

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาพฤติกรรมการสึกหรอระหว่างล้อและราง
Experimental Study on Wear Reduction Characteristics under Sliding
Contact Between Wheels and Rails.

โดย

นายเกรียงไกร พันพิลา
นายสกุลชัย มีบุญเกิด
นายศุภายุทธ ไตรสรณะกุลปต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62800
วัน,เดือน,ปี 22 ส.ค. 2549

b. 41620000
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาพฤติกรรมการสึกหรอระหว่างล้อและราง

Experimental Study on Wear Reduction Characteristics under Sliding Contact Between Wheels and Rails.

ผู้จัดทำ

นายเกรียงไกร พันพิลา รหัสประจำตัว 46015391

นาย สกฤษชัย มีบุญเกิด รหัสประจำตัว 45010792

นาย คชายุทธ ไตรสรณะคุปต์ รหัสประจำตัว 45015453


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาพฤติกรรมการสึกหรอระหว่างล้อยและราง

นาย เกรียงไกร พันพิลา 46015391

นาย สกฤษดิ์ มีบุญเกิด 45010792

นาย ศหาชุต ใครสรณะคุปต์ 45015453

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

โครงการนี้บรราชอาณาจักรเกี่ยวข้องกับการคัดปลงล้อยและรางเพื่อทำการลดการสึกหรอของล้อยที่เกิดการสัมผัสแบบสั้นไกล ล้อยจะถูกออกแบบให้มีน้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสโดยมีลักษณะเป็นฟิล์มทำให้เกิดแรงดันกระทำต่อไหล

การทดลองจะตั้งค่าที่ทำการทดสอบที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ใกล้บริเวณที่ไหลแตกต่างกันกระทำ ทำให้มีอายุการใช้งานได้ต่างกันตามชนิดของสารหล่อลื่น อายุการใช้งานที่เกิดจากล้อยที่นำมาคัดปลงจะพบว่ามียุการใช้งานที่ยาวนานกว่าล้อยธรรมดา

Experimental Study on Wear Reduction Characteristics under Sliding Contact Between Wheels and Rails.

Kriangkrai Panpila 46015391

Sakulchai Meeboongerd 45010792

Katayut Traisanakooop 45015453

Assoc. Prof. Dr.Mongkol Mongkolwongrojn Advisor

Abstract

This project describes the modification of wheels and rails. System the wear between wheels and rails under sliding and rolling contact. The wheel is designed to allow the lubrication flow into the contact region in order to be able to generate hydrodynamic film pressure to carry the load. Experimental set up will be perform under various load and various speeds. Test results will be presented to obtain near area at various loads various life cycle and various kind of lubricants. The life cycle of the modified wheel be last longer when compares with the conventional wheel.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้จะประสบความสำเร็จได้โดยสนับสนุนจาก รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ เป็นบุคคลสำคัญที่ให้คำปรึกษาและให้แนวทางในการทำโครงการจนเสร็จสำเร็จ เป็นปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

อนึ่งผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์นี้ขอแสดงความขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้ใช้เครื่องมือทดสอบปรับความเที่ยงตรงของชุดทดสอบ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ รวมทั้ง อาจารย์ พงศักดิ์ คำมูล และคุณมณฑาทิให้คำปรึกษาในการสร้างอุปกรณ์การทดลอง ทำให้โครงการนี้และปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จ

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

นาย เกรียงไกร พันพิลา
นาย สกฤษชัย มีบุญเกิด
นาย ศชายุทธ ไตรสรณะกุลปต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	1
1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 พื้นฐานการหล่อลื่น	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ชนิดการหล่อลื่น	4
2.3 การเกิดแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น	6
2.4 ความหนืดของสารหล่อลื่น	7
2.5 สมการเรโนลด์	8
บทที่ 3 สารหล่อลื่น	12
3.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว	12
บทที่ 4 แรงเสียดทาน	17
4.1 คำแนะนำ	17
4.2 แรงกระทำบนพื้นที่สัมผัส	17
4.3 แรงฉุดบริเวณสัมผัส	18
4.4 Hysteresis losses	19
4.5 ความเสียดทานการหมุน	20
4.6 การหล่อลื่นของทรงกระบอก	22
4.7 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของการสัมผัสแนวเส้น	27
4.8 ความร้อนของการสัมผัสที่ทางเข้า	29
4.9 การวิเคราะห์การหล่อลื่น ณ จุดสัมผัส	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 วิธีการแก้ปัญหาที่ง่ายสำหรับค่าความเค้นและการเปลี่ยนรูปร่าง	33
5.1 ผลบวกและลบของผิวความโค้ง	33
5.2 ความเค้นของผิวและการเปลี่ยนรูปร่าง	35
5.3 ความเค้นของพื้นผิวข้อย	38
5.4 การแก้ปัญหาที่ง่าย	39
บทที่ 6 ทฤษฎีของการหมุนบนผิวสัมผัสของ Kalker	44
บทที่ 7 เครื่องทดสอบการสึกหรอ	49
7.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอ	49
7.2 ขั้นตอนการเตรียมการ	50
บทที่ 8 วิธีการทดลอง	51
บทที่ 9 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	53
9.1 ผลการทดลอง	53
9.2 สรุปผลการทดลอง	73
9.3 ข้อเสนอแนะ	73
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงผลการสึกหรอของขอบล้อ	75
ภาคผนวก ข. กราฟ Caribration ชุดไฮดรอลิกส์	79
บรรณานุกรม	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างข้อมูลผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลชนิดเหลว.....	2
ตารางที่ 2.1 ประโยชน์จากรูปแบบโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	10
ตารางที่ 3.1 เวลาที่ใช้รอการเพิ่มอุณหภูมิของของผสมระหว่างการผสมวัตถุดิบของ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนก่อนและหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	26
ตารางที่ 3.2 เวลาที่ใช้รอการเพิ่มอุณหภูมิของของผสมระหว่างการผสมวัตถุดิบของ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนและหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	27
ตารางที่ 3.3 เวลาที่ใช้รอการลดอุณหภูมิของของผสมระหว่างการผสมวัตถุดิบของ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนก่อนและหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น.....	30
ตารางที่ 3.4 เวลาที่ใช้รอการลดอุณหภูมิของของผสมระหว่างการผสมวัตถุดิบของ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนและหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น.....	31
ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิ ของของผสมในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบเพิ่มถึงค่าเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ บำรุงผิววาสลีน ก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	36
ตารางที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิ ของของผสมในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบเพิ่มถึงค่าเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ บำรุงผิววาสลีน หลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	40
ตารางที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิ ของของผสมในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบเพิ่มถึงค่าเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ บำรุงผิวชนิดร่า ก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	45
ตารางที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิ ของของผสมในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบเพิ่มถึงค่าเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ บำรุงผิวชนิดร่า หลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	49
ตารางที่ ก.5 ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ลดอุณหภูมิของผสมในถึงผสมหลักกับเวลา ในการรออุณหภูมิของผสมลดถึงค่าเป้าหมายในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบของ ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีน ก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น.....	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ก.6 ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ลดอุณหภูมิของผสมในถังผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิของผสมลดลงถึงค่าเป้าหมายในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้น หลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น.....	58
ตารางที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ลดอุณหภูมิของผสมในถังผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิของผสมลดลงถึงค่าเป้าหมายในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบของการผลิตผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดรี ก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น.....	61
ตารางที่ ก.8 ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ลดอุณหภูมิของผสมในถังผสมหลักกับเวลาในการรออุณหภูมิของผสมลดลงถึงค่าเป้าหมายในขั้นตอนการผสมวัตถุดิบของการผลิตผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดรี หลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น.....	65
ตารางที่ ง.1 เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นของผสมในถังผสมผ่านเปลือกหุ้มที่คำนวณจากสมการประมาณเวลา.....	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ.....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของของไหลผ่านผิวหน้าของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	9
รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นวน.....	11
รูปที่ 2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผงท่อติดครีป.....	11
รูปที่ 2.7 หอทำน้ำหล่อเย็นแบบอากาศหมุนเวียนตามธรรมชาติ.....	17
รูปที่ 2.8 หอทำน้ำหล่อเย็นแบบไหลสวนทาง.....	18
รูปที่ 2.9 หอทำน้ำหล่อเย็นแบบ ไหลตัดกัน.....	18
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการผสมวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้น.....	21
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นกับระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ ของของผสมที่อุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็นต่างๆ.....	28
รูปที่ ก.1 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้นก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	37
รูปที่ ก.2 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้นก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	37
รูปที่ ก.3 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้นก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	38
รูปที่ ก.4 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้นก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 2.....	38
รูปที่ ก.5 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้นก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลมี ความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.882.....	39
รูปที่ ก.6 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลิ้นหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.7 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลินหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	41
รูปที่ ก.8 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลินหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	42
รูปที่ ก.9 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลินหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 2.....	42
รูปที่ ก.10 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลินหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 3.....	43
รูปที่ ก.11 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลินหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 4.....	43
รูปที่ ก.12 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลินหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลมี ความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.319.....	44
รูปที่ ก.13 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	46
รูปที่ ก.14 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	46
รูปที่ ก.15 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	47
รูปที่ ก.16 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 2.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.17 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลมี ความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.241.....	48
รูปที่ ก.18 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	50
รูปที่ ก.19 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลทั้งหมด.....	50
รูปที่ ก.20 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	51
รูปที่ ก.21 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 2.....	51
รูปที่ ก.22 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 3.....	52
รูปที่ ก.23 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 4.....	52
รูปที่ ก.24 Individual control chart ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 5.....	53
รูปที่ ก.25 Normal probability plot ของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เติมลงถึงผสมหลักในการผลิต ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน: ข้อมูลมี ความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.512.....	53
รูปที่ ก.26 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ก.27 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	56
รูปที่ ก.28 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	57
รูปที่ ก.29 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.556.....	57
รูปที่ ก.30 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	59
รูปที่ ก.31 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	59
รูปที่ ก.32 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	60
รูปที่ ก.33 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิววาสลีนหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.477.....	60
รูปที่ ก.34 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	62
รูปที่ ก.35 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	62
รูปที่ ก.36 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลที่ตัดค่าที่ไม่มี ความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 1.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ก.37 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลที่ตัดค่า ที่ไม่มีความน่าเชื่อถือซึ่งอยู่นอกขอบเขตการควบคุมครั้งที่ 2.....	63
รูปที่ ก.38 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าก่อนปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.104.....	64
รูปที่ ก.39 Normal probability plot ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด มีความน่าเชื่อถือ P-Value = 0.578.....	66
รูปที่ ก.40 Individual control chart ของเวลาทั้งหมดในการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวชนิดร่าหลังปรับปรุงหอทำน้ำหล่อเย็น: ข้อมูลทั้งหมด.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

โครงการนี้ได้ถูกพัฒนาจากโครงการการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอ ภายใต้การกดแบบลื่นไถลระหว่างล้อและรางจำลอง ได้มีการออกแบบเครื่องทดสอบ โดยส่วนที่เป็นล้อย่อมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และจะมีโพลไฮดรอลิกสัมากระทำการกดระหว่างล้อที่หมุน โดยที่ทำการทดลองจะมีสองทิศทางคือ โพลในแนวแกนและโพลในแนวรัศมี อัตราการสึกหรอจะถูกวัดโดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโพลและความเร็วรอบ การทดลองจะทำการทดลองในกรณีที่น่าสัมผัสแห้ง ส่วนโครงการนี้มุ่งพัฒนาลักษณะเกี่ยวกับการคัดแปลงของล้อและราง เพื่อทำการลดการสึกหรอของขบล้อและรางภายใต้การสัมผัสแบบลื่นไถล ล้อจะถูกออกแบบให้มีน้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสโดยมีลักษณะเป็นฟิล์มและทำการเพิ่มโพลตามแนวแกนและแนวรัศมี โดยการทดลองจะเลือกชนิดของสารหล่อลื่นและตั้งค่ามอเตอร์ไฟฟ้าที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจะขึ้นอยู่กับโพลต่างๆที่มากระทำ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อคัดแปลงล้อและรางขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบเพื่อลดการสึกหรอที่ขบล้อที่เกิดจากการสัมผัสแบบลื่นไถล โดยทำการเพิ่มโพลตามแนวแกนและแนวแกนรัศมี และทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆโดยหลักการ จะให้น้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าไปในทางเดินน้ำมันที่เราจะรูไว้
2. เลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อนำมาสรุปเป็นแนวทางในการวิจัยขั้นสูงต่อไป

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
2. เลือกสารหล่อลื่นชนิดต่างๆเพื่อใช้ในการทดลอง
3. ทดสอบโดยการเพิ่มโพลที่ระดับต่างๆระหว่างขบล้อและราง
4. ทดสอบโดยการเปลี่ยนความเร็วรอบต่างๆ
5. บันทึกผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบในกรณีหน้าสัมผัสเปียกและแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงพฤติกรรมการสึกหรอของขบล้อ
2. เพื่อทราบถึงพฤติกรรมการลดการสึกหรอของขบล้อ โดยใช้สารหล่อลื่น
3. เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิจัยและออกแบบพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาในเรื่องขอบเขตของโครงการ
2. วางแผนแนวคิดในการออกแบบจำลองของล้อและราง
3. วางแผนแนวคิดในการออกแบบลักษณะของการหล่อขึ้นของขอบล้อและราง
4. ติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อสอบถามข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง
5. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการติดตั้งอุปกรณ์การหล่อขึ้น
6. ทำการติดตั้งอุปกรณ์การหล่อขึ้น
7. ทำการสร้างชุดเครื่องมือวัด
8. ประกอบและติดตั้งเครื่องทดสอบ
9. ทำการ Calibration ชุดไฮดรอลิกส์ทั้งสองชุดกับเครื่อง UMT
10. ทำการทดสอบ โดยแบ่งตามกรณีที่ทดสอบที่ต้องการเก็บค่าการลดอัตราความเร็ว
11. เก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาแสดงในรูปแบบกราฟ
12. เปรียบเทียบผลการลดความเร็วในสภาวะต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง
13. สรุปผลการทดลองที่ได้
14. ทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

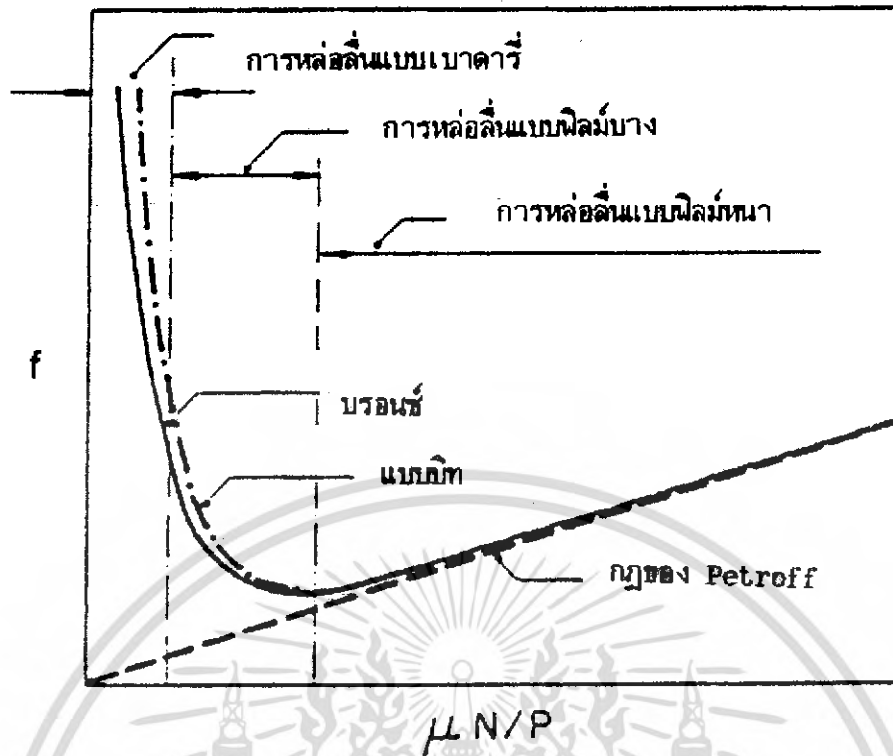
หลักพื้นฐานของการหล่อลื่น

2.1 บทนำ

การหล่อลื่นชิ้นงาน คือการแยกชิ้นงานออกจากกันด้วยฟิล์มสารหล่อลื่น ขณะที่ผิวชิ้นงานตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไปเคลื่อนไถลดูกัน ฟิล์มสารหล่อลื่นจะถูกเลื่อนโดยผิวของชิ้นงานทั้งสองไม่เกิดการเสียดทาน ถ้าหากว่ามีฟิล์มน้ำมันคั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงาน แต่ถ้าไม่มีฟิล์มหรือมีเฉพาะบางพื้นที่ของผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่ไม่เกิดฟิล์มจะเกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงานทั้งสอง เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ ก็จะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเคลื่อนไถลระหว่างผิวโลหะทำให้เนื้อโลหะหลุดออกจากผิวและเกิดการสึกหรอของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าการหล่อลื่นชิ้นงานสามารถลดการสึกหรอได้ ทำให้เครื่องจักรมีอายุยาวนานขึ้น และยังทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งทำให้เครื่องจักรมีขนาดเล็กลง ประหยัดพลังงานรวมทั้งลดมลพิษให้แก่สิ่งแวดล้อม การหล่อลื่นนั้นจำเป็นต้องทำให้เกิดฟิล์มสารหล่อลื่นซึ่งเป็นของไหลที่มีฟิล์มหนาเพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดการแตะสัมผัสของผิวโลหะชิ้นงานหรือไม่เกิดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงาน ขณะที่ชิ้นงานชิ้นหนึ่งเคลื่อนไถลไปบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง การหล่อลื่นแบบนี้จะพบในกาบรองลื่นเพลากลมแผ่นรองลื่นรับแรงดันซึ่งเรียกการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มักจะเป็นน้ำมันหล่อลื่นแร่ น้ำ อากาศ หรือน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ฯลฯ

จากเหตุผลที่ว่าอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เครื่องจักร เครื่องมือสมัยใหม่ได้ถูกจึงพัฒนาให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง ความเร็วรอบสูง ทำให้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกได้ถูกนำไปใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรต่างๆ เช่น กังหันไอน้ำ กังหันแก๊ส เครื่องอัดอากาศ เครื่องยนต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การหล่อลื่นแบบแห้งและการหล่อลื่นแบบเบาคาร์บี้ ใช้สารหล่อลื่นที่เป็นไข อาจจะเป็นจาระบีหรือไขน้ำมัน มักจะใช้ในงานที่มีความเร็วรอบต่ำหรืองานที่ผิวงานมีการเคลื่อนไถลบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งผิวที่เคลื่อนไถลดูกันของชิ้นงานอาจมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์หรืออาจไม่มีการหล่อลื่นเป็นผิวแห้งก็ได้

วิชาการวิทยาศาสตร์การหล่อลื่น ได้เริ่มมีการศึกษาดังแต่ประมาณปี ค.ศ. 1785 นายคูลอม (Coulomb) ได้อธิบายปรากฏการณ์การฝืดและยังได้อธิบายความแตกต่างของความฝืดสถิตย์และความฝืดจลน์ (Static Friction & Kinetic Friction) ต่อมาในปี ค.ศ. 1886 นายเรโนลด์ (Reynold) ได้เขียนทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยฟิล์มของไหลเป็นครั้งแรก ทำให้วิชาการทางด้านการศึกษาการหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนปัจจุบันวิชาการหล่อลื่นได้เป็นวิชาการที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่



รูปที่ 2.1 ชนิดของการหล่อลื่น

2.2 ชนิดการหล่อลื่น

พฤติกรรมของการเคลื่อนไถลของผิวชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับฟิล์มและสารหล่อลื่นที่คั่นอยู่ระหว่างผิวของชิ้นงานทั้งสอง และสภาวะการทำงาน จากรูปที่ 2.1 สำหรับกาบรองลื่นเพลากลมได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f และค่า $\frac{\mu N}{P}$ โดยที่ μ คือค่าความหนืดของสารหล่อลื่น N คือความเร็วรอบของเพล และ P คือภาระที่กาบรองลื่นรับต่อพื้นที่ภาพฉายเรียกภาระจำเพาะ จากกราฟพบว่าที่ค่า $\frac{\mu N}{P}$ สูง ๆ กาบรองลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $\frac{\mu N}{P}$ และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มหนาหรือการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก เมื่อลดค่า $\frac{\mu N}{P}$ ลงจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงด้วยจนมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นการหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง ในการหล่อลื่นแบบนี้ ถ้าลดค่า $\frac{\mu N}{P}$ ให้มีค่าต่ำลงไปอีกจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การหล่อลื่นในลักษณะนี้เรียกหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง และถ้าลดค่า $\frac{\mu N}{P}$ ให้ต่ำลงไปอีก จากกราฟพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าฟิล์มและสารหล่อลื่นบางส่วนจะถูกทำลายไป ซึ่งเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ว่า การหล่อลื่นแบบเบาดารี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยเฉลี่ยของสารหล่อลื่นแบบต่าง ๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

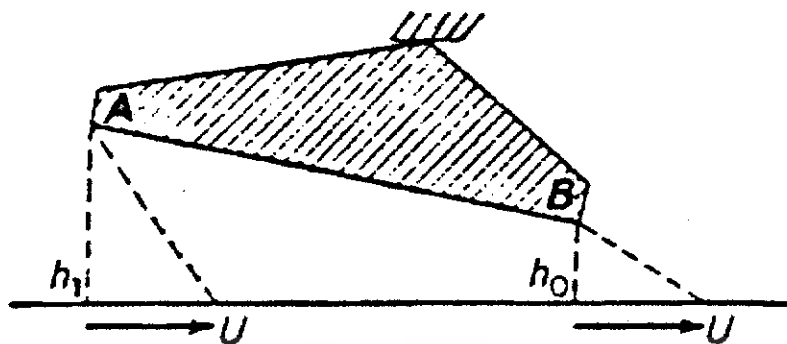
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน โดยเฉลี่ย

ชนิดของสารหล่อลื่น	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
ไม่มีการหล่อลื่น(ผิวแห้ง)	1.0-2.0	การสึกหรอสูงมาก
การหล่อลื่นแบบเบาคาร์หรือ แบบฟิล์มบาง	0.05-0.15	การสึกหรอเล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา	0.001	ไม่มีการสึกหรอ

การหล่อลื่นแบบฟิล์มหนา เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวชิ้นงานหนาขณะที่ชิ้นงานเคลื่อนไถลดูกัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของผิวโลหะชิ้นงาน และไม่เกิดการสึกหรอ ดังนั้นจึงเป็นชนิดการหล่อลื่นที่ต้องการของผู้ออกแบบเครื่องจักร โดยทั่วไป

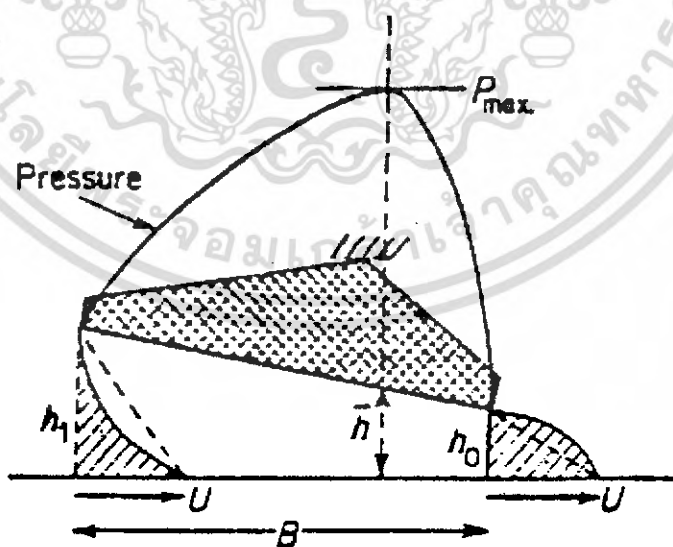
การหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง เป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มบาง ๆ คั่นระหว่างผิวของชิ้นงาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวชิ้นงานและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่า การหล่อลื่นแบบฟิล์มบางเมื่อค่า $\frac{\mu N}{P}$ มีค่าต่ำลงฟิล์มสารหล่อลื่นจะบางลง จนกระทั่งยอดขรุขระของผิวชิ้นงานจะแตะสัมผัสกันแล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวชิ้นงาน คุณสมบัติของโลหะชิ้นงานและคุณสมบัติของการสารหล่อลื่นที่ใช้ด้วย การหล่อลื่นแบบเบาคาร์ในการหล่อลื่นแบบนี้จะพบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นบางมาก ฟิล์มหนาตั้งแต่ 10^{-4} เซนติเมตรถึงความหนาของฟิล์มของสารหล่อลื่นเท่ากับความหนาของโมเลกุลของสารหล่อลื่นเท่านั้น ถ้าชิ้นงานทำงานที่ความเร็วต่ำเกิดการระเหยขึ้น ก็จะทำให้ฟิล์มสารหล่อลื่นบางกว่าความสูงของยอดขรุขระที่ผิวชิ้นงาน และถ้าผิวขรุขระนี้มีสารหล่อลื่นจับเป็นชั้นของโมเลกุล สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีคือ โมเลกุลของสารหล่อลื่นสามารถจับตัวเป็นลูกโซ่ยาว ซึ่งได้แก่ ไกครอน้ำมัน เมื่อใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าการหล่อลื่นแบบนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.1 เท่านั้น

2.3 การเกิดแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 2.2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นในแผ่นรองลื่นเอียง

เมื่อชิ้นงาน A เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U จะทำให้ของไหลหรือน้ำมันหล่อลื่นไหลเข้าแผ่นรองลื่น (Bearing) เอียง B ที่ทางเข้าเกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนาเท่ากับ h_1 และที่ทางออกจะเกิดฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนาเท่ากับ h_0 ถ้าสมมติว่าการกระจายของความเร็วในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นเป็นเส้นตรง โดยที่ผิวของชิ้นงาน A ความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นที่แตะกับผิว A มีค่าเท่ากับ U ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้า $q_{x1} = \frac{Uh_1}{2}$ และอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ทางออก $q_{x0} = \frac{Uh_0}{2}$ เนื่องจากค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ทางเข้าแผ่นรองลื่นหนากว่าที่ทางออกจากแผ่นรองลื่น ($h_1 > h_0$) เพราะฉะนั้น $q_{x1} > q_{x0}$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ตามกฎหมายมวล เมื่อให้เป็นไปตามกฎทรงมวลคือที่สภาวะคงตัว อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลเข้าแผ่นรองลื่นจะต้องเท่ากับอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลออกจากแผ่นรองลื่น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นขณะที่น้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านแผ่นรองลื่น แรงดันนี้จะทำให้การกระจายตัวของความเร็วในน้ำมันหล่อลื่นแปรเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกระจายแรงดันและความเร็วของน้ำมันหล่อลื่นในแผ่นรองลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นตามแกน X ที่ตำแหน่ง X ใด ๆ จะเขียนได้ดังนี้

$$q_x = \frac{Uh}{2} - f(p) \quad (2.1)$$

โดยที่ $f(p)$ เป็นเทอมที่ขึ้นกับความชันของแรงดันของน้ำมันหล่อลื่น ตามแกน X และค่าความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น h ที่ตำแหน่งใด ๆ และค่า $f(p)$ มีค่าดังนี้

$$f(p) = \frac{h^3}{\mu} \cdot \frac{dP}{dX} \quad (2.2)$$

∴ อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นใน แผ่นรองลื่น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{\mu} \left(\frac{dP}{dX} \right) \quad (2.3)$$

หรือ

$$q_x = \frac{U\bar{h}}{2} \quad (2.4)$$

โดยที่ \bar{h} คือความหนาของฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่ตำแหน่งที่เกิดแรงดันสูงสุด จะเห็นได้ว่าสมการ (2.3) และสมการ (2.4) ต่างก็เท่ากัน ดังนั้น $\frac{dP}{dX}$ จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dP}{dX} = \frac{\mu U}{2} \left(\frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) \quad (2.5)$$

สมการที่(2.5) เป็นสมการใช้ในการคำนวณหาการกระจายของแรงดันในน้ำมันหล่อลื่น

2.4 ความหนืดของสารหล่อลื่น

ค่าความหนืดของสารเป็นตัวแสดงความชันของสารนั้น ๆ ตามปกติเมื่อสารหล่อลื่น เช่น น้ำมันหล่อลื่นเมื่อได้รับความร้อน อุณหภูมิจะสูงขึ้น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง

สำหรับของไหลที่เป็นของไหลนิวทอนเนียน ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนในชั้นของของไหลกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในชั้นของของไหล สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.6)$$

โดยที่ τ คือความเค้นเฉือนหรือแรงเสียดทานต่อพื้นที่สัมผัส μ คือค่าความหนืดของของไหล และ $\frac{\partial u}{\partial y}$ คือ อัตราการเฉือน

จากสมการ (2.6) สามารถเขียนสมการหาค่าความหนืด ได้ดังนี้

$$\mu = \frac{F}{A \left(\frac{du}{dy} \right)} \quad (2.7)$$

หน่วยของความหนืด

$$\mu = \frac{N \cdot \text{sec}}{\left(\frac{m^2 \cdot m / \text{sec}}{m} \right)} = \frac{N \cdot \text{sec}}{m^2}$$

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ 21°C

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}

2.5 สมการเรโนลด์

สมการเรโนลด์ เป็นสมการหลักในวิชาหล่อลื่นใช้อธิบายการเกิดแรงดันของของไหลขณะที่ของไหลไหลในแบริ่ง เป็นแผ่นฟิล์มบางโดยที่ฟิล์มของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กตามทิศทางการไหล ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นในของไหล

