์เรนซ์ = 0.1 mm และ L/D = 0.5

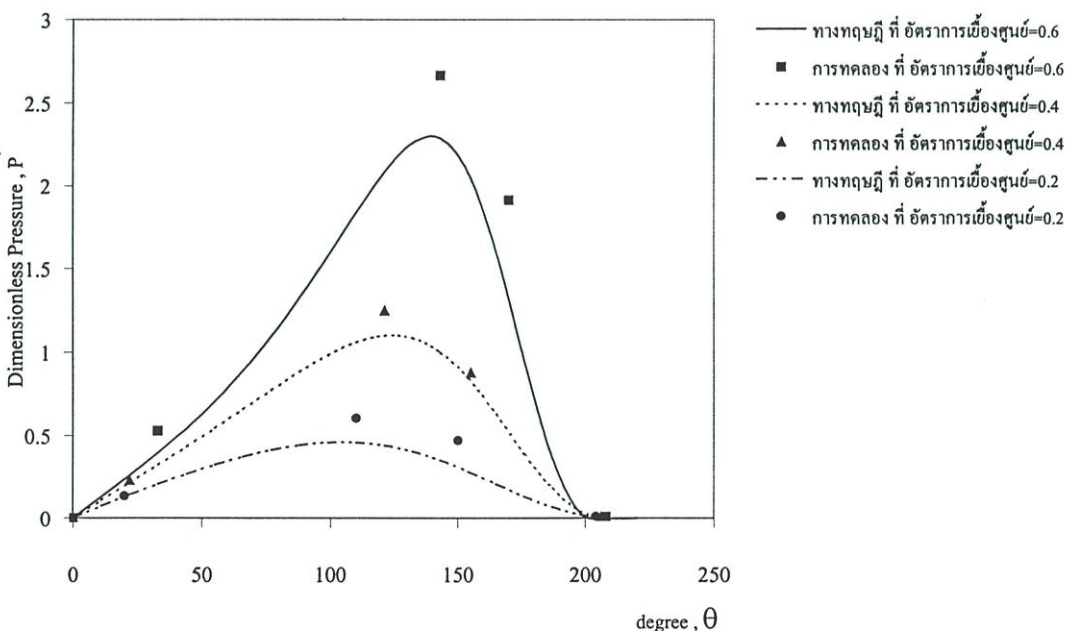
ในรูปที่ 8.22 – 8.24 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรองลื่นที่มีผลต่อค่าการกระจายอุณหภูมิในรูปไร้มิติ (Dimensionless Temperature, T) ระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% โดยน้ำหนัก ค่า  $L/D = 0.5$  ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.2 , 0.4 และ 0.6 พบว่าที่ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นระหว่างน้ำมันปาล์ม กับน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และ 1% พบว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 1% จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าน้ำมันปาล์มที่ผสม ZDTP 0.2% และน้ำมันปาล์ม ที่ไม่ผสมสารเพิ่มคุณภาพ

## บทที่ 9

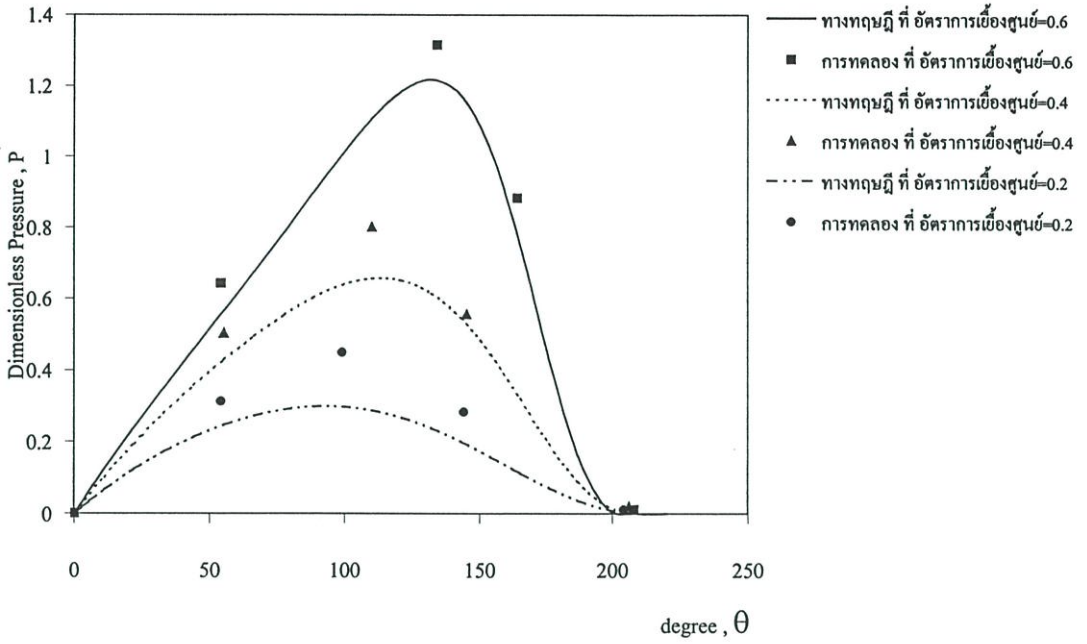
# เปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

### 9.1 การกระจายความดันในฟิล์มน้ำมัน (Dimensionless pressure)

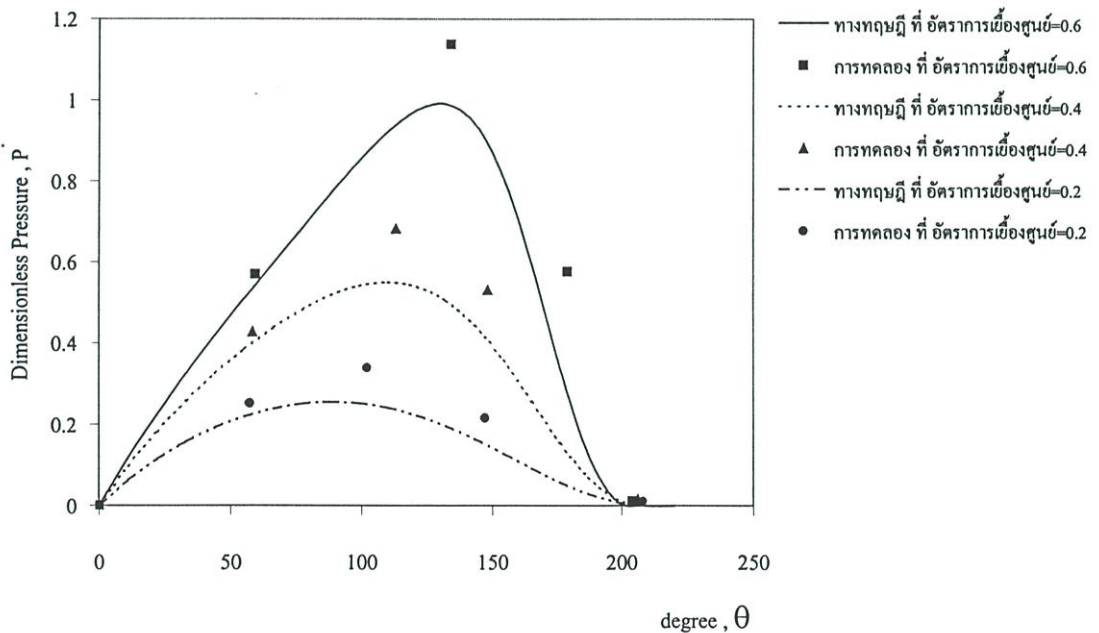
ในรูปที่ 9.1-9.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจายความดันในรูปไร้มิติ (Dimensionless pressure) ของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น มีค่า  $L/D=1$  ผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจะเห็นว่าค่าการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เพราะว่าค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการคำนวณกำหนดให้เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่กระจายอยู่ในชั้นฟิล์มน้ำมันซึ่งจะได้อุณหภูมิที่สูงที่สุดเป็นผลให้ค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดต่ำลงไปตามทฤษฎี แต่ในการทดลองจริงไม่สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ฟิล์มน้ำมันให้สูงที่สุดตามทฤษฎีได้ จึงทำให้ค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าการกระจายความดันในชั้นฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการคำนวณและการทดลองก็มีลักษณะที่สอดคล้องกัน



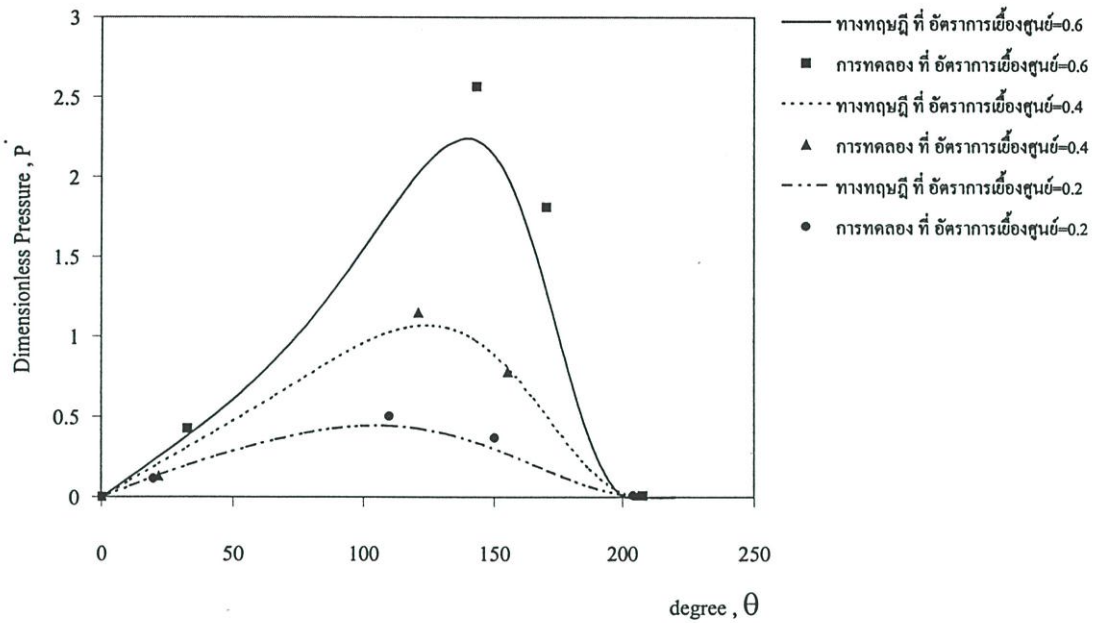
รูปที่ 9.1 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



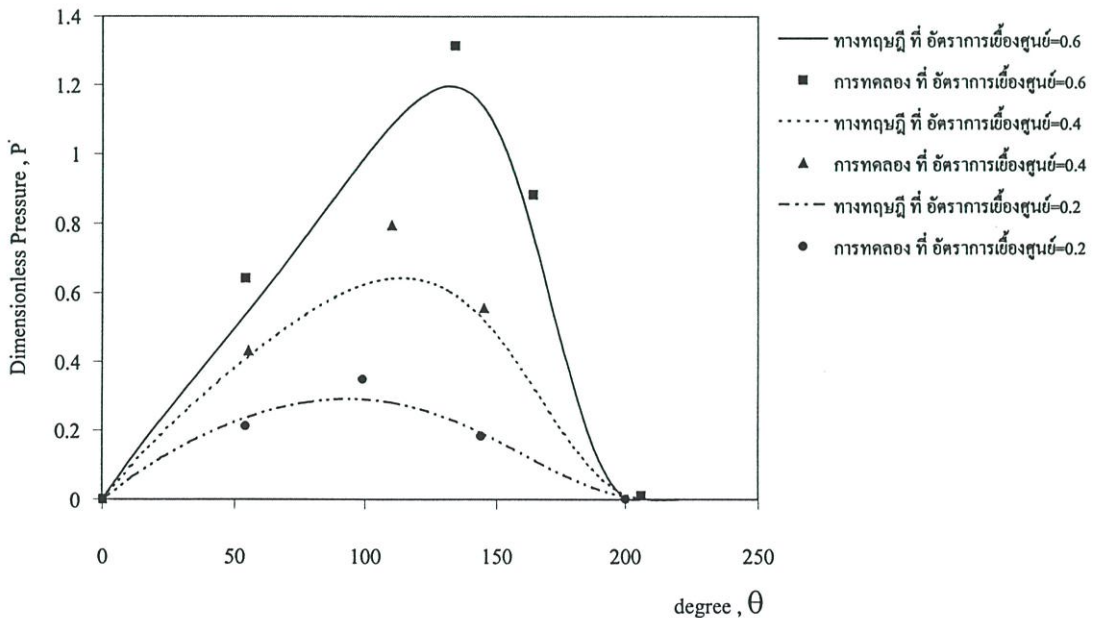
รูปที่ 9.2 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



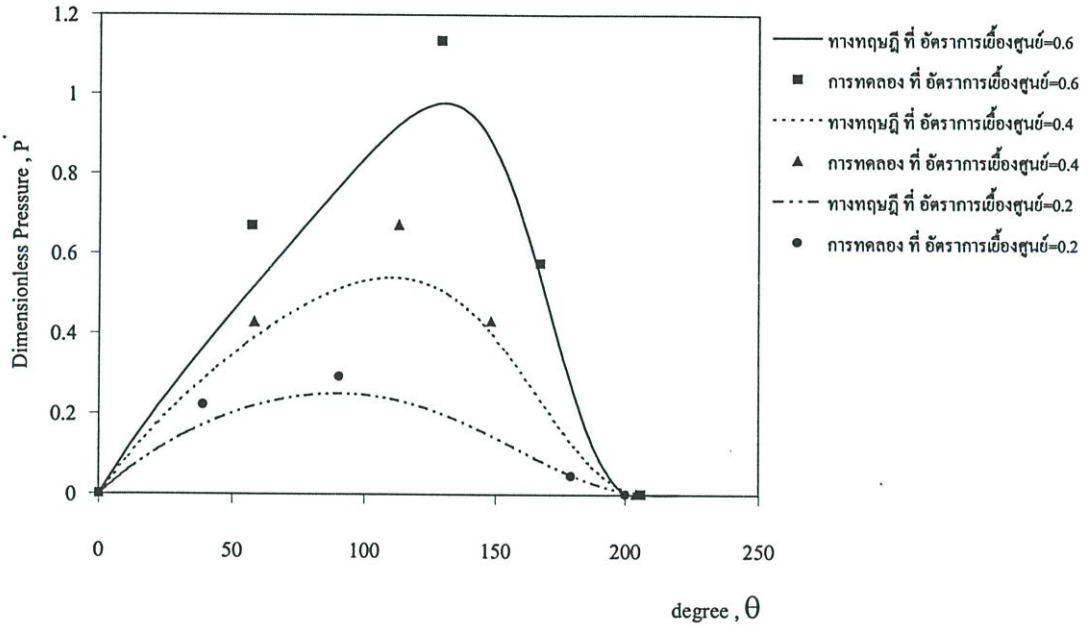
รูปที่ 9.3 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



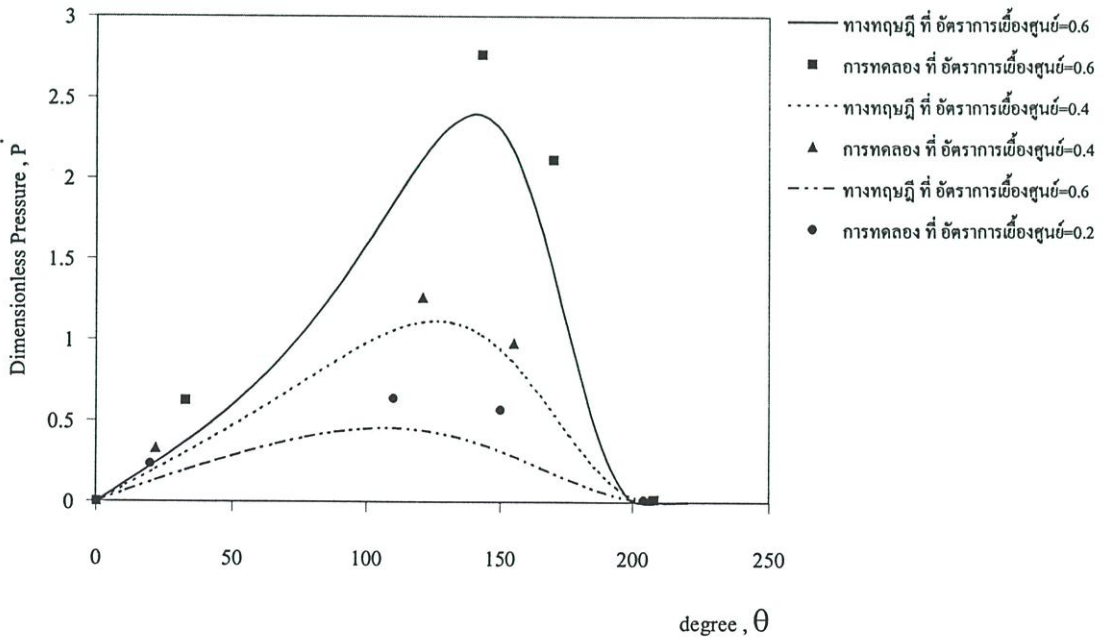
รูปที่ 9.4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200$  rpm. และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2 %



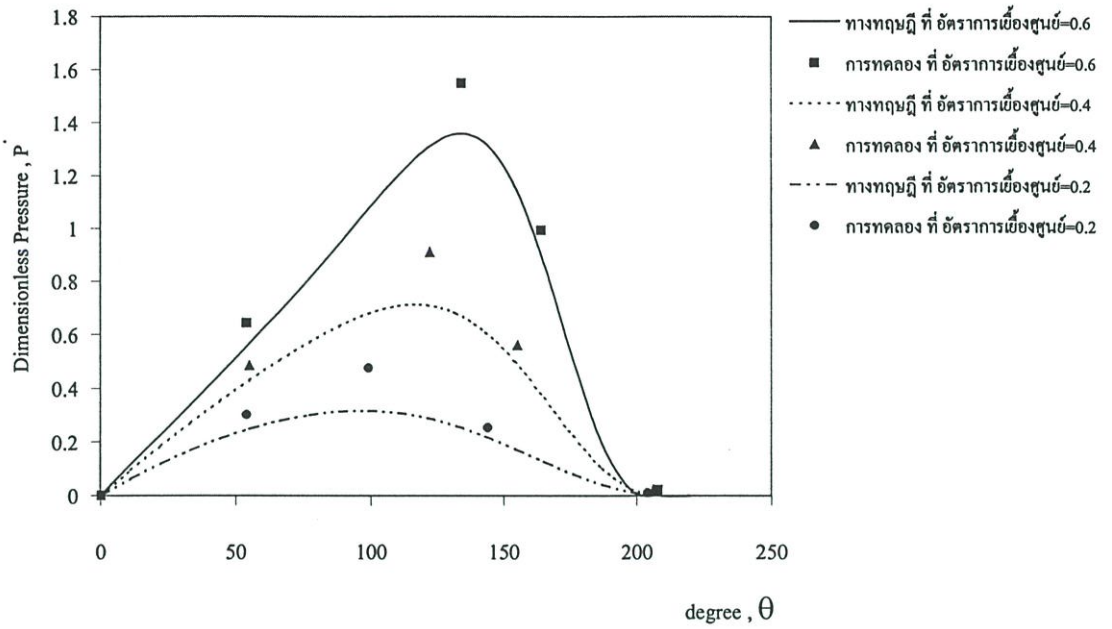
รูปที่ 9.5 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600$  rpm. และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2 %



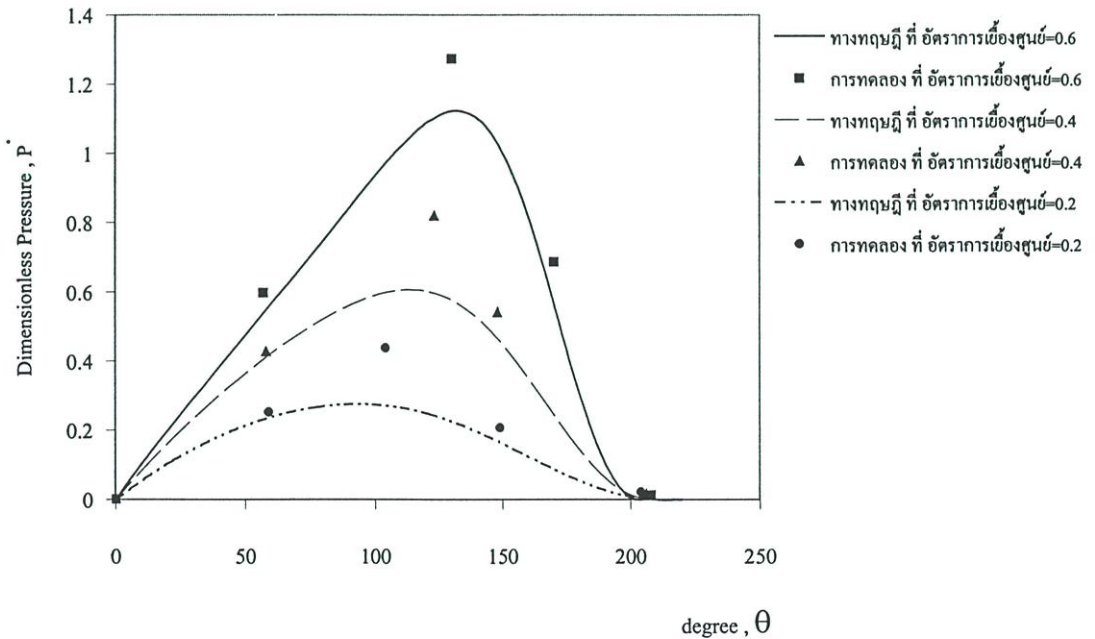
รูปที่ 9.6 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2 %



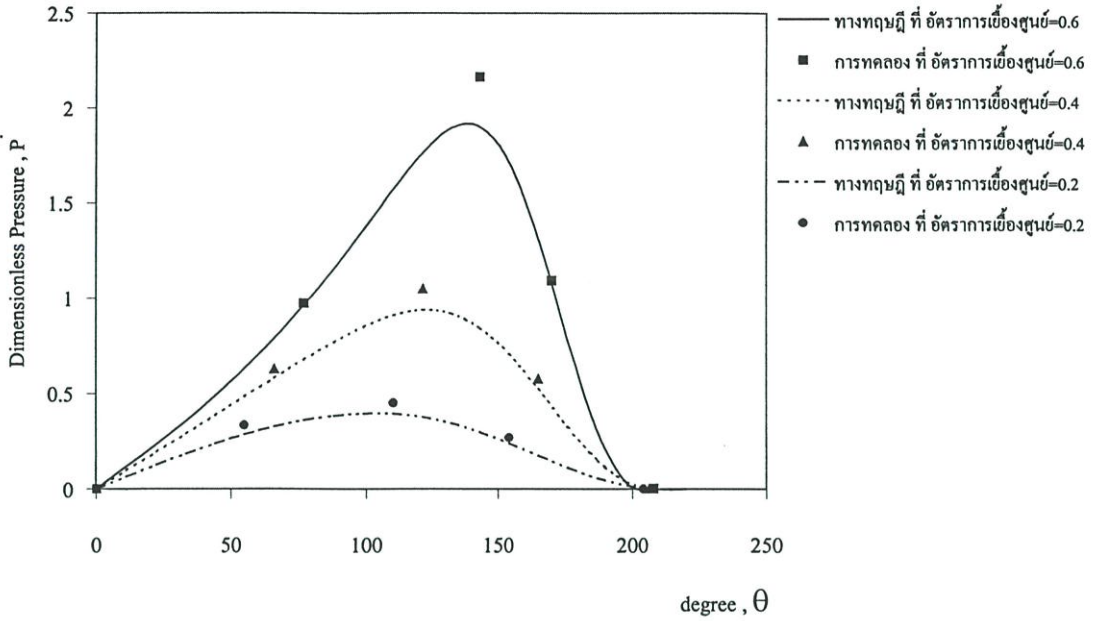
รูปที่ 9.7 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1 %



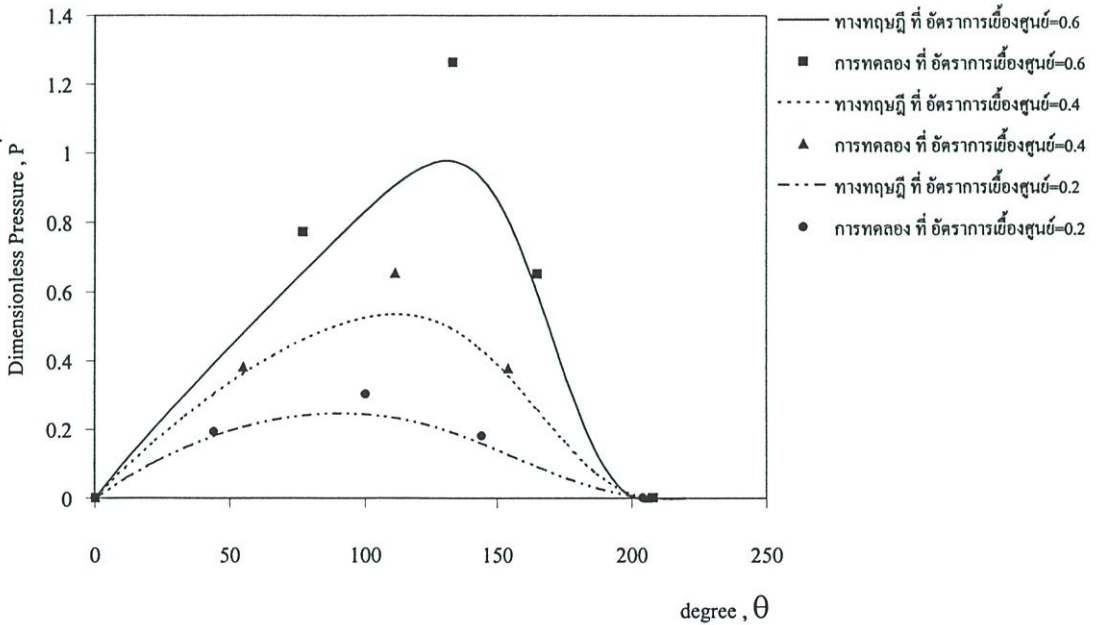
รูปที่ 9.8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600$  rpm. และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1 %



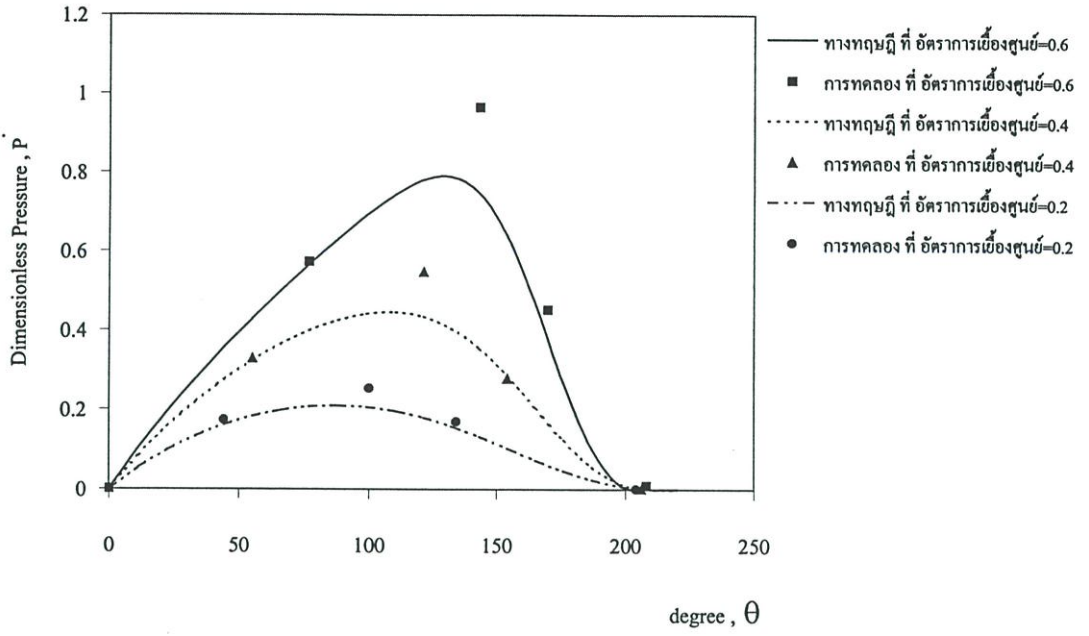
รูปที่ 9.9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800$  rpm. และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1 %



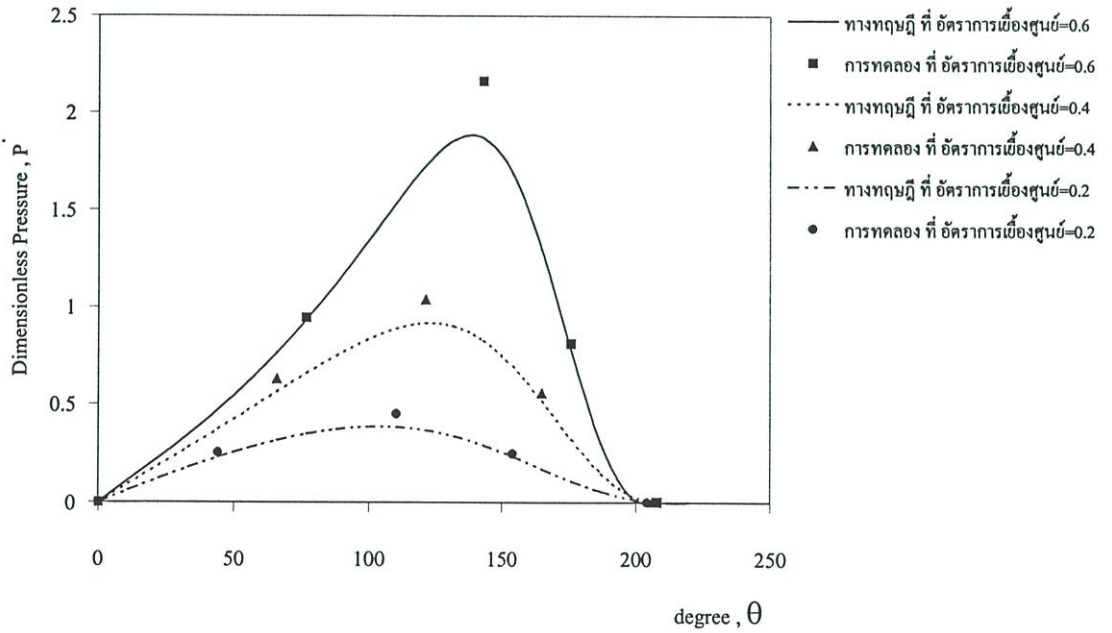
รูปที่ 9.10 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



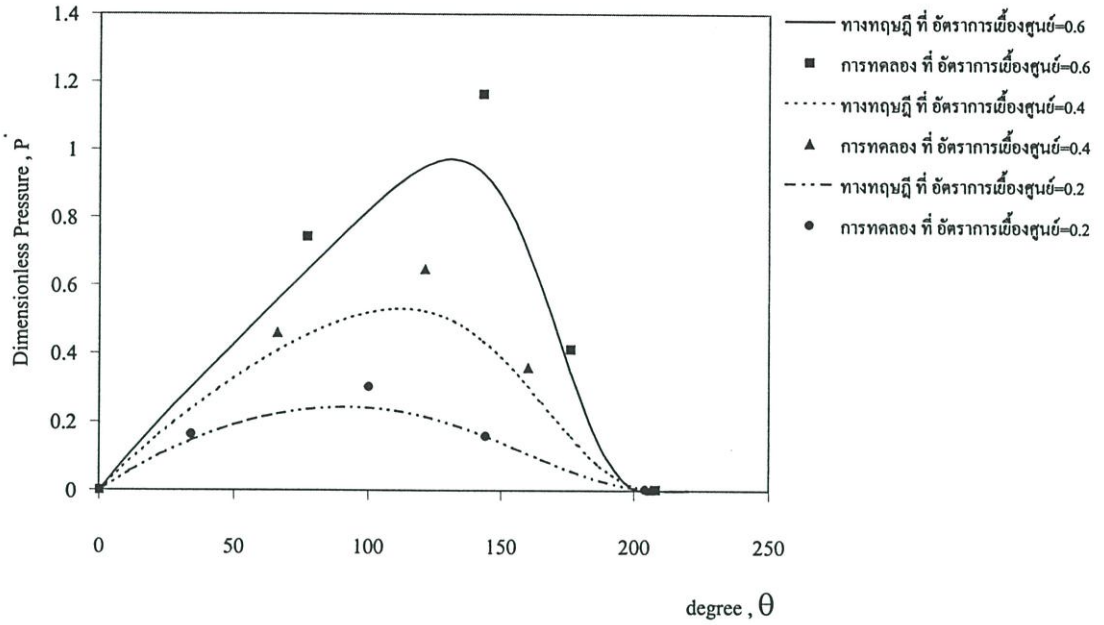
รูปที่ 9.11 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



