

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง

Experimental Study on Wear Reduction of Wheels and Rails under Line

Contact



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง
Experimental Study on Wear Reduction of Wheels and Rails under Line
Contact



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง

Experimental Study on Wear Reduction of Wheels and Rails under Line Contact

ผู้จัดทำ

นาย ชัยโรจน์ ทิทธิธีรวัช รหัสประจำตัว 46010540

นาย อนุจิต มงคล รหัสประจำตัว 46010913


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.มงคล มงคลวงษ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง

นาย ชัยโรจน์ พิสุทธิรัชต์ 46010540

นาย อนุชิต มงคล 46010913

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับล้อและรางจะเห็นได้ว่าการสึกหรอเกิดขึ้น ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง จะมีการทดลองเกี่ยวกับการหล่อลื่นล้อ เพื่อให้การสึกหรอที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุนและลื่นไถลให้ลดน้อยลง โดยค่าการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับ โหลดและความเร็วรอบที่กระทำกับล้อและราง วิธีการหล่อลื่นนั้นจะทำการใส่สารหล่อลื่นเข้าตรงบริเวณที่ผิวสัมผัส โดยมีลักษณะเป็นฟิล์มทำให้เกิดแรงดันกระทำต่อโหลด ซึ่งในการทดลองนั้นจะทำการตั้งค่าที่จะทำการทดลองด้วยแรงกดเป็นเส้นตรงด้วยแรงกด 500 kg และ 1000 kg โดยแรงกดที่กระทำนั้นจะมีทั้งแรงกดในแนวแกนและแรงกดในแนวรัศมี ที่ระดับความเร็วรอบ 650 rpm และ 1080 rpm

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองคือ ขาระบี และ ไขมันปาล์ม ผลการทดลองที่ได้จะแสดงถึงการสึกหรอของล้อและรางจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มากกระทำ, ความเร็วรอบ และ การหล่อลื่น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะนำล้อไปชั่งน้ำหนักแบบละเอียดเพื่อทำการหาค่าน้ำหนักที่หายไป นั้นหมายถึงค่าของการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับล้อนั่นเอง สำหรับแรงที่มากกระทำมีค่าสูงและความเร็วรอบมีค่ามาก ทำให้อัตราการสึกหรอจะมีค่าสูงและเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย

Experimental Study on Wear Reduction of Wheels and Rails under Line

Contact

Chaiyarojn Pisitrach 46010540

Anuchit Mongkol 46010913

Assoc. Prof. Dr.Mongkol Mongkolwongroj Advisor

Abstract

This project deals with the experimental study on wear characteristics of a wheel moving on the rail both rolling and sliding. Test prototype was design and construction in order to obtain sliding motion with varying load and speed. The 500 kilograms and 1,000 kilograms loads were applied in both radial and axial directions with 650 rpm and 1,080 rpm.

The lubrications for the wheel and rail are grease and palm kanel oil. The experiment results show the wear of wheel and rail are related to the loads, speed and lubricant. For high load and high speed, the wear are very serious and cause high temperature.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีโดยผู้จัดทำได้รับการสนับสนุนจาก รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อีกทั้งเป็นบุคคลที่ให้คำปรึกษาและให้แนวทางในการทำโครงการตลอดมาจนเสร็จสำเร็จเป็นปริญญาบัตรฉบับนี้

อนึ่งผู้จัดทำปริญญาบัตรใคร่ขอแสดงความขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือทดสอบปรับความเที่ยงตรงของชุดทดสอบและเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้ง อาจารย์เมธี ลี้มกุล และคุณมณฑา เทียมเมือง ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์การทดลอง ทำให้โครงการนี้และปริญญาบัตรนี้สำเร็จ

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจใส่เสมอมาในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย ชัยโรจน์ พิสิทธ์รัชต์

นาย อนุชิต มงคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง

นาย ชัยโรจน์ พิสุทธิรัชต์ 46010540

นาย อนุชิต มงคล 46010913

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับล้อและรางจะเห็นได้ว่ามีการสึกหรอเกิดขึ้น ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดเป็นเส้นตรง จะมีการทดลองเกี่ยวกับการหล่อลื่นล้อ เพื่อให้การสึกหรอที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุนและเลื่อน โหลดให้ลดน้อยลง โดยค่าการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับ โหลดและความเร็วรอบที่กระทำกับล้อและราง วิธีการหล่อลื่นนั้นจะทำการใส่สารหล่อลื่นเข้าตรงบริเวณที่ผิวสัมผัส โดยมีลักษณะเป็นฟิล์มทำให้เกิดแรงดันกระทำต่อ โหลด ซึ่งในการทดลองนั้นจะทำการตั้งค่าที่จะทำการทดลองด้วยแรงกดเป็นเส้นตรงด้วยแรงกด 500 kg และ 1000 kg โดยแรงกดที่กระทำนั้นจะมีทั้งแรงกดในแนวแกนและแรงกดในแนวรัศมี ที่ระดับความเร็วรอบ 650 rpm และ 1080 rpm

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองคือ จาระบี และ ไขมันปาล์ม ผลการทดลองที่ได้จะแสดงถึงการสึกหรอของล้อและรางจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มากกระทำ, ความเร็วรอบ และ การหล่อลื่น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะนำล้อ ไปชั่งน้ำหนักแบบละเอียดเพื่อทำการหาน้ำหนักที่หายไป นั้นหมายถึงค่าของการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับล้อนั่นเอง สำหรับแรงที่มากกระทำมีค่าสูงและความเร็วรอบมีค่ามาก ทำให้อัตราการสึกหรอจะมีค่าสูง และเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย

Experimental Study on Wear Reduction of Wheels and Rails under Line Contact

Chaiyarojn Pisitrach 46010540

Anuchit Mongkol 46010913

Assoc. Prof. Dr.Mongkol Mongkolwongrojn Advisor

Abstract

This project deals with the experimental study on wear characteristics of a wheel moving on the rail both rolling and sliding. Test prototype was design and construction in order to obtain sliding motion with varying load and speed. The 500 kilograms and 1,000 kilograms loads were applied in both radial and axial directions with 650 rpm and 1,080 rpm.

The lubrications for the wheel and rail are grease and palm kanel oil. The experiment results show the wear of wheel and rail are related to the loads, speed and lubricant. For high load and high speed, the wear are very serious and cause high temperature.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีโดยผู้จัดทำได้รับการสนับสนุนจาก รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โครงการงาน อีกทั้งเป็นบุคคลที่ให้คำปรึกษาและให้แนวทางในการทำโครงการงาน ตลอดจนงานเสร็จสำเร็จเป็นปริญญาบัตรฉบับนี้

อนึ่งผู้จัดทำปริญญาบัตรนี้ขอแสดงความขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือทดสอบปรับความเที่ยงตรงของชุดทดสอบและเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้ง อาจารย์เมธี ลิ่มกุล และคุณมณฑา เทียมเมือง ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์การทดลอง ทำให้โครงการนี้และปริญญาบัตรนี้สำเร็จ

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย ชัยโรจน์ พิสิทธิ์รัชต์

นาย อนุชิต มงคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์คำย่อ

- a = ความยาวของแกนย่อยของบริเวณผิวสัมผัสรูปวงรีในทิศทางในการกลิ้ง (มิลลิเมตร)
 a' = ขนาดกึ่งหนึ่งของล้อและลูกกลิ้งที่ผิวสัมผัสในทิศทางของการหมุน (มิลลิเมตร)
 a_1 = ขนาดของความยาวครึ่งหนึ่งของผิวสัมผัสรูปวงรีในแกนรอง (มิลลิเมตร)
 b = ความยาวในแกนรองของผิวสัมผัสรูปวงรีในทิศทางด้านข้าง (มิลลิเมตร)
 b' = ขนาดกึ่งหนึ่งของล้อและลูกกลิ้งที่ผิวสัมผัสในทิศทางด้านข้าง (มิลลิเมตร)
 C_{11}, C_{22}, C_{23} = ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเคลื่อนที่ Kalker
 e', e = อัตราส่วนของแกนที่ผิวสัมผัสของรูปวงรี
 E = ค่า Young Modulus
 $E(e)$ = อินทิกรัลในแนวแกนรูปวงรี
 f = สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานจลน์
 f_s = สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานสถิตย์
 F = แรงดึงทั้งหมดในทิศทางของการหมุน (กิโลนิวตัน)
 h = ระยะช่วงในทิศทางในการหมุน
 p_x = แรงดึงของผิวสัมผัสของรูปวงรีในทิศทางแกน x (กิโลนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
 p_x' = แรงดึงผิวสัมผัสของวงกลมในทิศทางแกน x'
 p_y = แรงดึงผิวสัมผัสของรูปวงรีในทิศทางแกน y (กิโลนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
 p_y' = แรงดึงบนผิวสัมผัสของวงกลมในทิศทางในแกน y'
 p_z = ความดันบนพื้นผิวสัมผัสของวงกลม
 R_r = รัศมีของการหมุนของลูกกลิ้ง (มิลลิเมตร)
 R_w = รัศมีของการกลิ้งของชุดล้อ (เมตร/วินาที)
 v = ความเร็วการกลิ้งของชุดล้อ
 v_r = ค่าการลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัส (มิลลิเมตร/วินาที)
 x = แกนโคออร์ดิเนตของผิวสัมผัสวงรีในทิศทางของการหมุน
 x' = แกนโคออร์ดิเนตของผิวสัมผัสวงกลมในทิศทางของการหมุน
 ω_r = ค่าองค์ประกอบของความเร็วในการลื่นไถลทั้งหมดในทิศทางแกน x
 ω_y = ค่าองค์ประกอบของความเร็วในการลื่นไถลทั้งหมดในทิศทางแกน y
 y = แกนโคออร์ดิเนตบริเวณผิวสัมผัสวงรีในทิศทางด้านข้าง
 y' = แกนโคออร์ดิเนตบริเวณผิวสัมผัสวงกลมในทิศทางด้านข้าง
 Y = ชุดล้อที่มีศูนย์กลางอยู่ด้านข้าง

δ = ผิวสัมผัสของชุดล้อ-ลูกกลิ้ง (เรเดียน)

$\Delta y'$ = ช่วงในทิศทางแกน y'

μ = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยึดเกาะ

ν = อัตราส่วนของบิวซอง

ξ_x = ระยะเคลื่อนที่ตามแนวความยาว

ξ_y = ระยะเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

Φ = ระยะเคลื่อนที่แบบหมุนควง (มิลลิเมตร)

ψ = มุมเอียงที่ผิวสัมผัสของชุดล้อ (เรเดียน)

ω_r = ความเร็วเชิงมุมของลูกกลิ้ง (เรเดียน /วินาที)

ω_w = ความเร็วเชิงมุมของชุดล้อ (เรเดียน /วินาที)



สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สัญลักษณ์คำย่อ	IV
สารบัญ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 การสึกหรอ	3
2.1 การสึกหรอ	3
2.2 สูตรพื้นฐานของการสึกหรอ	3
2.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอ	3
บทที่ 3 แรงเสียดทาน	4
3.1 แรงเสียดทาน	4
3.2 แรงกระทำบนพื้นที่สัมผัส	7
3.3 แรงกดบริเวณสัมผัส	8
3.4 Hysteresis losses	8
3.5 ความเสียดทานการหมุน	9
3.6 การหล่อลื่นของทรงกระบอก	11
3.7 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของการสัมผัสแนวเส้น	16
3.8 ความร้อนของการสัมผัสที่ทางเข้า	17
3.9 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของจุดสัมผัส	18
บทที่ 4 การหล่อลื่น	21
4.1 หลักพื้นฐานการหล่อลื่น	21
4.2 ชนิดของสารหล่อลื่น	23

บทที่ 5 ปาล์มน้ำมัน	39
5.1 ประวัติความเป็นมาของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม	39
5.2 การเก็บเกี่ยวทะลายน้ำมัน	39
5.3 ส่วนประกอบของทะลายน้ำมันสด	40
5.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	41
5.5 ปาล์มสเตียริน	44
บทที่ 6 ทฤษฎีของการหมุนบนผิวสัมผัสของ Kalker	49
บทที่ 7 เครื่องทดสอบการสึกหรอและเครื่องใส่สารหล่อลื่น	55
บทที่ 8 วิธีการทดลอง	57
บทที่ 9 ผลการทดลอง	59
บทที่ 10 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
10.1 สรุปผลการทดลอง	67
10.2 ข้อเสนอแนะ	67
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงน้ำหนักของล้อทดสอบที่สภาวะต่างๆ	68
ภาคผนวก ข. กราฟการ Calibration ชุดเครื่องไฮดรอลิกส์	71
บรรณานุกรม	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

โครงการนี้ได้ถูกพัฒนาจากโครงการการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การกดแบบลื่นไถลระหว่าง ล้อและรางรถไฟจำลองได้มีการออกแบบเครื่องทดสอบโดยส่วนที่เป็นล้อจะหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและจะมีโหลด จากไฮดรอลิกส์มากระทำการกดระหว่างที่ล้อหมุน โดยโหลดที่ทำการทดลองจะมีสองทิศทางคือโหลดใน แนวแกนและโหลดในแนวรัศมี อัตราการสึกหรอจะถูกวัดโดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดและความเร็วรอบ การ ทดลองที่ผ่านมาได้ทำการทดลองในกรณีที่หน้าสัมผัสแห้ง ซึ่งผลการทดลองจะพบว่า เกิดการสึกหรอของล้อและ รางที่เห็นได้อย่างชัดเจนและเกิดเสียงดัง ส่วน โครงการนี้มุ่งพัฒนาลักษณะเกี่ยวกับการดัดแปลงของล้อและรางเพื่อ ทำการลดการสึกหรอของล้อที่เกิดการสัมผัสแบบลื่นไถล ล้อจะถูกออกแบบให้มีสารหล่อลื่นไหลเข้าไปในบริเวณ ผิวสัมผัสโดยมีลักษณะเป็นฟิล์มทำให้เกิดแรงดันกระทำต่อโหลด โดยการทดลองจะเลือกชนิดของสารหล่อลื่น และตั้งค่ามอเตอร์ไฟฟ้าที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ ซึ่งอัตราการสึกหรอจะถูกวัด โดยการชั่งน้ำหนัก และสังเกตจาก น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อได้เปรียบของการทดลองนี้กับการทดลองที่ผ่านมา คาดว่าจะเกิดการสึกหรอและเกิด เสียงดังน้อยลง ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ใกล้บริเวณที่โหลดต่างๆมากระทำ ทำให้มีอายุการใช้งานได้ ต่างกันตามชนิดต่างๆของสารหล่อลื่น อายุการใช้งานที่เกิดจากล้อที่นำมาดัดแปลง จะพบว่า มีอายุการใช้งาน นานกว่าล้อธรรมดา

โครงการนี้ต้องการออกแบบอุปกรณ์ที่ลดการสึกหรอของล้อซึ่งจำลองขึ้นมาแทนของจริง โดยเลือกชนิด ของสารหล่อลื่นที่สามารถลดการสึกหรอที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อนำไปค้นคว้าเพื่อเป็นทางเลือกที่ดีอีกทาง โดยผลการทดลองที่ได้จะนำมาสรุปเป็นกราฟผลการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดอัด
2. เพื่อศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการลดการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดอัด โดยการเลือกใช้สาร หล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
2. เลือกสารหล่อลื่นชนิดต่างๆเพื่อใช้ในการทดลอง
3. ทดสอบโดยการเพิ่มโหลดที่ระดับต่างๆระหว่างขอล้อและราง
4. ทดสอบโดยการเปลี่ยนความเร็วรอบต่างๆ
5. บันทึกผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบในกรณีหน้าสัมผัสที่มีสารหล่อลื่น
6. เขียนสมการแสดงแบบจำลองของการสึกหรอของล้อและรางภายใต้แรงกดอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิสัยทัศน์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงพฤติกรรมการศึกษาหรือของข้อลื้อ
2. เพื่อทราบถึงพฤติกรรมผลการลดการศึกษาหรือของข้อลื้อ โดยใช้สารหล่อลื่น
3. เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิจัยและออกแบบพัฒนาต่อไป

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาในเรื่องขอบเขตของโครงการงาน
2. วางแผนแนวคิดในการออกแบบลักษณะของการหล่อลื่นของข้อลื้อ
3. ติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อสอบถามข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง
4. รวบรวมข้อมูลที่เป็นในการติดตั้งอุปกรณ์การหล่อลื่น
5. ทำการติดตั้งอุปกรณ์การหล่อลื่น
6. ทำการสร้างชุดเครื่องป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้
7. ประกอบและติดตั้งเครื่องทดสอบ
8. ทำการ Calibration ชุดไฮดรอลิกส์ทั้งสองชุดกับเครื่อง Universal Testing Machine
9. ทำการทดสอบ โดยแบ่งตามกรณีทดสอบที่ต้องการเก็บค่าการลดอัตราการศึกษาหรือ
10. ทำการวัดค่าการศึกษาหรือของข้อลื้อ โดยการชั่งน้ำหนัก
11. เก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาแสดงในรูปผลกราฟ
12. เปรียบเทียบผลการลดการศึกษาหรือในสภาวะต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง
13. สรุปผลการทดลองที่ได้
14. ทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

10.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลการทดลองที่ได้ทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่ล้อ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ในการทดลอง โดยสารหล่อลื่น ไขมันปาล์มซึ่งยึดเกาะผิวสัมผัสได้ดีกว่าสารหล่อลื่นจาระบี จะมีอัตราการสึกหรอที่น้อยกว่าที่สภาวะโหลดและความเร็วรอบเดียวกัน

2. เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นที่สภาวะโหลดเดียวกัน อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้น โดยสารหล่อลื่นจาระบีจะมีอัตราการสึกหรอที่มากกว่าสารหล่อลื่น ไขมันปาล์ม

3. เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นในสภาวะที่ความเร็วรอบเดียวกัน อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้น โดยสารหล่อลื่นจาระบีจะมีอัตราการสึกหรอที่มากกว่าสารหล่อลื่น ไขมันปาล์ม

4. อุณหภูมิของการทดลองจะขึ้นอยู่กับอัตราการสึกหรอเมื่อใช้สารหล่อลื่น ไขมันปาล์ม ซึ่งมีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าสารหล่อลื่นจาระบี อุณหภูมิจะน้อยกว่า

5. จากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาทำงานจริงต่อไป

10.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องทดสอบการสึกหรอควรจะต้องติดตั้งในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก เนื่องจากในการทดลองบางขั้นตอนได้เกิดควันจากการเสียดสีระหว่างล้อและราง ถ้าติดตั้งเครื่องในบริเวณที่อากาศถ่ายเทไม่ดีจะทำให้ควันและกลิ่นเหม็นไหม้ นั้น ไม่ระบายออก ทำให้ผู้ทำการทดลองและคนรอบข้างในบริเวณนั้นสูดดมกลิ่นนั้นไปอาจจะเกิดอันตรายกับระบบทางเดินหายใจได้

2. ควรเลือกเหล็กที่มีความแข็งใกล้เคียงกับล้อและรางจริงเพื่อที่จะได้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

การสึกหรอ

2.1 การสึกหรอ

การสึกหรอของวัสดุโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสีกันของผิวสัมผัสอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาของการสัมผัสซึ่งมีตัวประกอบอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาอีกมากมาย อย่างเช่น ลักษณะของผิวสัมผัส อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุ ความแข็ง ความเปราะ ฯลฯ

การสึกหรอของวัสดุมีหลายแบบ แต่ละแบบเองก็มีการศึกษาเจาะลึกในเนื้อหาที่มีปริมาตรเป็นบทความ หนังสือเยอะมาก ซึ่งให้รายละเอียดของแต่ละแบบอยู่แล้ว โดยในส่วนของเนื้อหาของการสึกหรอ โครงการนี้มุ่งประเด็นมาที่การศึกษาคุณภาพโดยรวมของการเกิดการสึกหรอ เช่น สูตรที่ใช้ในการคำนวณเรื่องการสึกหรอ ตัวแปรที่สำคัญของการสึกหรอ ตลอดจนผลกระทบจากสาเหตุต่างๆ ที่มีผลต่อการสึกหรอซึ่งจะได้แจกแจงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2 สูตรพื้นฐานของการสึกหรอ

ARCHARD'S EXPERIMENTAL WEAR LAW.

$$V = \frac{kND}{H} \quad (2.1)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอ (Wear coefficient)

N = แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Normal load)

D = ระยะทางการเคลื่อนที่ (Distance moved)

H = ความแข็ง (Hardness)

2.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอ

1. ความเรียบหรือหยาบของผิวสัมผัสของวัสดุ
2. ภาระที่ใช้ในการทดสอบ
3. ความเร็วในการทดสอบ
4. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบ
5. ความแข็งของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียว
6. ชนิดของการหล่อลื่น ปริมาณของการหล่อลื่น ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมัน
7. อุณหภูมิของการทดลอง
8. และอื่นๆ อีกมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แรงเสียดทาน

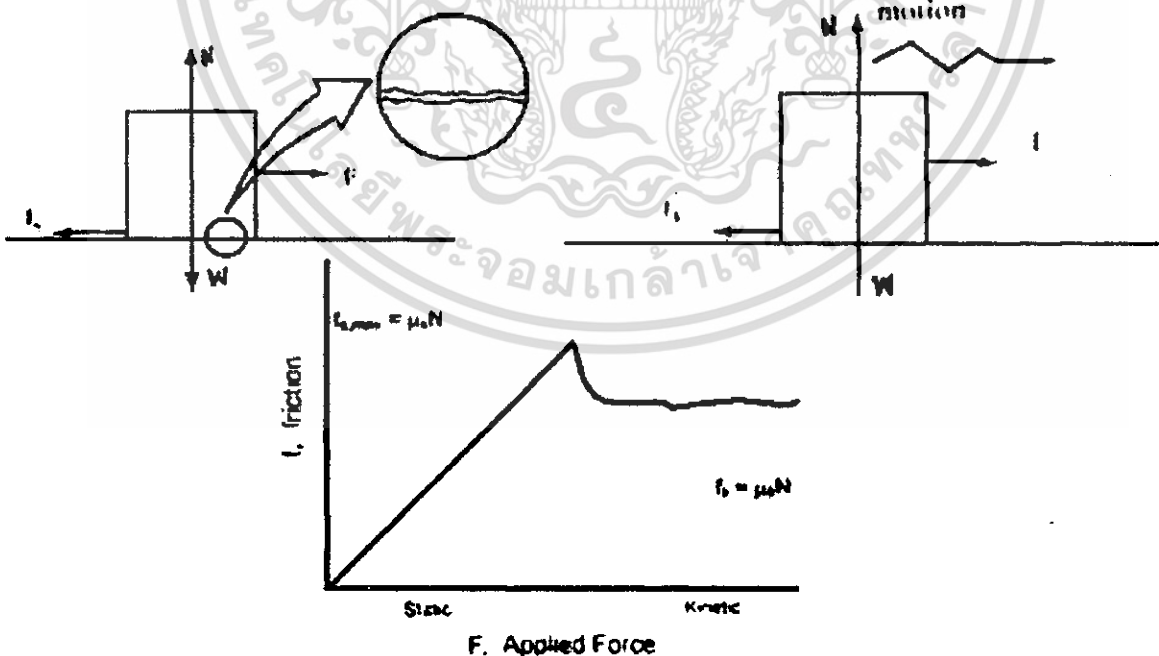
3.1 แรงเสียดทาน

เป็นแรงที่กระทำในทิศต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ 2 อัน แรงเสียดทานแบ่งเป็นหลายประเภท เช่น

แรงหนืด (viscous frictional force) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในอากาศหรือในของเหลว เช่น แรงที่อากาศกระทำต่อรถยนต์ที่วิ่งด้วยความเร็วสูง เป็นต้น

แรงเสียดทานที่เกิดจากการไถลของวัตถุ (sliding frictional force) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของวัตถุ 2 ชนิดสัมผัสกัน และจะมีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ไถลไปบนอีกวัตถุหนึ่งเสมอ

แรงเสียดทานมีความสำคัญมากเพราะการที่เราสามารถเดินไปบนถนนหรือรถวิ่งทางโค้ง หรืออื่น ๆ อีกได้โดยไม่ลื่นไถลก็เนื่องจากมีแรงเสียดทานคอยต้านเอาไว้ แต่บางครั้งเวลาออกแบบสร้างเครื่องมือต่าง ๆ เราจะต้องพยายามลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเพื่อประสิทธิภาพในการทำงาน เช่น การใส่ลูกล้อหรือการใช้ของเหลว เช่น พวบน้ำมัน ในการหล่อลื่นตามรอยต่อต่าง ๆ แม้ว่าในของเหลวจะมีแรงเสียดทานซึ่งเราเรียกว่าแรงหนืดก็ตาม แต่แรงเสียดทานในของเหลวจะน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงเสียดทานที่เกิดจากของแข็ง



รูปที่ 3.1 แรงเสียดทาน f ระหว่างกลองและพื้นผิวที่ผิวหน้าขรุขระที่มี F กระทำในทิศทางตรงข้ามกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (a) แรงเสียดทานสถิต = แรง F
- (b) เมื่อ $F > f_{s,\max}$ ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไปทางขวา
- (c) กราฟระหว่างแรงเสียดทานกับแรงภายนอกที่กระทำต่อกล่องสังเกตว่า $f_{s,\max} > f_k$

พิจารณากล่องที่วางอยู่บนโต๊ะดังรูป 3.1 ถ้าเราออกแรง F ในแนวระดับ กระทำต่อกล่องไปทางขวา กล่องจะยังคงหยุดนิ่ง ถ้าแรง F ที่กระทำไม่มากพอ เพราะมีแรงกระทำต่อกล่องไปทางซ้ายซึ่งเรียกว่าแรงเสียดทาน ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย f_s จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงนี้เกิดจากธรรมชาติของผิวหน้าของวัตถุ 2 ชนิดที่สัมผัสกัน มีความขรุขระของผิวหน้าต่าง ๆ กัน ความขรุขระนี้อาจจะเกิดเพียงบางแห่งที่สัมผัสกันก็ได้ ดังแสดงในวงกลมรูปที่ 3.1 ถ้าเราเพิ่มขนาดของแรง F ให้มากขึ้น ดังในรูป 3.1 กล่องจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อกล่องจะเคลื่อนที่ f_s จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ F มีค่ามากกว่า $f_{s,\max}$ ดังรูป 3.1 เราเรียกแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุกำลังเคลื่อนที่ว่า แรงเสียดทานจลน์ (force of kinetic friction) ใช้สัญลักษณ์ว่า f_k และเรียกแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุยังไม่เคลื่อนที่ว่าแรงเสียดทานสถิต, f_s (force of static friction) โดยแรงเสียดทานจลน์, f_k มีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิต, f_s ขณะวัตถุเริ่มจะเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าสูงที่สุด

จากรูป 3.1 แรงลัพธ์ในทิศ $+X = F - f_k$ ทำให้วัตถุมีความเร่งไปทางขวาถ้า $F = 0$ แรงเสียดทานจะกระทำไปทางซ้ายของกล่องจะทำให้กล่องลดความเร่งลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง

จากการทดลองพบว่า สำหรับวัตถุหนึ่ง ๆ f_k และ f_s เป็นสัดส่วนกับแรงปฏิกิริยาพื้นที่สัมผัสกับวัตถุในแนวตั้งฉากหรือ F_N (Normal force) ในที่นี้เราจะใช้สัญลักษณ์แทน Normal force เป็น N ซึ่งจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุที่วางในแนวราบ และจะขึ้นกับธรรมชาติระหว่างวัตถุ 2 ชนิดด้วย ถ้าผิวสัมผัสมีความขรุขระมากก็จะมีแรงเสียดทานมาก จากผลการทดลองเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_k = \mu N \quad (3.1)$$

$$\text{หรือ } f_s = \mu N \quad (3.2)$$

- เมื่อ $f_k =$ แรงเสียดทานที่มากที่สุดมีหน่วยเป็นนิวตัน
- $\mu =$ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นค่าคงที่สำหรับวัตถุหนึ่ง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แรงที่พื้นที่กระทำต่อวัตถุในแนวตั้งฉากเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นกรณีแรงเสียดทานสถิต

$$f_s^\omega = \mu_s N^\omega \quad (3.3)$$

μ_s = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

ถ้าเป็นกรณีแรงเสียดทานจลน์

$$f_k^\omega = \mu_k N^\omega \quad (3.4)$$

μ_k = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์

สรุปสมบัติจากแรงเสียดทานจากการทดลอง

1. $f_{s,max}^\omega$ ไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิวที่สัมผัสกัน เช่น ถ้าเดิมกล่องมีขนาดครึ่งหนึ่ง มีแรงเสียดทาน $f_{s,max}^\omega$ ค่าหนึ่งเมื่อเปลี่ยนกล่องให้ใหญ่เป็นสองเท่า แต่น้ำหนักเท่าเดิม ดังรูปประแรงเสียดทาน $f_{s,max}^\omega$ ก็ไม่เปลี่ยนแปลง

2. สำหรับวัตถุคู่หนึ่ง ๆ $f_{s,max}^\omega$ เป็นสัดส่วนกับ normal force N^ω

3. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต μ_s มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง $f_{s,max}^\omega$ กับ N^ω

4. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ μ_k ไม่ขึ้นกับความเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ และเนื่องจาก $f_k^\omega < f_{s,max}^\omega$ ดังนั้น $\mu_k < \mu_s$

