

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและราง
EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF RAIL AND WHEEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและราง

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF RAIL AND WHEEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF RAIL AND WHEEL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2014

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและราง
EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF RAIL AND WHEEL

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนดี อินทรเทศ รหัสประจำตัว 54010539
2. นาย ภัทร์ วิจารณกรณ์ รหัสประจำตัว 54010979
3. นาย ศุภชัย โชติศิริ รหัสประจำตัว 54011286



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและราง

นายธนดี	อินทรเทศ	54010539
นายภัทร์	วิจารณ์ภรณ์	54010979
นายศุภชัย	โชติศิริ	54011286
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2557		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอที่ผิวสัมผัสของล้อและราง โดยชุดทดสอบสามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการสัมผัสแบบกลิ้งและการสัมผัสแบบไถลได้ ในการทดสอบสามารถทำการทดสอบที่อัตราส่วนการเคลื่อนไถลเท่ากับ 0 - 0.10 ความเร็วตั้งแต่ 200 รอบต่อนาทีถึง 500 รอบต่อนาทีและโหลดที่กระทำตั้งแต่ 200 กิโลกรัมถึง 500 กิโลกรัมในการทดลองนี้จะทราบถึงแนวโน้มของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและพฤติกรรมการสึกหรอที่ผิวสัมผัสของล้อและรางเพื่อที่จะนำไปออกแบบและพัฒนาระบบล้อและรางในอนาคต



EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF RAIL AND WHEEL

Thanadee Indradese 54010539

Phat Vijaranakorn 54010979

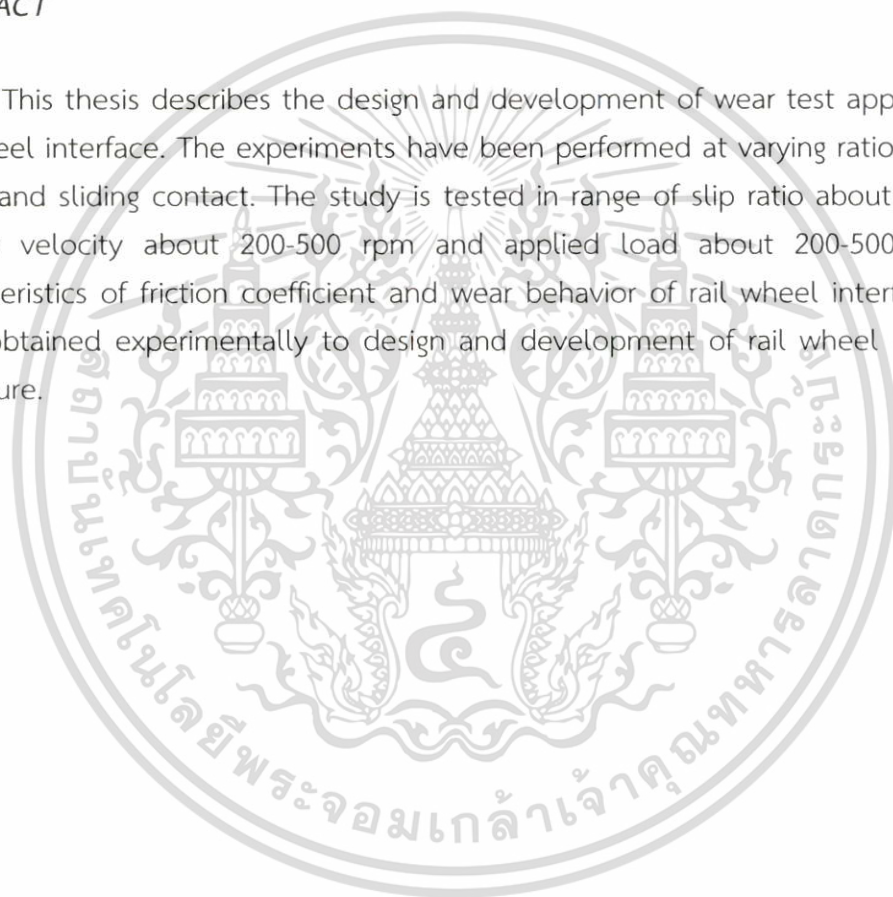
Suphachai Chotisiri 54011286

Assoc.Prof. Dr.Mongkol Mongkolwongrojn Advisor

Year 2014

ABSTRACT

This thesis describes the design and development of wear test apparatus on rail wheel interface. The experiments have been performed at varying ratio between rolling and sliding contact. The study is tested in range of slip ratio about 0 0.10, angular velocity about 200-500 rpm and applied load about 200-500 kg. The characteristics of friction coefficient and wear behavior of rail wheel interface have been obtained experimentally to design and development of rail wheel system in the future.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความรู้ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณสิริพงษ์ ดาวเจริญพร ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในด้านการออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง

ขอขอบคุณ คุณธนวัฒน์ โชติศิริ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำทางด้านระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้แก่ โหลดเซลล์ สเตรนเกจ และตัวส่งสัญญาณไร้สายพร้อมโปรแกรมการรับ-ส่งสัญญาณ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องอุปกรณ์เครื่องมือ คณะเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและกำลังใจในการทำงาน สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน

นายธนดี
นายภัทร์
นายศุภชัย

อินทรเทศ
วิจารณ์กรณ
โชติศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz Contact Theory).....	3
2.2 ทฤษฎีของเฮิร์ตสำหรับการสัมผัสแบบอีลาสติก (Hertz Elastic Contact Theory).....	4
2.3 การสึกหรอ (Wear).....	4
2.3.1 สมการพื้นฐานของการสึกหรอ (Archard's Wear Equation).....	5
2.4 แรงเสียดทาน (Friction Force)	5
2.4.1 การเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction).....	6
2.4.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction).....	9
2.4.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient).....	10
2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย.....	12
2.5.1 (Strain Gauge).....	12
2.5.2 อุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูลและโปรแกรม.....	12
2.5.3 โหลดเซลล์ (Load Cell).....	13
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	14
3.1 การทดลองและชุดทดลอง.....	14
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	16
3.3 ชุดล้อและรางในการทดสอบ.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.3.1	แบบของแผ่นล้อรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ.....	18
3.3.2	แบบของแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ.....	19
3.4	การคำนวณขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า.....	20
บทที่ 4	การออกแบบการทดลองและชุดทดลอง.....	21
4.1	การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	21
4.2	การสอบเทียบแรงบิด.....	22
บทที่ 5	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	24
5.1	การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	24
5.1.1	พื้นผิวสัมผัสแบบแห้ง.....	24
5.1.2	พื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมัน.....	25
5.1.3	พื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมันผสมผงถ่าน.....	26
5.2	พฤติกรรมการสึกหรอ.....	27
5.2.1	พฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้ง.....	27
5.2.2	พฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การสัมผัสแบบไถ.....	28
บทที่ 6	สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	30
6.1.1	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวสัมผัสแบบแห้ง.....	30
6.1.2	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมัน.....	30
6.1.3	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมันผสมผงถ่าน.....	30
6.1.4	การสึกหรอ.....	31
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....		32
ภาคผนวก.....		33
ภาคผนวก ก.....		34
ภาคผนวก ข.....		35
ภาคผนวก ค.....		36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน.....	11
3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก JIS เหล็ก S45C.....	17
3.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก JIS เหล็ก SCM440.....	17
3.3 การแบ่งประเภทของล้อยรถไฟตามมาตรฐาน ASTM A504-89.....	18



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) ทรงกระบอก 2 อันมีความยาว l ที่สัมผัสกันด้วยแรงกด F และ.....	3
(ข) ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรูปวงรีที่มีความกว้างเท่ากับ $2b$	
2.2 พื้นผิวสัมผัสแบบอีลาสติกของทรงกระบอก 2 ชิ้น.....	4
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	6
2.4 แสดงถึงการเสียดทานแบบไถล.....	6
2.5 แสดงถึงผิวสัมผัสจริงกับผิวสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิร์ต.....	7
2.6 แสดงถึงพื้นผิวการเปลี่ยนรูปถาวรในกรณีเกิดการไถล.....	8
2.7 แสดงถึงการสัมผัสแบบกลิ้ง.....	9
2.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์ของการยึดเกาะและ..... สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขที่สะอาดและมีการปนเปื้อน เส้นทึบแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะและเส้นประแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน	10
2.9 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะที่ต้องการในการขนส่งทางรถไฟ.....	11
2.10 Strain Gauge.....	12
2.11 แสดงถึงตัวส่งข้อมูลแบบไร้สาย Wi-Fi Module.....	12
2.12 โหลดเซลล์ (Load Cell).....	13
3.1 แผนภาพจำลองชุดทดลองพฤติกรรมการศึกษาหรือล้อและรางรถไฟ.....	14
3.2 (a) พื้นผิวแบบแห้ง (b) พื้นผิวแบบน้ำมัน (c) พื้นผิวแบบน้ำมันผสมผงถ่าน.....	15
3.3 (a) การสัมผัสแบบกลิ้ง (Rolling) (b) การสัมผัสแบบไถล (Sliding).....	16
3.4 (ก) แผนภาพขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	16
3.5 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นล้อ.....	18
3.6 แบบของแผ่นล้อที่ใช้ในการทดลอง 3 มิติ และ 2 มิติด้านข้าง.....	19
3.7 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นล้อ.....	19
3.8 2 D Dimensions of Wheel and Rail	19
4.1 แสดงถึงวิธีการในการติด Strain Gauge เพื่อวัดค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณเพลลา.....	21
4.2 แสดงถึงตัวส่งข้อมูลแบบไร้สาย Wi-Fi Module	21
4.3 แสดงถึงการสอบเทียบแรงบิด.....	22
4.4 แสดง Flow Chart ของการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	23
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำ..... ภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกลิ้งพื้นผิวแห้ง	24
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำ.....	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำ.....	25
ภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกลิ้งพื้นผิวน้ำมัน	
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำ.....	25
ภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบไถลพื้นผิวน้ำมัน	
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำ.....	26
ภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกลิ้งพื้นผิวน้ำมันผสมผงถ่าน	
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำ.....	26
ภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบไถลพื้นผิวน้ำมันผสมผงถ่าน	
5.7 แสดงพฤติกรรมการสึกหรอเฉลี่ยของล้อภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้งที่ความเร็ว 390RPM.....	27
และ490 RPM	
5.8 แสดงอัตราของพฤติกรรมการสึกหรอเฉลี่ยของล้อภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้งที่ความเร็ว.....	28
390RPM และ490 RPM	
5.9 แสดงพฤติกรรมการสึกหรอของล้อภายใต้การสัมผัสแบบไถล.....	28
5.10 แสดงอัตราของพฤติกรรมการสึกหรอเฉลี่ยของล้อภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้งที่ความเร็ว.....	29
390RPM และ490 RPM	
ก-1 แบบจำลองอย่างง่าย.....	33
ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปกับแรงบิดที่เกิดขึ้น.....	34
ข-2 แสดง User Interface ของโปรแกรมที่เก็บข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	34
ค-1 แสดง User Interface ของโปรแกรมที่เก็บข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อภา VIII เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขนส่งทางราง ถือเป็นกิจกรรมคมนาคมแบบหนึ่งที่มีประโยชน์เป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย โดยถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องและประเทศไทยได้ริเริ่มนำเอาเทคโนโลยีทางระบบรางมาใช้เช่น รถไฟ รถไฟฟ้าหรือรถไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อทำให้เกิดสะดวกต่อการขนส่งมวลชน, การขนส่งสินค้า และช่วยให้ประเทศมีความเจริญก้าวหน้าในด้านการคมนาคม การติดต่อค้าขายเพื่อพร้อมที่รองรับการเข้าร่วมประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน