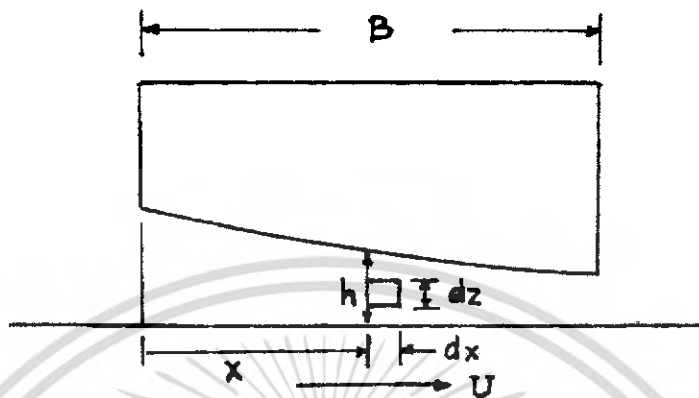
ข้อสมมติในการเขียนสมการเรโนลด์

- 1) ไม่คิดแรงภายนอกที่กระทำต่อสารหล่อลื่น เช่น ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของสารหล่อลื่น แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) แรงดันที่เกิดขึ้นในของไหลหรือสารหล่อลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแกนความหนาของของไหล ซึ่งหมายความว่าฟิล์มของสารหล่อลื่นนั้นบางมาก
- 3) การไหลของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่นที่มีผิวโค้งนั้น ถูกสมมติว่าเป็นการไหลในแกนตรงไม่คิดผลเนื่องจากผิวโค้งของกาบรองลื่น
- 4) ไม่เกิดการลื่นไถลของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่น ดังนั้นสารหล่อลื่นที่แตะจับผิวกาบรองลื่นหรือเพลลาจะมีความเร็วเท่ากับผิวกาบรองลื่นหรือผิวเพลลา
- 5) สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian Fluid)
- 6) การไหลของสารหล่อลื่นเป็นการไหลอย่างเป็นระเบียบซึ่งเรียกการไหลแบบลามินาร์ (Laminar)

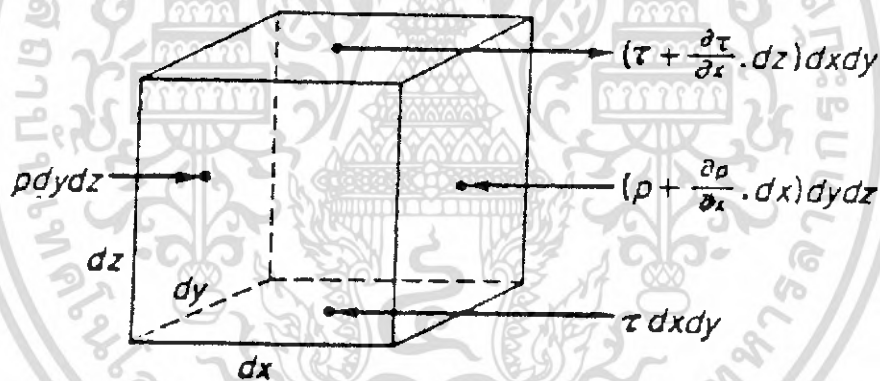
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่น เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นบางมาก
 8) ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าคงที่ ไม่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิหรือความดัน

การสมดุลย์ของแรงที่กระทำต่อสารหล่อลื่น



รูปที่ 2.4 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นผ่านหน้าตัดเล็ก ๆ ตามทิศทาง การไหลในแบร์ริง



รูปที่ 2.5 แสดงแรงกระทำต่อสารหล่อลื่นในทิศตามแกน X

พิจารณาชิ้นงานสองชิ้น ชิ้นบนมีความเร็ว U_1 ตามแกน X และชิ้นล่างเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ U_2 ตามแกน X มีสารหล่อลื่นระหว่างชิ้นทั้งสองดังรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาการสมดุลของแรงที่กระทำต่อสารหล่อลื่นชิ้นเล็ก ๆ ตามรูปที่ 2.2 จะพบว่าแรงกระทำบนชิ้นสารหล่อลื่นประกอบด้วย แรงเฉือนระหว่างชั้นของสารหล่อลื่นและแรงเนื่องจากแรงดันของสารหล่อลื่น ซึ่งสามารถเขียนสมการการสมดุลของแรงตามแกน X ได้ดังนี้

$$P dy dz + \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right) dx dy = \tau_{xz} dx dy + \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) dy dz$$

จะได้
$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแสดงการสมดุลของแรงตามแนวแกน y

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2.9)$$

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตัน

$$\tau_{xz} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.10)$$

$$\text{และ } \tau_{yz} = \mu \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.11)$$

แทนค่าความเค้นจากสมการ (2.10) และ (2.11) ลงในสมการ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ จะได้สมการความเร็วของสารหล่อลื่นตามแกน x ; u และตามแกน y ; v ตามลำดับ ดังนี้

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.12)$$

$$\text{และ } \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.13)$$

อินทิเกรตสมการ (2.12) และ (2.13) เทียบกับ z สองครั้งจะได้

$$u = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2 \quad (2.14)$$

$$\text{และ } v = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) \frac{z^2}{2} + D_1 z + D_2 \quad (2.15)$$

โดยที่ C_1 , C_2 , D_1 และ D_2 เป็นค่าคงที่ ค่า C_1 และ C_2 สามารถหาได้จากรูปที่ 2.1 ตามสภาวะเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้คือ

$$\text{ที่ } z = 0 ; u = U_2 ; v = V_2$$

$$\text{ที่ } z = h ; u = U_1 ; v = V_1$$

$$\text{จะได้ } u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) (z^2 - zh) + \frac{(U_1 - U_2)z}{h} + U_2 \quad (2.16)$$

$$\text{และ } v = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) (z^2 - zh) + \frac{(V_1 - V_2)z}{h} + V_2 \quad (2.17)$$

อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน x ; q_x

$$q_x = \int_0^h u dz \quad (2.18)$$

อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน y ; q_y

$$q_y = \int_0^h v dz \quad (2.19)$$

แทนสมการ (2.16) ลงใน (2.18) จะได้

$$q_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \int_0^h (z^2 - zh) dz + \left(\frac{U_1 - U_2}{h} \right) \int_0^h z dz + U_2 \int_0^h dz$$

$$q_x = \frac{-h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + (U_2 + U_1) \frac{h}{2} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกันแทนสมการ (2.17) ลงใน (2.19) จะได้อัตราการไหลของสารหล่อลื่นตามแกน y , q_y เป็นดังนี้

$$q_y = \frac{-h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) + (V_1 + V_2) \frac{h}{2} \quad (2.21)$$

จากสมการกฏทรงมวล

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2.22)$$

แทนค่า และ จากสมการ (2.20) และ (2.21) ลงในสมการกฏทรงมวล (2.22) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + (U_1 + U_2) \frac{h}{2} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) + (V_1 + V_2) \frac{h}{2} \right\} = 0 \quad (2.23)$$

ตามปกติในการรองพื้น ผิวภายในจะไม่มี การเคลื่อนไถลตามแกน y

ดังนั้น $V_1 = V_2 = 0$ และให้ $U_1 = 0$ และ $U_2 = U$

จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{Uh}{2} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right\} = 6 \frac{\partial(Uh)}{\partial x} \quad (2.24)$$

ตามปกติความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นถูกสมมติให้มีค่าคงที่เท่ากันตลอดในกาบรองพื้นหรือแผ่นรองพื้น และความเร็วของผิวภายในหรือผิวเพลามีความเร็วเร็วคงที่ U ตามแกน x ดังนั้นสมการด้านบนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6\mu U \frac{dh}{dx} \quad (2.25)$$

สมการ (2.25) คือสมการเรโนลด์แบบสองมิติใช้ในการคำนวณหาการกระจายของแรงดันในกาบรองพื้นหรือแผ่นรองพื้น

บทที่ 3

สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในระบบการหล่อลื่นจะทำหน้าที่ใหญ่ๆ สองประการคือ ประการแรก ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมแรงเสียดทาน ประการที่สองช่วยลดการสึกหรอที่ผิวชิ้นงานระหว่างชิ้นงานที่มีการหมุนหรือเคลื่อนที่ ในการออกแบบระบบการหล่อลื่นและเลือกสารหล่อลื่นจะต้องพิจารณาถึง

1. ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงาน
2. แรงกระทำบนผิวชิ้นงาน
3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผิวชิ้นงาน

แฟกเตอร์ทั้งสามจะเป็นตัวกำหนดชนิดของการหล่อลื่น ซึ่งการหล่อลื่นโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. การหล่อลื่นที่มีฟิล์มของไหลหนา หรือการหล่อลื่นแบบไฮโดร ไดนามิก เป็นชนิดของการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นที่เป็นฟิล์มของไหลหนาดังนั้นสมรรถนะการหล่อลื่นจะขึ้นกับคุณสมบัติสารหล่อลื่นเป็นหลัก
2. การหล่อลื่นแบบเบาคาร์รี่ เป็นชนิดการหล่อลื่นที่ผิวชิ้นงานมีสารหล่อลื่นคั่นอยู่หนาเพียงหนึ่งหรือสองโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการหล่อลื่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและคุณสมบัติของผิวชิ้นงานด้วย

3.1 สารหล่อลื่นสถานะของเหลว

น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นสถานะของเหลวที่ได้จากปิโตรเลียม ถ่านหิน น้ำมันดิบเป็นต้น ส่วนใหญ่น้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม ดังนั้นจะขอกกล่าวเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากปิโตรเลียมเท่านั้น น้ำมันปิโตรเลียมส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของคาร์บอนประมาณ 83-87 % มีไฮโดรเจนประมาณ 11-14 % และมีส่วนผสมอื่นได้แก่กำมะถัน ออกซิเจนและไนโตรเจน การจับตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจนจะสามารถจับตัวได้หลายๆ แบบ ซึ่งจะให้คุณสมบัติทางน้ำมันแตกต่างกันไป สามารถจำแนกออกเป็น พาราฟิน(Paraffins) โอลิฟิน(Olefins) เอโรมาติก(Aromatics) แนพทีน(Naphthen) และแอสฟาเทน(Asphatens) ผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมสามารถเลือกชนิดหรือแหล่งน้ำมันแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมดิบและกำหนดอัตราส่วนของน้ำมันดิบต่างๆ ในโลกในปริมาณ 0-40% เพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ น้ำมันปิโตรเลียมสามารถใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากทำให้ผิวชิ้นงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นเปียกเป็นชั้นน้ำมันขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนไถลกัน น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่มีพิสัยความหนืดสูงสามารถเลือกใช้งานได้ง่ายให้เหมาะสมกับงาน และน้ำมันปิโตรเลียมมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่าของไหลอื่นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมชนิดของน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ส่วนผสมของพาราฟิน เอโรมาติก และแนพธีน จะผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์เป็นอย่างมาก ตามตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ผลของส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียมต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

คุณสมบัติ	พาราฟิน	เอโรมาติก	แนพธีน
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง	สูง
จุดวาบไฟ	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความต่อต้านต่อการเกิดออกซิเดชัน	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ	ต่ำ

ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คืออัตราส่วนของค่าความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนของชั้นน้ำมันหล่อลื่น โดยสมมติว่าน้ำมันหล่อลื่นเป็นของไหลนิวตันเนียน (Newtonian Fluids) ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูญเสียพลังงานเนื่องจาก ความฝืด ประสิทธิภาพทางกล ความร้อนที่เกิดขึ้น การไหลของน้ำมัน ภาระที่สามารถรับได้ และความสึกหรอของชิ้นส่วนของเครื่องจักร เช่น กาบรอลงันหรือเฟืองเป็นต้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลงซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในทางปฏิบัติ สำหรับเครื่องยนต์ SAE ได้กำหนดค่าน้ำมันหล่อลื่นตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ตามตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งตามเบอร์ SAE

ความหนืดเบอร์ SAE	ความหนืด ($\mu\text{m}^2 / \text{s}$)			
	-17.8 °C		99 °C	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
5W	-	869	-	-
10W	1,303	2,606	-	-
20W	2,066	10,423	5.73	9.62
30W	-	-	9.62	12.93
40W	-	-	12.93	16.77
50W	-	-	16.77	22.68
75W	-	3,257	-	-
80W	3,257	21,716	-	-
90W	-	-	14.24	25.0
140W	-	-	25.0	42.7
250W	-	-	42.7	-

น้ำมันเครื่อง 5W-50W น้ำมันเกียร์ 75W-250W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.3 ตารางแสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในทางอุตสาหกรรมกำหนดโดย ASLE – ASTM
ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานของ ISO คือ Standard 3448 และ ISO

เกรดน้ำมัน ISO VG	ความหนืดโดยเฉลี่ย ($\mu\text{m}^2 / \text{s}$) ที่ 40 °C	พิสัยค่าความหนืด ($\mu\text{m}^2 / \text{s}$) ที่ 40 °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
200	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าความหนืดน้ำมันเปลี่ยนไป กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดจะลดลง และแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ความหนืดน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไปซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะผลต่อสมรรถนะของกาบรองลื่นหรือแผ่นรองลื่น เช่นทำให้ภาวะที่สามารถรับได้มีค่าเปลี่ยนทำให้แรงเสียดทานและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเปลี่ยนไป ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดลดลง ในทางปฏิบัติเมื่อเพิ่มแรงดันของน้ำมันหล่อลื่น 38 เท่า ของแรงดันบรรยากาศ จะมีผลต่อค่าความหนืดเท่ากับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเท่ากับ 1°C

คุณสมบัติอื่นที่ควรพิจารณาได้แก่ ความหนาแน่น ความดันไอ ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จุดเยือกแข็ง เป็นต้น

การใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันหล่อลื่นมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ น้ำมันปิโตรเลียมมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถผสมหรือทำน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมให้มีคุณสมบัติตามต้องการได้โดยไม่มีขาด อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่สุครวมทั้งต้นทุนที่เหมาะสมด้วย

ในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นสำหรับงานใดงานหนึ่งจะต้องพิจารณาทั้งในด้านความข้นใส และด้านสมรรถนะหรือคุณสมบัติประกอบกันด้วย จะพิจารณาด้านใดด้านหนึ่งไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นทั้งทางด้านความข้นใสและทางด้านสมรรถนะขึ้น สำหรับมาตรฐานทางด้านความข้นใสหรือความหนืด SAE จะนิยมใช้สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ และมาตรฐานความข้นใสหรือความหนืด ISO จะนิยมใช้สำหรับน้ำมันอุตสาหกรรม

บทที่ 4

แรงเสียดทาน

4.1 คำแนะนำ

เป็นที่รู้กันดีในทฤษฎีทางกลว่าถ้าจุดสามจุดของการขยับยังของรูปร่างระนาบใดๆมีการสัมผัสของจุดแบบธรรมดา การเคลื่อนที่ถูกกีดขวางเพื่อหมุนจุดเหล่านั้น ตัวอย่างเช่น คู่การหมุนที่เป็นวงกลม จุดสัมผัสอยู่กับที่มีความสัมพันธ์กับจุดอื่นๆ และหมุนต่อเนื่อง คู่ของจุดสัมผัสมีจุดศูนย์กลางเปลี่ยนแปลงจะเกิดการหมุนเล็กน้อย ตัวอย่าง เช่น ตำแหน่งใหม่คือด้านจุดการสัมผัสของสามจุดใหม่ของการขยับยัง โดยทั่วไปมีรูปร่างแตกต่างกันไปและอ้างอิงเป็น higher pair และตรงกันข้ามจะไม่ครอบคลุมใน lower pair และสมมติเป็นผิวทรงกระบอก การสัมผัสจะเป็นแนวเส้น ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากการผสมของสองอย่างคือ การลื่นและการหมุน

ใน higher pair ความเสียดทานอาจจำเป็นของแรงในส่วนของลื่นเสียดทานสองอันสัมผัสกัน แรงบนลื่นไม่เพียงยึดการสัมผัสแต่ยังป้องกันการลื่นระหว่างการสัมผัส เพื่อความแน่ใจ แรงใน higher pair ควรจะทำมากกว่ารักษาผิวการสัมผัส ตัวอย่าง ball bearing เป็น lower pair หรือเป็น higher pair ที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามพิจารณาเป็น higher pair

บทนี้เขียนเพื่อให้ผู้อ่านแน่ใจในรายละเอียดของ higher kinematic pairs ซึ่งมีสองวัตถุประสงค์คือ

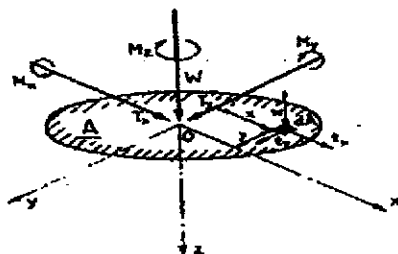
1. เพื่อพัฒนาความเข้าใจของพื้นฐานหลักการของการสัมผัส
2. เพื่อพัฒนาความง่ายด้วยการวิเคราะห์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการสัมผัสสำหรับ higher kinematic pairs

ข้อมูลในบทนี้สามารถใช้แก้ปัญหาสำหรับ higher kinematic pairs คือ หนึ่ง ปัญหาการสัมผัสระหว่างผิวสองผิวถูกอธิบาย รวมทั้งการส่งแรงที่จุดสัมผัส แรงคิงผิว elastic hysteresis ระหว่างการหมุน ความต้านทานการหมุน และ การลื่นของลูกกลิ้ง และ สอง ความหนาฟิล์มภายใต้สภาวะ isothermal elastohydrodynamic ความร้อนทางเข้า ของการสัมผัสแนวเส้น สูดทำปัญหาเกี่ยวกับการหมุนในแบร์ริง , เกียร์ , cam-follower และสมการการหาความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด

4.2 แรงกระทำบนพื้นที่สัมผัส

ในส่วนนี้จะพิจารณาโหลดกระทำบนพื้นที่สัมผัสและวิธีการส่งแรงจากผิวหนึ่งไปสู่ผิวอื่นๆ โหลดที่กระทำพิจารณาเป็นแรงตัวฉาก (P) ตามแนวตั้ง และแรงเฉือน (T) ซึ่งต้านโดยแรงเสียดทาน ความสัมพันธ์ระหว่าง W และ T แสดงโดย

$$T \leq fW \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1

เมื่อ f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน T สามารถเขียนในรูปส่วนประกอบตามแนว x (T_x) และแนวแกน Y (T_y) ขนานแกน x และแกน y ในการสัมผัสเส้นแรงเฉือนจะมีทิศทางด้านความเร็ว แรงส่งที่ตั้งฉากของการสัมผัสมีผลต่อการอัดของของแข็งและจะมีผลที่จะเกิดโมเมนต์ขึ้น ซึ่งประกอบด้วยโมเมนต์ M_x และ M_y เรียกว่า โรลิ่งโมเมนต์ ด้านการหมุนแต่มีขนาดเล็กจะไม่คิดก็ได้ ส่วน M_z กระทำบนแกนตั้งฉาก เรียกว่า สปินโมเมนต์

การหมุนอิสระนิยามเป็นการหมุน ซึ่งไม่มีการสปินและแรงเฉือน T เป็นศูนย์ สภาวะนี้จะไม่มีกำลังและไม่มีแรงเบรกถ้าความต้านทานการหมุนและความเสียดทานในแบริ่งไม่มี ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับล้อขับเคลื่อนและเบรก ส่งแรงเฉือนที่จุดสัมผัสกับถนนหรือรางรถไฟ

4.3 แรงจุดบริเวณสัมผัส

แรงและโมเมนต์ที่อธิบายข้างบนถูกส่งข้ามผิวสัมผัสโดยแรงค้ำผิว ที่ผิวสัมผัส แรงค้ำตั้งฉาก (ความดัน) w และ แรงค้ำเฉือน (แรงเสียดทาน) t แสดงบนผิวเล็กในรูป 4.1 สมการสมมูลรวม

$$W = \int_A w dA, \quad (4.2)$$

$$T_x = \int_A t_x dA, \quad T_y = \int_A t_y dA \quad (4.3)$$

รูปการสัมผัสโดยผิวโค้งเส้นสัมผัสประมาณใน ระนาบ $x-y$ ดังนั้น

$$M_x = \int_A wy dA, \quad M_y = - \int_A wx dA, \quad (4.4)$$

และ
$$M_z = \int_A (t_y x - t_x y) dA \quad (4.5)$$

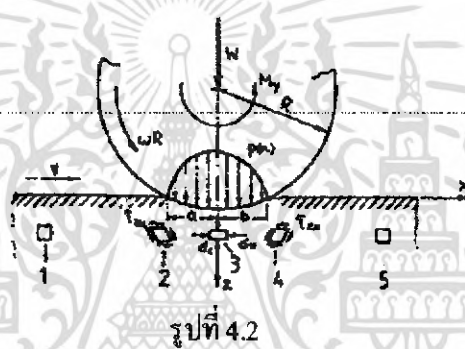
เมื่อเป็นผิวโค้งปิด ตัวอย่างเช่น deep-groove ball-bearing ซึ่งสามารถหา M_x , M_y ตามสมการ 4.4 และแรงค้ำเฉือน t_x และ t_y ตามสมการ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 Hysteresis losses

บางพลังงานจะสลายระหว่างรอบของไหลคหรือไม่มีไหลค แม้ว่าจะอยู่ในช่วงหคได้เพราะว่าไม่มีของแข็งที่ยึดหยุ่นสมบูรณ์ พลังงานสูญเสียแสดงเป็นรูปเศษส่วน α ของพลังงานความเครียดยึดหยุ่นที่สะสมอยู่ในวัตถุเมื่อ α อ้างอิงเท่ากับ hysteresis loss factor สำหรับโลหะส่วนใหญ่ ความเค้นภายในช่วงยึดหยุ่น ค่า α น้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์ แต่พอลิเมอร์ และยางลบจะมากกว่า

ในการหมุนอิสระวัสดุในส่วนสัมผัสภายใต้รอบของไหลคและไม่มีไหลค จะไหลผ่านบริเวณสัมผัสตามรูป 4.2 พลังงานความเครียดของวัสดุเพิ่มขึ้นตรงกลางระหว่างงานอัด โดยความเค้นสัมผัสบนครึ่งด้านหน้าของพื้นที่สัมผัส แต่หลังศูนย์กลางระบบพลังงานความเครียดลดลง และงานต้านความเค้นสัมผัสที่ด้านหลังของการสัมผัส ไม่คิดความเสียดทานผิวสัมผัส พลังงานความเครียดของวัสดุเข้าไปใกล้ศูนย์กลางระบบ ในช่วงเวลาสั้นๆ สามารถหาจากความเค้นบนครึ่งหนึ่งของการสัมผัส สำหรับการสัมผัสทรงกลม



รูปที่ 4.2

$$dP = \omega dt \int_0^a p(x)x dx, \tag{4.6}$$

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

$$P = \frac{2}{3\pi} W a \omega, \tag{4.7}$$

เมื่อ π คือไหลคการสัมผัส ถ้า เศษส่วน α ของพลังงานความเครียดนี้น้อยจะ สมมุติให้สลายโดย hysteresis ผลลัพธ์โมเมนต์เพื่อต้องการรักษาการเคลื่อนที่ โดยสมการพลังงานสุทธิ ดังนั้น

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

หรือ

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = a \frac{2a}{3\pi R} \tag{4.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ f_r คือ สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการหมุน ดังนั้น ความต้านทานการหมุนของวัตถุที่ไม่ยึดหยุ่นสมบูรณ์ แสดงในรูปของ hysteresis loss factor ซึ่งตามทฤษฎีความเสียดทานการหมุนของ Tabor

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = a \frac{2a}{16R} \quad (4.9)$$

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

มีปัญหาพื้นฐาน 2 อย่างเกี่ยวกับทฤษฎีนี้ 1. hysteresis loss factor \propto ปกติไม่ใช่ค่าคงที่ของวัสดุในส่วนของโลหะเพิ่มความเครียด (a/R) 2. hysteresis loss factor ในการสัมผัสแบบหมุนไม่สามารถหาด้วย loss factor ในรอบการดึงหรือการอัด อย่างง่ายเสียรูปในการสัมผัสหมุนอธิบายในรูป 4.2 เกี่ยวกับการหมุนของแกนหลักระหว่างจุดของ 2,3,4 ด้วยการเปลี่ยนพลังงานความเครียดทั้งหมดเล็กน้อย

การเสียรูปในผิวควรจะหาโดยการหมุนของทรงกลมแข็งบนผิวระนาบที่ไม่ยึดหยุ่น ซึ่งมีความต้านทานน้อย ความต้านทานนี้อยู่ในรูปของส่วนประกอบของแรงเสียดทาน มีค่าเท่ากับความต้านทานการหมุน F_r ซึ่งแสดงในสมการ 4.9

4.5 ความเสียดทานการหมุน

การเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบง่าย ๆ ใน Higher kinematics pairs ในทางอุดมคติไม่ควรจะมีการสูญเสียพลังงานมาก แต่ในความจริงจะสลายไปจากความเสียดทานการหมุน พลังงานสูญเสียในการหมุนจำแนกได้เป็น

- เป็นผลจาก micro-slip และ ความเสียดทานที่ผิวสัมผัส
- วัสดุมีคุณสมบัติไม่ยึดหยุ่น
- ผิวสัมผัสมีความขรุขระ

การหมุนอิสระจะนิยามว่าการเคลื่อนที่ที่ไม่มีผลจากแรงเฉือน ความต้านทานการหมุนมีผลจากโมเมนต์ M_y ทั้งสอง ซึ่งต้องการความสมมาตรของการกระจายความดัน โดยความดันสูงบนการ

สัมผัสข้างหน้ามากกว่าข้างหลัง อย่างไรก็ตามการหมุนในแบร์ริง สมมุติให้มีการเสียดทานน้อยและความต้านทานการหมุนถูกเอาชนะโดย แรงเฉือน T_x ที่กระทำบนแบร์ริงและด้านที่ผิวสัมผัส ซึ่งความต้านทานการหมุนน้อย ($T_x \ll W$) เขียนความต้านทานการหมุนในรูปไร้มิติสัมประสิทธิ์ f_r แสดงในเทอมของอัตราส่วนของการกระจายความดัน P

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = \frac{T_x}{W} = \frac{P}{WV} \quad (4.10)$$

P/V คือ พลังงานกระจาย ต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

พลังงานสูญเสียช่วง micro-slip

พลังงานกระจายช่วง micro-slip เกี่ยวกับผิวสัมผัสเมื่อวัตถุหมุนไม่คล้ายการสัมผัสแบบยึดหยุ่น ความต้านทานจากสาเหตุนี้ขึ้นกับความแตกต่างของค่าคงที่ยืดหยุ่นแสดงโดยพารามิเตอร์ β (นิยามโดยสมการ 4.11) และ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการลื่น f

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[(1-2\nu_1)/G_1] - [(1-2\nu_2)/G_2]}{[(1-\nu_1)/G_1] + [(1-\nu_2)/G_2]} \right\} \quad (4.11)$$

ความต้านทานการหมุนเข้าใกล้ค่ามากที่สุด

$$f_r = \frac{M_y}{WR} \approx 15 \times 10^{-1} \beta \left(\frac{a}{R} \right) \quad (4.12)$$

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

$$f_r = \frac{M_y}{WR} = 0.08 f \left(\frac{a}{R} \right)^2 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad (4.13)$$

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

ใน tractive rolling เมื่อแรงและโมเมนต์มาก ๆ ส่งผ่านวัตถุ มีความหมายน้อยที่จะแสดงความต้านทานการหมุนตาม T_x หรือ M_y/R พลังงานยังคงสูญเสียใน micro-slip และสำหรับการเปรียบเทียบกับ การหมุนอิสระ มีประโยชน์ที่จะนิยามประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน $f = P/VW$ นี่เป็นการวัดการสูญเสียของประสิทธิภาพของ tractive drive เช่น สายพาน, ก้อนขับ, continuously variable speed gear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานสูญเสียช่วง plastic deformations

ในสาเหตุส่วนใหญ่ ความต้านทานการหมุนถูกมีอิทธิพลโดย การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของการสัมผัสวัตถุหนึ่งหรือสอง ในส่วนนี้พลังงานจะสูญเสียในของแข็ง ที่ความถี่ตามส่วนประกอบแรงเฉือนมากที่สุดตามความเค้นการสัมผัส มากกว่าผิวสัมผัส กับวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ การปล่อยความร้อนต่ำที่ผิวสามารถทำให้อุณหภูมิภายในสูงและสึกกร่อน โดยความเครียด ความร้อน โดยทั่วไปแล้วโลหะมีพฤติกรรมแตกต่างจากพวกที่ไม่ใช่โลหะ คุณสมบัติการไม่ยืดหยุ่นของโลหะและ บางอย่างเป็น crystalline non-metallic ถูกควบคุม โดยการเคลื่อนที่ที่อุณหภูมิปกติ ไม่มีอิทธิพลทั้งจากอุณหภูมิ หรือ อัตราการเสียรูป

คุณสมบัติความเสียดทานการหมุนของวัสดุซึ่งมีช่วงความเค้นยืดหยุ่นตามอัตราส่วนอิสระพลาสติก ที่ไหลค่น้อยการเสียรูปยืดหยุ่น และความต้านทานการหมุนแสดงตามสมการ ยืดหยุ่น hysteresis (4.8) hysteresis factor หาโดยการทดลอง โดยทั่วไปแล้วจะเป็นเปอร์เซ็นต์เล็กน้อย

ที่ไหลคสูงเมื่อบริเวณพลาสติกไม่ใหญ่มาก 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 เกิดการสัมผัสจริงและมีความคั่นเกิดขึ้น ดังนั้น การเสียรูปพลาสติกจะเกี่ยวข้องแม้ว่าความเค้นบีบจะอยู่ภายในช่วงยืดหยุ่นก็ตาม ผิวหยาบและเรียบจะเสียรูปพลาสติกบนการเคลื่อนที่ครั้งแรกแต่การเสียรูปจะเป็นแบบยืดหยุ่นในรอบต่อมา ความต้านทานการหมุนลดลงด้วยการหมุนซ้ำ สังเกตได้จากการทดลอง และอีกทางหนึ่งความขรุขระผิวมีผลต่อความต้านทาน พลังงานที่ใช้มากขึ้น เช่น ผิวหยาบมากใช้ไหลคมาก จุดศูนย์กลางมวลของลูกกลิ้ง เคลื่อนขึ้นลง ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไม่คงที่ การวัดความต้านทานของแรงแสดงใหญ่มาก ความถี่สูง พลังงานสูญเสียเร็วในการกระทบเล็กๆ ระหว่างผิวที่ไม่สม่ำเสมอ เพราะว่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ด้วยความเร็วของการหมุน