5. แรงเสียดทานจลน์ f_k^ω มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุมีค่า $f_k^\omega = \mu_k N^\omega$

6. แรงเสียดทานสถิตมีทิศตรงข้ามกับแรงภายนอกที่กระทำวัตถุมีค่า $f_s^\omega = \mu_s N^\omega$ และ $f_{s,max}^\omega = \mu_s N^\omega$ เพราะเมื่อวัตถุหยุดนิ่ง แรงเสียดทานจะกระทำกับวัตถุ โดยยังคงทำให้วัตถุมีความเร็ว = 0 เมื่อเทียบกับผิวหน้าต่อไป

7. μ_k และ μ_s ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผิวหน้า แต่ $\mu_k < \mu_s$ เสมอ ค่า μ จะอยู่ในช่วง 0.01 สำหรับวัตถุผิวเรียบถึง 1.5 สำหรับวัตถุคิขรุขระดังตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

เป็นที่รู้กันดีในทฤษฎีทางกลว่าถ้าจุดสามจุดของการยับยั้งของรูปร่างระนาบใดๆมีการสัมผัสของจุดแบบธรรมดา การเคลื่อนที่ตกลงเพื่อหมุนจุดเหล่านั้น ตัวอย่างเช่น คู่การหมุนที่เป็นวงกลม จุดสัมผัสอยู่กับที่มีความสัมพันธ์กับจุดอื่นๆ และหมุนต่อเนื่อง คู่ของจุดสัมผัสมีจุดศูนย์กลางเปลี่ยนแปลงจะเกิดการหมุนเล็กน้อย ตัวอย่าง เช่น ตำแหน่งใหม่ต่อต้านจุดการสัมผัสของสามจุดใหม่ของการยับยั้ง โดยทั่วไปมีรูปร่างแตกต่างกันไป และอ้างอิงเป็น higher pair และตรงกันข้ามจะไม่ครอบคลุมใน lower pair และสมมุติเป็นผิวทรงกระบอก การสัมผัสจะเป็นแนวเส้น ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากการผสมของสองอย่างคือ การลื่นและการหมุน

ใน higher pair ความเสียดทานอาจจำเป็นของแรงในส่วนของล้อเสียดทานสองอันสัมผัสกัน แรงบนล้อไม่เพียงยึดการสัมผัสแต่ยังป้องกันการลื่นระหว่างการสัมผัส เพื่อความแน่ใจ แรงใน higher pair ควรจะทำมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รักษาผิวการสัมผัส ตัวอย่าง ball bearing เป็น lower pair หรือเป็น higher pair ที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามพิจารณาเป็น higher pair

บทนี้เขียนเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจในรายละเอียดของ higher kinematic pairs ซึ่งมีสองวัตถุประสงค์ คือ

1. เพื่อพัฒนาความเข้าใจของพื้นฐานหลักการของการสัมผัส

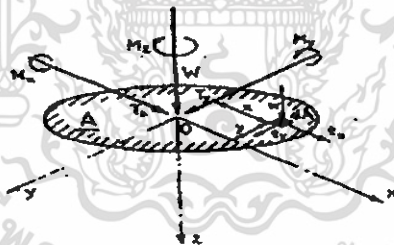
2. เพื่อพัฒนาความง่ายด้วยการวิเคราะห์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการสัมผัสสำหรับ higher kinematic pairs

ข้อมูลในบทนี้สามารถใช้แก้ปัญหาสำหรับ higher kinematic pairs คือ หนึ่ง ปัญหาการสัมผัสระหว่างผิวสองผิวถูกอธิบาย รวมทั้งการส่งแรงที่จุดสัมผัส แรงดึงผิว elastic hysteresis ระหว่างการหมุน ความต้านทานการหมุน และการหล่อลื่นของลูกกลิ้ง และ สอง ความหนาฟิล์มภายใต้สภาวะ isothermal elastohydrodynamic ความร้อนทางเข้าของการสัมผัสแนวเส้น สุดท้ายปัญหาเกี่ยวกับการหมุนในเบร้ง , เกียร์ , cam-follower และสมการการหาความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด

3.2 แรงกระทำบนพื้นที่สัมผัส

ในส่วนนี้จะพิจารณาโหลดกระทำบนพื้นที่สัมผัสและวิธีการส่งแรงจากผิวหนึ่งไปสู่ผิวอื่นๆ โหลดที่กระทำพิจารณาเป็นแรงตั้งฉาก (P) ตามแนวตั้ง และแรงเฉือน (T) ซึ่งต้านโดยแรงเสียดทาน ความสัมพันธ์ระหว่าง T และ P แสดงโดย

$$T \leq fW \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.2 แรงกระทำบนพื้นที่สัมผัส

เมื่อ f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน T สามารถเขียนในรูปส่วนประกอบตามแนว x (T_x) และแนวแกน y (T_y) ขนานแกน x และแกน y ในการสัมผัสเส้นแรงเฉือนจะมีทิศทางด้านความเร็ว แรงส่งที่ตั้งฉากของการสัมผัสมีผลต่อการอัดของของแข็งและจะมีผลที่จะเกิด โมเมนต์ขึ้น ซึ่งประกอบด้วยโมเมนต์ M_x และ M_y เรียกว่า โรลลิง โมเมนต์ ด้านการหมุนแต่มีขนาดเล็กจะไม่ได้คิดก็ได้ ส่วน M_z กระทำบนแกนตั้งฉาก เรียกว่า สปิน โมเมนต์

การหมุนอิสระนิยามเป็นการหมุน ซึ่งไม่มีการสปินและแรงเฉือน T เป็นศูนย์ สภาวะนี้จะไม่มีกำลังและไม่มีแรงเบรกด้าความต้านทานการหมุนและความเสียดทานในเบร้งไม่มี ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับล้อขับและเบรกด้าแรงเฉือนที่จุดสัมผัสกับถนนหรือรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แรงกดบริเวณสัมผัส

แรงและ โมเมนต์ที่อธิบายข้างบนถูกส่งข้ามผิวสัมผัสโดยแรงค้ำผิว ที่ผิวสัมผัส แรงค้ำตั้งฉาก (ความดัน) w และ แรงค้ำเฉือน (แรงเสียดทาน) t แสดงบนผิวเล็กในรูป 3.2 สมการสมมูลรวม

$$W = \int_A w dA, \quad (3.6)$$

$$T_x = \int_A t_x dA, \quad T_y = \int_A t_y dA \quad (3.7)$$

รูปการสัมผัสโดยผิวโค้งเส้นสัมผัสประมาณใน ระนาบ x-y ดังนั้น

$$M_x = \int_A wy dA, \quad M_y = - \int_A wx dA, \quad (3.8)$$

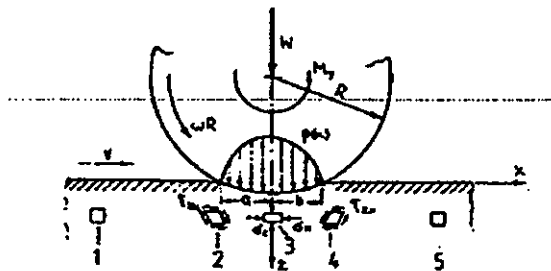
และ $M_z = \int_A (t_y x - t_x y) dA \quad (3.9)$

เมื่อเป็นผิวโค้งปิด ตัวอย่างเช่น deep-groove ball-bearing ซึ่งสามารถหา M_x M_y ตามสมการ 3.8 และแรงค้ำเฉือน t_x และ t_y ตามสมการ 3.9

3.4 Hysteresis losses

บางพลังงานจะสลายระหว่างรอบของไหลหรือ ไม่มีไหล แม้ว่าอยู่ในช่วงหดได้เพราะว่าไม่มีของแข็งที่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ พลังงานสูญเสียแสดงเป็นรูปเศษส่วน α ของพลังงานความเครียดยืดหยุ่นที่สะสมอยู่ในวัตถุ เมื่อ α อ้างอิงเท่ากับ hysteresis loss factor สำหรับโลหะส่วนใหญ่ ความเค้นภายในช่วงยืดหยุ่น ค่า α น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ แต่พอลิเมอร์ และยางลบจะมากกว่า

ในการหมุนอิสระวัสดุในส่วนสัมผัสภายใต้รอบของไหลและ ไม่มีไหล จะไหลผ่านบริเวณสัมผัสตามรูป 3.3 พลังงานความเครียดของวัสดุเพิ่มขึ้นตรงกลางระนาบระหว่างงานอัด โดยความค้ำสัมผัสบนครึ่งด้านหน้าของพื้นที่สัมผัส แต่หลังศูนย์กลางระบบพลังงานความเครียดลดลง และงานด้านความค้ำสัมผัสที่ด้านหลังของการสัมผัสไม่คิดความเสียดทานผิวสัมผัส พลังงานความเครียดของวัสดุเข้าใกล้ศูนย์กลางระบบในช่วงเวลาเล็กๆ สามารถหาจากความค้ำบนครึ่งหนึ่งของการสัมผัส สำหรับการสัมผัสทรงกลม



รูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dP = \omega dt \int_0^a p(x)x dx, \quad (3.10)$$

เมื่อ $w = V/R$ คือความเร็วเชิงมุมของโรลเลอร์ แทน $p(x)$ โดยทฤษฎี Hertz

$$P = \frac{2}{3\pi} Wa\omega, \quad (3.11)$$

เมื่อ W คือโหดการสัมผัส ถ้า เศษส่วน α ของพลังงานความเครียดนี้ร้อยละ สมมุติให้สลายโดย hysteresis ผลลัพธ์โมเมนต์เพื่อต้องการรักษาการเคลื่อนที่ โดยสมการพลังงานสุทธิ ดังนั้น

$$M_y \omega = aP = \frac{2}{3\pi} aW a\omega$$

หรือ

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = a \frac{2a}{3\pi R} \quad (3.12)$$

เมื่อ f_r คือ สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการหมุน ดังนั้น ความต้านทานการหมุนของวัตถุที่ไม่ยืดหยุ่น สมบูรณ์ แสดงในรูปของ hysteresis loss factor ซึ่งตามทฤษฎีความเสียดทานการหมุนของ Tabor

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = a \frac{2a}{16R} \quad (3.13)$$

เมื่อ a คือ ครึ่ง-ความกว้างของการสัมผัสรูปร่างรี สำหรับทรงกลม a ประมาณเป็น $(WR)^{1/3}$ ดังนั้น ประสิทธิภาพต้านทานการหมุน $f_r = \frac{M_y}{R}$ ควรจะประมาณเป็น $W^{3/4} R^{-2/3}$ ความสัมพันธ์นี้รองรับโดยการทดลองด้วยยางลบ แต่มีน้อยในโลหะ

มีปัญหาพื้นฐาน 2 อย่างเกี่ยวกับทฤษฎีนี้ 1. hysteresis loss factor α ปกติไม่ใช่ค่าคงที่ของวัสดุในส่วนของโลหะเพิ่มความเครียด (a/R) 2. hysteresis loss factor ในการสัมผัสแบบหมุนไม่สามารถหาด้วย loss factor ในรอบการดึงหรือการอัดอย่างง่ายเสียรูปในการสัมผัสหมุนอธิบายในรูป 3.3 เกี่ยวกับการหมุนของแกนหลักระหว่างจุดของ 2,3,4 ด้วยการเปลี่ยนพลังงานความเครียดทั้งหมดเล็กน้อย

การเสียรูปในผิวควรจะหาโดยการหมุนของทรงกลมแข็งบนผิวระนาบที่ไม่ยืดหยุ่น ซึ่งมีความต้านทานน้อย ความต้านทานนี้อยู่ในรูปของส่วนประกอบของแรงเสียดทาน มีค่าเท่ากับความต้านทานการหมุน F_r ซึ่งแสดงในสมการ 3.13

3.5 ความเสียดทานการหมุน

การเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบง่าย ๆ ใน Higher kinematics pairs ในทางอุดมคติไม่ควรจะมีการสูญเสียพลังงานมาก แต่ในความจริงจะสลายไปจากความเสียดทานการหมุน พลังงานสูญเสียในการหมุนจำแนกได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป็นผลจาก micro-slip และ ความเสียดทานที่ผิวสัมผัส
- วัสดุมีคุณสมบัติไม่ยืดหยุ่น
- ผิวสัมผัสมีความขรุขระ

การหมุนอิสระจะนิยามว่าการเคลื่อนที่ไม่มีผลจากแรงเฉือน ความต้านทานการหมุนมีผลจากโมเมนต์ M , ทั้งสอง ซึ่งต้องการความสมมาตรของการกระจายความดัน โดยความดันสูงบนการสัมผัสข้างหน้ามากกว่าข้างหลัง อย่างไรก็ตามการหมุนในแบร์ริง สมมุติให้มีความเสียดทานน้อย และความต้านทานการหมุนถูกเอาชนะ โดยแรงเฉือน T_x ที่กระทำบนแบร์ริงและด้านที่ผิวสัมผัส ซึ่งความต้านทานการหมุนน้อย ($T_x < W$) เขียนความต้านทานการหมุนในรูปไร้มิติสัมประสิทธิ์ f_r แสดงในเทอมของอัตราส่วนของการกระจายความดัน P

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = \frac{T_x}{W} = \frac{P}{WV} \quad (3.14)$$

P/V คือ พลังงานกระจาย ต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

พลังงานสูญเสียช่วง micro-slip

พลังงานกระจายช่วง micro-slip เกี่ยวกับผิวสัมผัสเมื่อวัตถุหมุนไม่คล้ายการสัมผัสแบบยืดหยุ่น ความต้านทานจากสาเหตุนี้ขึ้นกับความแตกต่างของค่าคงที่ยืดหยุ่นแสดงโดยพารามิเตอร์ β (นิยามโดยสมการ 3.15) และ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการเลื่อน f

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[(1-2\nu_1)/G_1] - [(1-2\nu_2)/G_2]}{[(1-\nu_1)/G_1] + [(1-\nu_2)/G_2]} \right\} \quad (3.15)$$

ความต้านทานการหมุนเข้าใกล้ค่ามากที่สุด

$$f_r = \frac{M_y}{WR} \approx 15 \times 10^{-1} \beta \left(\frac{a}{R} \right) \quad (3.16)$$

เมื่อ $\beta/f \approx 5$ สำหรับวัสดุผสม β ไม่ค่อยเกิน 0.2 ความต้านทานการหมุนช่วง micro-slip น้อยมาก มีคำแนะนำว่า micro-slip จะเพิ่มขึ้นถ้าผิวโค้งของวัตถุทั้งสองต่างกันง่ายที่จะเห็นความแตกต่างในความเค้นเครียดระหว่างทั้งสองผิวซึ่งอยู่ในรูป second-order (a/R) และการไม่คิดความเครียดเล็กน้อย ความต้านทานการหมุนสูงสุดจะเป็น

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = 0.08 f \left(\frac{a}{R} \right)^2 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสัมผัสรูปวงรี (b/a) คือฟังก์ชันรูปร่างของ ball และ groove เมื่อเป็นรูปปิด เช่น ใน deep groove ball bearing $b \gg a$ และ ความต้านทานการหมุนจากสาเหตุนี้จะมีความสำคัญ

ใน tractive rolling เมื่อแรงและโมเมนต์มากๆส่งผ่านวัตถุ มีความหมายน้อยที่จะแสดงความต้านทานการหมุนตาม T_r หรือ M/R พลังงานยังคงสูญเสียใน micro-slip และสำหรับการเปรียบเทียบกับภาระมีประโยชน์ที่จะนิยามประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน $f = P/VW$ นี่เป็นการวัดการสูญเสียของประสิทธิภาพ ของ tractive drive เช่น สายพาน, ล้อขับ, continuously variable speed gear

พลังงานสูญเสียช่วง plastic deformations

ในสาเหตุส่วนใหญ่ ความต้านทานการหมุนถูกมีอิทธิพล โดย การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของการสัมผัสวัตถุหนึ่งหรือสอง ในส่วนนี้พลังงานจะสูญเสียในของแข็ง ที่ความลึกตามส่วนประกอบแรงเฉือนมากที่สุดตามความเค้นการสัมผัส มากกว่าผิวสัมผัสกับวัตถุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ การปล่อยความร้อนต่ำที่ผิวสามารถทำให้ อุณหภูมิภายในสูงและสึกกร่อน โดยความเครียด ความร้อน โดยทั่วไปแล้ว โลหะมีพฤติกรรมแตกต่างจากพวกที่ไม่ใช่โลหะ คุณสมบัติการไม่ยืดหยุ่นของโลหะและ บางอย่างเป็น crystalline non-metallic ถูกควบคุม โดยการเคลื่อนที่ที่อุณหภูมิปกติ ไม่มีอิทธิพลทั้งจากอุณหภูมิ หรืออัตราการเสียรูป

คุณสมบัติความเสียดทานการหมุนของวัสดุซึ่งมีช่วงความเค้นยืดหยุ่นตามอัตราส่วนอิสระพลาสติก ที่ไหลลดน้อยการเสียรูปยืดหยุ่น และความต้านทานการหมุนแสดงตามสมการ ยืดหยุ่น hysteresis (3.13) hysteresis factor หาโดยการทดลอง โดยทั่วไปแล้วจะเป็นเปอร์เซ็นต์เล็กน้อย

ที่ไหลสูงเมื่อบริเวณพลาสติกไม่ใหญ่มาก ความต้านทานการหมุนหาโดยทฤษฎี ของแข็งพลาสติก เมื่อจะเป็นพลาสติกเต็ม จะมีค่าเข้าใกล้ $W/2a \approx 2.6$ และ $Ea/YR \approx 100$ แสดงว่า $GW/kR \approx 300$ เมื่อ k คือ yield stress ในของแข็ง

พลังงานสูญเสียช่วง surface roughness

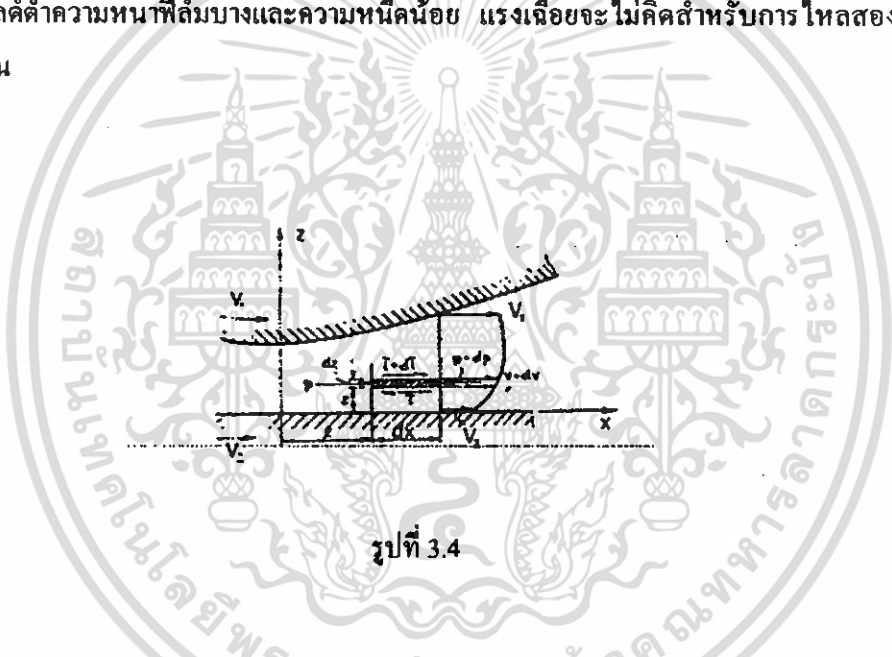
เป็นที่ชัดเจนว่าความต้านทานการหมุนของล้อบนผิวขรุขระจะมากกว่าผิวเรียบ ผิวมีอิทธิพลต่อความเสียดทานหมุน 2 ทาง คือ เกิดการสัมผัสจริงและมีความเค้นเกิดขึ้น ดังนั้นการเสียรูปพลาสติกจะเกี่ยวข้องแม้ว่าความเค้นบักจะอยู่ในช่วงยืดหยุ่นก็ตาม ผิวหยาบและเรียบจะเสียรูปพลาสติกบนการเคลื่อนที่ครั้งแรกแต่การเสียรูปจะเป็นแบบยืดหยุ่นในรอบต่อมา ความต้านทานการหมุนลดลงด้วยการหมุนซ้ำ สังเกตได้จากการทดลอง และอีกทางหนึ่งความขรุขระผิวมีผลต่อความต้านทาน พลังงานที่ใช้มากขึ้น เช่น ผิวหยาบมากใช้ไหลลดมาก จุดศูนย์กลางมวลของลูกกลิ้ง เคลื่อนขึ้นลง ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไม่คงที่ การวัดความต้านทานของแรงแสดงใหญ่มาก ความถี่สูง พลังงานสูญเสียเร็วในการกระทบเล็กๆ ระหว่างผิวที่ไม่สม่ำเสมอ เพราะว่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ด้วยความเร็วของการหมุน

3.6 การหล่อลื่นของทรงกระบอก

โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นเพื่อแน่ใจในการทำงานของผิวการสัมผัสกัน แม้ว่าผิวของการสัมผัสแบบหมุน เช่น ball-bearing, micro-slip ซึ่งต้องการการหล่อลื่น ถ้าผิวถูกทำลาย หรือเพื่อหลีกเลี่ยงการหล่อลื่น การรั่วไม่ผ่านการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หล่อลื่นทำได้สองทาง หนึ่งจัดเตรียมฟิล์มบางบนผิวของแข็งเพื่อป้องกันการติดแน่น และลดแรงเสียดทานระหว่างผิว เพื่อใช้แรงเฉือนน้อย การกระทำนี้รู้จักในขอบเขตการหล่อลื่น ฟิล์มโดยทั่วไปบางและมีพฤติกรรมอิสระขึ้นกับคุณสมบัติฟิสิกส์และเคมีทั้งของสารหล่อลื่นและผิวของแข็ง ความสัมพันธ์ของความหนาฟิล์มอยู่ระหว่างผิวและ sufficient pressure ซึ่งถูกพัฒนาในฟิล์มเพื่อรองรับโหลดคั่งจากปราคาจากการสัมผัสกันของของแข็ง การกระทำนี้เรียกว่า การหล่อลื่น hydrodynamic ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของการสัมผัสและความหนืดของเหลว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงฟิล์มรับโหลดระหว่างทรงกระบอกสองอันทั้งการหมุนและการลื่น ซึ่งสามารถประยุกต์ในการหล่อลื่นของฟันเกียร์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ดังรูป 3.3 และจะแสดงสมดุลทั้งการสัมผัสแบบหมุนและลื่นผสมกันทั้งสองทรงกระบอก

ฟิล์มบางของสารหล่อลื่นอัดตัวไม่ได้ ความหนืด μ ระหว่างผิวของของแข็งสองอัน ด้วยความเร็ว V_1 และ V_2 ดังรูป 3.4 ซึ่งเกือบจะขนาน ส่วนประกอบความเร็วตั้งฉากกับฟิล์ม ไม่คิด ดังนั้น ความดันคือรูปแบบข้ามความหนา ที่เลขเรโนลด์ต่ำความหนาฟิล์มบางและความหนืดน้อย แรงเฉื่อยจะไม่คิดสำหรับการไหลสองมิติ สมการของไหลแสดงเป็น



รูปที่ 3.4

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{3.18}$$

เมื่อ V คือ stream velocity , $\partial p / \partial x$ ค่าอิสระของ z สมการ 3.18 สามารถอินทิเกรตโดย z ให้ $v = V_1$ และ $v = V_2$ ที่ $z = 0$ และ h คือ parabolic velocity profile ดังรูปที่ 3.4 แสดงโดย

$$v(z) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (z^2 - hz) + (V_1 - V_2) \left(\frac{z}{h} \right) + V_2 \tag{3.19}$$

ปริมาตรการไหล Q ของฟิล์ม คือ

$$Q = \int_0^h v(z) dz = -\frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) + (v_1 + v_2) \frac{h}{2} \tag{3.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลต่อเนื่อง Q เหมือนกันสำหรับพื้นที่ภาคตัดทั้งหมด

$$Q = (V_1 + V_2) \frac{h_1}{2}, \quad (3.21)$$

เมื่อ h , คือ ความหนาฟิล์มที่ pressure gradient dp/dx คือ 0

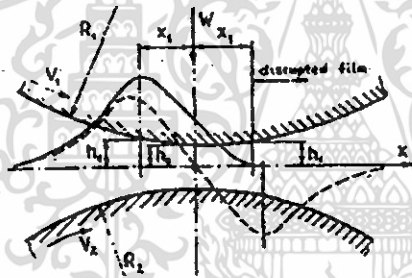
กำจัด Q

$$dp/dx = 6\mu(V_1 + V_2) \left(\frac{h - h_1}{h^3} \right) \quad (3.22)$$

สมการเรโนลด์นี้สำหรับการไหลสองมิติคงที่ในฟิล์มหล่อลื่นบาง ให้การเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์ม $h(x)$ สามารถอินทิเกรตความดัน $p(x)$ โดย hydrodynamic สำหรับการอธิบายที่ซับซ้อนกว่านี้สำหรับสมการเรโนลด์ สมการ (3.22) จะใช้หาความดันในฟิล์มระหว่างทรงกระบอกหมุนสองอัน

1. ทรงกระบอกแข็ง

รูปร่างของทรงกระบอกแข็งสองอันสัมผัสกันแสดงในรูป 3.5 การให้น้ำมันที่ทางเข้า ภายในบริเวณสัมผัส ความหนาของฟิล์มสามารถแสดงเป็น



รูปที่ 3.5

$$h \approx \frac{h_0 + x^2}{2R} \quad (3.23)$$

เมื่อ $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ และ h คือความหนาฟิล์มที่ $x=0$ แทนสมการ (3.23) ใน (3.22) จะได้

$$dp/dx = \frac{6\mu(V_1 + V_2)}{h_0^2} \left\{ \frac{1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right) + \left(\frac{x^2}{2Rh_0}\right)}{\left(1 + \frac{x^2}{2Rh_0}\right)^3} \right\} \quad (3.24)$$

โดยการแทน $\zeta = \tan^{-1} [x/(2Rh)^{\frac{1}{2}}]$ สมการ (3.24) สามารถอินทิเกรตเพื่อหาการกระจายความดันได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{h_0^2}{(2Rh_0)^{\frac{1}{2}}} + \frac{p}{6\mu(V_1 + V_2)} = \frac{\xi}{2} + \frac{\sin 2\xi}{4} \quad (3.25)$$

เมื่อ $\xi = \tan^{-1}[x/(2Rh)^{\frac{1}{2}}]$ และ x , คือ ค่าของ x เมื่อ $h = h$, และ $dp/dx = 0$ ค่าของ ξ , และ A หาจากสภาวะสุดท้าย

ที่เริ่มต้นสมมติว่าความดันเท่ากับศูนย์ที่จุดทางเข้าและออก $p = 0$ ที่ $x = \pm\infty$ ผลลัพธ์ของการกระจายแรงแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 3.5 มีค่าบวกที่ทางเข้า (converging) และมีค่าลบที่ทางออก (diverging) แรงรวม W รองรับโดยฟิล์มเป็นศูนย์ในสภาพนี้ อย่างไรก็ตามการอธิบายคือไม่จริงที่บริเวณของความดันลบใหญ่ๆ ออกที่สภาวะบรรยากาศ การไหลทางออกลดลง ความดันประมาณเท่ากับบรรยากาศ จุดก่อนหน้านี้ของฟิล์มก่อนที่จะลดลงหาโดยการพิจารณาการไหลสามมิติในสิ่งที่ไหลและมีอิทธิพลโดยแรงคิงผิว อย่างไรก็ตามสามารถหาได้โดยการให้สภาวะ

$$dp/dx = p = 0 \quad (3.26)$$

ในสภาวะนี้ด้วย $p = 0$, ที่ $x = -\infty$ แทนในสมการ (3.25) พบว่า $\xi_1 = 0.443$, $x_1 = 0.475 (2Rh_0)^{1/2}$ การกระจายความดันแสดงโดยเส้นโค้งของแข็งดังรูป 3.5 ในภาวะนี้ไหลทั้งหมดรองรับโดยฟิล์มแสดงโดย

$$W = \int_{-\infty}^{x_1} p(x) dx = 2.45(V_1 + V_2)R\mu/h_0 \quad (3.27)$$

ในสภาวะส่วนใหญ่จะเป็นไหลซึ่งจะเจาะจง สมการ (3.27) สามารถใช้คำนวณความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด h_0 เพื่อประสิทธิภาพการหล่อลื่น h_0 ต้องมากกว่าผิวหรือซึ่งเห็นจากสมการ (3.27) ว่าความสามารถรับไหลของฟิล์มถูกทำโดยการหมุนแสดงโดย $(V_1 + V_2)$ ถ้าทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วเท่ากันในทิศทางตรงกันข้าม $(V_1 + V_2) = 0$ มีความดันในฟิล์ม

2. ทรงกระบอกยึดหมุน ภายใต้ไหลลดการเสียดรูปของทรงกระบอกยึดหมุนการกระจายความดันบนฟิล์มแสดงเป็น

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2R} + [u_{z1}(x) - u_{z1}(0)] + [u_{z2}(x) + u_{z2}(0)] \quad (3.28)$$