ในปัจจุบันงานวิจัยและการศึกษาทางด้านการคมนาคมและขนส่งทางรางมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับประโยชน์ในการใช้งานทางด้านการคมนาคมและขนส่งทางรางของประเทศไทย ซึ่งอาจจะทำให้สูญเสียเวลาในการวิเคราะห์ปัญหาหรือการพัฒนาที่ไม่ตรงจุด และปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญคือ ปัญหาด้านการสึกหรอของล้อและรางรถไฟซึ่งการสึกหรอนั้นส่งผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อและรางมีค่าที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดการไถล ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในกรณีรถไฟลดความเร็วหรือเบรคและกรณีที่ขณะรถไฟวิ่ง

ดังนั้นในการศึกษาและวิจัยนี้จึงได้สร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่าที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกลิ้ง และแบบไถล โดยชุดทดลองสามารถปรับเปลี่ยนน้ำหนักที่กระทำกับล้อและความเร็วของล้อได้ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแต่ละเงื่อนไขการสัมผัสและนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของล้อและรางที่เกิดขึ้น ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เหมาะสมนั้นจะสามารถลดอัตราการสึกหรอได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและรางภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้ง และแบบไถล
2. วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มีค่าเหมาะสม และนำไปปรับใช้เพื่อลดอัตราการสึกหรอ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. น้ำหนักมีผลโดยตรงกับการสึกหรอ
2. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการสัมผัสแบบไถล ซึ่งส่งผลให้เกิดอัตราการสึกหรอที่มากกว่าปกติ
3. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่ามากจะทำให้เกิดการสัมผัสแบบกลิ้ง ซึ่งส่งผลให้เกิดอัตราการสึกหรอแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและรางภายใต้การสัมผัสแบบกึ่งและแบบไกล โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อกับราง น้ำหนักที่กระทำกับล้อ และความเร็วของล้อ มาวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการสึกหรอ ซึ่งชุดทดลองสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วและน้ำหนักที่มากระทำกับล้อ เพื่อให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองและชุดการทดลอง โดยอ้างอิงจากมาตรฐานและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์
4. สร้างชุดศึกษาทดลอง
5. ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกรณีต่างๆ
6. ทำการทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของล้อและราง
7. วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เหมาะสม

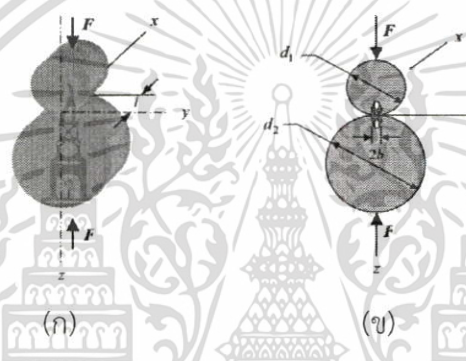
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ผิวของล้อและรางเป็นแบบผิวเรียบ (Smooth surface)
2. ลักษณะพื้นที่สัมผัสของล้อและรางรถไฟเป็นรูปวงรี (Elliptical Contact Shape)

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz Contact Theory)

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟจริง ให้อยู่ในรูปของชุดทดลอง จะต้องมีการหาค่าของตัวแปรต่างๆเพื่อที่จะทำให้การทดลองเสมือนกับของจริง หนึ่งในตัวแปรสำคัญคือโหลดที่กระทำกับล้อรถไฟ ซึ่งสามารถหาได้จากทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ซึ่งจากการทดลองเป็นการสัมผัสของทั้งล้อและรางรถไฟจะเป็นแบบการสัมผัสของทรงกระบอก 2 อัน (Cylinder-Cylinder Contact)



รูปที่ 2.1 ก) ทรงกระบอก 2 อันมีความยาว l ที่สัมผัสกันด้วยแรงกด F และ
ข) ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรูปร่างรีที่มีความกว้างเท่ากับ $2b$

ขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้จาก

$$b = K_b \sqrt{F} \tag{2.1}$$

โดยที่
$$K_b = \sqrt{\frac{2(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{\pi l (1/d_1 + 1/d_2)}} \tag{2.2}$$

F : แรงที่กระทำ

ν_1, ν_2 : ค่า Poisson Ratio ของทรงกระบอก 1 และ 2

E_1, E_2 : ค่า Young Modulus ของทรงกระบอก 1 และ 2

d_1, d_2 : เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก 1 และ 2

* ในการหาค่า b ทรงกระบอกที่สัมผัสกับแนวระนาบ เช่น รางรถไฟ เราจะได้ $d_2 = \infty$

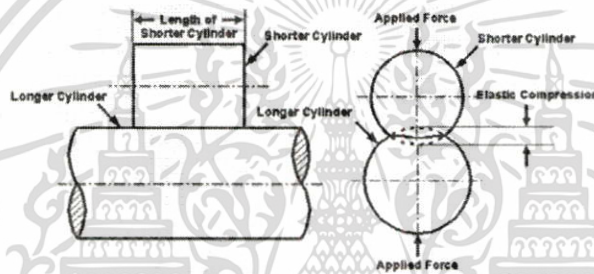
ค่าความดันสัมผัสสูงสุดระหว่างทรงกระบอก 2 อัน เกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$p_{\max} = \frac{2F}{\pi bl} \quad (2.3)$$

2.2 ทฤษฎีของเฮิร์ตสำหรับการสัมผัสแบบอีลาสติก (Hertz Elastic Contact Theory)

ลักษณะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นแบบรูปวงรี ซึ่งการเกิดความดันในพื้นที่ผิวสัมผัสจะถูกพิจารณาแบบ General Profiles โดยความดันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา ภายใต้พื้นที่ผิวสัมผัสที่สมการดังนี้

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 - 1 = 0 \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 พื้นที่ผิวสัมผัสแบบอีลาสติกของทรงกระบอก 2 ชิ้น

จะได้สมการในการสร้างรูปแบบการเกิดความดันตามทฤษฎีของเฮิร์ตดังนี้

$$p = p_{\max} \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)^2 \quad (2.5)$$

และโหลดทั้งหมดที่กระทำบนพื้นที่สัมผัสวงรีหาได้จาก

$$F_{\text{Total}} = \left(\frac{2}{3}\right) p_{\max} \pi ab \quad (2.6)$$

2.3 การสึกหรอ (Wear)

การสึกหรอของวัสดุโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสีกันของผิวสัมผัส อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาของการสัมผัส ซึ่งมีตัวประกอบอื่นๆ ที่ต้องพิจารณาอีกมากมาย เช่น ลักษณะของผิวสัมผัส อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุ ความแข็ง ความเปราะ และอื่นๆ

2.3.1 สมการพื้นฐานของการสึกกร่อน (Archard's Wear Equation)

$$Q = \frac{kWl}{H} \quad (2.7)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การสึกกร่อน (Wear Coefficient)

W = แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Normal load), N

l = ระยะทางของการเคลื่อนที่ (Sliding Distance), m

Q = ปริมาตรของการสึกกร่อน (Volume Removed), mm³

2.5.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การสึกกร่อน

1. ภาระโหลดที่ใช้ในการทดสอบ
2. ความเร็วในการทดสอบ
3. ความเรียบหรือความหยาบของผิวสัมผัส
4. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุที่นำมาทดสอบ
5. ความแข็งของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียว
6. ชนิดของการหล่อลื่น ปริมาณของการหล่อลื่น ความหนาของชั้นผิวน้ำมัน
7. อุณหภูมิของการทดลอง
8. อื่นๆ

2.4 แรงเสียดทาน (Friction Force)

ความเสียดทานเป็นแรงต้านทานการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิว 2 ผิว ลักษณะของการเคลื่อนที่อาจเป็นการเลื่อนไถล (Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลว หรือมีฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมผัส ปัญหาสำคัญของความเสียดทาน คือ การที่ผิวเกิดความเสียดทานระหว่างผิววัสดุ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบ เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้ พลังงานที่สูญเสียไปนี้เมื่อนามา รวมกัน พบว่ามีมูลค่ามหาศาล การศึกษาที่มุ่งเน้นในการลดแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากใน วิทยาการสมัยใหม่ทั้งในการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และการออกแบบระบบให้ เกิดความเสียดทานน้อยที่สุด เป็นต้น แต่ในบางกรณีความเสียดทานก็เป็นที่ต้องการ เช่น การเดิน การ ขับเคลื่อนของรถยนต์ การหยิบจับสิ่งของ ถ้าไม่มีความเสียดทานระหว่างผิว กิจกรรมต่างๆเหล่านี้จะ เกิดขึ้นไม่ได้ ดังนั้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานระหว่างผิว กิจกรรมต่างๆเหล่านี้ก็จะเกิดขึ้นไม่ได้ ดังนั้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานจึงประกอบด้วยการศึกษาเพื่อลดความเสียดทานให้ ต่ำที่สุดในกรณีที่ไม่ต้องการ และการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานให้เพียงพอกับความต้องการในการ ทำงานบางอย่าง นอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่ต้องการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานในช่วงเวลาแคบๆ ให้สามารถควบคุมได้ เช่น ในระบบเบรกรถยนต์ ซึ่งการทำงานของเบรกไม่ต้องการให้หยุดในทันที ต้องมี ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดของรถไม่ให้ช้าหรือเร็วจนเกินไปเพื่อการนุ่มนวลในการขับขี่ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

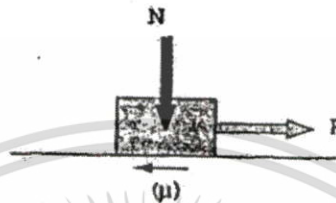
โดยสมการสำหรับแรงเสียดทาน คือ

$$F = \mu N \quad (2.8)$$

เมื่อ μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

F = แรงที่ทำให้เคลื่อนที่

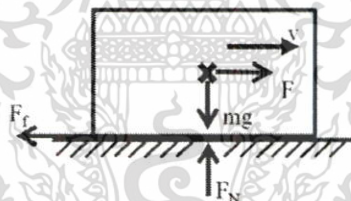
N = แรงตั้งฉาก, น้ำหนัก



รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ขนาดหรือระดับของค่าความเสียดทาน โดยทั่วไปเราใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นตัววัดค่า โดยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถคำนวณหาได้ตามรูปที่ 2.3

2.4.1 การเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)



รูปที่ 2.4 แสดงถึงการเสียดทานแบบไถล

ผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่ค้นพบเรื่องความเสียดทาน คือ Leonardo da Vinci หลังจากนั้น Amontons ได้ทำการสังเกตและตั้งกฎพื้นฐานความเสียดทานไว้ 2 ข้อ ซึ่งได้รับการกล่าวถึง และมีการนำไปอ้างอิงเป็นที่แพร่หลาย ต่อมากฎข้อที่ 3 ก็ได้ตั้งขึ้นมาจากการสังเกตของ Coulomb ซึ่งมี เนื้อหาดังนี้ คือ

กฎข้อที่ 1 แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงตั้งฉาก ($F = \mu N$)

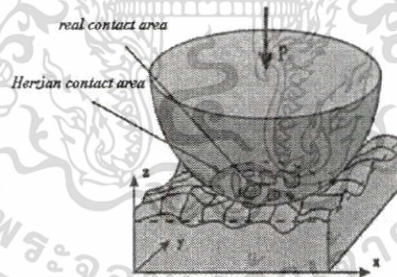
กฎข้อที่ 2 ความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส (Apparent area of contact)