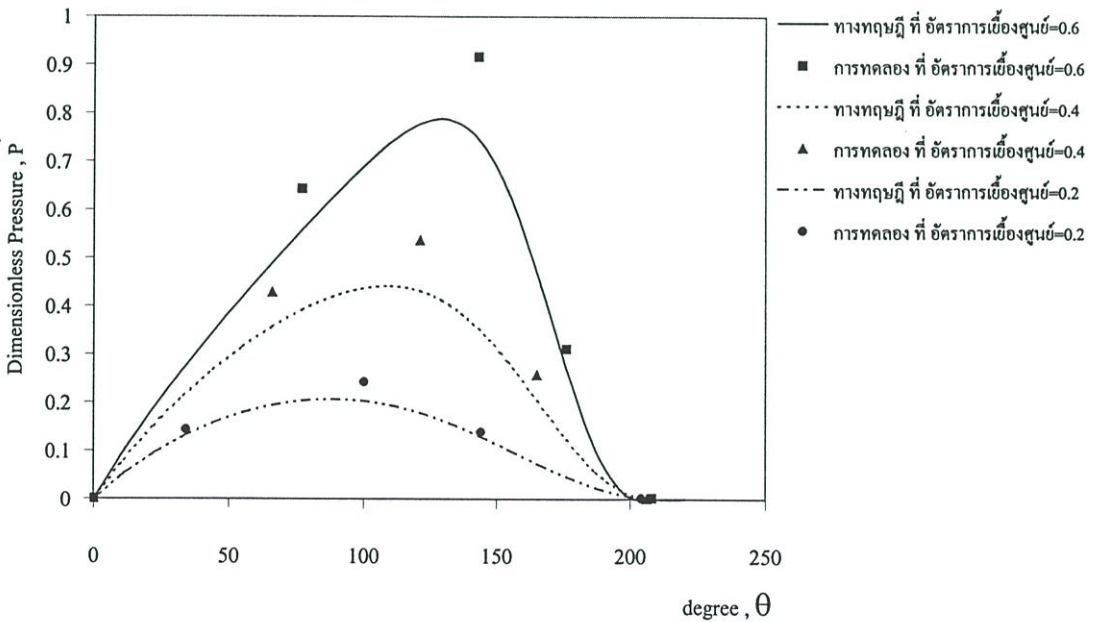
รูปที่ 9.12 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



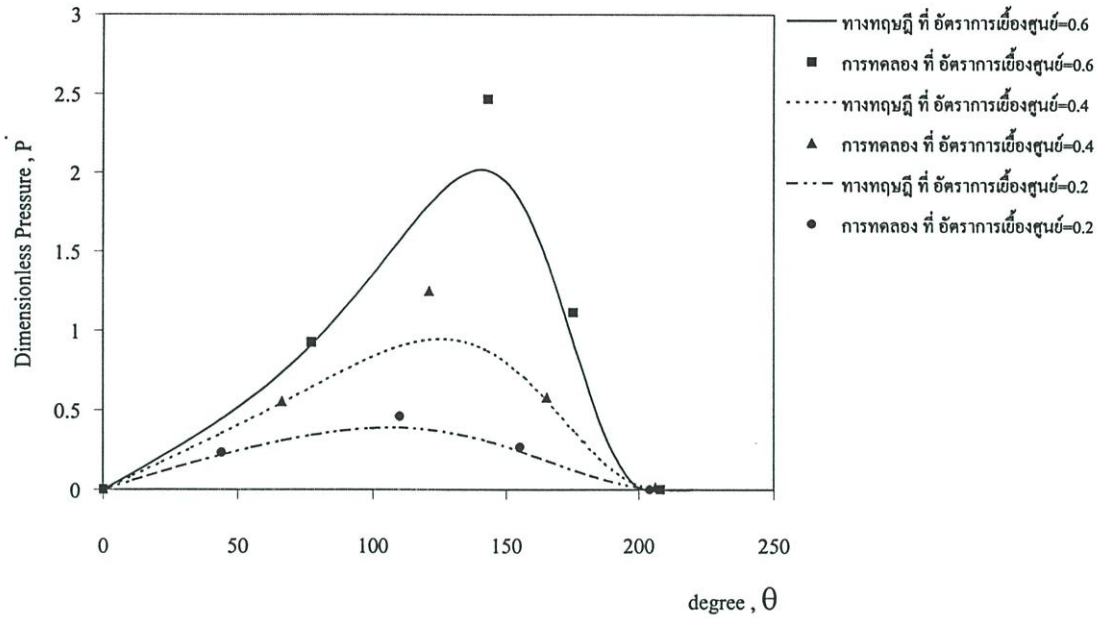
รูปที่ 9.13 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



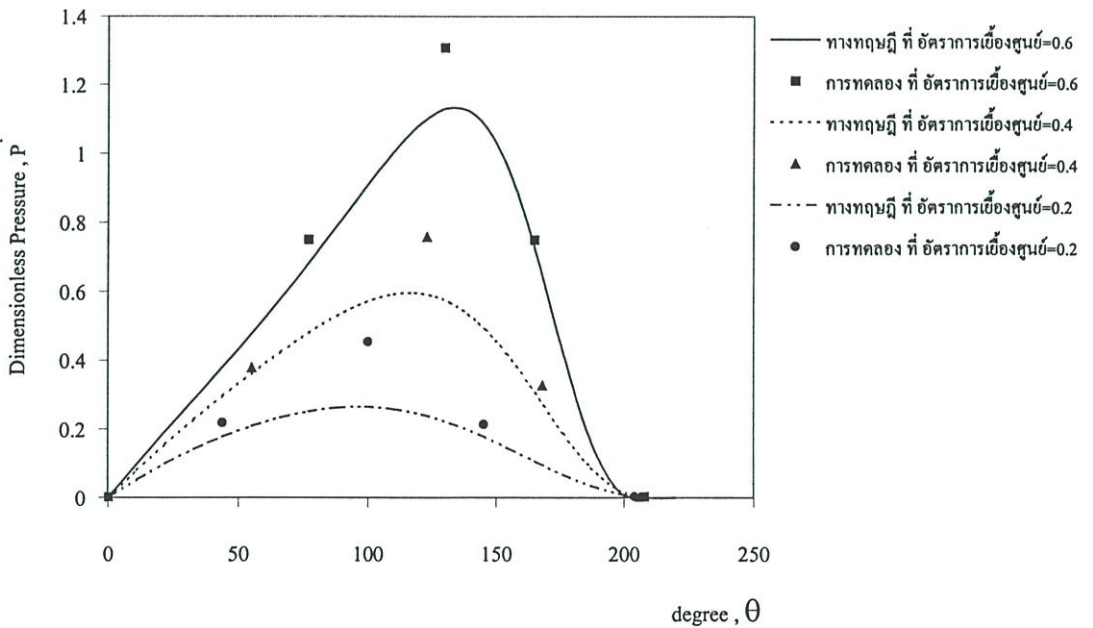
รูปที่ 9.14 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



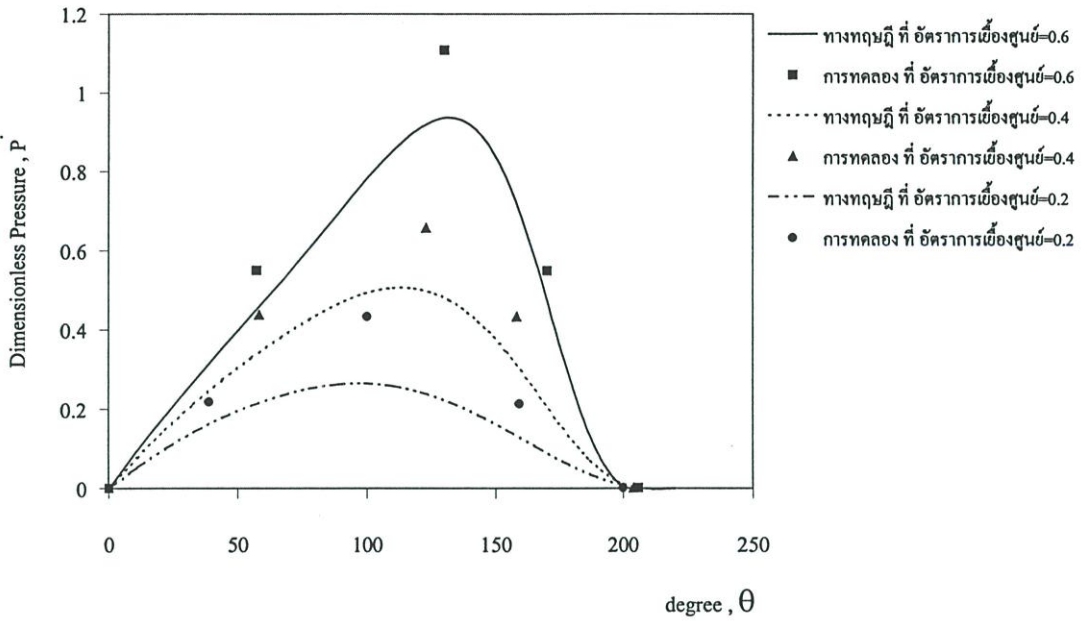
รูปที่ 9.15 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



รูปที่ 9.16 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

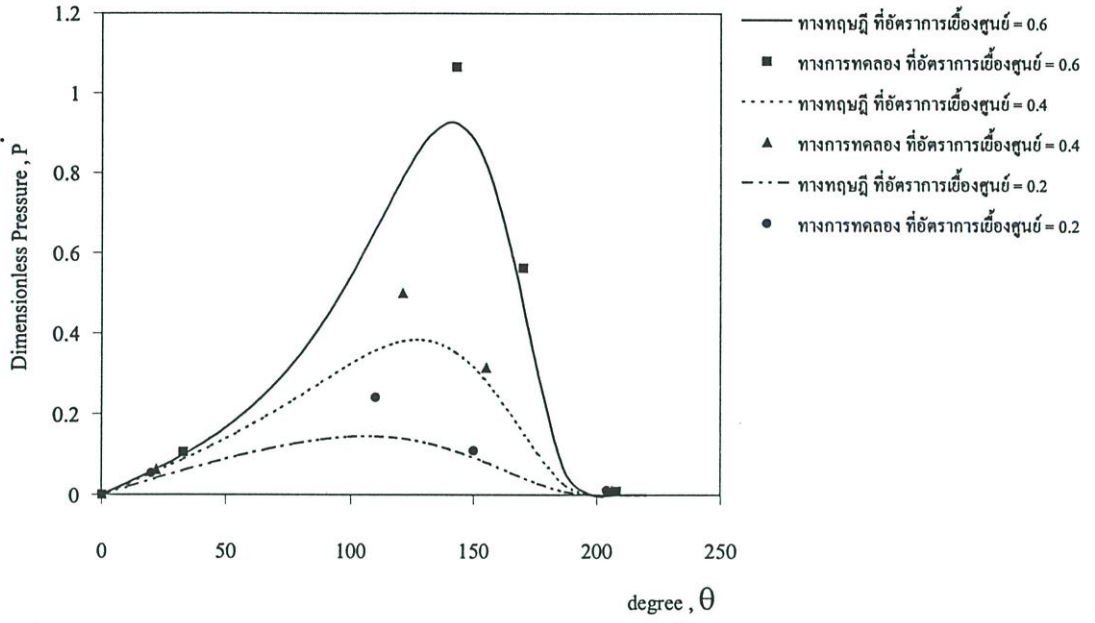


รูปที่ 9.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

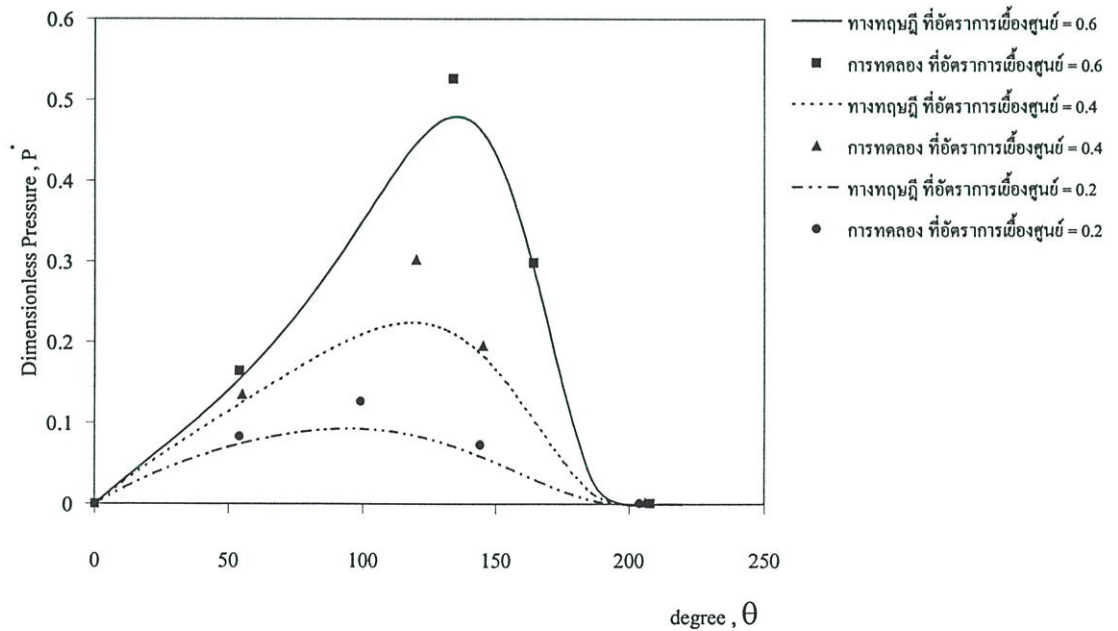


รูปที่ 9.18 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$  และ  $L/D = 1$ . ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

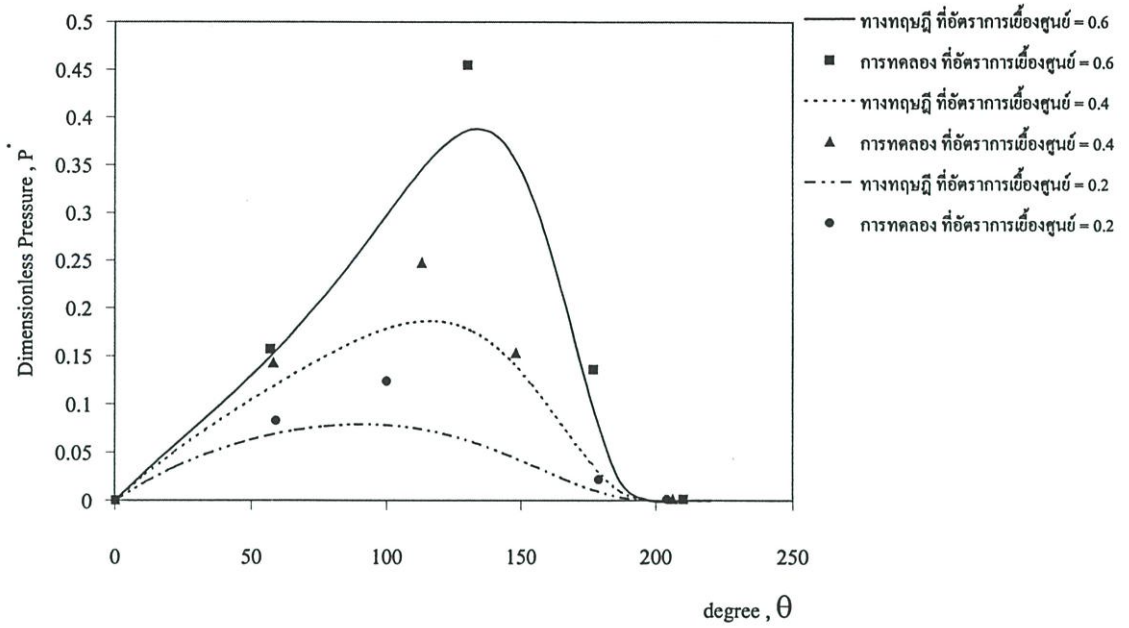
ในรูปที่ 9.19-9.36 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจายความดันในรูปไร้มิติ (Dimensionless pressure) ของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น มีค่า  $L/D=0.5$  ผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจะเห็นว่าค่าการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เพราะว่าค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการคำนวณกำหนดให้เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่กระจายอยู่ในชั้นฟิล์มน้ำมันซึ่งจะได้อุณหภูมิที่สูงที่สุดเป็นผลให้ค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลดต่ำลงไปตามทฤษฎี แต่ในการทดลองจริงไม่สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ฟิล์มน้ำมันให้สูงที่สุดตามทฤษฎีได้ จึงทำให้ค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าการกระจายความดันในชั้นฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการคำนวณและการทดลองก็มีลักษณะที่สอดคล้องกัน



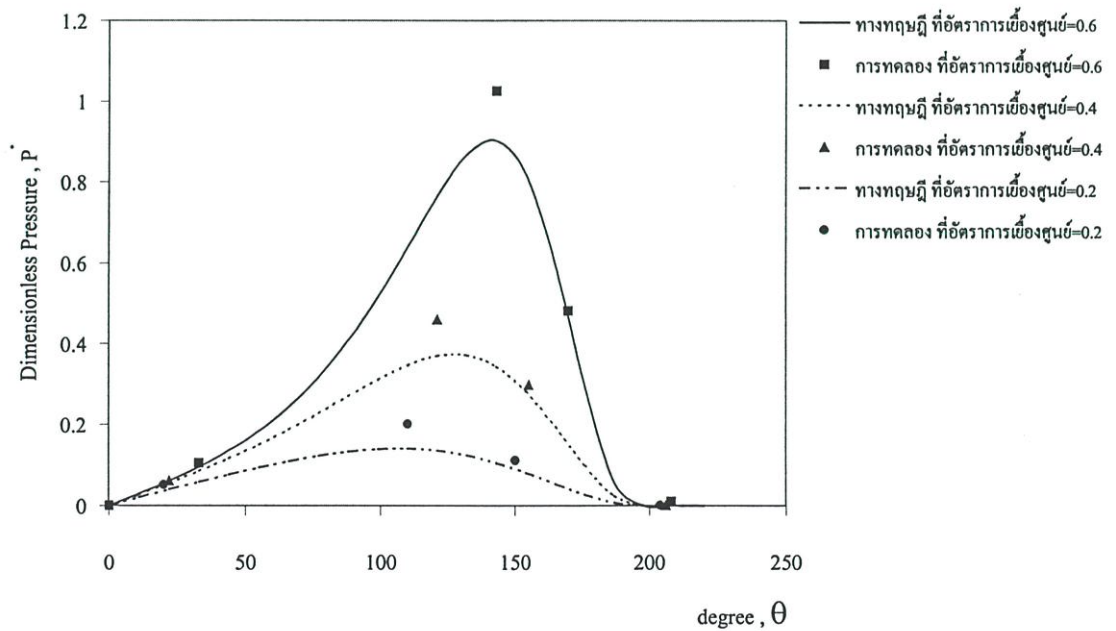
รูปที่ 9.19 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



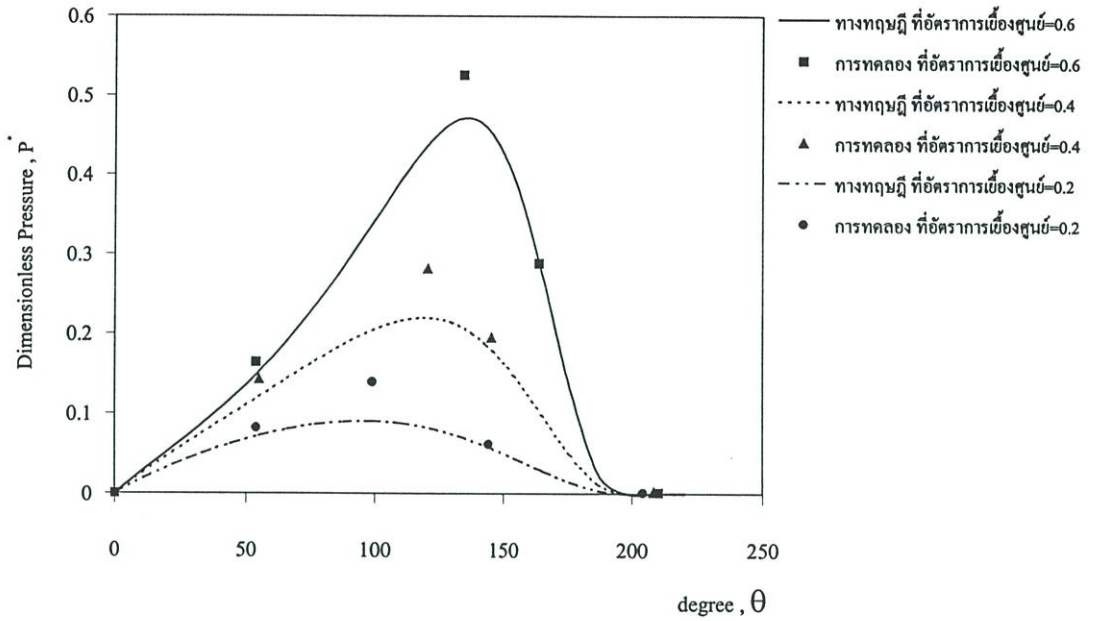
รูปที่ 9.20 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



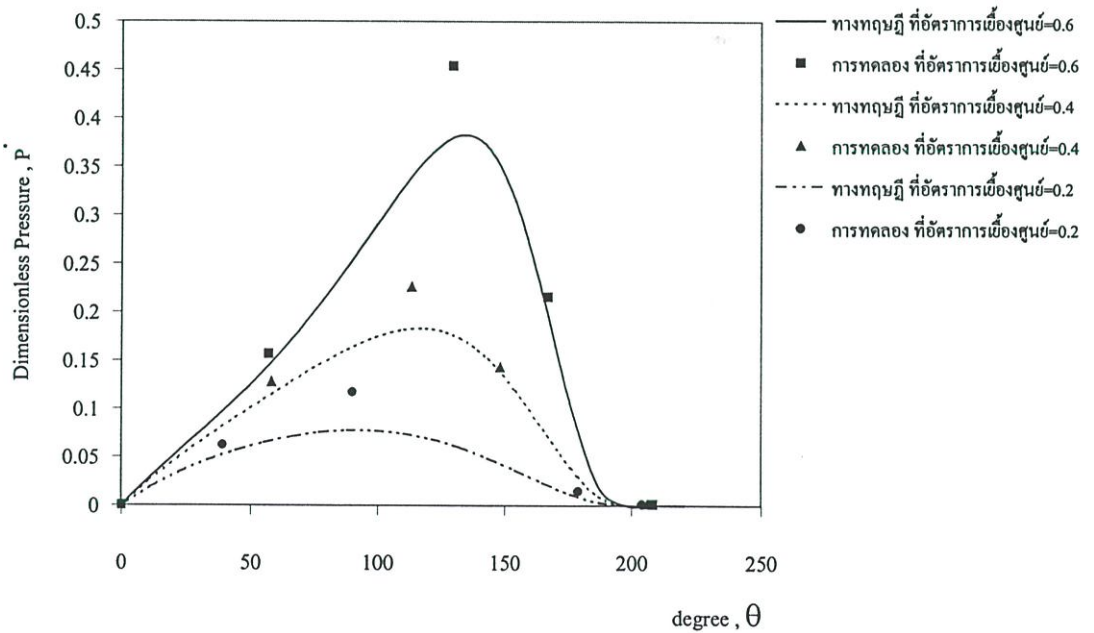
รูปที่ 9.21 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



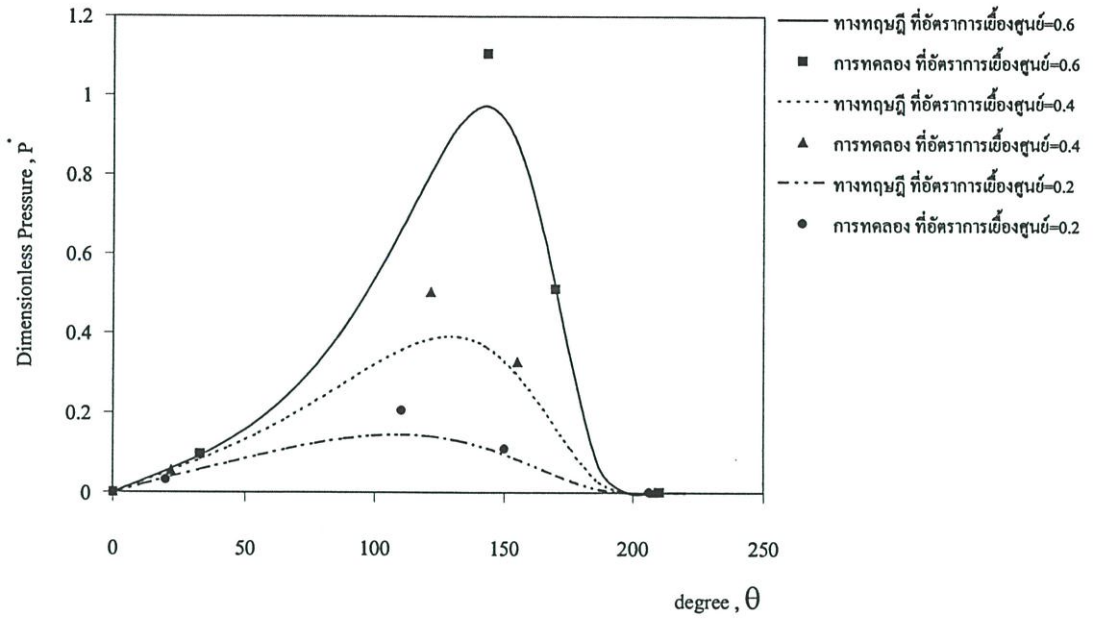
รูปที่ 9.22 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2 %



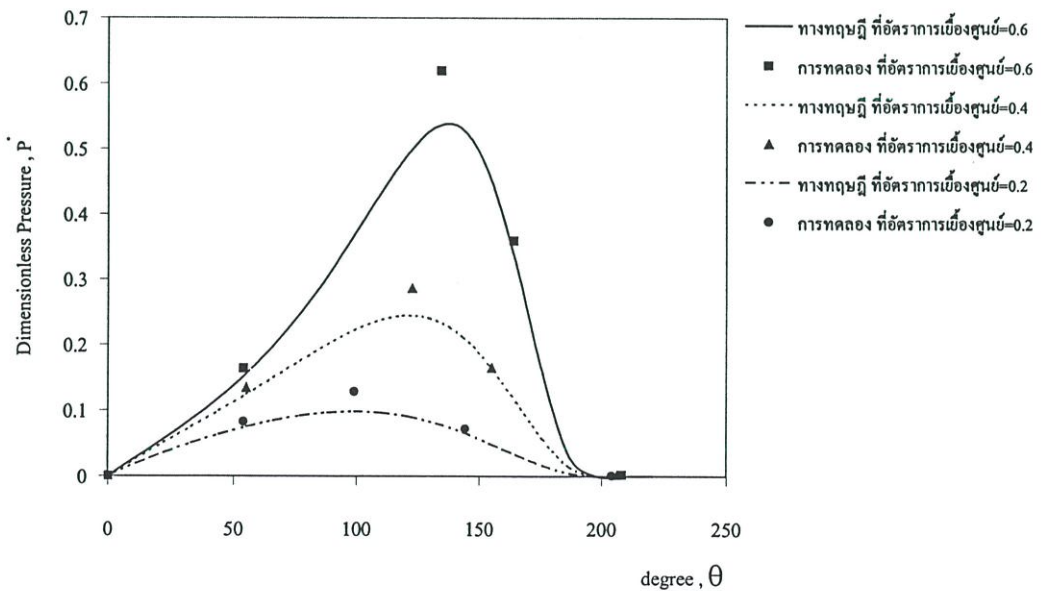
รูปที่ 9.23 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2 %



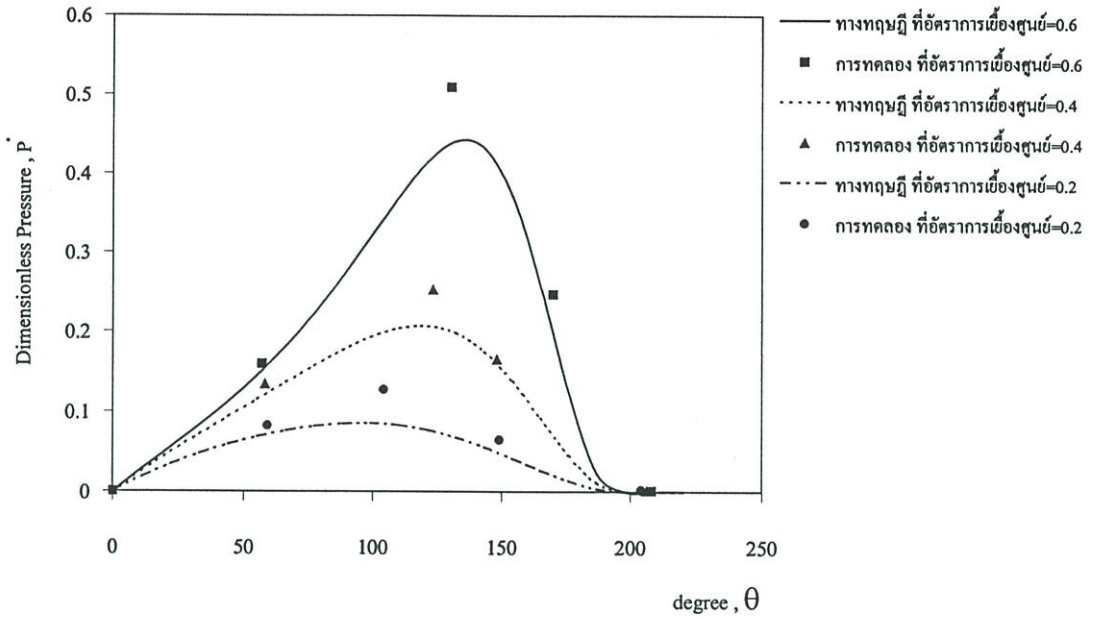
รูปที่ 9.24 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2 %



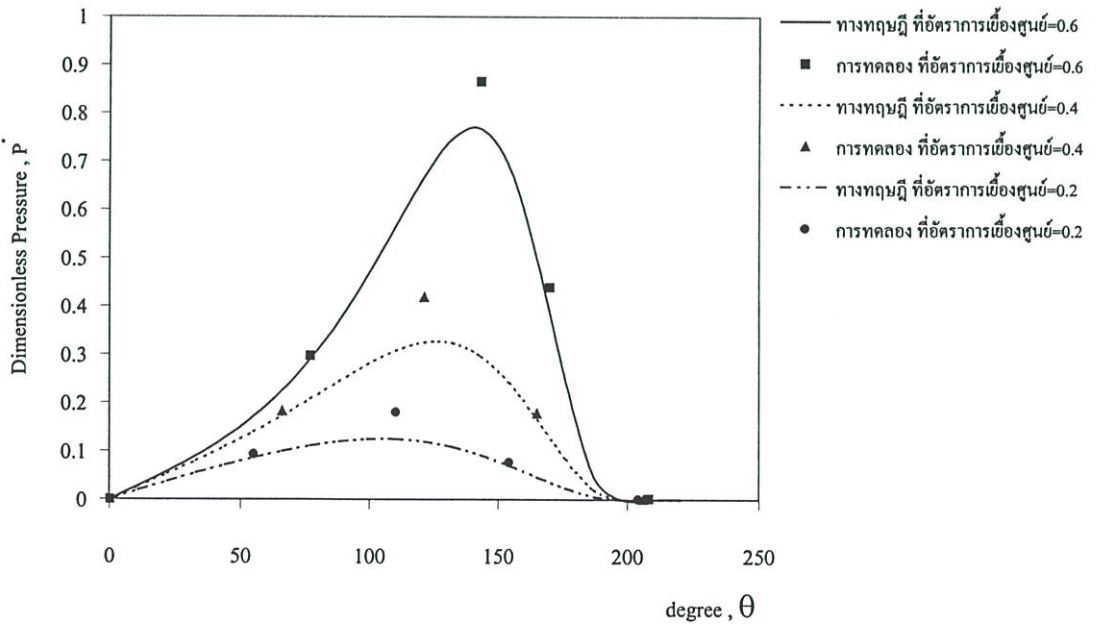
รูปที่ 9.25 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200$  rpm. และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1 %