เมื่อ μ_{z1} และ μ_{z2} คือ ระเบียบิตหมุนตั้งฉากของสองผิวแสดงโดยทฤษฎี Hertz ดังนั้น

$$h(x) = h_0 + (x^2/2R) - \frac{2}{\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} p(s) \ln \left| \frac{x-s}{s} \right| ds \quad (3.29)$$

สมการนี้และสมการเรโนลด์ (3.22) ใช้แสดงสำหรับรูปร่างฟิล์ม $h(x)$ และความดัน $p(x)$ ซึ่งสามารถผสมเข้าสู่สมการเดียวสำหรับ $h(x)$ ซึ่งสามารถแก้โดยวิเคราะห์เชิงตัวเลข รูปร่างฟิล์มแทนในสมการเรโนลด์เพื่อหาการกระจายความดัน $p(x)$

พารามิเตอร์ที่สำคัญคือความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด h_{min} ในทุกสภาวะ $h_{min} \approx 0.8 h_0$, การหล่อลื่นในการเสียดรูปแบบยืดหยุ่น ของผิวของแข็งรู้จักในการหล่อลื่นแบบ elastohydrodynamic

3. การหล่อลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืด เป็นที่รู้จักกันดีว่าความหนืดของสารหล่อลื่น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ในความดันในอุณหภูมิต่างๆ ในคุณสมบัติการสัมผัสของ higher kinematic pairs ความดันมีแนวโน้มสูง ดังนั้นมันไม่ประหลาดที่การเพิ่มความหนืดด้วยความดันในการหล่อลื่นแบบ elastohydrodynamic เมื่อการเคลื่อนที่สัมผัสแบบการลื่น ความร้อนจากการเสียดทานจะทำให้อุณหภูมิตั้งขึ้น ซึ่งฟิล์มจะมีความหนืดลดลง เป็นไปได้ที่จะแยกประสิทธิภาพของความดันและอุณหภูมิ

พิจารณาฟิล์มมีอุณหภูมิตั้งขึ้นที่การเปลี่ยนแปลงความหนืดตามความดันแสดง โดยสมการ

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (3.30)$$

เมื่อ μ_0 คือ ความหนืดที่สภาวะความดันและอุณหภูมิบรรยากาศและ α คือสัมประสิทธิ์ความดันคงที่ของความหนืด สมการนี้เป็นการอธิบายของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารหล่อลื่นทั่วไป แทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการเรโนลด์ (3.22) จะได้

$$e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx} = 6\mu_0 (V_1 + V_2) \left[\frac{h-h_0}{h^3} \right] \quad (3.31)$$

นี่เป็นการใช้สมการเรโนลด์สำหรับความดัน hydrodynamic ต้องแสดงสมการ (3.29) สำหรับผลกระทบของการเสียดรูปแบบยืดหยุ่นบนรูปร่างฟิล์ม การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข จำนวนของการเปลี่ยนพฤติกรรมสัมผัสและนำโดยผลกระทบความดัน - ความหนืด พื้นที่ฟิล์มที่สัมผัสประมาณว่าขนานกัน ผลลัพธ์นี้จากสมการ (3.31) เมื่อ α_p มากข้างซ้ายมือจะน้อยดังนั้น $h - h_0$ จะน้อยเช่น $h \approx h_0 =$ ค่าคงที่การกระจายความดันเป็นพื้นฐานของ Hertz สำหรับการสัมผัสแห้ง แต่ความดันสูงสุดอยู่บนทางออกตามการลดลงอย่างรวดเร็วของความดันและความหนาฟิล์มบางเมื่อความหนืดต่ำบรรยากาศมีค่า μ_0 รูปร่างและคุณสมบัติของไหลของการสัมผัส elastohydrodynamic จะสูง และฟิล์มขนานขรุขระเล็กน้อยที่ทางออกและการกระจายความดันประมาณตาม Hertz แต่สูงสุดใกล้ทางออกซึ่งสนับสนุนโดยการทดลองเพื่อความถูกต้องสมมุติว่าความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดประมาณ 75% ของความหนาในส่วนขนานการแก้ปัญหาที่สำคัญคือการคิดสภาวะที่ยอมรับได้ที่จะไม่คิดการเสียดรูปแบบยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง บางครั้งสามารถทดลองหาค่าโดยพารามิเตอร์ไร้มิติ 2 อัน พารามิเตอร์ความหนืด g_v พารามิเตอร์ความยืดหยุ่น g_e ที่แสดง การเคลื่อนที่ทางกลของการหล่อลื่น elastohydrodynamic ด้วยความดันตอนนี้ชัดเจนแล้วความดันพัฒนาโดย hydrodynamic ที่บริเวณทางเข้าด้วยการเพิ่มความหนืดอย่างมากความหนาฟิล์มที่จุดสิ้นสุดของ converging ถูกจำกัดโดยความดัน จึงต้องการหาความหนาฟิล์มในเทอมของความเร็ว, รัศมีเอกซอร์เป็นเอกซอร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกกลิ้งและคุณสมบัติความหนืดของสารหล่อลื่น การเพิ่มโหลดจะเพิ่มการเสียรูปแบบยืดหยุ่นของลูกกลิ้งด้วยเพียงเล็กน้อยที่มีอิทธิพลของความหนาฟิล์ม ของเหลว ความหนืดสูงผ่านทั่วบริเวณขนานจนกระทั่งความดันและความหนืดเป็นปกติที่ทางออกหมายความว่ามีการลดลงของความหนาฟิล์ม บริเวณทางเข้าและทางออกมีประสิทธิภาพอิสระ พบว่าที่จุดสิ้นสุดสุดของบริเวณขนานมีความชันที่ไม่ต่อเนื่องของผิวและมีความดันสูงสุด

3.7 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของการสัมผัสแนวเส้น

ในส่วนนี้จะแสดงการหล่อลื่นของการสัมผัสแนวเส้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การสัมผัสแนวเส้นแสดงดังรูปที่ 3.6 ความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่ทางออก และสามารถทำนายสูตรการคำนวณได้โดย Dawson และ Higginson สำหรับสภาวะอุณหภูมิกึ่งที่

$$\frac{h_{min}}{R} = 2.5 \frac{G^{0.54} V^{0.77}}{W^{0.13}} \tag{3.32}$$

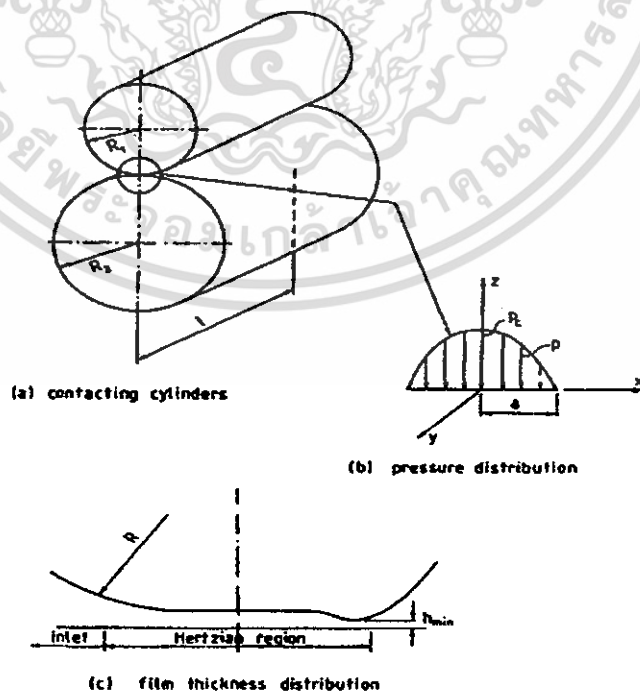
เมื่อ $G = \alpha E$ คือ dimensionless material parameter

$V = [\mu_0(V_1 + V_2)]/2ER$ คือ dimensionless speed parameter

$W = w/ERL$ คือ dimensionless load parameter

$\alpha =$ pressure viscosity coefficient

$\mu = \mu_0 e^{\alpha p}$ คือ piezo-viscous relation



รูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีผลต่อการเปลี่ยนของความหนืดกับความดัน

$$1/E = \frac{1}{2} \left[\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right] \quad (3.33)$$

เมื่อ μ_0 คือ ความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิผิวทางเข้า

V_1, V_2 คือ ความเร็วผิวบริเวณที่สัมผัสกัน

w คือ แรงทั้งหมด

L คือ ความยาวของการสัมผัส

และ $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 \pm R_2}$ เมื่อเครื่องหมายบวกเป็นการสัมผัสภายนอก (ผิวทั้งสองโค้งออก) และ

เครื่องหมายลบ เป็นการสัมผัสภายใน (ผิวรัศมีใหญ่กว่าโค้งเข้าข้างใน)

ความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิของผิวของแข็งบริเวณสัมผัสทางเข้า คือ ผลของความหนืดสำหรับหาค่าความหนาฟิล์ม ที่อุณหภูมินี้บางที่พิจารณาสูงกว่าสารหล่อลื่นที่ให้ ดังนั้นความหนืดทางเข้าอาจจะมีสสารต่ำกว่าที่คาดไว้ ปกติแล้วอุณหภูมิผิวทางเข้าจะ ไม่รู้ปริมาณในการออกแบบ วิธีการแก้ปัญหาคือ ใช้อุณหภูมิสารหล่อลื่นทางออก หรือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางเข้าและทางออกเพื่อหาค่าความหนาฟิล์ม ควรชี้ให้เห็นว่าการทำนายความหนาฟิล์มอาจจะใหญ่มากเมื่อระบบให้อุณหภูมิถูกใช้และการไหลของสารหล่อลื่นไม่เพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิของสารหล่อลื่นทางเข้าคุณลักษณะของสารหล่อลื่น เช่น ความหนืด, สัมประสิทธิ์ความดัน-ความหนืด และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ-ความหนืด โดยปกติหาได้จากข้อมูลสารหล่อลื่นของผู้ผลิต

3.8 ความร้อนของการสัมผัสที่ทางเข้า

ในส่วนที่แล้วได้กล่าวถึงคุณลักษณะของสารหล่อลื่นบริเวณอุณหภูมิทางเข้า และระบบที่อุณหภูมิคงที่ อุณหภูมิสารหล่อลื่นบริเวณทางเข้าปกติแล้วจะสูงกว่าอุณหภูมิมืดของสารหล่อลื่น มีเหตุผลทางกล 3 อย่างที่เพิ่มอุณหภูมิสารหล่อลื่นบริเวณทางเข้า คือ หนึ่งความร้อนจากความหนืด สองการนำความร้อนในมัดของการสัมผัสของ สองสาเหตุผลทางกลนี้บางที่มีความสำคัญเพียงในการตื่นอย่างเดียว ซึ่งมีผลต่อความร้อนทางเข้า ควรได้รับการพิจารณา วิเคราะห์แก้ปัญหาโดยวิธี Thermal reduction factor (T_f) ซึ่งสามารถคูณโดย isothermal film thickness h_0 จะทำให้ง่ายต่อการหาค่าความหนาฟิล์มที่แท้จริง

แฟคเตอร์ความร้อนที่ถูกต้องอยู่ในฟังก์ชันโหลดที่น้อย และพารามิเตอร์วัสดุ การประมาณค่าครั้งแรกใช้หาค่า แฟคเตอร์ ความร้อนที่ถูกต้องของการสัมผัสแนวเส้น

$$T_f = 0.827 - 0.234T_f + 0.000168(T_f)^2 \quad (3.34)$$

ในสมการ (3.34) แฟคเตอร์โหลดความร้อน T_f หาโดยการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_f = \frac{\mu_o V^2 \delta}{\rho} \quad (3.35)$$

เมื่อ μ_o = ความหนืดของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิผิวทางเข้า

V = ความเร็วผิวเฉลี่ย (w/s)

δ = สัมประสิทธิ์ ความหนืด - อุณหภูมิของสารหล่อลื่น

ρ = ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่น

สัมประสิทธิ์ ความหนืดอุณหภูมิ, δ , สามารถหาได้จากแผนภูมิความหนืดอุณหภูมิของสารหล่อลื่น จำเป็นที่เลือกสองอุณหภูมิประมาณ 20°C ผ่านใกล้อุณหภูมิทางเข้าสมมุติและแบ่งความหนืด โดยความหนืด ความร้อนเฉลี่ยและ การเปลี่ยนอุณหภูมิตามความการเปลี่ยนความหนืด ค่าการนำความร้อน ρ คือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ ตามส่วนประกอบของเคมีของสารหล่อลื่น สำหรับน้ำมันแร่ ค่าที่เหมาะสมคือ 0.12-0.15 w/mk ค่าที่ต่ำกว่านี้ใช้ สำหรับความหนืดที่ต่ำกว่า ทั้งจากน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า หรืออุณหภูมิต่ำกว่า เพื่ออธิบายข้างต้นการคำนวณเชิง ตัวเลขจะง่าย สมมุติสารหล่อลื่น SAR 10 น้ำมันแร่ อุณหภูมิ 55°C δ เท่ากับ 0.045°C และค่าการนำความร้อน ของสารหล่อลื่น เท่ากับ 0.12 W/m K. สมการ (3.35) จะเป็น

$$T_f = \frac{(27.6 \times 10^{-3})(15)^2 \times 0.045}{0.12} = 2.32$$

ใช้สมการ (3.34)

$$T_f = 0.857 - 0.0234(2.32) + 0.000168(2.32)^2 = 0.8$$

ความหนาฟิล์มที่ถูกต้อง

$$h = T_f h_o = 0.8(2.28) = 1.824 \mu m$$

หมายความว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของความหนาฟิล์มมีผลมาจากความร้อนที่ทางเข้า

3.9 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของจุดสัมผัส

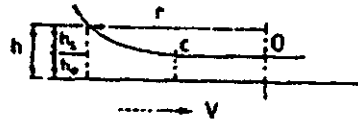
ในการเปรียบเทียบโหลหน้กๆ ของการสัมผัสแนวเส้นความเข้าใจของการหล่อลื่นจุดสัมผัสมีน้อย การวิเคราะห์ปัญหาปกติพิจารณาขอบเขตความรู้ของรูปทรงการสัมผัส ซึ่งปกติไม่รู้รายละเอียด พื้นฐานทฤษฎีแก้ปัญหา ถูกคิดโดย Grubin เขาสมมุติว่า

1. ความดันกระจายภายใต้สภาวะหล่อลื่นเกือบจะเป็น Hertzian

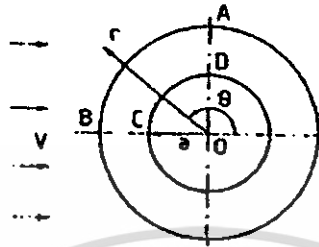
2. รูปทรงของช่องว่างทางเข้านิยโดยความดัน Hertzian อย่างเดียว ตัวอย่างเช่น

ความดันของเหลวตรงทางเข้าของบริเวณสัมผัสไม่มีผลกระทบ การประยุกต์ของ Grubin ประมาณว่าง่าย ที่เดียวในการสัมผัสแนวเส้น แต่จุดสัมผัสซับซ้อนมากกว่า การเปลี่ยนแปลงของโหลคความดันสูงสุด รัศมีสัมผัส และการเสีรูปร่างที่สามารถที่จะพบในหนังสือ Elasticity มาตราฐานทั่วไป ความสัมพันธ์แสดงตามนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) geometry of entry



(b) geometry of contact

รูปที่ 3.7

1. ใช้โหลด W สร้างการสัมผัสเชิงมุมของรัศมี a

$$W = \frac{2}{3} \pi a^2 P_{max} \tag{3.36}$$

เมื่อ P_{max} คือ ความดันสูงสุดที่จุดศูนย์กลาง
 2. รัศมีสัมผัส a มาจากความสัมพันธ์

$$a^3 = \frac{3}{4} \pi \frac{RW}{E} \tag{3.37}$$

เมื่อ R คือ รัศมีสมมูล หาโดย $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$
 E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1-V_1^2}{E_1} + \frac{1-V_2^2}{E_2} \right]$$

เมื่อ V คือ อัตราส่วนปัวซองของ และ 1, 2 อ้างอิงเป็นวัสดุ 2 ชิ้น สัมผัสกัน

3. ช่องว่างข้างนอกของบริเวณสัมผัสหลัก ที่ระยะห่างรัศมี V (ดูรูป 3.7)

$$h = h_0 + \frac{3W}{4aE} \left[\left(\left(\frac{r^2}{a^2} \right) - 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(2 \frac{r^2}{a^2} \right) \cos^{-1} \frac{a}{r} \right] \tag{3.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่องว่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส สามารถประมาณในบริเวณ $a \leq r \leq 2a$ โดย

$$3.81(r/a-1)^{1.5}$$

โดยสมการ (3.38) จะเป็น

$$h = h_0 \{1 + E[\frac{r}{a} - 1]^{1.5}\} \quad (3.39)$$

เขียนในรูปไร้มิติของสมการเรโนลด์ ในเชิงชั่วและพิจารณาใน สมการสุดท้ายสามารถหาได้ เห็นได้ชัดว่า สมการไม่แก้ปัญหาคาหวิเคราะห์ได้แม่นยำปกติแล้วแก้โดยการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งได้ทำไว้หลายคนและได้ สมการที่ง่าย ดังนี้

$$\frac{h_0}{R} = \frac{3a\mu_0(V/R)}{(W/ER^2)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.40)$$

เมื่อ μ_0 คือ ความหนืดน้ำมันที่ความดันบรรยากาศ

a คือ สัมประสิทธิ์ ความดัน ความหนืด และ

V คือ ความเร็ว

สมการ (3.40) ได้จากการทดลองและขณะนี้ชัดเจน แม้ว่าไม่เอื้ออำนวยต่อรูปร่าง ฟิสิกส์หล่อลื่น elastohydrodynamic มีจุดสัมผัสในสภาวะกว้างมาก

บทที่ 4 การหล่อลื่น

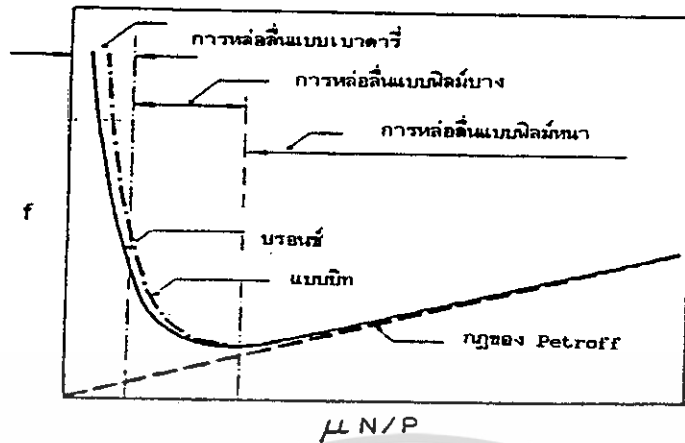
4.1 หลักพื้นฐานการหล่อลื่น

4.1.1 การหล่อลื่นชิ้นงาน

การหล่อลื่นชิ้นงาน คือ การแยกชิ้นงานออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ขณะที่ผิวชิ้นงานตั้งแต่สี่ชิ้นขึ้นไปไปตลอดทุกกัน ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกฉีกโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่เกิดความเสียหาย ถ้าหากว่ามีฟิล์มน้ำมันล้นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงาน แต่ถ้าไม่มีฟิล์มเฉพาะบางพื้นที่ของผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดฟิล์มจะเกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงานทั้งสอง เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ ก็จะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเคลื่อนไถลระหว่างผิวโลหะทำให้เนื้อโลหะหลุดออกจากผิวเกิดการสึกหรอของชิ้นงาน จะเห็นว่า การหล่อลื่นชิ้นงาน สามารถลดการสึกหรอทำให้เครื่องจักรมีอายุยาวนานขึ้น และยังทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งทำให้เครื่องจักรมีขนาดเล็กลง ประหยัดพลังงานรวมทั้งลดมลพิษให้แก่สิ่งแวดล้อมด้วย การหล่อลื่นนั้นจำเป็นต้องให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นซึ่งเป็นของไหลที่มีความหมายเพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงาน หรือไม่สึกหรอของผิวชิ้นงาน ขณะที่ชิ้นงานชิ้นหนึ่งเคลื่อนไถลไปบนผิวของชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง การหล่อลื่นแบบนี้จะพบในกาบรองลื่นเพลากลม แผ่นรองลื่นรับรองค้อน ซึ่งเรียกการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดร ไดนามิค สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มักจะเป็นน้ำมันหล่อลื่น แร่ น้ำ อากาศ หรือน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ฯลฯ

จากเหตุผลที่ว่าอุตสาหกรรมมีการพัฒนาตัวอย่างรวดเร็ว เครื่องจักรเครื่องมือสมัยใหม่ได้ถูกพัฒนาให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง ความเร็วรอบสูง ทำให้การหล่อลื่นแบบไฮโดร ไดนามิคได้ถูกนำไปใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรต่าง ๆ เช่น กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส เครื่องอัดอากาศเครื่องยนต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การหล่อลื่นแบบแห้งและการหล่อลื่นแบบเบาดารี ใช้สารหล่อลื่นที่เป็นไข อาจเป็นจาระบีหรือน้ำมันไข มักจะใช้งานที่มีความเร็วรอบต่ำ หรืองานที่ผิวชิ้นงานเคลื่อนไถลบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งผิวที่เคลื่อนไถลกันของผิวชิ้นงาน อาจมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ หรืออาจไม่มีการหล่อลื่นเป็นผิวแห้งก็ได้

วิชาวิทยาศาสตร์การหล่อลื่น ได้เริ่มมีการศึกษาค้นคว้าตั้งแต่ประมาณ ปี ค.ศ.1785 นายคูลอมบ์ (Coulomb) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความคิดและยังได้อธิบายความคิดสถิตย์และความคิดจลน์ (Static friction and Kinetic friction) ต่อมาในปี ค.ศ.1886 นายเรโนลด์ (Reynold) ได้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลเป็นครั้งแรก ทำให้วิชาการทางด้าน การหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนปัจจุบันวิชาการหล่อลื่นได้เป็นวิชาที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่



รูป 4.1 ชนิดของการหล่อลื่น

4.1.2 ชนิดการหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นกับฟิล์มสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสภาวะการทำงาน จากรูป 4.1 สำหรับกาบรองลื่นเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f และค่า $\mu N/P$ โดยที่ μ คือ ค่าความหนืดของสารหล่อลื่น N คือความเร็วรอบของเพล และ P คือภาระที่กาบรองลื่นรับต่อพื้นที่ภาพฉาย หรือเรียกว่าภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าค่าที่ $\mu N/P$ สูง ๆ กาบรองลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $\mu N/P$ และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่า ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบ ไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า $\mu N/P$ ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำสุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ถ้าลดค่า $\mu N/P$ ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นในลักษณะนี้เรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง และถ้าลดค่า $\mu N/P$ ลงไปอีก จากรูปจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็วและยังพบว่าฟิล์มหล่อลื่นบางส่วนถูกทำลายไป ซึ่งเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบาดารี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของการหล่อลื่นแบบต่าง ๆ ได้แสดงในตาราง 4.1

ชนิดของการหล่อลื่น	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น (ผิวแห้ง)	1.0 – 2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบาดารีหรือแบบฟิล์มบาง	0.05 – 0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

ตาราง 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ชนิดของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่หลักใหญ่ ๆ สองประการ คือ ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สอง ช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงานระหว่างที่ชิ้นงานมีการหมุนหรือเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและเลือกสารหล่อลื่นจะต้องพิจารณาถึง

1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน
2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน

แฟลตเตอร์ทั้งสามนี้เป็นตัวกำหนดชนิดของการหล่อลื่น ซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นสองชนิดคือ

1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนาหรือเรียกการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นที่เป็นฟิล์มของไหลหนา ดังนั้นสมรรถนะการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นหลัก

2. การหล่อลื่นแบบเอนาจารี เป็นชนิดการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่หนาเพียงหนึ่งหรือสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้น กระบวนการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น และคุณสมบัติของผิวชิ้นงานด้วย

สารหล่อลื่นที่จะกล่าวต่อไปนี้ คือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง และสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

4.2.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว

น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นสถานะชนิดของเหลวที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน น้ำมันดิบ เป็นต้น ส่วนใหญ่น้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม ดังนั้น ในที่นี้จะพูดถึงน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมดิบส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 83 – 87% มีไฮโดรเจนประมาณ 11 – 14% และมีส่วนผสมอื่น ๆ ได้แก่ กำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน จะเห็นว่าน้ำมันปิโตรเลียมดิบมีส่วนผสมส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและไนโตรเจน จะสามารถจับตัวได้หลาย ๆ แบบ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแตกต่างกันไป สามารถจำแนกออกเป็น พาราฟิน โอลีฟิน เอโรมาติก แน้ทรีน และเอสพาเทิน ผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมสามารถเลือกชนิดหรือแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมดิบและกำหนดอัตราส่วนของน้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันดิบต่าง ๆ ในโลกประมาณ 0 – 40% เพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณภาพตามความต้องการ น้ำมันปิโตรเลียมสามารถใช้แทนน้ำมันปิโตรเลียมได้อย่างดี เนื่องจากทำให้ผิวชิ้นงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นเปียก เป็นชั้นน้ำมันขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ลดถูกกัน น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่มีพิสัยความหนืดสูง สามารถเลือกใช้ได้ง่ายให้เหมาะกับงาน และน้ำมันปิโตรเลียมมีค่าความหนืดเพิ่มมากกว่าของไหลอื่นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนผสมชนิดของน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ส่วนผสมของพาราฟิน เอโรมาติก และแน้ทรีน จะมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างมากตามตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ	พาราฟิน	เอโรมาติก	เน็ทซีน
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง	สูง
จุดไฟวาบ	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ	ต่ำ

ตาราง 4.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารหล่อลื่นสถานะของเหลว

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือ อัตราส่วนของความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนของชั้นของน้ำมันหล่อลื่น โดยสมมติว่าน้ำมันหล่อลื่นเป็นของเหลวนิวตันเนียน (newtonian fluid) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูญเสียพลังงาน เนื่องจากความฝืดประสิทธิภาพทางกล ความร้อนที่เกิดขึ้น การไหลของน้ำมัน ภาระที่สามารถรับได้ และความสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น กาวรองลื่น หรือเฟือง เป็นต้น

ชนิดของสารหล่อลื่น	ค่าความหนืด (นิวตัน.วินาที)/ตารางเมตร
น้ำผึ้ง	15×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 50	8×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 30	3×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 10	0.7×10^{-4}
น้ำมันหล่อลื่น SAE 5	0.32×10^{-4}
น้ำมันมะกอก	1×10^{-4}
ปรอท	0.15×10^{-5}
น้ำ	0.1×10^{-5}
อากาศ	0.018×10^{-5}

ตาราง 4.3 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ 21°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำมันหล่อลื่น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในทางปฏิบัติ สำหรับเครื่องยนต์ SAE ได้กำหนดค่าน้ำมันหล่อลื่นตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ตามตาราง 4.4

ความหนืดเบอร์SAE	ความหนืด ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)			
	-17.8°C		99°C	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
5W	-	869	-	-
10W	1303	2606	-	-
20W	2066	10423	5.73	9.62
30W	-	-	9.62	12.93
40W	-	-	12.93	16.77
50W	-	-	16.77	22.68
75W	-	3257	-	-
80W	3257	21761	-	-
90W	-	-	14.24	25.0
140W	-	-	25.0	42.7
250W	-	-	42.7	-

ตาราง 4.4 หนืดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE

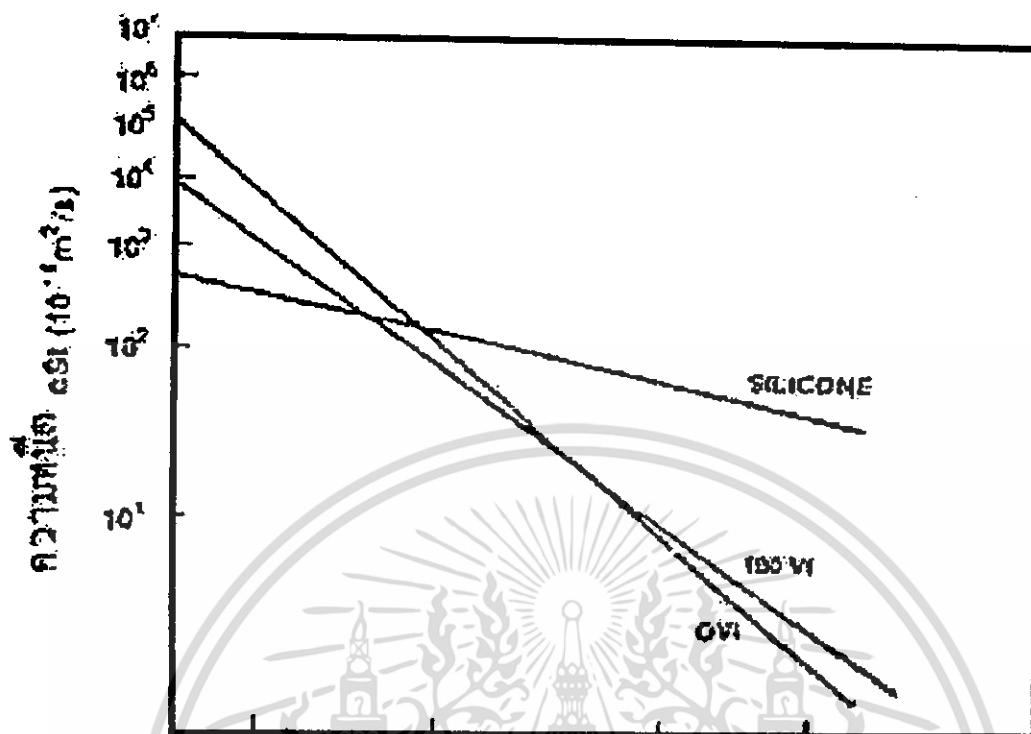
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกรดน้ำมัน ISO VG	ความหนืดโดยเฉลี่ย M^2/s ที่ $40^\circ C$	พิสัยค่าความหนืด M^2/s ที่ $40^\circ C$	
		ต่ำสุด	สูงสุด
2	2.2	1.98	2.24
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	980	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

