

การศึกษานិងทดลองการสึกกร่อนของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเบี่ยงคู้
EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR OF RAIL-WHEEL SYSTEM
UNDER RAIL MISALIGNMENT

ศตวรรษ มีชัย
จิตรกร จิตต์ตวง
เศรษฐ เต็มใจโรจน์

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาเชิงทดลองการสึกหรอของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเอียงศูนย์

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR OF RAIL-WHEEL SYSTEM
UNDER RAIL MISALIGNMENT

คณากร	มีชัย
จิตรกร	จิตต์ฉายา
เศรษฐพล	เลี้ยวไพโรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR OF RAIL-WHEEL SYSTEM
UNDER RAIL MISALIGNMENT

Khanakorn Meechai
Jitrakorn Jitchaya
Sethapol Lieophairot

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
2013

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองการสึกหรอของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์

Experimental Study on Wear of Rail-Wheel System under Rail Misalignment

ผู้จัดทำ

1. นาย คณากร มีชัย รหัสประจำตัว 53010160
2. นาย จิตรกร จิตต์ฉายา รหัสประจำตัว 53010205
3. นาย เศรษฐพล เลี้ยวไพโรจน์ รหัสประจำตัว 53011617



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

การศึกษาเชิงทดลองการสีกหรือของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์

นายคณากร	มีชัย	53010160
นายจิตรกร	จิตต์ฉายา	53010205
นายเศรษฐพล	เลี้ยวไพโรจน์	53011617
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้กล่าวถึงการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับลักษณะพฤติกรรมการสีกหรือของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์ โดยชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษานี้ กำหนดให้ลักษณะของการสัมผัสของล้อและรางรถไฟเกิดขึ้นแบบรูปวงรี ซึ่งชุดทดลองนี้ถูกออกแบบและพัฒนา โดยกำหนดค่าความเร็วและโพลดที่กระทำภายใต้การเคลื่อนที่บนรางเยื้องศูนย์ จากการทดลอง สามารถหาพื้นที่ของการสัมผัสและการสีกหรือภายใต้รางเยื้องศูนย์ที่มีระดับรางต่างกันเท่ากับ 3 มม. และ 5 มม. ตามลำดับ แล้วใช้ค่าที่ได้จากการทดลองในการหารูปแบบของความดันผิวสัมผัสด้วยทฤษฎีของเฮิร์ต จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองภายใต้รางเยื้องศูนย์เทียบกับการทดลองภายใต้รางแนวตรง

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR OF RAIL-WHEEL SYSTEM UNDER RAIL MISALIGNMENT

Khanakorn Meechai 53010166

Jitrakorn Jitchaya 53010205

Sethapol Lieophaipot 53011617

Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongroj

Advisor

Year 2013

ABSTRACT

This thesis describes the experimental study on the wear characteristics of rail-wheel system under rail misalignment. The experimental model of the rail-wheel systems in this study are the equivalent system to obtain elliptical contact. The model of rail-wheel system has been designed and developed. Experiments have been set up at fixed speed and load under misalignment rail conditions. Contact area and wear can be obtained experimentally for the rail step change to 3 mm and 5 mm respectively. Contact pressure can be calculated by using Hertz contact theory. Experimental results of misalignment rail-wheel system are compared with the experimental results of rail wheel system under alignment.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความเอาใจใส่ การให้คำแนะนำ และการช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมาจาก รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยติดตามความก้าวหน้าของโครงการ ชี้แนวทางในการศึกษา ตรวจสอบแก้ไข และสนับสนุนให้กลุ่มผู้จัดทำได้เสนอแนวคิดและวิธีการในการศึกษา กลุ่มผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบริษัท เอเชียเอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เซอร์วิส (ไทยแลนด์) จำกัด ที่สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ และวัสดุในการทำชุดทดลอง รวมถึงพี่ๆ ในบริษัท ที่ช่วยกันออกแบบ และสร้างชุดทดลอง จนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้โอกาสในการจัดทำโครงการ รวมถึงสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงท่านอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และคอยชี้แนะวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูกลุ่มผู้จัดทำมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ นอกจากนี้ผู้จัดทำยังได้รับการช่วยเหลือและกำลังใจจากเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ กลุ่มผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายคณากร	มีชัย
นายจิตรกร	จิตต์ฉายา
นายเศรษฐพล	เลี้ยวไพโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
2.1 วิธีการแก้ปัญหาอย่างง่ายสำหรับค่าความเค้นและการเปลี่ยนรูปร่าง.....	3
2.1.1 ผลบวกและลบของผิวความโค้ง.....	3
2.1.2 ความเค้นของผิวและการเปลี่ยนรูปร่าง.....	4
2.1.3 ความเค้นของพื้นผิวย่อ.....	7
2.1.4 การแก้ปัญหาอย่างง่าย.....	8
2.2 โหลดปกติของอีลาสติก, ไอโซโทรปิกปราศจากการเคลื่อนไหวอื่นๆ.....	12
2.3 ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ต.....	12
2.4 ทฤษฎีของเฮิร์ตสำหรับการสัมผัสแบบอีลาสติก.....	14
2.5 การสึกหรอ.....	14
2.5.1 สมการพื้นฐานของการสึกหรอ.....	14
2.5.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการศึกษา.....	15
2.6 คุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมการศึกษา.....	15