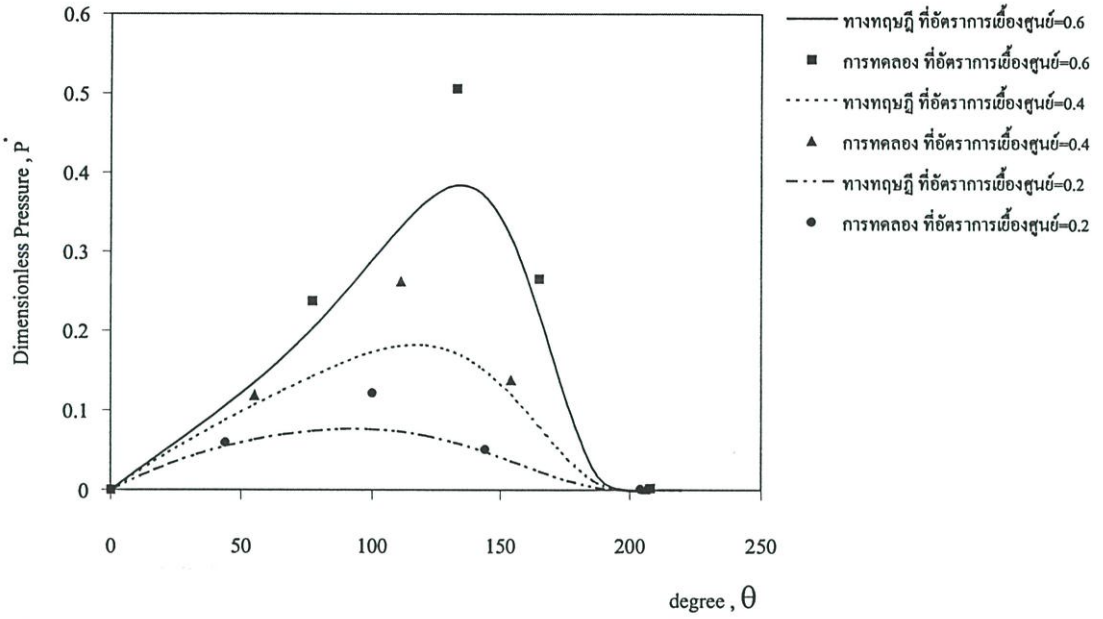
รูปที่ 9.26 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600$  rpm. และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1 %



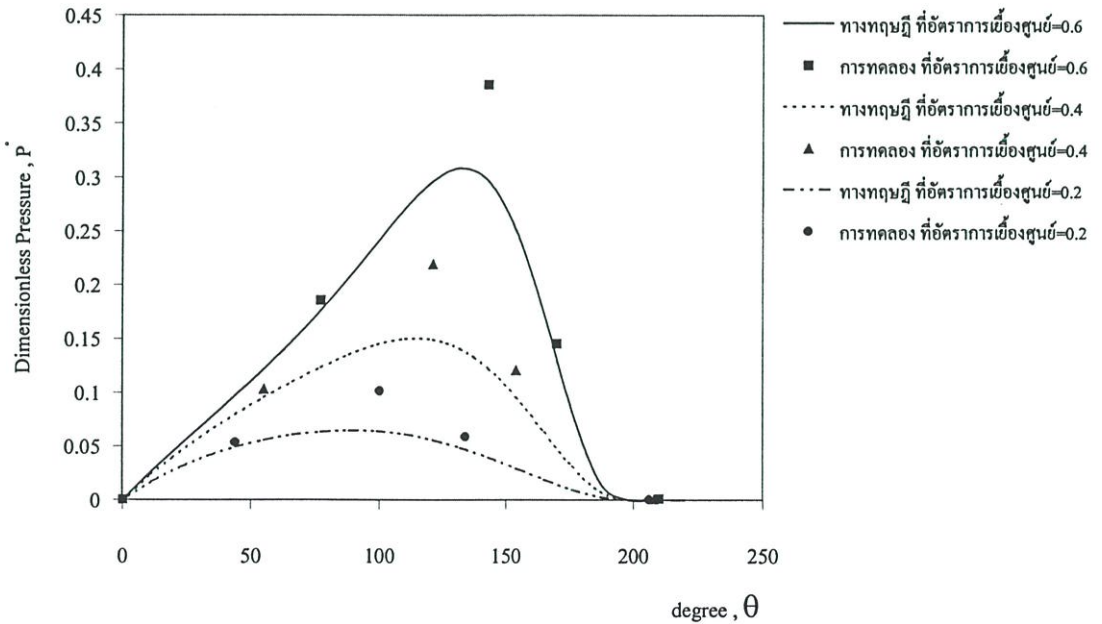
รูปที่ 9.27 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1 %



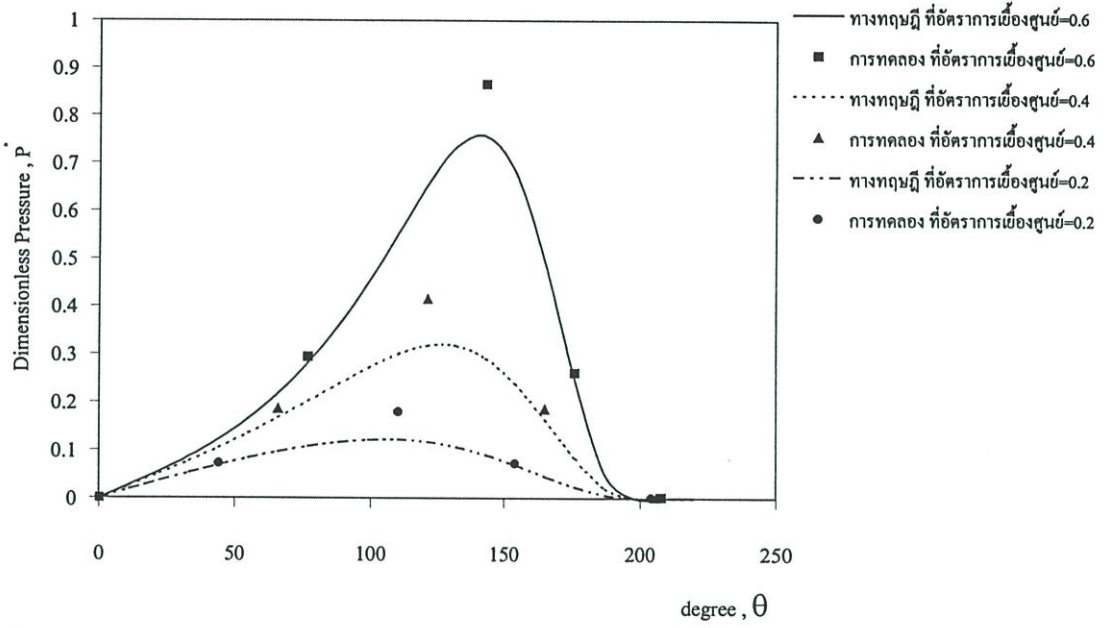
รูปที่ 9.28 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์ม



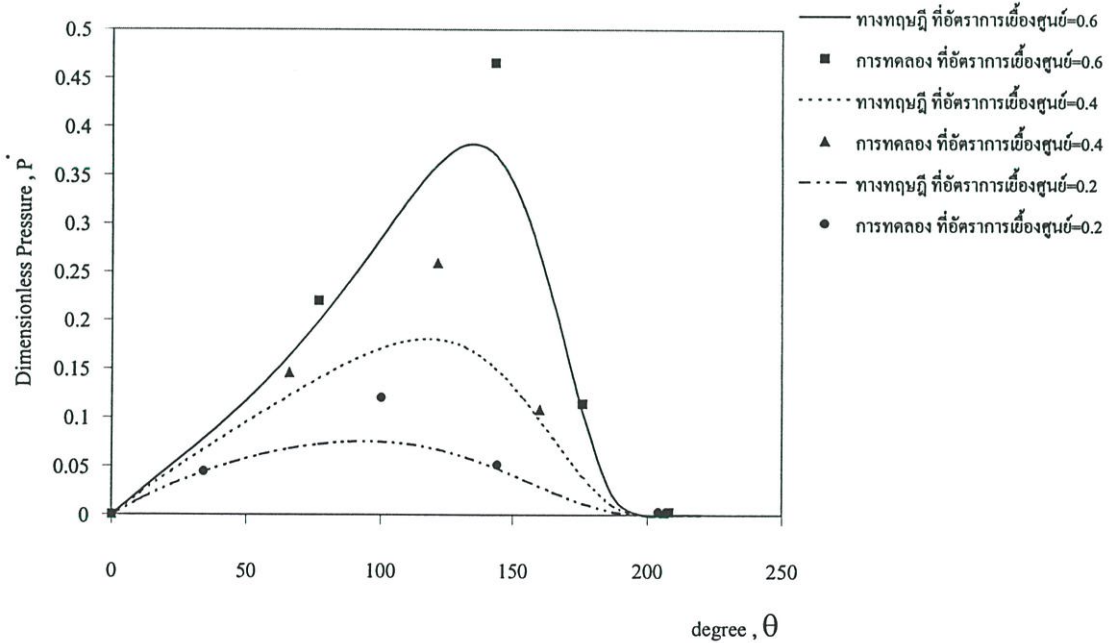
รูปที่ 9.29 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์ม



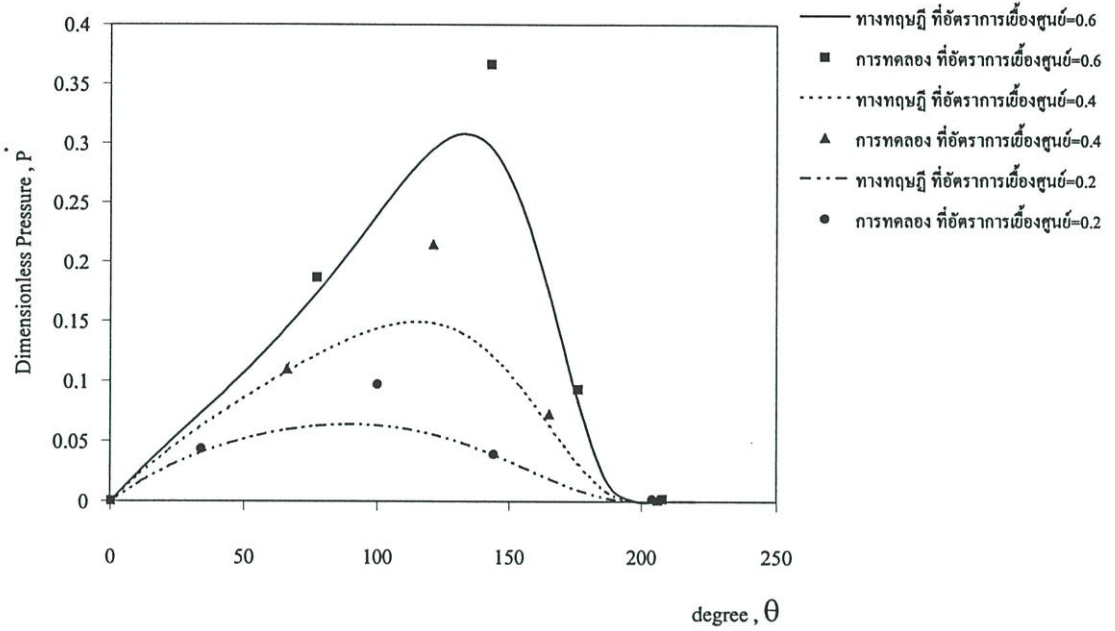
รูปที่ 9.30 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์ม



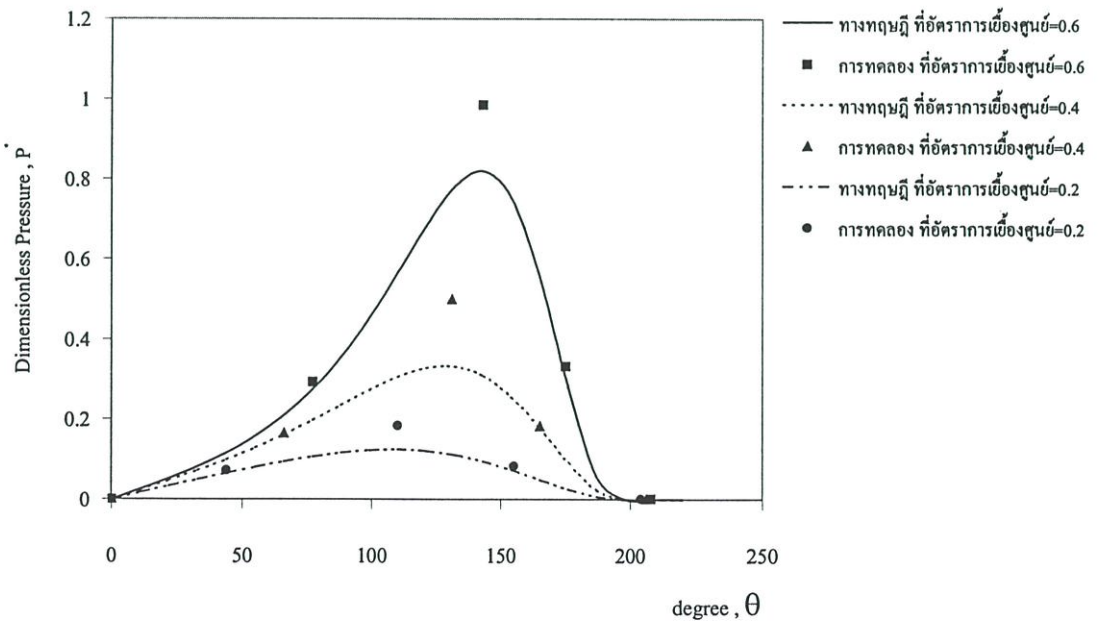
รูปที่ 9.31 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200$  rpm. และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



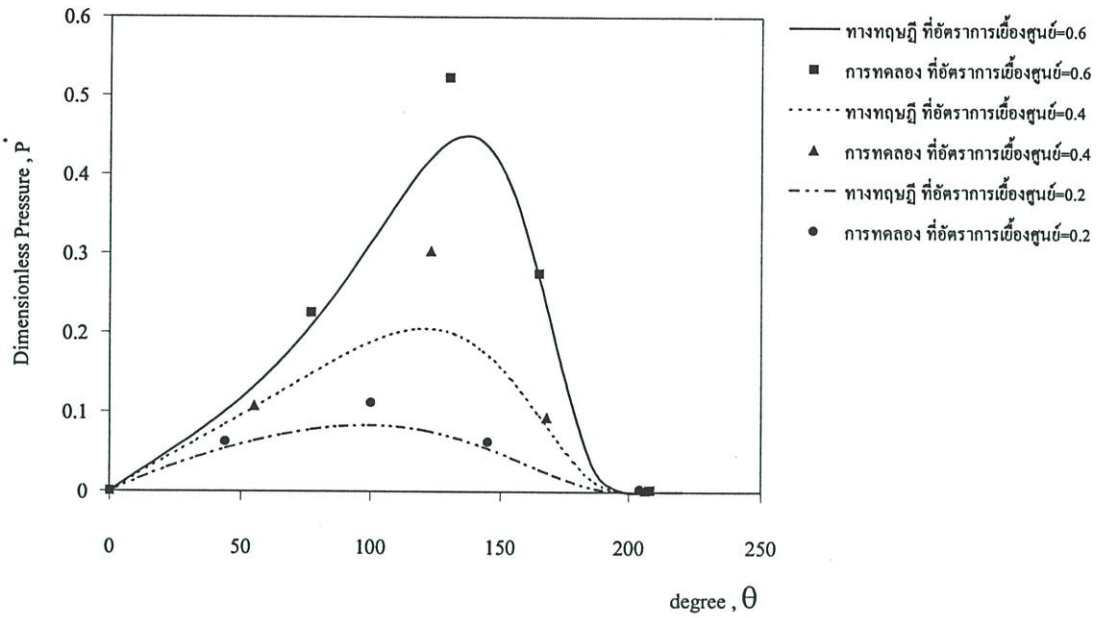
รูปที่ 9.32 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600$  rpm. และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



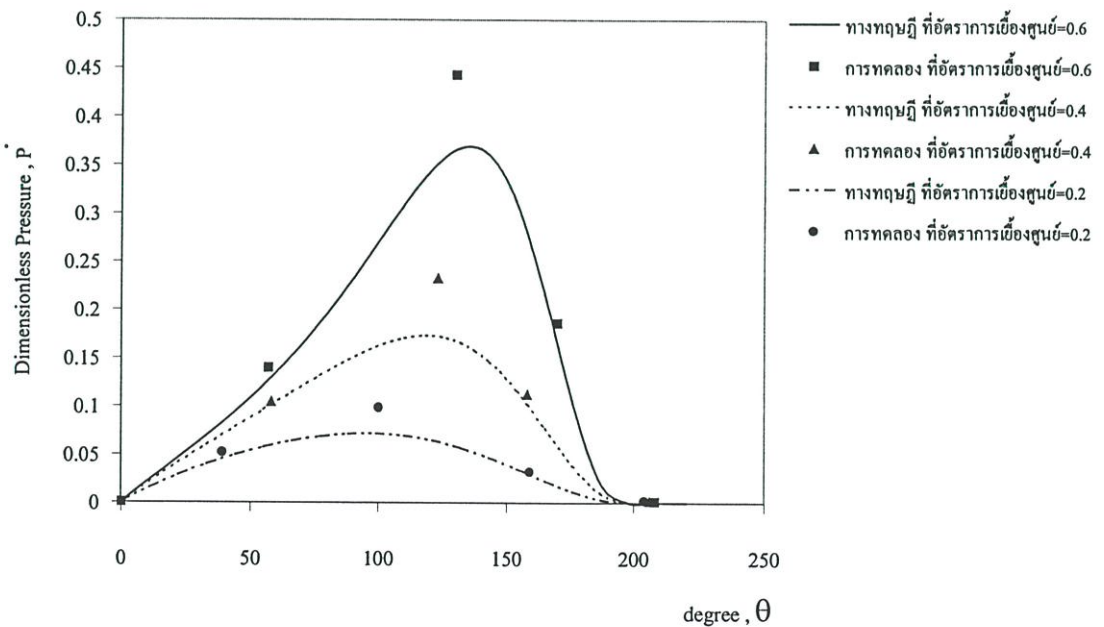
รูปที่ 9.33 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



รูปที่ 9.34 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%



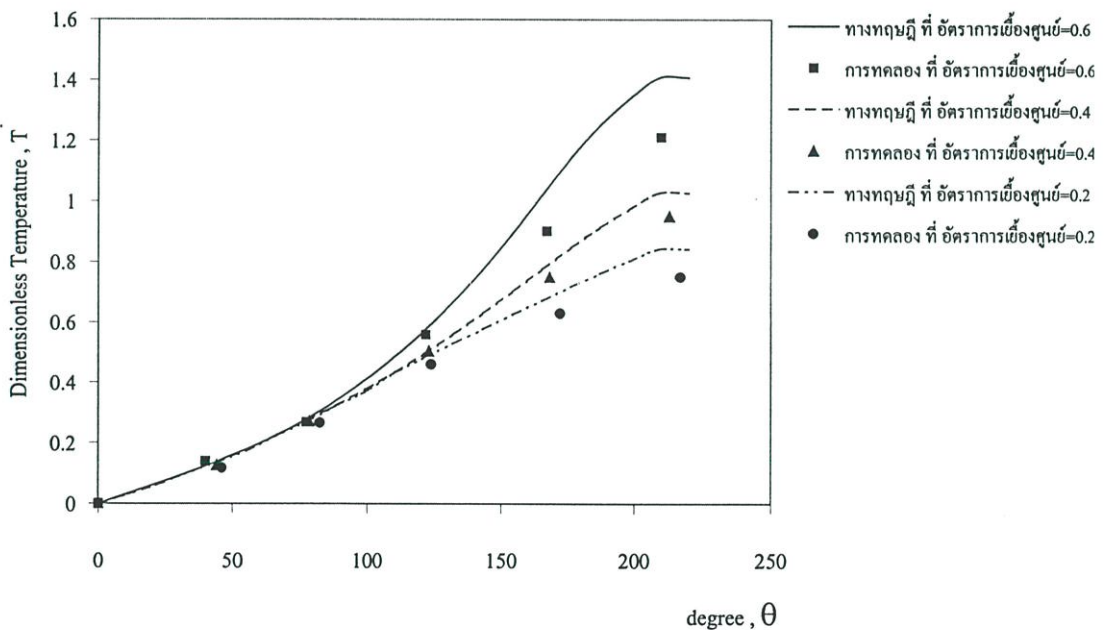
รูปที่ 9.35 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%



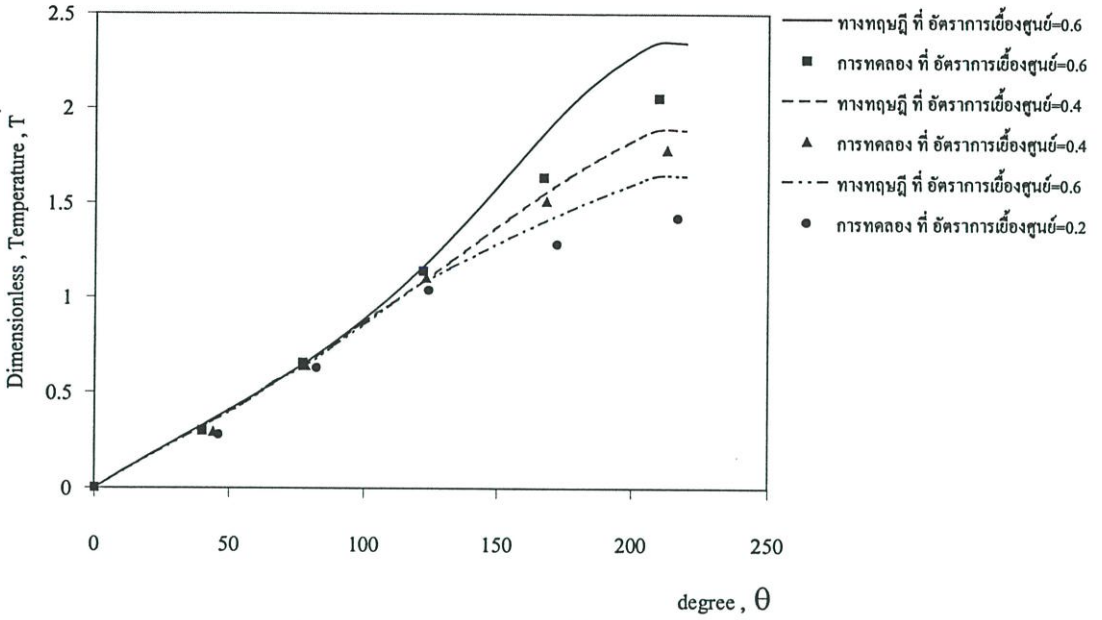
รูปที่ 9.36 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

## 9.2 การกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน (Dimensionless temperature)

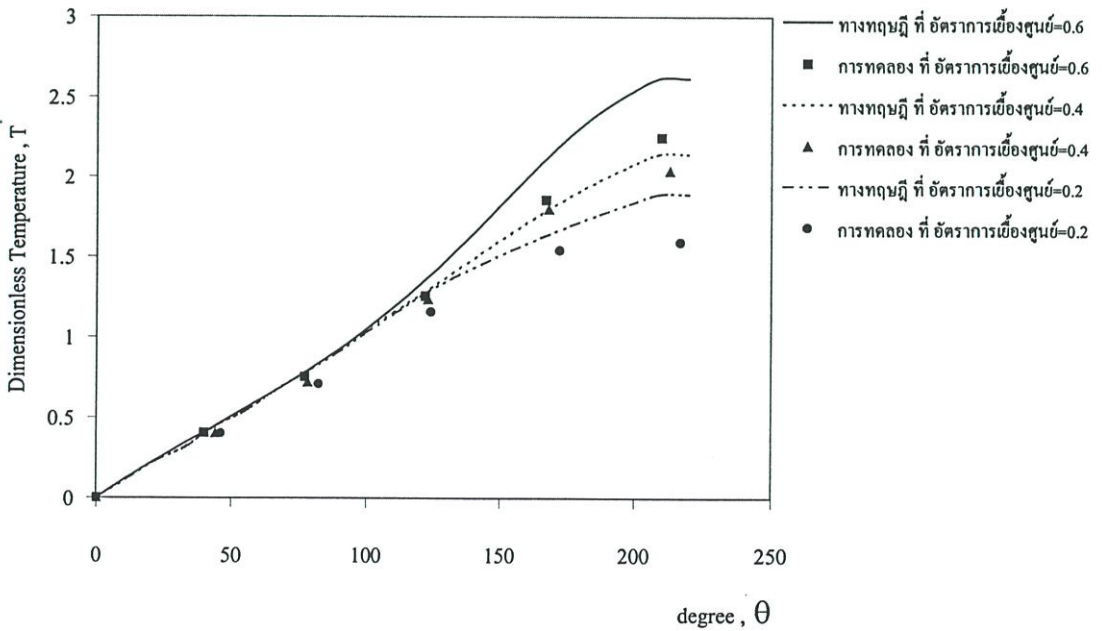
ในรูปที่ 9.37-9.54 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันในรูปไร้มิติ (Dimensionless temperature) ที่ค่า  $L/D=1$  ของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น ผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจะเห็นว่าค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณทั้งนี้เพราะว่าค่าที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่กระจายอยู่ในชั้นฟิล์มน้ำมันซึ่งจะได้อุณหภูมิที่สูงที่สุดตามทฤษฎี แต่ในการทดลองจริงไม่สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ฟิล์มน้ำมันให้สูงที่สุดตามทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าการกระจายอุณหภูมิในชั้นฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการคำนวณและการทดลองก็มีลักษณะที่สอดคล้องกัน



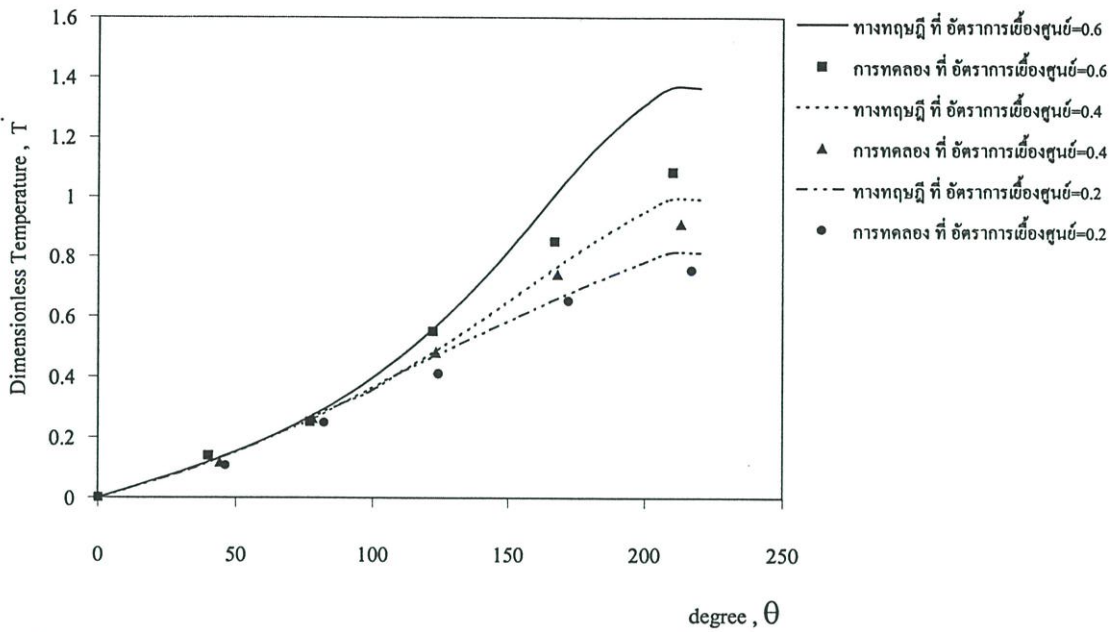
รูปที่ 9.37 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



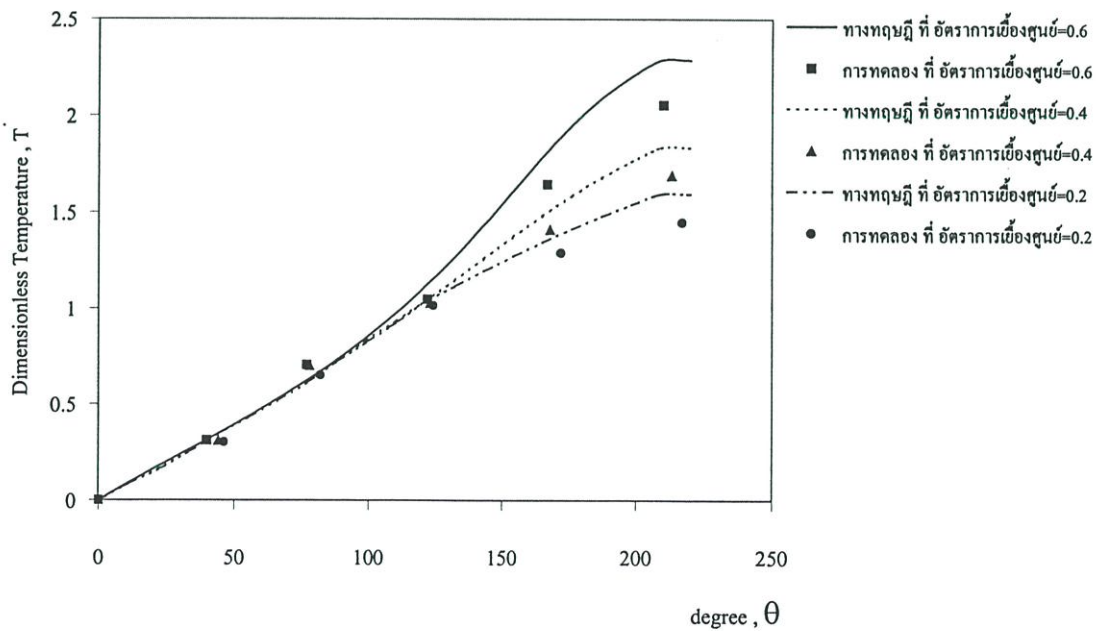
รูปที่ 9.38 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