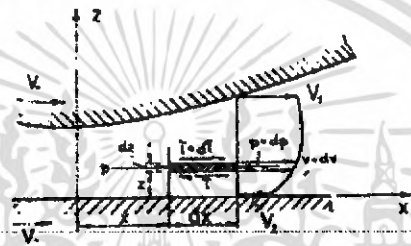
4.6 การล่อลื่นของทรงกระบอก

โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นเพื่อแน่ใจในการทำงานของผิวการสัมผัสกัน แม้ว่าผิวของการสัมผัสแบบหมุน เช่น ball-bearing , micro-slip ซึ่งต้องการการหล่อลื่น ถ้าผิวถูกทำลาย หรือเพื่อหลีกเลี่ยงการหลวม การหล่อลื่นทำได้สองทาง หนึ่งจัดเตรียมฟิล์มบางบนผิวของแข็งเพื่อป้องกันการติดแน่น และลดแรงเสียดทานระหว่างผิว เพื่อใช้แรงเฉือนน้อย การกระทำนี้รู้จักในขอบเขตการหล่อลื่น ฟิล์ม โดยทั่วไปบางและมีพฤติกรรมอิสระขึ้นกับคุณสมบัติฟิสิกส์และเคมีทั้งของสารหล่อลื่นและผิวของแข็ง ความสัมพันธ์ของความหนาฟิล์มอยู่ระหว่างผิวและ sufficient pressure ซึ่งถูกพัฒนาในฟิล์มเพื่อรองรับ โหลดตั้งฉากปราศจากการสัมผัสกันของของแข็ง การกระทำนี้เรียกว่า การล่อลื่น hydrodynamic ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของการสัมผัสและความหนืดของเหลว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงฟิล์มรับโหลดระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกสองอันทั้งการหมุนและการเลื่อน ซึ่งสามารถประยุกต์ในการหล่อลื่นของฟันเกียร์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ดังรูป 4.2 และจะแสดงสมดุลทั้งการสัมผัสแบบหมุนและเลื่อนผสมกันทั้งสองทรงกระบอก

ฟิล์มบางของสารหล่อลื่นอัดตัวไม่ได้ ความหนืด μ ระหว่างผิวของของแข็งสองอัน ด้วยความเร็ว V_1 และ V_2 ดังรูป 4.3 ซึ่งเกือบจะขนาน ส่วนประกอบความเร็วตั้งฉากกับฟิล์มไม่คิด ดังนั้น ความดันคือรูปแบบข้ามความหนา ที่เลขเรโนลด์ค่าความหนาฟิล์มบางและความหนืดน้อย แรงเฉื่อยจะไม่คิด สำหรับการไหลสองมิติ สมการของไหลแสดงเป็น



รูปที่ 4.3

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (4.14)$$

เมื่อ v คือ stream velocity, $\partial p / \partial x$ ค่าอิสระของ z สมการ 4.14 สามารถอินทิเกรต โดย z ให้ $v = v_2$ และ v_1 ที่ $z = 0$ และ h คือ parabolic velocity profile ดังรูปที่ 4.3 แสดงโดย

$$v(z) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (z^2 - hz) + (V_1 - V_2) \left(\frac{z}{h} \right) + V_2 \quad (4.15)$$

ปริมาตรการไหล Q ของฟิล์ม คือ

$$Q = \int_0^h v(z) dz = -\frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) + (v_1 + v_2) \frac{h}{2} \quad (4.16)$$

การไหลต่อเนื่อง Q เหมือนกันสำหรับพื้นที่ภาคตัดทั้งหมด

$$Q = (V_1 + V_2) \frac{h_1}{2}, \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ h_1 คือ ความหนาฟิล์มที่ pressure gradient dp/dx คือ 0

กำจัด Q

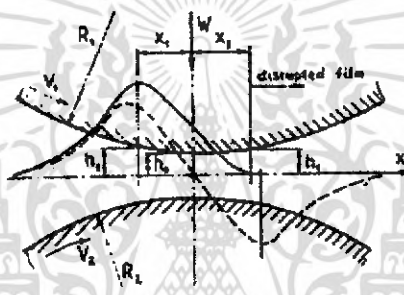
$$dp/dx = 6\mu(V_1 + V_2) \left(\frac{h - h_1}{h^3} \right) \quad (4.18)$$

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

สมการ (4.18) จะใช้หาความดันในฟิล์มระหว่างทรงกระบอกหมุนสองอัน

1. ทรงกระบอกแข็ง

รูปร่างของทรงกระบอกแข็งสองอันสัมผัสกันแสดงในรูป 4.4 การให้น้ำมันที่ทางเข้า ภายในบริเวณสัมผัส ความหนาของฟิล์มสามารถแสดงเป็น



รูปที่ 4.4

$$h \approx h_0 + x^2 / 2R, \quad (4.19)$$

เมื่อ $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ และ h คือความหนาฟิล์มที่ $x = 0$ แทนสมการ (4.19) ใน (4.18) จะได้

$$dp/dx = \frac{6\mu(V_1 + V_2)}{h_0^2} \left[\frac{1 - \left(\frac{h_1}{h_0} \right) + \left(\frac{x^2}{2Rh_0} \right)}{\left(1 + \frac{x^2}{2Rh_0} \right)^3} \right] \quad (4.20)$$

โดยการแทน $\zeta = \tan^{-1} [x / (2Rh)^{1/2}]$ สมการ (4.20) สามารถอินทิเกรตเพื่อหาการกระจายความดันได้เป็น

$$\frac{h_0^2}{(2Rh_0)^2} \frac{p}{6\mu(V_1 + V_2)} = \frac{\zeta}{2} + \frac{\sin 2\zeta}{4} \quad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\zeta = \tan^{-1}[x/(2Rh)^{1/2}]$ และ x , คือ ค่าของ x เมื่อ $h=h$, และ $dp/dx=0$ ค่าของ ζ , และ A มาจากสภาวะสุดท้าย

ที่เริ่มต้นสมมุติว่าความดันเท่ากับศูนย์ที่จุดทางเข้าและออก $p=0$ ที่ $x=\pm\infty$ ผลลัพธ์ของการกระจายแรงแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 4.4 มีค่าบวกที่ทางเข้า(converging) และมีค่าลบที่ทางออก(diverging) แรงรวม W รองรับโดยฟิล์มเป็นศูนย์ในสภาพนี้ อย่างไรก็ตามการอธิบายคือไม่จริงที่บริเวณของความดันลบใหญ่ๆ ออกที่สภาวะบรรยากาศ การไหลทางออกลดลง ความดันประมาณเท่ากับบรรยากาศ จุดก่อนหน้าของฟิล์มก่อนที่จะลดลงหาโดยการพิจารณาการไหลสามมิติในสิ่งที่ไหลและมีอิทธิพลโดยแรงคิงผิว อย่างไรก็ตามสามารถหาได้โดยการให้สภาวะ

$$dp/dx = p = 0 \quad (4.22)$$

ในสภาวะนี้ด้วย $p = 0$, ที่ $x = -\infty$ แทนในสมการ (4.21) พบว่า $\zeta_1 = 0.443$, $x_1 = 0.475 (2Rh_0)^{1/2}$ การกระจายความดันแสดงโดยเส้นโค้งของแข็งรูป 4.4 ในภาวะนี้ไหลทั้งหมดรองรับโดยฟิล์มแสดงโดย

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 2.45(V_1 + V_2)R\mu/h_0 \quad (4.23)$$

ในสภาวะส่วนใหญ่จะเป็นไหลซึ่งเจาะจง สมการ (4.23) สามารถใช้คำนวณความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด h_0 เพื่อประสิทธิภาพการหล่อลื่น h_0 ต้องมากกว่าคิมหรือซึ่งเห็นจากสมการ (4.23) ว่าความสามารถรับไหลของฟิล์มถูกทำโดยการหมุนแสดงโดย (V_1+V_2) ถ้าทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วเท่ากันในทิศทางตรงกันข้าม $(V_1+V_2) = 0$ มีความดันในฟิล์ม

2. ทรงกระบอกยึดหมุน ภายใต้ไหลการเลือกรูปของทรงกระบอกยึดหมุนการกระจายความดันบนฟิล์มแสดงเป็น

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

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

$$h(x) = h_0 + (x^2/2R) - \frac{2}{\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} p(s) \ln \left| \frac{x-s}{s} \right| ds \quad (4.24)$$

สมการนี้และสมการเรโนลด์ (4.18) ใช้แสดงสำหรับรูปร่างฟิล์ม $h(x)$ และความดัน $p(x)$ ซึ่งสามารถผสมเข้าสู่สมการเดียวสำหรับ $h(x)$ ซึ่งสามารถแก้โดยวิเคราะห์เชิงตัวเลข รูปร่างฟิล์ม แทนในสมการเรโนลด์เพื่อหาการกระจายความดัน $p(x)$

พารามิเตอร์ที่สำคัญคือความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด h_{\min} ในทุกสภาวะ $h_{\min} \approx 0.8 h_1$. การหล่อลื่นในการเสีรูปร่างแบบฮิดรอน ของผิวของแข็งรู้จักในการหล่อลื่นแบบ elastohydrodynamic

3. การหล่อลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืด เป็นที่รู้จักกันว่าความหนืดของสารหล่อลื่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ในความดันในอุณหภูมิต่ำ ในคุณสมบัติการสัมผัสของ higher kinematic pairs ความดันมีแนวโน้มสูง ดังนั้น มันไม่ประหลาดที่การเพิ่มความหนืดด้วยความดันในการหล่อลื่นแบบ elastohydrodynamic เมื่อการเคลื่อนที่สัมผัสแบบการลื่น ความร้อนจากการเสียดทานจะทำให้อุณหภูมิตั้งขึ้น ซึ่งฟิล์มจะมีความหนืดลดลง เป็นไปได้ที่จะแยกประสิทธิภาพของความดันและอุณหภูมิตั้งขึ้น

พิจารณาฟิล์มมีอุณหภูมิตั้งที่การเปลี่ยนแปลงความหนืดตามความดันแสดงโดยสมการ

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p}, \quad (4.25)$$

เมื่อ μ_0 คือ ความหนืดที่สภาวะความดันและอุณหภูมิตั้งบรรยากาศและ α คือสัมประสิทธิ์ความดันคงที่ของความหนืด สมการนี้เป็นกรณีอธิบายของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารหล่อลื่นทั่วไป แทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการเรโนลด์ (4.18) จะได้

$$e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx} = 6\mu_0 (V_1 + V_2) \left[\frac{h-h_1}{h^3} \right] \quad (4.26)$$

นี่เป็นการใช้สมการเรโนลด์สำหรับ ความดัน hydrodynamic ต้องแสดงสมการ (4.24) สำหรับผลกระทบของการเสีรูปร่างแบบฮิดรอนบนรูปร่างฟิล์ม การแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข จำนวนของการเปลี่ยนพฤติกรรมสัมผัสและนำโดยผลกระทบความดัน - ความหนืด พื้นที่ฟิล์มที่สัมผัสประมาณว่าขนานกันผลลัพธ์นี้จากสมการ (4.26) เมื่อ α_p มากข้างซ้ายมือจะน้อยดังนั้น $h - h_1$ จะน้อย เช่น $h \approx h_1 =$ ค่าคงที่การกระจายความดันเป็นพื้นฐานของ Hertz สำหรับการสัมผัสแห้ง แต่ความดันสูงสุดอยู่บนทางออกตามการลดลงอย่างรวดเร็วของความดันและความหนาฟิล์มบางเมื่อความหนืด สูบบรรยากาศมีค่า μ_0 รูปร่างและคุณสมบัติของโหลดของการสัมผัส elastohydrodynamic จะสูง และฟิล์มขนานขรุขระเล็กที่ทางออกและการกระจายความดันประมาณตาม Hertz แต่สูงสุดใกล้ทางออกซึ่งสนับสนุนโดยการทดลองเพื่อความถูกต้องสมมุติว่าความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด ประมาณ 75% ของความหนาในส่วนขนานการแก้ปัญหาที่สำคัญคือการคิดสภาวะที่ยอมรับได้ที่จะไม่คิดการเสีรูปร่างแบบฮิดรอนหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง บางครั้งสามารถทดลองหาค่าโดยพารามิเตอร์ไร้มิติ 2 อัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ความหนืด g_v พารามิเตอร์ความยืดหยุ่น g_e ที่แสดง การเคลื่อนที่ทางกลของการหล่อลื่น elastohydrodynamic ด้วยความดันตอนนี้ชัดเจนแล้วความดันพัฒนาโดย hydrodynamic ที่บริเวณทางเข้า ด้วยการเพิ่มความหนืดอย่างมากความหนาฟิล์มที่ จุดสิ้นสุดของ converging ถูกจำกัดโดยความดัน จึงต้องการหาความหนาฟิล์มในเทอมของความเร็ว, รัศมีลูกกลิ้งและคุณสมบัติความหนืดของสารหล่อลื่น การเพิ่มโพลจะเพิ่มการเสียดรูปแบบยืดหยุ่นของลูกกลิ้งด้วยเพียงเล็กน้อยที่มีอิทธิพลของความหนาฟิล์มของเหลว ความหนืดสูงผ่านทั่วบริเวณขนานจนกระทั่งความดันและความหนืดเป็นปกติที่ทางออก หมายความว่ามีการลดลงของความหนาฟิล์ม บริเวณทางเข้าและทางออกมีประสิทธิภาพอิสระ พบว่าที่ จุดสิ้นสุดของบริเวณขนานมีความชันที่ไม่ต่อเนื่องของผิวและมีความดันสูงสุด

4.7 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของการสัมผัสแนวเส้น

ในส่วนนี้จะแสดงการหล่อลื่นของการสัมผัสแนวเส้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การสัมผัสแนวเส้นแสดงดังรูปที่ 4.5 ความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่ทางออก และสามารถทำนายสูตรการคำนวณได้โดย Dawson และ Higginson สำหรับสถานะอุณหภูมิตั้งที่

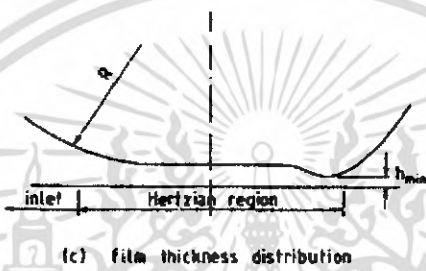
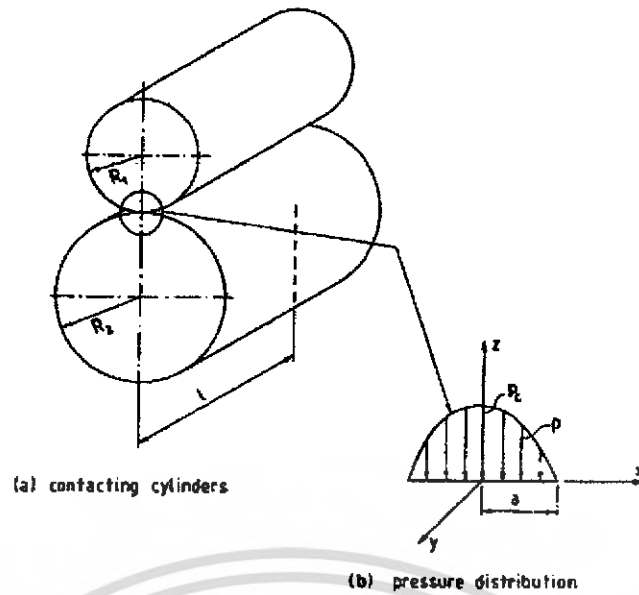
$$\frac{h_{\min}}{R} = 2.5 \frac{G^{0.54} V^{0.77}}{W^{0.13}} \quad (4.27)$$

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



รูปที่ 4.5

$\mu = \mu_0 e^{xp}$ คือ piezo-viscous relation
 และมีผลต่อการเปลี่ยนของความหนืดกับความดัน

$$1/E = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right]$$

μ_0 คือ ความหนืดของสารหล่อลื่น ที่อุณหภูมิผิวทางเข้า

V_1, V_2 คือ ความเร็วผิวบริเวณที่สัมผัสกัน

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 \pm R_2}$$

เมื่อเครื่องหมายบวกเป็นการสัมผัสภายนอก (ผิวทั้งสองโค้งออก) และเครื่องหมายลบเป็นการสัมผัสภายใน (ผิวรัศมีใหญ่กว่าโค้งเข้าข้างใน) w คือ แรงทั้งหมด L คือ ความยาวของการสัมผัส

ความหนืดของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิของผิวของแข็งบริเวณสัมผัสทางเข้า คือ ผลของความหนืดสำหรับหาค่าความหนาฟิล์ม ที่อุณหภูมินี้บางทีพิจารณาสูงกว่าสารหล่อลื่นที่ให้ ดังนั้นความหนืดทางเข้า อาจจะมีสสารต่ำกว่าที่คาดไว้ ปกติแล้วอุณหภูมิผิวทางเข้าจะไม่รู้ปริมาณในการออกแบบ วิธีการแก้ปัญหา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ใช้อุณหภูมิสารหล่อลื่นทางออก หรือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางเข้าและทางออกเพื่อหาค่าความหนาฟิล์ม ควรชี้ให้เห็นว่าการทำนายความหนาฟิล์มอาจจะใหญ่มากเมื่อระบบให้อุณหภูมิถูกใช้และการไหลของสารหล่อลื่นไม่เพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิของสารหล่อลื่นทางเข้าคุณลักษณะของสารหล่อลื่น เช่น ความหนืด, สัมประสิทธิ์ความดัน-ความหนืด และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ-ความหนืด โดยปกติหาได้จากข้อมูลสารหล่อลื่นของผู้ผลิต

4.8 ความร้อนของการสัมผัสที่ทางเข้า

ในตอนที่แล้ว ได้กล่าวถึงคุณลักษณะของสารหล่อลื่นบริเวณอุณหภูมิทางเข้า และระบบที่อุณหภูมิคงที่ อุณหภูมิสารหล่อลื่นบริเวณทางเข้าปกติแล้วจะสูงกว่าอุณหภูมิมืดของสารหล่อลื่น มีเหตุผลทางกล 3 อย่างที่เพิ่มอุณหภูมิสารหล่อลื่นบริเวณทางเข้า คือ หนึ่งความร้อนจากความหนืด สอง การนำความร้อนในบัตของการสัมผัสของ สองสาเหตุผลทางกลนี้บางทีมีความสำคัญเพียงในการเคลื่อนอย่างเฉื่อย ซึ่งมีผลต่อความร้อนทางเข้า ควรได้รับการพิจารณา วิเคราะห์แก้ปัญหาโดยวิธี Thermal reduction factor (T_f) ซึ่งสามารถคูณโดย isothermal film thickness h_0 จะทำให้ง่ายต่อการหาค่าความหนาฟิล์มที่แท้จริง

แฟกเตอร์ความร้อนที่ถูกต้องอยู่ในฟังก์ชัน โทลคที่น้อย และพารามิเตอร์วัสดุ การประมาณค่าครั้งแรกใช้หาค่า แฟกเตอร์ ความร้อนที่ถูกต้องของการสัมผัสแนวเส้น

$$T_f = 0.827 - 0.234T_f + 0.000168(T_f)^2 \quad (4.28)$$

ในสมการ (4.28) แฟกเตอร์โทลคความร้อน T_f หาโดย

$$T_f = \frac{\mu_0 V^2 \delta}{\rho} \quad (4.29)$$

เมื่อ μ_0 คือ ความหนืดของสารหล่อลื่นที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิผิวทางเข้า $V = (V_1 + V_2)/2$ คือ ความเร็วผิวเฉลี่ย (w/s) δ คือ สัมประสิทธิ์ ความหนืด-อุณหภูมิ สารหล่อลื่น $[= (1/\mu T / \Delta\mu / \Delta T): C^{-1}]$ และ ρ คือ ค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่น

สัมประสิทธิ์ ความหนืดอุณหภูมิ, δ , สามารถหาได้จากแผนภูมิความหนืดอุณหภูมิของสารหล่อลื่นจำเป็นที่จะเลือกสองอุณหภูมิประมาณ 20°C ผ่านใกล้อุณหภูมิทางเข้าสมมุติและแบ่งความหนืด โดยความหนืดความร้อนเฉลี่ยและ การเปลี่ยนอุณหภูมิตามความการเปลี่ยนความหนืด ค่าการนำความร้อน ρ คือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ ตามส่วนประกอบของเคมีของสารหล่อลื่น สำหรับน้ำมันแร่ ค่าที่เหมาะสมคือ 0.12-0.15 w/mk ค่าที่ต่ำกว่านี้ใช้สำหรับความหนืดที่ต่ำกว่า ทั้งจากน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า หรืออุณหภูมิที่สูงกว่า เพื่ออธิบายข้างต้นการคำนวณเชิงตัวเลขจะง่าย สมมุติสารหล่อลื่น SAR 10, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันแร่ อุณหภูมิ 55 °C δ เท่ากับ 0.045 °C และค่าการนำความร้อนของสารหล่อลื่น เท่ากับ 0.12 W/m K. สมการ (4.29) จะเป็น

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

ใช้สมการ (6.28)

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

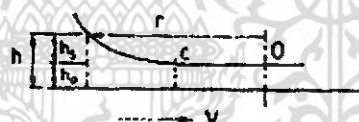
ความหนาฟิล์มที่ถูกต้อง

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

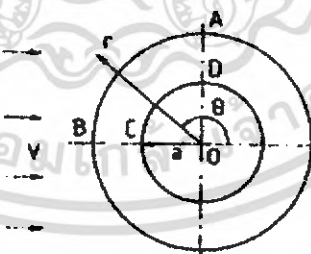
หมายความว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของความหนาฟิล์มมีผลมาจากความร้อนที่ทางเข้า

4.9 การวิเคราะห์การหล่อลื่นของจุดสัมผัส

ในการเปรียบเทียบโหลหนักๆ ของการสัมผัสแนวเส้นความเข้าใจของการหล่อลื่นจุดสัมผัสมีน้อย การวิเคราะห์ปัญหาปกติพิจารณาขอบเขตความรู้ของรูปทรงการสัมผัส ซึ่งปกติไม่รู้รายละเอียดพื้นฐานทฤษฎีแก้ปัญหาถูกคิดโดย Grubin เขาสมมุติว่า



(a) geometry of entry



(b) geometry of contact

รูปที่ 4.6

1. ความดันกระจายภายใต้สภาวะหล่อลื่นเกือบจะเป็น Hertzian
2. รูปทรงของช่องว่างทางเข้านิยามโดยความดัน Hertzian อย่างเดียว ตัวอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันของเหลวตรงทางเข้าของบริเวณสัมผัสไม่มีผลกระทบ การประยุกต์ของ Grubin ประมาณว่าง่ายที่เดียวในการสัมผัสแนวเส้น แต่จุดสัมผัสซับซ้อนมากกว่า การเปลี่ยนแปลงของโหนด ความดันสูงสุด รัศมีสัมผัส และการเลี้ยวรูปสามารถที่จะพบในหนังสือ Elasticity มาตรฐานทั่วไป ความสัมพันธ์แสดงตามนี้

1. ใช้โหนด W สร้างการสัมผัสเชิงมุมของรัศมี a

$$W = \frac{2}{3} \pi a^2 P_{\max} \quad (4.30)$$

เมื่อใช้ P_{\max} คือ ความดันสูงสุดที่จุดศูนย์กลาง

2. รัศมีสัมผัส a หาจากความสัมพันธ์

$$a^3 = \frac{3}{4} \pi \frac{RW}{E} \quad (4.31)$$

เมื่อ R คือ รัศมีสมมูล หาโดย $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ และ E คือ โมดูลัสวัสดุ สมมูล

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]$$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนบัวของ และ 1, 2 อ้างอิงเป็นวัสดุ 2 ชิ้น สัมผัสกัน

3. ช่องว่างข้างนอกของบริเวณสัมผัสหลัก ที่ระยะห่างรัศมี V (ดูรูป 4.6)

$$h = h_o + \frac{3W}{4aE} \left[\left(\left(\frac{r^2}{a^2} \right) - 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(2 \frac{r^2}{a^2} \right) \cos^{-1} \frac{a}{r} \right] \quad (4.32)$$

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

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

โดยสมการ (4.32) จะเป็น

$$h = h_o \left\{ 1 + E \left[\frac{r}{a} - 1 \right]^{1.5} \right\} \quad (4.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนในรูปไร้มิติของสมการเรโนลด์ ในเชิงชั่วและพิจารณาใน สมการสุดท้ายสามารถหาได้ เห็นได้ชัดว่าสมการไม่แก้ปัญหาคาร์วิเคราะห์ได้แม่นยำปกติแล้วแก้โดยการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งทำได้ ทั่วไปหลายคนและได้สมการที่ง่าย ดังนี้

$$\frac{h_0}{R} = \frac{3a\mu_0(V/R)}{(W/ER^2)^{\frac{1}{3}}}, \quad (4.34)$$

เมื่อ μ_0 คือ ความหนืดน้ำมันที่ความดันบรรยากาศ a คือ สัมประสิทธิ์ ความดัน ความหนืด และ V คือ ความเร็ว สมการ (4.34) ได้จากการทดลองและขณะนี้ชัดเจน แม้ว่าจะไม่เอื้ออำนวยต่อรูปร่าง พิสูจน์ห่อถิ้น elastohydrodynamic มีจุดสัมผัสในสภาวะกว้างมากๆ



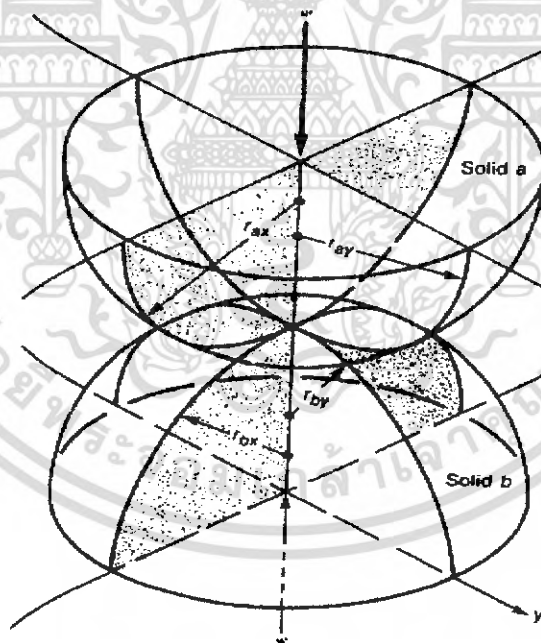
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิธีการแก้ปัญหาที่ง่ายสำหรับค่าความโค้งและการเปลี่ยนรูปร่าง

5.1 ผลบวกและลบของผิวความโค้ง

ผิวสัมผัสของแข็งไม่มีรูปแบบทางเรขาคณิตที่สมบูรณ์ดังนั้นแสดงในทอมทัวไปว่าเป็นรูปวงรีที่มีผิวสัมผัสกัน ในรูปภาพรัศมีของผิวสัมผัสคู่ของของแข็งสองชนิด จะมีความแตกต่างกันในระนาบ x และ y ต้องผ่านเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งที่สัมผัสอยู่ที่จุด ๆ หนึ่งภายใต้โหลดที่มากระทำเป็นศูนย์กลางเงาเราจะเรียกว่าจุดสัมผัสและจะแสดงดังตัวอย่างรูปภาพรัศมีความโค้ง จะแทนค่าเป็น r มันเป็นการสมมุติฐานของผิวสัมผัสที่ซับซ้อนได้แสดงในรูปภาพที่ 4.1 ผิวความโค้งที่แสดงเป็นบวกผิวสัมผัสจะเว้าเข้าไปด้านใน ผิวความโค้งที่เป็นลบ ดังนั้นถ้าศูนย์กลางของเส้นความโค้งที่เป็นของแข็งรัศมีของผิวความโค้งจะเป็นบวก ถ้าศูนย์กลางของเส้นความโค้งอยู่ด้านนอกของแข็ง รัศมีความโค้งจะเป็นลบ ดังที่รูปภาพได้แสดงถึงการคิดเครื่องหมายของรัศมีความโค้งสำหรับชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต่าง ๆ อาทิเช่น ชิ้นส่วนโรลลิงและแบร์ริง ความสำคัญของเครื่องหมายของรัศมีความโค้งจะแสดงอยู่ในบทนี้



รูปที่ 5.1 รูปแบบเรขาคณิตของการสัมผัสการยึดหยุ่นของของแข็ง

ดังนั้นค่าโคออร์ดิเนตสำหรับแกน x และ y จะใช้เป็นดังเช่น

$$\frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{by}} \geq \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{by}} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของสถาบันการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า x ที่เป็นจุดโคออร์ดิเนตจะหาทิศทางของแกนย่อยของบริเวณผิวสัมผัสเมื่อโหลดถูกนำมาใช้ และทิศทางแกน y จะเป็นส่วนของแกนหลัก ทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกแรงดึงและจะถูกพิจารณาในแนวแกน x สำหรับสถานการณ์นั้นจะแสดงให้เห็นระนาบความโค้งของผิวสัมผัส 2 แห่งจะไม่สอดคล้องกัน อ้างจาก Timoshenko และ Goodier(1970)

การบวกและการลบของความโค้งจะเป็นปริมาณที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นของผิวสัมผัสที่มีการคั่นรูปร่าง

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (5.2)$$

$$R_d = R \left(\frac{1}{R_x} - \frac{1}{R_y} \right) \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}} \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_{ay}} + \frac{1}{r_{by}} \quad (5.5)$$

สมการ (5.4) และ (5.5) จะถูกนิยามถึงประสิทธิภาพของปัญหาที่เป็นของรูปวงรี 2 ชั้น จะแสดงถึงในแต่ละเทอมของความสัมพันธ์ของรัศมีของของแข็ง R_x และ R_y จะอยู่ในระนาบจะแสดงเป็นค่าลบของความโค้งในสมการที่ 5.3 เป็นสมการที่ไม่มีหน่วย