ตาราง 4.5 ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรม

เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนของน้ำมันเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนืดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าของความหนืด ได้แสดงด้วยค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index) หรือ VI ค่า VI สูงแสดงว่าค่าความหนืดมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมिन้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่า VI ต่อรูป 4.2 แสดงผลอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอน (Silicone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

เนื่องจากแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไป ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อสมรรถนะของการรองลื่นหรือแผ่นรองลื่น เช่น ทำให้ภาระที่สามารถรับ ได้มีค่าเปลี่ยนไปทำให้แรงเสียดทานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดลดลง ในทางปฏิบัติเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำมันหล่อลื่น 38 เท่าของแรงดันบรรยากาศ จะมีผลของค่าความหนืดเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเท่ากับ 1°C

คุณสมบัติอื่นที่ควรพิจารณา ได้แก่ ความหนาแน่น ความดันไอ ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จุดเยือกแข็ง เป็นต้น

การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันหล่อลื่นมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ น้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถผสมหรือทำน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมให้มีคุณสมบัติตามความต้องการได้ไม่ยาก อย่างไรก็ตามน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (additive) เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพเหมาะสมกับงานที่สุครวมทั้งต้นทุนที่เหมาะสมด้วย เช่น น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องทำความเย็นจะต้องมีคุณสมบัติไม่เป็นไขเมื่ออุณหภูมิต่ำ น้ำมันหล่อลื่นกังหันจะต้องสามารถต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน เพื่อจะได้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น

ชนิด	ชนิดน้ำมันปิโตรเลียม	คุณสมบัติของสารเติมแต่ง
น้ำมันเครื่องยนต์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน สามารถ ละลายสิ่งสกปรกเพิ่มค่าดัชนีความหนืด ต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นกังหัน น้ำมันไฮดรอลิก	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม ต้านทานต่อการสึกหรอ ต้านทานการเกิดฟอง
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรกล สิ่งทอ	พาราฟินและเน็พธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องทำความ เย็น	เน็พธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการกัดกร่อน
น้ำมันหล่อลื่นเครื่อง จักรกลสิ่งทอ	พาราฟินและเน็พธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรกล สิ่งทอ	พาราฟินและเน็พธีน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานต่อการเกิดสนิม
น้ำมันเกียร์	พาราฟิน	ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการเกิดฟอง ต้านทานต่อการเกิดสนิม เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัน

ตาราง 4.6 แสดงตัวอย่างการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นที่มีสารเติมแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	Phenolic amines, hindered phenol
สารเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน	Zinc dithiophosphate, Sulfurized olefins
สารเพิ่มความต้านทานต่อการสึกกร่อน	Tricresyl Phosphate, lead naphthenate
สารเพิ่มความสามารถในการละลายสิ่งสกปรก	Calcium and barium sulfonates, Phosphates, phenates, salicylates, Polyimides, Polyesters
สารเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดสนิม	Calcium and barium sulfonates, acid Phosphates esters, petroleum sodium sulfonates, lanolin, terpenes, dithio, phosphate, dithio carbonates
สารเพิ่มคุณสมบัติดัชนีความหนืด	Polybutylenes, polyacrylate
สารเพิ่มความแข็งแรงในน้ำมันฟิล์ม	Chlorine, Phosphorus, sulf-containing oil and waxes, lead soaps
สารป้องกันการเกิดฟอง	Silicones organic copolymers

ตาราง 4.7 สารเติมแต่งที่นิยมใช้

4.2.2 สารหล่อลื่นสถานะกึ่งของแข็ง

4.2.2.1 จาระบี

จาระบีเป็นสารหล่อลื่นที่เป็นส่วนผสมของน้ำมันแร่ กับสารเติมให้ข้น เช่น โลหะลิ้นเหมือนสบู่ผสม หรืออาจจะเป็นน้ำมันสังเคราะห์ ได้แก่ ซิลิโคน หรือเอสเตอร์ (esters) ผสมกับสารเติมข้นอาจจะเป็นดิน (bentonites) ซิลิกา คาร์บอนแบล็ค และเทปลอน เป็นต้น

จาระบีเป็นของไหล non-Newtonian คือ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนไม่เชิงเส้น จาระบีได้ถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น ซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสีย กล่าวคือ การใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่นมีข้อดีคือ สามารถใช้เป็นหล่อลื่นที่ความเร็วต่ำ ข้อเสียคือสามารถระบายความร้อนได้ต่ำ ไม่สามารถไหลพาเอาเศษโลหะที่เกิดจากการสึกกร่อนออกจากการบรลงลื่นหรือแผ่นรองลื่น จาระบีไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ความเร็วสูง ๆ อย่างไรก็ตาม จาระบีสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นดัดลูกปืนได้ที่ความเร็วสูงถึง 100,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานานถึง 100 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมการผลิตจาระบี

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน + สารเพิ่มคุณภาพทางเคมี + สบู่

สบู่ที่ผสมลงไปจะทำให้จาระบีข้นเหนียว เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งแข็งกึ่งเหลว ช่วยอุ้มและเกาะจับ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และสารเพิ่มคุณภาพทางเคมีไว้ ณ จุดหล่อลื่น โดยไม่เยิ้มทะลักออกมาจากภายนอก

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานผสมกับสารเพิ่มคุณภาพทางเคมี ก็คือน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปชนิดต่าง ๆ ที่เราใช้งานกันอยู่นั่นเอง ความแตกต่างของจาระบีแต่ละชนิดอยู่ที่คุณสมบัติของสบู่ที่ผสม โดยทั่วไปสบู่ได้มาจากปฏิกิริยาระหว่างด่างและกรดไขมันหรือไขมันพืช ยกเว้นบางกรณีอาจใช้สารอื่น ๆ เป็นส่วนผสมแทนสบู่

คุณสมบัติของสบู่แต่ละชนิดมีผลโดยตรงถึงคุณสมบัติของจาระบี ดังนี้

จาระบีที่มีส่วนผสมของลิเทียม (Lithium-base grease) เป็นจาระบีที่เป็นส่วนผสมของลิเทียม (Lithium soap) ซึ่งเป็นกรด 2-ไฮดรอกซี (2-hydroxy acid) และ/หรือไกลเซอไรด์ (Glyceride) รวมกับกรดไขมัน (fatty acid) จาระบีชนิดนี้จะให้ความเสถียรของแรงเฉือนดีมาก สามารถจับกับผิวชิ้นงานได้ดี สามารถใช้กับสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี เป็นจาระบีที่นิยมใช้มากที่สุดในยานยนต์ และอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

จาระบีที่มีส่วนผสมของแคลเซียม (Calcium-base grease) มีลักษณะคล้ายเนย มีอุณหภูมิที่ทำให้จาระบีชนิดนี้เริ่มหยดตัวได้ (dropping point) ที่ 66-104 องศาเซลเซียส ใช้เป็นสารหล่อลื่นเครื่องจักรกลที่มีความเร็วต่ำอุณหภูมิต่ำที่มีการกัดกร่อนสูง เนื่องจากจาระบีชนิดนี้มีคุณสมบัติ สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของโซเดียม (Sodium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (dropping point) 121-232 องศาเซลเซียส โครงสร้างมีความเสถียรสูง มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ไม่ดี แต่สามารถใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูง ได้เป็นอย่างดี

จาระบีที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม (Aluminium-base grease) มีลักษณะเหมือนวุ้นใส มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (dropping point) 66-104 องศาเซลเซียส สามารถต้านทานน้ำได้อย่างดี ทนต่อแรงบิดได้ต่ำ มีโครงสร้างเสถียร ใช้เป็นจาระบีสำหรับหล่อลื่นชิ้นส่วนช่วงล่างของรถยนต์ ใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรสิ่งทอ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูป

จาระบีที่มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium-base grease) เป็นจาระบีที่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัวได้ (dropping point) สูงมาก จึงเหมาะสมสำหรับใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง ๆ

จาระบีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว (Lead-base grease) เป็นจาระบีที่ให้ความสามารถในการรับแรงอัดเป็นแรงดันได้สูง จึงเหมาะสำหรับการใช้ในการหล่อลื่นเพื่อง จาระบีชนิดนี้มักจะมีส่วนผสมของกำมะถัน (sulfur) คลอไรด์ (Chloride) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) เพื่อให้มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อการออกซิเดชัน

จาระบีที่มีส่วนผสมของเบนโทน (Bentone-base grease) เป็นจาระบีที่มีคุณสมบัติสามารถต้านทานต่อน้ำ สามารถจับตัวกับผิวโลหะได้ดี ไม่มีอุณหภูมิเริ่มหยดตัว จึงเหมาะที่จะใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ ได้

4.2.2.2 คุณสมบัติอื่น ๆ ของจาระบี

1.ความอ่อนแข็ง (Consistency)

จาระบีชนิดเดียวกัน อาจมีความอ่อนแข็งต่างกัน สถาบันจาระบีในสหรัฐอเมริกา (National Lubrication Grease Institute หรือชื่อย่อ NLGI) ได้กำหนดความอ่อนแข็งของจาระบีออกเป็นเบอร์ โดยปล่อยเครื่องมือรูปกรวยแหลมให้ปักจมลงไปในเรื่องจาระบี (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ระยะจม (Penetration) เป็นหน่วย 1/10 ของมิลลิเมตรของแต่ละเบอร์ แตกต่างกันดังนี้

เบอร์จาระบี NLGI NO.	ระยะจม (1/10 มม.) ที่ 25 องศาเซลเซียส
000	444-475
00	400-430
0	355-385
1	310-340
2	265-295
3	220-250
4	175-205
5	130-160
6	85-115

ตาราง 4.8 เปรียบเทียบจาระบี

เบอร์ต่ำเป็นจาระบีเหลวหรืออ่อน (ระยะจมมาก) ส่วนเบอร์สูงเป็นจาระบีประเภทแข็ง (ระยะจมน้อย)

2.จุดหยด (Dropping Point)

เนื่องจากจาระบีเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่นและสบู่ ซึ่งแน่นอนว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โอกาสที่น้ำมันจะแยกตัวออกมาย่อมเป็นไปได้มาก จุดหยดของจาระบีคืออุณหภูมิซึ่งจาระบีหมดความคงตัวเริ่มไหลกลายเป็นของเหลว

3.สารเพิ่มคุณภาพทางเคมี (Additives)

สารเพิ่มคุณภาพทางเคมีที่ผสมอยู่ในจาระบีมีผลในการทำงาน สารเพิ่มคุณภาพทางเคมีที่ผสม ได้แก่ สารรับแรงกดแรงกระแทก สารช่วยป้องกันสนิมและการกัดกร่อน ฯลฯ นอกจากนั้นถ้าเป็นจาระบีใช้งานพิเศษบางชนิดอาจจะผสมสารช่วยหล่อลื่นลงไปด้วย เช่น โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์, กราไฟต์ ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 การเลือกใช้จาระบี

จาระบีที่จำหน่ายอยู่ที่องค์การมีอยู่หลายประเภท ผู้ใช้ต้องพิจารณาเลือกใช้ให้ถูกต้อง และเหมาะสม ข้อควรคำนึงในการเลือกใช้ มีดังนี้

1. สัมผัสกับน้ำและความชื้นหรือไม่ ถ้าสัมผัสหรือเกี่ยวข้องกับต้องเลือกใช้จาระบีประเภทน้ำ ถ้าเลือกใช้ไม่ถูก จาระบีจะถูกน้ำชะหลุดออกมาจากจุดหล่อลื่น
2. อุณหภูมิใช้งานสูงมากน้อยแค่ไหน จุดใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ควรเลือกใช้จาระบีประเภททนความร้อน ถ้าเลือกใช้ไม่ถูกต้อง จาระบีจะเสื่อมเหลว ทะลักออกมาจากจุดหล่อลื่น
3. ในกรณีที่สัมผัสทั้งน้ำและความร้อน ควรเลือกใช้จาระบีประเภทเอนกประสงค์ (Multipurpose) คุณภาพดี หรือ จาระบีคอมเพล็กซ์ (Complex) ซึ่งแน่นอนว่าราคาแพงกว่าจาระบีประเภทน้ำ หรือทนความร้อนเพียงอย่างเดียว
4. มีแรงกดแรงกระแทกระหว่างการใช้งาน ถ้ามากคงพิจารณาเลือกใช้จาระบีประเภทผสมสารรับแรงกดกระแทก (EP Additives)
5. สภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ฝุ่นละอองและสิ่งสกปรก จะเป็นปัจจัยสำคัญทำให้การอัดจาระบีบ่อยครั้งขึ้น
6. วิธีการใช้งาน ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ถ้าเป็นระบบแบบจุดจ่ายกลาง (Centralized System) ก็ควรจาระบีอ่อน คือ เบอร์ 0 หรือเบอร์ 1 ถ้าอัดด้วยปืนอัดจาระบีมักจะใช้เบอร์ 2 หรือเบอร์ 3 ถ้าอัดด้วยคัลบอาจใช้เบอร์ 3 หรือแข็งกว่านี้ และถ้าอัดหรือทาด้วยมือ ความอ่อนแข็งไม่สำคัญมากนัก นอกจากนั้นถ้าเป็นพวกกระปุกพียงเกียร์ที่ใช้จาระบี ก็ควรใช้จาระบีประเภทอื่น คือเบอร์ 0 หรือเบอร์ 1

4.2.2.4 คำแนะนำการใช้งาน

1. อัดจาระบีตามอัตราที่คู่มือระบุไว้และพิจารณาใช้งานประกอบด้วย เช่น ความร้อนสูงถูกชะล้างด้วยน้ำ ฝุ่นละอองมากควรอัดจาระบีบ่อยครั้งขึ้น
2. ตรวจสอบสภาพซีลเพลลา อย่าให้ซีลหลุดเพราะจาระบีจะไหลทะลักออกมาได้เป็นการสิ้นเปลือง
3. ตรวจสอบเครื่องมืออัดจาระบี โดยเฉพาะหัวอัดอย่างปล่อยให้อุดตัน จาระบีจะไม่เข้าไปที่จุดใช้งานเกิดความเสียหายขึ้นได้
4. อย่าเลือกใช้จาระบีเพราะราคาถูก หรือสีสวยงามมาใช้ แต่ขอให้พิจารณาจากคุณภาพและสภาพการใช้งานเป็นหลัก การใช้จาระบีที่เหมาะสมจะช่วยประหยัด ลดการสิ้นเปลืองและไม่เกิดความเสียหาย
5. การใช้จาระบีคุณภาพสูงเกิดความจำเป็นไม่เป็นการประหยัด เนื่องจากราคาแพงเกินไป เช่น จาระบีทนความร้อนสูงมากไม่ควรนำไปใช้ที่อุณหภูมิใช้งานต่ำ เป็นต้น
6. จาระบีเอนกประสงค์ ทนน้ำและทนความร้อน แต่ไม่ได้หมายความว่า เป็นจาระบีที่ใช้งานได้ทุกสภาพ ถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงมาก มีแรงกดแรงกระแทก ฯลฯ ควรพิจารณาเลือกใช้จาระบีพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.พยายามใช้จาระบีอย่างประหยัดและคุ้มค่า เช่น ถ้าวิธีการบรรจุเป็นแบบอัดเพิ่มอย่างสม่ำเสมอไม่จำเป็นต้องอัดไล่จาระบีเก่าออกจนหมด อัดเพียงจาระบีเก่าเริ่มทะลักออกมาบ้างก็พอแล้ว เพราะจาระบีเก่าส่วนที่เหลือยังสามารถใช้งานได้อีก

8.การใช้จาระบีคนละชนิด เบอร์ ยี่ห้อปนกัน

ก.ไม่ควรใช้จาระบีคนละชนิดปนกัน เพราะสารเคมีที่ผสมในจาระบีคนละชนิด อาจไม่ถูกกัน อาจเกิดการเสียหายได้

ข.ใช้คนเบอร์แต่ชนิดเดียวกันได้

ค.การใช้จาระบีคนละยี่ห้อปนกัน ถ้าเป็นประเภทสบู่อายุเดียวกันทำได้

หมายเหตุ ถ้าเป็นการอัดจาระบีด้วยปืน ซึ่งเมื่ออัดไล่จาระบีเก่าออกและจาระบีใหม่ปลิ้นออกมาแล้ว การใช้จาระบีปนกันก็อนุโลมให้ได้

4.2.2.5 วิธีการผลิตจาระบี

เริ่มต้นเราต้องนำเอาไฮดรอกไซด์ของโลหะ (ค่า) มาผสมกับไขสัตว์ หรือน้ำมันพืชให้เป็นสบู่เสียก่อน แล้วจึงผสมกับน้ำมันพื้นฐานกับสบู่ ขึ้นต่อไปก็เติมสารเพิ่มคุณภาพต่าง ๆ ตามต้องการ ปกติแล้วกระบวนการทั้งหมด จะทำให้ภาชนะอันเดียว เรียกว่า เป็นถังเหล็ก มีลักษณะกลมสูง คอนล่างเป็นรูปกรวย ภายในมีเครื่องกวน ซึ่งหมุนอยู่ในแนวตั้ง เครื่องกวนและกวนน้ำมัน และสบู่จะถูกเคล้าเข้าด้วยกัน ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จาระบี

จาระบีสังเคราะห์ (Synthetic grease) เป็นจาระบีที่ได้จากการนำเอาของไหลสังเคราะห์ เช่น ซิลิคอน (Silicone) ไปผสมกับสารทำให้ข้น อนินทรีย์ ทำให้มีคุณสมบัติสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง ได้ดีส่วนใหญ่จะใช้ในการหล่อลื่นเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรในเครื่องบิน

4.2.3 สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

สารหล่อลื่นสถานะของแข็งมักจะถูกใช้กับงานอุตสาหกรรม ที่สารหล่อลื่นสถานะของเหลวไม่สามารถใช้ได้ เช่น งานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไป หรือในงานที่เกิดความเค้นสูงที่ผิวชิ้นงานซึ่งสารหล่อลื่นสถานะของแข็งสามารถรับความเค้นได้มากกว่าสารหล่อลื่นสถานะของเหลว สารหล่อลื่นของแข็งยังมีข้อดีในการใช้งานเหนือสารหล่อลื่นสถานะของเหลว คือไม่จำเป็นต้องมีภาชนะบรรจุสารหล่อลื่น และไม่จำเป็นต้องมีซีล (Seal) ที่ใช้ในการป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันหล่อลื่น และยังสามารถป้องกันสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในระบบหล่อลื่น

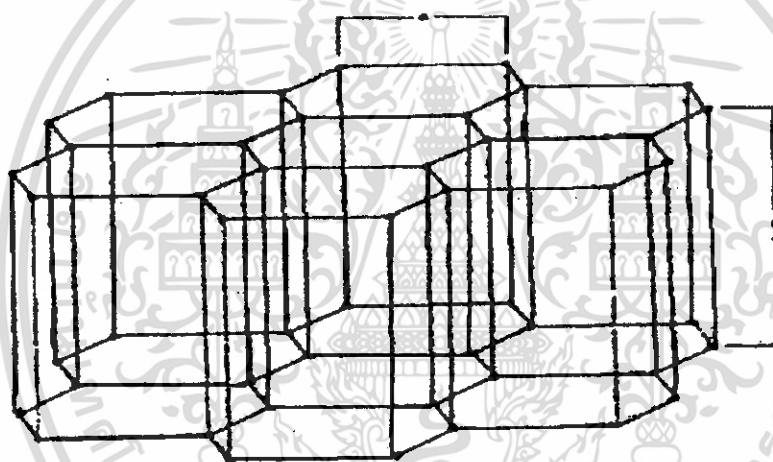
สารหล่อลื่นสถานะของแข็งจำพวกผง ยังใช้ผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นจาระบี และแก๊สเพื่อช่วยในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็งยังนิยมทำเป็นฟิล์มหรือชั้นของสารหล่อลื่นของแข็ง สมรรถนะของการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นของแข็ง จะขึ้นกับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและชนิดของสารหล่อลื่นของแข็ง จะเห็นว่าสารหล่อลื่นสถานะของแข็งที่ไม่สามารถใช้งานทั่ว ๆ ไป แต่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นกับงานประเภทที่มีสภาวะอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ๆ สภาวะอุณหภูมิต่ำมาก ๆ สภาวะสุญญากาศภายในสภาวะภาระสูงมาก ๆ ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีรุนแรง และในอุปกรณ์นิวเคลียร์

4.2.3.1 สารหล่อลื่นของแข็งเป็นผง (Particulate)

สารหล่อลื่นมีลักษณะเป็นผงทำมาจากวัสดุอนินทรีย์ อาจจะใช้สารหล่อลื่นคั่นระหว่างงานที่ต้องการหล่อลื่น หรืออาจใช้ผงสารหล่อลื่นผสมลงในสารหล่อลื่นสถานะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจาระบี ผงสารหล่อลื่นอาจจะเป็นแกรไฟต์ โมลบดีเนียมไดซัลไฟด์ (molybdenum disulfide) แทลค์ (talc) ไมก้า (mica) เวอร์มิคูไลต์ (vermiculite) เทฟลอน (Teflon) และเกลือ อนินทรีย์อื่น ๆ สารหล่อลื่นที่ได้กล่าวมานี้ จะมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี กล่าวคือมีโครงสร้างเป็นชั้น แลททิซ (Lattice) ตามรูปที่ 2.4 ยอมให้ถูกเฉือนได้โดยง่าย ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ตามตาราง 2.8



รูป 4.3 โครงสร้างเป็นชั้นส่วนแลททิซของแกรไฟต์

สารหล่อลื่นของแข็งที่นิยมใช้กันมาก คือ แกรไฟต์ และ โมลบดีเนียมไดซัลไฟด์ มักจะทำให้เป็นผงใช้ผสมลงในสารหล่อลื่นอื่น เช่น น้ำ หรือน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น บางครั้งอาจเติมผงเทฟลอน หรือผงตะกั่ว เนื่องจากเทฟลอน และผงตะกั่วจะช่วยป้องกันหรือชะลอการจับตัวของผิวชิ้นงาน เมื่อฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นถูกทำลาย เนื่องจากรับภาระสูงเกิดความเค้นสูงมากเกินไป ทำให้ผิวชิ้นงานร้อนจัด จะเกิดการจับตัวติดกันของผิวชิ้นงาน

วัสดุ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน		
	26.7 ° c	260 ° c	93.8 ° c
LiF	0.3 – 0.4	0.9	0.65 – 0.75
AlPO ₄	0.6	-	0.51
PbS	0.47	0.27 – 0.47	0.15 – 0.19
Pbs/Mas ₂	0.16 – 0.13	0.13	0.37
Pbs แกรไฟต์	0.2	0.24	0.21
แกรไฟต์	0.14 – 0.30	0.06 – 0.12	0.20 – 0.27
MoS ₂	0.34	0.10	-
BN	0.3	0.15	-
PbF ₂	0.6	0.6	-
TuS ₂	0.7	0.6	-
WS ₂	0.7 – 1.6	0.2	-
ไม้ก้ำ	0.38 – 0.89	-	-
แร่ทัลค์	0.13 – 0.89	-	-

ตาราง 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นสถานะของแข็ง

4.2.3.2 แกรไฟต์

แกรไฟต์สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้คือ เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไม่เกิดออกซิเดชัน มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นตามรูป 4.3 จะให้ค่าความเค้นเฉือนต่ำหรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ เนื่องจากอะตอมที่จับตัวกันอย่างไม่ถูกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดแรงพันธะหรือแรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ำเกินไป จึงทำให้เกิดแกรไฟต์มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่าย มีทฤษฎีหนึ่งอธิบายว่า แก๊สหรือไอน้ำที่ถูกแกรไฟต์ดูดซับจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของชั้นแกรไฟต์สูงขึ้น เป็นผลให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการหล่อลื่น สารหล่อลื่นสถานะของแข็ง ได้แก่ แกรไฟต์ โมลิตินัมไดซัลไฟด์ โบรอนไนไตรด์ (Boronitride) และ แทลค์ (talc) จะมีโครงสร้างในผลึกจับตัวกัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ

ถึงแม้ว่าแกรไฟต์ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำสภาวะอุณหภูมิต่ำเหมือนโลหะ แต่แกรไฟต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่สภาวะอุณหภูมิสูง แกรไฟต์บริสุทธิ์จะเสียน้ำหนักของมัน 1% ทั้งหมดในเวลา 24 ชั่วโมงนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 520 - 560 องศาเซลเซียส ในอากาศ หรือแกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชัน เท่ากับ 30 กรัม ต่อ ตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง สารที่ผสมในแกรไฟต์จะมีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของแกรไฟต์ เช่น เมื่อแกรไฟต์มีส่วนผสมของแบเรียม (Barium) เพียง 1% จะทำให้แกรไฟต์มีอัตราการเกิดออกซิเดชันเป็น 2000 กรัม ต่อ ตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง และถ้าแกรไฟต์มีส่วนผสมของสังกะสีบอเรท (Zinc borate) เพียง 2% ก็สามารถลดอัตราการเกิดออกซิเดชันลงเหลือเพียง 7.4 กรัมต่อตารางเมตรในหนึ่งชั่วโมง โมลิตินัมไดซัลไฟด์ฟลูออไรด์ (Graphite fluoride) จะเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส

แกรไฟต์โมลิตินัมไดซัลไฟด์ จะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับเหล็กอลูมิเนียม ทำให้เกิดการกัดกร่อนความชื้น จะไม่ทำให้การกัดกร่อนเปลี่ยนไปได้ สำหรับอลูมิเนียมสามารถป้องกันการกัดกร่อนด้วยการทำให้ผิวอลูมิเนียมมีสภาพเป็นขี้ผึ้ง

โมลิตินัมไดซัลไฟด์ MoS_2 มีโครงสร้างเป็นผลึกเหมือนโครงสร้างของแกรไฟต์ มีความสมบัติสามารถเป็นสารหล่อลื่นได้ดี มีอุณหภูมิระเหิดที่ 450 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยากับอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แสดงว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ MoS_2 ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น โมลิตินัมไดซัลไฟด์ สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ดีในแก๊สไนโตรเจนแห้ง และไม่เหมาะสมในการใช้เป็นสารหล่อลื่นในแก๊สออกซิเจน ไม่ควรใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นในบริเวณที่มีอากาศชื้น จะยังพบว่าโมลิตินัมไดซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าในการหล่อลื่นแบบเบาคาร์ ทำให้เกิด FeS

เมื่อใช้โมลิตินัมไดซัลไฟด์ผสมในน้ำมันจะต้องผสมอย่างน้อย 10% จึงทำให้มีผลของ MoS_2 ในน้ำมันหล่อลื่น

4.2.3.3 วัสดุประกอบ (composites)

เนื่องจากการหล่อลื่นสถานะของแข็งจะต้องจับตัวกับโลหะ ในระบบการหล่อลื่นวิธีการให้สารหล่อลื่นเกาะจับตัวกับโลหะ สามารถทำได้หลาย ๆ วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ บอนฟิล์ม (Bonded films)

บอนฟิล์มจะประกอบด้วยชั้นของสารหล่อลื่นของแข็งจับยึดติดกับผิวโลหะที่ต้องการ การหล่อลื่นด้วยน้ำยาประสาน ได้แก่ เรซิน ซิลลิเกต (Silicate) หรือ เซรามิก (Ceramic) แล้วอบให้ความร้อนหรือทิ้งให้แห้งในบรรยากาศ สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ MoS_2 แกรไฟต์ เทปลอน และ WS_2 บางครั้งใช้ส่วนผสมของสารหล่อลื่นผสมกันตามอัตราส่วน เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะ

เรซินบอนฟิล์ม (Resin-bonded films) จะใช้กับผิวโลหะที่สะอาด บางครั้งจะทำให้เกิดการซึมลึกของผิวดโลหะลึกประมาณ 5.1 - 20.3 ไมโครเมตร ด้วยวิธีการฉีดหรือจุ่ม

ตัวประสานสำหรับให้สารหล่อลื่นแห้งจับตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ คือ เทอร์โมพลาสติก เรซิน (Thermoplastic resin) เช่น พวกลเซลลูโลซิก (Cellulose) และอะคริลิก (Acrylics) จะได้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่ค่อนข้างแข็งจับประสานกับผิวโลหะ

สารหล่อลื่นของแข็งที่ได้จาก เรซินบอน (Resin bonded) ที่ต้องใช้ความร้อนในการอบให้แห้งและแข็งเป็นที่นิยมมากที่สุด ตามปกติประกอบด้วยส่วนผสมของ MoS_2 90% และแกรไฟต์ 10% ในเรซินเทอร์โมเซตติง ได้แก่ อัลไคด์ (Alkyds) ฟีนอลิก (Phenolics) อีพ็อกซี (Epoxyics) และซิลิคอน (Silicone) บางครั้งจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมของเงินและตะกั่ว การอบจะต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 – 200 องศาเซลเซียส การอบแข็งด้วยความร้อนจะให้ผลดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะใช้ในงานที่มีภาระสูงและทำให้ใช้งานนานขึ้น