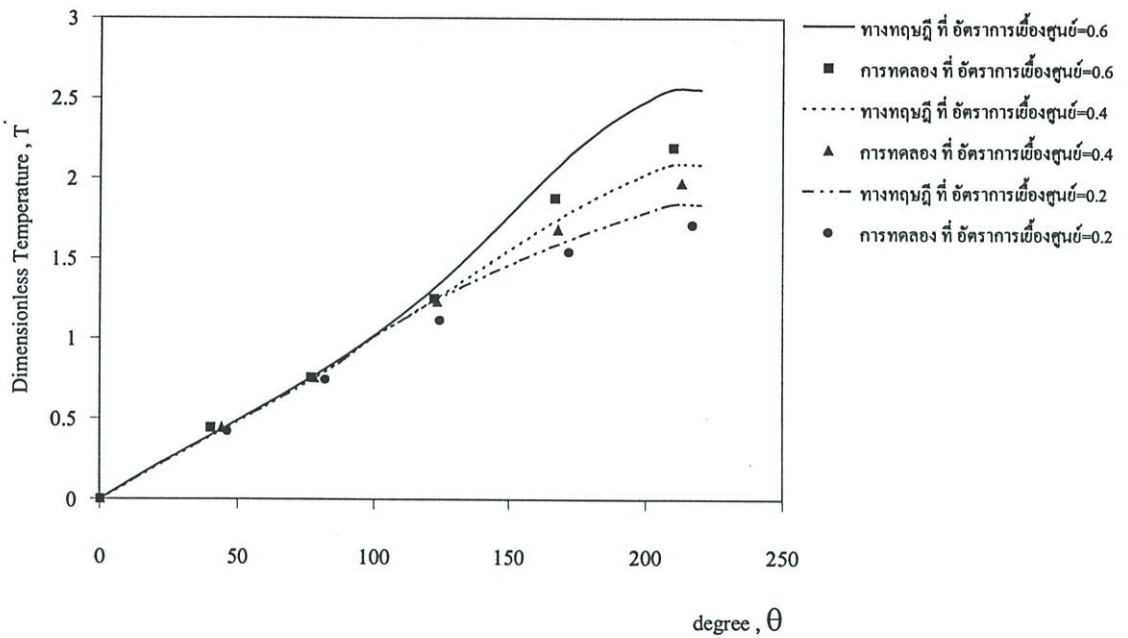
รูปที่ 9.39 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



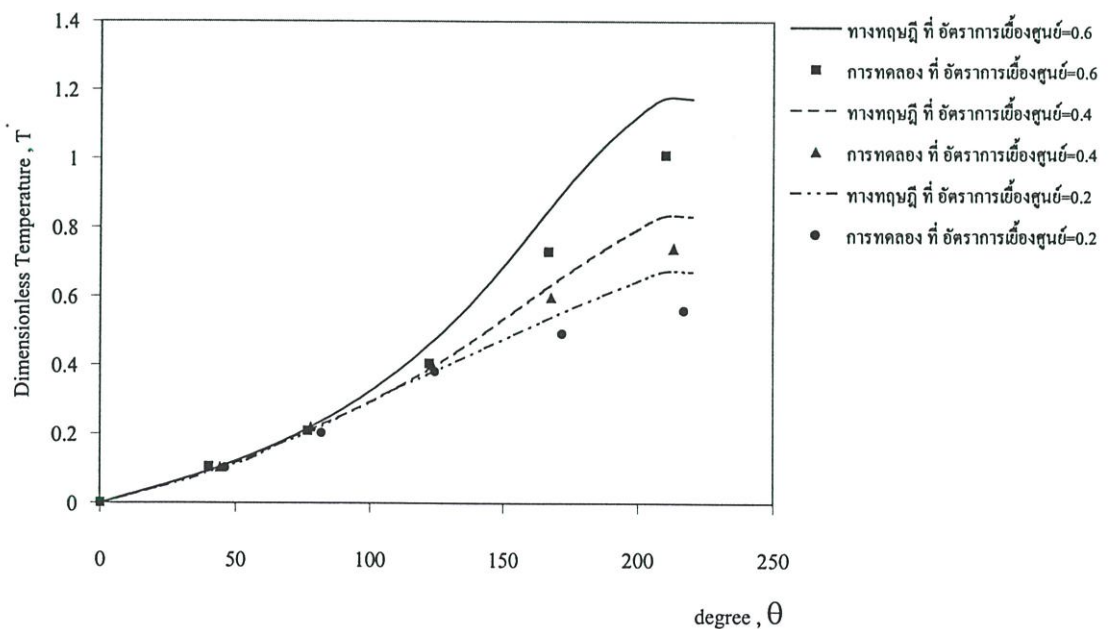
รูปที่ 9.40 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%



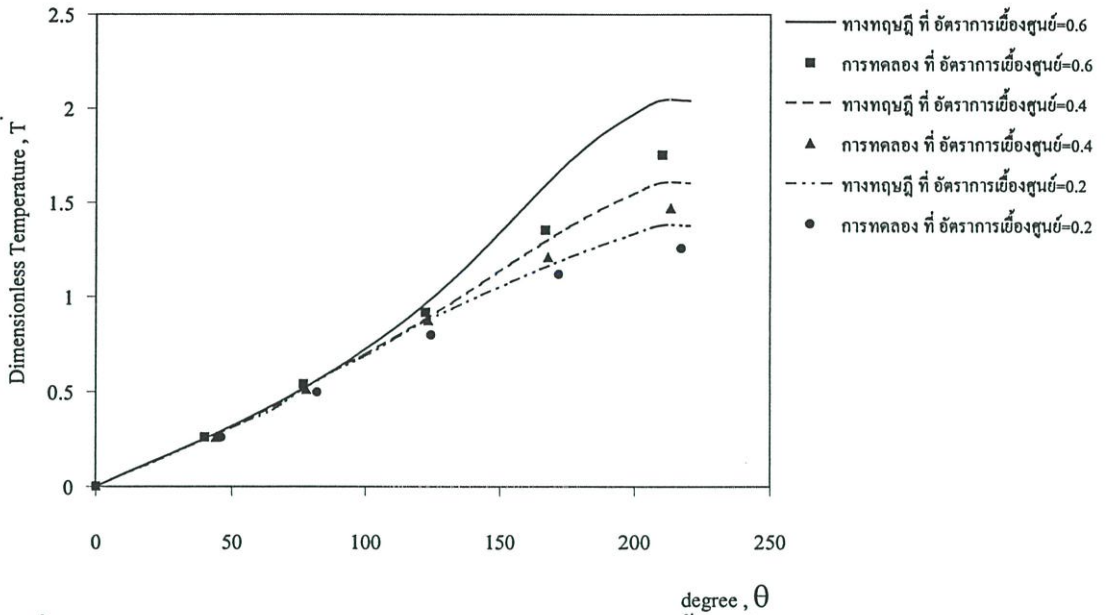
รูปที่ 9.41 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%



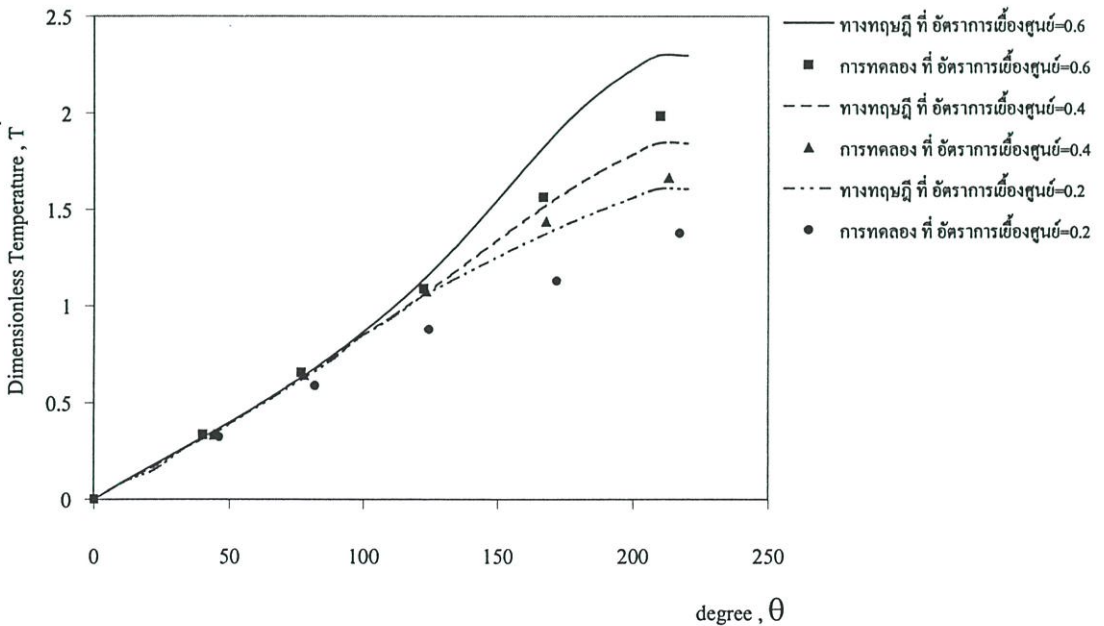
รูปที่ 9.42 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%



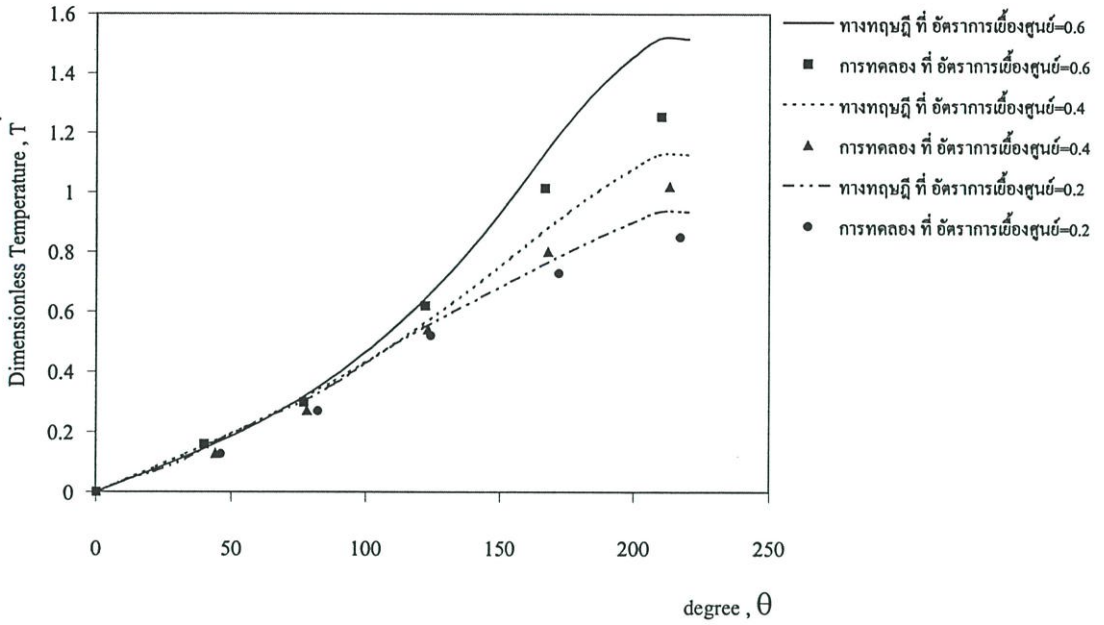
รูปที่ 9.43 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%



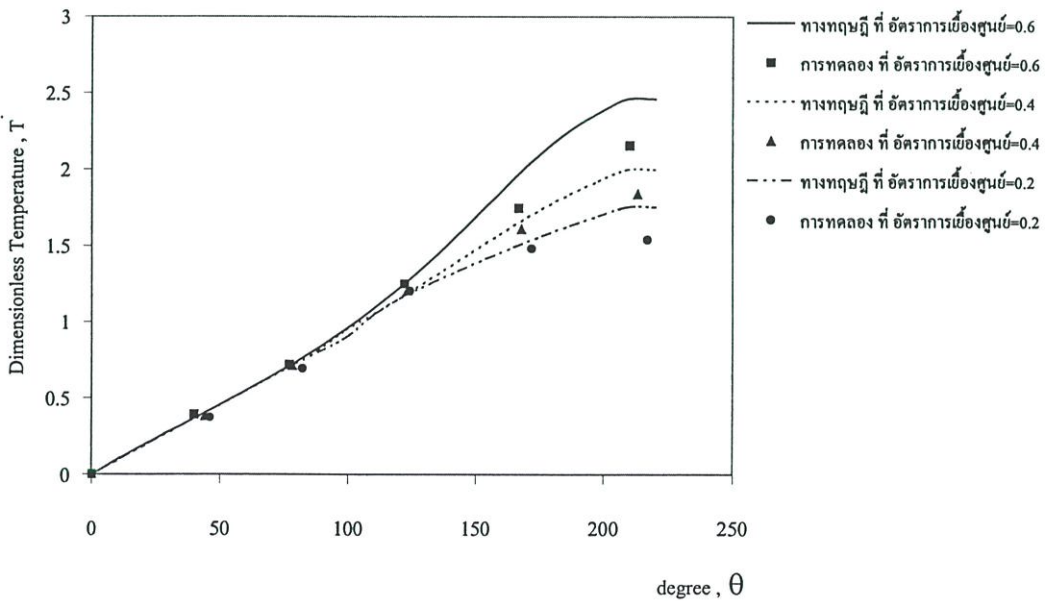
รูปที่ 9.44 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%



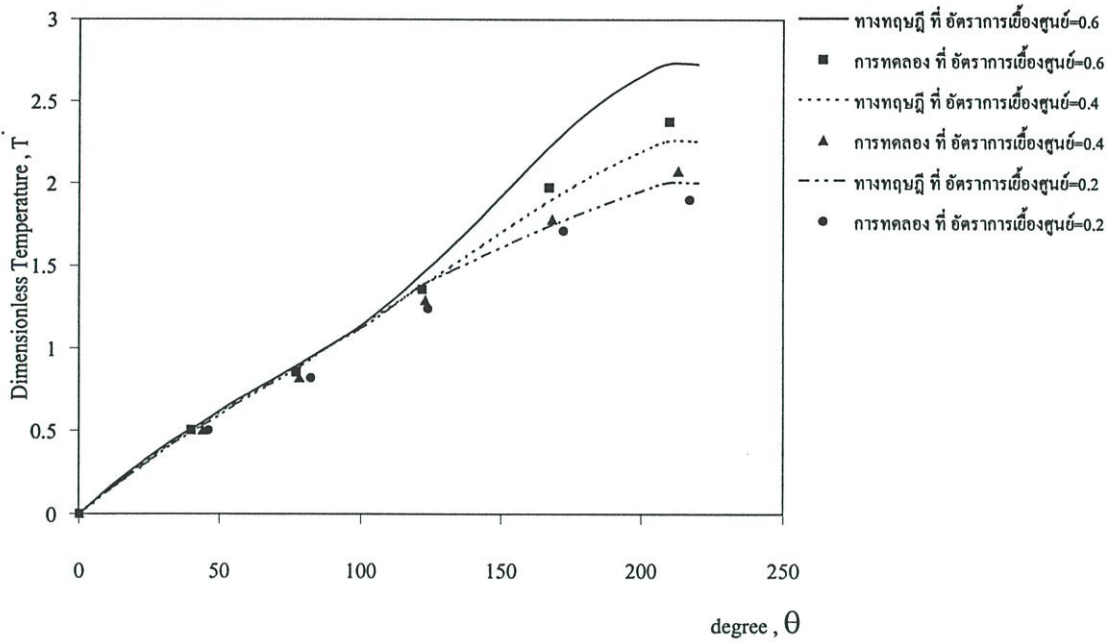
รูปที่ 9.45 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%



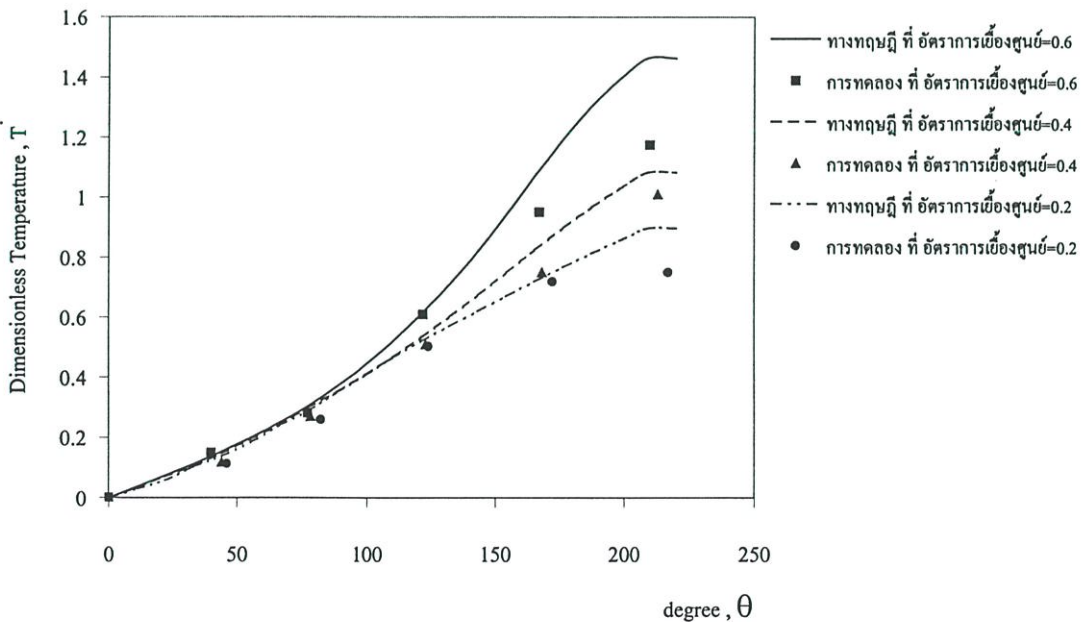
รูปที่ 9.46 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



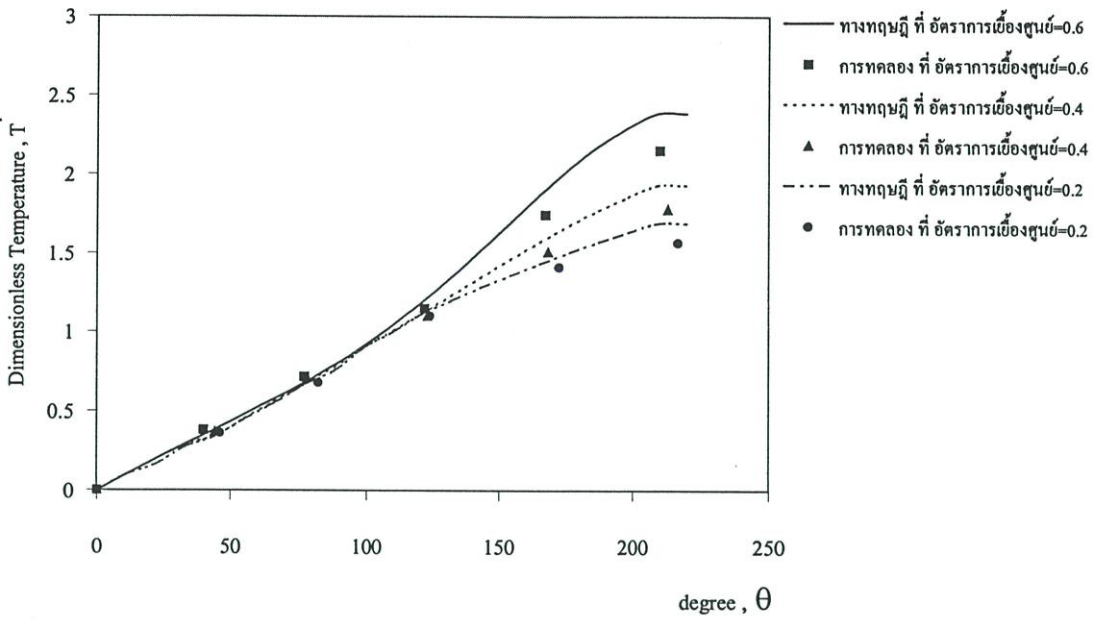
รูปที่ 9.47 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



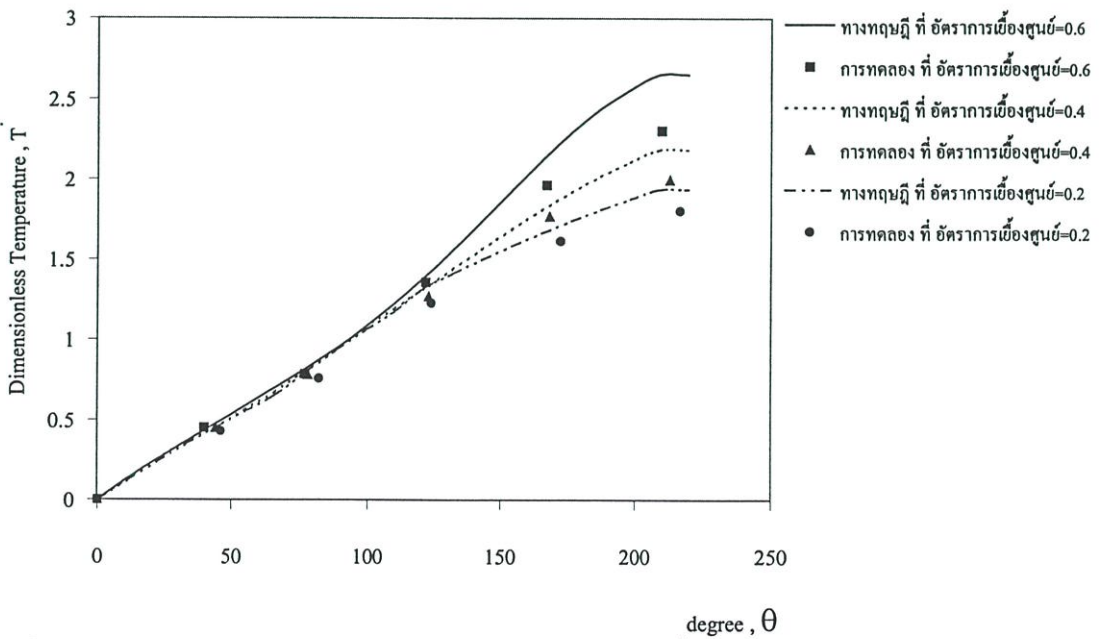
รูปที่ 9.48 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



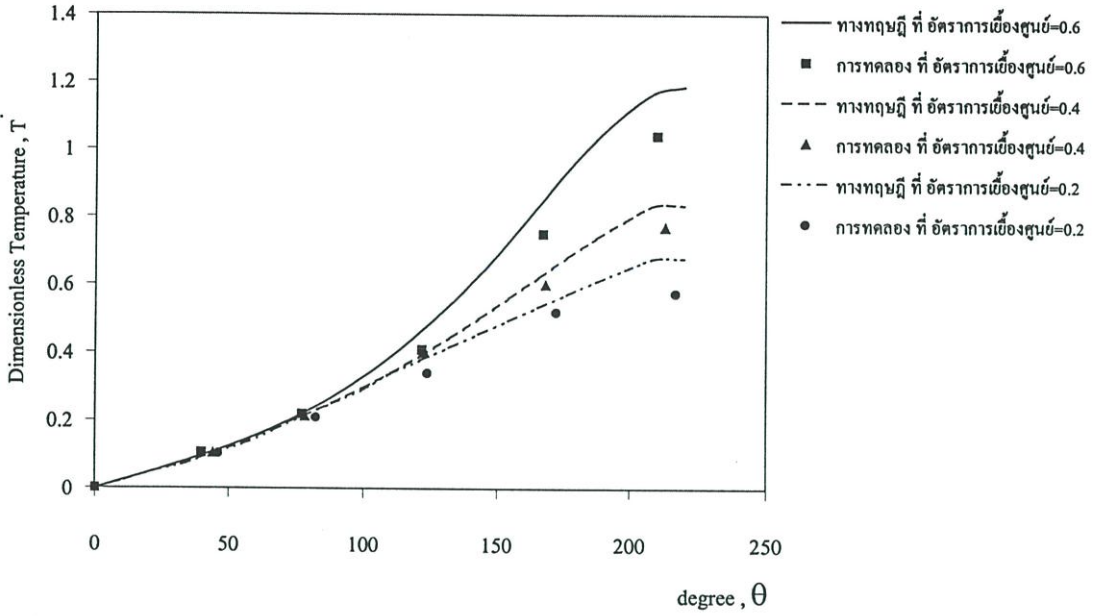
รูปที่ 9.49 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



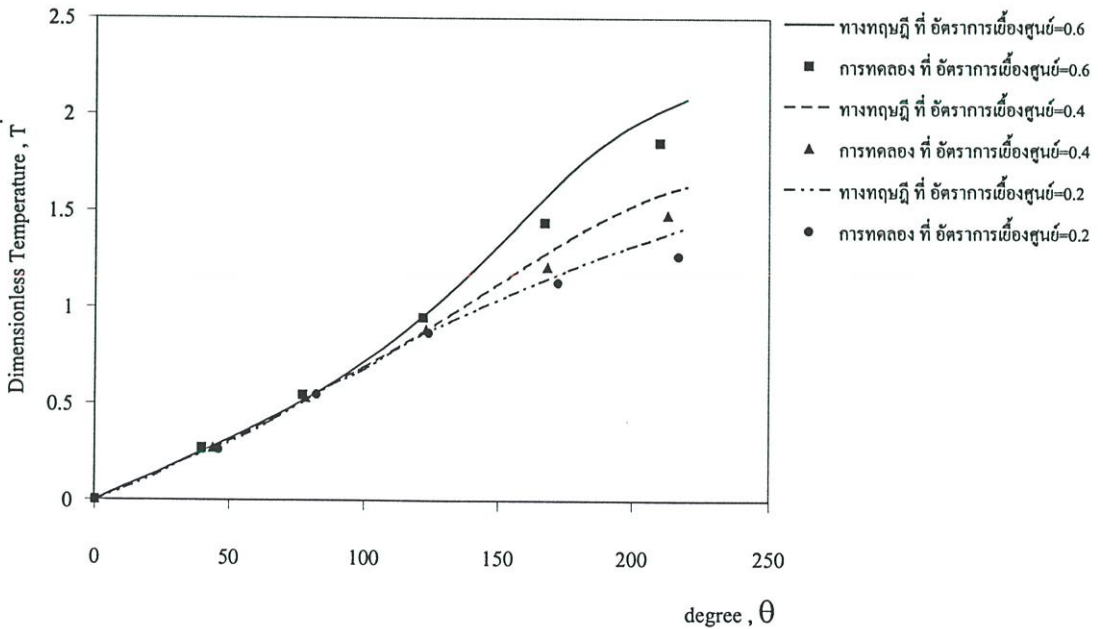
รูปที่ 9.50 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



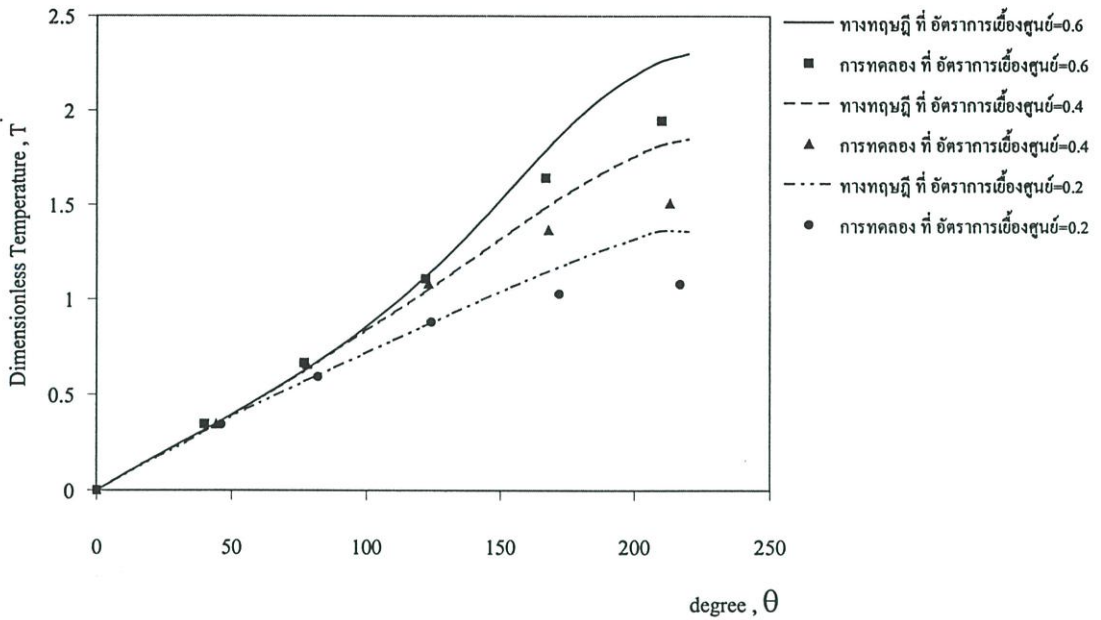
รูปที่ 9.51 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



รูปที่ 9.52 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200$  rpm. และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

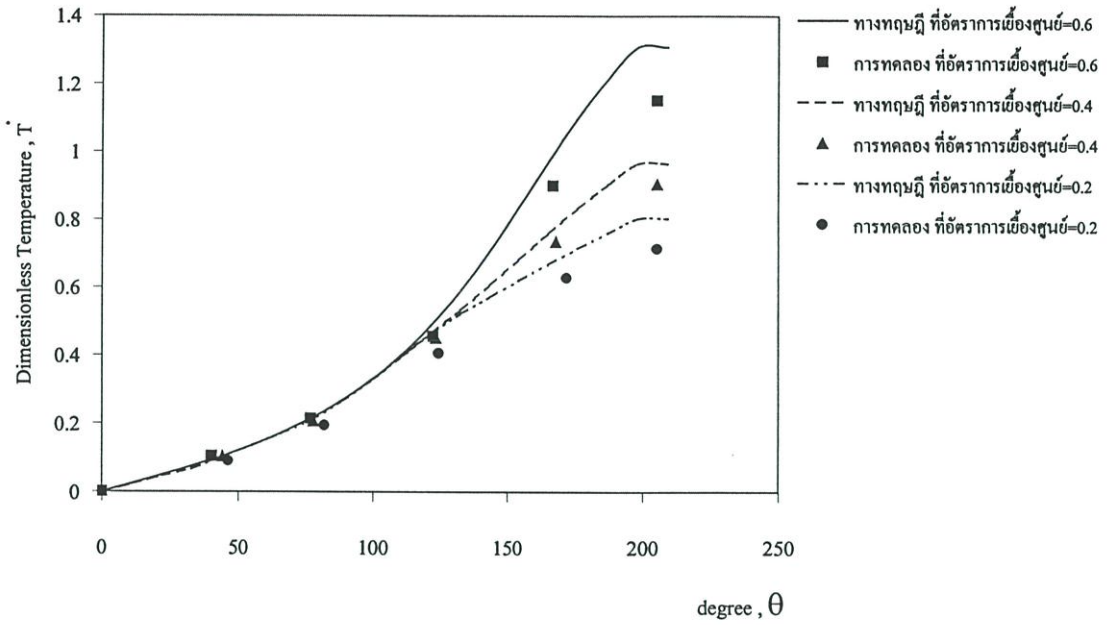


รูปที่ 9.53 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600$  rpm. และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