อัตราส่วนรัศมี α_r จะนิยามในสมการ (5.6) จะเหมือนกันสำหรับในบทนี้

$$\alpha_r = \frac{R_y}{R_x} \quad (5.6)$$

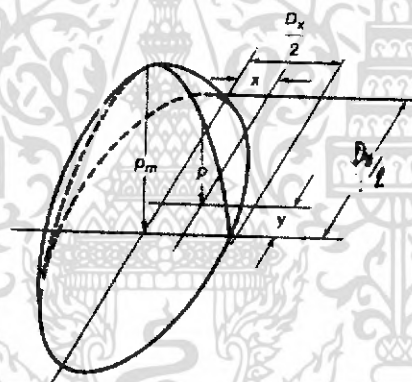
ดังนั้นถ้าสมการที่ (5.1) ให้ $\alpha_r > 1$ จะแสดงค่าที่ยอมรับได้และ $\alpha_r < 1$ เป็นค่าที่ไม่ยอมรับได้

5.2 ความเค้นของผิวและการเปลี่ยนรูปร่าง

เมื่อของแข็งมีความยืดหยุ่นจะกระทำต่อโหลด ความเค้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มโหลด ความเค้นจะทำให้เกิดการคั่นรูปร่างซึ่งจะถูกนิยามโดยค่าของความเครียด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีทิศทางเดียวกัน ดังเช่นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น จะมีค่าความสัมพันธ์แบบเส้นตรงซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับความเครียด จะกำหนดให้ค่าคงที่ของการยืดหยุ่น จะขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น(E) และค่าอัตราส่วนปึงของค์จะแสดงโดย ν เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญทั้งสองตัว

ในขณะที่ความเค้นเพิ่มขึ้นวัสดุจะเกิดความยืดหยุ่นจะเกิดในช่วงวัสดุคืนรูปร่างอย่างถาวรความเค้นจะมีพฤติกรรมการยืดหยุ่นที่มีรูปร่างที่เราเรียกว่าเป็นค่า “ yield stress “ จะเป็นค่าที่วัสดุสามารถทนได้ที่อ่อนนุ่มหนึ่ง ในที่นี้จะพิจารณาพฤติกรรมการเกิดความยืดหยุ่นด้วย

เมื่อของแข็งยืดหยุ่นสองชนิดถูกนำมาติดด้วยกันภายใต้โหลดที่กระทำและบริเวณสัมผัสจะถูกพัฒนาเป็นรูปร่างและขนาดขึ้นอยู่กับโหลดที่มากระทำ วัสดุจะมีค่าความยืดหยุ่นที่เหมาะสมและผิวที่มีส่วนโค้งจะขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด เมื่อเป็นของแข็งสองชนิดดังรูปภาพที่ 1 จะมีโหลดปกติมากระทำต่อชิ้นของแข็ง บริเวณที่สัมผัสจะเป็นรูปร่างรีจะแสดงถึงจุดที่สัมผัสที่มีรูปร่างเป็นรูปร่างรี แต่จะอยู่ภายใต้โหลดที่มากระทำบริเวณที่สัมผัสที่มีรูปร่างลักษณะวงรี สำหรับในกรณีพิเศษ $r_{ax} = r_{ay}$ และ $r_{bx} = r_{by}$ ผลที่สัมผัสจะเป็นรูปร่างกลมมากกว่ารูปร่างรีเมื่อ r_{ay} และ r_{by} จะเป็นเส้นตรงที่ไม่มีที่สิ้นสุดบริเวณที่สัมผัสจะถูกพัฒนาให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อโหลดมากระทำ Hertz (1881) ความเค้นและการคืนรูปร่างจะเป็นรูปแบบที่สมมาตรแบบ ผิวที่ราบเรียบ รูปของแข็งกลมที่มีผิวราบเรียบเป็นรูปร่างรี ของแข็งที่สัมผัสกันในลักษณะดังรูปที่ 1 เขาได้ประยุกต์ทฤษฎีการยืดหยุ่นเข้ากับรูปแบบปัญหาส่วนนี้ เป็นพื้นฐานสำหรับการคำนวณหาค่าความเค้นสำหรับชิ้นส่วนของเครื่องจักรดังเช่น บอลและโรลลิงเบียร์, เกียร์และเพลาถูกเบียด Hertz ได้สมมุติฐานตามหัวข้อดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.2 การสัมผัสการกระจายความเค้น

1. วัสดุชนิดเดียวกันจะมีค่า yield stress ไม่มากเกินไป
2. ไม่มีแรงสัมผัสเกิดขึ้นระหว่างของแข็ง
3. พื้นผิวสัมผัสเล็ก ๆ จะถูกจำกัดในทิศทางบริเวณที่สัมผัสที่มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารัศมีของของแข็งที่มีผิวราบเรียบเป็นรูปร่างรี
4. เมื่อของแข็งอยู่หนึ่งจะเกิดความสมดุลย์

เกิดจากสมมุติฐาน Hertz (1881) ได้แสดงตามดังนี้ สำหรับความเค้นที่สัมผัสในอาณาบริเวณที่เป็นรูปร่างรีดังแสดงในรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = p_m \left[1 - \left(\frac{2x}{D_x} \right)^2 - \left(\frac{2y}{D_y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

เมื่อ D_x = เส้นผ่านศูนย์กลางของผิวสัมผัสวงรีในทิศทางแกน x

D_y = เส้นผ่านศูนย์กลางของผิวสัมผัสวงรีในทิศทางแกน y

ถ้าค่าความดันสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสตั้งจะเป็น

$$p_m = \frac{6w_z}{\pi D_x D_y} \quad (5.8)$$

เมื่อ w_z เป็นค่าของโหลดปกติที่มากระทำ สมการที่ 5.7 ต้องการหาค่าความดันที่เกิดขึ้นหรือความเค้นบนส่วนที่เกี่ยวข้อง จะทำให้แน่ใจในการหาค่าสูงสุดที่ศูนย์กลางของบริเวณที่สัมผัสและจะลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์

ค่าพารามิเตอร์ของรูปที่เป็นวงรีจะแสดงได้เป็น k จะถูกนิยามเช่นเดียวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณสัมผัสของรูปวงรีในแนวแกน y (ทิศทางขวาง) จะหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณผิวสัมผัสที่เป็นรูปวงรีในแนวแกน x

$$k = \frac{D_y}{D_x} \quad (5.9)$$

ถ้าสมการ (1) เป็นไปได้ $\alpha_r \geq 1$ สัมผัสวงรีมีทิศทางขวางสำหรับการเคลื่อนที่ และดังนั้น $k \geq 1$ มิฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวแกนหลักจะเป็นเส้นตามยาวตามแนวการเคลื่อนที่ทำให้ทั้งคู่จะแสดง $\alpha_r < 1$ และ $k < 1$ เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนจะต้องแก้ปัญหาสำหรับการเปลี่ยนรูปร่างของผิวสัมผัสและความเค้นจะถูกแสดงให้เป็น $\alpha_r > 1$ เป็นการแก้ปัญหาที่ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับในกรณี $\alpha_r < 1$ Harris (1966) ได้แสดงค่าพารามิเตอร์ของรูปวงรีสามารถเขียนเป็นสมการที่สัมพันธ์กับการลบของผิวส่วนโค้งดังสมการ (5.3) และค่า τ จะแสดงความสัมพันธ์ของรูปวงรีตัวแรก และ ξ จะแสดงตัวที่สองดังสมการ

$$k = \left[\frac{2\tau - \xi(1 + R_d)}{\xi(1 - R_d)} \right]^{1/2} \quad (5.10)$$

$$\tau = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \phi \right]^{-1/2} \quad (5.11)$$

$$\xi = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \phi \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

วิธีการกำหนดจุดหนึ่งที่น่ามาใช้โดย Hamrock และ Anderson (1973) สามารถค่าพารามิเตอร์ สำหรับวงรี เมื่อทำตามขั้นตอนจนถึง k_{n+1} จะมีค่าแตกต่างจาก k_n

$$k_{n+1} \cong k_n \quad (5.13)$$

เมื่อทำตามขั้นตอนจนถึง k_{n+1} จะมีค่าแตกต่างจาก k_n น้อยกว่า 10×10^{-7} จะแสดงถึง ค่าพารามิเตอร์ของรูปวงรีเป็นฟังก์ชันของรัศมีของผิวความโค้งของแข็ง

$$k = f(r_{ax}, r_{bx}, r_{ay}, r_{by}) \quad (5.14)$$

ในขณะที่โหลดเพิ่มขึ้นค่าของแกน x และแกน y ของผิวสัมผัสวงรีจะเพิ่มขึ้นที่คงที่จากจุดหนึ่ง ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของรูปวงรีก็จะมีค่าคงที่ รูปที่ 4 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ของรูปวงรีและความสัมพันธ์ ของรูปวงรี ชนิดแรกและสอง สำหรับอัตราส่วนของรัศมี ($\alpha_r = R_y / R_x$) จะแสดงได้จากรูปที่ 5.4 $\xi = \tau$ เมื่อ $\alpha_r = 1$ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าทั้ง ξ และ τ ไม่ขึ้นอยู่กับ $\alpha_r = 1$ เมื่อค่าพารามิเตอร์วงรี k โหลด มากกระทำตามปกติ w_z อัตราส่วนปัวซอง ν ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น E ของของแข็งสัมผัสสามารถเขียน ได้จากการวิเคราะห์ของ Hertz (1881) ในขณะที่

$$D_y = 2 \left(\frac{6k^2 \xi w_z R}{\pi E'} \right) \quad (5.15)$$

$$D_x = 2 \left(\frac{6k^2 \xi w_z R}{\pi k E'} \right) \quad (5.16)$$

$$\delta_m = \tau \left[\frac{9}{2\xi R} \left(\frac{w_z}{\pi k E'} \right) \right]^{1/3} \quad (5.17)$$

เมื่อ
$$E' = \frac{2}{(1-\nu_a^2)/E_a + (1-\nu_b^2)/E_b} \quad (5.18)$$

ในสมการนี้ D_x และ D_y จะมีค่าสัดส่วนโดยตรงกับ $w_z^{1/3}$ และ δ_m เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $w_z^{2/3}$

5.3 ความเค้นของพื้นผิวย่อย

ความกล้าโดยปกติอยู่ที่ผิวที่มีความลึกแน่นอนในระนาบที่ขนานกับทิศทางการหมุน เพราะที่เป็น เช่นนี้เป็นกรณีเพิ่มเติมโดยให้ช่วงของค่าความเค้นเดือนอยู่ในแนวระนาบ ยิ่งไปกว่านี้ค่าความเค้นเดือน สูงสุดอยู่ที่ค่าความลึก ที่อยู่ภายใต้ผิวสัมผัสจากการวิเคราะห์ โดย Lundberg และ Palmgren (1947) จะใช้ เพื่อให้นิยามความเค้นนี้

ความเค้นจะถูกอ้างอิงถึงพิกัดมุมฉากกับจุดกึ่งนิกที่ศูนย์กลางของการสัมผัส แกน z โดยปกติจะ เกี่ยวข้องกับรูปร่าง โดยต้องพิจารณาแกน x ในทิศทางของการหมุนและแกน y จะมีทิศทางตั้งฉากกับแกน หมุน ในการวิเคราะห์สมมติให้ $y=0$ จาก Lundberg และ Palmgren (1947) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tau_{zx} = \frac{6w_z \cos^2 \phi_a \sin \phi_a \sin \gamma_a}{\pi (D_y^2 \tan^2 \gamma_a + D_x^2 \cos^2 \phi_a)} \quad (5.19)$$

$$x = \frac{1}{2} (D_x^2 + D_y^2 \tan^2 \gamma_a)^{1/2} \sin \phi_a \quad (5.20)$$

$$z = \frac{D_y}{2} \tan \gamma_a \cos \phi_a \quad (5.21)$$

เมื่อ ϕ_a และ r_a เป็นมุมที่ใช้ในจุดที่มีโคออร์ดิเนต (x, z) นิยามไว้ว่าจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของผิวสัมผัสและความดันที่กระทำกับรูปวงรี (สำหรับ Hertz, 1881 และ Lundberg และ Palmgren, 1947)

ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะถูกนิยาม

$$\tau_0 = (\tau_{zx})_{\max}$$

ค่าแอมพลิจูดของ τ_0 จะหาได้จาก

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial \phi_a} = 0 \quad \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial \gamma_a} = 0$$

สำหรับจุดที่มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tan^2 \phi_a = t^* \quad (5.22)$$

$$\tan^2 \gamma_a = t^* - 1 \quad (5.23)$$

$$\frac{D_x}{D_y} = \left[\left[(t^*)^2 - 1 \right] (2t^* - 1) \right]^{1/2} \quad (5.24)$$

เมื่อ t^* เป็นค่าพารามิเตอร์รวม ค่าแห่งสูงสุดหาได้จาก

$$z_0 = \zeta^* \frac{D_x}{2} \quad (5.25)$$

$$x_0 = \pm \zeta^* \frac{D_x}{2} \quad (5.26)$$

$$\zeta^* = \frac{1}{(t^* + 1)(2t^* - 1)^{1/2}} \quad (5.27)$$

$$\zeta^* = \frac{t^*}{t^* + 1} \left(\frac{2t^* - 1}{2t^* + 1} \right)^{1/2} \quad (5.28)$$

มากไปกว่านี้ ขนาดของความเค้นเฉือนสูงสุดจะแสดงในเทอมของ t^* ให้โดย

$$\tau_0 = P_m \frac{(2t^* - 1)^{1/2}}{2t^* (t^* + 1)} \quad (5.29)$$

มันควรจะชี้ว่า τ_0 แสดงถึงค่าระยะตรงกลางที่จุดสูงสุดของผิวข้อยที่มีความเค้นเฉือนและจะไม่คำนึงถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของผิวข้อยที่เกิดขึ้นได้จุดศูนย์กลางบริเวณสัมผัสสบนระนาบทำมุม 45° กับพื้นผิว Lundberg และ Palmgren ได้ทำนายถึงค่าความกล้า เป็นพื้นฐานถึงการคำนวณของ τ_0 และถูกจำกัดโดยเส้นตัดตามขวางในระนาบของบริเวณการหมุน ($y=0$)

5.4 การแก้ปัญหาที่ง่าย

การแก้ปัญหาของ Hertzian จะแสดงให้เห็นในเนื้อเรื่องก่อนหน้านี้เพื่อต้องการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของผิวสัมผัสสองรี k และค่าความสัมพัทธ์ของวงรีที่สมบูรณ์ของชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 τ และ ξ วิธีการแก้ปัญหาดำเนินการตามสมการที่สัมพันธ์กับค่า k , τ และ ξ บริเวณสัมผัสที่เป็นรูปเรขาคณิตของของแข็งจะแสดงในสมการที่ (4.9) โดยปกติจะประสบผลสำเร็จต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขที่บรรยายโดย Hamrock และ Anderson(1973) หรือใช้วิธีการหาจากแผนภาพที่แสดงโดย Jones (1946)

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าอัตราส่วนรัศมีต่างๆ α_r จะมีค่าแปรผันกับค่า k , τ และ ξ ได้จากกระบวนการทางตัวเลขที่แสดงโดย Hamrock และ Anderson(1973) Hamrock และ Brew (1983) ใช้วิธีการ Liner Regression โดยวิธีการที่เรียกว่า Least Squares เพื่อจะหาข้อมูลที่เป็นชุดได้อย่างเหมาะสม $[(k_r, \alpha_{r,i}), i = 1, 2, \dots, 26]$ แสดงในตารางที่ 1 ค่าที่จะแสดงในสมการ

(5.30)

ค่าแอสซิมโทตของ τ และ ξ ($\alpha_r \rightarrow 1$ อ้างอิง $\xi \rightarrow \tau \rightarrow \pi/2$ และ $\alpha_r \rightarrow \infty$) จะแนะนำเป็นค่าชนิดของฟังก์ชันที่ขึ้นตรงกับ ξ และ τ ต้องทำตามผลที่ได้จะอินเวอร์สและมีเส้นโค้งเป็นแบบลอการิทึมสำหรับ ξ และ τ ตามลำดับ Hamrock และ Brew (1983) ได้สร้างสมการดังนี้

$$\bar{k} = \alpha_r^{2/\pi} \quad (5.31)$$

$$\text{เมื่อ } \bar{\xi} = 1 + q_0 \alpha_r \text{ สำหรับ } \alpha_r \geq 1 \quad (5.32)$$

$$\text{และ } q_0 = \frac{\pi}{2} - 1 \quad (5.33)$$

ค่าของ \bar{k} , $\bar{\xi}$ และ $\bar{\tau}$ จะแสดงในตารางที่ 1 และเปรียบเทียบกับวิธีการทางตัวเลข หาค่าของ k , τ และ ξ ตามตารางที่ 5.1 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของการผิดพลาดเท่า

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบทางตัวเลขกับค่าตัวแปรของความโค้งที่เป็นรูปเรขาคณิต
(Form Hamrock and Brewster(1983); $R_x = 1.0$ cm)

Radius ratio α_r	Ellipticity			Complete elliptic integral of first kind			Complete elliptic integral of second kind		
	k	\bar{k}	Error, $e_r, \%$	τ	$\bar{\tau}$	Error, $e_r, \%$	ε	$\bar{\varepsilon}$	Error, $e_r, \%$
1.00	1.00	1.00	0	1.57	1.57	0	1.57	1.57	0
1.25	1.16	1.15	0.66	1.68	1.69	-0.50	1.46	1.45	0.52
1.50	1.31	1.29	1.19	1.78	1.80	-0.70	1.39	1.38	0.76
1.75	1.45	1.42	1.61	1.87	1.89	-0.75	1.33	1.32	0.87
2.00	1.58	1.55	1.96	1.95	1.96	-0.73	1.29	1.28	0.91
3.00	2.07	2.01	2.87	2.18	2.19	-0.44	1.20	1.19	0.83
4.00	2.50	2.41	3.35	2.35	2.36	-0.11	1.15	1.14	0.69
5.00	2.89	2.78	3.61	2.49	2.48	0.17	1.12	1.11	0.57
6.00	3.25	3.12	3.74	2.60	2.59	0.40	1.10	1.09	0.48
7.00	3.58	3.45	3.80	2.69	2.68	0.59	1.08	1.08	0.40
8.00	3.90	3.75	3.81	2.77	2.75	0.75	1.07	1.07	0.35
9.00	4.20	4.05	3.78	2.85	2.82	0.88	1.06	1.06	0.30
10.00	4.49	4.33	3.74	2.91	2.88	1.00	1.05	1.05	0.26
15.00	5.79	5.60	3.32	3.16	3.11	1.38	1.03	1.03	0.15
20.00	6.92	6.73	2.81	3.33	3.28	1.60	1.02	1.02	0.10
25.00	7.94	7.76	2.29	3.46	3.40	1.74	1.02	1.02	0.07
30.00	8.87	8.71	1.79	3.57	3.51	1.84	1.01	1.01	0.05
35.00	9.74	9.61	1.32	3.67	3.60	1.90	1.01	1.01	0.04
40.00	10.56	10.46	0.87	3.74	3.67	1.95	1.01	1.01	0.03
45.00	11.33	11.28	0.44	3.81	3.74	1.99	1.01	1.01	0.02
50.00	12.07	12.06	0.03	3.88	3.80	2.02	1.01	1.01	0.02
60.00	13.45	13.52	-0.72	3.98	3.90	2.06	1.00	1.00	0.01
70.00	14.47	14.94	-1.40	4.08	3.99	2.08	1.00	1.00	0.01
80.00	15.95	16.27	-2.03	4.15	4.07	2.09	1.00	1.00	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ปรากฏการณ์ของอัตราส่วนรัศมีบนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณความเค้นของผิว
(Form Hamrock and Brewe 1983)

Radius ratio α_r	Auxiliary parameter			Radius ratio α_r	Auxiliary parameter		
	t^*	\bar{t}^*	Error, e_r , %		t^*	\bar{t}^*	Error, e_r , %
0.01	5.71	7.00	-22.47	2.00	1.14	1.18	-3.71
0.02	4.42	4.86	-9.87	3.00	1.09	1.13	-3.78
0.03	3.81	3.98	-4.49	4.00	1.06	1.10	-3.45
0.04	3.43	3.48	-1.15	5.00	1.05	1.08	-3.03
0.05	3.16	3.15	0.35	6.00	1.04	1.07	-2.62
0.06	2.96	2.91	1.58	7.00	1.03	1.05	-2.24
0.07	2.80	2.73	2.42	8.00	1.02	1.05	-1.91
0.08	2.67	2.59	3.01	9.00	1.02	1.04	-1.61
0.09	2.56	2.47	3.43	10.00	1.01	1.03	-1.35
0.10	2.47	2.38	3.72	15.00	1.00	1.01	-0.50
0.20	1.96	1.88	3.90	20.00		1.00	-0.09
0.30	1.73	1.68	2.86	25.00			0.12
0.40	1.59	1.56	1.79	30.00			0.21
0.50	1.50	1.48	0.85	35.00			0.26
0.60	1.43	1.43	0.05	40.00			0.27
0.70	1.38	1.39	-0.62	45.00			0.27
0.80	1.34	1.35	-1.19	50.00			0.26
0.90	1.30	1.33	-1.66	60.00			0.24
1.00	1.28	1.30	-2.05	70.00			0.21
1.25	1.22	1.26	-2.78	80.00			0.19
1.50	1.19	1.23	-3.25	90.00			0.17
1.75	1.16	1.20	-3.54	100.00			0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_r = \frac{(\bar{i} - i)100}{i} \quad (5.34)$$

$$\text{เมื่อ } i = (k, \xi, \tau) \quad (5.35)$$

$$\bar{i} = (\bar{k}, \bar{\xi}, \bar{\tau}) \quad (5.36)$$

ค่าที่ยอมรับระหว่างการแก้ปัญหาที่ถูกต้องและประมาณได้จากสูตร ค่าที่ยอมรับเช่น ξ จะอยู่ระหว่าง 0 และ 1 เปอร์เซนต์ ค่าที่ไม่น่าพอใจสำหรับ k จะเป็น ± 4 เปอร์เซนต์

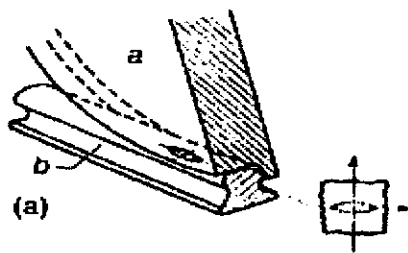
ตารางที่ 5.2 จะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของค่ารัศมีต่างๆ α_r และค่าที่ได้จะแปรผันกับค่าพารามิเตอร์รอง r^* ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและค่าของผิวย่อยที่มีความเค้นเฉือนสูงสุด การแก้ปัญหาที่แน่นอนสำหรับ r^* ได้จากวิธีทางตัวเลขที่แสดงโดย Hamrock และ Anderson(1973) สำหรับชุดข้อมูล $[(r_i^*, \alpha_{r,i}), i=1,2,\dots,44]$ จะแสดงในตารางที่ 2 สูตรอย่างง่ายจะได้จาก Hamrock และ Brew (1983)

$$\bar{r}^* = 1 + 0.16 \csc h \frac{\bar{k}}{2} \quad (5.37)$$

เปอร์เซนต์สำหรับค่าผิดพลาด e_r ใช้สำหรับค่าพารามิเตอร์ตัวรองในตารางที่ 2 ค่าที่ยอมรับอยู่ระหว่างค่าที่แน่นอนและค่าที่ได้จากการประมาณของ r^* เป็นค่าที่ยอมรับได้ดีที่อัตราส่วนรัศมีน้อยเกินไป ($\alpha_r \leq 3$) สำหรับค่าของ r^* จะเป็นการหาตำแหน่งและค่าผิวย่อยสูงสุด ค่าความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการ (5.24) ถึง (5.27)

ตารางที่ 5.3 จาก Hamrock และ Brew (1983) ให้รูปแบบสมการที่ง่ายสำหรับ $0.01 \leq 100$ เมื่อการจัดค่าสมบูรณูปกติ ในแบบฝึกหัด มันเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ค่าที่เหมาะสมของ α_r เมื่อค่าของขนาดจะมีผลให้สมการอย่างง่าย ตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึง \bar{k} และ \bar{r}^* จะมีผลกระทบต่อมุมของวงรีและความสัมพันธ์ของวงรีชนิดแรกและที่สอง (τ และ ξ) มีนเป็นสิ่งสำคัญถึงการตระหนักถึงค่า α_r แสดงวิธีการที่เหมือนค่าของ τ และ ξ เป็นรูปแบบโดยการเปลี่ยนแปลงมุมของผิวสัมผัสวงรี

รูปภาพที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงสถานการณ์ถึงรูปแบบที่ง่ายที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ ล้อรถจักรบนราง(รูปภาพ 5a) จะแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างในกรณีของค่าพารามิเตอร์ของผิวสัมผัสวงรี k และอัตราส่วนรัศมีน้อยกว่า 1 บอลโรลลิ่งจะแสดงในระนาบ 5b จะแสดงให้เห็นผิวสัมผัส (*i.e.*, $\alpha_r = k = 100$) ในรูปภาพ (5c) แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างไปถึงผิวสัมผัสวงรีที่มีรูปแบบใน ball-on-race สัมผัสของบอลเบร็ญนี้จะแสดงให้เห็นถึงแกนหลักจะมีทิศทางในการหมุนที่ปกติ ดังนั้น α_r และ k มีค่ามากกว่า 2 รายละเอียดของค่าเรขาคณิตที่สามารถนำมาคำนวณได้จากสูตรอย่างง่ายที่ให้จากตารางที่ (5.4) สำหรับผิวสัมผัสที่มี 3 รูปแบบ ใช้สูตรที่สำคัญเพื่อจะหาเครื่องหมายของผิวโค้ง จะแสดงให้เห็น



รูปที่ 5.3 ก๊อบนราง

ในรูปภาพ(5.3) ของผิวว่า ดังนั้นต้องการให้เครื่องหมายติดลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ทฤษฎีของการหมุนบนผิวสัมผัสของ Kalker

สมการของค่าการลื่นไถลที่อยู่บนผิวสัมผัสที่เป็นอนุภาคของวัตถุที่ยึดหยุ่นได้ในผิวสัมผัสของการหมุน

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

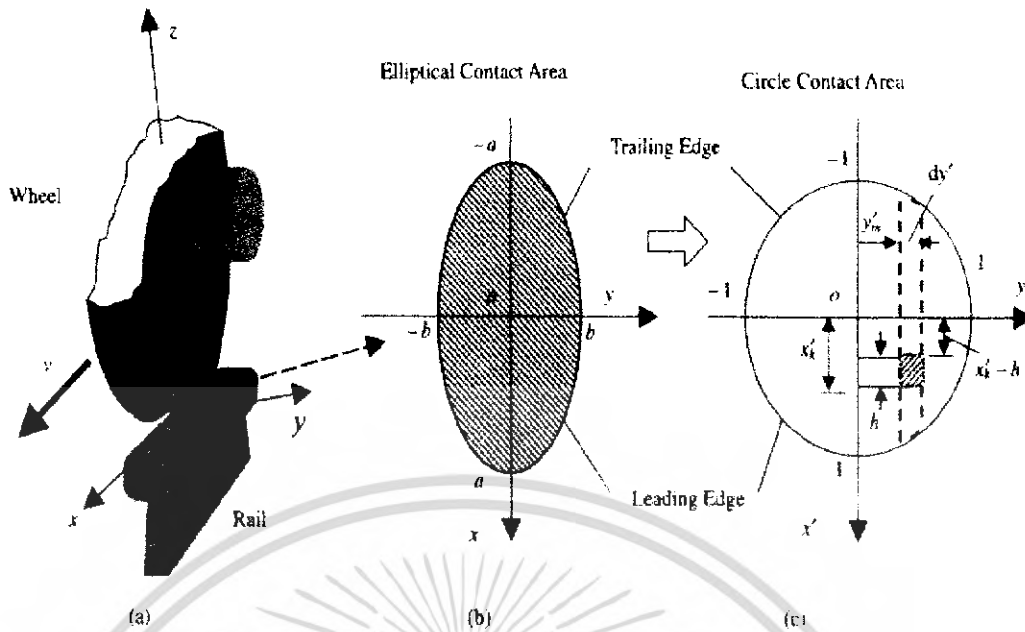
ในการหาวิธีการแก้ปัญหาของสมการที่ 10 จะทำได้ง่ายจะต้องทำเป็นสมการไร้มิติ

$$\begin{aligned} n_{x'} &= C_0 C_{11} \xi_{x'}, n_{y'} = C_0 C_{22} \xi_{y'} \\ w_{x'} &= C_0 C_{11} w_x, w_{y'} = C_0 C_{22} w_y \\ f_{x'} &= \frac{E}{1+\mu} \frac{a^{1/2} b^{5/2} c_{23}}{F_n} \Phi, f_{y'} = \frac{E}{1+\mu} \frac{a^{3/2} b^{3/2} c_{23}}{F_n} \Phi \\ p_{x'} &= \frac{2\pi ab}{3F_n} p_x, p_{y'} = \frac{2\pi ab}{3F_n} p_y, x' = \frac{x}{a}, y' = \frac{y}{b} \\ C_0 &= \frac{3}{32} \frac{E}{1+\mu} \frac{\pi ab}{F_n} \end{aligned} \quad (6.2)$$

ดังนั้นรูปแบบของสมการ ไร้มิติจะเป็น

$$w_{x'} = n_{x'} - f_{x'} y' - \frac{\partial p_{x'}}{\partial x'}, w_{y'} = n_{y'} - f_{y'} x' - \frac{\partial p_{y'}}{\partial x'} \quad (6.3)$$