4.2.3.4 โลหะอ่อนนุ่ม

ได้มีการใช้โลหะอ่อนนุ่มทำเป็นฟิล์มโลหะ เช่น ดิบุก อินเดียม (Indium) ตะกั่ว และเงิน เป็นต้น ทำเป็นฟิล์มในกาบรองลื่น แต่ในปัจจุบันและในอนาคตเชื่อว่า ดิบุก ทองแดง และตะกั่วจะถูกนำไปเคลือบหรือชุบบนผิวโลหะ เพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่น ตามปกติจะชุบเคลือบฟิล์มโลหะอ่อนเพียงบาง ๆ เท่านั้น บนผิวโลหะแข็ง การใช้งานของกาบรองลื่นแบบนี้จะใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ หรือในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ใช้ในการรีดเหล็กที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ ฟิล์มของทองคำ เงิน และโลหะมีค่าอื่น ได้ถูกใช้เป็นสารหล่อลื่นในยานอวกาศ เครื่องบินไอพ่น เครื่องจักรที่ทำงานที่ความเร็วรอบสูงและภาระสูง ได้มีการรายงานว่าชุบทองคำบนผิวเหล็กกล้า และสแตนเลส ทำให้การสึกหรอลดลง แต่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้น การชุบโลหะเงิน ทองแดง ทองคำ จะมีผลน้อยกว่าในการลดการสึกหรอของผิวโลหะ และการชุบโลหะนิกเกิล (Nickel) จะไม่มีผลต่อการสึกกร่อนของผิวโลหะเลย

กาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียม (Indium-coated bearings) จะใช้ในเครื่องบิน เครื่องยนต์ ดีเซล เครื่องยนต์แก๊สโซลีน เพราะว่ากาบรองลื่นที่เคลือบด้วยโลหะอินเดียมกับตะกั่วบนพื้นผิวเพลาเหล็กกล้า โลหะอินเดียมจะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแก่กาบรองลื่น และยังช่วยให้สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และช่วยให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น กาบรองลื่นที่ใช้กับงานหนัก ๆ บางครั้งจะเคลือบด้วยเงิน

โลหะอ่อนนุ่มจะมีค่าความเค้นเฉือนต่ำ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และกาบรองลื่นสามารถภาระได้สูง จำเป็นต้องเคลือบด้วยโลหะนุ่มเป็นฟิล์มบาง ๆ ความหนาของฟิล์มโลหะนุ่มจะอยู่ระหว่าง $10^{-4} - 10^{-5}$ เซนติเมตร

โลหะ	ความแข็งแรงเฉือน (กรัมต่อตารางมิลลิเมตร)	
	คำนวณจากแรงเสียดทาน	สำหรับโลหะบริสุทธิ์
อินเดียม	325	220
ตะกั่ว	1,600	750
ทองแดง	28,000	16,000
เหล็กกล้า	140,000	90,000

ตาราง 4.10 ความแข็งแรงเฉือนของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

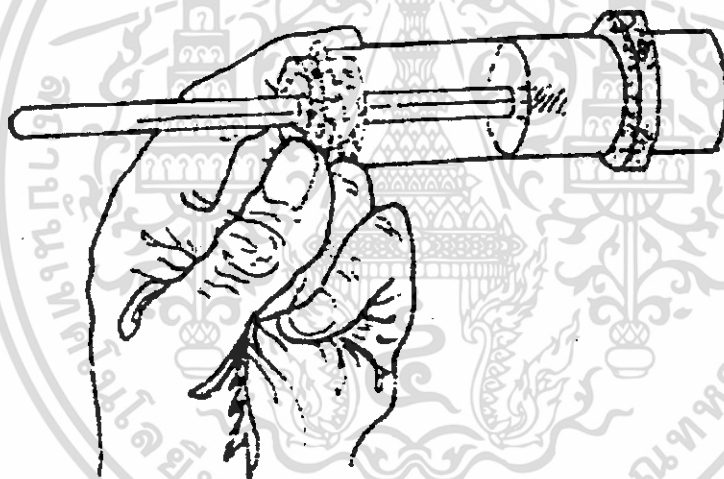
4.2.4 จุดไหลเท (pour point)

หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่มีน้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำเย็นไขก็จะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยกักเอาน้ำมันไว้และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป

ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน ตัวอย่างเช่นในประเทศหนาว จะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้สามารถไหลได้ ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ ในทางตรงกันข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่มีควมจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงตลอดเวลา

ไข (Wax) ที่มีอยู่ในเนื่อน้ำมันจะแข็งตัว (Crystallize) เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหลเทของน้ำมันนั้น ทำให้น้ำมันไหลได้ยาก

ในการใช้น้ำมันในที่อุณหภูมิต่ำมาก เช่น ห้องเย็น หรือ โรงน้ำแข็ง หรือในฤดูหนาวต้องใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน



รูป 4.4 การจัดจุดไหลเท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 ปาล์มน้ำมัน

5.1 ประวัติความเป็นมาของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่อยู่ในตระกูลปาล์มเช่นเดียวกับมะพร้าว ซึ่งปาล์มน้ำมันมีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกา และปาล์มน้ำมันที่ขึ้นในแอฟริกาส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า อีเลอัส กีนีนซิล

ปาล์มน้ำมันได้ถูกนำเข้ามาปลูกในทวีปเอเชียเป็นครั้งแรกในประเทศอินโดนีเซีย และถัดมาอีกไม่กี่ปีก็มีการนำมาปลูกในเชิงธุรกิจในประเทศมาเลเซีย จนกระทั่งมาเลเซียได้กลายเป็นผู้ส่งออกน้ำมันปาล์มรายใหญ่ที่สุดของโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2508 เป็นต้นมา

สำหรับประเทศไทยนั้นพบว่าได้มีผู้นำปาล์มน้ำมันเข้ามาปลูกที่จังหวัดสงขลา แล้วต่อมาได้มีการปลูกปาล์มน้ำมันในเชิงการค้าเป็นครั้งแรกในจังหวัดกระบี่ และสตูล โดยนำปาล์มมาจากประเทศมาเลเซียทั้งหมดซึ่งต่อมาได้มีการปลูกสวนปาล์มกันอย่างแพร่หลายในหลายจังหวัดทางภาคใต้ ส่งผลทำให้กิจการการบีบน้ำมันปาล์มขยายตัวอย่างต่อเนื่องเป็นต้นมา

5.2 การเก็บเกี่ยวทะลายนปาล์ม

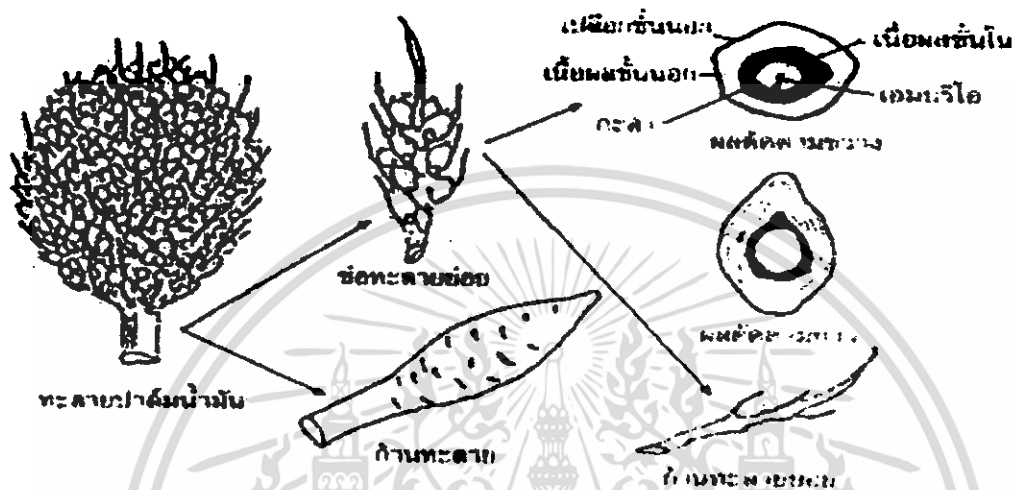
ช่อดอกตัวเมียที่ได้รับการผสมเกสรแล้วจะใช้เวลาประมาณ 5 ถึง 6 เดือน ผลปาล์มเริ่มสุกซึ่งระยะเวลานี้อาจเปลี่ยนแปลงมากน้อยแล้วแต่สภาพแวดล้อม และความสมบูรณ์ของต้นปาล์ม โดยปฏิกิริยาชีวเคมีของผลปาล์มในช่วงที่ผลปาล์มสุกนั้น แป้งในส่วนชั้นเปลือกจะแปรสภาพกลายเป็นน้ำซึ่งเรียกว่า กลีเซอไรด์ สำหรับผลปาล์มที่สุกนั้น สีของเมล็ดปาล์มจะเปลี่ยนจากม่วงดำเป็นสีแดงส้ม นอกจากการวัดความสุกของเมล็ดปาล์มจากสีส้มแล้วยังสามารถสังเกตได้จากผลปาล์มที่ร่วงจากทะลาย (2 ผลค่อน้ำหนักทะลาย 1 กิโลกรัม) จึงสามารถทราบว่ามีเมล็ดปาล์มสุกหรือไม่

ข้อควรปฏิบัติในการเก็บเกี่ยวทะลายนปาล์มมีดังนี้

1. ควรตัดทะลายนปาล์มที่สุกพอดี ไม่ควรตัดทะลายนปาล์มที่ยังดิบ เพราะในผลปาล์มดิบมีสภาพเป็นน้ำและแป้งยังไม่แปรสภาพเป็นน้ำมัน ส่วนทะลายนปาล์มที่สุกมากเกินไป จะมีกรดไขมันอิสระสูง
2. รอบการเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูที่ผลปาล์มออกชุกควรทำทุก 7 – 10 วัน ส่วนหน้าแล้งอาจเก็บช่วงนานกว่านี้ และผลปาล์มที่ร่วงควรเก็บมาให้หมดสิ้น
3. ไม่ควรแทงวงทะลายมากเกินไป และไม่ควรทำให้ผลปาล์มมีรอยขีดข่วน หรือชำรุดนักเพราะกรดไขมันอิสระจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
4. หากทะลายติดแน่นกับลำตัวมากให้ใช้มีดขูด หรือพรว้าตัดเขาะขั้วทะลายเสียก่อนแล้วจึงใช้เสียมแทงตาม
5. เมื่อเก็บทะลายนปาล์มมาจากสวนแล้ว ควรขนส่งไปยังโรงงานอย่างรวดเร็ว

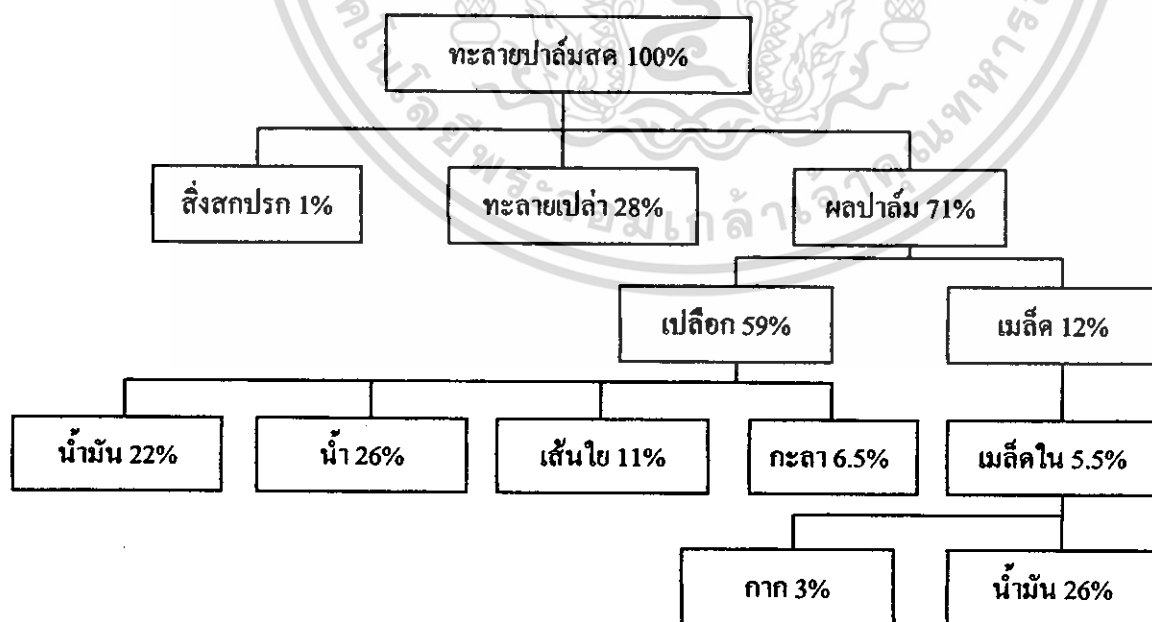
5.3 ส่วนประกอบของทะเลาะปาล์มสด

ทะเลาะปาล์มสดประกอบด้วย ทะเลาะเปล่า ผลปาล์ม ภายในผลปาล์มประกอบไปด้วยส่วนของชั้นเปลือก ซึ่งในชั้นนี้จะมีน้ำมันปาล์ม จากชั้นเปลือกจะมีกะลาหุ้มเมล็ดในอยู่ ภายในเมล็ดในจะมีน้ำมันอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า น้ำมันเมล็ดใน



รูป 5.1 แสดงลักษณะส่วนประกอบของทะเลาะปาล์ม

สำหรับปาล์มเทเนอร์อายุ 8 ปีขึ้นไป มีส่วนประกอบโดยประมาณดังนี้



รูป 5.2 แสดงส่วนประกอบของทะเลาะปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำมันจากเปลือกซึ่งเป็นตัวที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงสุดนั้น จะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามอายุของปาล์มตลอดจนการดูแลรักษา ซึ่งในกรณีที่ปาล์มอายุน้อยจะมีปริมาณน้ำมันจากเปลือกน้อยตามไปด้วย

5.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

การสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากทะลายนปาล์มสดนั้น ได้เริ่มมีมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยชาวพื้นเมืองได้นำเอาผลปาล์มจากปามาบีบเอาน้ำมันออกมาด้วยวิธีการง่าย ๆ เช่น นำผลปาล์มมาต้มกับน้ำแล้วใส่ครกตำจากนั้นก็นำไปต้มกับน้ำร้อน เพื่อแยกน้ำมันออกมาซึ่งได้ประสิทธิภาพต่ำมาก เครื่องหีบน้ำมันปาล์มในยุคแรก ๆ มีหลายแบบ เช่น เครื่องหีบน้ำมันแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เครื่องหีบแบบไฮดรอลิก และเครื่องแบบเกลียวอัดบางแบบก็ได้เลิกใช้กันไป และบางแบบก็ได้พัฒนาเพิ่มเติมจนใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน

สำหรับในประเทศไทยนั้นจากการสำรวจของโครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กตามพระราชดำริ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปลายปี พ.ศ. 2527 พบว่ามีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีกระบวนการผลิตต่างกัน 3 แบบคือ

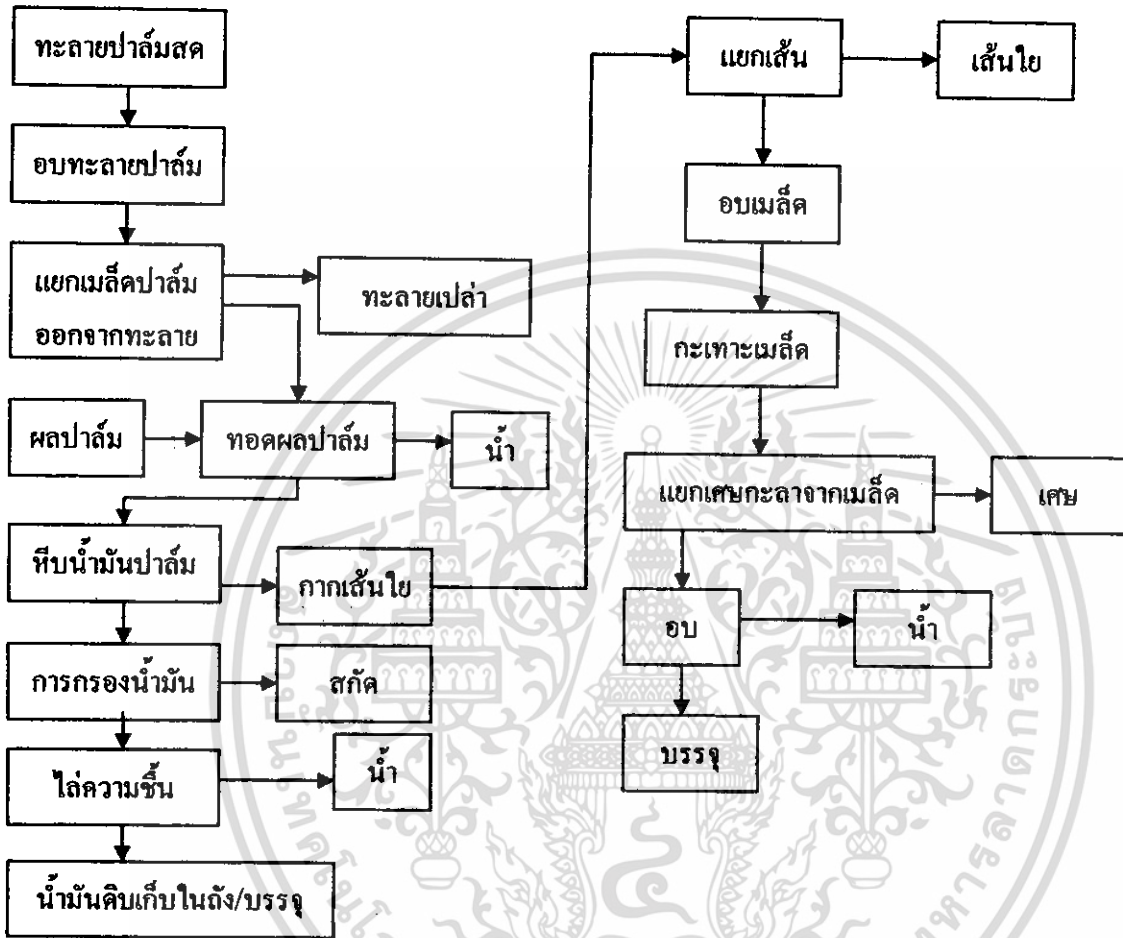
5.4.1 กระบวนการสกัดแบบมาตรฐาน

กระบวนการผลิตแบบนี้ เป็นกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานซึ่งเครื่องจักรและเทคโนโลยีล้วนนำเข้ามาจากต่างประเทศทั้งสิ้น โรงงานประเภทนี้เริ่มตั้งขึ้นครั้งแรกที่จังหวัดกระบี่ในราวปี พ.ศ. 2527 และต่อมาก็ได้มีการสร้างและอยู่ในระหว่างดำเนินการก่อสร้างอีกรวมทั้งสิ้นเกือบ 20 โรงงาน โรงงานเหล่านี้จะมีกำลังผลิตตั้งแต่ 10 ถึง 40 ตันทะลายต่อชั่วโมง และแต่ละโรงงานจะมีสวนปาล์มของตนเองทั้งสิ้น 10,000 ไร่ขึ้นไป โรงงานเหล่านี้จะใช้เงินทุนค่อนข้างสูง คือประมาณ 50 - 100 ล้านบาท

กระบวนการผลิตเริ่มจากนำทะลายนปาล์มสดมาอบไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120 - 130 องศาเซลเซียส มีความดันประมาณ 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลาประมาณ 45 นาที การอบทะลายนปาล์มมีจุดมุ่งหมายที่จะหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่ม และฉีกหลุดจากทะลายนได้ง่าย ทะลายนปาล์มที่อบแล้วจะถูกนำไปป้อนเข้าเครื่องแยกเปลือกปาล์มออกจากทะลายน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องแบบโรตารี หมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 23 รอบต่อนาที ทะลายนปาล์มเปล่าจะถูกถาล้างไปเข้าเตาเผาทะลายนเพื่อทำปุ๋ยต่อไป ส่วนผลจะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอก ข้างในมีใบพัดกววนผลปาล์มให้เส้นใยฉีกย่อยออกจากเมล็ด และเชลล์น้ำมันแตกตัวออกมาเพื่อง่ายต่อการบีบน้ำมัน ข้างในมีใบพัดกววนผลปาล์มให้เส้นใยฉีกย่อยออกจากเมล็ด และเชลล์น้ำมันแตกตัวออกมาเพื่อง่ายต่อการบีบน้ำมัน เวลาที่กวนนานประมาณ 15 - 20 นาที จากนั้นก็ป้อนเข้าเครื่องบีบแบบเกลียวอัด ซึ่งส่วนมากเป็นเกลียวอัดคู่ซึ่งทำงานโดยอัตโนมัติ น้ำมันปาล์มที่สกัดได้จะส่งไปเข้าถังกรองซึ่งจะแยกน้ำมันออกจากน้ำกับเศษใยและสิ่งสกปรกอื่น ๆ ในขั้นแรก และนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำมันให้ใสสะอาดขึ้น จากนั้นก็นำไปไล่ความชื้นให้ได้มาตรฐาน แล้วนำไปเก็บในถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่เพื่อเตรียมส่งจำหน่ายโรงงานกลั่นน้ำมันบริสุทธิ์ต่อไป กระบวนการผลิตได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปไล่ความชื้นในถังสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 - 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 - 60 นาที จากนั้นก็นำไปกรองผ่านเครื่องกรองแบบอัดหลายชั้นเพื่อแยกสิ่งสกปรกออกก่อนจะบรรจุถังเก็บต่อไป ส่วนกากผลปาล์มก็จะนำไปแยกเอาเมล็ดในออกด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกับประเภทแรก กระบวนการผลิต ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.4

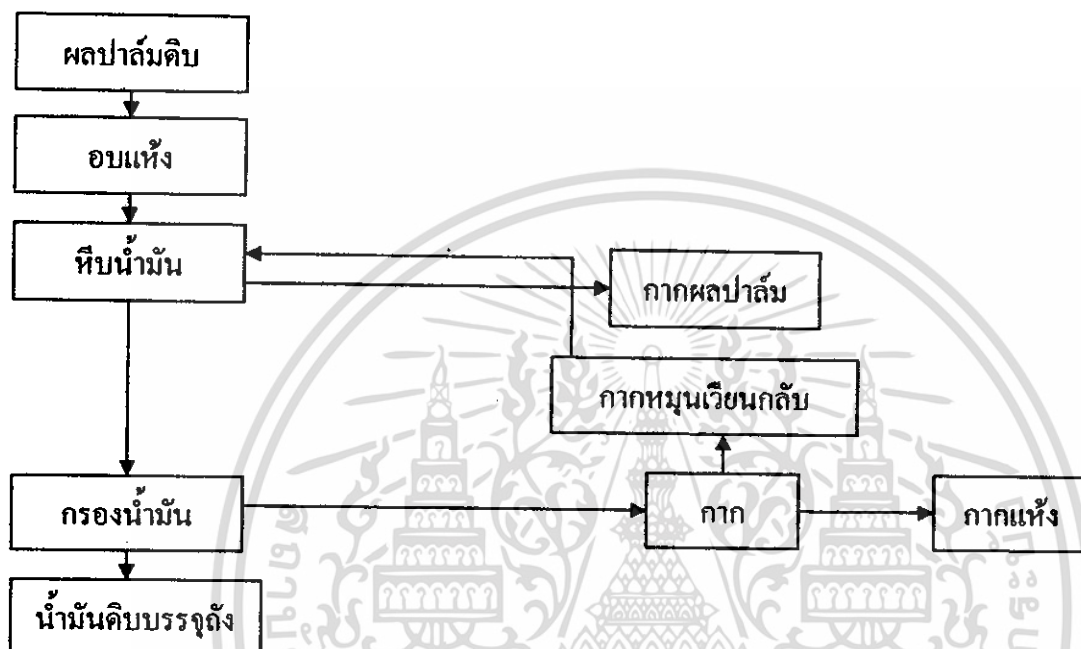


รูป 5.4 กระบวนการหีบน้ำมันแบบทอดผลปาล์มในน้ำมัน

5.4.3 กระบวนการหีบแบบผสม

กระบวนการผลิตนี้เกิดขึ้นจากโรงงานหีบน้ำมันมะพร้าว ซึ่งได้ตัดแปลงมาเป็นโรงงานหีบน้ำมันปาล์มเมื่อราวปี พ.ศ. 2518 - 2549 ปัจจุบันมีอยู่ประมาณกว่า 20 โรงงาน โรงงานประเภทนี้ใช้ผลปาล์มร่วงเป็นวัตถุดิบ โดยนำเอาผลปาล์มร่วงมาทำการย่างที่อุณหภูมิประมาณ 180 - 200 องศาเซลเซียส ในกระบะโดยเป่าลมร้อนจากเตาพื้นเข้ามาโดยตรงเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นก็นำเอาปาล์มไปบีบน้ำมันด้วยเครื่องบีบน้ำมันมะพร้าว ซึ่งน้ำมันจากเปลือกและเมล็ดในจะผสมกันหมด น้ำมันก็จะถูกนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบอัดหลายชั้น ส่วนกาก เส้นใย กะลา และเมล็ดใน ซึ่งปนกันอยู่จะบรรจุกระสอบจำหน่ายเป็นอาหารสัตว์ต่อไป โรงงานประเภทนี้มีกำลังผลิตประมาณ 10 - 30 ตัน ผลปาล์มร่วงต่อวัน ใช้เงินลงทุนต่ำและสามารถบีบได้ทั้งผลปาล์ม มะพร้าว และเมล็ดยางพารา ฯลฯ กระบวนการผลิตก็ง่ายไม่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 5.5 แต่ข้อเสียของกระบวนการผลิตแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อนักผู้ใดเห็นประโยชน์ในการดำเนินการก็ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่ก็มีหลายประการ กล่าวคือ น้ำมันจะไหม้ และฟอกสียาก เนื่องจากผลปาล์มถูกอย่างที่มีความร้อนสูง น้ำมันจะสกปรกเพราะมีเขม่าควันมากจากการย่างผลปาล์ม นอกจากนี้ยังเกิดกรดไขมันอิสระที่สูงกว่า ประการสุดท้าย น้ำมันปาล์มกับน้ำมันเมล็ดในที่ผสมกันอยู่ จะมีปัญหาหากเมื่อนำไปกลั่นบริสุทธิ์ จึงจำหน่ายได้ราคาต่ำกว่าน้ำมันที่ผลิตได้จากโรงงานสองประเภทแรก โดยเท่าที่ทราบโรงกลั่นจะนำไปทำสบู่หรือ ไม่นำไปแยกกรดฟอสเฟตและก็บรรจุปีบขายเป็นน้ำมันหมูเทียม



รูป 5.5 กระบวนการหีบน้ำมันผสม

5.5 ปาล์มสเตียร์น (Palm Stearin)

น้ำมันสเตียร์นชีวภาพสังเคราะห์ได้จากน้ำมัน หรือไขมันจากพืชและสัตว์หลากหลายชนิด ในหลายประเทศใช้น้ำมันพืชที่แตกต่างกันผลิตได้น้ำมันสเตียร์นคุณภาพดังแสดงในตาราง 5.1

ในประเทศไทยมีการผลิตพืชน้ำมันหลายชนิด แต่ละชนิดนั้นมีศักยภาพในการนำมาผลิตน้ำมันสเตียร์นชีวภาพ ในระดับอุตสาหกรรมแตกต่างกัน ศักยภาพนั้นได้แก่ปริมาณการผลิตที่ต้องมีเพียงพอ และสม่ำเสมอ รวมทั้งต้องมีราคาถูกเนื่องจากต้นทุนในการผลิตน้ำมันสเตียร์นชีวภาพส่วนใหญ่ขึ้นกับราคาน้ำมันวัตถุดิบ