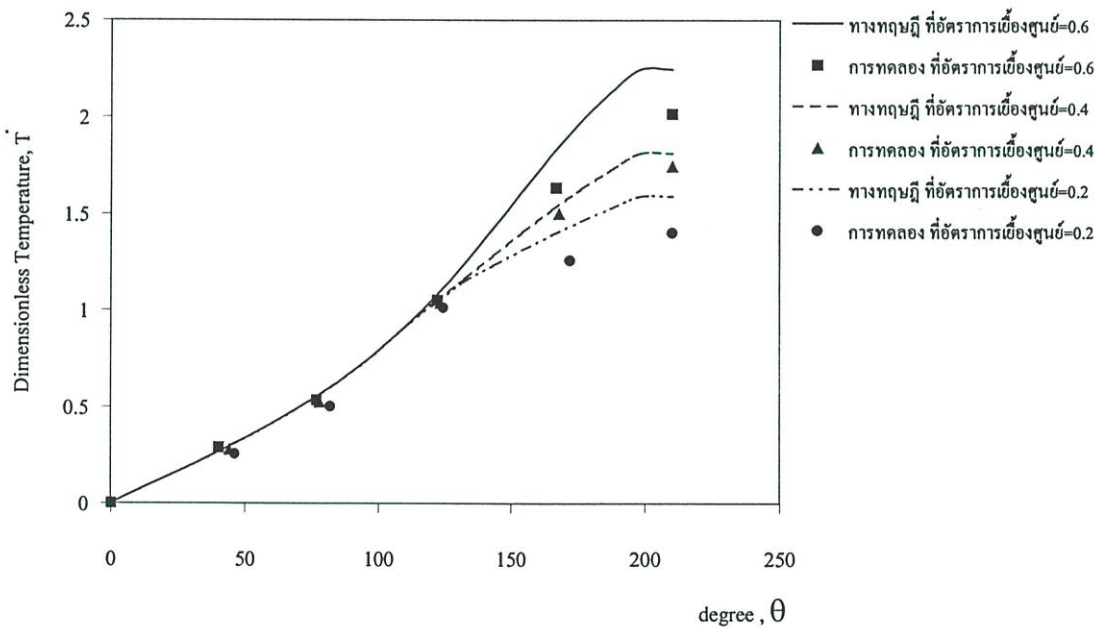


รูปที่ 9.54 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

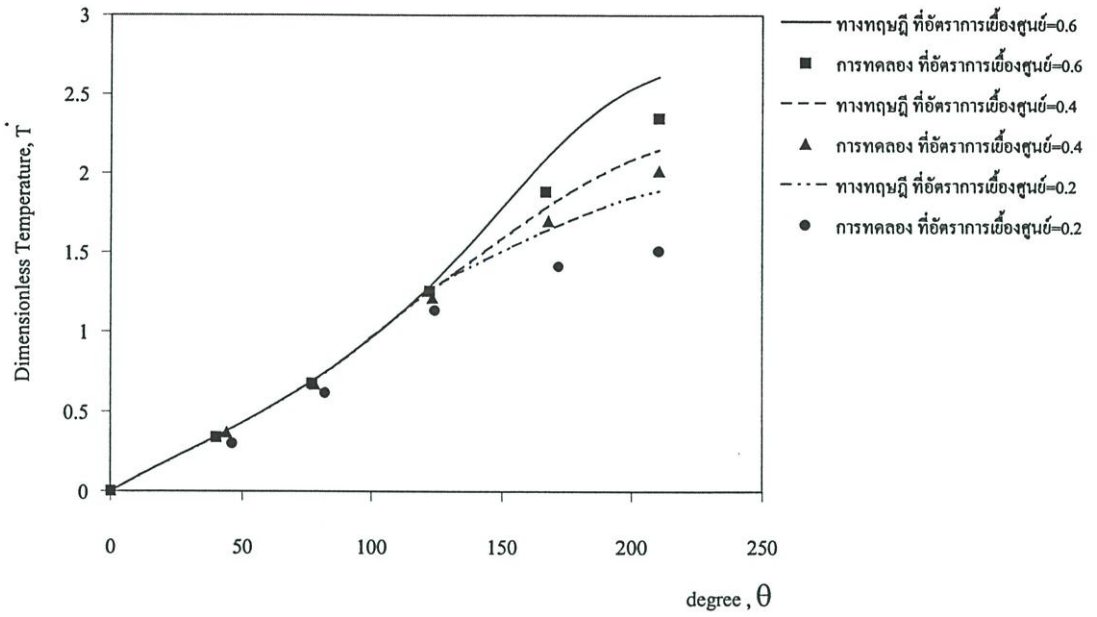
ในรูปที่ 9.55-9.72 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันในรูปไร้มิติ (Dimensionless temperature) ที่ค่า  $L/D=0.5$  ของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น ผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจะเห็นว่าค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณทั้งนี้เพราะว่าค่าที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่กระจายอยู่ในชั้นฟิล์มน้ำมันซึ่งจะได้อุณหภูมิที่สูงที่สุดตามทฤษฎี แต่ในการทดลองจริงไม่สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ฟิล์มน้ำมันให้สูงที่สุดตามทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าการกระจายอุณหภูมิในชั้นฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการคำนวณและการทดลองก็มีลักษณะที่สอดคล้องกัน



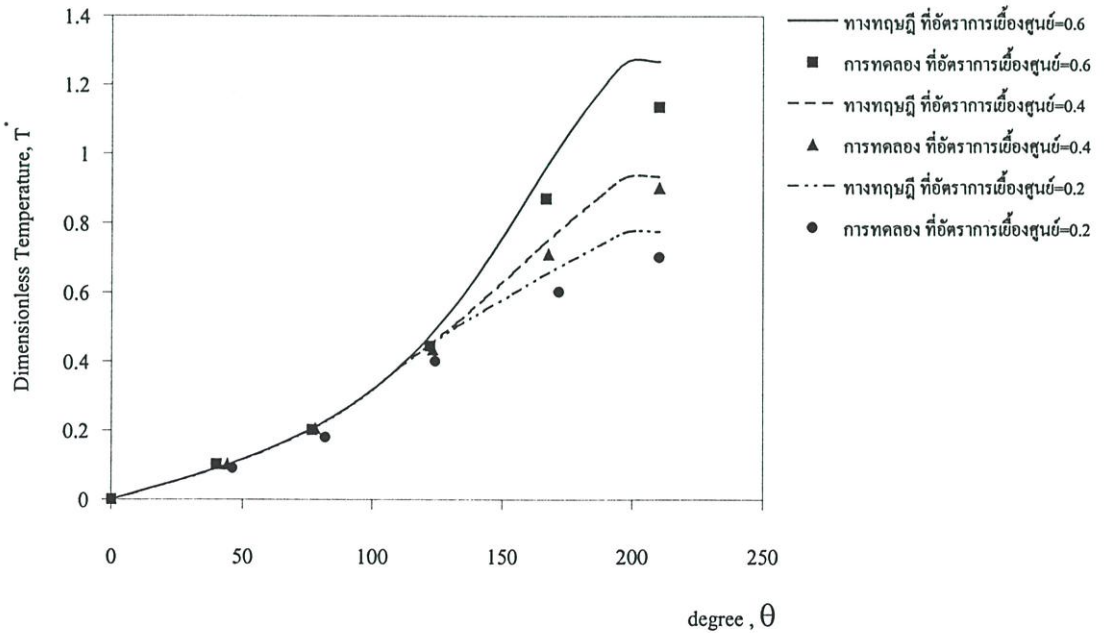
รูปที่ 9.55 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



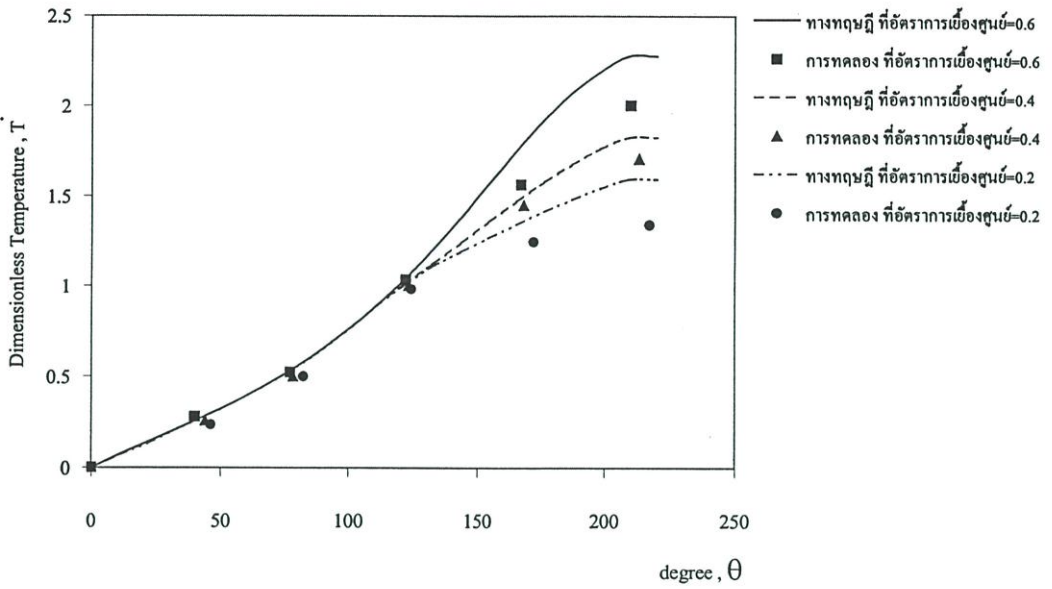
รูปที่ 9.56 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



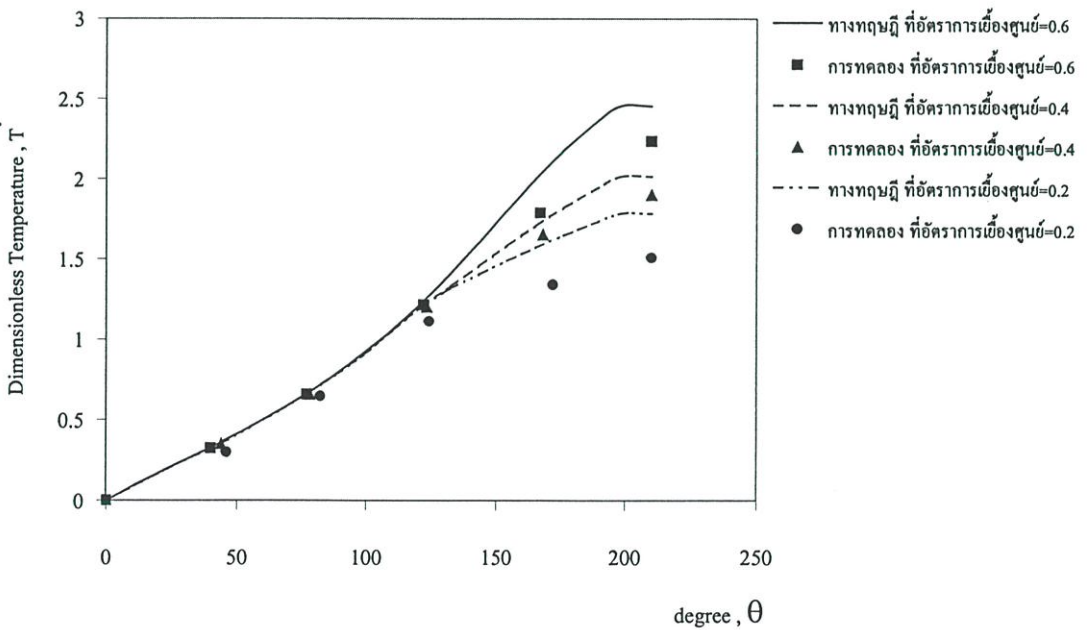
รูปที่ 9.57 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



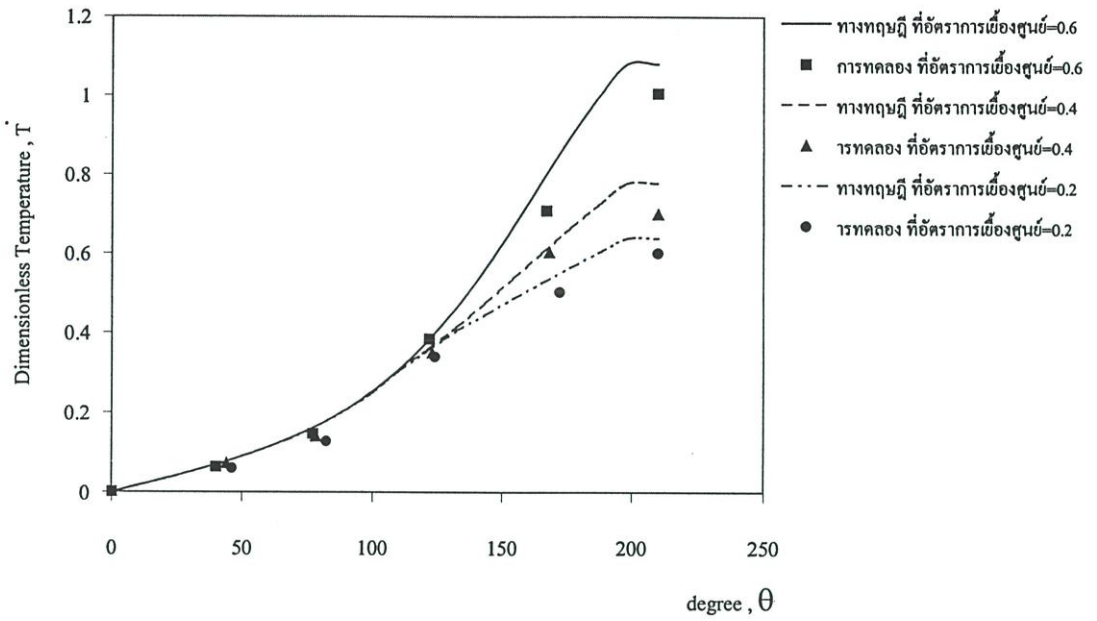
รูปที่ 9.58 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%



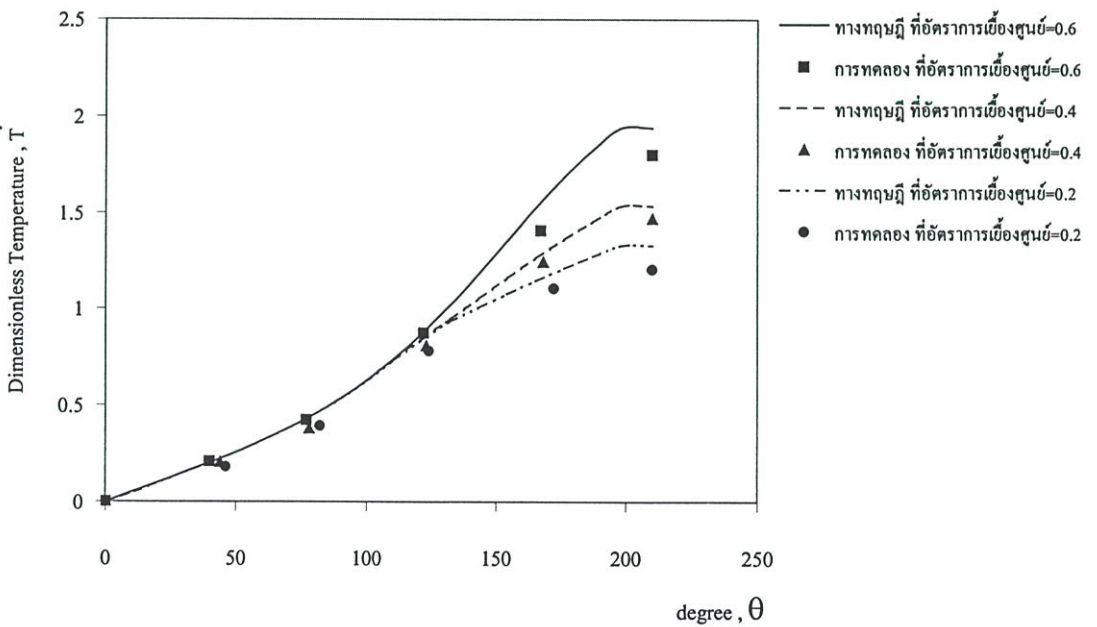
รูปที่ 9.59 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%



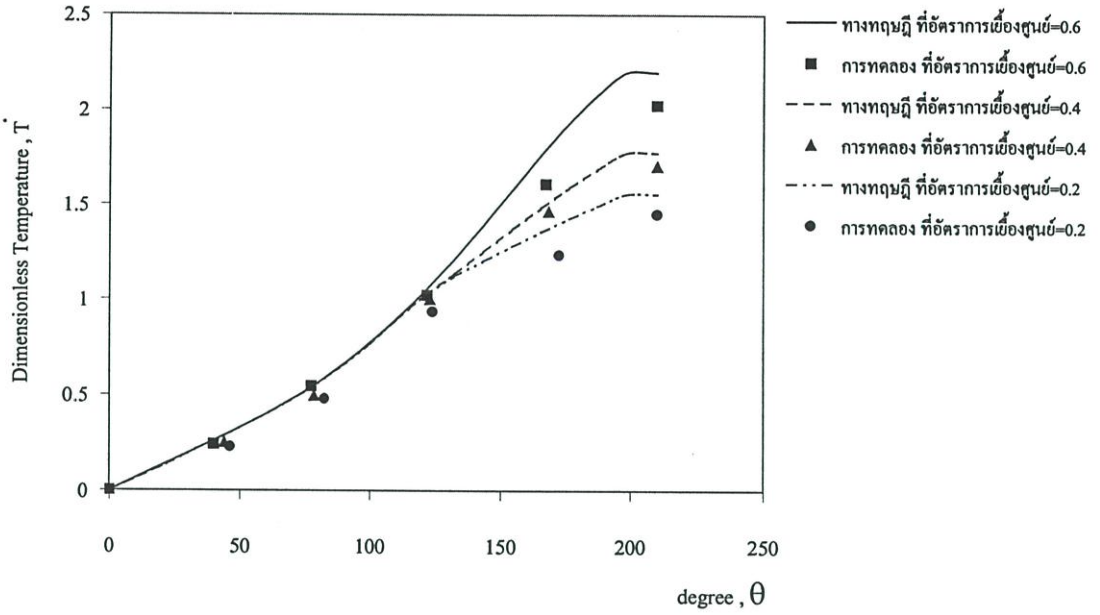
รูปที่ 9.60 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2%



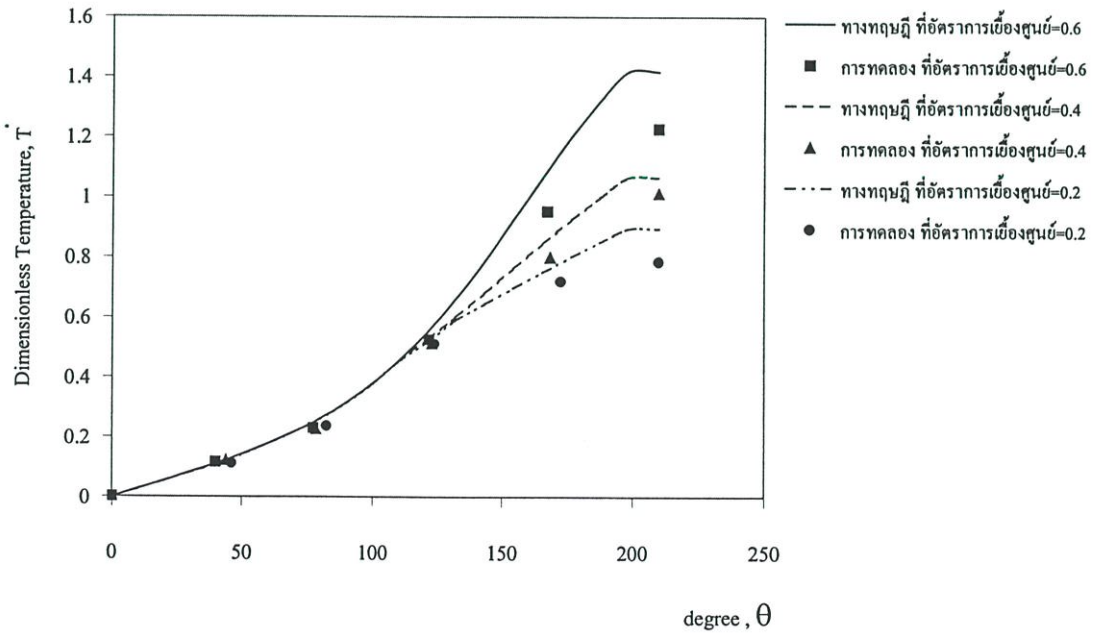
รูปที่ 9.61 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%



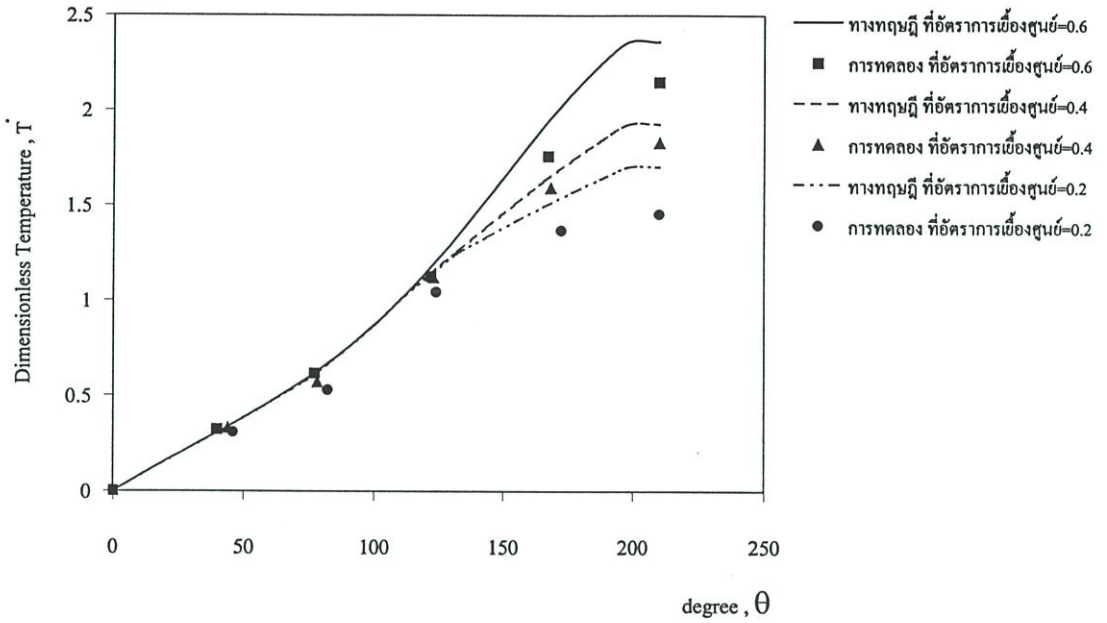
รูปที่ 9.62 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%



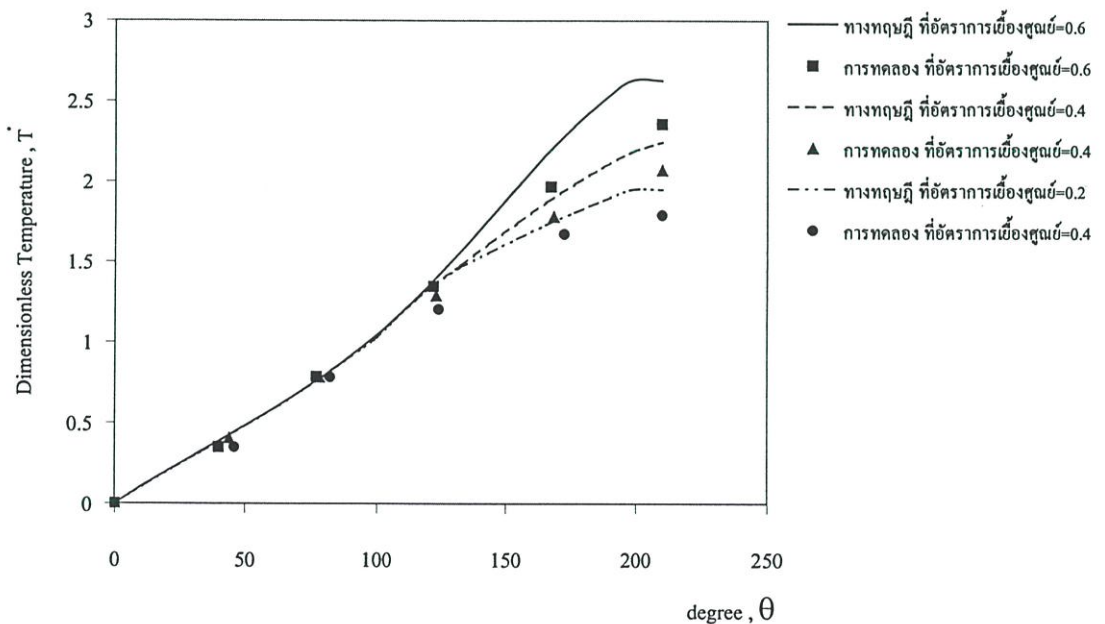
รูปที่ 9.63 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทาง  
ทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1%



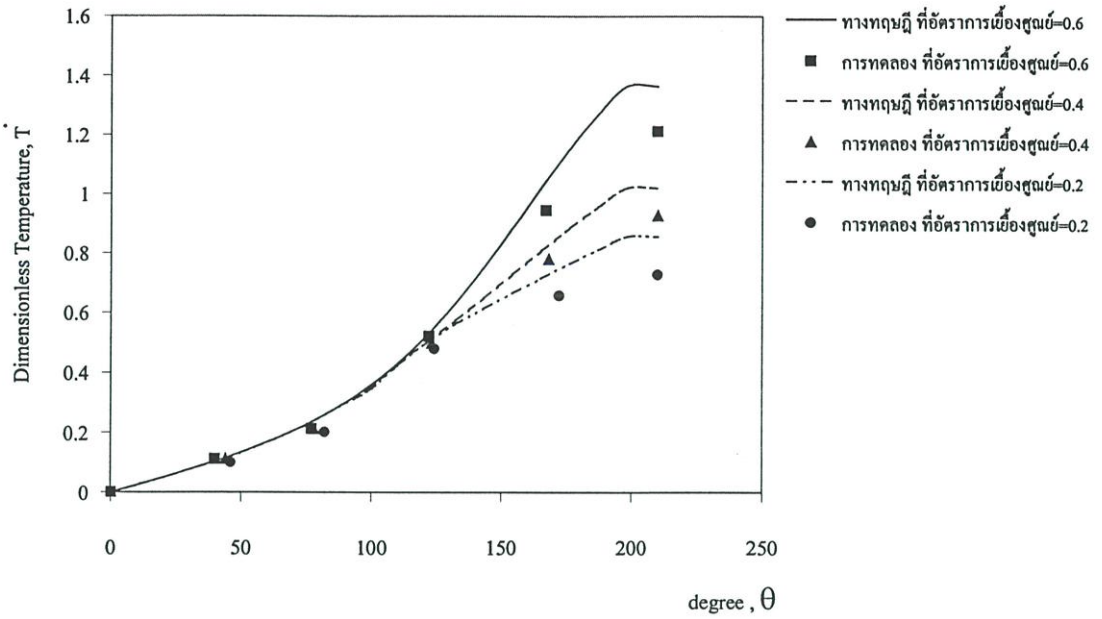
รูปที่ 9.64 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทาง  
ทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์ม



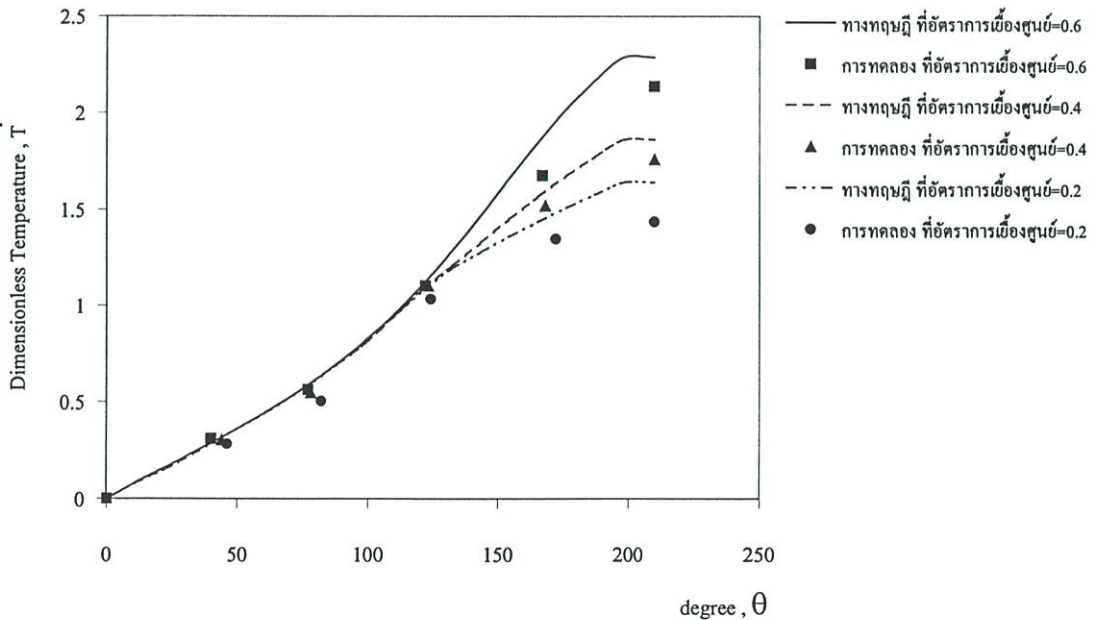
รูปที่ 9.65 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์ม



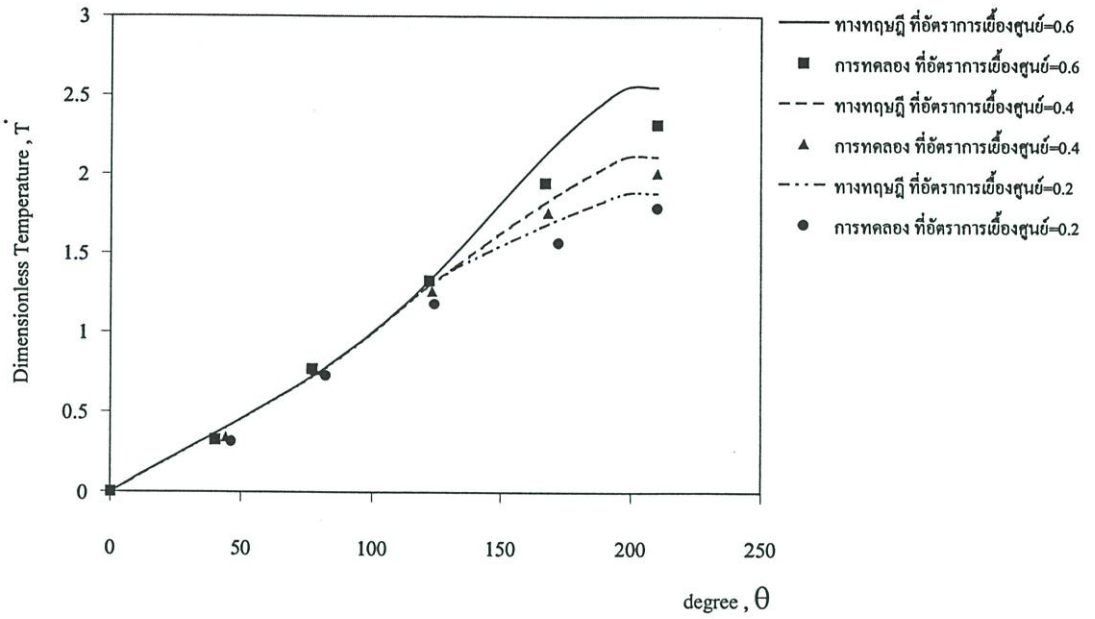
รูปที่ 9.66 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์ม



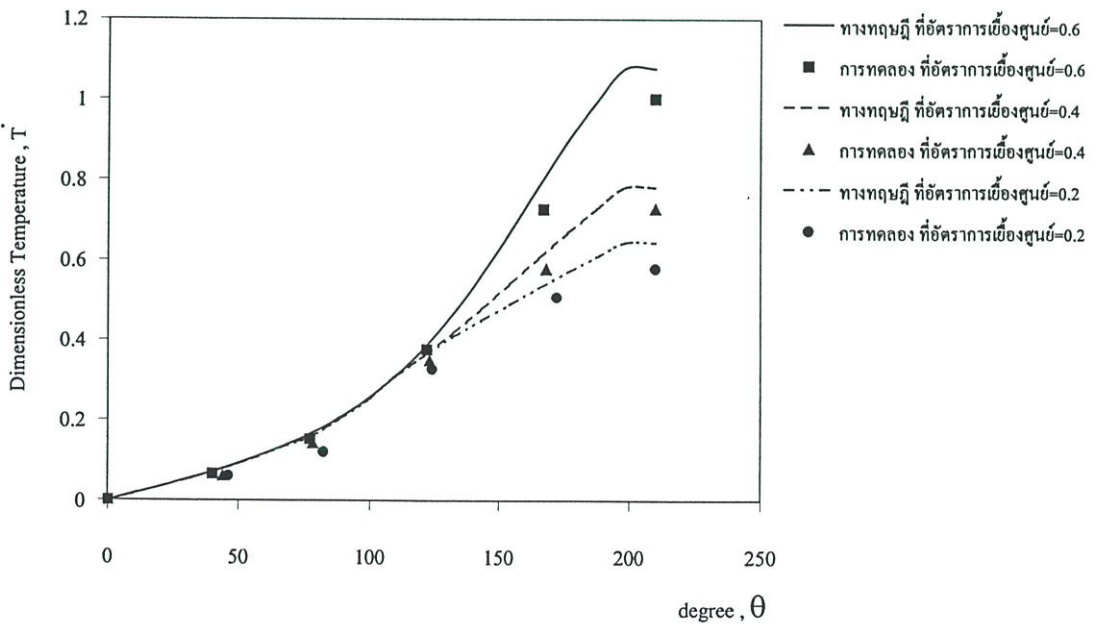
รูปที่ 9.67 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