ในสมการที่(11) ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเคลื่อนที่ของ Kalker จะแสดงเป็น C_{11} , C_{22} และ C_{23} ในความเป็นจริง สมการ ไร้มิติกับสมการ(11)เป็นสมการที่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f เป็นค่าคงที่ และ $3fF_n / (2\pi ab)$ ที่ใช้จะเป็นไร้มิติ(ไม่มีหน่วย)การใช้วิธีกำจัดของสมการที่ (6.11) ของผิวสัมผัสที่เป็นรูปวงรีของคือ p_x และ p_y ในรายงานนี้ f เป็นค่าของฟังก์ชันความเร็วของการหมุนกับค่าความเร็วของการลื่นไถลบนระหว่างผิวสัมผัส ในหัวข้อที่บรรยายของรายงานนี้ ดังนั้น f ไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปไร้มิติได้ต้องกำจัดค่า p_x และ p_y วิธีการเชิงตัวเลขที่แสดงให้เห็นความแตกต่างกับวิธีที่เรียกว่า FASTSIM เมื่อ p_x และ p_y เป็นค่าคงที่จะใช้มันอยู่ในรูปไร้มิติแต่ไม่สามารถหาผลแตกต่างทางตัวเลขได้ จะใช้รูปแบบการจำกัดสมการที่ 6.1 เป็นกรณีผิวสัมผัสของล้อและรางมีลักษณะเป็นรูปวงรีสามารถมองให้เป็นสามารถทำเป็นวงกลม 1 หน่วย



รูปที่ 6.1 รูปแสดงวิธีการถ่ายทอระหว่างพื้นผิวสัมผัสที่เป็นรูปร่างรีมองให้เป็นรูปร่างกลมมีรัศมี 1 หน่วย

การแก้ปัญหาคิวเลขของสมการ(6.12) เมื่อสมมุติว่าวงกลมถูกหารแบ่งเป็น 20 ช่วงและมีค่าความกว้าง $\Delta y' = 0.1$ ในทิศทางของแกน y' รูปภาพที่ 9c รูปแบบหลักจะเป็นเส้นประขนานกันและบริเวณของทรงกลมแบ่งเป็น 20 ช่องเท่าๆกันในทิศทางของ x' ความยาวแต่ละช่วงจะมีขนาดคล้ายพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าในทิศ x' กำหนดให้ดังสมการ

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

บริเวณที่เป็นวงกลมจะแบ่งช่วงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด 20x20ในในแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์เกี่ยวข้องอยู่ด้วย เช่น ความดัน ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานของราง จะต้องหาค่าที่เป็นจุดศูนย์กลางของ พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าในแต่ละช่วงโดยจะใช้ในการหาค่ากลาง สมการที่ (6.2)

$$\begin{aligned} hw^*_{x'} \Big|_{(x'-h/2, y'_k + dy'/2)} &= h(n_{x'} - f_x y') \Big|_{x'_k - h/2} + p_x (x'_k - h) - p_x (x'_k) \\ hw^*_{y'} \Big|_{(x'-h/2, y'_k + dy'/2)} &= h(n_{y'} - f_y x') \Big|_{x'_k - h/2} + p_y (x'_k - h) - p_y (x'_k) \end{aligned} \tag{6.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$p_{x'} \Big|_{x'_k = \sqrt{1 - y'^2}} = p_{y'} \Big|_{x'_k = \sqrt{1 - y'^2}} = 0 \quad (6.6)$$

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

$$\begin{aligned} p_{x'a} &= p_{x'}(x'_k) - h(n_{x'} - f_{x'} y') \Big|_{x'_k - h/2} \\ p_{y'a} &= p_{y'}(x'_k) - h(n_{y'} - f_{y'} x') \Big|_{x'_k - h/2} \end{aligned} \quad (6.7)$$

และ $p_a = (p_{x'a}^2 + p_{y'a}^2)$ เราจะเริ่มคำนวณ $p_{x'a}$ และ $p_{y'a}$ จาก $K=1$ (พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปแรกใกล้ขอบริมสุด) จนถึง $K=20$ (บริเวณ พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อยู่ตอนท้ายของริมขอบ) 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 $(x'_k - h/2, y'_m + dy'/2)$, ไม่Slip เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคที่จุดเดียวกัน $p_{x'a}$ และ $p_{y'a}$ จะเป็นส่วนประกอบของรางผิวสัมผัสที่จุดที่ต้องการ

2) ถ้า $p_a > f_s p_z$ แล้วกฎการเสียดทานของลูกอมบี้ ดังนั้นการแก้ปัญหาจะต้องทำดังนี้

$$p'_{x'a} = \frac{p_{x'a}}{p_a} f_s p_z, \quad p'_{y'a} = \frac{p_{y'a}}{p_a} f_s p_z \quad (6.8)$$

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

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

การกระจายในบริเวณ stick-slip จะอยู่ในบริเวณที่สัมผัสกับผิวสัมผัสโดยตรงภายใต้การควบคุมเงื่อนไขค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตในบริเวณที่มีพื้นที่เกิดการลื่น ไถลจะเกิดความเร็วสัมพัทธ์ v_r ระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคที่ไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แท้จริง f น้อยกว่า f_s ที่ผิวสัมผัสของรางจะน้อย ภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมของ f_s ในตอนแรกรางที่ผิวสัมผัสจะใช้วิธีการ

ก่อนหน้านี้คล้ายกัน สำหรับกรณีนี้สิ่งแรกคือหา w_x และ w_y จะสามารถคำนวณได้จากสมการ(10) สามารถหาได้จากก่อนหน้าแล้ว w'_x และ w'_y ดังนั้นเราจะรู้ค่า v_r ได้จาก

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

ทำตามขั้นตอนในการแก้ไขผิวสัมผัสของรางได้ดังนี้

1. ในพื้นที่ Slip ผิวสัมผัสของรางจะได้จาก

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

ใช้สมการ(5.2),(5.5)และ(5.10), $w_x^{(1)}$, $w_y^{(2)}$ และ $v_r^{(1)}$ ใช้ในการคำนวณ

2. ใช้สมการที่ 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. ทำซ้ำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้จนกระทั่งถึงขั้นตอน j , หรือไม่ $p_x^{(j+1)}$ และ p_y^{j+1}

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

เป็นสิ่งทดสอบ ถ้าทำได้การคำนวณจะหยุดการสมมุติฐาน p_x^{km} และ p_y^{km} จะเป็นการแก้ปัญหาขั้นสุดท้ายของผิวสัมผัสของราง,เมื่อ k และ m ที่แสดงให้เห็นพื้นที่ที่สัมผัสกันที่แสดงเป็นตัวเลขจะให้ เป็น k และ m อยู่ในพื้นที่จากขวามาซ้ายและล่างในพื้นที่วงกลมตามลำดับ สมการที่6.2 และ6.3 จะแสดงถึงพื้นผิวสัมผัสทั้งหมดและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยึดเกาะหาได้จาก

$$\begin{aligned} F &= \frac{3F_n}{200\pi} \sum_{k,m=1}^{20} \left[1 - \left(\frac{y_m + b/10}{b} \right)^2 \right]^{1/2} p_x^{km} \\ \mu &= \frac{F}{F_n} \end{aligned} \quad (6.14)$$

เมื่อ $F_n = W \cos \delta$ และ W = แรงที่กระทำตรงกึ่งกลางของแนวแกน สูตรการหาระยะเคลื่อนที่ของ ล้อและลูกกลิ้งนิยามได้

$$\begin{aligned} \xi_{xi} &= \frac{v_{rncxi} - v_{ncxi}}{v}, \quad \xi_{yi} = \frac{v_{rncyi} - v_{ncyi}}{v} \\ \Phi_i &= \frac{\omega_{rni} - \omega_{wni}}{v} \end{aligned} \quad (6.15)$$

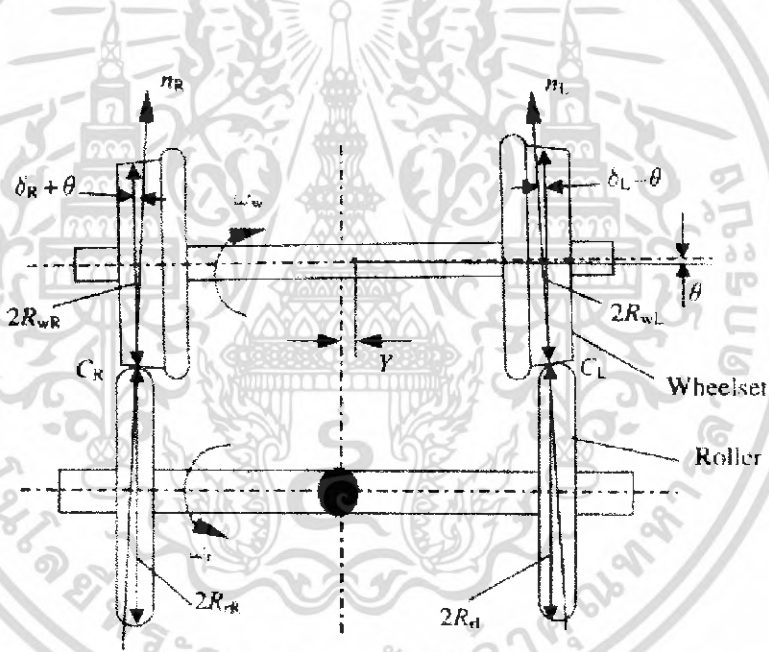
ในสมการส่วนที่ห้อย $i=L,R$ จะแทนบริเวณที่สัมผัสทางซ้ายและขวาของล้อและลูกกลิ้งตามลำดับ ดังแสดงตามรูปภาพ 10. ξ_{xi} , ξ_{yi} และ Φ_i เป็นค่าตามแนวความยาว ด้านข้างและเคลื่อนที่แบบหมุนควง ตามลำดับ ของผิวสัมผัสล้อและลูกกลิ้ง v_{rncxi} และ v_{ncxi} จะเป็นส่วนประกอบของความเร็วมุมสัมผัสของอนุภาคระหว่าง ล้อและลูกกลิ้งในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ v_{ncyi} จะเป็นส่วนประกอบในทิศทางด้านข้าง ω_{rni} และ ω_{wni} จะเป็นส่วนของเส้นตรงของ ω_r และ ω_w ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางปกติ $n_i (i = L, R)$ ตามลำดับ ในรูปภาพที่ 6.1, δ_L และ δ_R จะเป็นค่ามุมสัมผัสของมุมทางซ้าย และขวาตามลำดับ, R_w และ $R_r (i = L, R)$ ในทิศทางปกติ ตามลำดับ ในรูปภาพที่ 6.1, δ_L และ δ_R จะเป็นมุมสัมผัสทางซ้ายและขวาตามลำดับและ θ เป็นมุมของการหมุนของชุดล้อ เมื่อ $Y = \dot{Y} = 0$ และ $\psi = \dot{\psi} = 0$ ในการทดลอง

$\theta = 0, v_{rcyi} = 0, R_{wL} = R_{wR} = R_w, R_{rL} = R_{rR} = R_r, \delta_L = \delta_R = \delta, \xi_{xL} = \xi_{xR} = \xi_x, \xi_{yL} = \xi_{yR} = \xi_y$ จากสมการ(24)เขียนได้ดังนี้

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

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



รูปที่ 6.2 ระบบของล้อและราง

เมื่อ ω_w และ ω_r หาได้จากการวัด, δ สามารถหาได้จากการคำนวณบนพื้นผิวสัมผัสโดยใช้หลักเรขาคณิตคิดจากบริเวณสัมผัสผิวของลูกกิ้งและล้อ ในสมการ 25 ω_r / ω_w จะมีผลต่อค่าระยะในการหมุน โดยทั่วไปการผลิตรางที่มีผิวสัมผัสจะดูจากการที่มีผลต่อระยะการหมุนมากถ้า R_r เพิ่มขึ้น, ω_r ลดลงภายใต้เงื่อนไขที่เป็นตัวแปรของ ω_w และ ξ_x , จะมีผลทำให้การหมุนของลูกกิ้งลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

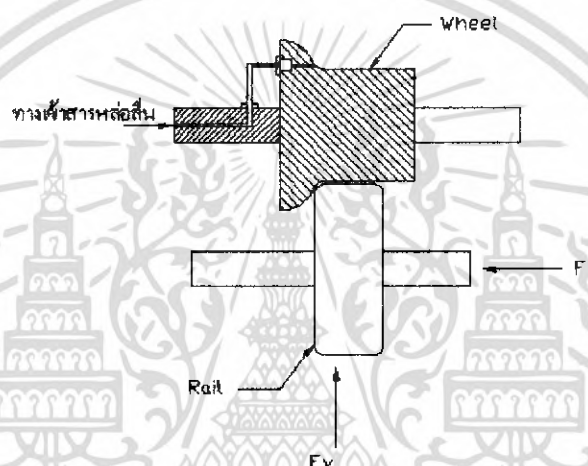
บทที่ 7

เครื่องทดสอบ

7.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอจะประกอบด้วยโหลด 2 โหลดดังนี้

1) ภาระโหลดที่กระทำตามแนวแกนเพลา (Vertical Load)ของระบบ จุดศูนย์กลางจะพบในส่วนหลังของรูปภาระโหลดที่กด โดยจะใช้ระบบไฮดรอลิกส์กดดังกล่าว

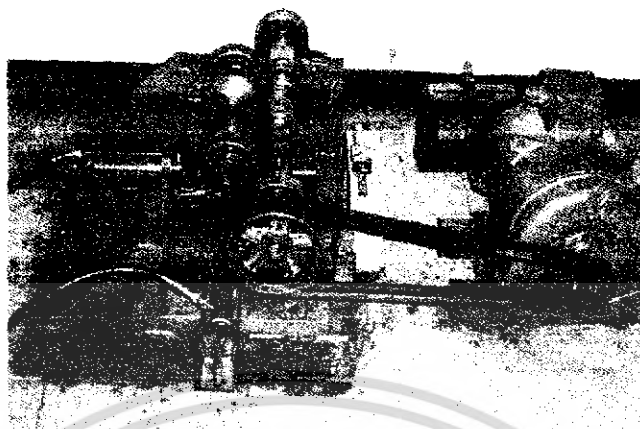
2) ภาระโหลดที่กระทำตามขอบล้อ(Lateral Load)โดยจำลองความโค้งที่จุดสัมผัสของขอบล้อ จะพบในรูปด้านหน้าขวาของภาพจะมีภาระโหลดที่ขอบ โดยจะใช้ระบบไฮดรอลิกส์กดดังกล่าว



รูปที่ 7.1 แสดงภาระโหลดที่กระทำและทิศทางเข้าของสารหล่อลื่น

ภาระโหลดได้อธิบายตามรูปดังกล่าว เป็นการจัดการที่เหมาะสมสำหรับการลอกแบบในช่วงสภาวะโหลดต่างๆ ที่เหมาะสม เพอร์เซ็นต์การลื่นไถลมีความสำคัญในการกำหนดโปรไฟล์ความเร็วที่ประสานกันกับหน้าสัมผัสของพื้นที่ดังกล่าว เพอร์เซ็นต์การลื่นไถลจากการทดลองมีค่าประมาณ 20 เพอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับล้อและรางของจริงประมาณ 5 เพอร์เซ็นต์ เพอร์เซ็นต์การลื่นไถลจะมีค่ามากเมื่อวัดความแตกต่างระหว่างระบบจริงกับระบบการจำลอง

โดยระบบการจำลองจะมีความยืดหยุ่น โดยอนุญาตให้ใช้กับการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของล้อและราง โปรไฟล์นี้สามารถออกแบบโดยการเขียนแบบหรือโปรไฟล์จากคลังสินค้าเก่า(ล้อและรางที่ใช้งานแล้ว) และเมื่อนำตัวอย่างมาดัดแปลง โดยการเพิ่มคุณสมบัติทางเรขาคณิตคือเรขาคณิตที่จุดสัมผัสระหว่างขอบล้อและราง



รูปที่ 7.2 แสดงเครื่องทดสอบ

7.2 ขั้นตอนการเตรียมการ

- 1) เลือกวัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาทำล้อและรางเพื่อให้ใกล้เคียงกับวัสดุจากล้อและรางรถไฟจริง
- 2) ออกแบบรูปทรงเรขาคณิตของล้อและรางจำลองให้เหมาะสม
- 3) นำวัสดุมาตกแต่งโดยใช้เครื่อง CNC
- 4) ออกแบบเพื่อทำการติดตั้งทางเดินน้ำมัน
- 5) ติดตั้งอุปกรณ์ของระบบล้อและรางจำลองเข้ากับเครื่องทดสอบ
- 6) ติดตั้งอุปกรณ์ทางเดินน้ำมัน
- 7) เตรียมชุดพูลเลย์และสายพานไว้ 2 ชุด คือที่ความเร็ว 635 rpm และที่ความเร็วรอบ 1080 rpm
- 8) เตรียมเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิหลังการทดลอง
- 9) เตรียมนาฬิกาเพื่อจับเวลาในการทดลอง
- 10) เตรียมสารหล่อลื่นเพื่อใช้ในการทดลอง
- 11) นำชุดกระบอกไฮดรอลิกไปปรับเทียบจากความดันเป็นแรงเพื่อความแม่นยำในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

วิธีการทดลอง

การทดลองจะมีการทดสอบที่หน้าสัมผัสเปียกและหน้าสัมผัสแห้งโดยมีภาระโหลดต่างๆ กับความเร็วรอบต่างๆ โดยก่อนการทดสอบจะต้องมีการดูแลความสะอาดระหว่างจุดสัมผัสของขอบและรางทำการปรับอัตราการใช้โหลให้มีการไหลออกมาน้อยที่สุดและให้มีการหล่อลื่นมากที่สุดบริเวณผิวสัมผัส (คือบริเวณที่ขอบล้อและรางสัมผัสกัน)

ในการทดลองจะทำการวัดอัตราการสึกหรอ โดยใช้ไดอัลเกจวัดการสูญเสียของเนื้อเหล็ก และการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ทางเรขาคณิตของขอบล้อ แต่การทดลองจะมีปรากฏการณ์ทางด้านความร้อน ดังนั้นเราจะมีการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิประกอบผลการทดลอง การทดลองในแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ โดยจะทำการบันทึกผลการทดลองไว้ในแต่ละครั้ง โดยจะมีวิธีการวัดค่าต่างๆ ดังนี้

1. ทดสอบความเร็วรอบที่ 635 rpm

1.1 แบบหน้าสัมผัสเปียก

1.1.1) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 500 kg_f

1.1.2) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 1000 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 1000 kg_f

1.2 แบบหน้าสัมผัสแห้ง

1.2.1) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 500 kg_f

1.2.2) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 1000 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 1000 kg_f

2. ทดสอบความเร็วรอบที่ 1080 rpm

2.1 แบบหน้าสัมผัสเปียก

2.1.1) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 500 kg_f

2.1.2) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 1000 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 1000 kg_f

2.2 แบบหน้าสัมผัสแห้ง

2.2.1) ใช้โหลกระทำตามแนวรัศมี 500 kg_f โหลกระทำตามแนวแกนเพลลา 500 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2) ใช้โหลดกระทำตามแนวรัศมี 1000 kg_r โหลดกระทำตามแนวแกนเพลลา 1000 kg_r

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

3.1) ก่อนการทดสอบใช้ไดอัลเกจวัดหาตำแหน่งอ้างอิง

3.2) ทดลองเปิดเครื่องและจับเวลาในการทดลองแต่ละครั้ง

3.3) หลังจาก 50,000 รอบให้หยุดความเร็วรอบแล้ววัดอุณหภูมิ วัดอัตราการสึกหรอโดยใช้ไดอัลเกจและถ่ายรูปประกอบการทดลอง

4. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องมีการปรับแต่งอุปกรณ์ เพราะเมื่อเดินเครื่องทดสอบจะมีการสั่นหรือ คังนั้นจะทำให้แรงกระทำตามแนวแกนลดลงจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงกระทำในแนวแกนให้คงที่

5. บันทึกผลการทดลองทุกครั้ง (ทีละ 50,000 รอบ) เพื่อจัดทำเป็นสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



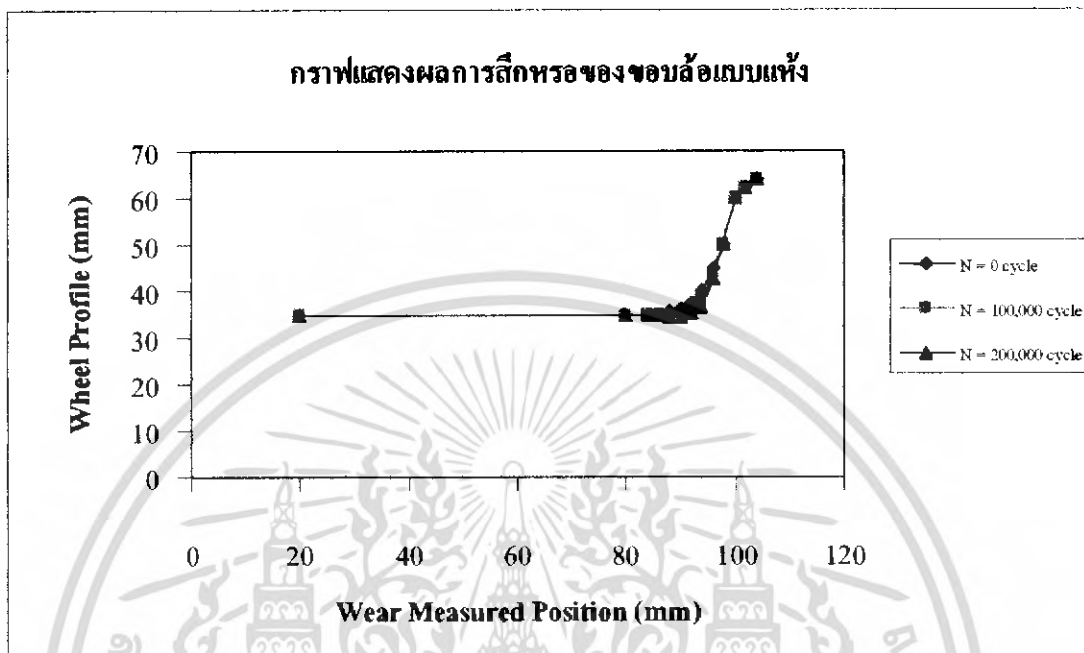
รูปที่ 8.1 แสดงการ วัดอัตราการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