กฎข้อที่ 3 แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

กฎข้อที่ 1 และ 2 โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับ มีเพียงบางกรณีที่ไม่เป็นไปตามกฎ เช่น ในกรณีวัสดุที่แข็งมากๆ เช่น เพชร หรือกรณีที่วัสดุอ่อนมากๆ เช่น PTFE (Teflon) พบว่าอาจเกิดความสัมพันธ์แบบ ยกกำลัง ($F = CN^x$) ได้ นอกจากนี้ในกรณีที่วัสดุอ่อนนุ่มแต่ฟิล์มแข็งเคลือบอยู่ในสภาวะทำงานที่มีค่าความเค้นต่ำฟิล์มแข็งที่เคลือบอยู่จะมีผลกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น จึงเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดความเสียดทานระหว่างฟิล์มเคลือบกับวัตถุที่มากระทำ แต่เมื่อความเค้นที่มากระทำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ฟิล์มเคลือบแตก เนื้อของวัสดุภายในจะเป็นตัวที่มีอิทธิพลกับค่าความเสียดทานเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและแรงกดจึงเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 คือ กรณีที่ผิวงานเรียบมากและสะอาดมากจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสูง จึงทำให้แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเค้นที่มากระทำ แต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สัมผัส ส่วนของกฎข้อที่ 3 มีการโต้แย้งกันมาก จากที่ทราบทั่วไปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Static friction coefficient : μ_s) มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction coefficient : μ_k) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจะมีค่าแปรตามช่วงเวลาในการสัมผัสกันของผิว 2 ผิว ถ้าสัมผัสกันเป็นช่วงเวลาสั้นๆ μ_s มีค่าต่ำหรือมีค่าเทียบเท่ากับ μ_k และเมื่อ 2 ผิวสัมผัสกันเป็นระยะเวลานานก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนที่ μ_s มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic Flow) และเคลือบของวัสดุในส่วนของ μ_k มีการทดลองมากมายที่ยืนยันว่า μ_k แปรผันตามความเร็วของการเคลื่อนที่สัมผัส ซึ่งก็จะไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 3 จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าทั้ง 3 ข้อที่ตั้งขึ้นมานั้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาความเสียดทานเท่านั้น ในทางปฏิบัติ ต้องนำปัจจัยอื่นๆ มาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์หาค่าความเสียดทานด้วย

- กลไกพื้นฐานของการเกิดความเสียดทานแบบไถล เป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นผิวทางวิศวกรรมไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริง ถึงแม้มองเห็นว่าเรียบด้วยตาเปล่าแต่เมื่อมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะที่เป็นคลื่นขรุขระอยู่ แบบจำลองของความเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่สัมผัสกันจริง (Real Contact Area) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 แสดงถึงผิวสัมผัสจริงกับผิวสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิร์ต

สมมุติฐานว่า บริเวณที่สัมผัสกันของผิววัสดุจะเกิดความเค้นสูงที่จุดสัมผัสระหว่าง 2 ผิว เนื่องจากเป็นบริเวณเล็กๆ จึงเกิดเป็นการเชื่อมติดกัน และถูกเฉือนให้แยกออกจากกันเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัส ภายหลังจากพบว่า ความเค้นสูงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสไม่ได้เกิดการเชื่อมยึดติดกัน แต่มีแรงยึดเหนี่ยว อยู่ค่าหนึ่ง ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัส แรงที่ใช้ต้องมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวนี้ได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัส ส่วนที่เป็นยอดสูงของส่วนที่แข็งกว่าของคู่สัมผัส จะขูดลงบนผิวที่อ่อนกว่าเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจึงต้องการแรงหรือพลังงานอีกส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนรูป ของผิวที่อ่อนกว่า ดังนั้น แรงเสียดทานซึ่งเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัส F จึงต้องเอาชนะ แรงยึดเหนี่ยว F_d และแรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ F_d เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = F_a + F_d \quad (2.9)$$

- แรงยึดเหนี่ยว (Adhesive Force)

พื้นผิวเล็กๆบริเวณที่สัมผัสกันจริงจะเกิดการยึดเหนี่ยวซึ่งอาจเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาทางกายภาพหรือทางเคมี แรงยึดเหนี่ยวเกิดได้ง่ายบนพื้นผิวที่เรียบ สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรก ในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสได้นั้นจะต้องมีแรงกระทำที่เพียงพอในการฉีกเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวนี้ บริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดก็จะฉีกขาด ซึ่งอาจจะเป็นที่ผิวสัมผัส หรือเนื้อของวัสดุตัวใดตัวหนึ่งในกรณีที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสแข็งแรงกว่าเนื้อในของวัสดุตัวนั้น

จากทฤษฎีของ Bowden และ Tabor

กรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Dry friction) พบว่า	กรณีที่สารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Partial liquid) พบว่า
$F_a = A_r + \tau_a$	$F_a = A_r[\alpha\tau_a + (1 - \alpha)\tau_1]$

โดยที่ A_r คือ พื้นที่สัมผัสจริงของผิว

τ_a คือ ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว

α คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสจริงต่อพื้นที่สัมผัสทั้งหมด

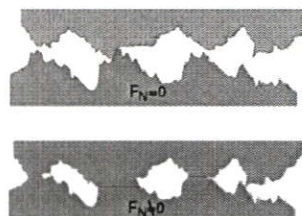
τ_1 คือ ค่าความแข็งแรงเฉือนของของเหลวที่คั่นอยู่

ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีของพื้นผิวทั้งคู่โดยทั่วไปความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวมีค่าต่ำ ถ้ามีพื้นที่สัมผัสจริงต่ำ เช่น ในกรณีมีฟิล์มบางกั้นหรือมีการใช้สารหล่อลื่น เพื่อลดบริเวณการสัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัส แต่ถ้าผิวสัมผัสกันในสุญญากาศ ไม่มีอนุภาคอื่น ๆ มากั้นระหว่างกลาง จะทำให้ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวสูง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็จะสูงด้วย

- แรงในการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation Force)

เนื่องจากบริเวณที่สัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัส มักเป็นบริเวณเล็กๆ ของยอดสูง (Asperity)

ขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่าง 2 ผิว จึงมักเกิดกลไกการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของผิวคู่สัมผัส ส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวสัมผัสที่แข็งแรงกว่าจะซูดไปบนผิวที่อ่อนกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเกิดการแตกหัก หรือการฉีกขาดของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า



รูปที่ 2.6 แสดงถึงพื้นผิวการเปลี่ยนรูปร่างถาวรในกรณีเกิดการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยที่ปรึกษาเพื่อใช้ในการฝึกอบรมเท่านั้น ผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น เพื่อให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์อย่างต่อเนื่อง แรงในการเคลื่อนที่จึงต้องมากเพียงพอในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่อ่อนกว่านอกเหนือจากนั้นผิววัสดุบางส่วนที่ถูกขูดจนเกิดการแตกหัก เมื่อหลุดออกจากผิวชิ้นงานก็จะกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งสูงเนื่องจากกลไกการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุที่ทำให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียด (*Work Hardening*) อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้มีอิทธิพลในการเพิ่มแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่เพราะสามารถขูดไปบนผิวชิ้นงานเหมือนกับส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวแข็ง ถ้าหากต้องการลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปวัสดุในส่วนนี้ สามารถทำได้โดยปรับสภาพผิวคู่สัมผัสให้มีความเรียบสูง ซึ่งช่วยลดปริมาณของยอดสูงและลดการเปลี่ยนรูปของวัสดุให้น้อยลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผิวที่มีความแข็งสูงต้องทำให้เรียบมากยิ่งขึ้น

2.4.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)



รูปที่ 2.7 แสดงถึงการสัมผัสแบบกลิ้ง

ในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างพื้นผิว ลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลิ้งเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า กล่าวคือ ระบบคู่สัมผัสจะต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ต่ำกว่าลักษณะการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล แต่ การเคลื่อนที่แบบกลิ้งมักเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่ว่าคู่สัมผัสหนึ่งมีลักษณะกลมหรือเกือบกลมเท่านั้น ใน กลไกของการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พลังงานในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของระบบจะต้องสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและแรงในการเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งก็เหมือนกับการเคลื่อนที่แบบไถล แต่มีความแตกต่างที่ทิศทางใน การเข้าหา (Approach) และการเคลื่อนที่ (Separation) ของบริเวณสัมผัสซึ่งจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉาก กับผิว ไม่ได้เกิดในทิศทางที่สัมผัสกับผิวเหมือนการไถล โดยปกติในขณะที่เกิดการกลิ้ง จะมีการเคลื่อนที่ รูปแบบอื่นอยู่ด้วย คือการไถลและการหมุนถึงแม้ว่าการไถลและการหมุนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในการ เคลื่อนที่แบบกลิ้ง แต่ก็เป็นตัวสร้างความต้านทานการเคลื่อนที่ ส่วนใหญ่ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดตาม สมการของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบกลิ้ง ดังต่อไปนี้

$$\mu_R = \frac{V_S}{V_R} \mu_K \quad (2.10)$$

โดยที่ V_S คือ ความเร็วของการไถล

คือ V_R ความเร็วของการกลิ้ง

คือ μ_K ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ในสภาวะการเคลื่อนที่แบบไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

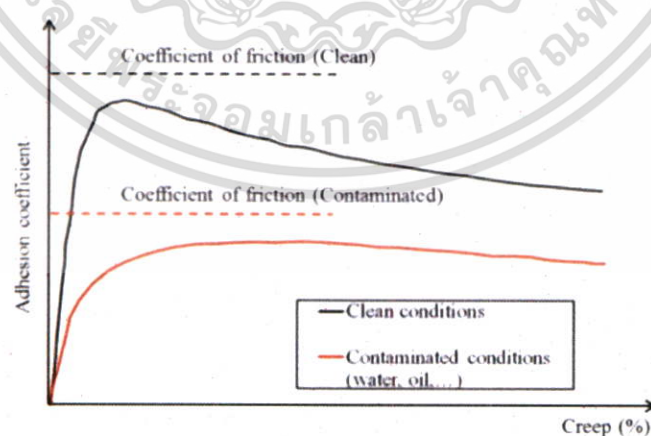
1. แรงเสียดทานแปรผกผันกับค่ารัศมีความโค้งของผิวที่กลิ้ง
2. ผิวที่เรียบจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าผิวที่หยาบ
3. ความเสียดทานสถิต (Static friction) มีค่าสูงกว่าความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction)

2.4.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient)

วัตถุวัสดุที่ต่างชนิดกันจะพื้นผิวรอยขรุขระที่ไม่เหมือนกันและมีลักษณะของความแข็งของพื้นผิวที่ไม่เหมือนกัน แรงเสียดทานจะต่างกัน ถ้าเลื่อนก้อนยางไปบนผิวของยาง จะทำได้ยากกว่าถ้าเลื่อนก้อนยางบนผิวของเหล็ก ตัวชี้บอกขนาดของแรงเสียดทานของวัสดุต่างๆที่นิยมคือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน คือ อัตราส่วนของแรงกระทำ กับน้ำหนักของวัตถุ ดังนั้นถ้าพื้นสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเท่ากับ 1 หมายความว่า ต้องออกแรงขนาด 10 กิโลกรัม ผลักน้ำหนักที่มีขนาด 10 กิโลกรัม แต่ถ้าพื้นนั้นลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานให้เหลือเท่ากับ 0.1 จะออกแรงเพียง 1 กิโลกรัม ก็ทำให้น้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัมเคลื่อนที่ได้