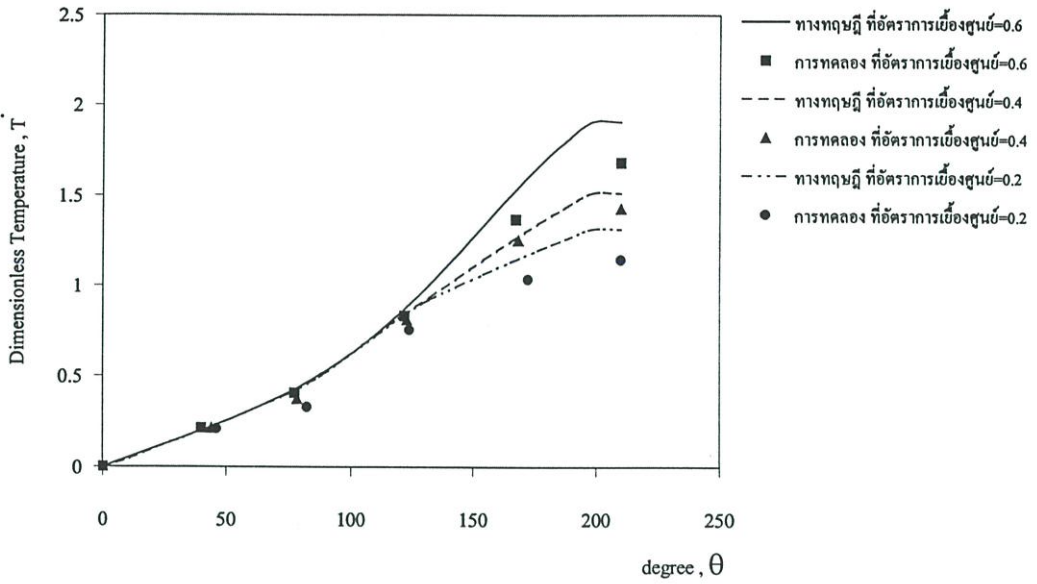
รูปที่ 9.68 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



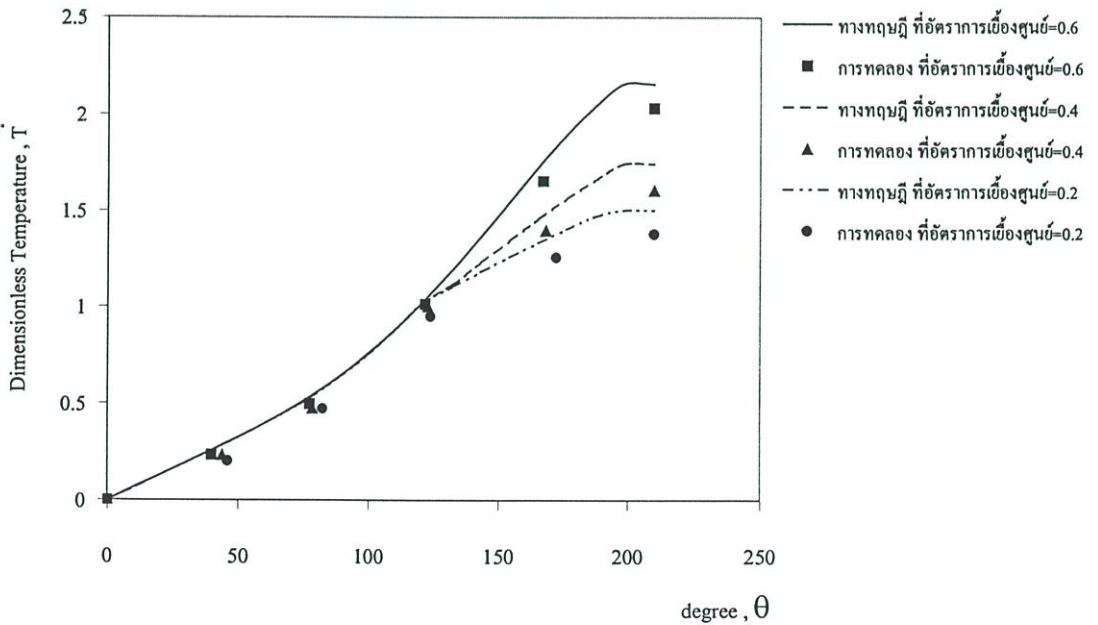
รูปที่ 9.69 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2%



รูปที่ 9.70 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$  ,  $N = 200\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%



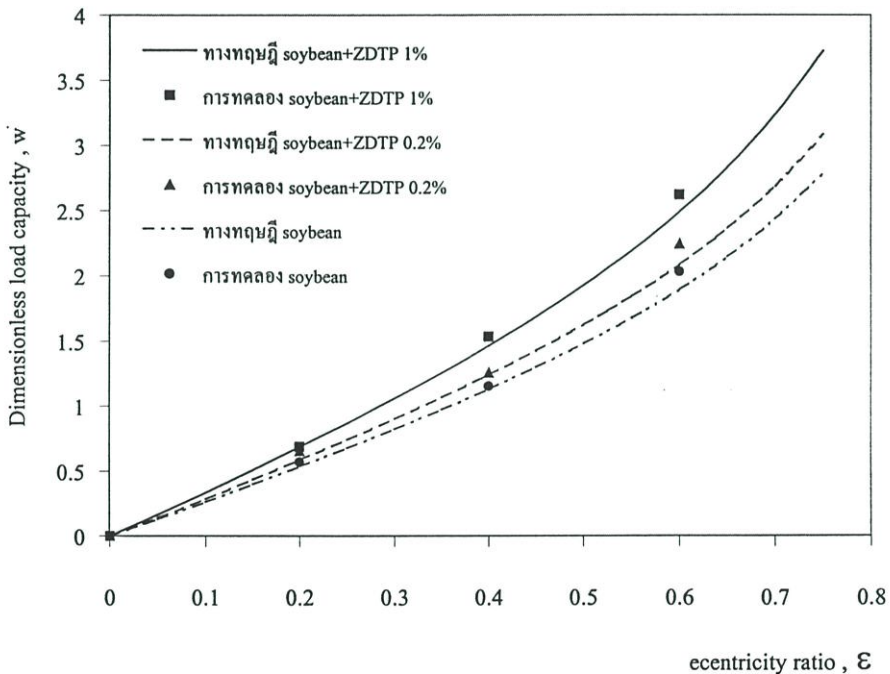
รูปที่ 9.71 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 600\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%



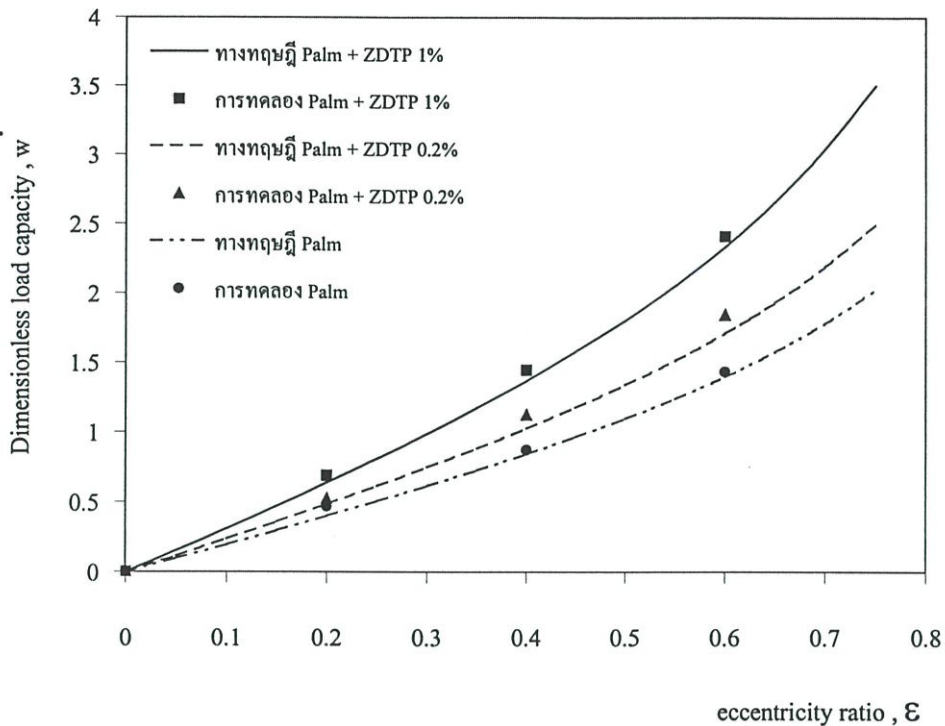
รูปที่ 9.72 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีที่  $C = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 800\text{ rpm}$ . และ  $L/D = 0.5$  ของน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1%

### 9.3 ความสามารถในการรับภาระการหล่อลื่นของกาบรองลื่น(Bearing load carrying capacity)

จากรูปที่ 9.73 – 9.74 ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางที่ จากการทดลองพบว่าความสามารถในการรับภาระการหล่อลื่นของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เพราะว่าในการคำนวณได้กำหนดให้ความหนืดของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่สูงที่สุด แต่จากการทดลองไม่สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิให้สูงที่สุดได้จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับภาระสูงกว่าในการคำนวณ



รูปที่ 9.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับภาระการรองลื่นกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น

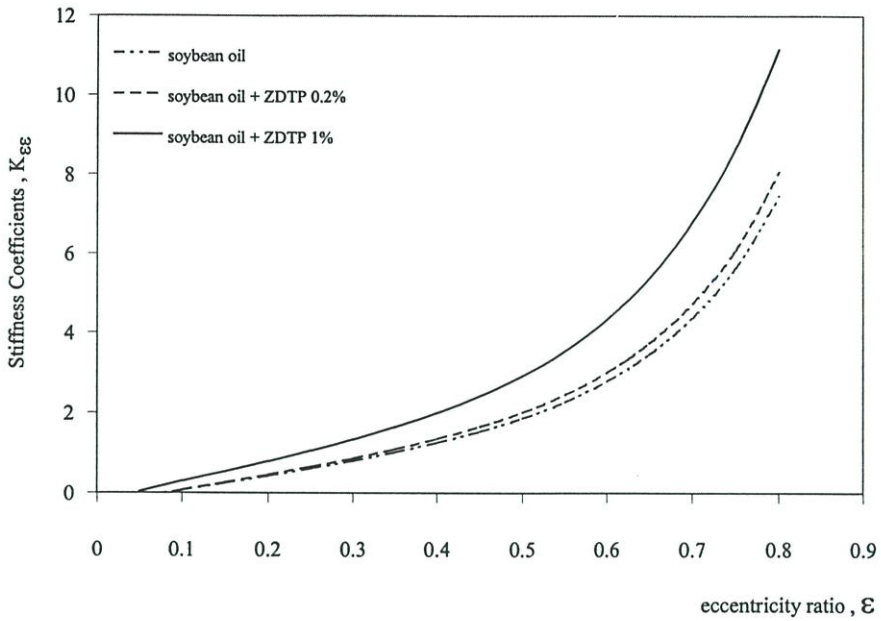


รูปที่ 9.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับภาระการรองรับกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่ใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น

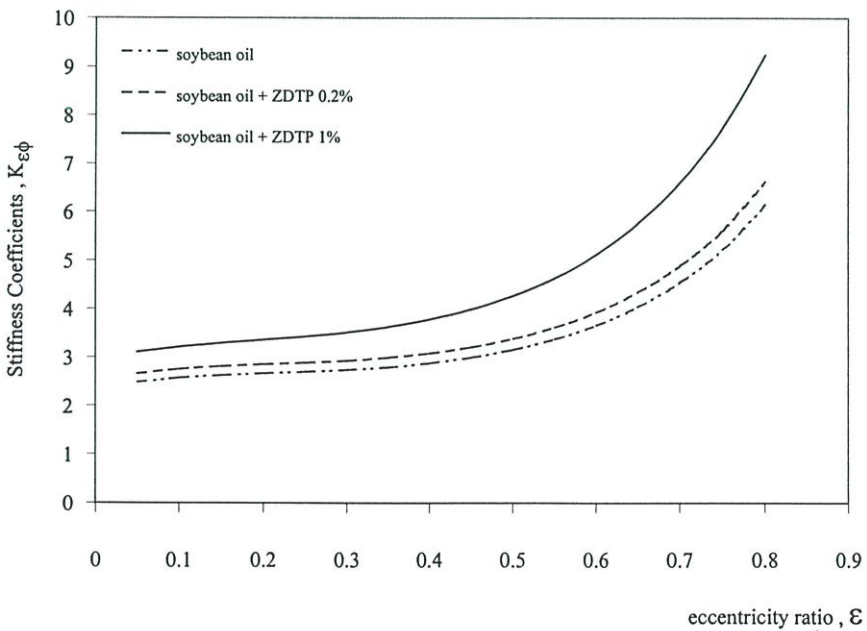
#### 9.4 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของกาบรองรับเพลากลม

##### (Numerical results dynamic characteristic of journal bearing)

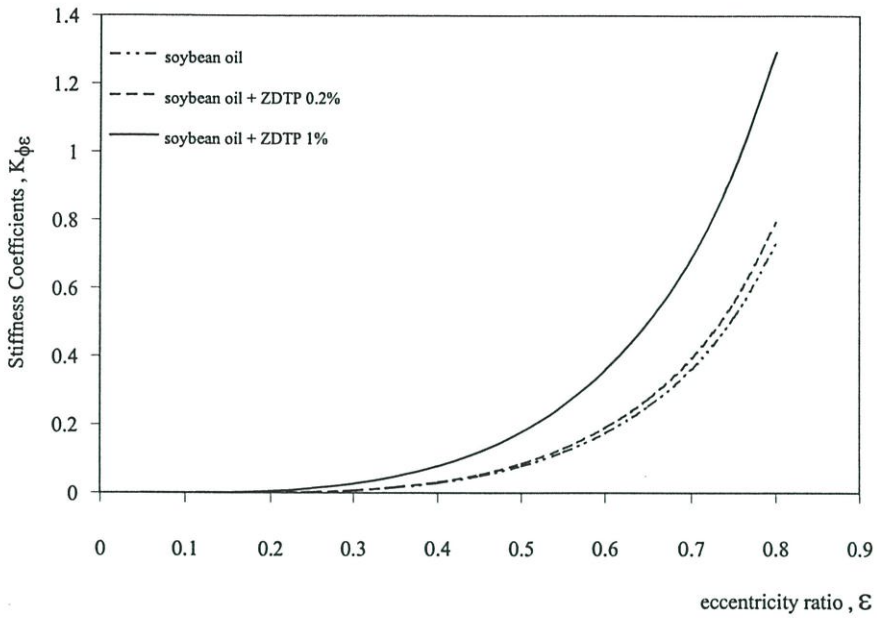
จากรูปที่ 9.75 – 9.90 จากการคำนวณหาพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของกาบรองรับเพลากลมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงและสัมประสิทธิ์ของแดมปีง ของน้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นที่เติมสาร ZDTP 0.2% และ 1% ตามลำดับ ผลที่ได้จากการคำนวณจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงและสัมประสิทธิ์ของแดมปีงจะมีค่าที่สูงกว่าน้ำมันพืชบริสุทธิ์



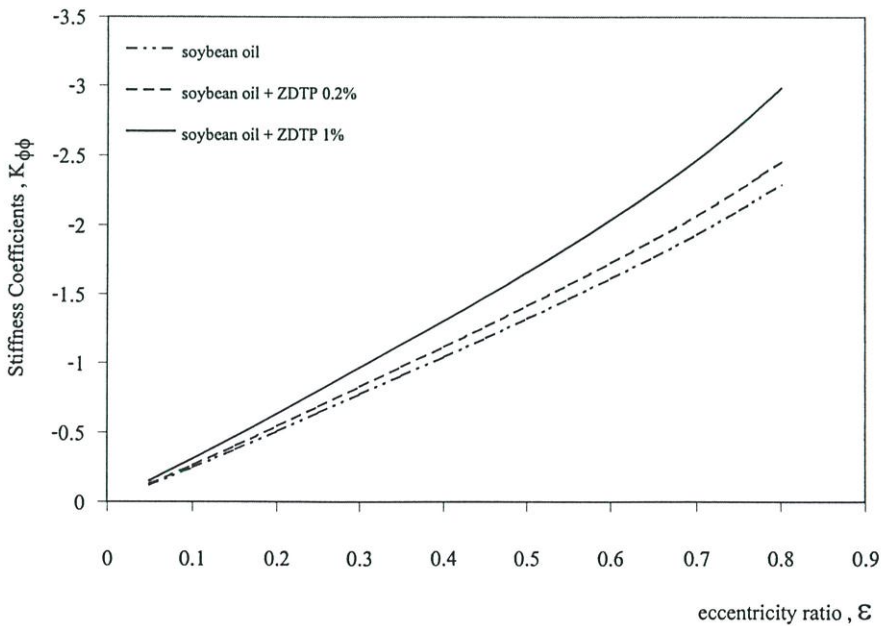
รูปที่ 9.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลาคี่  $C = 0.1 \text{ mm}$  และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



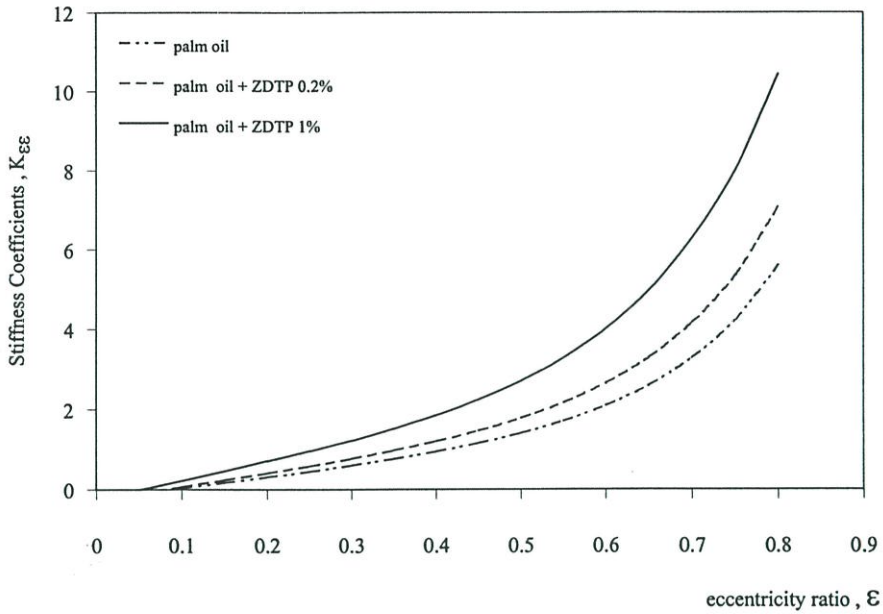
รูปที่ 9.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลาคี่  $C = 0.1 \text{ mm}$  และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



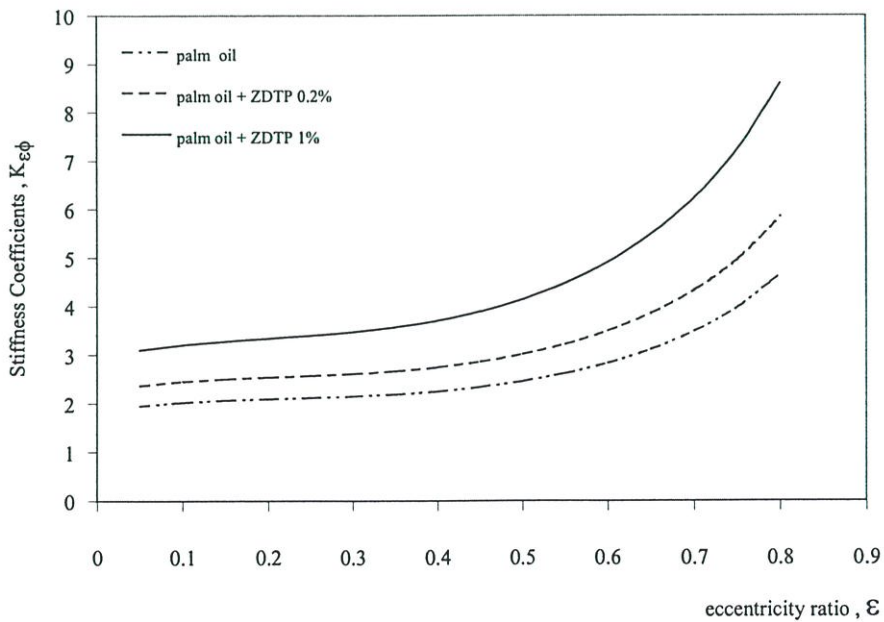
รูปที่ 9.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลาคี่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



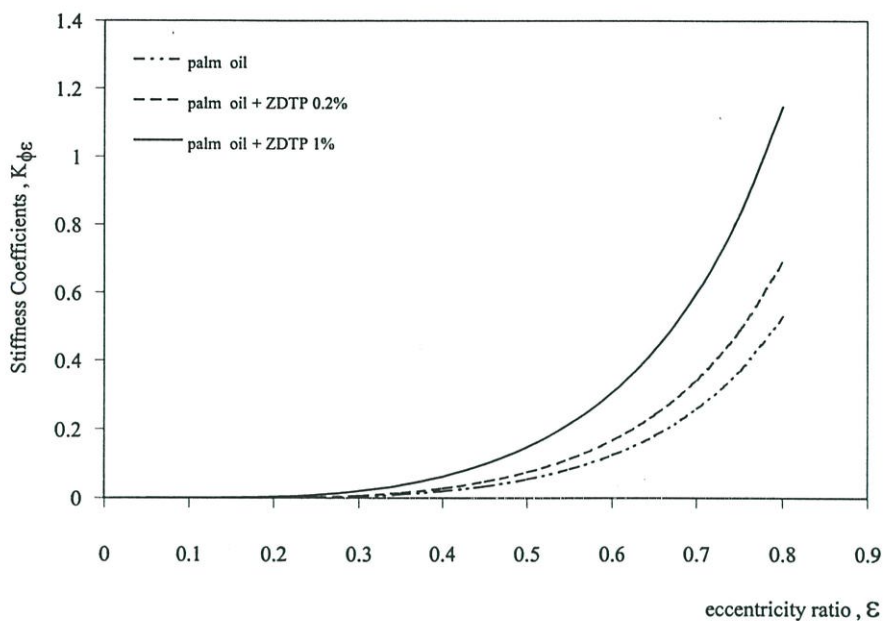
รูปที่ 9.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลาคี่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



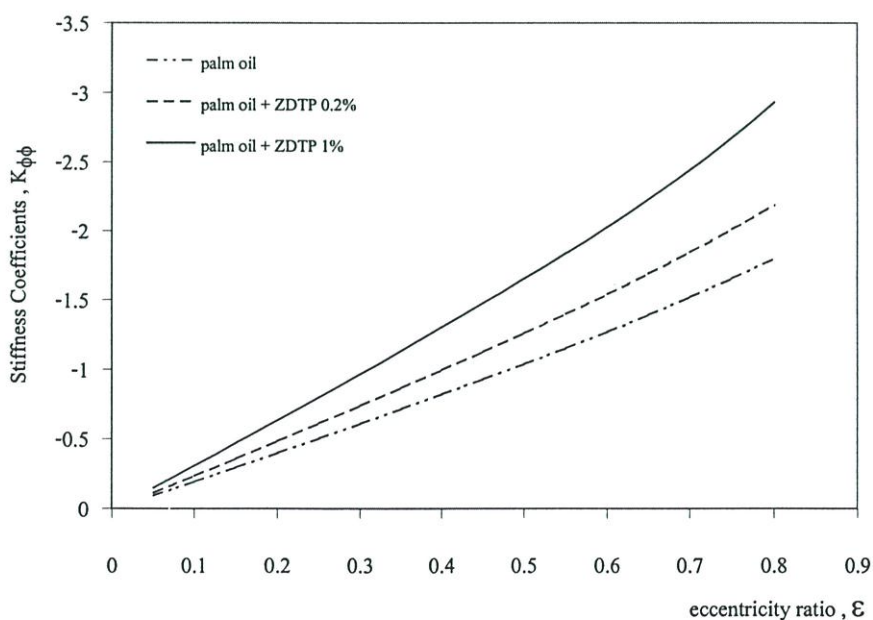
รูปที่ 9.79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



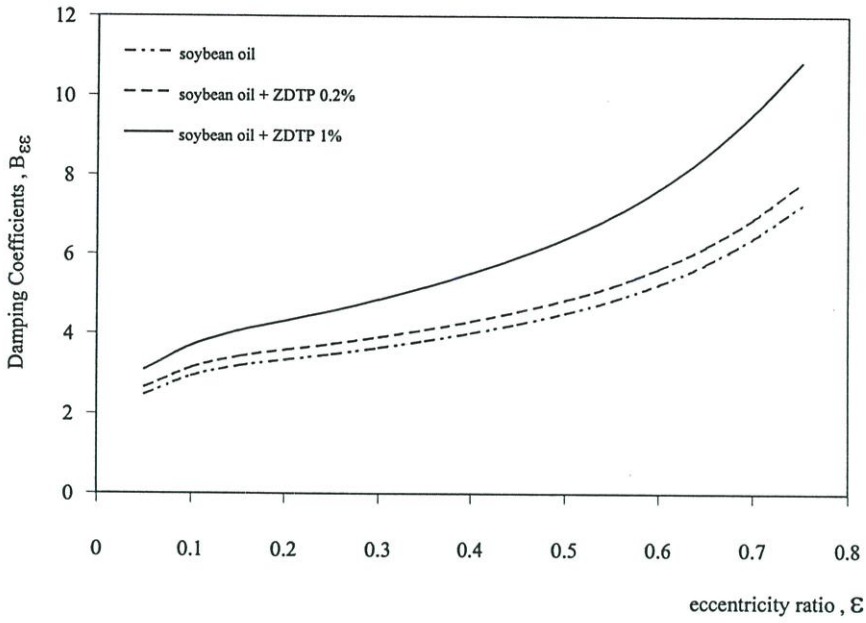
รูปที่ 9.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



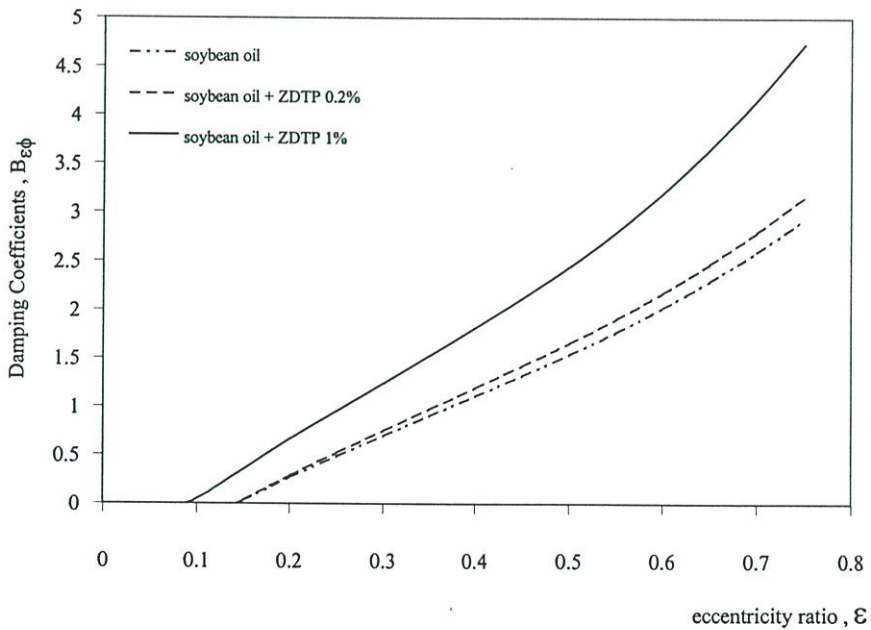
รูปที่ 9.81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



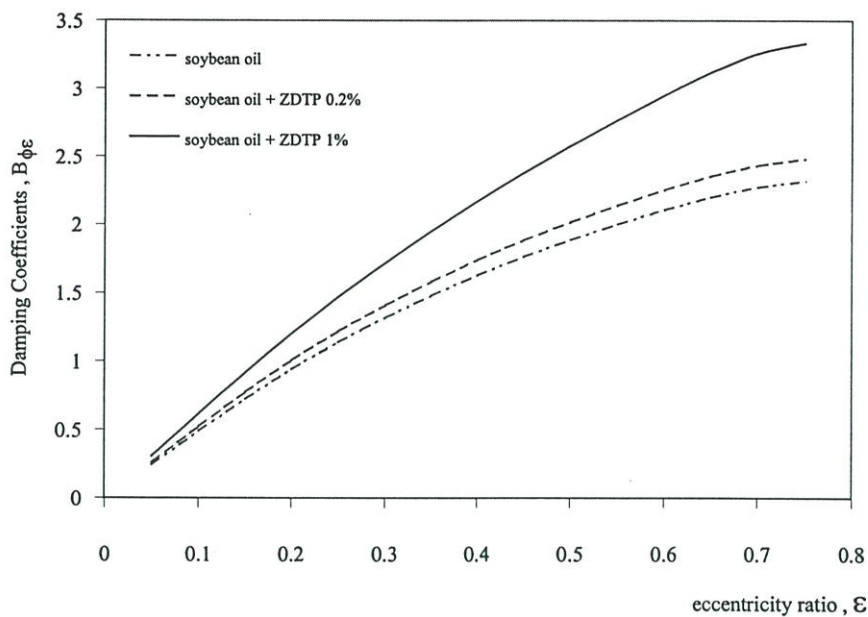
รูปที่ 9.82 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



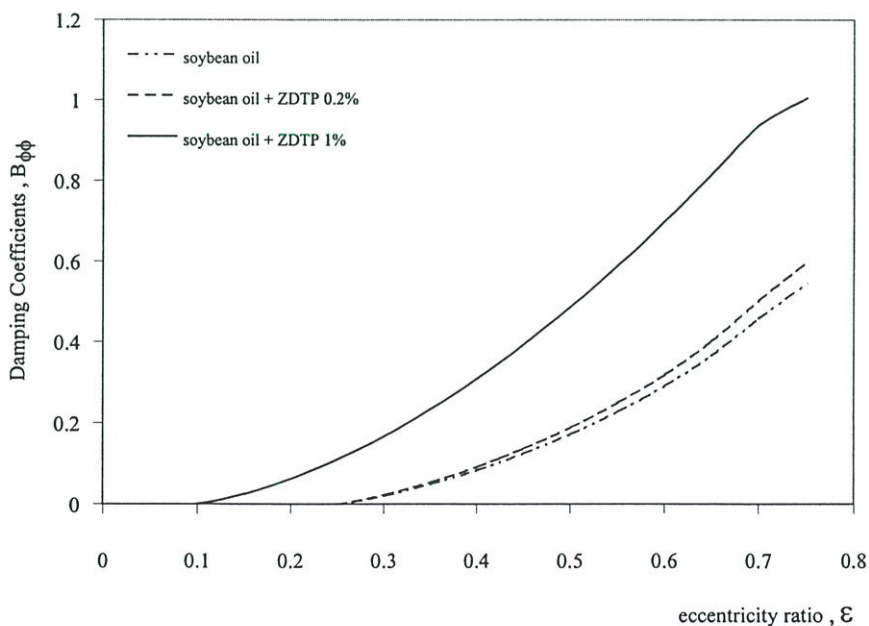
รูปที่ 9.83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแดมปีงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