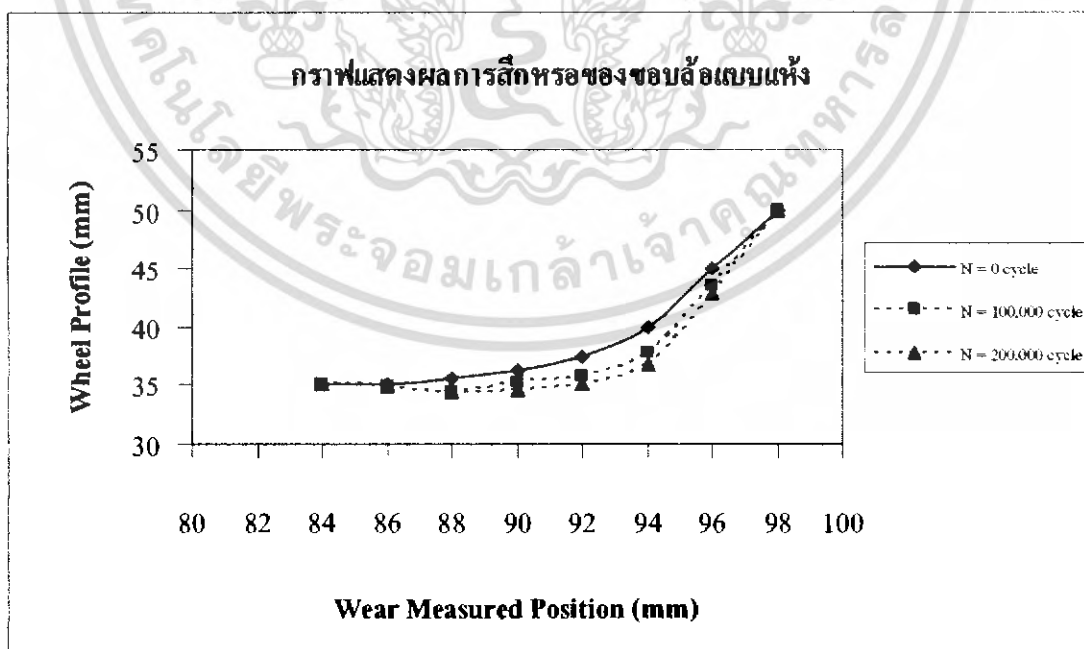
บทที่ 9

ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

9.1 ผลการทดลอง

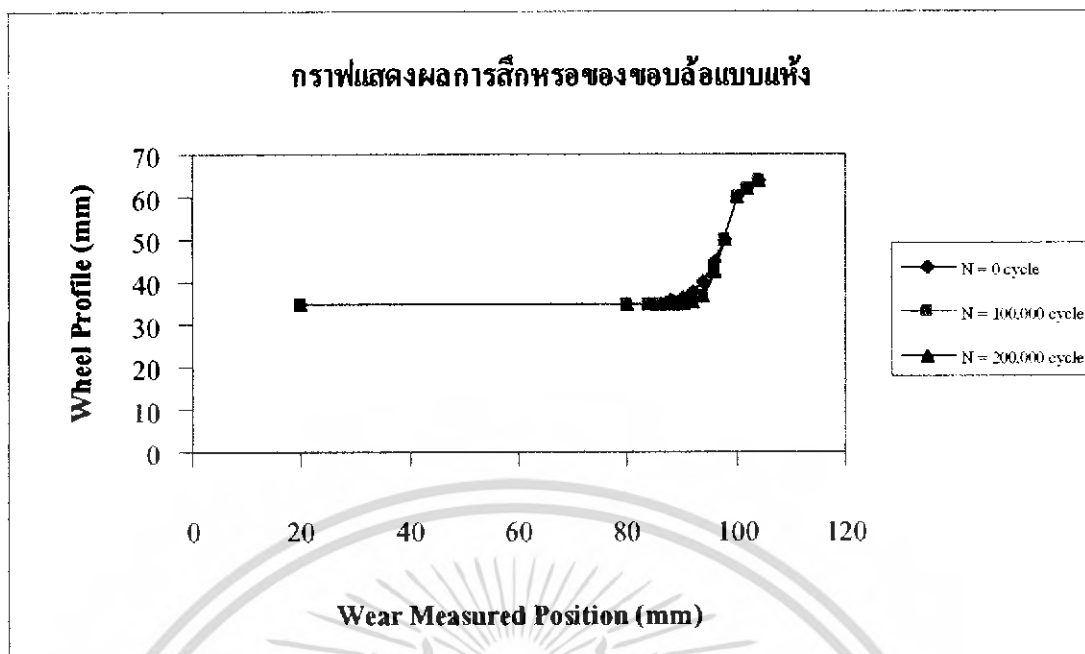


รูปที่ 9.1 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_r

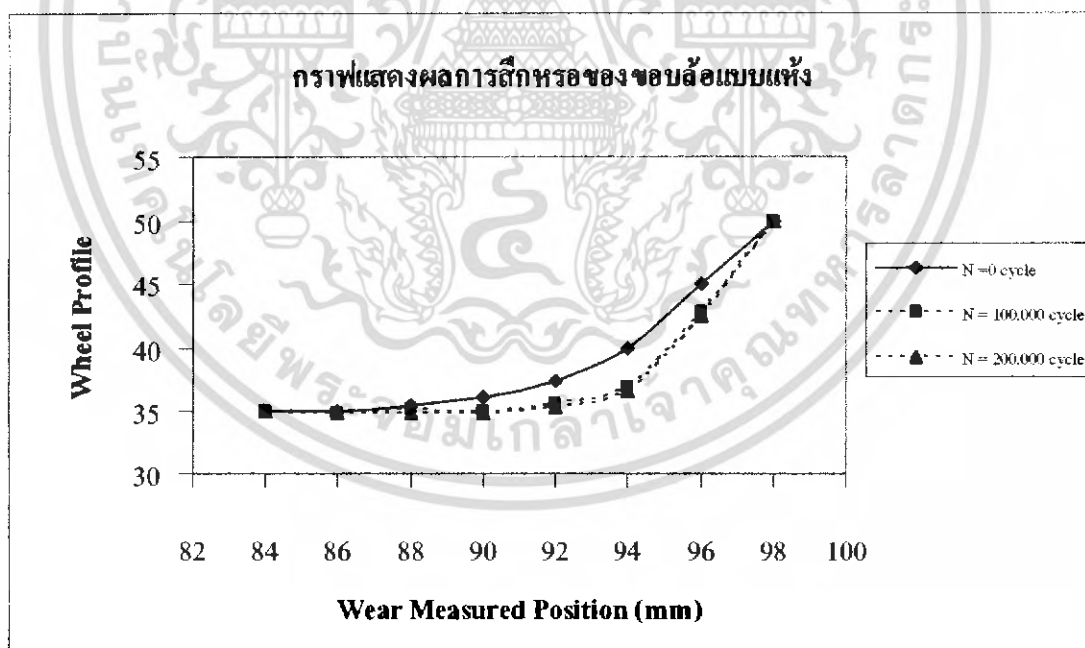


รูปที่ 9.2 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

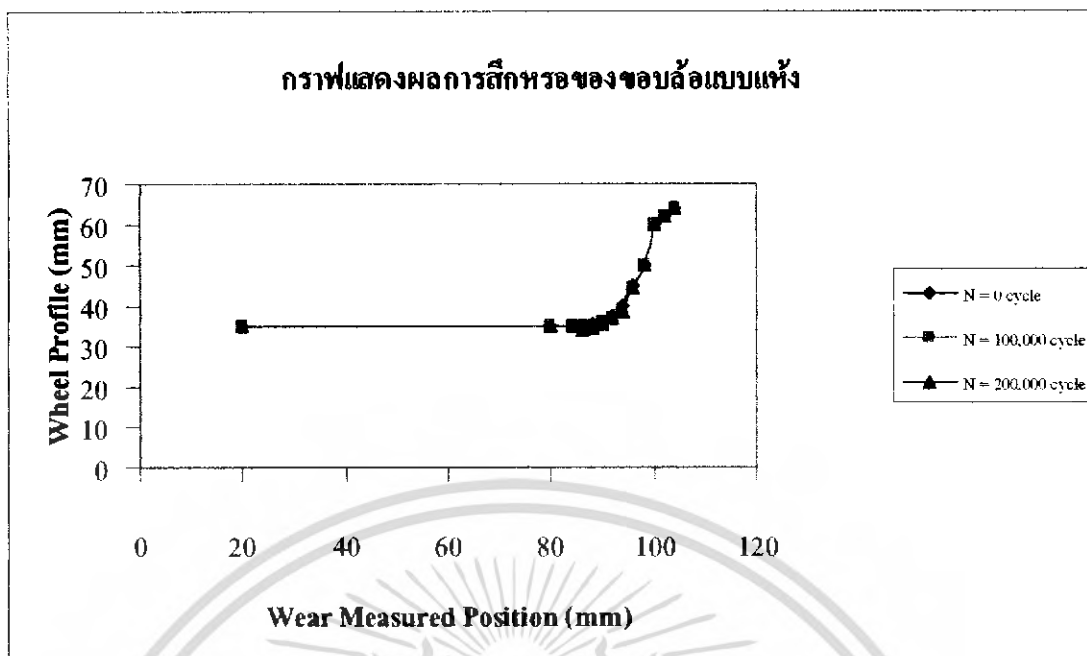


รูปที่ 9.3 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

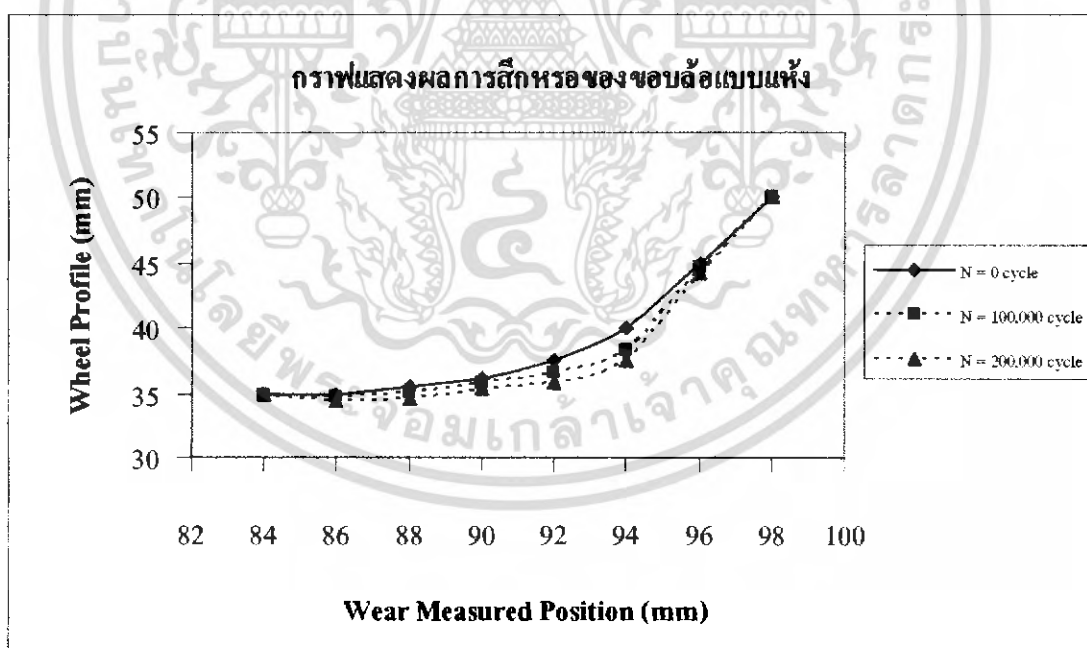


รูปที่ 9.4 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

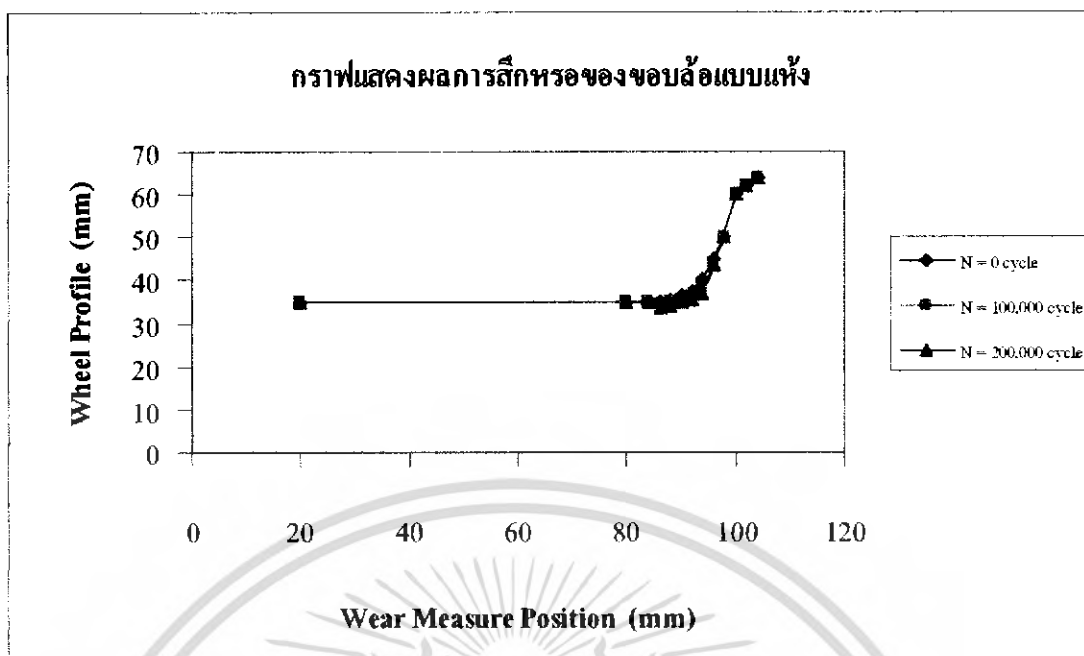


รูปที่ 9.5 กราฟแสดงลักษณะการสึกของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

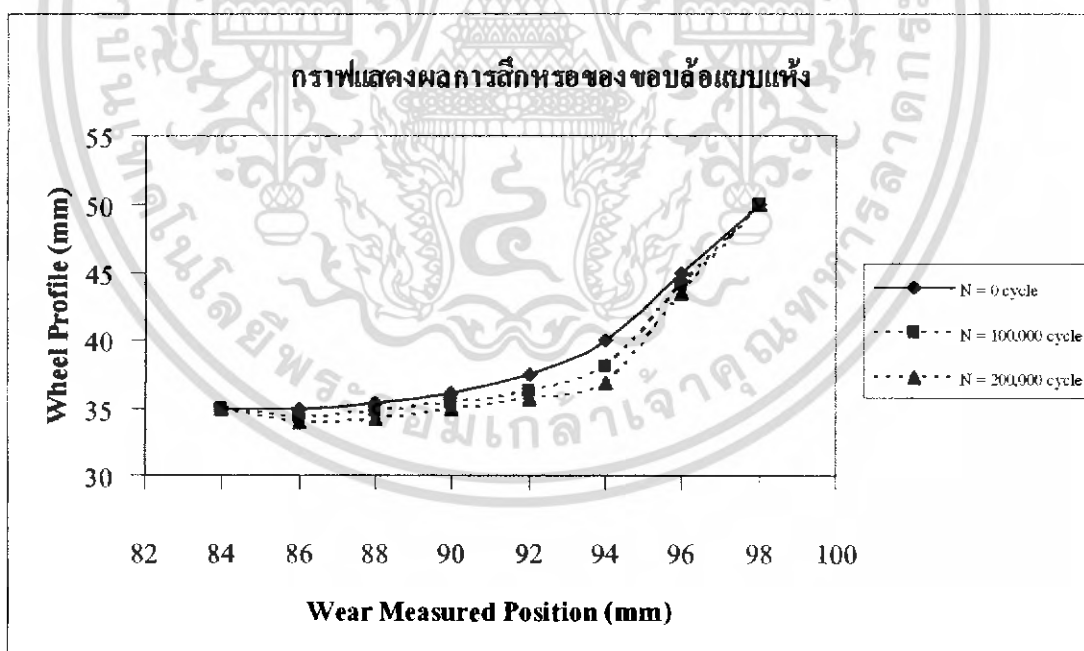


รูปที่ 9.6 กราฟแสดงลักษณะการสึกของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