ตาราง 5.1 ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ

Specifications	Units	Australia	France	Germany	Italy	Sweden	USA	Draft EU
Standard/Specification		ONC1191	-	DINE51606	UNI10635	SS155436	ASTM D6751	EN14214
Introduction Date		Jly 1997	Spt1997	Spt1997	Apr1997	Nov1996	2001	2001
Density @ 15 ° C	g/cm ³	0.85-0.89	0.87- 0.89	0.875- 0.90	0.86- 0.90	0.87-0.90	-	0.86-0.90
Viscosity@ 40 ° C	mm ² /s	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
Flash Point	° C	≥100	≥100	≥110	≥100	≥100	≥130	≥130
CFPP	° C	0/-15	-	0-10/-20	-	-5	-	0/-15
Pour Point	° C	-	-10	-	0/-15	-	-	-
Sulphur	%max	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01
CCR 100%max		0.05	-	0.05	-	-	0.05	-
10% disti.residue	%max	-	0.3	-	0.5	-	-	0.3
Sulphated Ash max	%max	0.02	-	0.03	-	-	0.02	0.01
(Oxide).Ash, max	%max	-	-	-	0.01	0.01	-	-
Water max.	mg/kg	-	200	300	700	300	≥0.05	500
Total Contaminants	mg/kg	-	-	20	-	20	-	-
Cu Corrosion	3h/ 50 ° C	-	-	1	-	-	NO.3	1
Cetane No.		≥49	≥49	≥49	-	≥48	≥47	≥49
Neutral No.		≤0.8	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.6	≤0.8	≤0.02
Methanol	%max	≤0.20	≤0.01	≤0.3	≤0.02	≤0.02	-	≤0.02
Ester Content	%max	-	≥96.5	-	≥98	≥98	-	≥96.5
Monoglyceride	%max	-	≤0.8	≤0.8	≤0.8	≤0.8	-	≤0.8
Diglyceride	%max	-	≤0.2	≤0.4	≤0.2	≤0.1	-	≤0.20
Triglyceride	%max	-	≤0.2	≤0.4	≤0.1	≤0.1	-	≤0.03
Free Glycerol	%max	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.05	≤0.02	≤0.02	≤0.25
Total Glycerol	%max	0.24	0.25	0.25	-	-	0.24	≤115
Iodine No.		≤120	≤115	≤115	-	≤125	-	-
C18:3 & higher acids		≤15	-	-	-	-	-	10
Phosphorous	ppm	≤20	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	10
Alkaline Matter	(Na, K)	-	≤5	≤5	≤10	≤10	-	≤360
Distillation 95%	° C	-	≤360	-	-	-	≤360	*
IBP min	° C	-	-	-	-	-	-	*
Bound Glycerin		-	-	-	-	-	-	Max 0.8
Oxidation Stability	Hrs.	-	-	-	-	-	-	6 min.
Sediment		-	-	-	-	-	-	≤0.05
Cloud Point		-	-	-	-	-	*	-

หมายเหตุ * ไม่กำหนดค่าเพียงแต่ให้รายงานค่า, CFPP คือ Cold Filter Plugging Point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.2 การเลือกใช้ไตรกลีเซอไรด์ชนิดต่าง ๆ เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ

ชนิดน้ำมัน	ประเทศ
น้ำมันจากผลเรพ (Rape Seed) 80% น้ำมันทานตะวัน 10%	อิตาลี และฝรั่งเศส
น้ำมันถั่วเหลือง (Soya bean)	อเมริกา
น้ำมันปาล์ม (Palm oil)	มาเลเซีย
น้ำมันมะกอก (Olive oil)	สเปน
น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cotton Seed Oil)	กรีซ
น้ำมันจาโทรฟาเคอร์เตส (Jatropha Curcas Oil)	นิการากัว
ไขวัว (Beef Tallow)	ไอร์แลนด์
น้ำมันพืชใช้แล้ว (Used frying Oil)	ออสเตรเลีย

มีรายงานว่าในประเทศไทยปาล์มน้ำมัน และปาล์มสเตียรินมีศักยภาพในการผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพมากกว่า น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง เนื่องจากมีผลผลิตต่อไร่ที่สูงกว่า และกากที่ได้จากการผลิตน้ำมันทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลืองมักจะนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ส่วนกากที่ได้จากการผลิตน้ำมันปาล์มได้นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้ววัตถุดิบที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม คือ น้ำมันพืชใช้แล้ว กรดไขมัน และปาล์มสเตียริน

ปาล์มสเตียรินเป็นผลิตภัณฑ์รองจากการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มีปริมาณประมาณ 30 – 35% ของน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น กระบวนการผลิตและการกลั่นแสดงในรูป 5.6 มีราคาต่ำประมาณ 6 ถึง 11 บาทต่อกิโลกรัม มีปริมาณการผลิตสม่ำเสมอประมาณ 124,200 ตัน/ปี มักจะล้นตลาดเพราะความต้องการในประเทศไทยมีน้อยต้องร่วมกันส่งออก และมีต้นทุนต่ำ

ขั้นตอนการกลั่นน้ำมันปาล์ม

1. การแยกยาง
2. การฟอกสีด้วยแป้งฟอกสี
3. การกรองแยกน้ำมันจากแป้งฟอกสี
4. การกำจัดออกซิเจนจากน้ำมัน
5. การกลั่นเพื่อแยกกรดและกำจัดกลิ่น โดยการระเหยในหอกถั่น
6. การเก็บรักษาน้ำมันกลั่นบริสุทธิ์ในถังภายใต้ไนโตรเจน

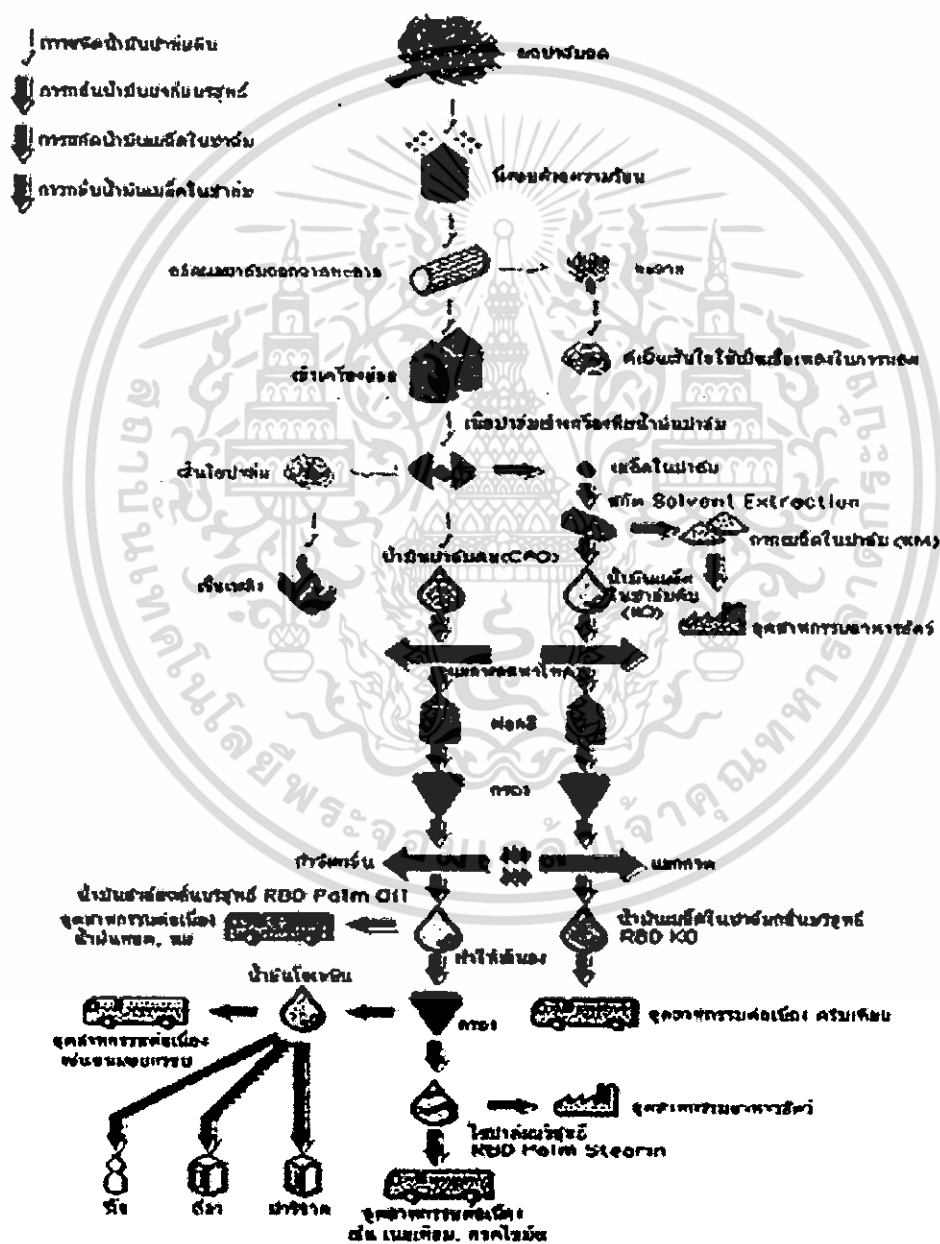
ขั้นตอนการแยกไขปาล์ม (Stearin)

1. อุ้มน้ำมันเพื่อละลายผลึกไขปาล์ม
2. ตกผลึกไขปาล์มโดยการใช้น้ำเย็นลดอุณหภูมิลงตามประเภทของน้ำมัน
3. กรองแยกไขปาล์มออกจากน้ำมัน โอเลอิน
4. มีมแยกน้ำมัน โอเลอินและไขปาล์ม ไปเก็บในถังเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.1 องค์ประกอบน้ำมันปาล์ม และปาล์มสเตียรีน

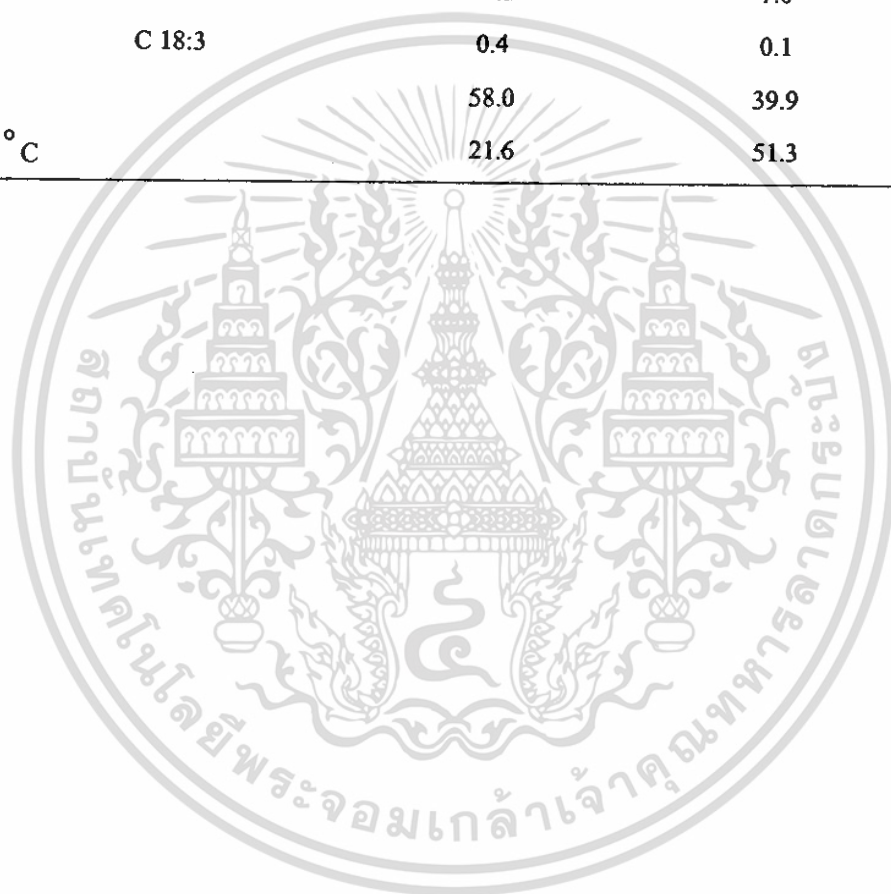
ปาล์มสเตียรีนเป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ เช่นเดียวกับน้ำมันปาล์ม และน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ แต่มีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันปาล์ม แสดงในตาราง 5.2 ซึ่งเมื่อนำมาผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพแล้ว จะทำให้มีคุณสมบัติเชื้อเพลิงบางคุณสมบัติที่ต่างออกไปจากน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์มไฮเลอิน จากรายงานของ Grabosky และคณะ ซึ่งสรุปได้ว่า เมทิลเอสเทอร์ที่มีความอิ่มตัวสูงกว่าจะมีค่าซีเทนนับเบอ์สูงกว่า และมีจุดไหลเท และจุดหมอกสูงกว่าเช่นกัน



รูป 5.6 กระบวนการการผลิตน้ำมันปาล์มไฮเลอิน ผลิตภัณฑ์รองปาล์มสเตียรีน และผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปาล์ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม และปาล์มสเตียรีน

ชนิดกรดไขมัน		น้ำมันปาล์มมาตรฐาน	ปาล์มสเตียรีนทั่วไป
Myristic	C 14:0	1.0	1.3
Palmitic	C 16:0	39.8	54.0
Stearic	C 18:0	4.4	4.7
Oleic	C 18:1	42.5	32.3
Linoleic	C 18:2	11.2	7.0
Linolenic	C 18:3	0.4	0.1
Iodine Value		58.0	39.9
Melting Point °C		21.6	51.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ทฤษฎีของการหมุนบนผิวสัมผัสของ Kalker

สมการของค่าการลื่นไถลที่อยู่บนผิวสัมผัสที่เป็นอนุภาคของวัตถุที่ยึดหยุ่นได้ในผิวสัมผัสของการหมุน

$$\begin{aligned} \frac{w_x}{L_{1v}} &= \frac{\xi_x}{L_1} - \frac{\Phi}{L_2'} y - \frac{\partial p_x}{\partial x} \\ \frac{w_y}{L_{2v}} &= \frac{\xi_y}{L_2} + \frac{\Phi}{L_2'} y - \frac{\partial p_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (6.1)$$

ในการหาวิธีการแก้ปัญหของสมการที่ 10 จะทำได้ง่ายจะต้องทำเป็นสมการไร้มิติ

$$\begin{aligned} n_x &= C_0 C_{11} \xi_x, n_y = C_0 C_{22} \xi_y \\ w_x^* &= C_0 C_{11} w_x, w_y^* = C_0 C_{22} w_y \\ f_x &= \frac{E}{1+\mu} \frac{a^{1/2} b^{5/2} c_{23}}{F_n} \Phi, f_y = \frac{E}{1+\mu} \frac{a^{3/2} b^{3/2} c_{23}}{F_n} \Phi \\ p_x &= \frac{2\pi ab}{3F_n} p_x, p_y = \frac{2\pi ab}{3F_n} p_y, x' = \frac{x}{a}, y' = \frac{y}{b} \\ C_0 &= \frac{3}{32} \frac{E}{1+\mu} \frac{\pi ab}{F_n} \end{aligned} \quad (6.2)$$

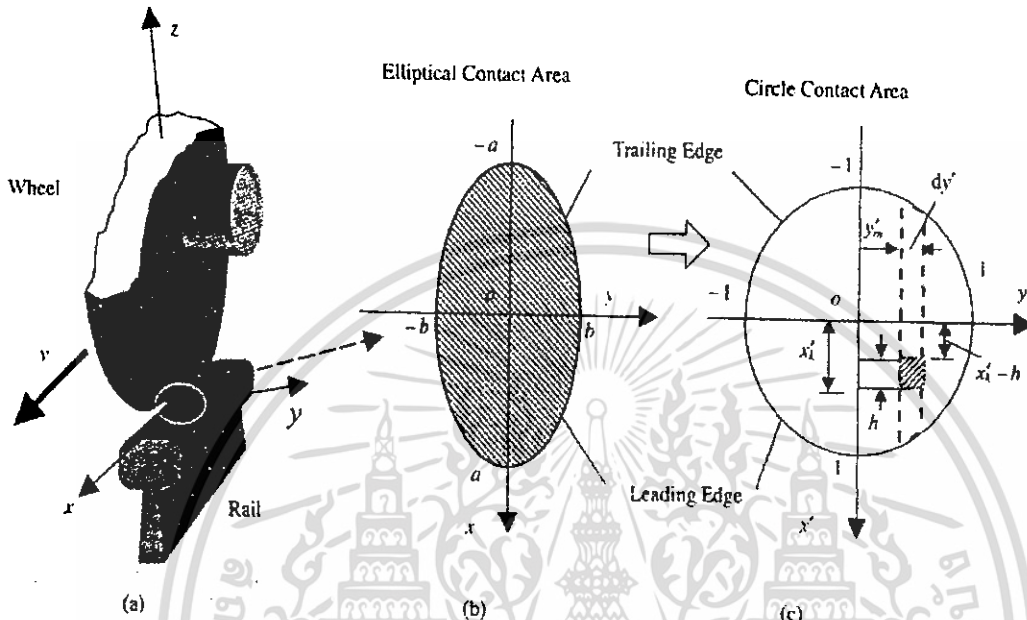
ดังนั้นรูปแบบของสมการไร้มิติจะเป็น

$$w_x^* = n_x - f_x y' - \frac{\partial p_x}{\partial x'}, w_y^* = n_y - f_y x' - \frac{\partial p_y}{\partial x'} \quad (6.3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเคลื่อนที่ของ Kalker จะแสดงเป็น C_{11} , C_{22} และ C_{23} ในความเป็นจริง สมการไร้มิติกับสมการ(11)เป็นสมการที่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f เป็นค่าคงที่ และ $3fF_n / (2\pi ab)$ ที่ใช้จะเป็นไร้มิติ(ไม่มีหน่วย)การใช้วิธีกำจัดของสมการที่ (6.1) ของผิวสัมผัสที่เป็นรูปวงรีของล้อ p_x และ p_y ในรายงานนี้ f เป็นค่าของฟังก์ชันความเร็วของการหมุนกับค่าความเร็วของการลื่นไถลบนระหว่างผิวสัมผัส ในหัวข้อที่บรรยายของรายงานนี้ ดังนั้น f ไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปไร้มิติได้ต้องกำจัดค่า p_x และ p_y วิธีการเชิงตัวเลขที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นความแตกต่างกับวิธีที่เรียกว่า FASTSIM เมื่อ p_x และ p_y เป็นค่าคงที่ที่จะใช้มันอยู่ในรูปไร้มิติแต่ไม่สามารถหาผลแตกต่างทางตัวเลขได้ จะใช้รูปแบบการจำกัดคังสมการที่ 6.1 เป็นกรณีผิวสัมผัสของล้อและรางมีลักษณะเป็นรูปวงรีสามารถมองให้เป็นสามารถทำเป็นวงกลม 1 หน่วย



รูป 6.1 รูปแสดงวิธีการถ่ายทอระหว่างพื้นผิวสัมผัสที่เป็นรูปวงรีมองให้เป็นรูปวงกลมมีรัศมี 1 หน่วย

การแก้ปัญหาตัวเลขของสมการ (6.2) เมื่อสมมติว่าวงกลมถูกหารแบ่งเป็น 20 ช่วงและมีค่าความกว้าง $\Delta y' = 0.1$ ในทิศทางของแกน y' จากรูปภาพที่ 6.1 รูปแบบหลักจะเป็นเส้นประขนานกันและบริเวณของทรงกลมแบ่งเป็น 20 ช่องเท่าๆกันในทิศทางของ x' ความยาวแต่ละช่วงจะมีขนาดคล้ายพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าในทิศ x' กำหนดให้ดังสมการ

$$h = \frac{\sqrt{1 - (y' + dy'/2)^2}}{10}, x'^2 + \left(y' + \frac{dy'}{2}\right)^2 = 1 \quad (6.4)$$

บริเวณที่เป็นวงกลมจะแบ่งช่วงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด 20×20 ในแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์เกี่ยวข้องอยู่ด้วย เช่น ความดัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรางต้องหาค่าที่เป็นจุดศูนย์กลางของพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าในแต่ละช่วง โดยจะใช้ในการหาค่ากลาง สมการที่ (6.2)

$$\begin{aligned}
 hw'_x \Big|_{(x'_k-h/2, y'_k+dy'/2)} &= h(n_{x'} - f_{x'} y') \Big|_{x'_k-h/2} + p_{x'}(x'_k - h) - p_{x'}(x'_k) \\
 hw'_y \Big|_{(x'_k-h/2, y'_k+dy'/2)} &= h(n_{y'} - f_{y'} x') \Big|_{x'_k-h/2} + p_{y'}(x'_k - h) - p_{y'}(x'_k)
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

ในขณะที่ $x' = x'_k - h/2, k = 1, 2, \dots, 20$ และ $y' = y'_m - dy'/2, m = 1, 2, \dots, 20$
 ขอบผิวสัมผัสของวงกลมเลือกให้ $x'_1 = \sqrt{1-y'^2}$ ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบของผิวสัมผัสของราง

$$p_x \Big|_{x'_1=\sqrt{1-y'^2}} = p_{y'} \Big|_{x'_1=\sqrt{1-y'^2}} = 0 \tag{6.6}$$

ในสมการ (6.5) เทอมทางซ้ายมือจะแสดงให้เห็นค่าของ Slip ของทั้งหมดที่ผิวสัมผัสของอนุภาคที่จุด $(x'_k - h/2, y'_m + dy'/2)$ บริเวณที่ผิวสัมผัสวงกลมเราไม่ทราบค่าตัวแปรและจำเป็นต้องการ เทอมแรงที่อยู่ทางขวามือจะเกี่ยวข้องกับค่า Slip ของวัตถุแข็งเกร็งที่จุดเดียวกัน เทอมที่ 2 และเทอมที่ 3 ในขวามือจะเป็นองค์ประกอบของผิวสัมผัสของรางที่จะใช้แก้ปัญหาโดยนิยาม

$$\begin{aligned}
 p_{x_a} &= p_x(x'_k) - h(n_{x'} - f_{x'} y') \Big|_{x'_k-h/2} \\
 p_{y_a} &= p_y(x'_k) - h(n_{y'} - f_{y'} x') \Big|_{x'_k-h/2}
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

และ $p_a = (p_{x_a}^2 + p_{y_a}^2)$ เราจะเริ่มคำนวณ p_{x_a} และ p_{y_a} จาก $K=1$ (พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปแรกใกล้ขอบริมสุด) จนถึง $K=20$ (บริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อยู่ตอนท้ายของริมขอบ) ทำทีละขั้นตอน และการคำนวณแบบลูกโซ่ p_{x_a} และ p_{y_a} และอยู่ในทิศที่ขนานกับแกน x' วิธีการทำซ้ำ p_{x_a} และ p_{y_a} จะอยู่ในพื้นที่บริเวณสี่เหลี่ยมผืนผ้าของรูปวงกลม

ในแต่ละขั้นตอนจะคำนวณโดยอาศัย กฎความเฉื่อยรวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานที่จะใช้ทำตามขั้นตอนดังสถานการณ์ต่อไปนี้

- 1) ถ้า $p_a \leq f_s p_z$, แล้ว $hw'_x = hw'_y = 0$ ที่จุด $(x'_k - h/2, y'_m + dy'/2)$, ไม่ Slip เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคที่จุดเดียวกัน p_{x_a} และ p_{y_a} จะเป็นส่วนประกอบของรางผิวสัมผัสที่จุดที่ต้องการ
- 2) ถ้า $p_a > f_s p_z$ แล้วกฎการเสียดทานของคูลอมบ์ ดังนั้นการแก้ปัญหาจะต้องทำดังนี้

$$p'_{x_a} = \frac{p_{x_a}}{p_a} f_s p_z, \quad p'_{y_a} = \frac{p_{y_a}}{p_a} f_s p_z \tag{6.8}$$

ใช้สมการ hw'_x และ hw'_y ใช้ในการคำนวณ ณ จุด $(x'_k - h/2, y'_m + dy'/2)$ ในสูตรก่อนหน้า
 ความดันปกติจะไว้มิติ ใน พื้นที่วงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_x = 1 - x'^2 - y'^2 \quad (6.9)$$

การกระจายในบริเวณ stick-slip จะอยู่ในบริเวณที่สัมผัสกับผิวสัมผัสโดยตรงภายใต้การควบคุมเงื่อนไขค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตในบริเวณที่มีพื้นที่เกิดการลื่นไถลจะเกิดความเร็วสัมพัทธ์ v_r ระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคที่ไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แท้จริง f น้อยกว่า f_s ที่ผิวสัมผัสของรางจะน้อยภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมของ f_s ในตอนแรกรางที่ผิวสัมผัสจะใช้วิธีการก่อนหน้านี้คล้ายกัน สำหรับกรณีนี้สิ่งแรกต้องหาค่า w_x และ w_y จะสามารถคำนวณได้จากสมการ(10) สามารถหาได้จากก่อนหน้าแล้ว w'_x และ w'_y ดังนั้นเราจะรู้ค่า v_r ได้จาก

$$v_r = v(w_x^2 + w_y^2)^{1/2} \quad (6.10)$$

ทำตามขั้นตอนในการแก้ไขผิวสัมผัสของราง ได้ดังนี้

1. ในพื้นที่ Slip ผิวสัมผัสของรางจะ ได้จาก

$$\begin{aligned} p_x^{(1)} &= -\frac{w_x}{v_r} (p_x^2 + p_y^2)^{1/2} \\ p_y^{(1)} &= -\frac{w_y}{v_r} (p_x^2 + p_y^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (6.11)$$

ใช้สมการ(6.2),(6.5)และ(6.10), $w_x^{(1)}$, $w_y^{(2)}$ และ $v_r^{(1)}$ ใช้ในการคำนวณ

2. ใช้สมการ 6.7, f ที่ได้จาก

$$p_x^{(2)} = -\frac{w_x}{v_r} f p_x, \quad p_y^{(2)} = -\frac{w_y}{v_r} f p_x \quad (6.12)$$

3. ทำซ้ำตามขั้นตอนก่อนหน้าจนกระทั่งถึงขั้นตอน j , หรือไม่ $p_x^{(j+1)}$ และ $p_y^{(j+1)}$

$$\max \left\{ |p_x^j - p_x^{(j+1)}|, |p_y^j - p_y^{(j+1)}| \right\} \leq \varepsilon \quad (6.13)$$

เป็นสิ่งทดสอบ ถ้าทำได้การคำนวณจะหยุดการสมมุติฐาน p_x^{km} และ p_y^{km} จะเป็นการแก้ปัญหาขั้นสุดท้ายของผิวสัมผัสของราง, เมื่อ k และ m ที่แสดงให้เห็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แสดงเป็นตัวเลขจะให้เป็น k และ m อยู่ในพื้นที่จากขวามาซ้ายและล่าง ในพื้นที่วงกลมตามลำดับ สมการที่ 6.12 และ 6.13 จะแสดงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยึดเกาะหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{3F_n}{200\pi} \sum_{k,m=1}^{20} \left[1 - \left(\frac{y_m + b/10}{b} \right)^2 \right]^{1/2} p_x^{km}$$

$$\mu = \frac{F}{F_n} \quad (6.14)$$

เมื่อ $F_n = W \cos \delta$ และ $W =$ แรงที่กระทำตรงกึ่งกลางของแนวแกน สูตรการหาระยะเคลื่อนที่ของล้อและลูกกลิ้งนิยามได้

$$\xi_x = \frac{v_{rxcx} - v_{wcx}}{v}, \quad \xi_y = \frac{v_{rscy} - v_{wcy}}{v}$$

$$\Phi_i = \frac{\omega_{mi} - \omega_{wi}}{v} \quad (6.15)$$

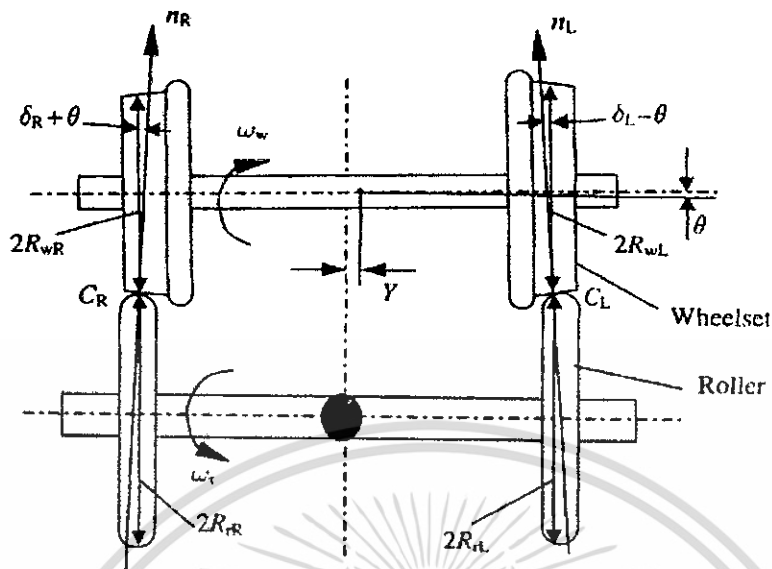
ในสมการส่วนที่ห้อย $i=L,R$ จะแทนบริเวณที่สัมผัสทางซ้ายและขวาของล้อและลูกกลิ้ง ตามลำดับ ดังแสดงตามรูปภาพ 6.2 ξ_x , ξ_y และ Φ_i เป็นค่าความแนวความยาว ด้านข้างและเคลื่อนที่แบบหมุนควง ตามลำดับของผิวสัมผัสล้อและลูกกลิ้ง v_{rxcx} และ v_{wcx} จะเป็นส่วนประกอบของความเร็วของผิวสัมผัสของอนุภาคระหว่างล้อและลูกกลิ้งในทิศทางการหมุน v_{rscy} และ v_{wcy} จะเป็นส่วนประกอบในทิศทางด้านข้าง ω_{mi} และ ω_{wi} จะเป็นส่วนของเส้นตรงของ ω_r และ ω_w ในทิศทางปกติ $n_i (i=L,R)$ ตามลำดับ ในรูปภาพที่ 6.1 δ_L และ δ_R จะเป็นค่าผิวสัมผัสของมุมทางซ้ายและขวาตามลำดับ R_{wi} และ $R_{ri} (i=L,R)$ ในทิศทางปกติตามลำดับ ในรูปภาพที่ 6.1 δ_L และ δ_R จะเป็นมุมผิวสัมผัสทางซ้ายและขวาตามลำดับและ θ เป็นมุมของการหมุนของชุดล้อ