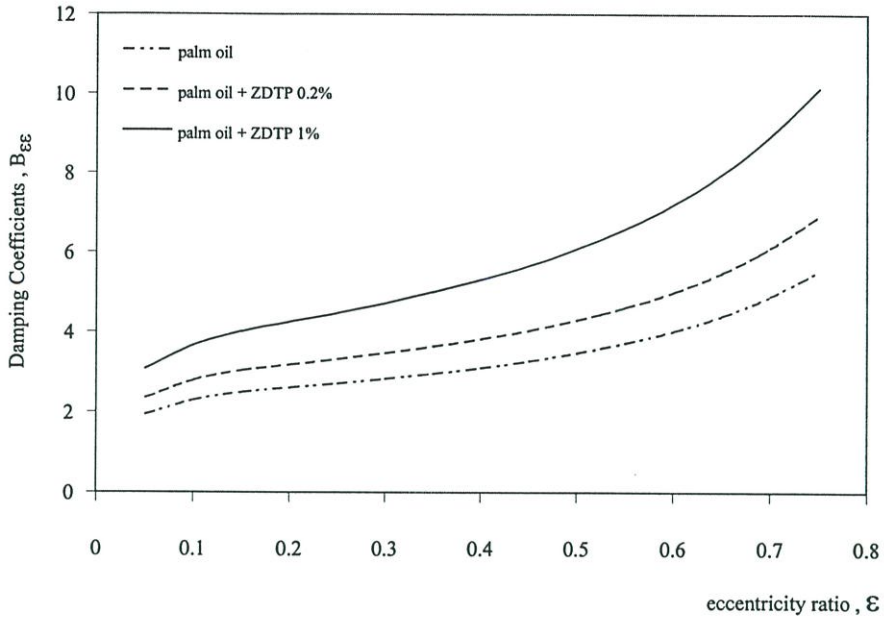
รูปที่ 9.84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแดมปีงกับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



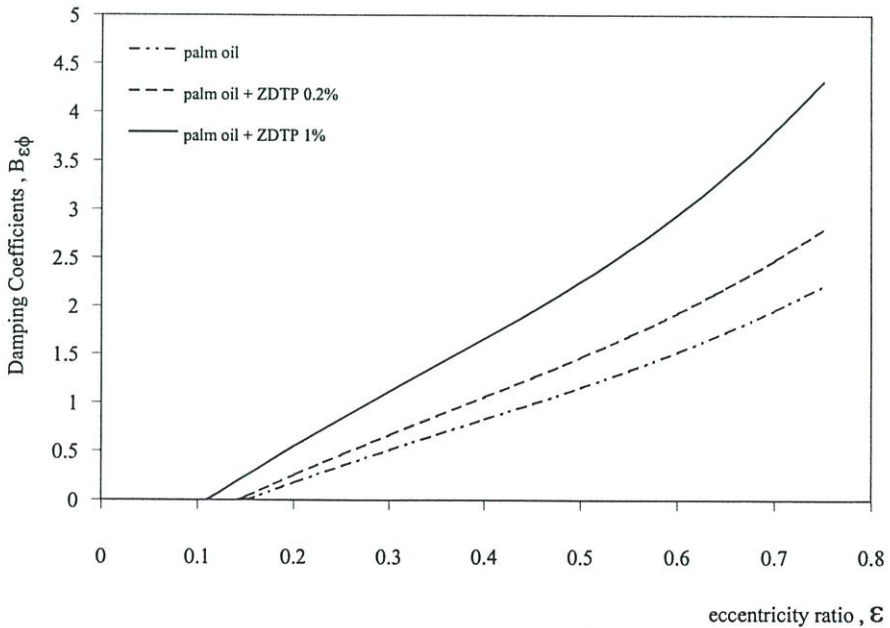
รูปที่ 9.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์กับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลทที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



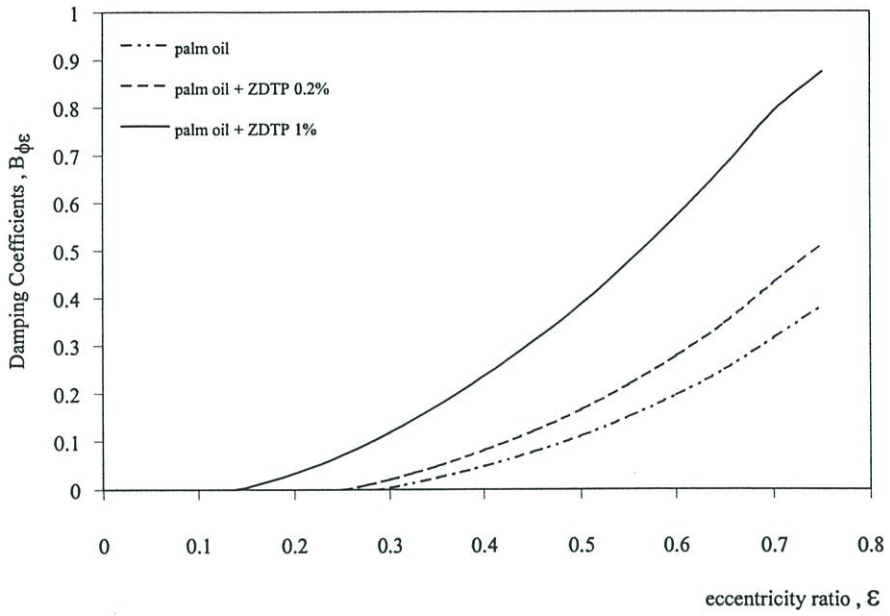
รูปที่ 9.86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์กับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลทที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันถั่วเหลือง



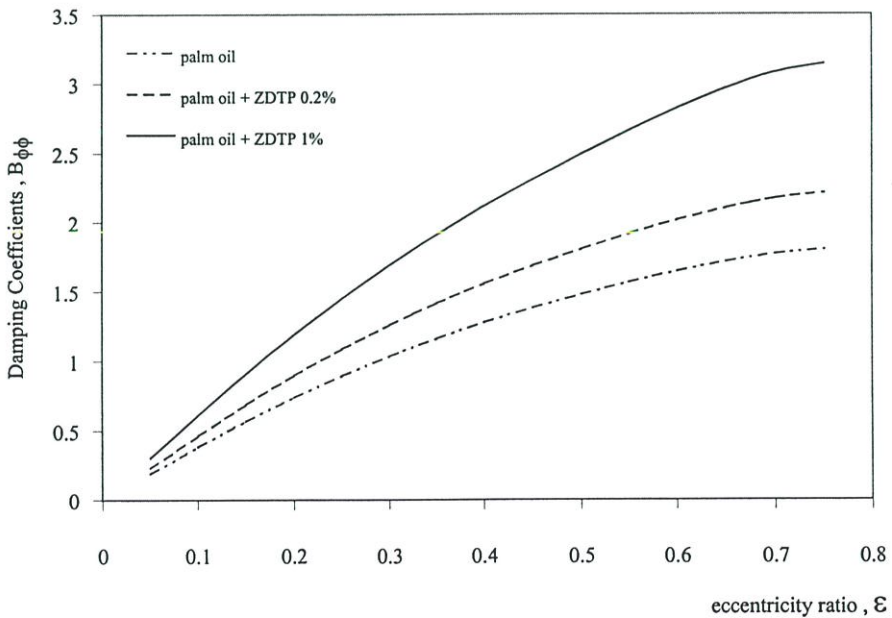
รูปที่ 9.87 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์กับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 9.88 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์กับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 9.89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์กับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 9.90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแอมป์กับอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่  $C = 0.1$  mm และ  $L/D = 1$  ของน้ำมันปาล์ม

## บทที่ 10

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 10.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของกาบรองลื่นเพลากลมโดยใช้น้ำมันพืชผสมกับสารไดอัลไคลด์ไดไตรโอฟอสเฟต (dialkyldithiophosphates, ZDT) ที่เป็นสารเพิ่มคุณภาพ มีคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งจากการหาความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราความเครียดเฉือน จากการใช้เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational viscometer) พบว่าน้ำมันพืชที่นำมาทำการทดสอบมีคุณสมบัติเป็นของไหล นอน-นิวโตเนียน แบบไคลลาแตนท์ สามารถเขียนอยู่ในรูป Power law model ได้ จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยใช้แบบจำลองดังกล่าว กับสมการการไหลจะทำให้ได้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ และสมการพลังงานสำหรับกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง จากสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์และสมการพลังงาน เมื่อทำการแก้สมการ โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข จะทำให้เราสามารถหาค่าการกระจายความดันและค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสร้างกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง ที่มีอัตราส่วน  $L/D$  เท่ากับ 1 และ 0.5 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการคำนวณซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่ภายใต้ความเร็วรอบคงที่พบว่าเมื่อเพิ่มภาระที่มากกระทำกับเพลาก็ทำให้เกิดพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับกาบรองลื่นจะส่งผลให้ค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันมีค่ามากขึ้นและค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงขึ้นไปด้วย
2. ที่ภายใต้ภาระคงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเพลาก็มีผลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น โดยค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันมีค่าลดลงและค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันมีค่าต่ำลงด้วย
3. จากการศึกษาพบว่าค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 1% มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชที่นำมาใช้ทดสอบชนิดอื่น
4. จากการศึกษาพบว่าค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสม ZDTP 1% มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชที่นำมาใช้ทดสอบชนิดอื่น

5. จากการทดลองและการคำนวณค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมัน และค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของกาบรองลื่นเพลากลมพบว่า มีแนวโน้มที่มีพฤติกรรมสอดคล้องกัน

ผลการทดลองที่ได้พบว่าแนวโน้มของพฤติกรรมมีลักษณะที่สอดคล้องกับการคำนวณ แต่เนื่องจากในทางทฤษฎีมีข้อสมมุติฐานว่าเป็น Adiabatic แต่ในทางปฏิบัติไม่ใช่เป็น Adiabatic ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนระหว่างผลทางทฤษฎีและผลการทดลอง รวมทั้งความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

## 10.2 ข้อเสนอแนะ

ทำการทดสอบระบบเพลลา และ กาบรองลื่นสำหรับใช้งานจริงเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่เพื่ออายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของน้ำมันพืช

ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสมสารเพิ่มคุณภาพที่ผสมลงในน้ำมันพืชที่นำมาใช้ทดสอบ และไม่ได้ทำการศึกษาถึงผลของการสึกหรอและการกัดกร่อนของน้ำมันพืชที่มีต่อวัสดุที่นำมาใช้ทำกาบรองลื่นเพลากลม

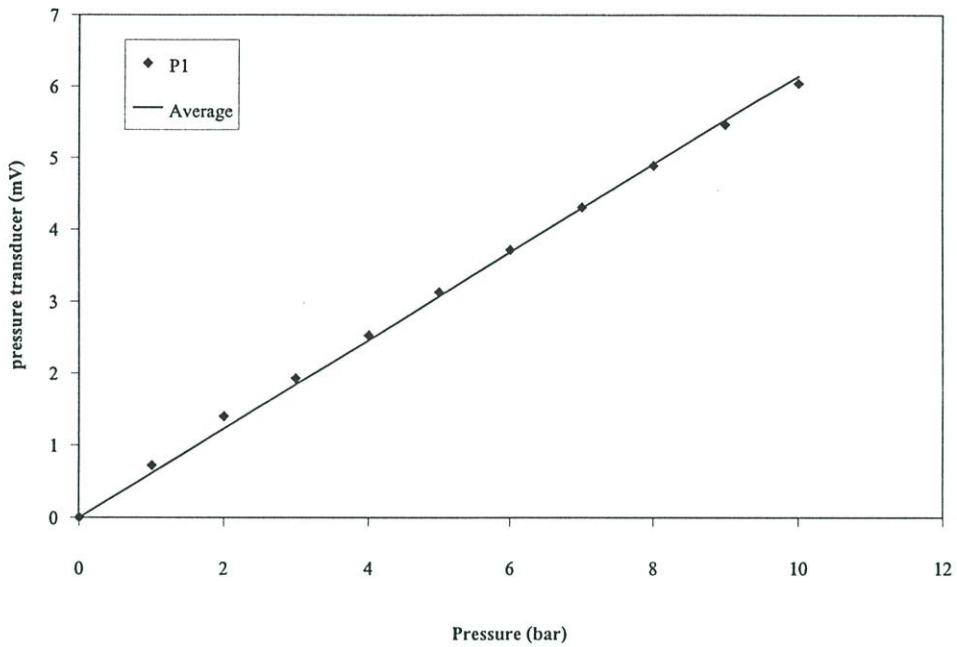
## เอกสารอ้างอิง

1. Reynolds, O. 1886 **On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beachamp Tower's Experiments.** Phil, Trans. Roy. Soc., 177 , 1886.
2. Horowitz, H.H, and Steidler, F.E. 1961. **Calculated performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearing .** ASLE Trans. Vol. 4.
3. Tanner, R.I.,1963. **Non-Newtonian Lubrication Theory and Its Application to the Short Journal Bearing .** Australian Journal of Applied Science, vol. 14,
4. Tanner, R.I., 1964. **Short Bearing Solution for Pressure Distribution in a Non-Newtonian Lubrication.** Trans. ASME Journal of Applied Mech.
5. Wada,S.,and Hayashi, H. 1971. **Hydrodynamic Lubrication of Journal Bearing by Pseudoplastic Lubricants.** Bulletin of the JSME
6. Safar, Z.S. 1979. **Journal Bearing Operating with Non-Newtonian Lubricant Films.** WEAR, vol. 53.
7. Mongkolwongrojn, M., Arunmetta,P. 2000. **Theoretical Characteristic of Hydrodynamic Journal Bearing Lubricated with Soybean-based Oil ,** 9<sup>th</sup> Nordic Symposium on Tribology : at Porvoo, Finland, 11-14 June
8. Ranny, M.W.,1973. **Lubricant Additives.** Noyes Data Co:London.
9. Schey, J.A. 1984. **Tribology in Metalworking : Friction, Lubrication and Wear,** American Society for Metals: Ohio.
10. Freeman,J.P,Padly,F.B and Sheppard, W.L. 1973. **Use of silicones in flying oils.** Jour. Amer. Oil Chem., 50,101.
11. Hashimoto H., Mongkolwongrojn M. 1993. **Advanced lubrication theory.** KMITL Bangkok.
12. Dien, I.K. and Elrod, H.G. 1983. **A generalized Steady-State Reynolds Equation for Non-Newtonian Fluids with Application to Journal Bearings.** Trans. ASME ,Jour. Lubr. Tech., vol. 105
13. Sakata,M. Takahasni,Y. and Sonehara,M. 1985. **Quality of flined food with palm oil.** Jour. Amer. Oil Chem. 62,449.
14. Csichos,H., 1978 **Tribology : A system approach to the science and Technology of friction,lubrication and wear.** Elsevier scientific publishing Co:New York.

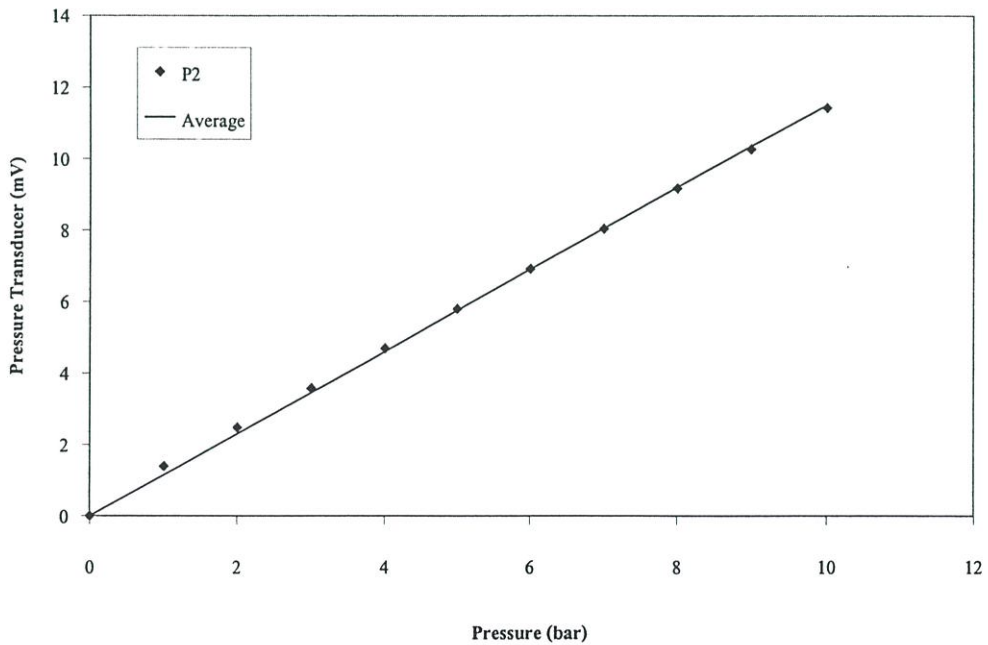
15. กอน้ำมันเชื้อเพลิง. 2538, สรุปการผลิต การนำเข้าและการจำหน่ายน้ำมันเชื้อเพลิงประจำปี 2538 : กรมทะเบียนการค้า
16. กอน้ำมันเชื้อเพลิง. 2539, สรุปการผลิต การนำเข้าและการจำหน่ายน้ำมันเชื้อเพลิงประจำปี 2539 : กรมทะเบียนการค้า
17. Stachowick, G.W., Batchlor, A.W. 1993. **Engineering Tribology**. Elsevier science publishers: Natherlands.
18. Bielely, C.A., and Anrovs., **The Lubrication Engineering Manual**. 1<sup>th</sup> ed. U.S.A.: United States steel Co., 197.
19. A.Z. Szeri, 1980. **Tribology : friction, lubrication and wear**. Mc Graw Hill Co: Newyork,
20. V.K. bhatai, Alka Chaudhra, G.A. Sivasankaran, R.P.S. bisht and Meenu kashyap. 1990. **Modification of Jojoba oil for lubricant formulations**. JAOCS, vol.67
21. J.V.fedor. 1963. **Half Sommerfeld appoximation for Finite Journal Bearings**. Transaction of the ASME Journal Basic Engineering.

## ภาคผนวก ก

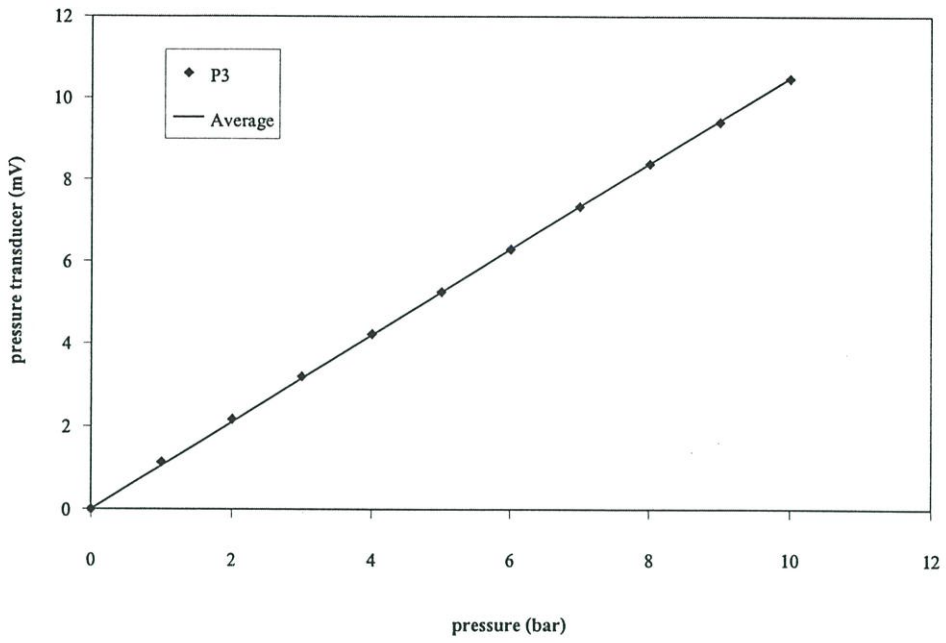
## กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer



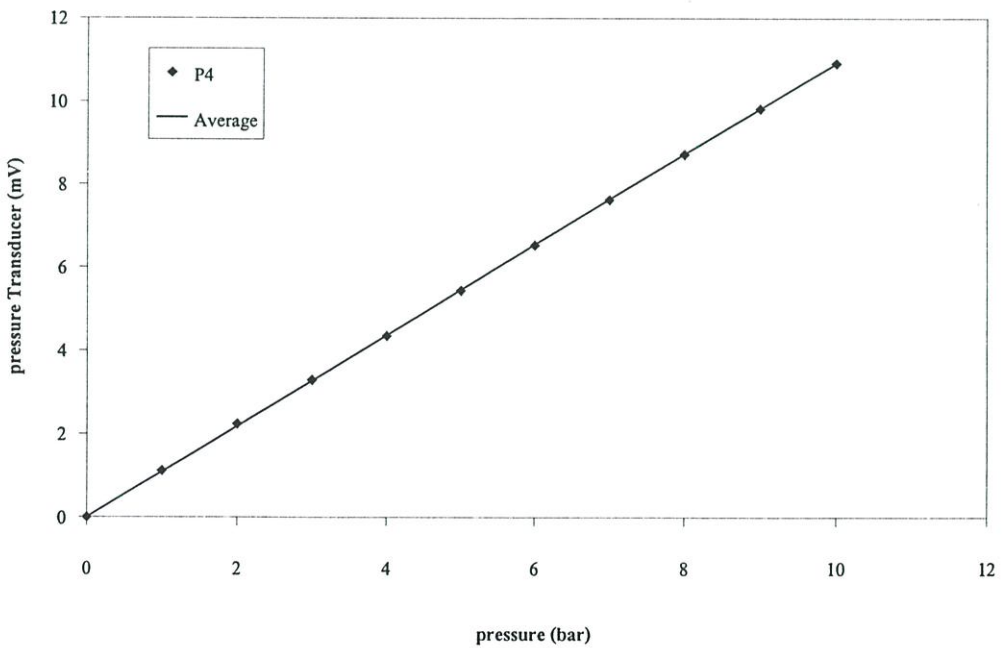
รูปที่ ก.1 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P1



รูปที่ ก.2 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P2



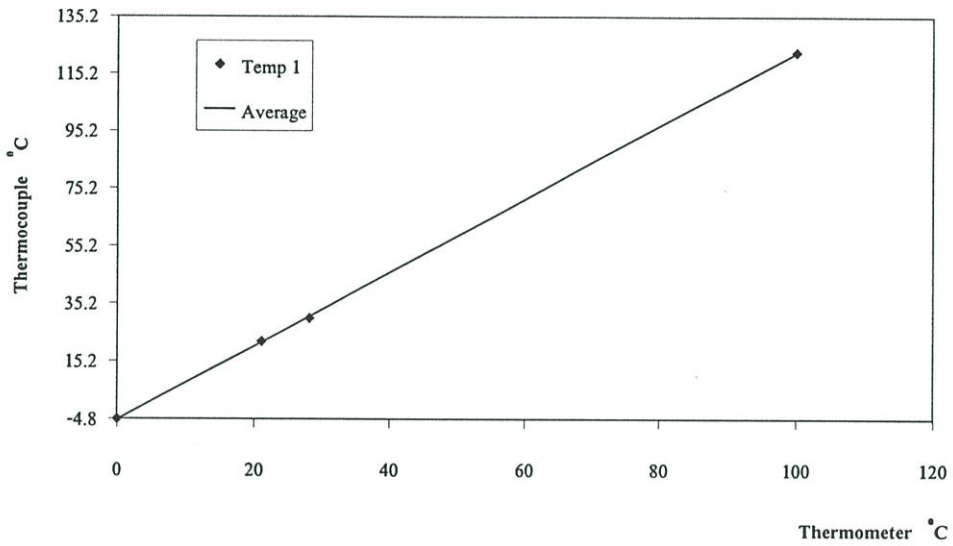
รูปที่ ก.3 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P3



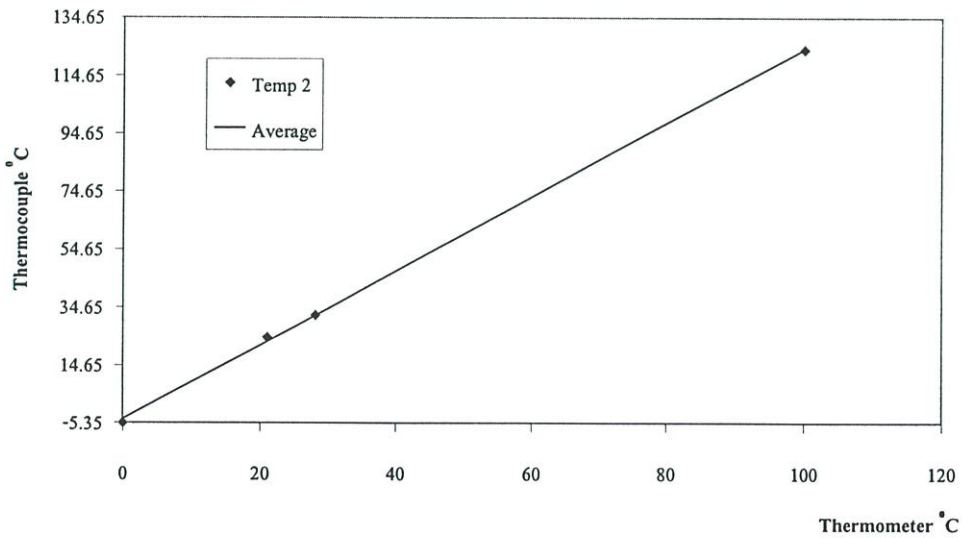
รูปที่ ก.4 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P4

## ภาคผนวก ข

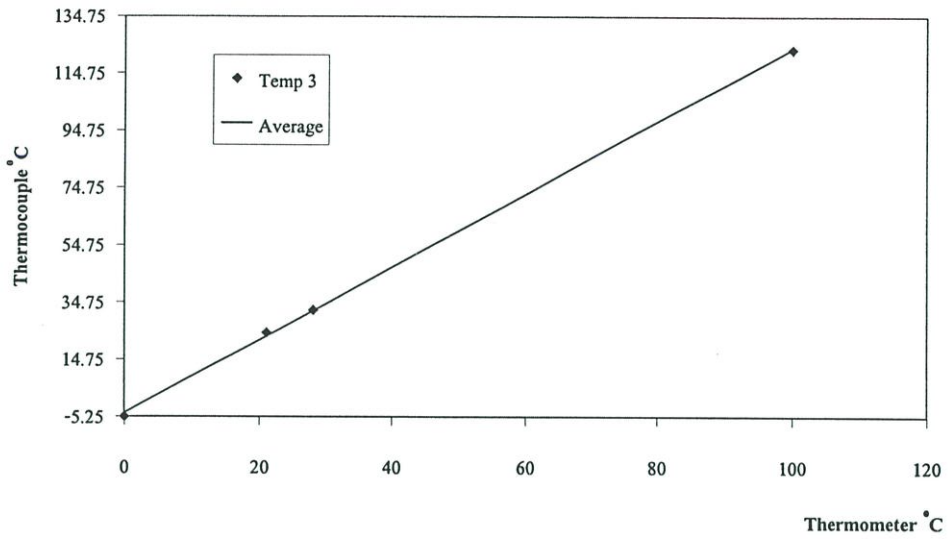
## กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple



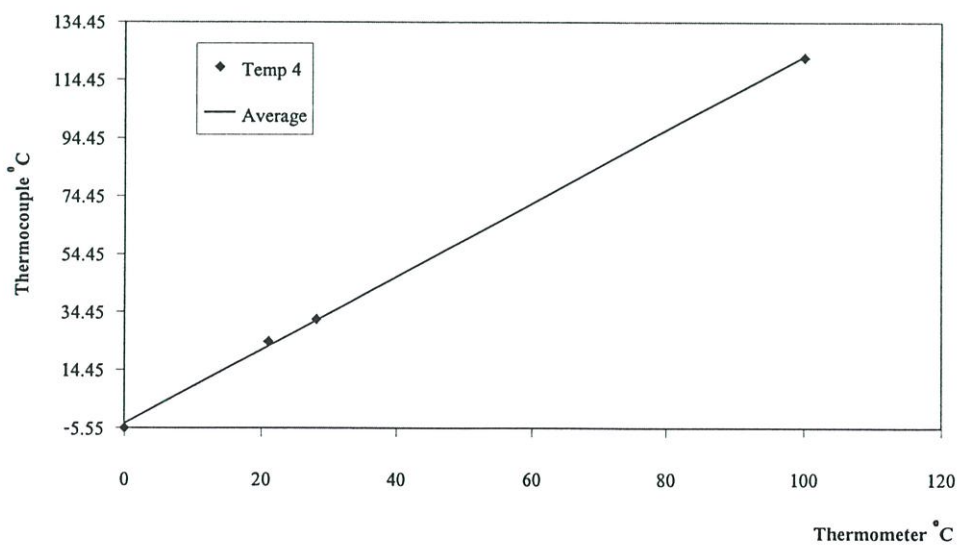
รูปที่ ข. 1 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T1



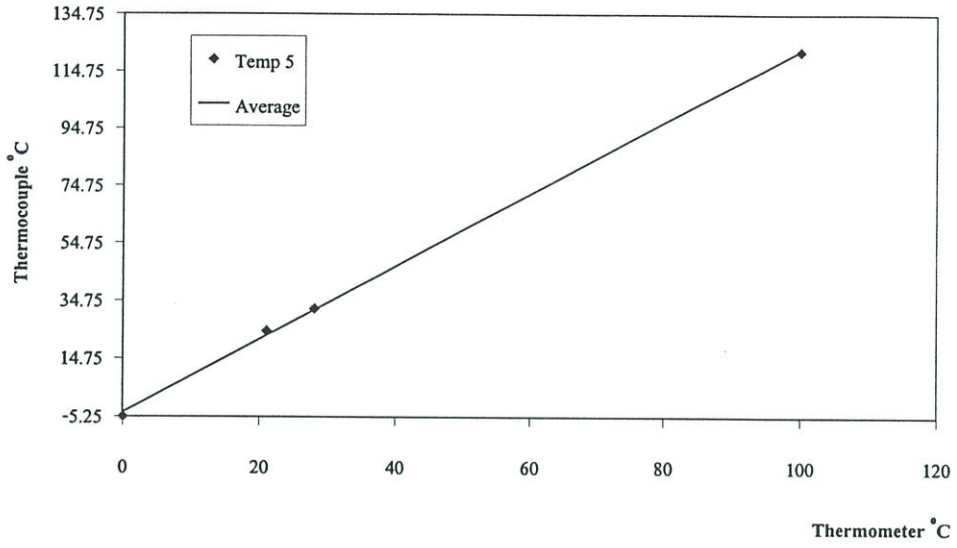
รูปที่ ข. 2 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T2



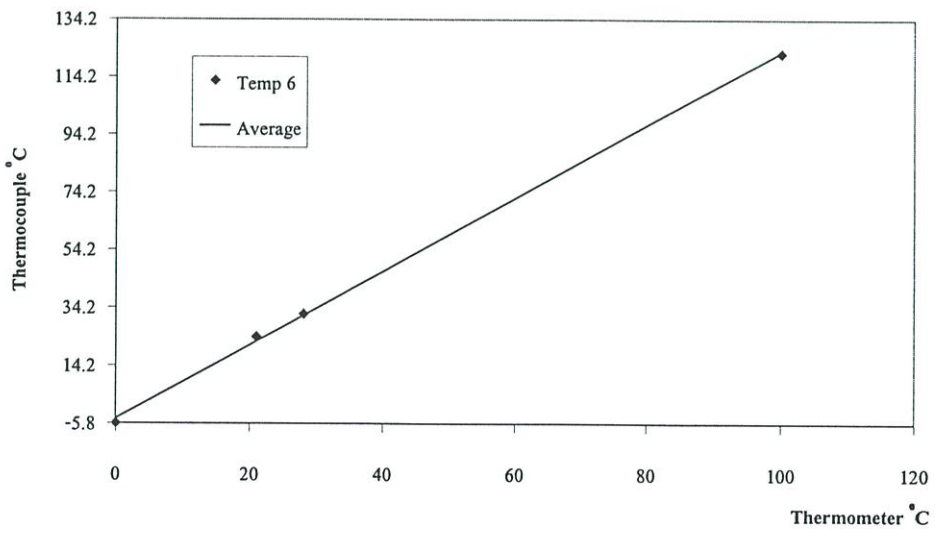
รูปที่ ข. 3 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T3