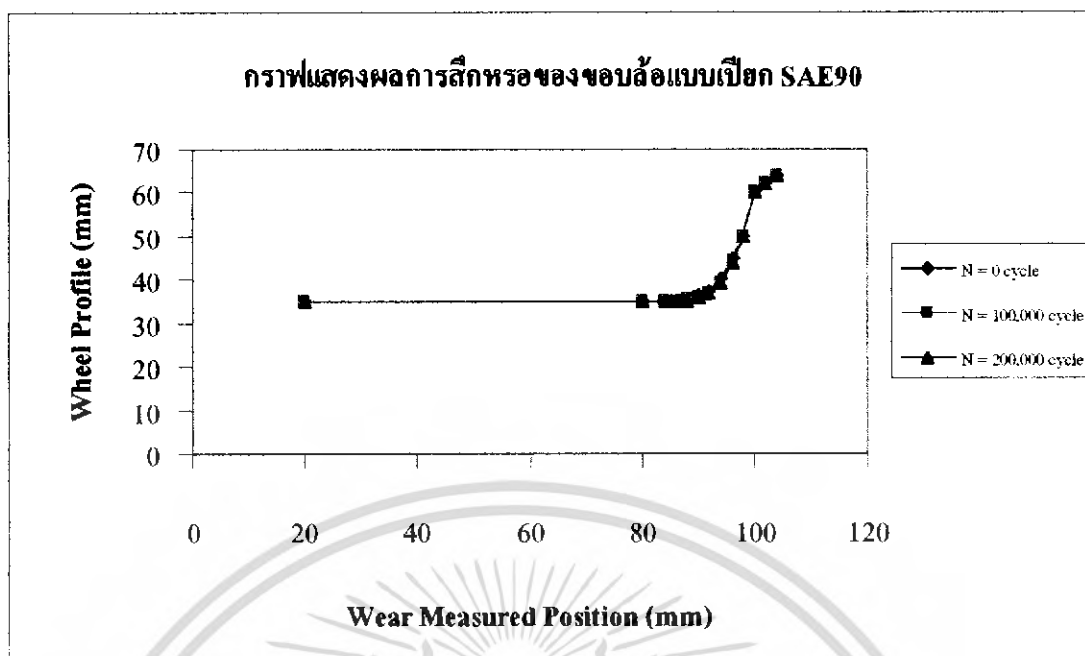


รูปที่ 9.7 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

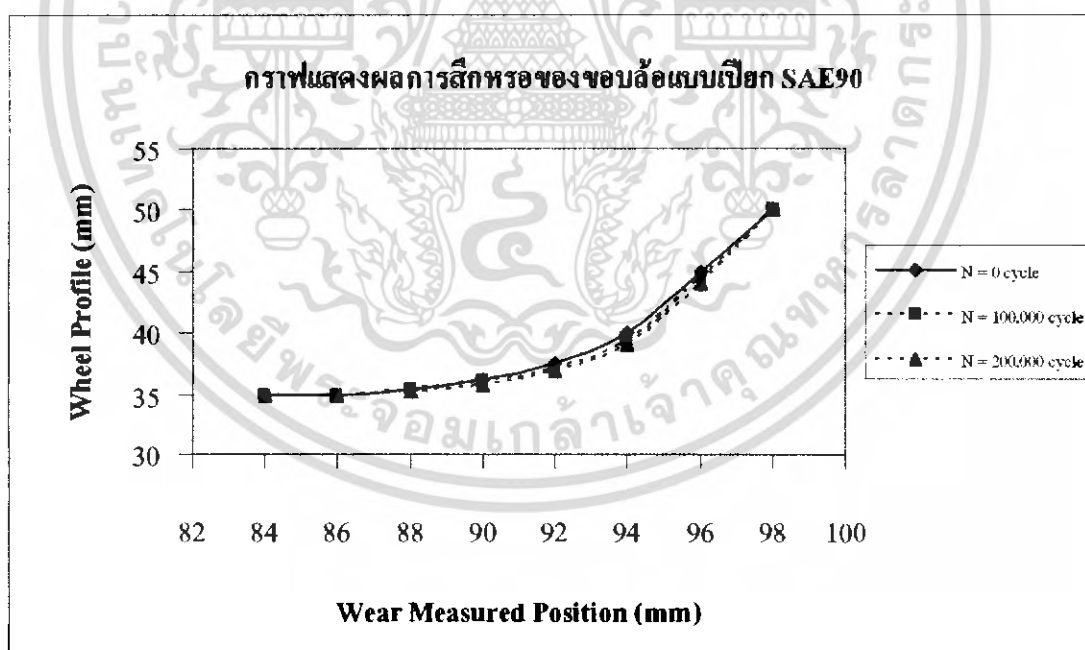


รูปที่ 9.8 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

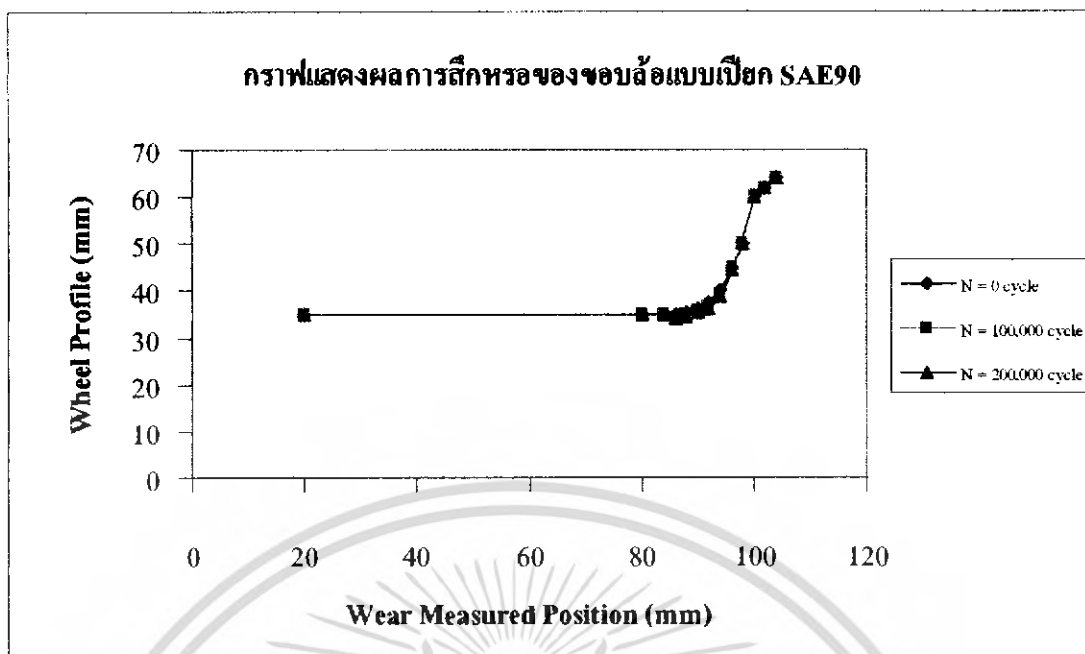


รูปที่ 9.9 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_r

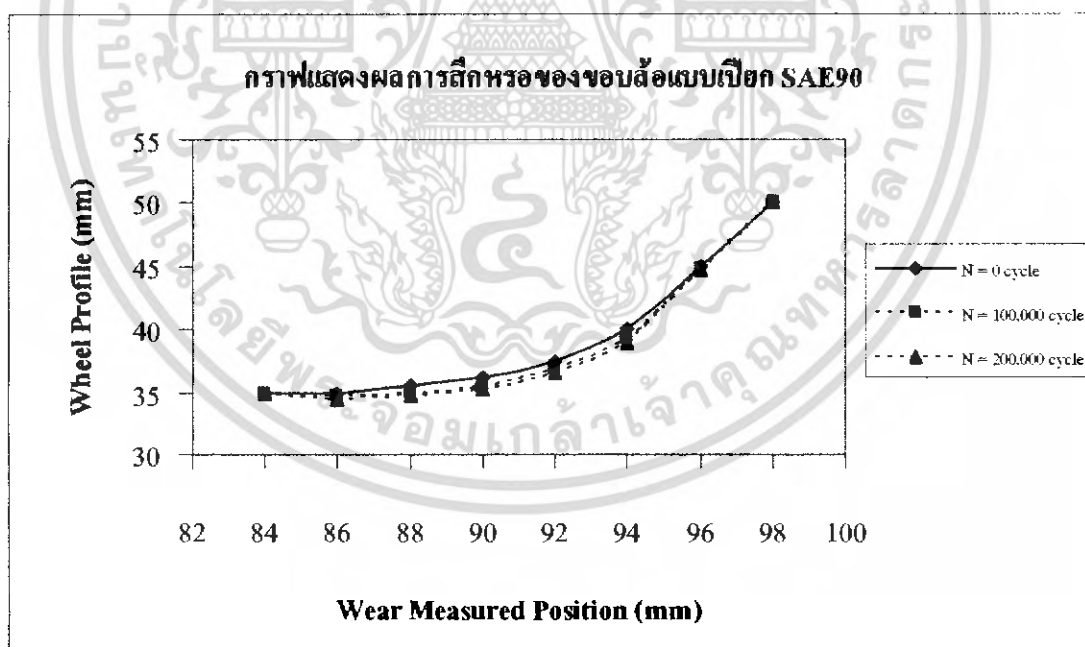


รูปที่ 10.10 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

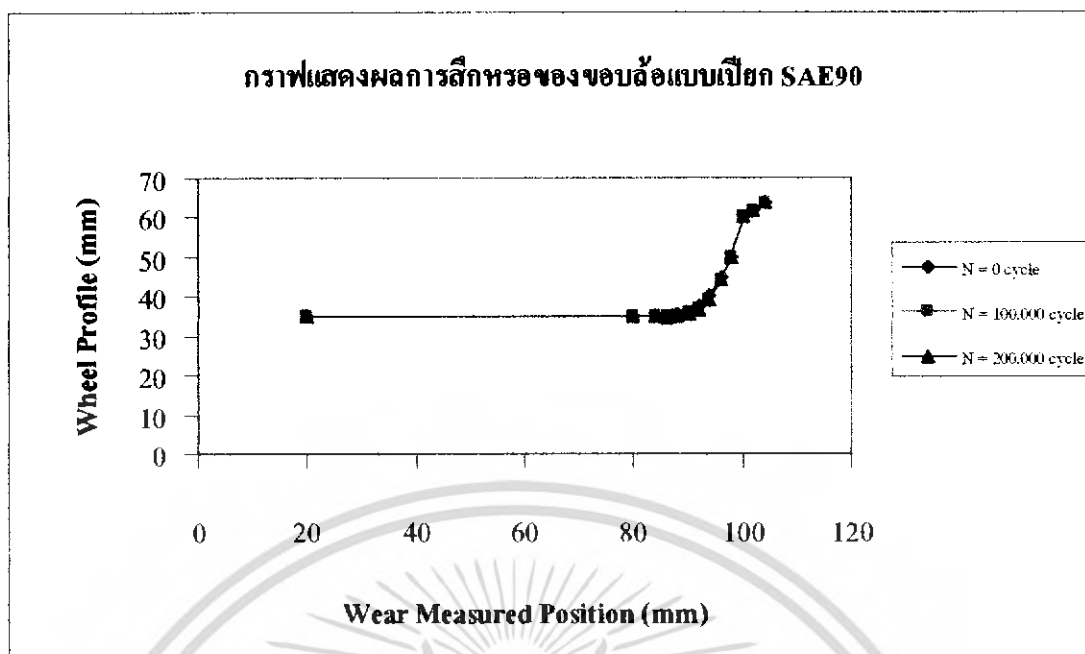


รูปที่ 9.11 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

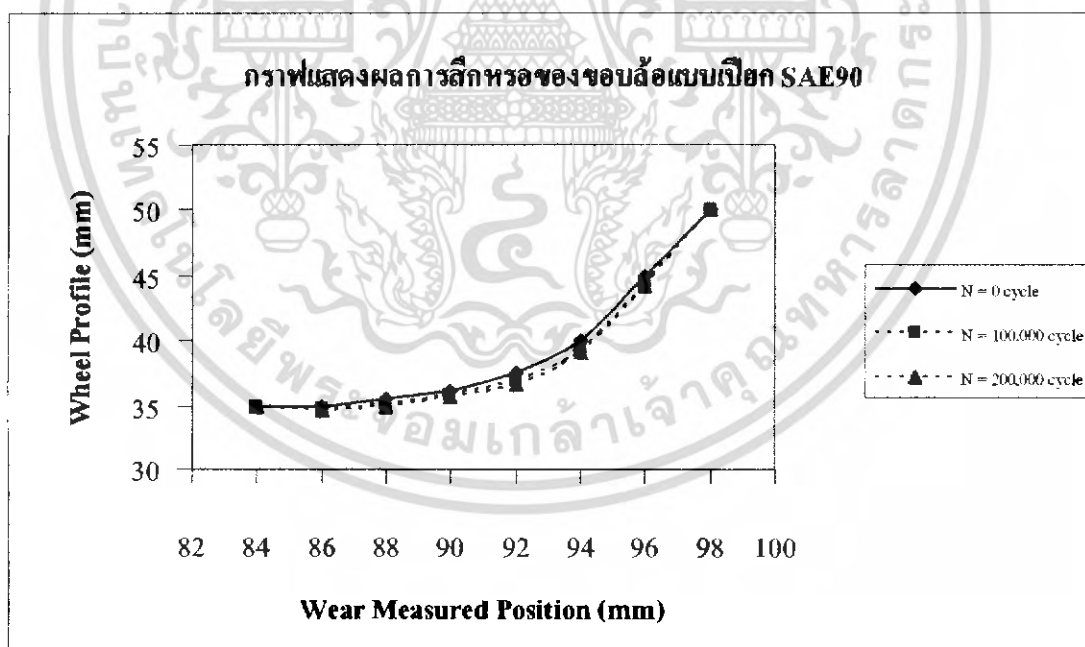


รูปที่ 9.12 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

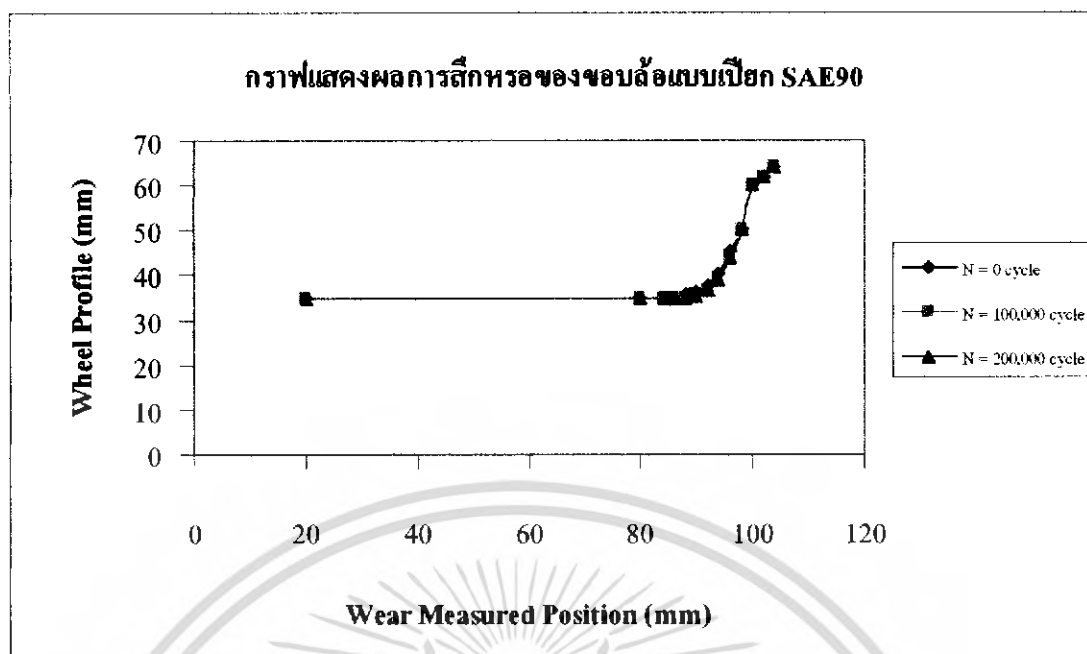


รูปที่ 9.13 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

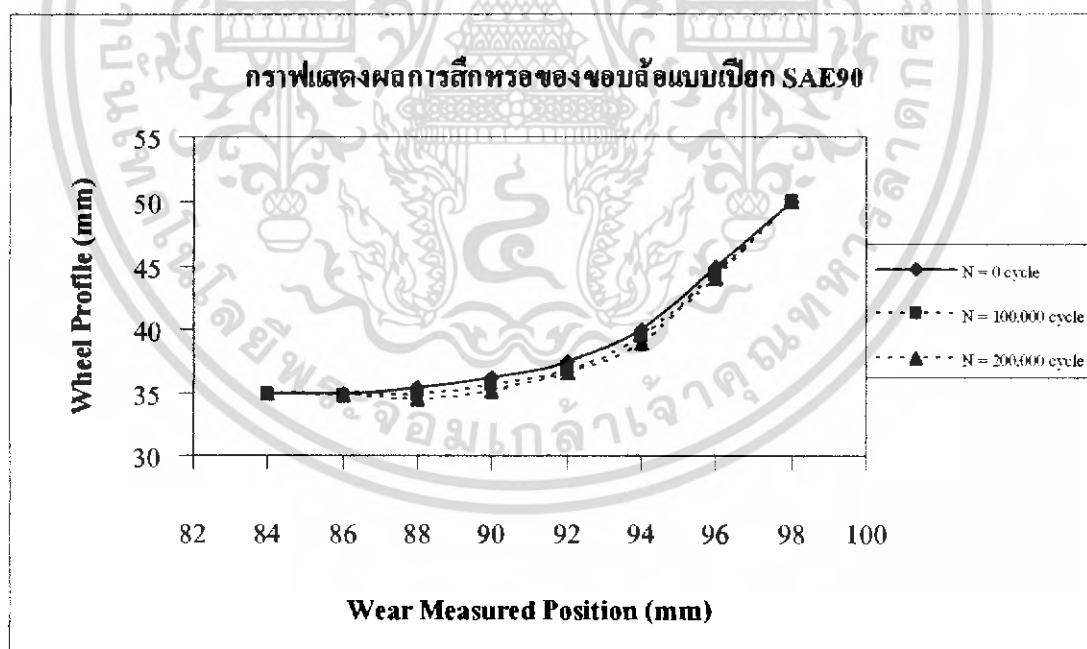


รูปที่ 9.14 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

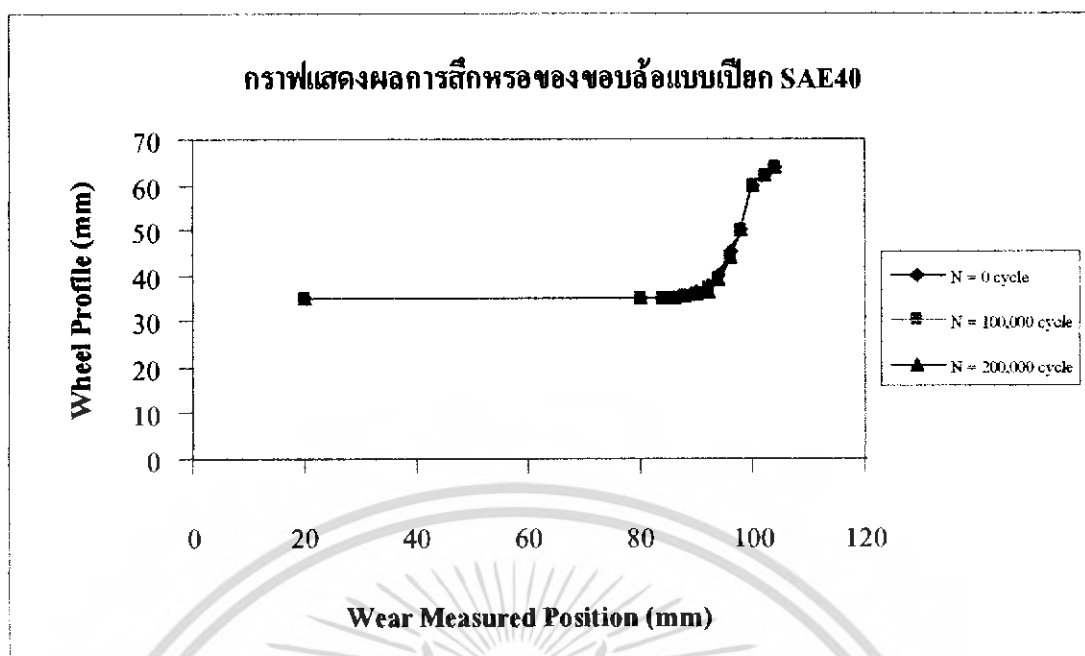


รูปที่ 9.15 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

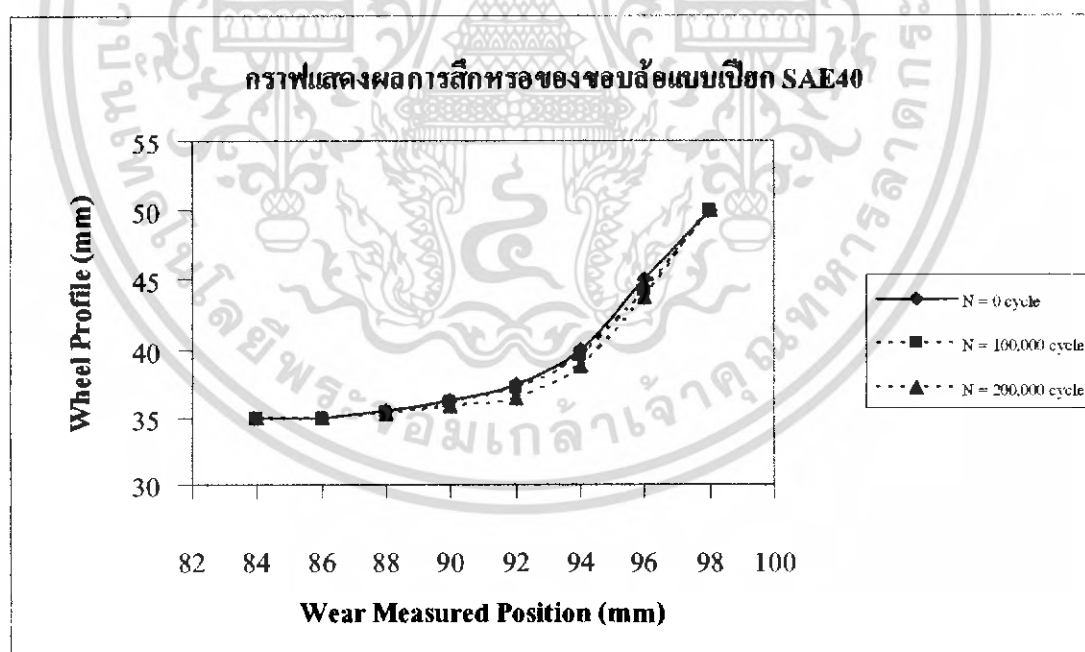


รูปที่ 9.16 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

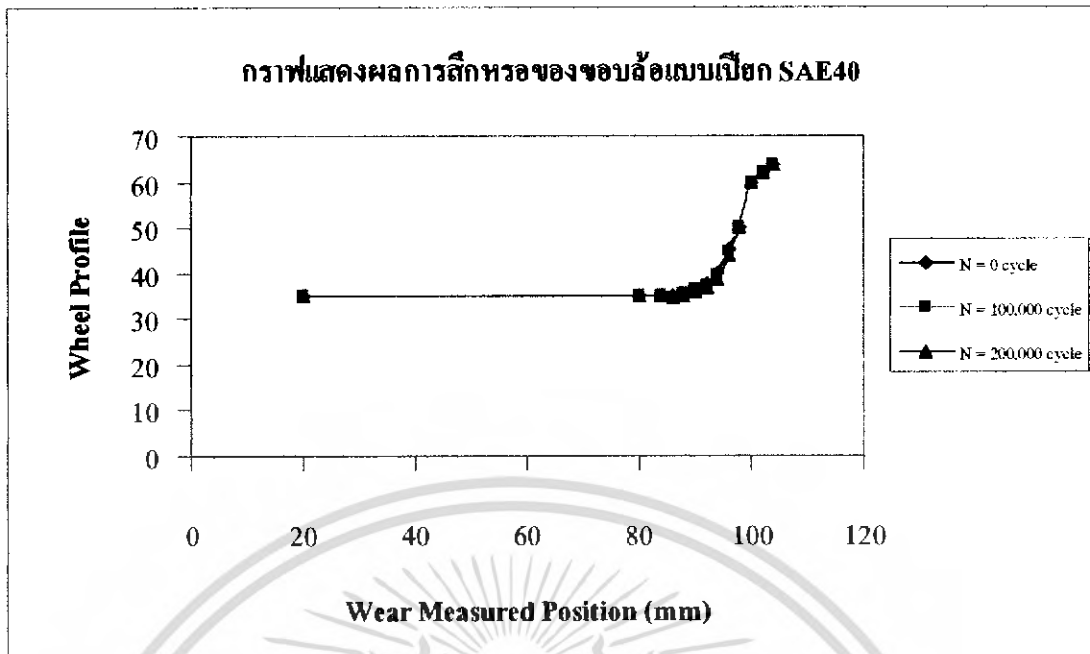


รูปที่ 9.17 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

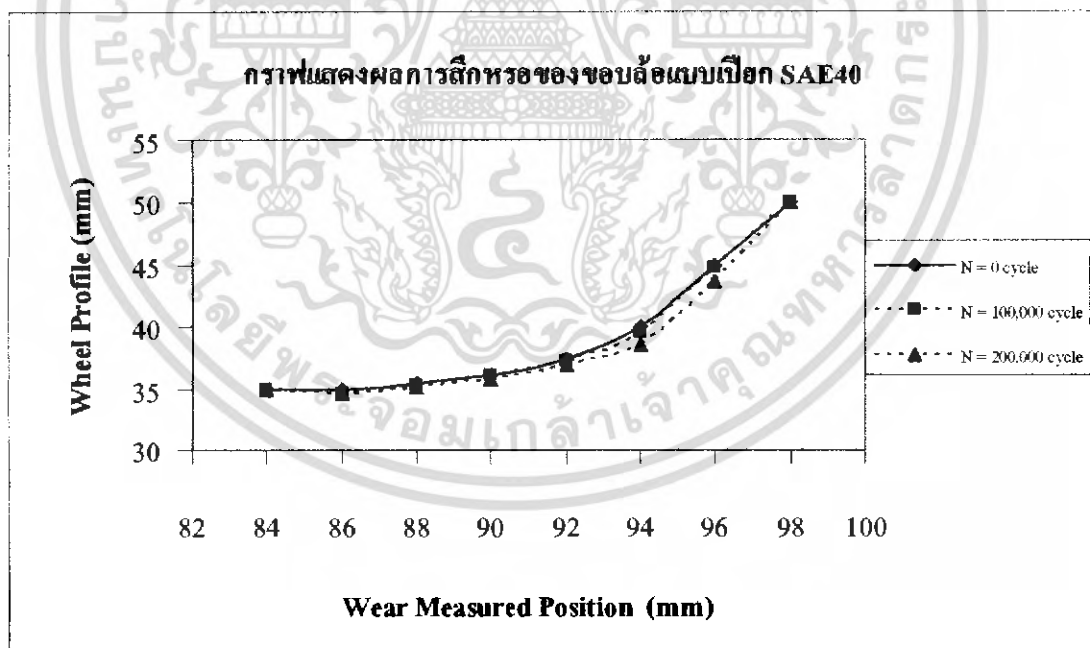


รูปที่ 9.18 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

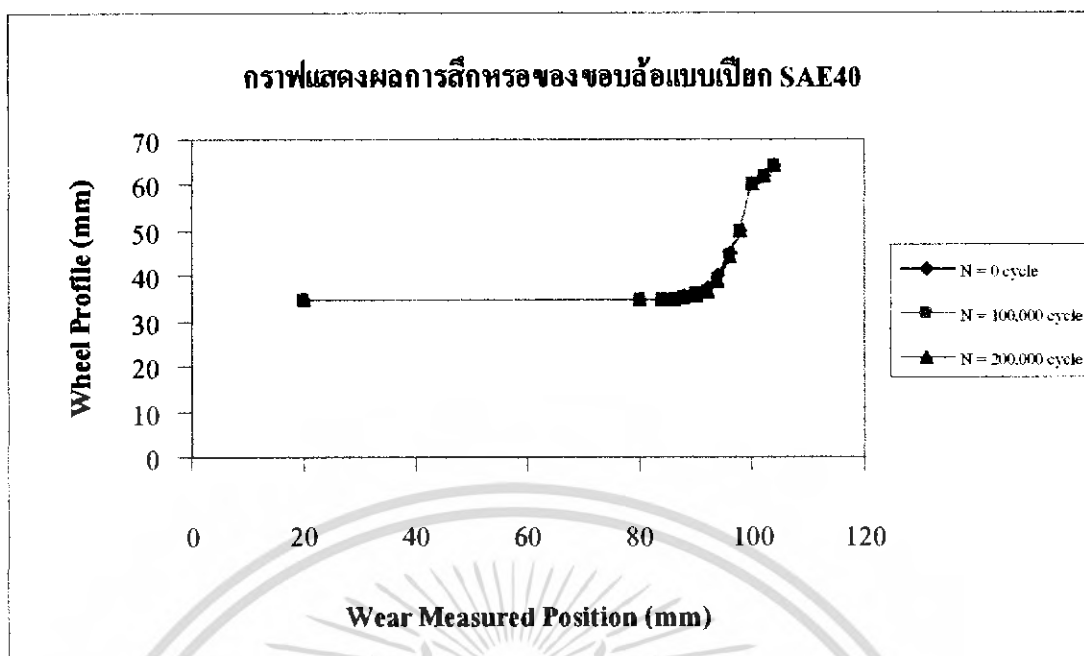


รูปที่ 9.19 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

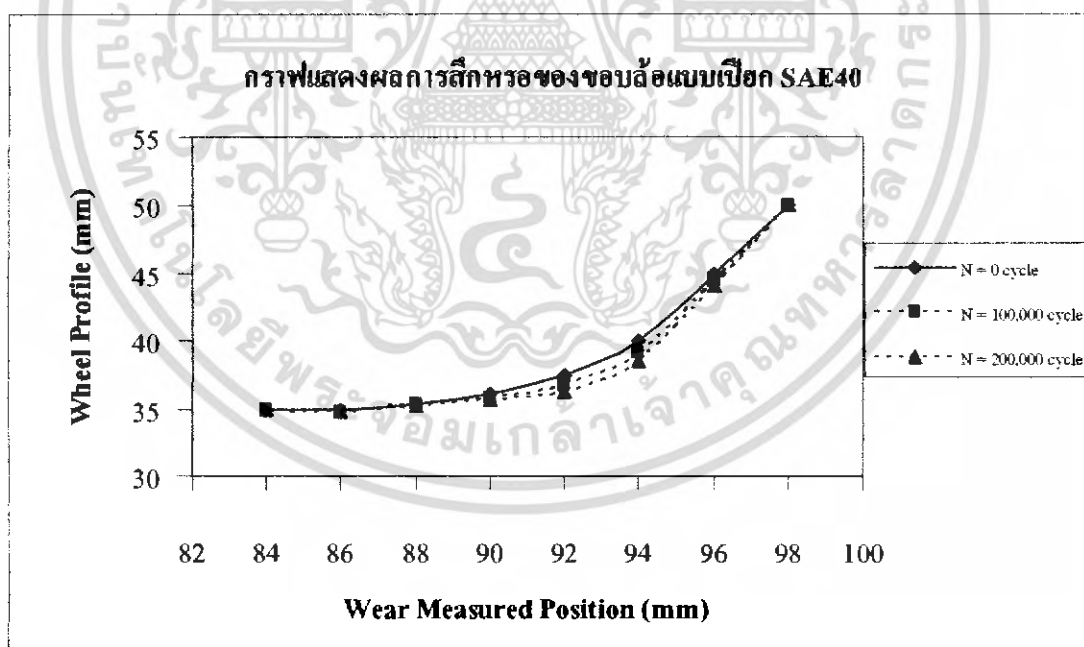


รูปที่ 9.20 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 635 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

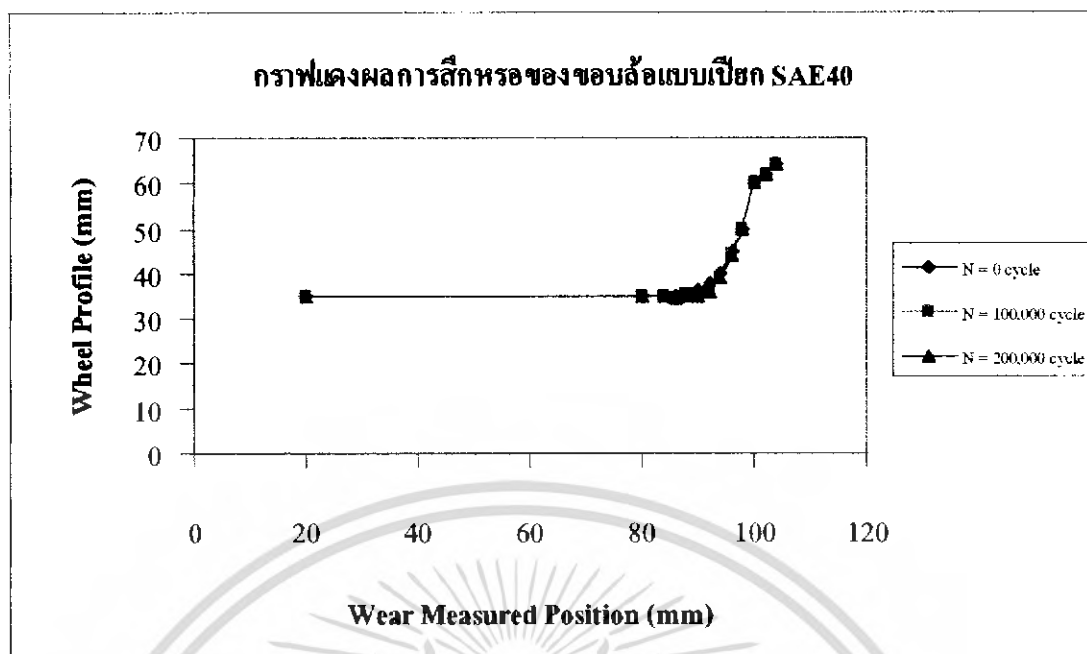


รูปที่ 9.21 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

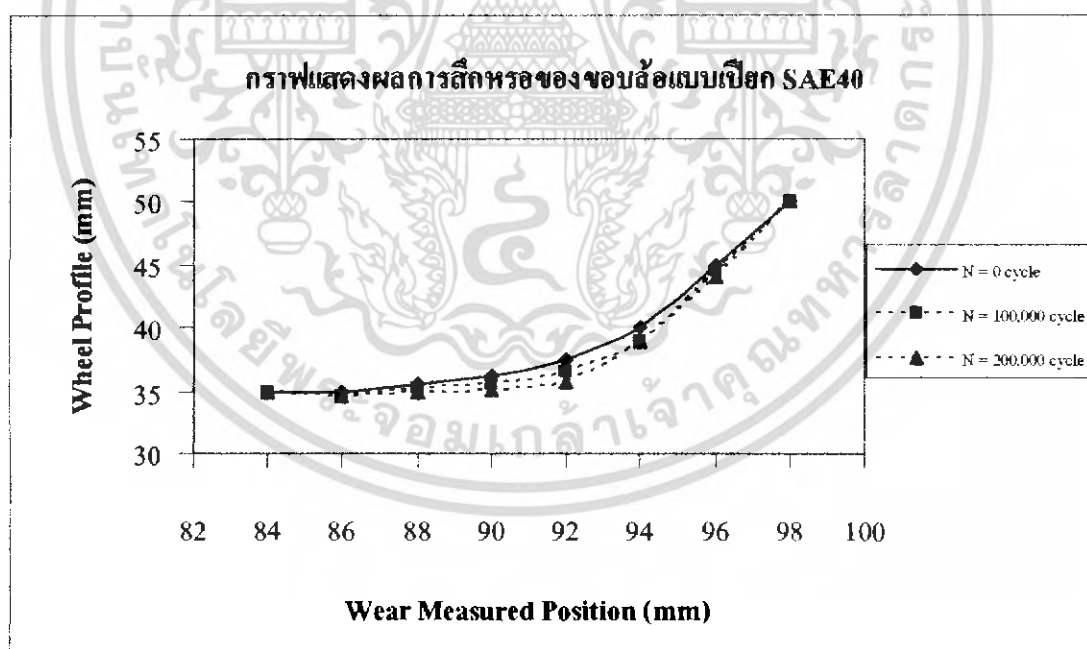


รูปที่ 9.22 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 500 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



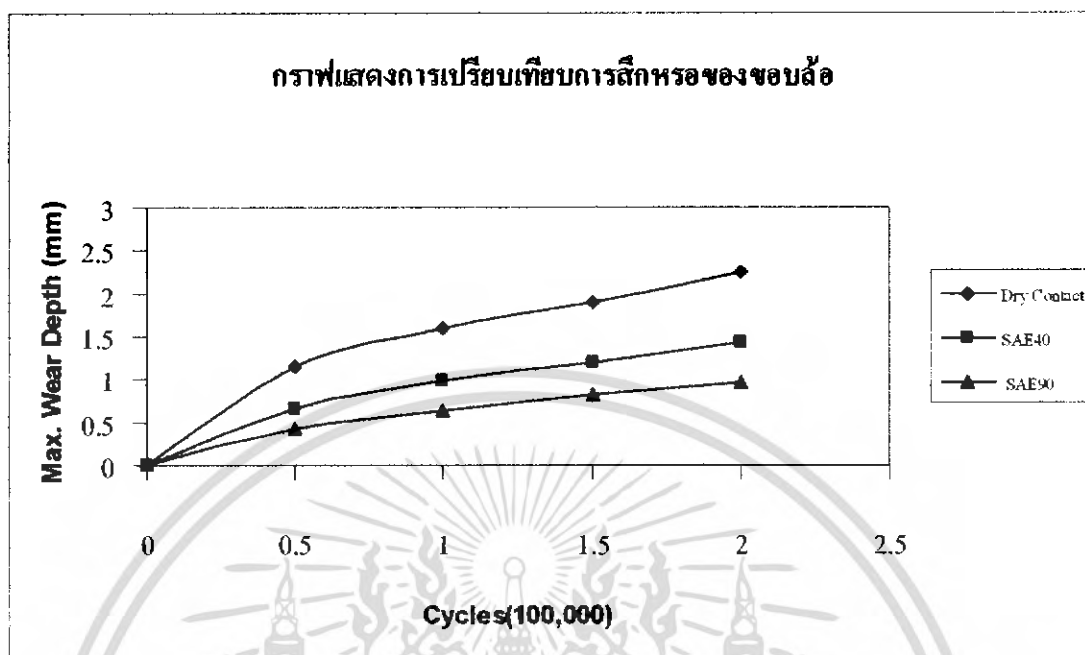
รูปที่ 9.23 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f



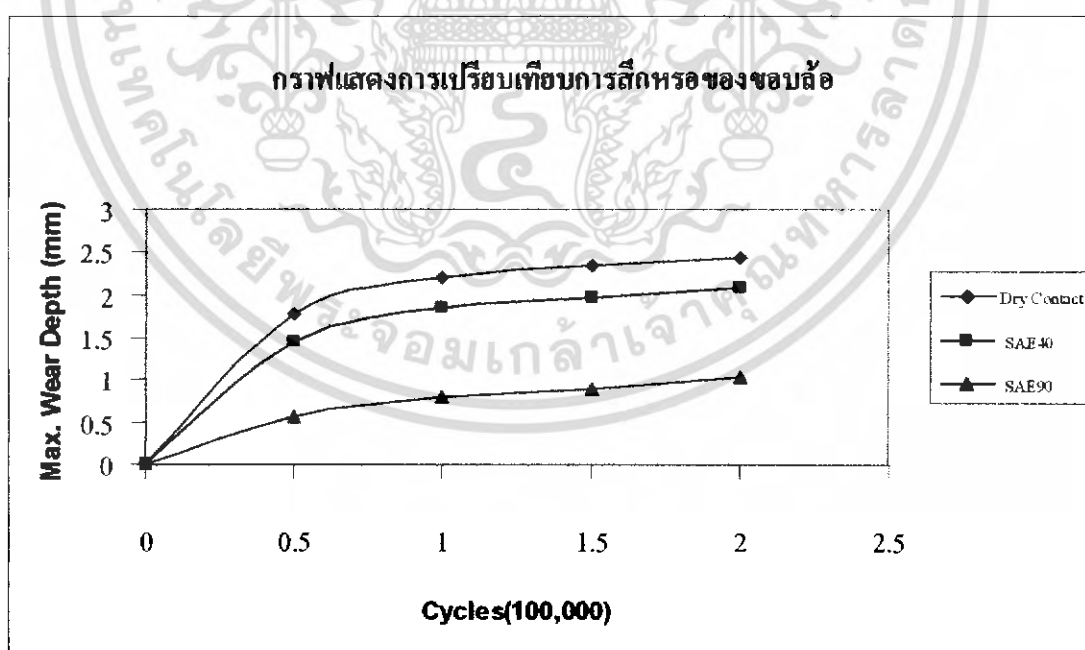
รูปที่ 9.24 กราฟแสดงลักษณะการสึกหรอของขอบล้อที่ความเร็วรอบ 1080 rpm โหลดกระทำด้านข้าง 1000 kg_f และ โหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการสึกหรอโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลดที่ทำการทำ

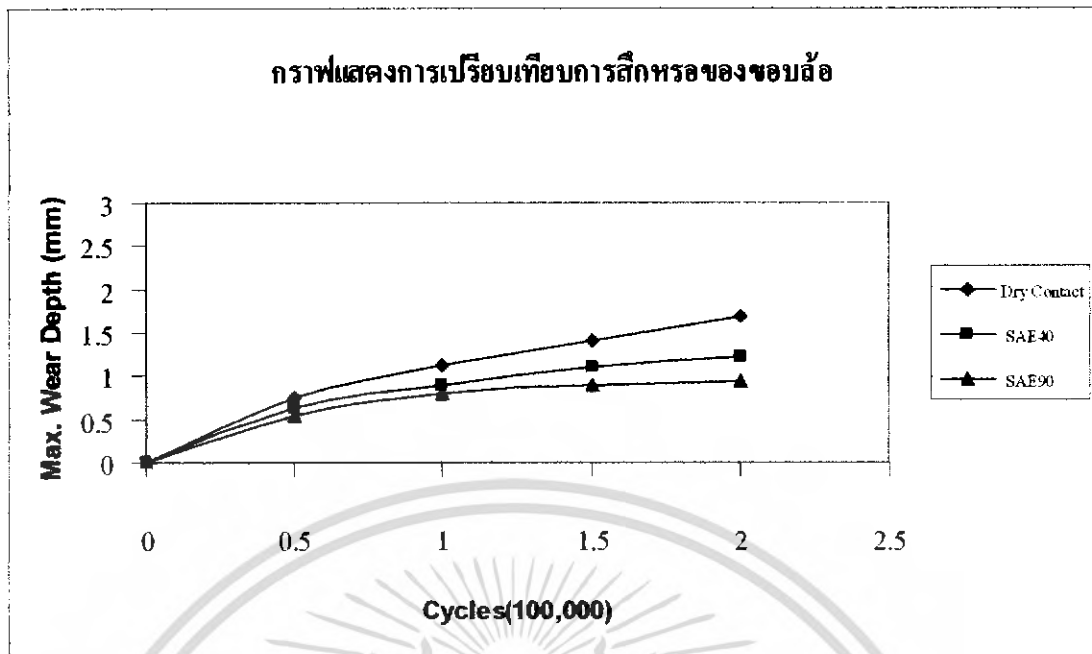


รูปที่ 9.25 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_f และ โหลดแนวรัศมี 500 kg_f

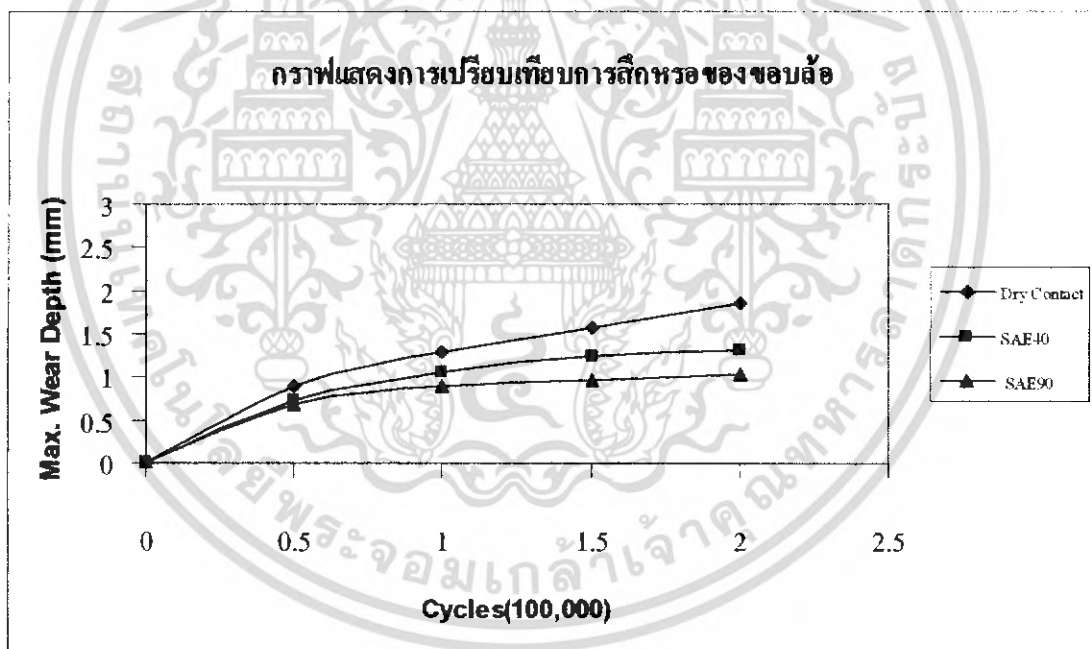


รูปที่ 9.26 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_f และ โหลดแนวรัศมี 1000 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.27 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดค้ำข้าง 500 kg_f และ โหลดแนวรัศมี 500 kg_f

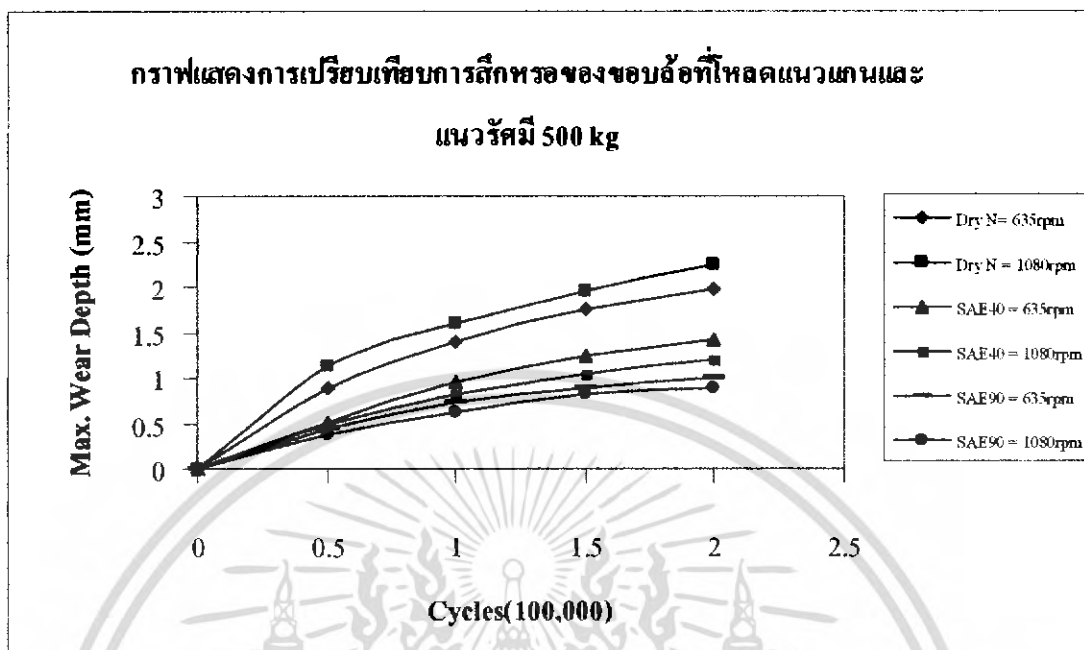


รูปที่ 9.28 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดค้ำข้าง 1000 kg_f และ โหลดแนวรัศมี 1000 kg_f

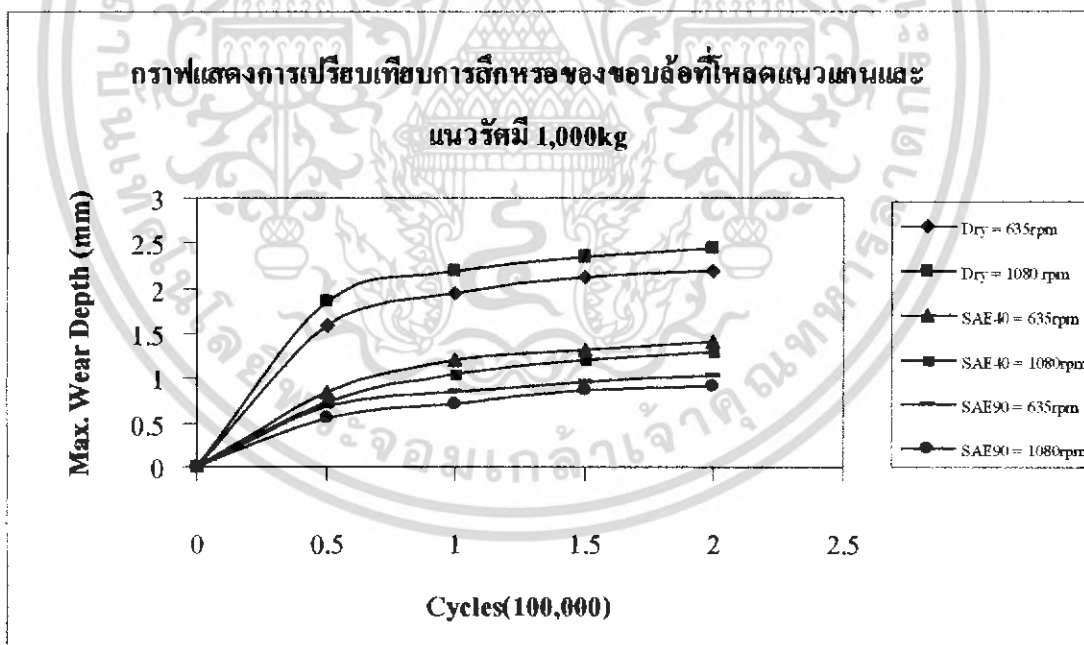
รูปที่ 9.25 ถึง รูปที่ 9.28 เป็นกราฟเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบต่างๆ และสภาวะโหลดต่างๆ ที่มากระทำ จะพบว่าอัตราการสึกหรอที่หน้าสัมผัสแห้งจะมากกว่าที่หน้าสัมผัสเปียก และหน้าสัมผัสเปียก แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ สารหล่อลื่นSAE40 กับสารหล่อลื่นSAE90 เราจะพบว่าสารหล่อลื่นSAE40 จะมีอัตราการสึกหรอมากกว่าสารหล่อลื่นSAE90 และสภาวะโหลดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอที่สภาวะโหลดเท่ากันแต่ความเร็วรอบต่างกัน



รูปที่9.29 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่สภาวะโหลดในแนวแกนและแนวรัศมี 500 kg_f