เมื่อ $Y = \dot{Y} = 0$ และ $\psi = \dot{\psi} = 0$

$\theta = 0, v_{rcy} = 0, R_{wL} = R_{wR} = R_w, R_{rL} = R_{rR} = R_r, \delta_L = \delta_R = \delta, \xi_{xL} = \xi_{xR} = \xi_x, \xi_{yL} = \xi_{yR} = \xi_y$
จากสมการ (6.16) เขียนได้ดังนี้

$$\xi_x = -\left(1 - \frac{R_r \omega_r}{R_w \omega_w} \right), \quad \xi_y = 0$$

$$\Phi_{L,R} = \mp \frac{1}{R_w} \left(1 + \frac{\omega_r}{\omega_w} \right) \sin \delta \quad (6.16)$$



รูป 6.2 ระบบของล้อและราง

เมื่อ ω_w และ ω_r หาได้จากการวัด, δ สามารถหาได้จากการคำนวณบนพื้นผิวสัมผัสโดยใช้หลักเรขาคณิตคิดจากบริเวณสัมผัสผิวของลูกกิ้งและล้อ ในสมการ 6.16 ω_r / ω_w จะมีผลต่อค่าระยะในการหมุนโดยทั่วไปการผลิตรางที่มีผิวสัมผัสจะดูจากการที่มีผลต่อระยะการหมุนมากถ้า R_r เพิ่มขึ้น, ω_r ลดลงภายใต้เงื่อนไขที่เป็นตัวแปรของ ω_w และ ξ_x , จะมีผลทำให้การหมุนของลูกกิ้งลดน้อยลง

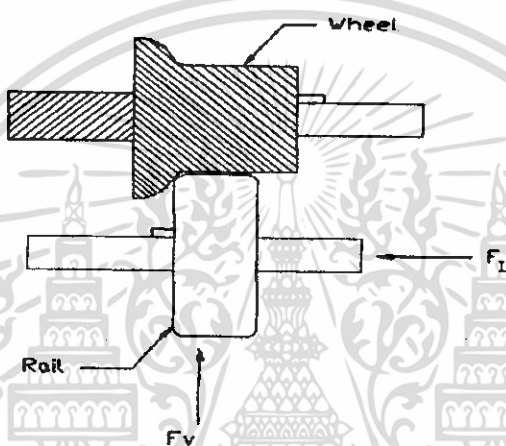
บทที่ 7

เครื่องทดสอบการสึกหรอ

7.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอ

จะประกอบด้วยโหลด 2 โหลดดังนี้

- 1) ภาระ โหลดที่กระทำตามแนวแกนเพลา (Vertical Load) ของระบบ
- 2) ภาระ โหลดที่กระทำตามขอบล้อ (Lateral Load) ของระบบ



รูป 7.1 แสดงภาระโหลดที่กระทำ

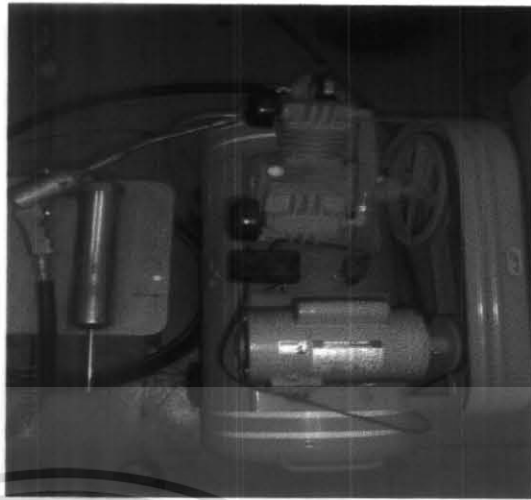
7.2 ขั้นตอนการเตรียมการ

- 1) เลือกวัสดุให้เหมาะสมที่จะนำมาทำล้อและรางเพื่อให้ใกล้เคียงกับวัสดุจากล้อและรางรถไฟจริง
- 2) ออกแบบเครื่องทดสอบเพิ่มเติม เช่น ที่ครอบสายพาน แฉกกันเศษของล้อและสารหล่อลื่น ฐานที่รองรับเครื่องทดสอบเพื่อลดการสั่นสะเทือนระหว่างการทดลอง เป็นต้น
- 3) ติดตั้งอุปกรณ์ของระบบล้อและรางจำลองเข้ากับเครื่องทดสอบ
- 4) ออกแบบเครื่องอัดสารหล่อลื่น
- 5) ติดตั้งเครื่องอัดสารหล่อลื่นเข้ากับเครื่องทดสอบ
- 6) ออกแบบวิธีการวัดค่าการสึกหรอของล้อ
- 7) เตรียมเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด
- 8) เตรียมชุดพูลเลย์และสายพานไว้ 2 ชุด คือที่ความเร็ว 650 rpm และที่ความเร็วรอบ 1080 rpm
- 9) เตรียมเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิหลังการทดลอง
- 10) เตรียมนาฬิกาเพื่อจับเวลาในการทดลอง
- 11) เตรียมสารหล่อลื่นเพื่อใช้ในการทดลอง
- 12) นำชุดกระบอกไฮดรอลิกไปปรับเทียบจากความดันเป็นแรงเพื่อความแม่นยำในการทดสอบ

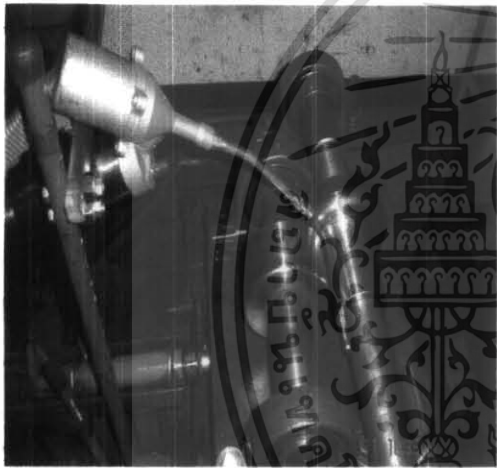
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



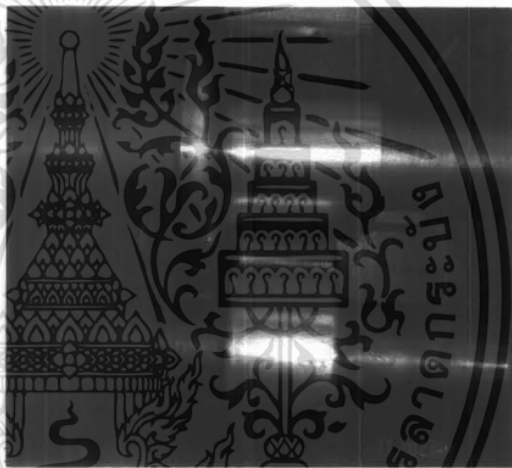
รูป 7.2 เครื่องทดสอบการสึกหรอ



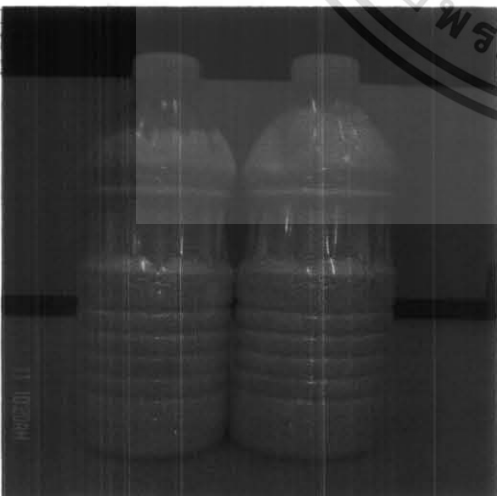
รูป 7.3 ชุดเครื่องอัดสารหล่อลื่น



รูป 7.4 ลักษณะการฉีดสารหล่อลื่น



รูป 7.5 ลักษณะการสัมผัสกันของล้อและราง



รูป 7.6 ไขมันปาล์ม



รูป 7.7 จาระบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

วิธีการทดลอง

การทดลองจะมีการทดสอบที่หน้าสัมผัสเปียก โดยมีการเปรียบเทียบกันระหว่างสารหล่อลื่น 2 ชนิดซึ่งมีคุณสมบัติต่างกัน โดยมีภาระโหลดกระทำต่อล้อที่แรงกดต่างๆทั้งตามแนวแกนและแนวรัศมี และที่ความเร็วรอบต่างๆ ตามที่ได้กำหนดความเหมาะสมไว้ โดยก่อนการทดสอบจะต้องมีการดูแลความสะอาดระหว่างจุดสัมผัสของขอบและราง ทำการฉีดสารหล่อลื่นในปริมาณที่พอเหมาะ ในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้มีการหล่อลื่นเกิดขึ้นในบริเวณที่ขอบล้อและรางสัมผัสกัน

ในการทดลองจะทำการวัดอัตราการสึกหรอของล้อ โดยนำล้อไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดเพื่อวัดน้ำหนักของล้อที่สูญเสียไประหว่างการทดลอง นั่นก็คือ การสึกหรอของล้อที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของขอบล้อ และการทดลองจะมีปรากฏการณ์ทางด้านความร้อน ดังนั้นเราจะมีการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิประกอบผลการทดลอง การทดลองในแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ โดยจะทำการบันทึกผลการทดลองไว้ในแต่ละครั้ง ซึ่งจะมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ตรวจสอบสภาพความพร้อมของเครื่องทดสอบก่อนใช้งานให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์
2. ประกอบล้อและรางสวมเข้าแต่ละเพลลาของเครื่องทดสอบ
3. ทำการติดตั้งเครื่องอัดสารหล่อลื่นเข้ากับเครื่องทดสอบ
4. นำสารหล่อลื่นที่จะทำการทดสอบ ได้แก่
 - 4.1 จาระบีที่มีส่วนผสมของลิเธียม มีค่าความหนืด $3 \cdot 10^{-1} \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ ซึ่งเป็นจาระบีที่ทนความร้อนได้สูงสุด 350 องศาเซลเซียส มาบรรจุเข้ากับเครื่องอัดสารหล่อลื่น
 - 4.2 ไขมันปาล์มที่ใช้หล่อลื่นมีส่วนผสมของสาร ZDDP 5% โดยมวล และไขมันปาล์มปกติ 95% โดยมวล มีค่าความหนืด $1.7 \cdot 10^{-1} \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ และสามารถทนความร้อนได้สูง 106 องศาเซลเซียส มาบรรจุเข้ากับเครื่องอัดสารหล่อลื่น
5. ทำการกำหนดเวลาฉีดสารหล่อลื่น ซึ่งในการทดลองจะกำหนดเวลาฉีดทุกๆ 3 นาที
6. ทำการเปิดเครื่องทดสอบ ซึ่งได้กำหนดการทดลองไว้ดังต่อไปนี้
 - 6.1 ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบที่ 650 rpm
 - 6.1.1 ใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่น
 - ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลลา 500 kg_r
 - ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 1,000 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลลา 1,000 kg_r
 - 6.1.2 ใช้ไขมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น
 - ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลลา 500 kg_r
 - ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 1,000 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลลา 1,000 kg_r
 - 6.2 ทดสอบความเร็วรอบที่ 1,080 rpm
 - 6.2.1 ใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลา 500 kg_r
- ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 1,000 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลา 1,000 kg_r

6.2.2 ใช้ไขมันปาล์มเป็นสารหล่อลื่น

- ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลา 500 kg_r
- ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 1,000 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลา 1,000 kg_r

7. ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการทดสอบทีละ 50,000 รอบ จนถึง 200,000 รอบ สิ่งที่ต้องทำมีดังต่อไปนี้

7.1 ทำการทดลองและจับเวลาในการทดลองแต่ละครั้ง

7.2 หลังจาก 50,000 รอบให้หยุดความเร็วรอบแล้ววัดอุณหภูมิ วัดอัตราการสึกหรอ โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดจากน้ำหนักของล้อยที่เปลี่ยนแปลงไปและทำการถ่ายรูปประกอบการทดลอง

8. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องมีการปรับแต่งอุปกรณ์ เพราะเมื่อเดินเครื่องทดสอบจะมีการสึกหรอ ดังนั้นจะทำให้แรงกระทำตามแนวแกนลดลงจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงกระทำในแนวแกนให้คงที่

9. บันทึกผลการทดลองทุกครั้ง (ทีละ 50,000 รอบ) เพื่อจัดทำเป็นสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลอง



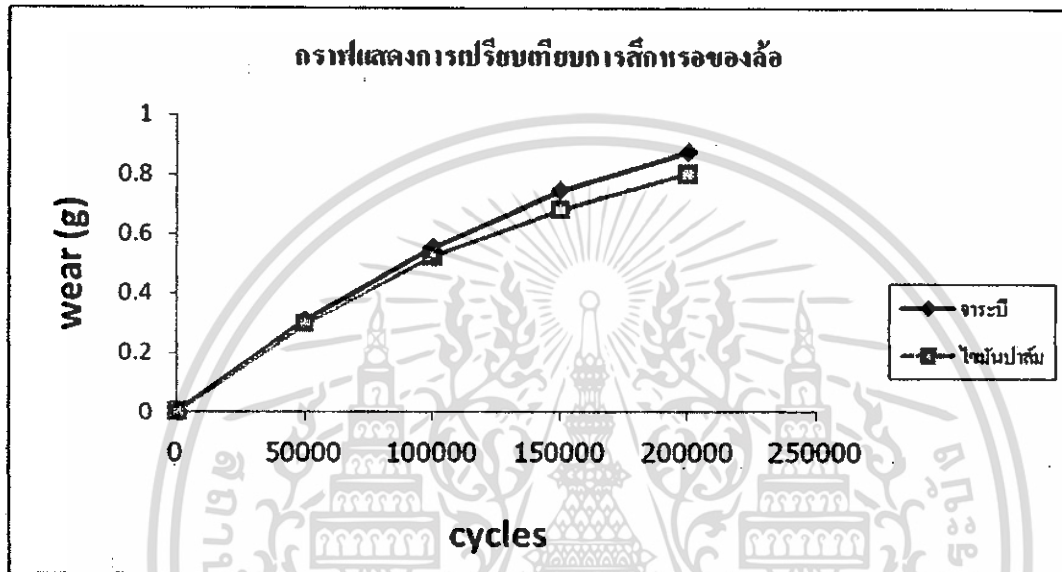
รูป 8.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

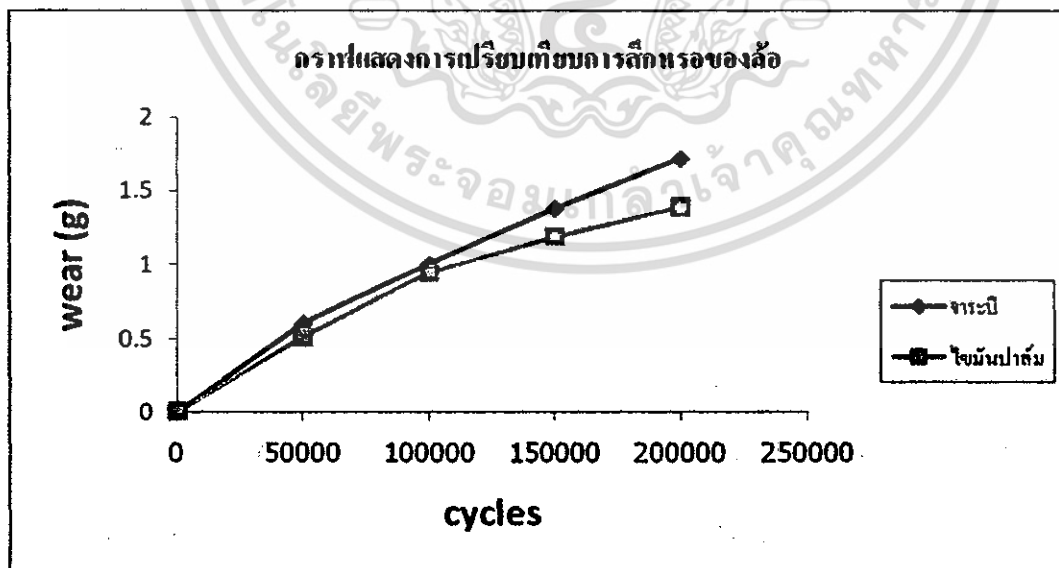
บทที่ 9

ผลการทดลอง

กราฟแสดงการสึกหรอโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลดที่มากกระทำ

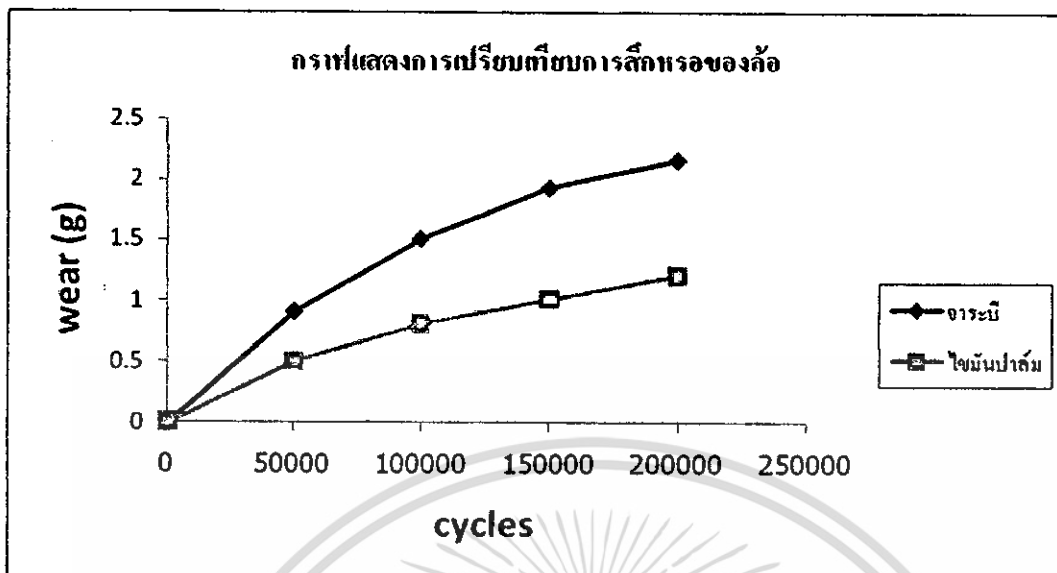


รูป 9.1 กราฟแสดงการสึกหรอที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg

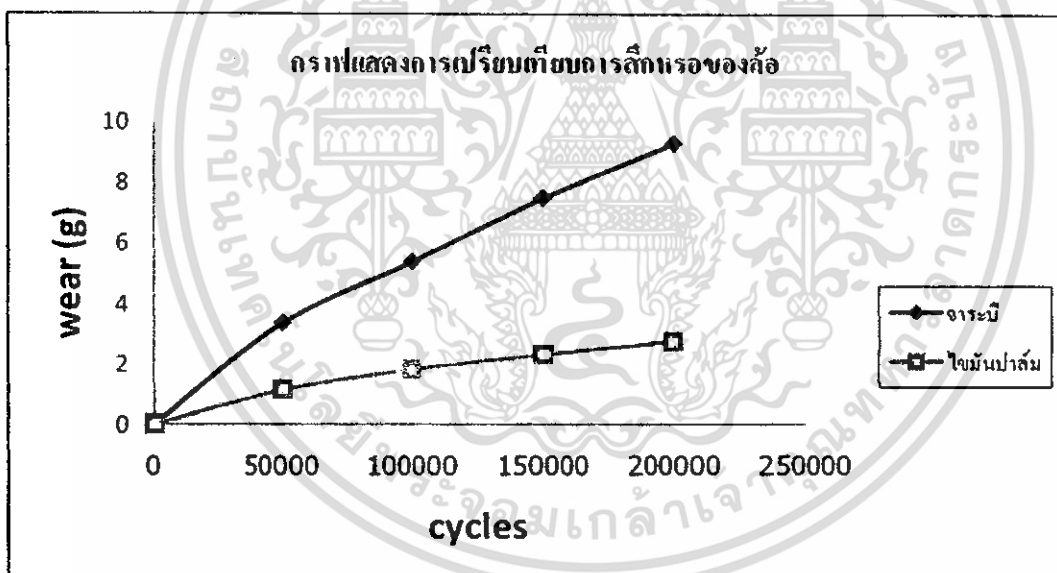


รูป 9.2 กราฟแสดงการสึกหรอที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



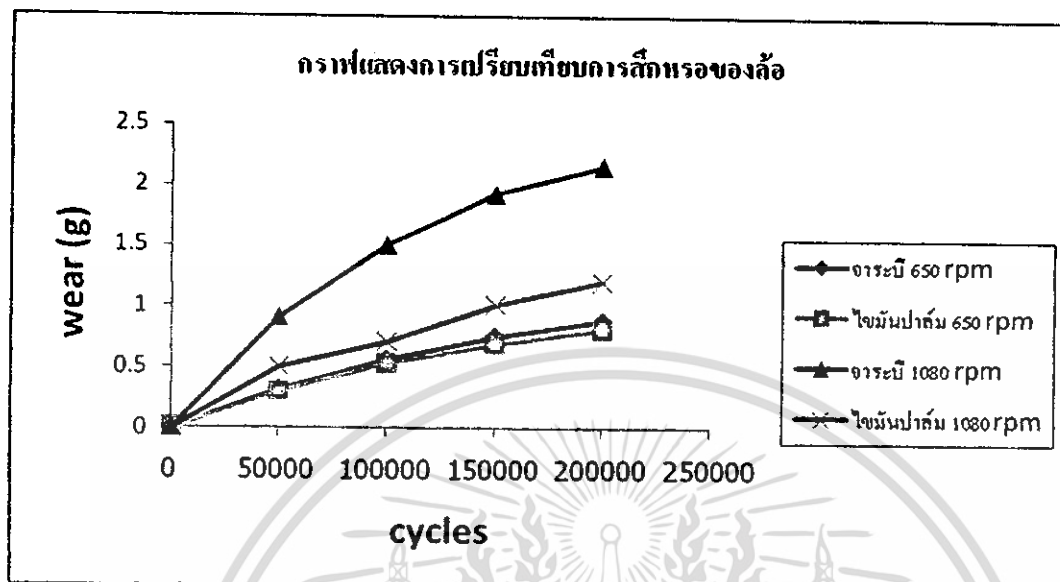
รูป 9.3 กราฟแสดงการสึกหรอที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg



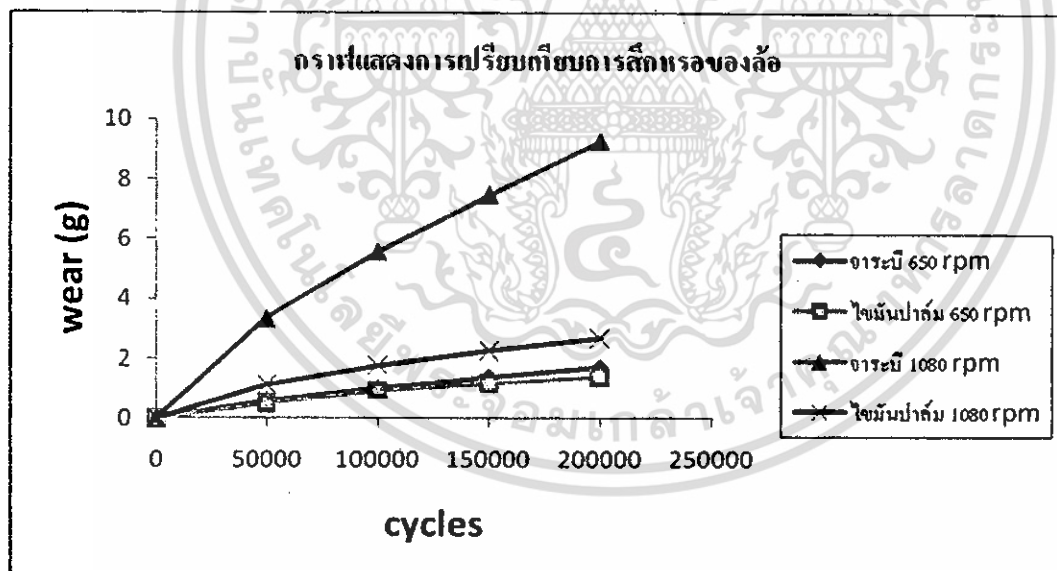
รูป 9.4 กราฟแสดงการสึกหรอที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

รูป 9.1 ถึง รูป 9.4 เป็นกราฟเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบต่างๆ และสภาวะโหลดต่างๆ ที่มากระทำ อัตราการสึกหรอระหว่างสารหล่อลื่น 2 ชนิด คือ สารหล่อลื่นจาระบีกับสารหล่อลื่นไขมันปาล์ม จะพบว่าเมื่อใช้สารหล่อลื่นจาระบีจะมีอัตราการสึกหรอมากกว่าสารหล่อลื่นไขมันปาล์ม และสภาวะโหลดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอที่ภาวะโหลดเท่ากันแต่ความเร็วรอบต่างกัน



รูป 9.5 กราฟแสดงการสึกหรอที่ภาวะ โหลดในแนวแกนและแนวรัศมี 500 kg

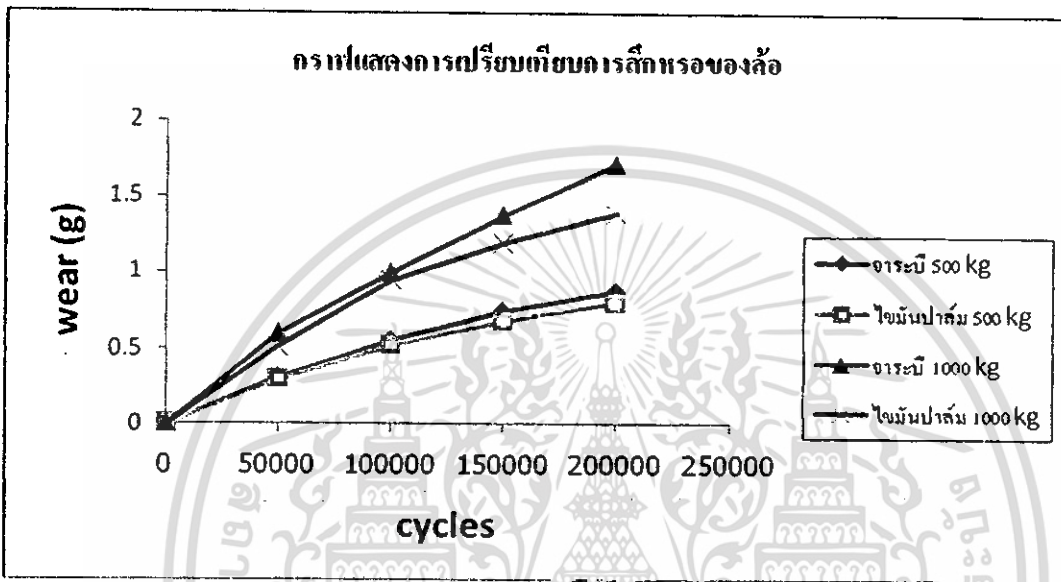


รูป 9.6 กราฟแสดงการสึกหรอที่ภาวะ โหลดในแนวแกนและแนวรัศมี 1000 kg

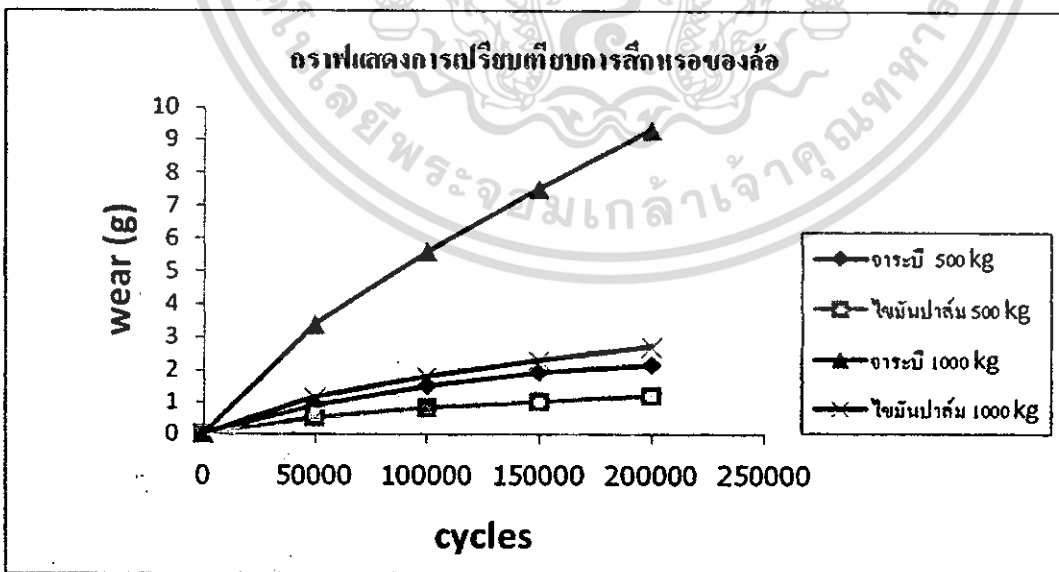
รูป 9.5 ถึง รูป 9.6 เป็นกราฟเปรียบเทียบการสึกหรอที่ภาวะ โหลดเท่ากันแต่ความเร็วรอบต่างกัน จะพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจากกราฟทั้งสองจะพบว่าอัตราการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหล่อลื่นด้วยเมื่อใช้สารหล่อลื่นจาระบี มีความหนืดมากกว่าสารหล่อลื่นไขมันปาล์ม แต่มีอัตราการสึกหรอมากกว่า ซึ่งการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นจาระบีจะเป็นแบบฟิล์มหนาแต่การหล่อลื่นของสารหล่อลื่นไขมันปาล์มจะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบที่เพิ่มมากขึ้นฟิล์มของสารหล่อลื่นจะมีความหนาลดลงไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีมากทำให้เมื่อความเร็วรอบมากขึ้นสารหล่อลื่นยิ่งยึดเกาะผิวสัมผัสได้น้อยลงขึ้น และการที่สารหล่อลื่นไขมันปาล์มลดอัตราการสึกหรอได้มากกว่าเนื่องจากการที่ผสมสาร EP กับสารหล่อลื่นไขมันปาล์มทำให้สารหล่อลื่นสามารถยึดเกาะกับหน้าสัมผัสได้ดีกว่า

กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอที่ความเร็วรอบเท่ากันภาวะโหลดต่างกัน



รูป 9.7 กราฟแสดงการสึกหรอที่ความเร็วรอบ 650 rpm

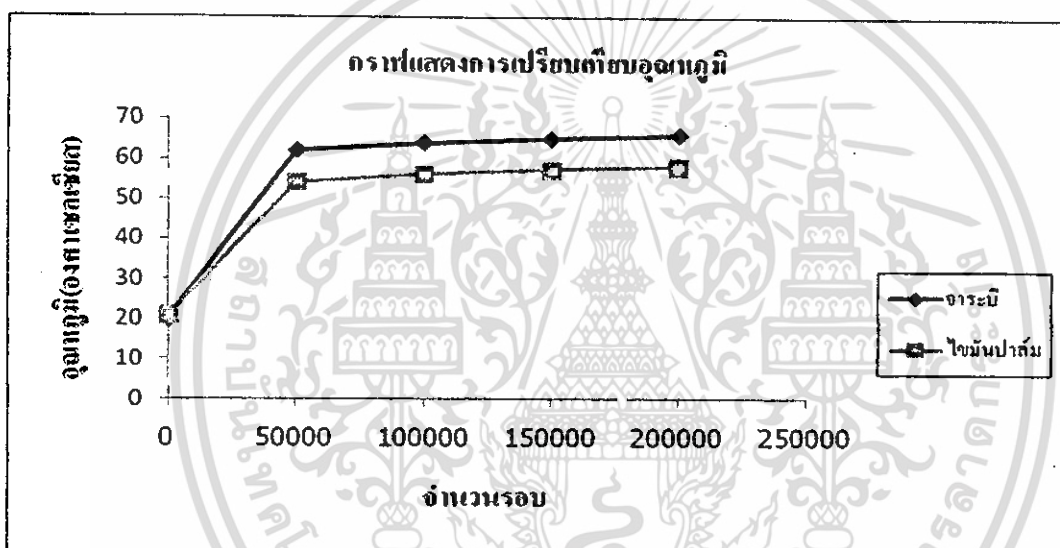


รูป 9.8 กราฟแสดงการสึกหรอที่ความเร็วรอบ 1000 rpm

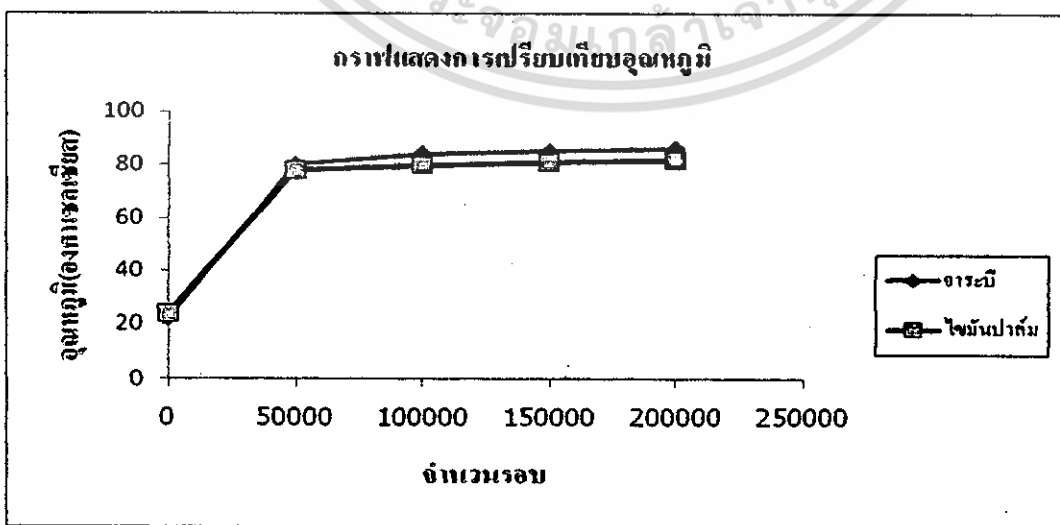
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 9.7 ถึง รูป 9.8 เป็นกราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบที่เท่ากันแต่ภาวะโหลดต่างกัน จะพบว่าเมื่อภาวะโหลดที่เพิ่มมากขึ้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกราฟจะพบว่าเมื่อใช้สารหล่อลื่นไขมันปาล์มจะลดอัตราการสึกหรอได้มากกว่าใช้สารหล่อลื่นจาระบี ซึ่งการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นจาระบีจะเป็นแบบฟิล์มหนาแต่การหล่อลื่นของสารหล่อลื่นไขมันปาล์มจะเป็นแบบฟิล์มบางบาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มแรงมากขึ้นทำให้ความหนาของฟิล์มจากการหล่อลื่นลดลงอัตราการสึกหรอจึงเพิ่มมากขึ้น และการที่สารหล่อลื่นไขมันปาล์มลดอัตราการสึกหรอได้มากกว่าเนื่องจากการที่ผสมสาร EP กับสารหล่อลื่นไขมันปาล์มทำให้สารหล่อลื่นสามารถปิดเกาะกับหน้าสัมผัสได้ดีกว่า

กราฟแสดงอุณหภูมิโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลดที่ทำการทำ

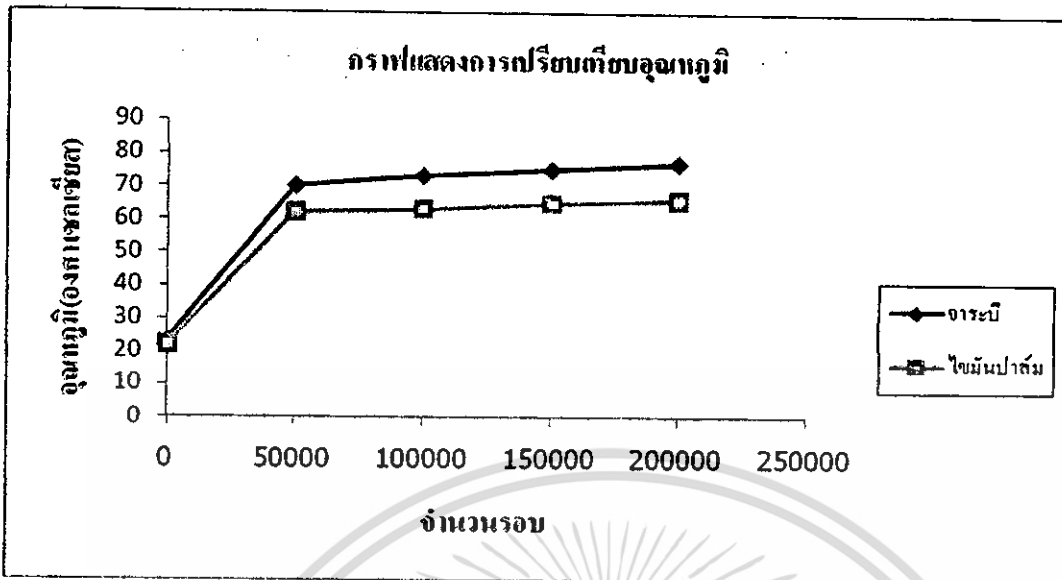


รูป 9.9 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg

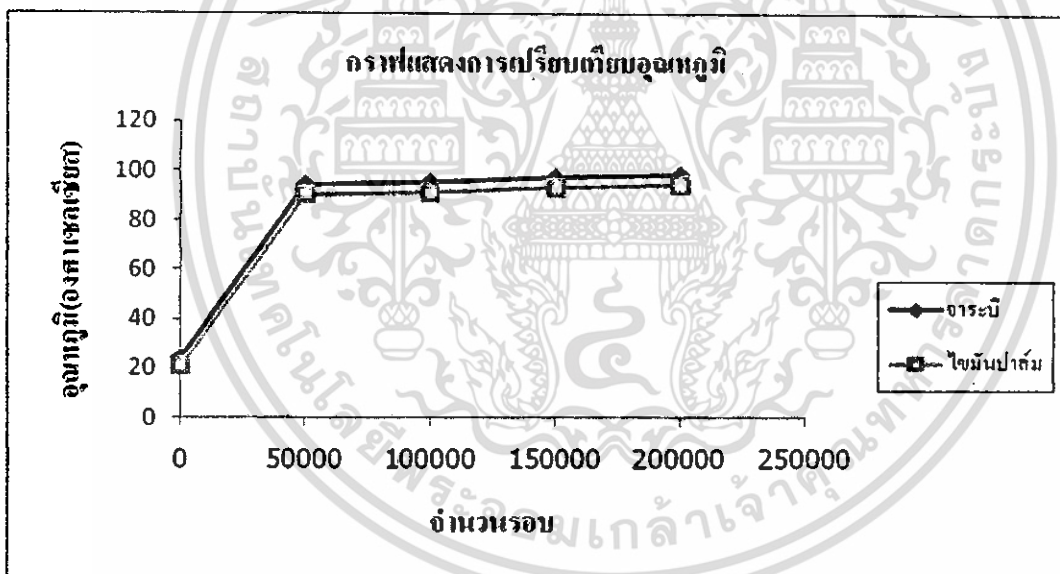


รูป 9.10 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



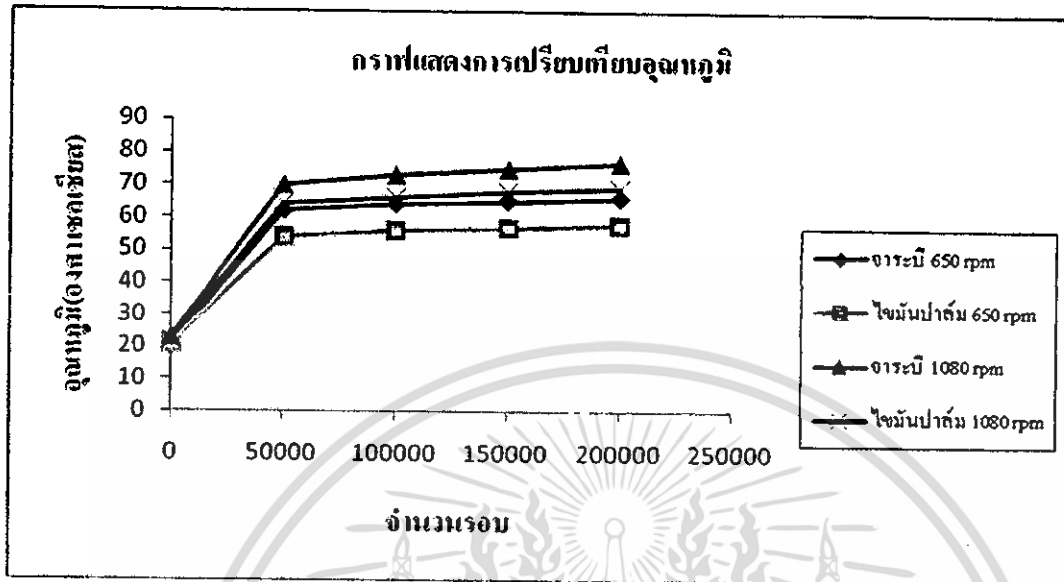
รูป 9.11 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg



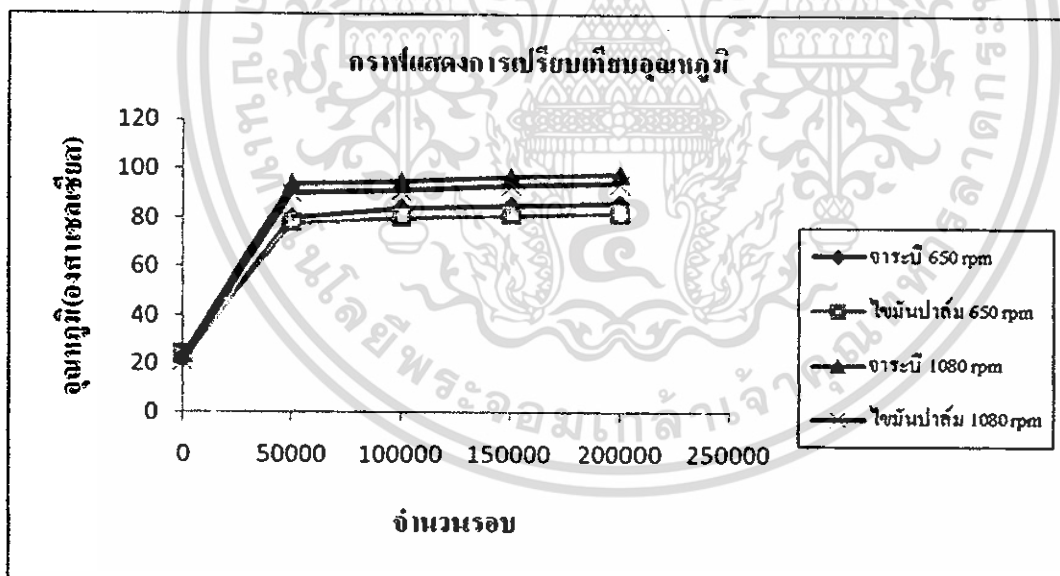
รูป 9.12 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

รูป 9.9 ถึง รูป 9.12 อุณหภูมิของสารหล่อลื่น ไขมันปาล์มจะน้อยกว่าสารหล่อลื่นจาระบีเพราะว่าสารหล่อลื่น ไขมันปาล์มยึดเกาะกับหน้าสัมผัสได้ดีกว่าสารหล่อลื่นจาระบี ทำให้การสัมผัสระหว่างหน้าสัมผัสของสารหล่อลื่น ไขมันปาล์มน้อยกว่าสารหล่อลื่นจาระบี มีผลทำให้อุณหภูมิของสารหล่อลื่น ไขมันปาล์มน้อยกว่าสารหล่อลื่นจาระบี

กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยภาวะโหลดเท่ากันแต่ความเร็วรอบต่างกัน



รูป 9.13 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ภาวะ โหลดในแนวแกนและแนวรัศมี 500 kg

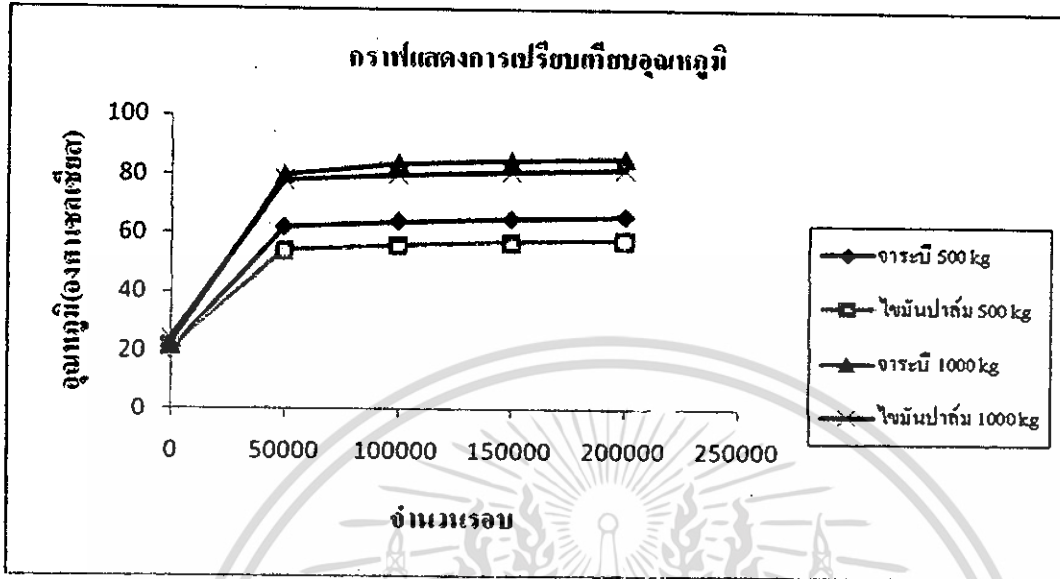


รูป 9.14 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ภาวะ โหลดในแนวแกนและแนวรัศมี 1000 kg

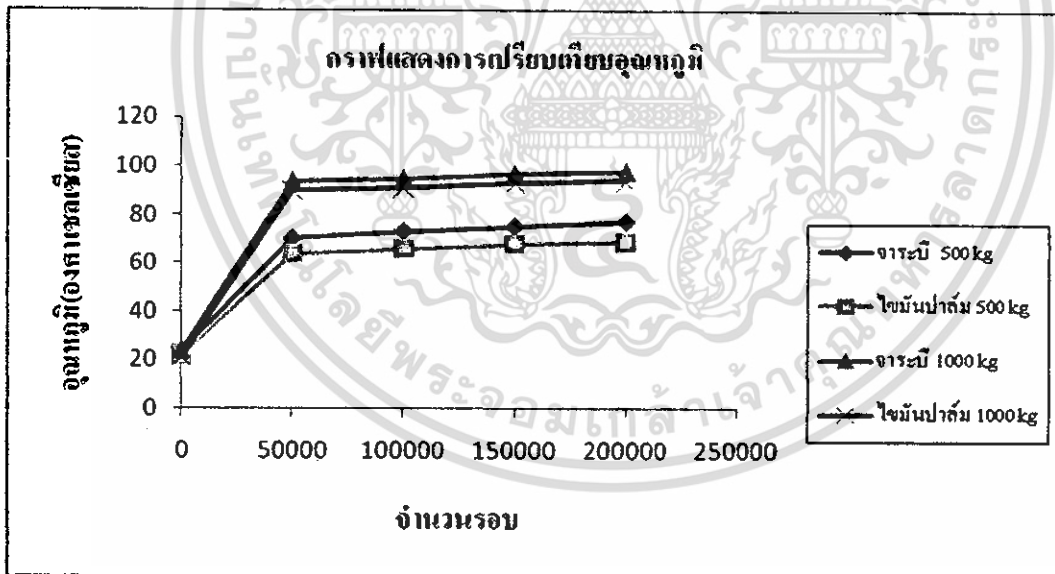
รูป 9.13 ถึงรูป 9.14 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อภาวะ โหลดเท่ากันแต่ความเร็วรอบต่างกัน จะพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของสารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิของสารหล่อลื่นจากระบี และสารหล่อลื่นโซ่พาน้ำส้มที่ความเร็วรอบสูงกว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของสารหล่อลื่นจากระบีและสารหล่อลื่นโซ่พาน้ำส้มที่ความเร็วรอบต่ำกว่า อธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะสูงขึ้น เนื่องการสัมผัสกันของผิวสัมผัสมีมากขึ้นเพราะว่ายิ่งความเร็วรอบเพิ่มขึ้นการบิดเกาะผิวสัมผัสของสารหล่อลื่นยิ่งน้อยลง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยภาวะความเร็วยรอบเท่ากันโหลดต่างกัน



รูป 9.15 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 650 rpm



รูป 9.16 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 1080 rpm

รูป 9.15 ถึงรูป 9.16 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ภาวะความเร็วยรอบเท่ากันแต่โหลดต่างกัน จะพบว่าเมื่อเพิ่ม โหลดให้มากขึ้นอุณหภูมิของสารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิของสารหล่อลื่น จาระบีและสารหล่อลื่นไขมันปาล์มที่ โหลดมากกว่ากว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของสารหล่อลื่นจาระบีและ สารหล่อลื่นไขมันปาล์มที่ความเร็วรอบต่ำกว่า อธิบายได้ว่าเมื่อ โหลดเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นจึงทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้น เพราะการสัมผัสกันของผิวสัมผัสมากขึ้นตามแรงกด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหวั่นมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ชมรมเพื่อพัฒนามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ,ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม : คู่มือเกษตรกร , โครงการส่งเสริมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กตามแนวพระราชดำริ : สงขลา ,2529
- [2] มงคล มงคลวงศ์โรจน์, “พื้นฐานทฤษฎีการหล่อลื่น”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ปี พ.ศ. 2525, หน้า 1-15
- [3] ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทรัพย์สมบูรณ์, ปานเพชร ชนินทร“ เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น”, ปี พ.ศ.2537, หน้า 211-214
- [4] ปราณี ฉัตรเชิดชัยกุล, รายงานอุตสาหกรรมน้ำมันพืชในไทยในปี พ.ศ.2542, 2542
- [5] จิรพันธ์ แคนงำ, พีระพงศ์ เนียรภาค, การศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากไขปาล์มสเตียรีน, ปริญญาทิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2544



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงน้ำหนักของล้อยอดสอบที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่1 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นจาระบีที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg โหลดในแนวรัศมี 500 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซิ่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	20	2967.96	2967.99	2967.94	2967.97	2967.965
50,000	62	2967.67	2967.63	2967.67	2967.69	2967.665
100,000	64	2967.44	2967.48	2967.39	2967.33	2967.410
150,000	65	2967.23	2967.20	2967.27	2967.17	2967.218
200,000	66	2967.06	2967.10	2967.09	2967.10	2967.088

ตารางที่2 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่น ไขมันปาล์มที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg โหลดในแนวรัศมี 500 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซิ่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	21	2976.70	2976.78	2976.74	2976.77	2977.743
50,000	54	2976.97	2977.07	2976.13	2977.00	2977.043
100,000	56	2976.84	2976.86	2976.87	2976.87	2976.860
150,000	57	2976.70	2976.68	2976.72	2976.70	2976.700
200,000	58	2976.57	2976.55	2976.60	2976.59	2976.578

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่3 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นจากระบบที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซั่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	22	2962.20	2962.10	2962.07	2962.20	2962.143
50,000	80	2961.54	2961.50	2961.57	2961.56	2961.543
100,000	84	2961.15	2961.17	2961.13	2961.12	2961.143
150,000	85	2960.75	2960.78	2960.72	2960.80	2960.763
200,000	86	2960.59	2960.50	2960.51	2960.30	2960.425

ตารางที่4 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นไขมันปาล์มที่ความเร็วรอบ 650 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซั่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	24	2999.71	2999.62	2999.73	2999.68	2999.685
50,000	78	2999.19	2999.17	2999.19	2999.15	2999.175
100,000	80	2998.72	2998.74	2998.70	2998.80	2998.740
150,000	81	2998.50	2998.47	2998.52	2998.49	2998.495
200,000	82	2998.29	2998.26	2998.32	2998.30	2998.293

ตารางที่5 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นจากระบบที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg โหลดในแนวรัศมี 500 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซั่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	23	2984.79	2984.92	2984.82	2984.82	2984.838
50,000	70	2983.95	2983.97	2983.92	2983.90	2983.935
100,000	73	2983.32	2983.35	2983.38	2983.30	2983.338
150,000	75	2982.95	2982.90	2982.93	2982.87	2982.913
200,000	77	2982.74	2982.72	2982.64	2982.62	2982.680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นไขมันปาล์มที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 500 kg โหลดในแนวรัศมี 500 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซั่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	22	2956.10	2956.15	2956.13	2956.10	2956.120
50,000	64	2955.63	2955.57	2955.67	2955.62	2955.623
100,000	66	2955.29	2955.32	2955.35	2955.30	2955.315
150,000	68	2955.10	2955.07	2955.13	2955.15	2955.113
200,000	69	2954.90	2954.95	2954.94	2954.89	2954.920

ตารางที่ 7 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นจากระบี่ที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

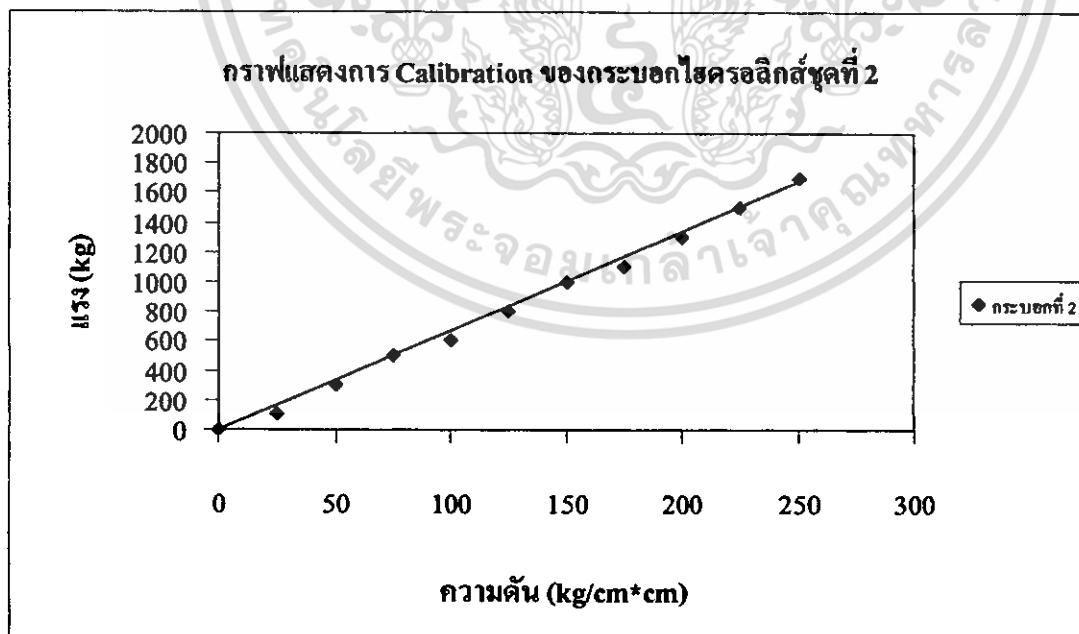
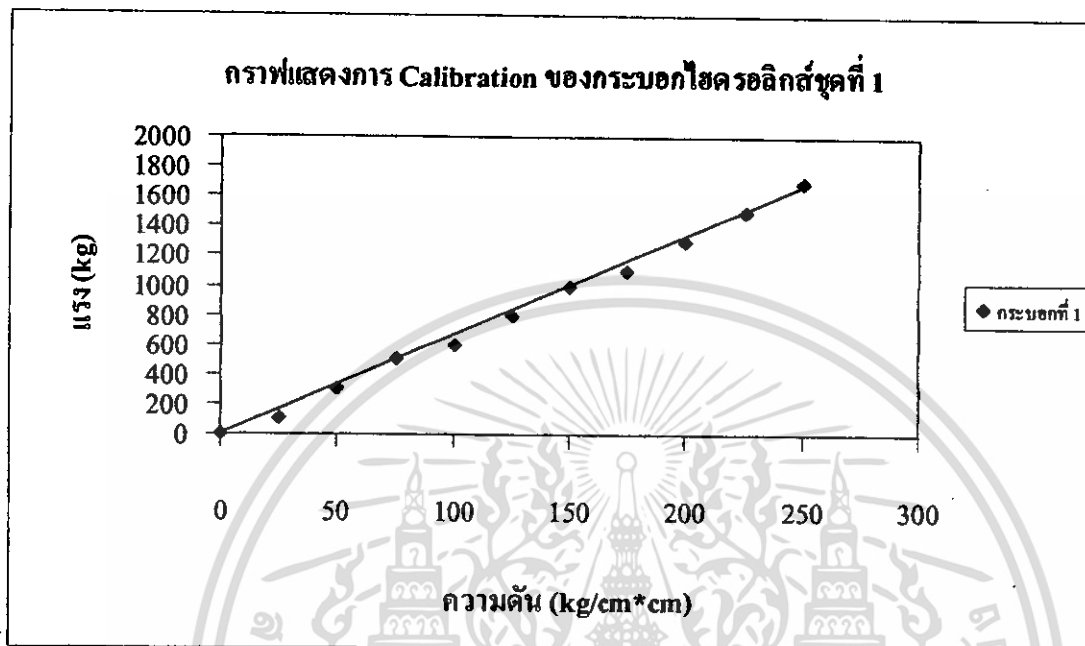
รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซั่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	24	2957.08	2957.04	2957.03	2957.06	2957.053
50,000	94	2953.85	2953.62	2953.62	2953.68	2953.688
100,000	95	2951.45	2951.46	2951.48	2951.45	2951.460
150,000	97	2949.63	2949.53	2949.60	2949.55	2949.558
200,000	98	2947.72	2947.75	2947.74	2947.70	2947.753

ตารางที่ 8 ผลการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นไขมันปาล์มที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดในแนวแกน 1000 kg โหลดในแนวรัศมี 1000 kg

รอบ	อุณหภูมิ	น้ำหนักที่ซั่ง (กรัม)				น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)
		1	2	3	4	
0	21	2968.31	2968.44	2968.44	2968.43	2968.405
50,000	90	2967.28	2967.30	2967.30	2967.20	2967.270
100,000	91	2966.59	2966.60	2966.62	2966.60	2966.603
150,000	93	2966.15	2966.10	2966.12	2966.07	2966.110
200,000	94	2965.65	2965.71	2965.73	2965.67	2965.690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
 กราฟการ Calibrate ของชุดเครื่องไฮดรอลิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้