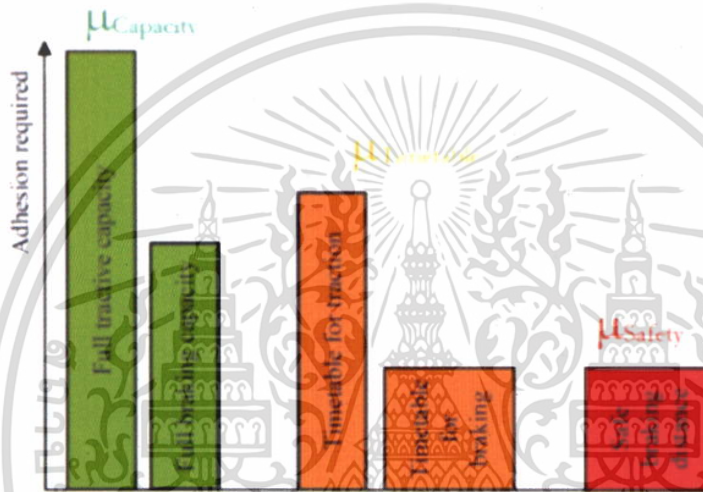
ในความเป็นจริง เพราะส่วนหนึ่งของแรงเสียดทานจะใช้แรงต้านข้างและแรงของการหมุน และยังเพราะภาระที่ไม่เท่ากันของการกระจายระหว่างเพลลาและล้อ, การยึดเกาะสูงสุด (หรือการเสียดทาน) ในทิศทางตามแนวยาวจะมีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานทั้ง ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการยึดเกาะส่วนใหญ่ จะกำหนดให้แรงเสียดทานใช้ได้เฉพาะเมื่อเกิดการยึดเกาะ สัมประสิทธิ์การยึดเกาะและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะแสดงในรูปที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีขนาดใหญ่กว่าค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะภายใต้เงื่อนไขทั้งสะอาดและการปนเปื้อน ปล.ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแสดงมรูปของค่าคงที่เพื่อใช้ในเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและแรงยึดเกาะ ในความเป็นจริงสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานไม่คงที่



รูป 2.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์ของการยึดเกาะและสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขที่สะอาดและมีการปนเปื้อน เส้นทึบแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะและเส้นประแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ของการยึดเกาะที่ต้อง สามารถแบ่งออกเป็น3ประเภท : 1)การขับเคลื่อนหรือเบรกของรถไฟขณะที่บรรทุกเต็มความจุ(Capacity) 2)การควบคุมรถไฟให้ตรงตามตารางเวลาที่กำหนด(Timetable) และ 3)การควบคุมรถบนความปลอดภัย(Safety) รูปที่ 2.9 แสดงเป็นแผนผังค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะทั้งสามประเภท เป็นข้อสังเกตได้ว่า สัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่ต้องนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของรถไฟ, ประเภทของรางรถไฟ, ระบบเบรก, จำนวนเพลลาขับ , ฯลฯ ตัวอย่างเช่นรถไฟฟ้าใต้ดินหรือรถไฟโดยสารมักจะต้องการเร่งและการชะลอตัวค่อนข้างสูง เนื่องจากมีช่วงเวลาสั้นๆระหว่างจากสถานีไปอีกสถานี รถไฟใต้ดินวัดค่าความเร่งได้ 1.5 m/s^2 และต้องการค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะอย่างน้อย 0.15 เป็นรูปแบบอย่างง่ายที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเร่งกับการลดความเร็วและค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะที่ต้องการในการขนส่งทางรถไฟ

ในทางกลับกัน สัมประสิทธิ์การยึดเกาะจะถูกจำกัดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อและราง แม้จะมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น การกระเด็นสั่นสะเทือนแบบไม่คงที่ สำหรับเหล็ก-เหล็กภายใต้เงื่อนไขแบบแห้งสะอาดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานประมาณ 0.6 แต่อย่างไรก็ตามล้อและรถไฟเป็นระบบเปิดซึ่งอาจมีสิ่งปนเปื้อนระหว่างผิวสัมผัส และส่งผลกระทบท่อระดับแรงเสียดทาน ทำให้แรงยึดของล้อและรางรถไฟสูงเกินไปหรือต่ำเกินไป ตารางที่ 1.2 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขบางอย่างที่แสดงอยู่ในตารางด้านล่างซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1 นั้นหมายถึงสัมประสิทธิ์การยึดเกาะจริงจะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเพื่อความปลอดภัย

Conditions	Temperature (°C)	Friction coefficient
Sunshine, dry rail	19	0.6–0.7
Recent rain on rail	5	0.2–0.3
A lot of grease on rail	8	0.05–0.1
Damp leaf film on rail	8	0.05–0.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย

2.5.1 (Strain Gauge)

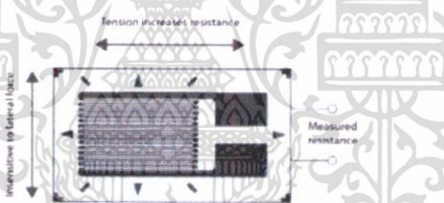
Strain Gauge คืออุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดความเครียดของชิ้นงานเมื่อมีแรงกระทำต่อชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า ซึ่ง Strain Gauge ที่ติดอยู่บนผิวชิ้นงานจะทำหน้าที่เหมือนตัวต้านทานในวงจร Wheatstone Bridge

Strain Gauge จะประกอบไปด้วยขดลวดที่ทำจากโลหะผสมความไวของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียด (SA) สูงเมื่อโลหะถูกแรงกระทำจะเกิดความเครียดขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของลวดไฟฟ้าเทียบกับโลหะผสมจะได้ค่าของความไวของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียดของโลหะผสม (SA, Strain Sensitivity of Alloy) ตามสมการ

$$S_A = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\epsilon_a} \quad (2.11)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้ามี หน่วยเป็น Ohm

ϵ_a คือ ความเครียดของโลหะผสม



รูปที่ 2.10 Strain Gauge

2.5.2 อุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูลและโปรแกรม

Wi-Fi Module คือ อุปกรณ์รับ-ส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายโดยใช้คลื่นวิทยุ ซึ่งมีความสะดวกและรวดเร็วในการส่งผ่านข้อมูล

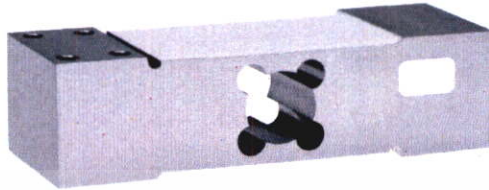


รูปที่ 2.11 แสดงถึงตัวส่งข้อมูลแบบไร้สาย WiFi Module

SmartSniff คือ โปรแกรมที่ใช้ในการตรวจสอบและดักจับชุดข้อมูล (Packets) ที่วิ่งผ่านใน Network ผ่านช่องทาง TCP/IP และสามารถเรียกดูข้อมูลการสื่อสารที่ส่งผ่านถึงกันระหว่าง Client และ server ได้ โดยออกมาเป็นรหัสภาษา ASCII ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 โหลดเซลล์ (Load Cell)



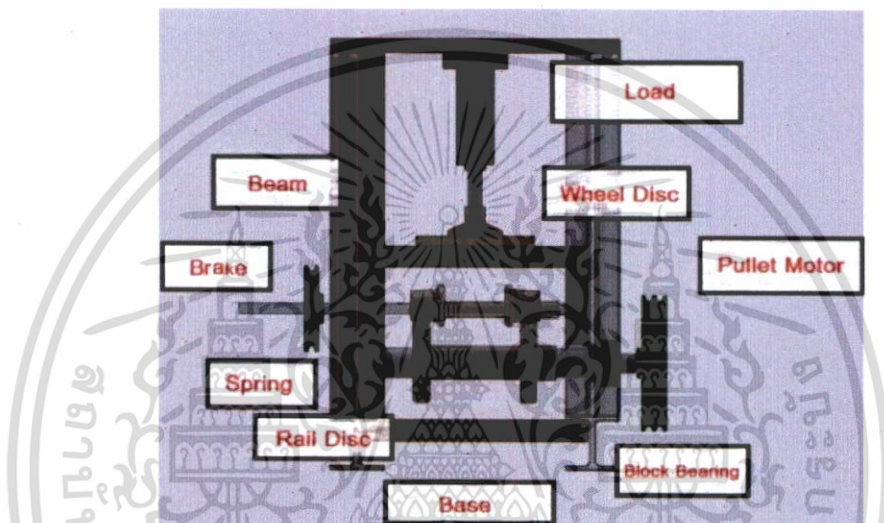
รูปที่ 2.12 โหลดเซลล์ (Load Cell)

โหลดเซลล์ คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Transducer) การแปลงค่านี้ไม่ใช่การแปลงค่าโดยตรงหากแต่เกิดขึ้นสองขั้นตอน จากการแปลงค่าทางกลศาสตร์ แรงจะถูกตรวจจับได้จากการเปลี่ยนรูปร่างของ Strain Gauge และจะแปลงค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (ความเครียด) นี้ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โหลดเซลล์มักจะประกอบไปด้วย Strain Gauge สี่ตัวซึ่งจัดเรียงวงจรในรูปแบบของ Wheatstone Bridge แต่โหลดเซลล์ที่ประกอบด้วย Strain Gauge หนึ่งหรือสองตัวก็มีใช้เช่นกัน สัญญาณไฟที่จ่ายออกไปนี้มักจะมีขนาดเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์และต้องการการขยายสัญญาณด้วยการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณก่อนที่จะถูกนำไปใช้งาน

บทที่ 3 การดำเนินงาน

3.1 การทดลองและชุดทดลอง

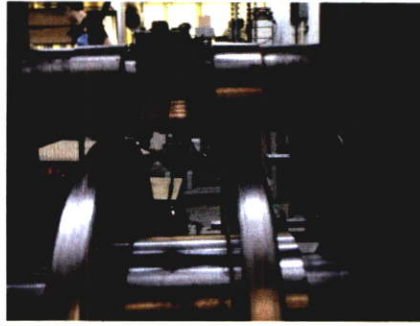
ในการทดลองใช้ชุดทดลองซึ่งจำลองมาจากการเคลื่อนที่ของล้อและรางรถไฟจริง โดยย่อขนาดให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมและสามารถทดลองจริงได้



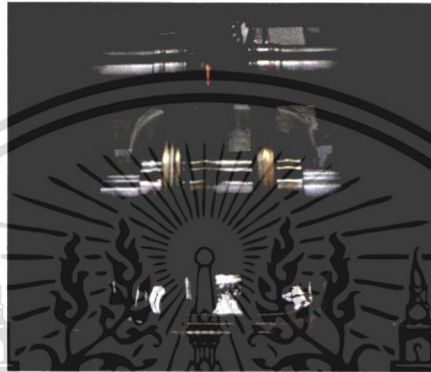
รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองชุดทดลองพฤติกรรมการศึกษาหรือล้อและรางรถไฟ

ชุดทดลองนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 15 กิโลวัตต์ 1 ตัวที่เพลาของแผ่นรางรถไฟซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203.2 มิลลิเมตร และขับเคลื่อนล้อรถไฟซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร มีโหลดเป็นแม่แรงกระทำในแนวรัศมีขนาด 50 100 และ 150 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งวัดแรงที่กระทำโดยโหลดเซลล์ และทดลองภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกึ่งและการสัมผัสแบบไกลภายใต้ความเร็วรอบ 331RPM 390RPM 490RPM ของความเร็วแบบกึ่งและความเร็วแบบไกลมีค่า 298RPM 356RPM และ 441RPM โดยสภาพพื้นผิวสัมผัสแบบแห้ง แบบน้ำมัน และน้ำมันผสมผง ถ่านโดยมีการควบคุมปริมาณของน้ำมันให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ตามรูปที่ 3.2a,b,c ตามลำดับ เพื่อพิจารณาหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากแรงบิดที่เทียบกับภาระที่ได้รับ และทำการทดลองหาพฤติกรรมการศึกษาหรือโดยสภาพพื้นผิวแบบแห้งภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกึ่งและการสัมผัสแบบไกล ที่ภาระโหลด 150 กิโลกรัม และความเร็ว 390RPM 490RPM ตามลำดับ โดยแสดงตามรูปที่ 3.3a และ 3.3b ซึ่งในแต่ละกรณีของการทดลองหาการศึกษาหรือจะทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อที่เปลี่ยนไปซึ่งหมายถึงความสึกหรอผิวสัมผัสที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องมือวัดไดอัลเกจ วัดความสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.2a แสดงถึงพื้นผิวแบบแห้ง