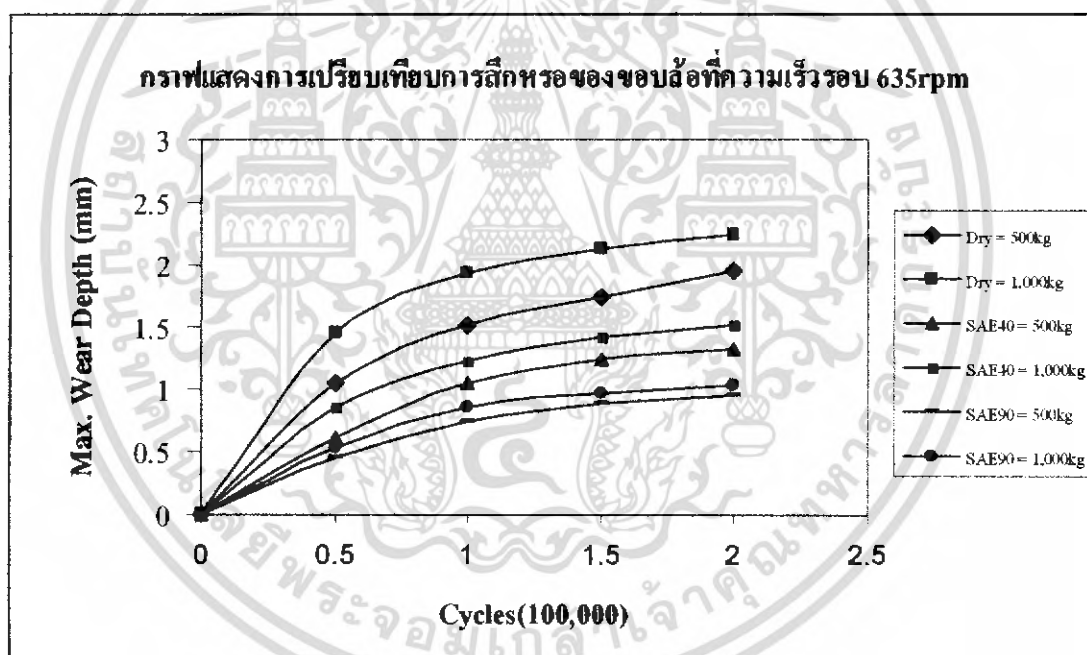


รูปที่9.30 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่สภาวะ โหลดในแนวแกนและแนวรัศมี 1,000 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

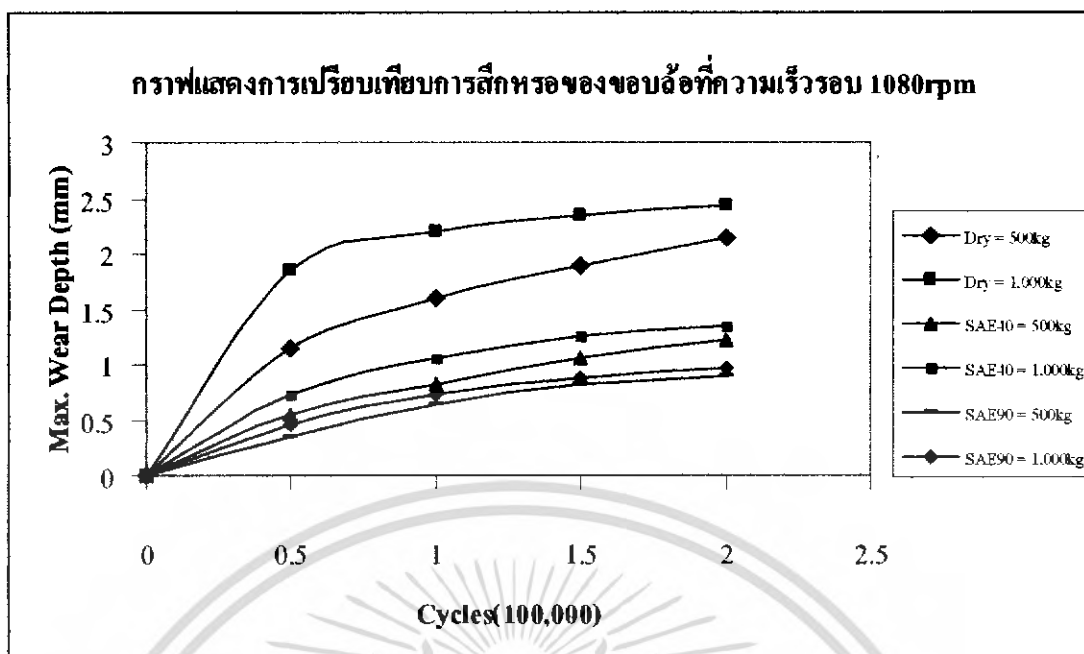
รูปที่ 9.29 ถึง รูปที่ 9.30 เป็นกราฟเปรียบเทียบสภาวะโหลดที่เท่ากันแต่ความเร็วรอบต่างกัน จะพบว่าที่หน้าสัมผัสแห้งถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามที่หน้าสัมผัสเปียกถ้าความเร็วเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอจะลดลง ซึ่งจากกราฟทั้งสองจะพบว่าที่หน้าสัมผัสเปียกจะขึ้นอยู่กับความหนืดคือที่สารหล่อลื่นSAE90 มีค่าความหนืดมากกว่าสารหล่อลื่นSAE40 มีผลทำให้อัตราการสึกหรอน้อยกว่า ซึ่งทั้งสองเป็นการหล่อลื่นแบบผสมระหว่างฟิล์มบางและไม่มีฟิล์มซึ่งเราสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความเร็วสูงขึ้นฟิล์มจากการหล่อลื่นจะหนาขึ้นทำให้ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสึกหรอลดลงเฉพาะหน้าสัมผัสเปียกเท่านั้น และค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นระหว่างสารหล่อลื่นSAE90 มีค่าความหนืดมากกว่าทำให้สามารถยึดเกาะกับหน้าสัมผัสมากกว่าทำให้อัตราการสึกหรอน้อยกว่าสารหล่อลื่นSAE40

กราฟเปรียบเทียบการสึกหรอที่ความเร็วรอบเท่ากันแต่สภาวะโหลดต่างกัน



รูปที่9.31 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 635 rpm

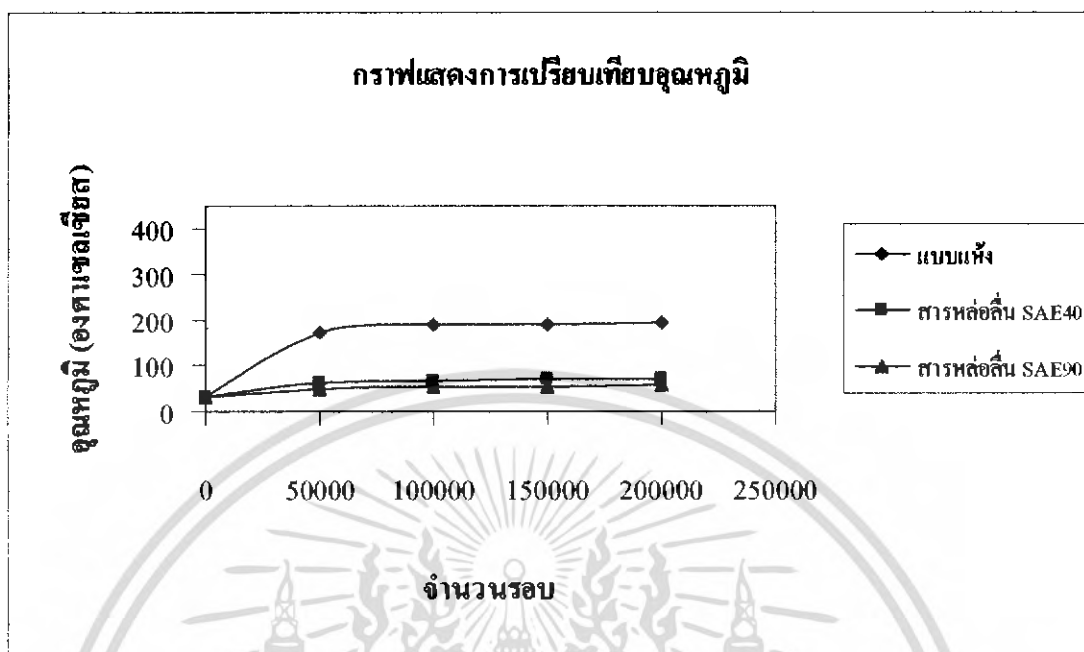
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



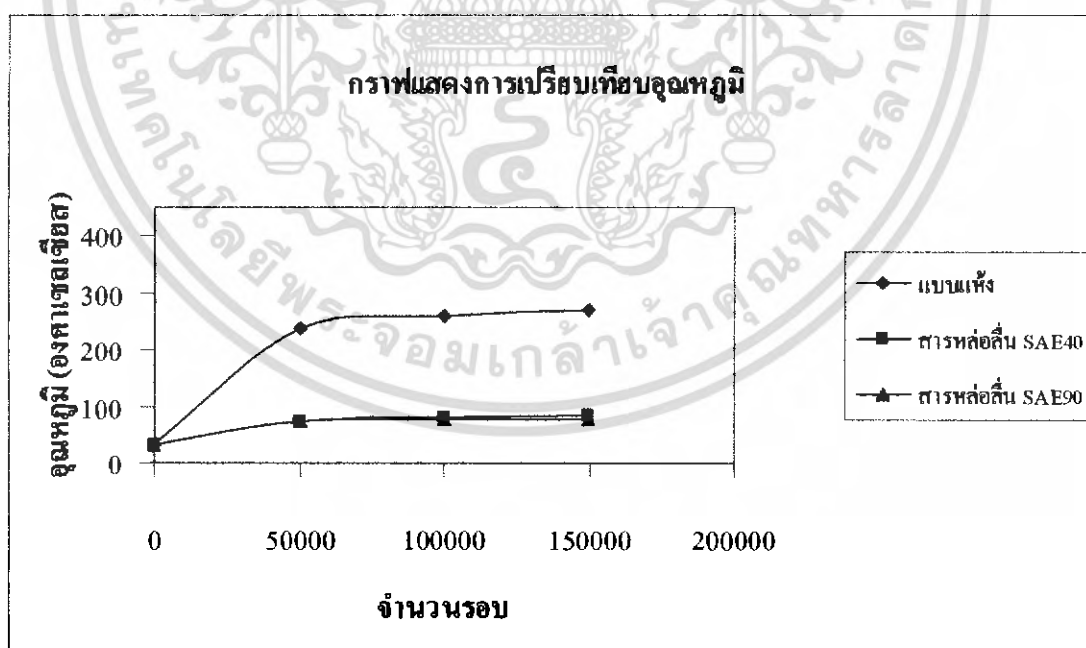
รูปที่ 9.32 กราฟแสดงระยะการสึกหรอมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 1080 rpm

รูปที่ 9.31 ถึง รูปที่ 9.32 เป็นกราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบที่เท่ากันแต่สภาวะโหลดต่างกัน จะพบว่าที่หน้าสัมผัสแห้งถ้าสภาวะโหลดเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในทุกกรณีที่หน้าสัมผัสเปียกถ้าสภาวะโหลดเพิ่มขึ้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งจากกราฟทั้งสองจะพบว่าที่หน้าสัมผัสเปียกจะขึ้นอยู่กับความหนืดคือที่สารหล่อลื่นSAE90 มีค่าความหนืดมากกว่าสารหล่อลื่นSAE40 มีผลทำให้อัตราการสึกหรอน้อยกว่า ซึ่งทั้งสองเป็นการหล่อลื่นแบบผสมระหว่างฟิล์มบางและไม่มีฟิล์มซึ่งเราสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความเร็วสูงขึ้นฟิล์มจากการหล่อลื่นจะหนามากขึ้นทำให้ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสึกหรอลดลงเฉพาะหน้าสัมผัสเปียกเท่านั้น และค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นระหว่างสารหล่อลื่นSAE90 มีค่าความหนืดมากกว่าทำให้สามารถยึดเกาะกับหน้าสัมผัสมากกว่าทำให้มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าสารหล่อลื่นSAE40

กราฟแสดงอุณหภูมิโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและโหลดที่ทำการทำ

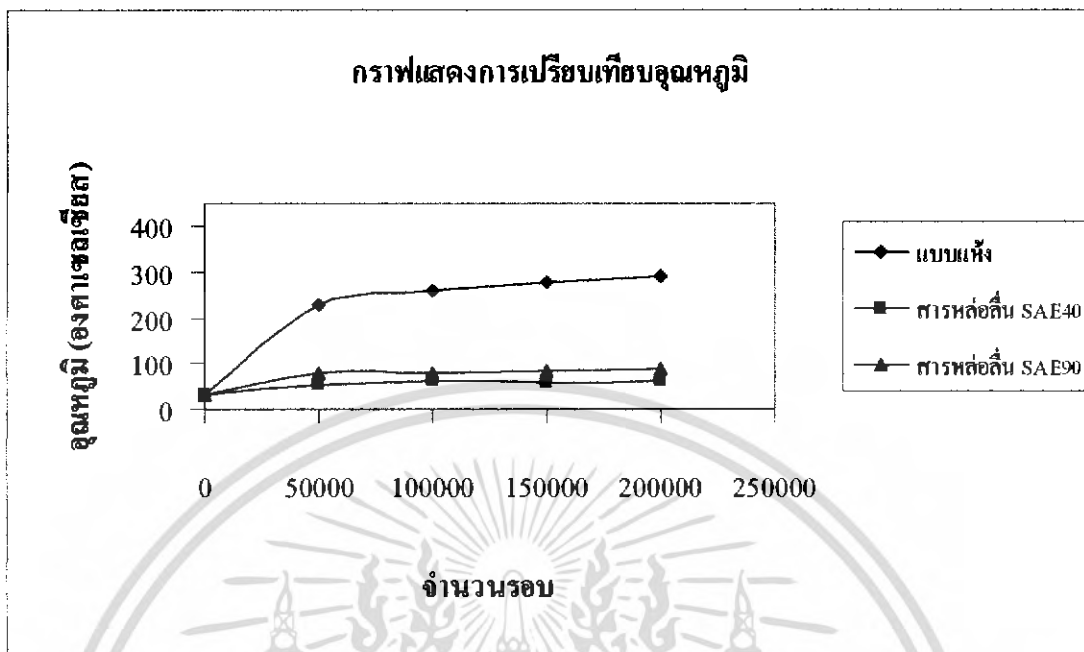


รูปที่ 9.33 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดค้ำข้าง 500 kg_f และโหลดแนวรัศมี 500 kg_f

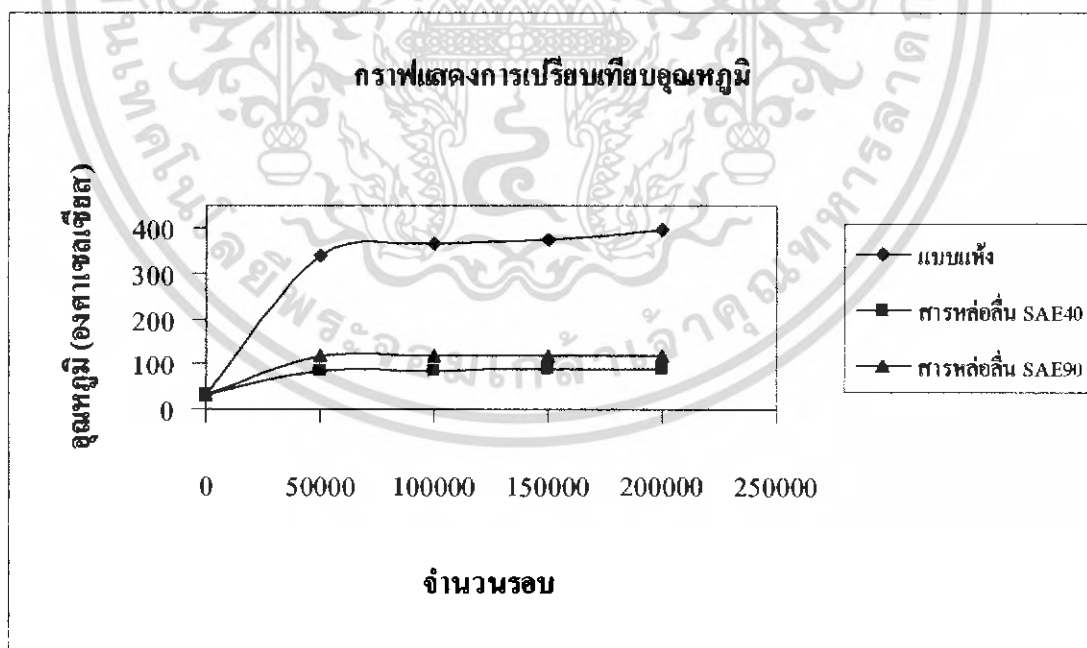


รูปที่ 9.34 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดค้ำข้าง 1000 kg_f และโหลดแนวรัศมี 1000 kg_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.35 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_r และโหลดแนวรัศมี 500 kg_r



รูปที่ 9.36 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดแนวรัศมี 1000 kg_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9.33 ถึง รูปที่ 9.36 จะพบว่าที่หน้าสัมผัสแห่งนี้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าหน้าสัมผัสเปียกในทุกกรณี

รูปที่ 9.33 ถึง รูปที่ 9.34 อุณหภูมิของสารหล่อลื่น SAE40 มากกว่าสารหล่อลื่น SAE90 เพราะเป็นช่วงที่มีความเร็วต่ำที่ 635 rpm เป็นผลทำให้เกิดฟิล์มบางคือฟิล์มของสารหล่อลื่น SAE40 จะน้อยกว่าฟิล์มของสารหล่อลื่น SAE90 ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างหน้าสัมผัสของสารหล่อลื่น SAE40 มากกว่าสารหล่อลื่น SAE 90 เป็นผลทำให้มีอุณหภูมิของสารหล่อลื่น SAE40 มากกว่าสารหล่อลื่น SAE 90

รูปที่ 9.35 ถึง รูปที่ 9.36 อุณหภูมิของสารหล่อลื่น SAE90 มากกว่าสารหล่อลื่น SAE40 เพราะเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นฟิล์มของสารหล่อลื่น SAE90 หนาขึ้นมีความหนืดและมีค่า Friction มากกว่าสารหล่อลื่น SAE40 ซึ่งมีผลทำให้ที่สารหล่อลื่น SAE90 มีความร้อนมากกว่าสารหล่อลื่น SAE40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 สรุปผลการทดลอง

1. ผลการทดลองที่ได้ทำให้เกิดการลดการสึกหรอของขอบล้อและรางทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีของความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสารชนิดนั้นคือถ้าความหนืดยิ่งมากอัตราการสึกหรอจะลดลง
2. ค่าที่ได้จากการทดลองได้นำมาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่โหลดมากระทำในแนวแกนและในแนวรัศมี พร้อมกำหนดค่าความเร็วรอบที่ต่าง ๆ กันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ถ้าโหลดเพิ่มขึ้นทั้งแนวแกนและแนวรัศมีอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้น
3. เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นที่สภาวะโหลดเดียวกันอัตราการสึกหรอจะลดลง
4. ขอบล้อที่เกิดจากผิวสัมผัสหน้าแห้งจะเกิดอัตราการสึกหรอที่มากกว่าขอบล้อที่มีหน้าผิวสัมผัสแบบเปียก
5. อุณหภูมิที่ได้จากการทดลองเราจะพบว่า อุณหภูมิที่เกิดจากการใช้ในกรณีผิวสัมผัสหน้าแห้งจะมีค่าสูงกว่าในทุกกรณีที่ใช้ผิวสัมผัสแบบเปียก
6. จากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้เป็นอย่างดี

9.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากแท่นทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีการสั่นคลอนในการทดลองทำให้ประสิทธิภาพในการทดลองต่ำลง
2. ผู้ทำการทดลองยังขาดความชำนาญในการใช้เครื่องมือวัด เช่น เครื่องมือที่เรียกว่า ไดอัลเกจ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีค่าค่อนข้างละเอียดทำให้มีผลกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยตรงทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการบันทึกค่าของผลการทดลองโดยตรง

บรรณานุกรม

- [1] มงคล มงคลวงศ์โรจน์ , “พื้นฐานทฤษฎีการหล่อลื่น” , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี พ.ศ. 2525, หน้า 1-15
- [2] ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สนิททรัพย์สมบูรณ์, ปานเพชร ชนินทร “ เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น”, ปี พ.ศ.2537, หน้า 211-214
- [3] ปริชญานีพนธ์เรื่อง”การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การกดแบบลื่นไถลระหว่างล้อและรางรถ” ปี พ.ศ.2547
- [4] Bernard J. Hamrock, “Fundamentals of Fluid Film Lubrication ” Mcgrawhill Intemational ,1981 pp.598-603



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงผลการสีกหรือของขอบลือทดสอบ

ภาคผนวก ข. กราฟการ Calibrate ชุด ไฮครอลิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงการสึกหรอของขอบล้อทดสอบ

ตารางที่1 ผลการทดลองแบบแห้งที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.15	0.95	0.09	0.11	0.22	0.02
100,000	0.31	1.34	0.20	0.28	0.42	0.19
150,000	0.49	1.75	0.94	0.43	0.64	0.56
200,000	0.67	1.98	1.50	0.59	0.84	0.92

ตารางที่2 ผลการทดลองแบบแห้งที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.4	1.59	0.61	0.34	0.22	0.34
100,000	0.92	1.94	1.22	0.81	0.66	0.55
150,000	1.13	2.13	1.47	1.21	0.97	1.03
200,000	1.58	2.20	1.68	1.70	1.27	1.31

ตารางที่3 ผลการทดลองแบบแห้งที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	1.07	1.05	1.14	0.84	0.65	0.09
100,000	1.60	1.16	1.47	1.09	1.13	0.09
150,000	1.57	1.51	1.90	1.10	1.13	0.09
200,000	2.21	2.22	2.25	1.17	1.15	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4 ผลการทดลองแบบแห้งที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	1.97	1.73	1.23	0.75	0.1	0.01
100,000	2.12	2.2	1.81	1.18	0.21	0.02
150,000	2.35	2.29	2.03	1.24	0.34	0.05
200,000	2.43	2.37	2.14	1.42	0.52	0.07

ตารางที่5 ผลการทดลองแบบเปียกใช้สารหล่อลื่น SAE40 ที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_r

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.52	0.20	0.14	0.07	0.03	0.01
100,000	0.76	0.43	0.39	0.18	0.12	0.02
150,000	1.35	0.99	0.93	0.31	0.17	0.04
200,000	1.43	1.16	1.03	0.41	0.27	0.05

ตารางที่6 ผลการทดลองแบบเปียกใช้สารหล่อลื่น SAE40 ที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_r และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_r

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.09	0.85	0	0	0.05	0
100,000	0.21	1.22	0.25	0.14	0.18	0.02
150,000	1.24	1.32	0.56	0.40	0.21	0.05
200,000	1.28	1.42	0.78	0.53	0.25	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่7 ผลการทดลองแบบเป็ยกใช้สารหล่อลื่น SAE40 ที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.30	0.34	0.40	0.25	0.02	0.05
100,000	0.62	0.63	0.63	0.28	0.07	0.18
150,000	0.67	0.99	0.89	0.43	0.11	0.19
200,000	0.95	1.43	1.11	0.47	0.21	0.20

ตารางที่8 ผลการทดลองแบบเป็ยกใช้สารหล่อลื่น SAE40 ที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.32	0.56	0.73	0.52	0.14	0.13
100,000	0.54	1.05	0.88	0.62	0.20	0.43
150,000	0.79	1.09	1.25	0.66	0.34	0.63
200,000	0.95	1.10	1.31	1.16	0.51	0.78

ตารางที่9 ผลการทดลองแบบเป็ยกใช้สารหล่อลื่น SAE90 ที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.33	0.45	0.19	0.26	0.25	0.10
100,000	0.36	0.50	0.54	0.33	0.38	0.20
150,000	0.70	0.89	0.70	0.42	0.70	0.29
200,000	0.84	0.98	0.83	0.51	0.78	0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่10 ผลการทดลองแบบเปียกใช้สารหล่อลื่น SAE90 ที่ความเร็วรอบ 635rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.44	0.69	0.57	0.43	0.32	0.07
100,000	0.63	0.81	0.83	0.81	0.62	0.11
150,000	0.95	0.95	0.88	0.96	0.73	0.34
200,000	1.02	0.99	0.97	1.03	0.98	0.57

ตารางที่11 ผลการทดลองแบบเปียกใช้สารหล่อลื่น SAE90 ที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 500 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 500 kg_f

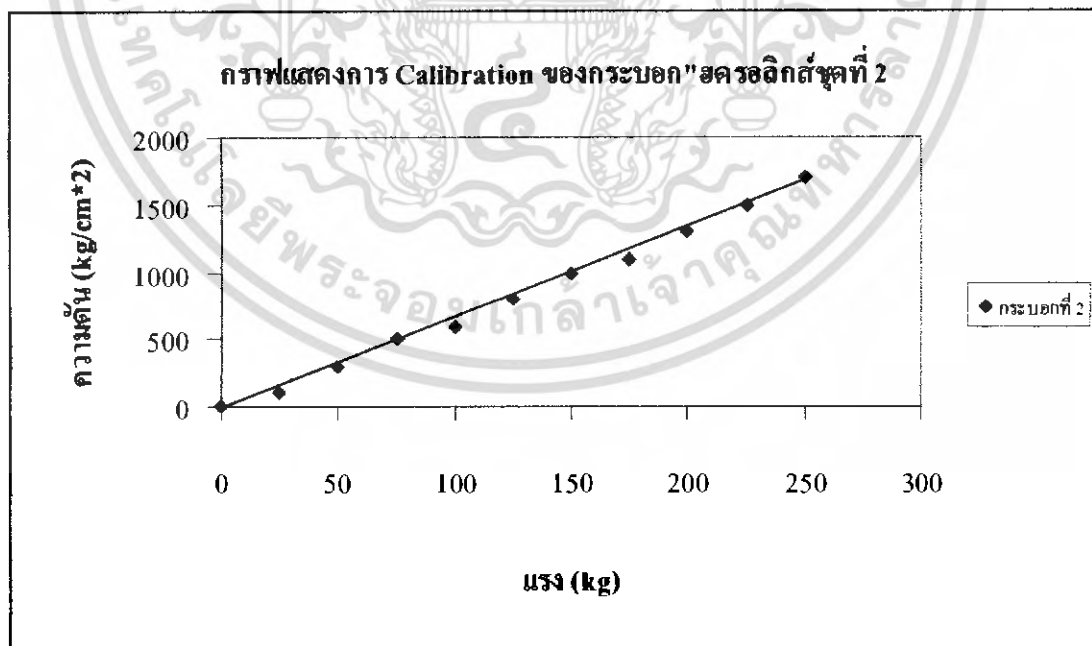
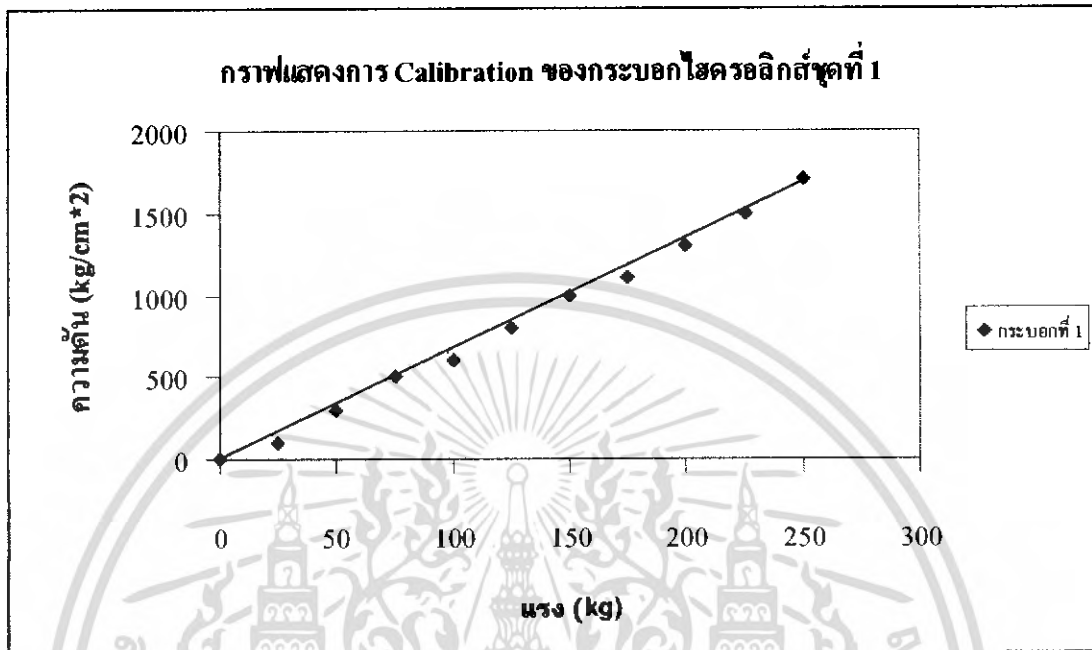
จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.33	0.23	0.33	0.10	0.01	0.01
100,000	0.42	0.45	0.37	0.17	0.07	0.02
150,000	0.82	0.8	0.55	0.20	0.17	0.02
200,000	0.90	0.90	0.63	0.50	0.27	0.03

ตารางที่12 ผลการทดลองแบบเปียกใช้สารหล่อลื่น SAE90 ที่ความเร็วรอบ 1080rpm โหลดด้านข้าง 1000 kg_f และโหลดในแนวรัศมี 1000 kg_f

จำนวนรอบ	ค่าที่วัดได้ตามจุดต่างๆ (mm)					
	1	2	3	4	5	6
50,000	0.06	0.57	0.06	0.20	0.43	0.53
100,000	0.22	0.69	0.09	0.32	0.61	0.66
150,000	0.28	0.88	0.67	0.70	0.77	0.80
200,000	0.38	0.92	0.84	0.79	0.87	0.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
กราฟการ Calibrate ของชุดไฮดรอลิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้