รูปที่ ข. 4 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T4



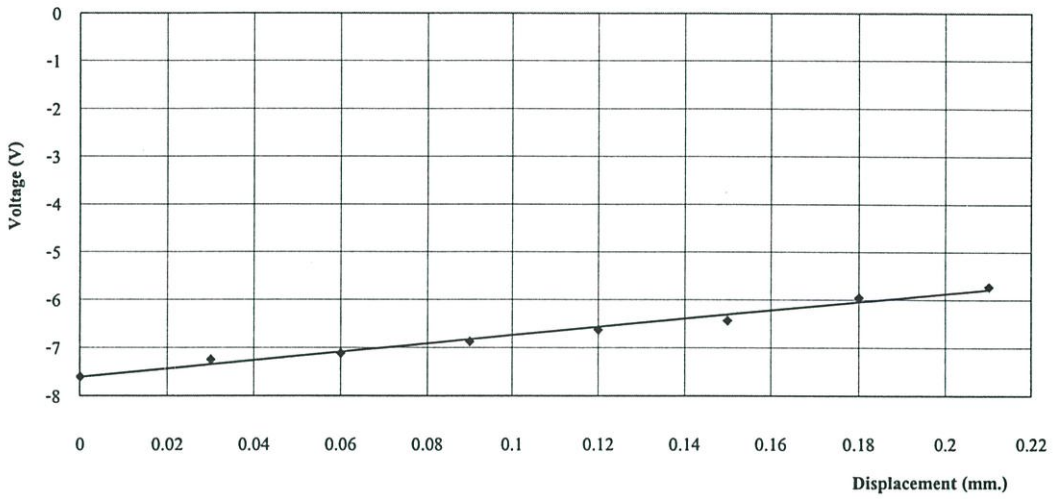
รูปที่ ข. 5 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T5



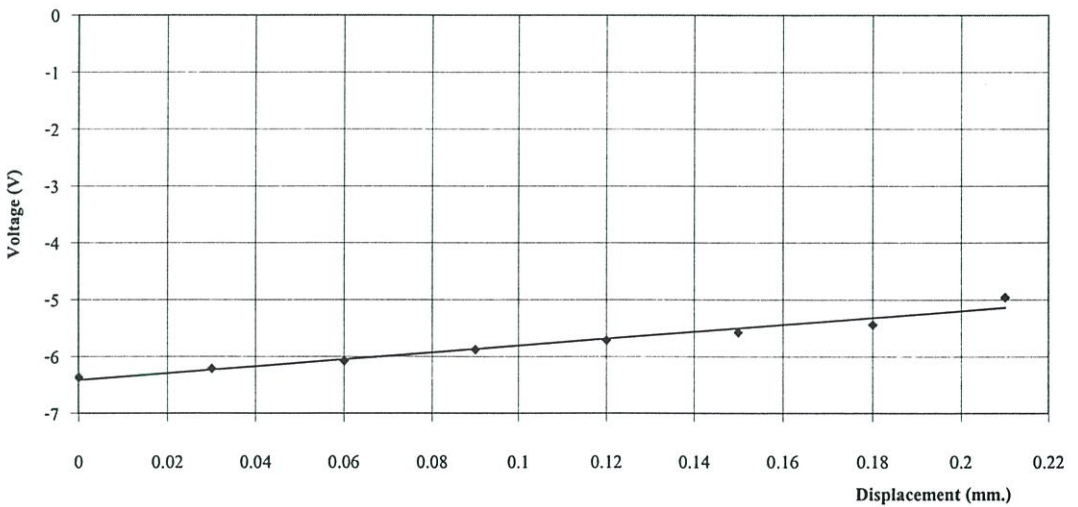
รูปที่ ข. 6 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T6

## ภาคผนวก ค

## กราฟแสดง Calibration curve –ของ Gapsensor



รูปที่ ค. 1 แสดง Calibration curve ของ Gapsensor , G1



รูปที่ ค. 2 แสดง Calibration curve ของ Gapsensor , G2

ภาคผนวก ง  
คุณสมบัติของน้ำมันทดสอบ

ตารางที่ ง. 1 คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลือง

คุณสมบัติ	น้ำมันถั่วเหลืองรีไฟน์	น้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2% by mass	น้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1% by mass
ความหนืดสมบูรณ์ $\mu$ (Pa. s) @25 °C @40 °C @60 °C @80 °C @100 °C	0.0559 0.0363 0.0219 0.0195 0.017	0.0539 0.0361 0.0218 0.0194 0.0169	0.0537 0.0348 0.0213 0.0192 0.0163
ความหนาแน่น $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) @40 °C $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) @100 °C	0.9168 0.8798	0.9149 0.8523	0.8767 0.8293
ค่าดัชนีความหนืด	170	165	164
ความหนืดจลน์ $\nu$ (cSt) @40 °C @100 °C	39.59 19.322	41.77 20.378	41.79 20.4
ค่าความร้อนจำเพาะ $C_p$ (J/g °C)	1.9994	1.9954	1.9842

ตารางที่ ง. 2 คุณสมบัติของน้ำมันปาล์ม

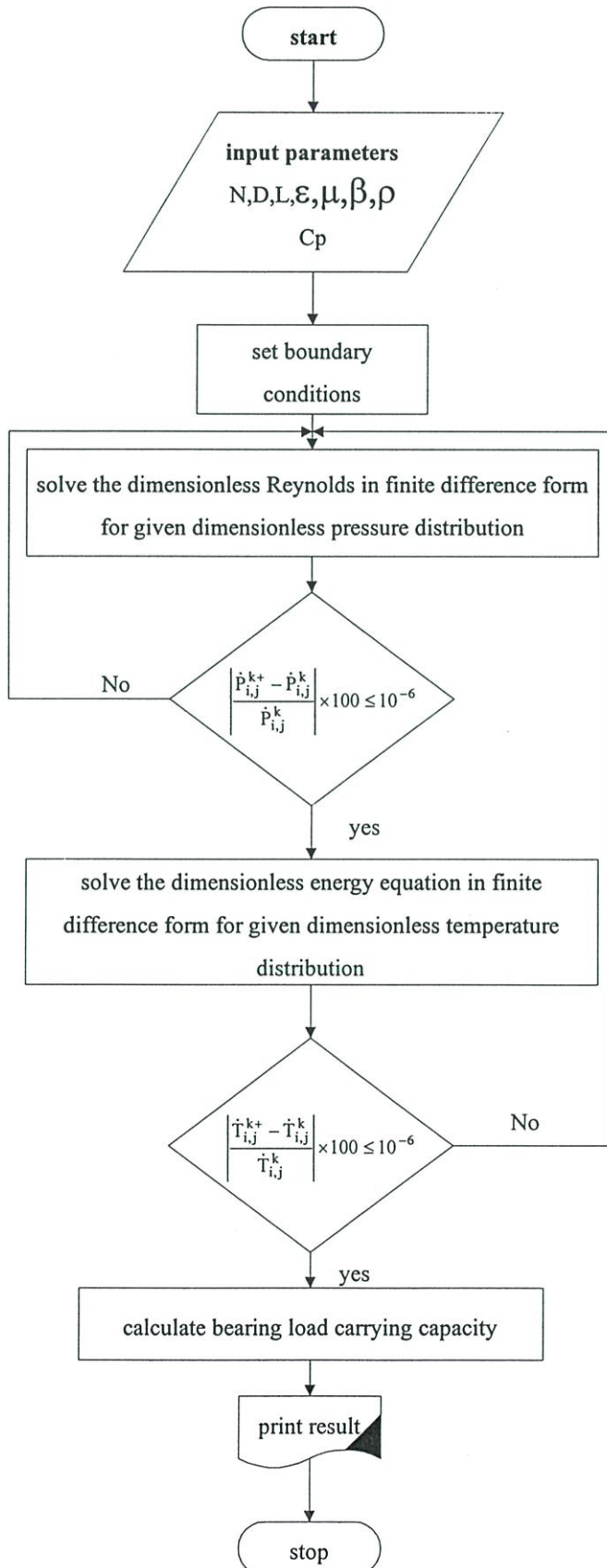
คุณสมบัติ	น้ำมันปาล์มรีไฟน์	น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 0.2% by mass	น้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1% by mass
ความหนืดสมบูรณ์ $\mu$ (Pa. S) @25 °C @40 °C @60 °C @80 °C @100 °C	0.0743 0.0476 0.0265 0.0205 0.0174	0.0738 0.0459 0.0265 0.0202 0.0171	0.0727 0.0438 0.0257 0.0198 0.0168
ความหนาแน่น $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) @40 °C $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) 100 °C	0.9293 0.882	0.903 0.8627	0.9027 0.8629
ค่าดัชนีความหนืด	166	164	163
ความหนืดจลน์ U (cSt) @40 °C @100 °C	47.132 19.047	48.521 19.821	52.689 20.164
ค่าความร้อนจำเพาะ Cp (J/g °C)	2.0379	2.0338	2.0130

ตารางที่ ง. 3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในปัจจุบัน

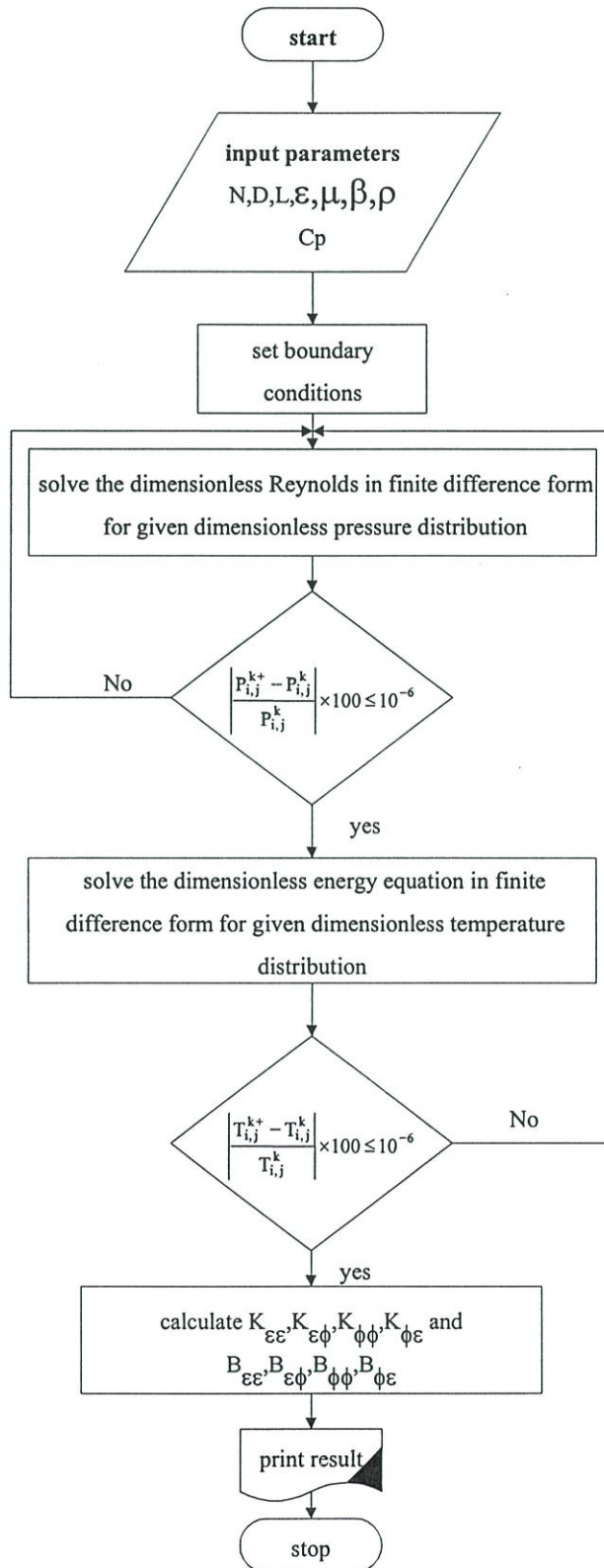
คุณสมบัติ	SAE 40	SAE 90
ความหนืดสมบูรณ์ $\mu$ (Pa. S) @25 °C @40 °C @60 °C @80 °C @100 °C	0.345 0.144 0.0565 0.0253 0.0165	0.505 0.204 0.0782 0.0365 0.0203

## ภาคผนวก จ

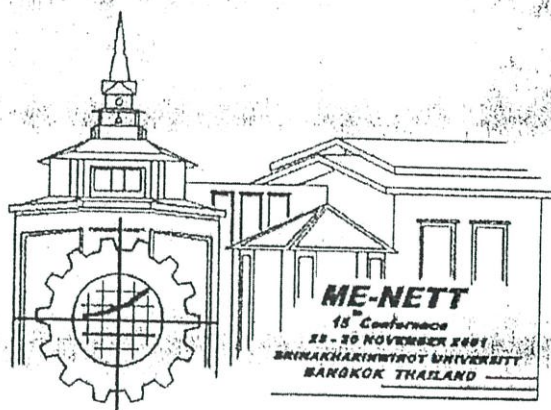
## แสดงผังไคอะแกรมของการคำนวณ static



## แสดงผังไต่อะแกรมของการคำนวณ dynamic load



ภาคผนวก ช  
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์



บทความวิชาการ : การประชุมวิชาการ  
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 15

เล่มที่ 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

MM-25

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15

## การหล่อลื่นของกบารองลื่นเพลากลม แบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ด้วยน้ำมันถั่วเหลือง Thermohydrodynamic Lubrication of Journal Bearing with Soybean-based Oil

มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และ อุทาน นุจันท์แก้ว  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนน ฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร 02-3269987 , โทรสาร 02-3269063

Mongkol Mongkolwongrojn and U-than Nujunkaew  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok 10520, Thailand  
Tel: 02-3269987, Fax 02-3269063

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอพฤติกรรมทางสถิตย์ของ Thermohydrodynamic journal bearing โดยใช้ไขมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ผสมกับสารเติมแต่ง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือนของไขมันถั่วเหลืองหาได้จากกราฟทดลอง โดยใช้ Power law model และสมการ เรย์โนลด์ กับ สมการ Adiabatic energy equation ได้ถูกประยุกต์ใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานของลื่นด้วยไขมันถั่วเหลืองผสมสารเติมแต่ง ผลการคำนวณเชิงตัวเลขได้แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มไขมัน และการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มไขมัน

### Abstract

This paper presented the static characteristic of thermohydrodynamic journal bearing with soybean-based oil. The non-Newtonian soybean-based oil was mixed with additive. The relationship between shear stress and shear strain rate of the soybean-based oil can be obtain and can be expressed as experimentally the power-law model. Reynolds equation and adiabatic energy equation were formulated to calculate the static characteristic of journal bearing with soybean-based oil. Numerical results show the oil film pressure distribution and temperature distribution.

### 1. บทนำ

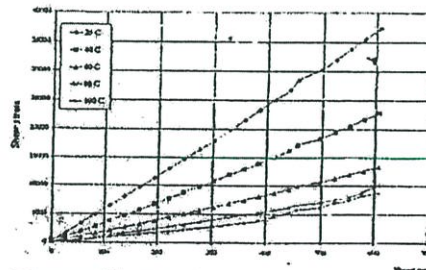
เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทาน และความร้อนจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่น ซึ่งในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่จะเป็นน้ำมันแร่ นับวันยิ่งมีราคาแพงมากขึ้น ซึ่งในบทความนี้จะได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่นที่เป็นไขมันถั่วเหลืองซึ่งมีราคาถูกกว่าและไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการกระจายความเค้นและการกระจายอุณหภูมิของไขมันถั่วเหลือง ที่นำมา

ใช้เป็นสารหล่อลื่นโดยการเติมสารเติมแต่ง เพื่อไม่ให้ความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ได้

### 2. ทฤษฎี

#### 2.1 Flow Characteristic ของไขมันถั่วเหลือง

ในบทความนี้ได้ใช้ไขมันถั่วเหลืองผสมสารเติมแต่งที่เป็น polyisobutylene 4% และ silicone oil 0.02% โดยนำหนัก Flow characteristic ของไขมันถั่วเหลืองได้มาจากการทดลองดังรูปที่ 1 โดยใช้ rotational rheometer according



Temperature, C	m	n	$\mu, \text{mPa}\cdot\text{s}$
25	46.862	1.043	60.723
40	23.916	1.071	36.686
50	11.975	1.094	21.100
80	5.744	1.145	13.760
100	0.587	1.497	11.730

รูปที่ 1 Flow characteristic curve ของไขมันถั่วเหลือง จากผลการทดลองเราทราบว่าไขมันถั่วเหลืองมีพฤติกรรมเป็นของไหล non-Newtonian แบบ dilatant ซึ่งค่าระหว่าง shear stress และ shear

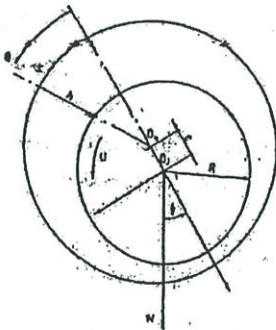
MM-26

rate เป็น nonlinear ซึ่งเราสามารถประมาณการได้โดยใช้ power-law model

$$\tau = m \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy} \quad (1)$$

ค่า m เป็นค่าของความหนืด, n เป็นค่าดัชนีของ power-law model,  $\tau$  เป็นค่าความเค้นเฉือน และ  $du/dy$  เป็นค่าอัตราความเฉือน

2.2 สมการโมดัลไฮดรีนอลด์ (Modified Reynolds's equation)



รูปที่ 2 ทางเรขาคณิตของ กาบร่องลื่นเพลากลม

ในกรณีที่เป็น 2 มิติ จากสมการที่ (1) จะได้

$$\mu = m \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (2a)$$

$$\tau_{yz} = m \left( \frac{dw}{dy} \right)^{n-1} \frac{dw}{dy} \quad (2b)$$

ค่า  $\tau_{xy}$  และ ค่า  $\tau_{yz}$  คือค่าความเค้นเฉือนในทิศทาง x และ ทิศทาง z ตามลำดับ ค่า u, w เป็นความเร็วในทิศทาง x และ z ตามลำดับจาก power-law model สำหรับ shear viscosity จะได้

$$\mu = m \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

จากสมการ Navier-Stokes ในทิศทาง x และ z

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (4b)$$

จากสมการที่ (1) ถึง (4) นำมาเขียนใหม่ได้เป็นสมการ modified Reynolds ดังสมการที่ (5)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{(u)^n}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5)$$

โดยมีสมการความหนาของฟิล์มน้ำมันเป็น

$$h = c(1 + E \cos \theta) \quad (6)$$

เขียนสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} x &= R\theta & z &= \bar{z}L \\ h &= \bar{h}C & P &= \left( \frac{mn(u)^n R}{C^{n+1}} \right) \bar{P} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

นำสมการที่ (7) แทนลงในสมการที่ (5) จะได้สมการ modified Reynolds ไร้มิติดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \bar{h}^{n+2} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + n \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{h}^{n+2} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \right) \\ = \frac{6mn}{\mu} \left( \frac{U}{c} \right)^{n-1} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\begin{aligned} \rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ = \tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (9)$$

k = heat conductivity coefficient

อินทิเกรตสมการที่ (10) ตลอดความหนาของฟิล์มน้ำมัน

MM-27

$$\rho c_p \int_0^h \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy - \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) \quad (10)$$

$$= \int_0^h u \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy + \int_0^h w \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy$$

จากการอินทิเกรตสมการที่ (10) จะได้ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\int_0^h \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy = h \left( u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + w_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \frac{1}{h} \int_0^h u dy = \frac{u}{9} - \frac{h^{n+1}}{12\mu n^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \\ w_m &= \frac{1}{h} \int_0^h w dy = -\frac{h^{n+1}}{12\mu n^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \\ T_m &= \frac{1}{h} \int_0^h T dy \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ในกรณีที่มีความเร็วสูงค่าการนำความร้อน (heat conduction) จากฟิล์มน้ำมันไปยังเพลลา (journal) และผิวการเบรค (bearing surface) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะเป็นไปคามข้อสมมุติว่าทั้งเพลลาและการเบรคเป็น การหุ้มฉนวนโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0 \quad (13)$$

จากการสมมูลย์ของแรงในฟิล์มน้ำมันเราจะได้

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

แทนสมการที่ (12) , (13) , (14) , (15) ลงในสมการที่ (11) จะได้

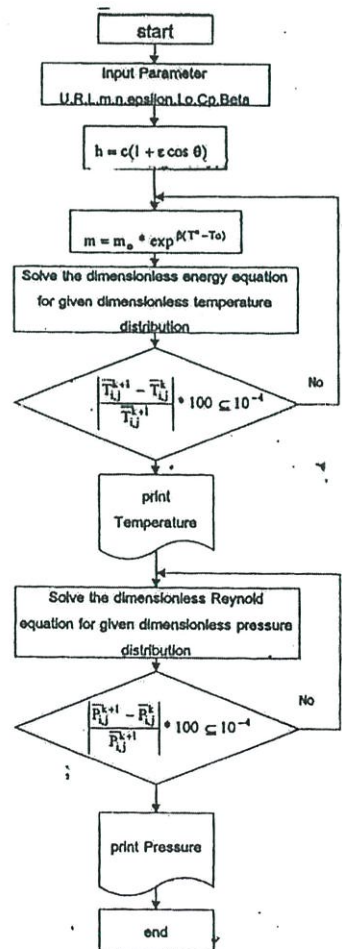
$$\rho c_p \left[ \left( \frac{uh}{2} - \frac{h^{n+2}}{12\mu n^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T_m}{\partial x} - \left( \frac{h^{n+2}}{12\mu n^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right] = m \left( \frac{u}{c} \right)^{n-1} \left[ \left( \frac{hu}{2} - \frac{h^{n+2}}{12\mu n^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{h^{n+2}}{12\mu n^{n-1}} \frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{m} &= \frac{m}{m_0} = \exp \left\{ -\beta(T - T_0) \right\} \\ \bar{T} &= \beta(T - T_0) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ในสมการที่ (17) คือตัวแปรไร้มิติ ค่า  $\bar{m}$  เป็นค่าดัชนีความหนืด ค่า  $\beta$  เป็นค่าดัชนีของอุณหภูมิความหนืด  $m_0$  จะเป็นค่า ดัชนีของความหนืด น้ำมันที่ทางเข้า และ  $T_0$  เป็นอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้า

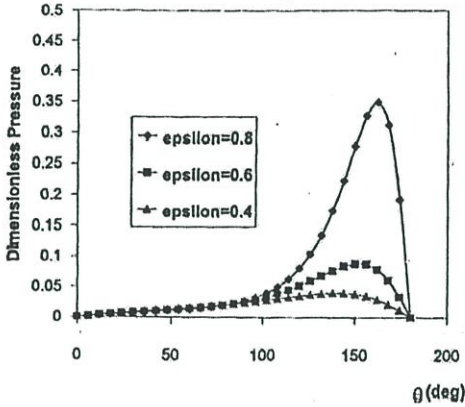
3.ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

จากสมการ modified Reynolds และสมการ energy equation ที่เป็น dimensionless เราทำการคำนวณไปพร้อมๆกันโดยใช้วิธี finite difference ตาม flow chart ดังแสดงในรูปที่ 3 นี้

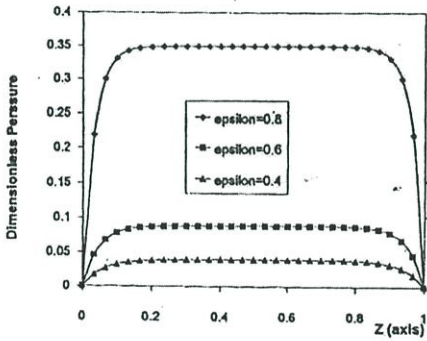


รูปที่ 3 flow chart แสดงการคำนวณ

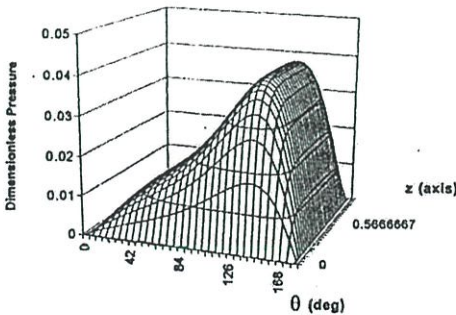
MM-29



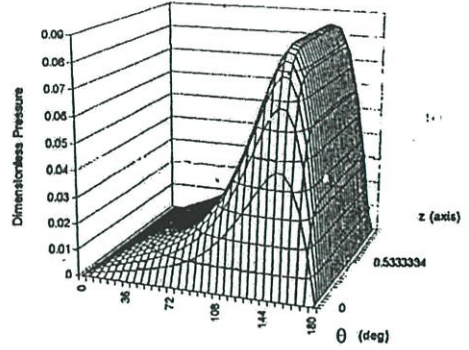
รูปที่ 8 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันในแกน  $\theta$



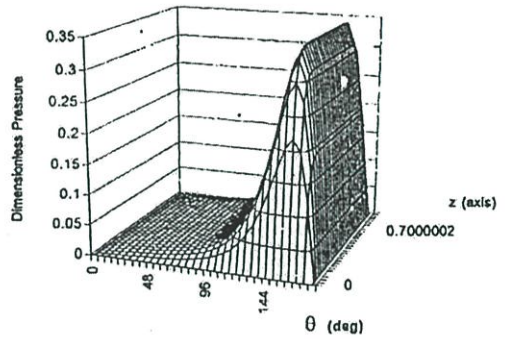
รูปที่ 10 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันในแกน z



รูปที่ 11 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่  $\epsilon = 0.4$



รูปที่ 12 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่  $\epsilon = 0.6$



รูปที่ 13 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่  $\epsilon = 0.8$

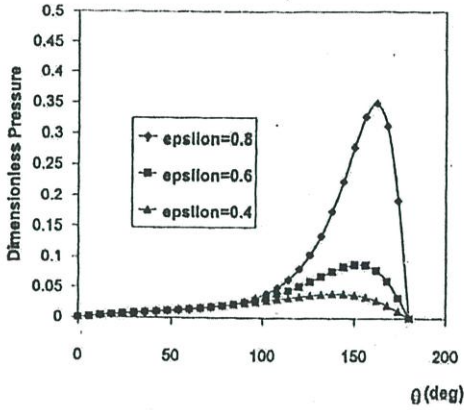
จากรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่า  $\epsilon$  หรือค่าอัตราการเยื้องศูนย์กลางมีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ยิ่งถ้าค่า  $\epsilon$  มากค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันยิ่งสูงขึ้น ส่วนในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 13 จะเป็นค่าการกระจายของแรงดันน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและค่าอัตราการเยื้องศูนย์กลาง ( $\epsilon$ )

5.สรุป

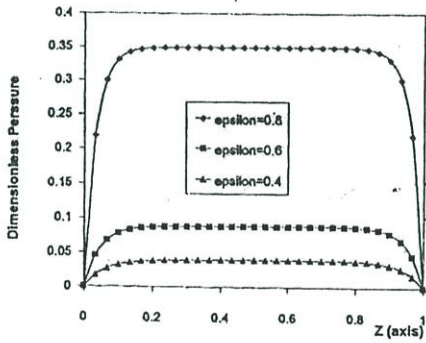
การศึกษาพฤติกรรมของแบริ่งเพลสทอลแบบ Thermo-hydrodynamicหล่อลื่นด้วยน้ำมันก๊วยเทิลสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) น้ำมันก๊วยเทิลมีคุณสมบัติเป็นของไหล non-Newtonian สามารถเขียนสมการในรูปของ power-law model
- 2) การกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมันและการกระจายของอุณหภูมิ น้ำมันจะขึ้นต่อกัน แรงเสียดทานของน้ำมันทำให้เกิดความร้อนมีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำมันเปลี่ยนแปลง
- 3) อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีผลต่อแรงดันในฟิล์มน้ำมัน

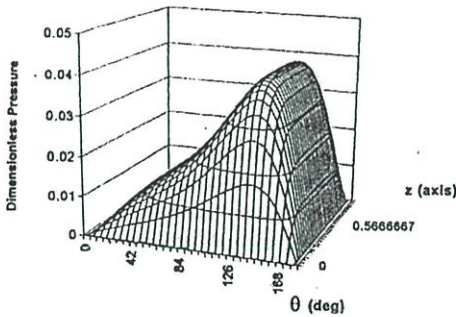
MM-29



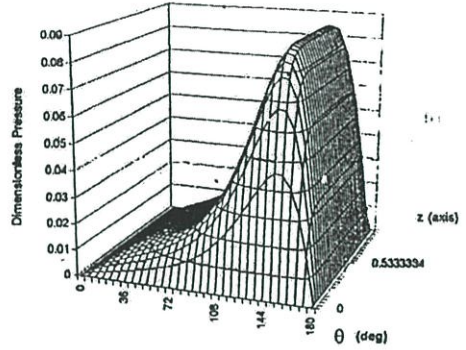
รูปที่ 10 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันในแกน  $\theta$



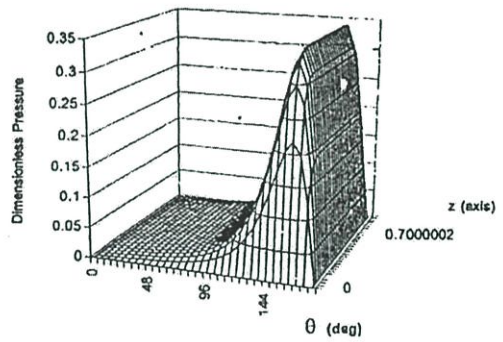
รูปที่ 11 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันในแกน z



รูปที่ 12 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่  $\epsilon = 0.4$



รูปที่ 13 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่  $\epsilon = 0.6$



รูปที่ 14 การกระจายความดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมันที่  $\epsilon = 0.8$

จากรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่า  $\epsilon$  หรือค่าอัตราการเยื้องศูนย์มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ยิ่งถ้าค่า  $\epsilon$  มากค่าการกระจายอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันยิ่งสูงขึ้น ส่วนในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 13 จะเป็นค่าการกระจายของแรงดันน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและค่าอัตราการเยื้องศูนย์ ( $\epsilon$ )

5.สรุป

การศึกษาพฤติกรรมของแบริ่งเพลากลมแบบ Thermohydrodynamicหล่อลื่นด้วยน้ำมันถั่วเหลืองสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) น้ำมันถั่วเหลืองมีคุณสมบัติเป็นของไหล non-Newtonian สามารถเขียนสมการในรูปของ power-law model
- 2) การกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมันและการกระจายของอุณหภูมิ น้ำมันจะขึ้นต่อกัน แรงเสียดทานของน้ำมันทำให้เกิดความร้อนมีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำมันเปลี่ยนแปลง
- 3) อุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันจะมีผลต่อแรงดันน้ำมันในฟิล์มน้ำมัน

MM-30

- 4) การกระจายอุณหภูมิและการกระจายแรงคั้นในฟิล์มน้ำมันจะขึ้น  
กับค่าอัตราความเยื้องศูนย์กลาง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Conner, J., Bayd, J., Avallone E.A, " Standard Handbook of Lubrication Engineering" ,Mc-Graw Hill, New York, 1968.
- [2] Horowitz, H.H., Steindler F.E., " The Calculated Journal Bearing Performance of Polymer Thickened Lubricants", ASLE Trans., Vol.3 No.1, 1960
- [3] Horowitz, H.H., Steindler F.E., " Calculated Performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearing", ASLE Trans., Vol.4, 1961.
- [4] Hashimoto, H., Wada, S., " The Effects of Fluid Inertia Forces in Parallel Circular Squeeze Film Bearings Lubricated with Pseudo-Plastic Fluid" ,ASME
- [5] Dien, Y.G. and Elrod, H.G., " A Generalized Steady State Reynolds Equation for the Non-Newtonian Fluid with Application to Journal Bearings", Transaction of the ASME Journal of Lubrication Technology, 1983, Vol.105.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายอุทาน หนูจันทร์แก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	21 พฤษภาคม 2512
วุฒิการศึกษา	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปีการศึกษา 2539
ประสบการณ์การทำงาน	
2534:	THAIKENZAISHA CO.,LTD.
2537:	PHILLIP HOZMANN CO.,LTD.
ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์	
2544:	“THERMOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF JOURNAL BEARING WITH SOYBEAN-BASED OIL”,การประชุมวิชาการเครื่องกลข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15
2545:	“EXPERIMENTAL STUDY ON JOURNAL BEARING WITH SOYBEAN-BASED OILS”,การประชุมวิชาการเครื่องกลข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16