รูปที่3.2b แสดงถึงพื้นผิวแบบน้ำมัน



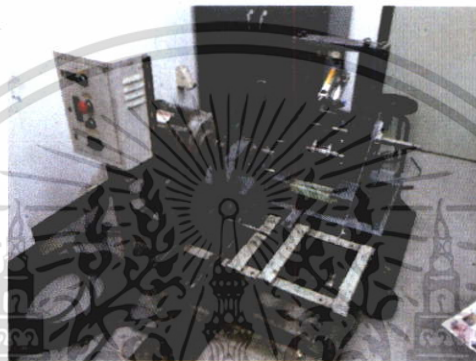
รูปที่3.2c แสดงถึงพื้นผิวแบบน้ำมันผสมผงถ่าน

ซึ่งในกรณีที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อและรางมีน้ำมันนั้นจะมีการควบคุมปริมาณของน้ำมันตลอดการทดลอง โดยใช้การมอนิเตอร์ตามระดับอ่างน้ำมันให้มีค่าที่จุดเดิมเสมอ ซึ่งใช้น้ำมันเครื่อง ยี่ห้อ Ptt เกรด SAE 90 มาทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

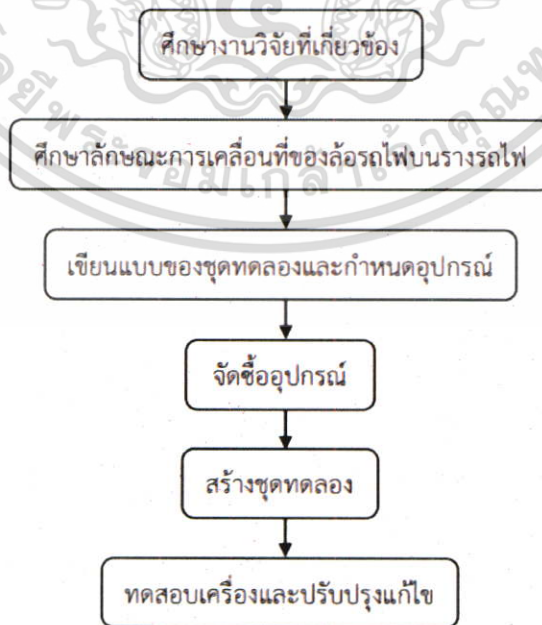


รูปที่3.3a การสัมผัสแบบกลิ้ง (Rolling)



รูปที่3.3b การสัมผัสแบบไถล (Sliding)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่3.4 แผนภาพขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชุดล้อและรางในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ทำล้อชุดทดลองคือ เหล็ก S45C และรางชุดทดลองคือ เหล็ก SCM440 ซึ่งเป็นวัสดุเหล็กตามมาตรฐาน JIS ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้

MECHANICAL PROPERTIES	METRIC
TENSILE STRENGTH	569 MPa
YIELD STRENGTH	343 MPa
SHEAR MODULUS	80 GPa
BULK MODULUS	140 GPa
ELASTIC MODULUS	205 GPa
POISSON'S RATIO	29 %
ELONGATION AT BREAK	20 %

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก JIS เหล็ก S45C

MECHANICAL PROPERTIES	METRIC
TENSILE STRENGTH	814 MPa
YIELD STRENGTH	485 MPa
SHEAR MODULUS	80 GPa
BULK MODULUS	160 GPa
ELASTIC MODULUS	205 GPa
POISSON'S RATIO	29%
ELONGATION AT BREAK	22.2 %

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก JIS เหล็ก SCM440

โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการทำล้อและรางรถไฟได้เลือกมาตามมาตรฐาน AAR M107 และ ASTM A504-89 ซึ่งจัดประเภทของล้อรถไฟแบ่งเป็น 5 ประเภท คือ ประเภท U, L, A, B และ C โดยวัสดุที่ใช้จัดอยู่ในล้อรถไฟประเภท L

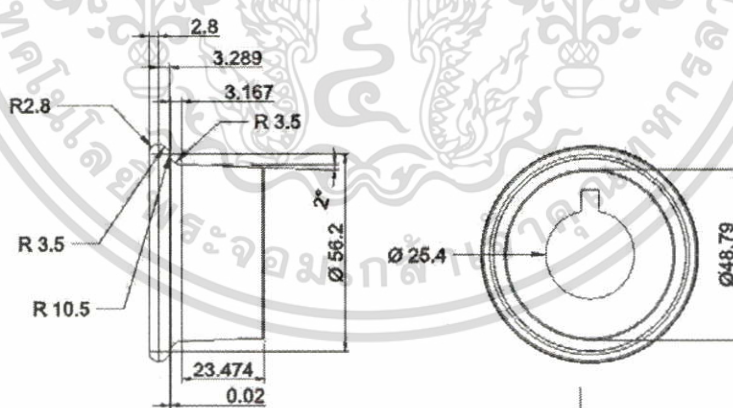
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Class	w/o C	BHN	Service Condition
U	0.65-0.77	-	General service where an untreated wheel is satisfactory
L	≤ 0.47	197-277	Light wheel loads, high speed service, more severe braking conditions than other classes
A	0.47-0.57	255-321	Moderate wheel loads, high speed service, severe braking conditions
B	0.57-0.67	277-341	Heavy wheel loads, high speed service, severe braking conditions
C	0.67-0.77	321-363	(1) High wheel loads under light braking (2) Heavier braking conditions employing off-tread brakes

ตาราง 3.3 การแบ่งประเภทของล้อรถไฟตามมาตรฐาน ASTM A504-89

3.3.1 แบบของแผ่นล้อรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ

แผ่นล้อที่ใช้ในการทดสอบ มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงโคน (Cone shape) ซึ่งเหมือนกับล้อรถไฟจริงเพียงแต่ถูกย่อขนาดให้เล็กลงเพื่อให้สามารถทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดเท่ากับ 67.4 มิลลิเมตร และมีความเอียงของหน้าผิวล้อตรงบริเวณโคนเท่ากับ 2 องศา



รูปที่ 3.5 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นล้อ

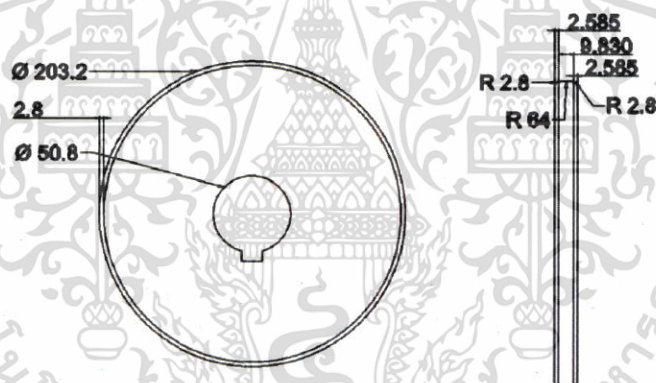
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



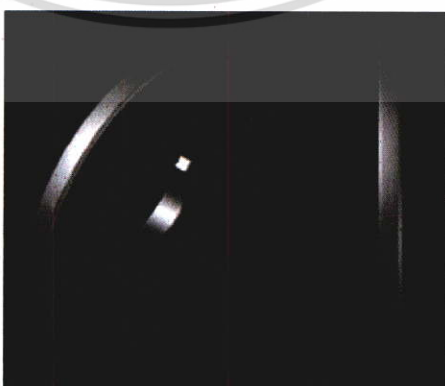
รูปที่ 3.6 แบบของแผ่นล้อที่ใช้ในการทดลอง 3 มิติ และ 2 มิติด้านข้าง

3.3.2 แบบของแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ

แผ่นรางที่ใช้ในการทดสอบถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมือนกับรางรถไฟจริงโดยมี ซึ่งมีความหนาเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดเท่ากับ 203.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.7 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นล้อ



รูปที่ 3.8 2D Dimensions of Wheel and Rail

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การคำนวณขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า

ความต้องการกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าหาได้จาก

$$P = \mu_T F \cdot v$$

เมื่อ $\mu_T = 0.5$ และ $\omega = 500$ รอบต่อนาที

โดยความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของรางสามารถหาได้จาก

$$V = \omega \cdot r = \left(\frac{2\pi(500)}{60} \right) (55 \times 10^3)$$

ซึ่งจะได้ความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของรางเท่ากับ 10.6290 เมตรต่อวินาที

และความต้องการกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= (0.5) \cdot (150 \times 9.81) \cdot (10.6290) \\ &= 7820.29 \text{ W} = 7.82 \text{ kW} \end{aligned}$$

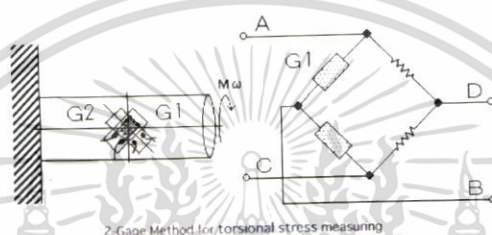
ดังนั้น มอเตอร์ไฟฟ้าควรมีขนาดเท่ากับ 15 กิโลวัตต์ (ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.92)

บทที่ 4

การออกแบบการทดลองและชุดทดลอง

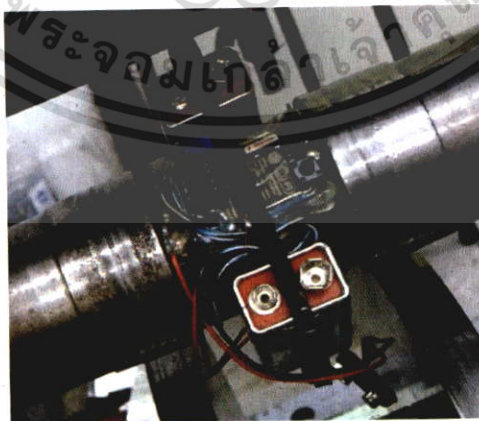
4.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นอาศัยหลักการของ Friction Torque โดยวัดจากค่าแรงบิดของเพลลาที่เกิดขึ้น ในกรณีที่มีแรงในแนวตั้งฉากหรือภาวะโหลดที่กระทำกับเพลลา ซึ่งได้ติดตั้ง Strain Gauge ไว้ที่เพลลาของล้อเพื่อวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณเพลลา



รูปที่ 4.1 แสดงถึงวิธีการในการติด Strain Gauge เพื่อวัดค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นบริเวณเพลลา

ซึ่งได้ติดตั้ง Strain Gauge แบบวัดความเครียดเฉือน (Shear Strain) รุ่น GFLA-3-50 ยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo ซึ่งมีค่าความต้านทาน 120 ± 0.3 โอห์ม มีค่า Gauge Factor $2.09 \pm 1\%$ โดยติดตั้ง 2 ตัว วงจรแบบ Half Bridge ทำมุม 45° ต่อกัน เพื่อวัดค่า Max Shear Strain ที่เกิดขึ้น ซึ่งความเครียดเฉือนที่วัดได้จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรจาก WiFi Module เป็นตัวส่งข้อมูลที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า มายังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อกำหนดหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



รูปที่ 4.2 แสดงถึงตัวส่งข้อมูลแบบไร้สาย Wi-Fi Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ถูกส่งจากตัวส่งข้อมูลไร้สายจะถูกนำไปรันบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า Smartsniff ซึ่งจะบันทึกข้อมูลเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ซึ่งถูกควบคุมให้บันทึกข้อมูลทุกวินาที ซึ่งค่าเหล่านั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการสอบเทียบค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นโดยที่แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$T = F * r \quad (4.1)$$

$$F = \mu N \quad (4.2)$$

$$\mu = \frac{T}{N * r} \quad (4.3)$$

$$\mu = \frac{T}{m * g * r} \quad (4.4)$$

โดยที่ μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
 F คือ Friction Torque, N
 T คือ Torque, N.m
 r คือ ระยะจากจุดหมุนถึงแนวแรง, m
 m คือ ภาระโหลดที่กระทำกับเพลาสล้อ, kg

4.2 การสอบเทียบแรงบิด

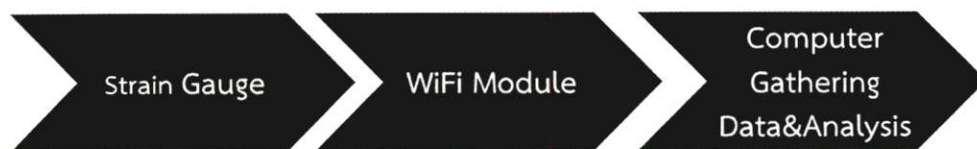
ในการที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นเราจำเป็นต้องสอบเทียบแรงบิดที่เกิดขึ้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับความเป็นจริงและค่าที่แม่นยำในการคำนวณ ซึ่งใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานเพื่อทำให้เกิดแรงบิดที่เพลาสล้อ



รูปที่ 4.3 แสดงถึงการสอบเทียบแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใส่น้ำหนักตั้งแต่ 0-4 kg. และอ่านค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้ แล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดไปเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาท์พุทที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับตอนไม่ใส่น้ำหนัก กับแรงบิดที่เกิดขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แสดงในภาคผนวก ข



รูปที่4.4 แสดง Flow Chart ของการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

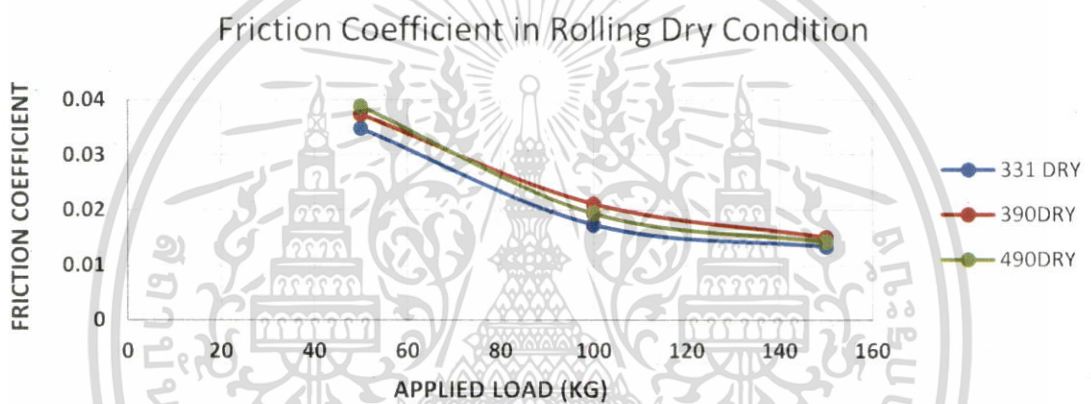
บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

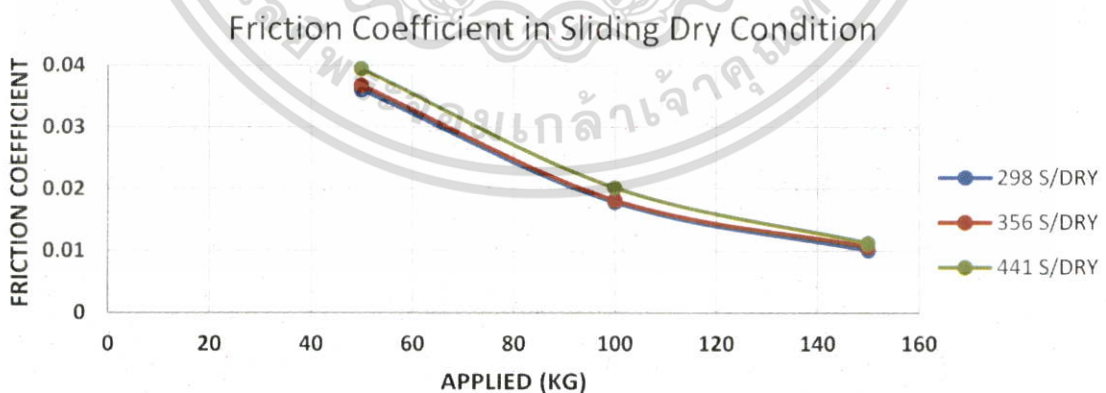
5.1 การหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ในการหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี ซึ่งในแต่ละกรณีนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จะมีค่าไม่กัน ซึ่งในการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทโดยการเดินเครื่องไป 30 วินาที ในทุกๆสภาพพื้นผิวสัมผัส

5.1.1 พื้นผิวสัมผัสแบบแห้ง



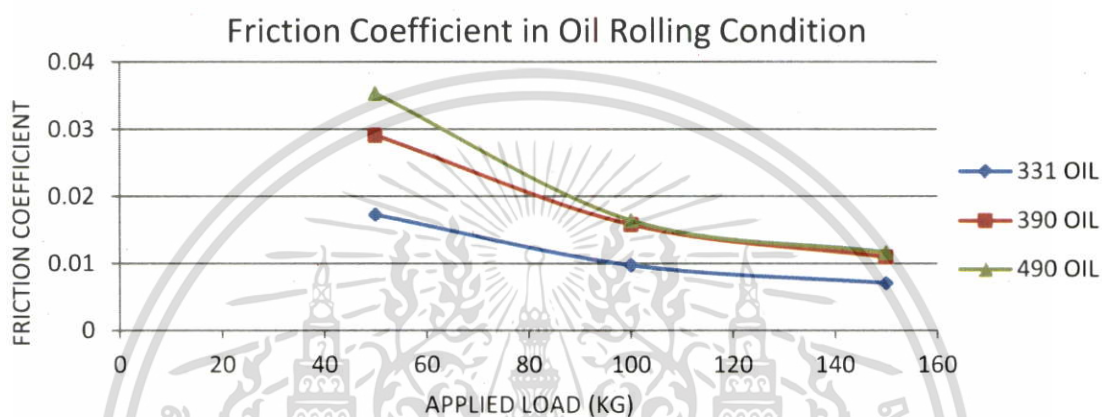
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกลิ้งพื้นผิวแห้ง



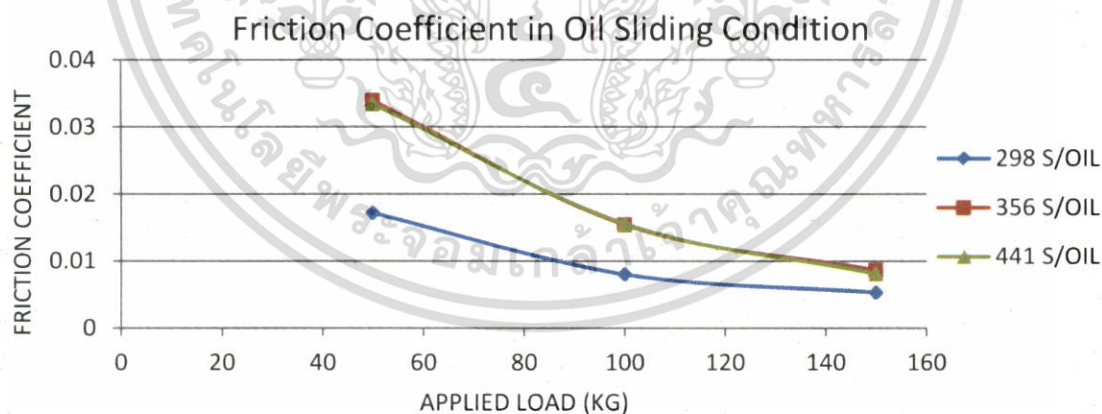
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบไถลพื้นผิวแห้ง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในกรณีผิวสัมผัสที่แห้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าค่อนข้างสูง ($\approx 0.01-0.04$) ซึ่งพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกัน เมื่อภาระโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการสัมผัสแบบไถลจะมีค่าน้อยกว่าการสัมผัสแบบกิ้งในทุกระยะโหลดและทุกช่วงความเร็ว

5.1.2 พื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมัน



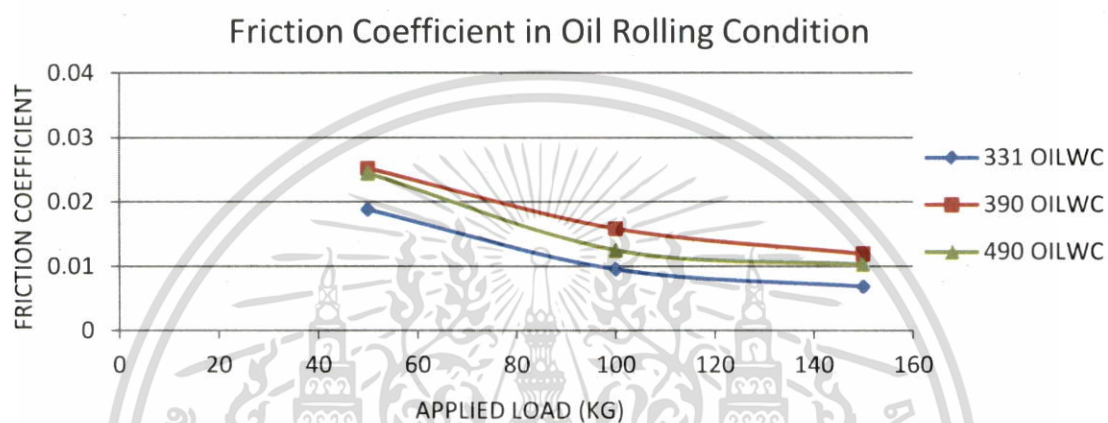
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกิ้งพื้นผิวน้ำมัน



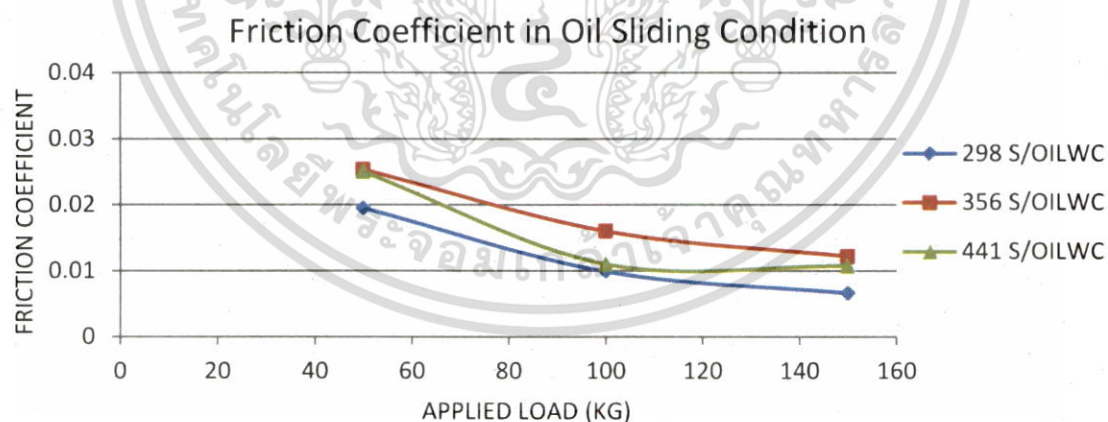
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบไถลพื้นผิวน้ำมัน

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในกรณีผิวสัมผัสที่มีน้ำมันค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าต่ำกว่าแบบแห้ง ($\approx 0.005-0.035$) ซึ่งพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกัน เมื่อภาระโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการสัมผัสแบบไถลจะมีค่าน้อยกว่าการสัมผัสแบบกิ้งในทุกระยะโหลดและทุกช่วงความเร็ว

5.1.3 พื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมันผสมผงถ่าน



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบกิ้งพื้นผิวน้ำมันผสมผงถ่าน



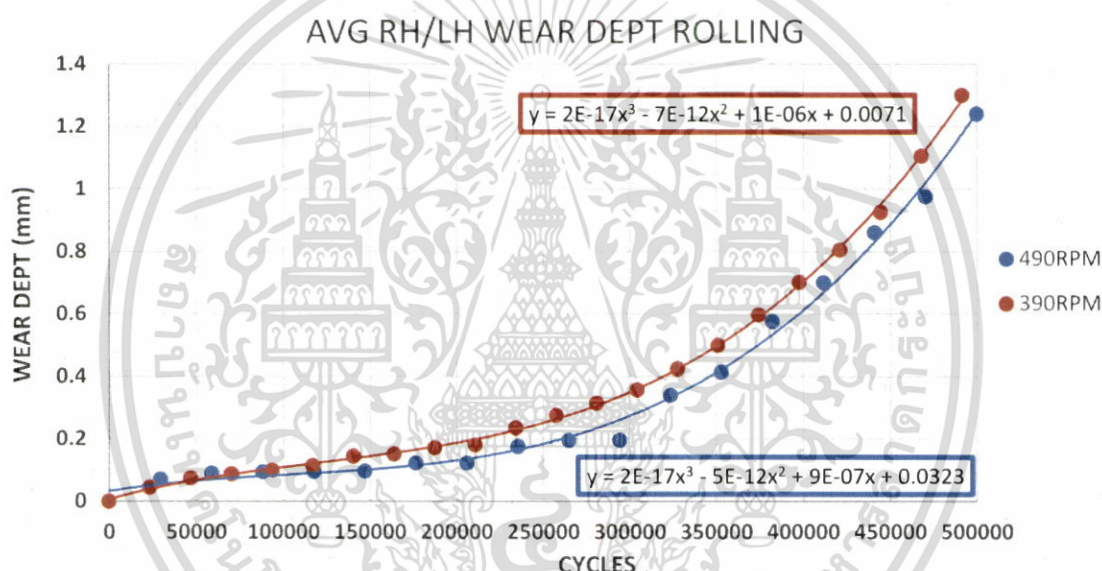
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับภาระโหลดที่มากกระทำภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบไถลพื้นผิวน้ำมันผสมผงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในกรณีผิวสัมผัสที่มีน้ำมันซึ่งผสมผงถ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าต่ำที่สุด ($\approx 0.007-0.025$) ซึ่งพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงแต่เมื่อความเร็วมีค่ามากกว่า 400RPM จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลง แต่ในทางกลับกัน เมื่อภาระโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการสัมผัสแบบโกลจะมีค่าใกล้เคียงกับการสัมผัสแบบกลิ้งในทุกภาระโหลดและทุกช่วงความเร็ว

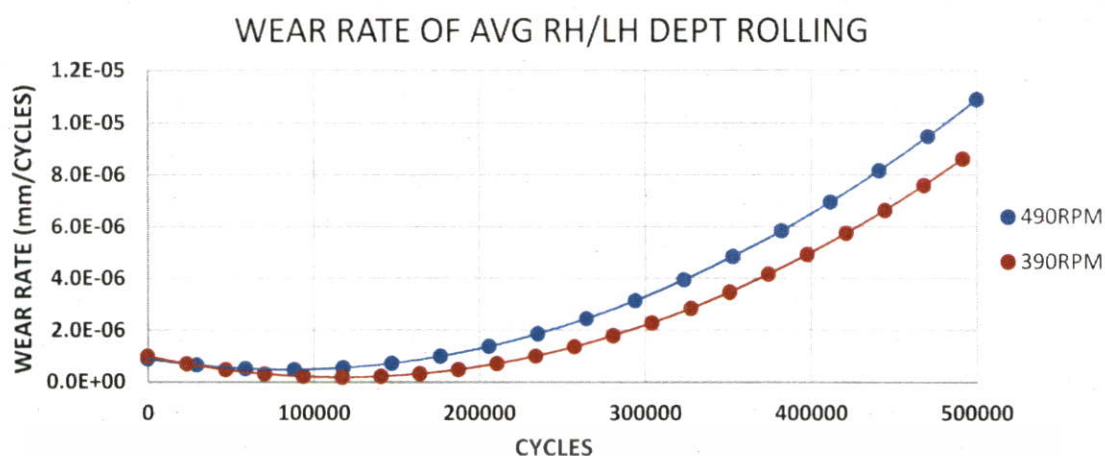
5.2 พฤติกรรมการสึกหรอ

5.2.1 พฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้ง



รูปที่ 5.7 แสดงพฤติกรรมการสึกหรอเฉลี่ยของล้อภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้งที่ความเร็ว 390RPM และ 490 RPM

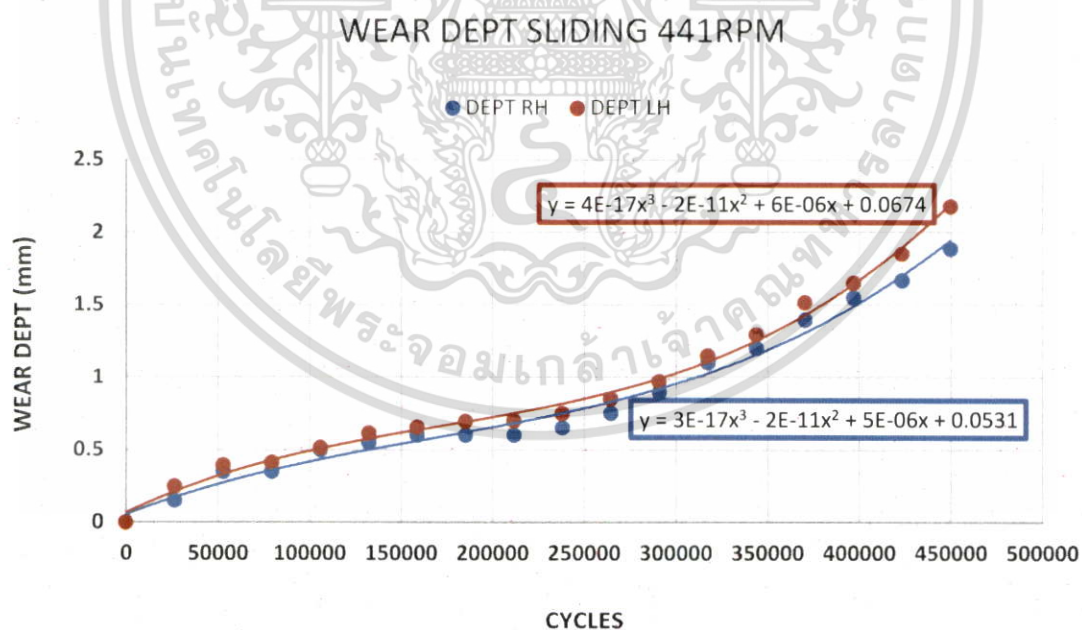
จะเห็นได้ชัดเจนว่าการสึกหรอของล้อที่ภาระโหลดที่มากกว่า 150kg เท่ากัน ในกรณีที่มีความเร็วมีค่า 490RPM จะมีการสึกหรอน้อยกว่าในกรณีที่มีความเร็ว 390RPM



รูปที่ 5.8 แสดงอัตราของพฤติกรรมการสึกหรอเฉลี่ยของล้อภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้งที่ความเร็ว 390RPM และ 490 RPM

จะเห็นได้ชัดเจนว่าในช่วงเริ่มต้นอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงจนถึงจุดที่ค่อนข้างจะคงที่และจะเพิ่มขึ้นในภายหลังในทั้งสองช่วงความเร็ว

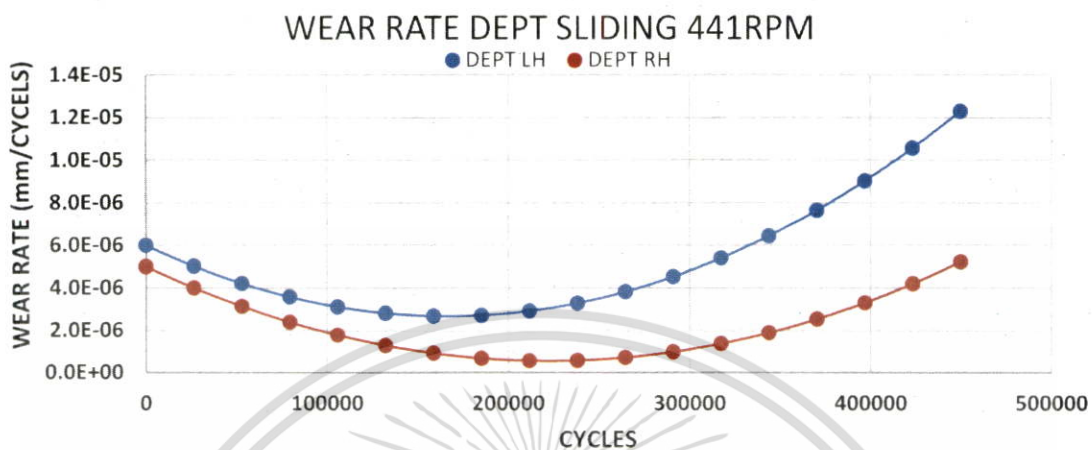
5.2.2 พฤติกรรมการสึกหรอภายใต้การสัมผัสแบบไกล



รูปที่ 5.9 แสดงพฤติกรรมการสึกหรอของล้อภายใต้การสัมผัสแบบไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ชัดเจนว่าการสึกหรอของล้อฝั่งซ้ายมีค่ามากกว่าล้อฝั่งขวาเนื่องจากเมื่อทำการเบรคให้เกิดความเร็วการไถลจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อซ้ายและขวาที่ค่าไม่เท่ากันทำให้การสึกหรอมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 5.10 แสดงอัตราของพฤติกรรมสึกหรอเฉลี่ยของล้อภายใต้การสัมผัสแบบกลิ้งที่ความเร็ว 390RPM และ 490 RPM

จะเห็นได้ชัดเจนว่าในช่วงเริ่มต้นอัตราการสึกหรอจะมีค่าลดลงจนถึงจุดที่ค่อนข้างจะคงที่และจะเพิ่มขึ้นในภายหลังในล้อทั้งสองฝั่งซึ่งอัตราการสึกหรอของล้อฝั่งซ้ายจะมีค่ามากกว่าล้อฝั่งขวา

บทที่ 6

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวสัมผัสแบบแห้ง

ในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งนั้นเมื่อค่าภาระโหลดที่มากกระทำมาค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงและแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเร็วเกิน 400RPM จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงเพราะเมื่อความเร็วมากถึงค่าหนึ่งจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้ล้อและรางแทบจะเกิดระยะห่างระหว่างกันเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง

ในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งนั้นเมื่อค่าภาระโหลดที่มากกระทำมาค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงและแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

6.1.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมัน

ในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งและแบบไถลนั้นเมื่อค่าภาระโหลดที่มากกระทำมาค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงและแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเร็วเกิน 400RPM จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงเพราะเป็นผลมาจาก hydrodynamic lubrication of oil ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง

6.1.3 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานพื้นผิวสัมผัสแบบน้ำมันผสมผงถ่าน

ในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งและแบบไถลนั้นเมื่อค่าภาระโหลดที่มากกระทำมาค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงและแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเร็วเกิน 400RPM จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลงเพราะเป็นผลมาจาก hydrodynamic lubrication of oil ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของกรณีที่มีผสมผงถ่านจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบน้ำมันอย่างเดียวเพราะผงถ่านช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสบริเวณล้อกับรางทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง

6.1.4 การสึกหรอ

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในกรณีการสัมผัสแบบโกลนนั้นการสึกหรอจะมีค่ามากกว่าในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งโดยภาระโหลดที่มากกระทำและความเร็วเป็นปัจจัยสำคัญให้การทำให้เกิดการสึกหรอ และในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งพื้นผิวสัมผัสแบบแห้งนั้นพบว่าความเร็วเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการทำให้เกิดการสึกหรอ เมื่อเทียบกันระหว่างความเร็วที่ 390RPM กับ 490RPM จะพบว่าที่ความเร็วต่ำกว่าจะทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 390RPM มีค่ามากกว่าในกรณีของความเร็วที่ 490RPM เมื่อที่ภาระโหลด 150kg เท่ากัน

กล่าวโดยสรุปคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลต่อการสึกหรอซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากจะทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่น้อยกว่าทั้งในกรณีของการสัมผัสแบบกลิ้งและแบบโกลน ส่วนพฤติกรรมของการสึกหรอและอัตราการสึกหรอที่ได้จากการทดลองนั้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับกราฟ Bathtub Wear Characteristics ภาคผนวก ค

6.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบการทดลองในกรณีการสัมผัสแบบกลิ้งจำเป็นต้องทำอย่างยิงที่จะทำให้เกิดการสมดุลระหว่างการสัมผัสของล้อทั้งสองฝั่งเพื่อที่จะทำให้เกิดการสึกหรอของล้อทั้งสองฝั่งมีค่าใกล้เคียงกัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] Matin Shahzamanian Sichani, Wheel-Rail Contact Modelling in Vehicle Dynamics Simulation , KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2013.
- [2] คณากร มีชัย, จิตรกร จิตต์ฉายา, เศรษฐพล เลี้ยวไพโรจน์, การศึกษาเชิงทดลองการสึกหรอของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [3] A. Ramalho n, M.Esteves,P.Marta, Friction and Wear Behavior of Rolling–Sliding Steel Contacts, *Wear* 302 (2013) 1468–1480.
- [4] R.Lewis,R.S.Dwyer-Joyce, *Wear Mechanisms and Transitions in Railway wheel*, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology 218 (6) (2004) 467–478
- [5] Koan-Sok Baek*, Keiji Kyogoku, Tsunamitsu Nakahara, An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan
- [6] O. Arias-Cuevasa,*, Z. Lia, R. Lewisb, E.A. Gallardo-Hernándezb, Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Road and Railway Engineering, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands The University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering, Mappin Street, S1 3JD Sheffield, United Kingdom
- [7] W.J. Wang, T.F. Liu, H.Y. Wang, Q.Y. Liun, M.H. Zhu, X.S. Jin, Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions, Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China



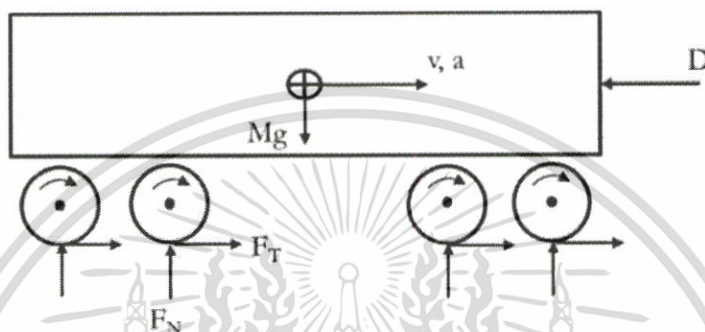
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รูปแบบอย่างง่ายในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวที่ต้องการ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเร่ง/ลดความเร็ว กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะสามารถอธิบายโดยแบบจำลองอย่างง่าย



รูปที่ ก-1 แบบจำลองอย่างง่าย

จากรูปที่ ก-1 สมมติให้รถวิ่งด้วยการเร่งและที่มีโหดกระทำกระจายเท่ากันระหว่างเพลาและล้อ ซึ่งเพลาและล้อ ทั้งหมดมีแรงขับเคลื่อน โดยที่ รถภายใต้แรงโน้มถ่วง คือ Mg และแรงต้านทาน คือ D แรงปกติ คือ F_N และ F_T คือ แรงยึดเกาะของแต่ละเพลา เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ :

$$\Sigma F = Mg \quad \text{ก-1}$$

$$F_T = \mu_a F_N \quad \text{ก-2}$$

$$F_a = \Sigma F_T = \mu_a \Sigma F_N = \mu_a Mg \quad \text{ก-3}$$

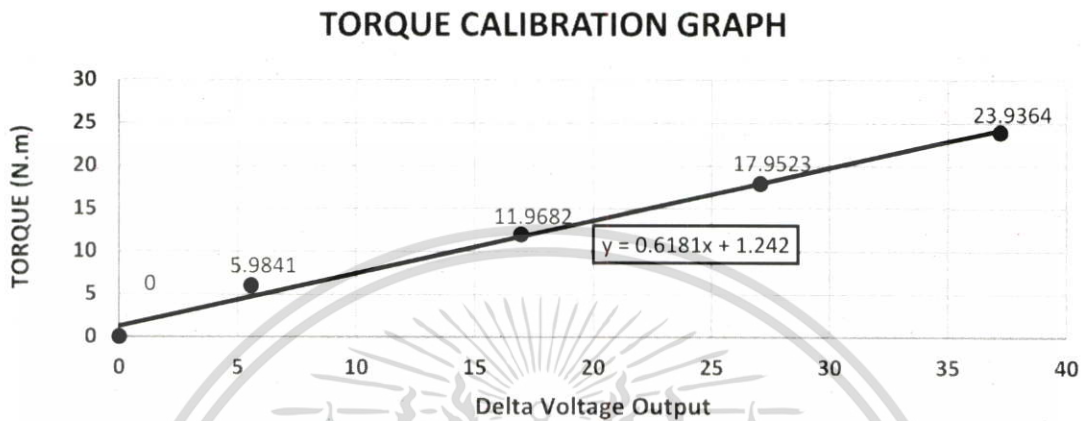
$$F_a = Ma + D \quad \text{ก-4}$$

โดยที่ μ_a คือสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะ และ F_a คือ แรงยึดเกาะทั้งหมด จากสมการ ก-3 และ ก-4 จะได้

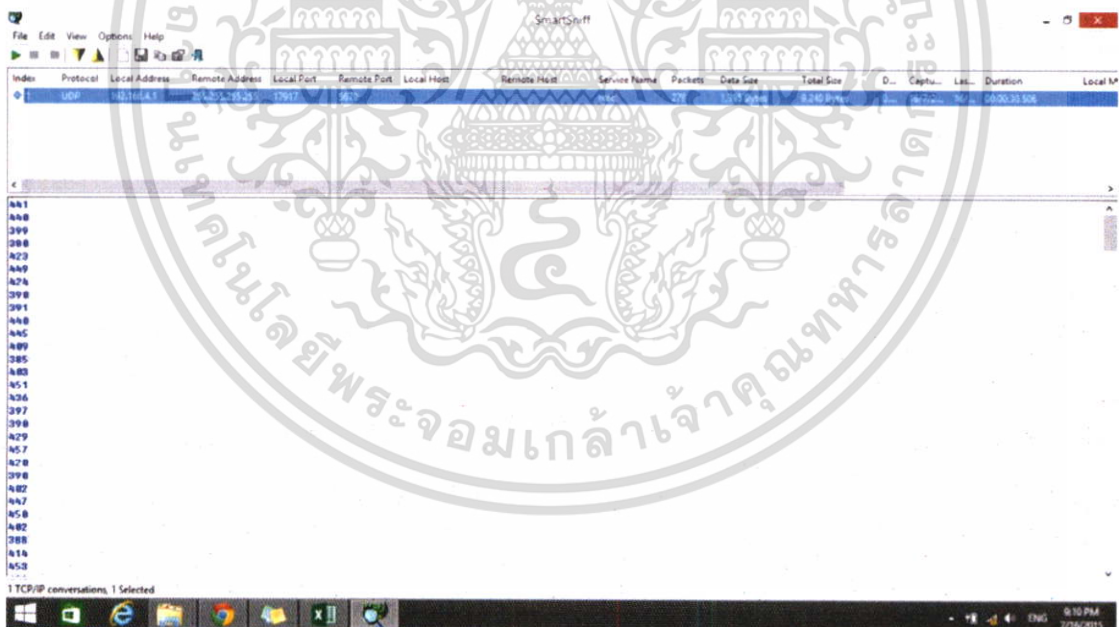
$$\mu_a = \frac{a}{g} + \frac{D}{Mg} \quad \text{ก-5}$$

ภาคผนวก ข

การสอบเทียบแรงบิด



รูปที่ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปกับแรงบิดที่เกิดขึ้น



รูปที่ข-2 แสดง User Interface ของโปรแกรมที่เก็บข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ค่าเริ่มต้นของค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคือ 424.63 เมื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้ในแต่กรณีมาแล้วนั้นก็นำมาหาค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นแล้วนำไปใส่ในสมการเพื่อหาค่าแรงบิดและหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตามทฤษฎี Friction Torque ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

Bathtub Wear Characteristics

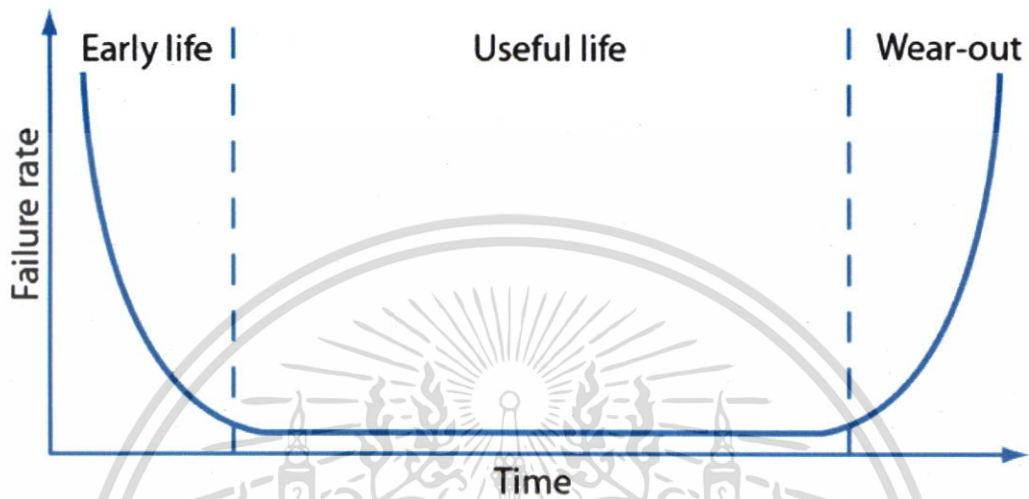


Figure 3. Reliability is a measure of ongoing failure rates attributable to random component failures, batch problems, and/or manufacturing issues. This is reflected on the flat part of the well-known “bathtub” curve. The ideal situation of no failures would be indicated by this part of the curve lying on the x-axis.

รูปที่ค-1 แสดงถึงพฤติกรรมการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้