2.7 การสึกหรอแบบพันธะแนบติด.....	17
2.7.1 ลักษณะของคู่มือสัมผัส.....	17
2.7.2 ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และการต้านทานความล้า.....	18
2.7.3 ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน.....	19
2.8 การสึกหรอจากการขัดถู.....	20
2.9 การสึกหรอเนื่องจากความล้า.....	21
2.10 แรงเสียดทาน.....	21
2.10.1 การเสียดทานแบบไถล.....	23
2.10.2 การเสียดทานแบบกิ้ง.....	26
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองและชุดทดลอง.....	27
3.1 การทดลองและชุดทดลอง.....	27
3.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	28
3.3 แผ่นล้อและแผ่นรางทดสอบ.....	29
3.3.1 แบบของแผ่นล้อรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
3.3.2 แบบของแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
3.4 โหลดกระทำที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.4.1 ล้อและรางรถไฟจริง.....	32
3.4.2 แผ่นล้อและแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
3.5 การคำนวณขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า.....	34
บทที่ 4 การสอบเทียบไฮดรอลิก.....	35
บทที่ 5 การวัดค่าการสึกหรอของแผ่นล้อทดสอบ.....	37
5.1 เครื่องมือวัดไดอัลเกจ.....	37
5.1.1 หลักการทำงานของไดอัลเกจ.....	37
5.1.2 การใช้ไดอัลเกจวัดค่า.....	38
5.1.3 การอ่านค่าจากไดอัลเกจ.....	38
5.2 ขั้นตอนในการวัดค่าการสึกหรอ.....	39

บทที่ 6 การสีกรของลื้อและผลการทดลอง.....	40
บทที่ 7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
7.1 รูปแบบความดันสัมผัสของเฮิร์ต.....	43
7.2 สมการอาร์ชาร์ด.....	44
7.3 การทำนายอายุการใช้งานของลื้อรถไฟ.....	44
7.3.1 มาตรฐานการซ่อมบำรุงของการรถไฟไทย.....	44
7.3.2 มาตรฐาน ASTM-A504.....	45
7.3.3 วิธีการคำนวณอายุการใช้งาน.....	45
บทที่ 8 สรุปผลงานวิจัย.....	47
8.1 สรุปผลการทดลอง.....	47
8.2 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ปัญหา.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงผลการสีกรของแผ่นลื้อทดสอบ.....	51
ภาคผนวก ข. กราฟแสดงการสีกรของแผ่นลื้อทดสอบ.....	58
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงปริมาตรที่หายไปของการสีกรของแผ่นลื้อทดสอบ.....	63

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบทางตัวเลขกับค่าตัวแปรของความโค้งที่เป็นรูปเรขาคณิต ($R_x = 1.0$ cm).....	10
2.2 ปรากฏการณ์ของอัตราส่วนรัศมีบนพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณความเค้นของผิวสัมผัส....	11
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียหายและอัตราการสึกหรอของคู่ผิวสัมผัสบางประเภท.....	16
3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก JIS G4051-S22C.....	29
3.2 การแบ่งประเภทของล้อรถไฟตามมาตรฐาน ASTM A504—89.....	29
3.3 ชนิดของแผ่นรางในการทดสอบ.....	31
3.4 ค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณความดันสัมผัสสูงสุดของล้อและรางรถไฟจริง.....	32
3.5 ค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาโหลดที่กระทำของแผ่นล้อและแผ่นรางทดสอบ.....	33
3.6 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการเคลื่อนที่ของรถไฟจริง กับค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	34
7.1 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของล้อรถไฟภายใต้รางแนวตรงและรางเยื้องศูนย์ 5 มิลลิเมตร.....	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบเรขาคณิตของการสัมผัสการยึดหยุ่นของของแข็ง.....	3
2.2 การกระจายของความดันภายใต้พื้นที่สัมผัสรูปวงรี.....	5
2.3 การสัมผัสของล้อบนรางรถไฟ.....	9
2.4 ทรงกระบอก 2 อันมีความยาว l ที่สัมผัสกันด้วยแรงกด F และความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรูปวงรีที่มีความกว้างเท่ากับ $2b$	12
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระหว่างจุลภาค (Microhardness) ณ บริเวณผิวสัมผัสกับดัชนีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion index) ของโลหะผสมที่มีอนุภาคของคาร์ไบด์แบบต่อเนื่อง (M_3C) และแบบไม่ต่อเนื่อง (M_7C_3) ผสมอยู่ในโครงสร้าง.....	16
2.6 ผิวของวัสดุ เมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็นจุดสัมผัสขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบแนบติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้.....	17
2.7 แสดงปฏิกิริยาระหว่างผิวสัมผัสเมื่อไม่มีพันธะโลหะแบบแนบติดเกิดขึ้น ผิวที่มีความอ่อนนุ่มของวัสดุมากกว่าจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งนำไปสู่การหลุดล่อนของเศษเกล็ดเล็กๆในที่สุด.....	19
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโลหะบริสุทธิ์ที่เสียดสีบนโลหะชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่นกับความแข็งวิกเกอร์ส.....	20
2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	22
2.10 พื้นที่สัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป.....	24
3.1 แผนภาพของชุดทดลองการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ.....	27
3.2 ชุดทดลองการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ.....	28
3.3 แผนภาพขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	28
3.4 แบบของแผ่นล้อที่ใช้ในการทดลอง 3 มิติ และ 2 มิติด้านข้าง.....	30
3.5 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นล้อ.....	30
3.6 แบบของแผ่นรางที่ใช้ในการทดลอง 3 มิติ และ 2 มิติด้านหน้า.....	31
3.7 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นราง.....	31
4.1 การสอบเทียบกระบอกไฮดรอลิกกับเครื่องอัดแรงไฮดรอลิก.....	35
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่กระทำและความดันของกระบอกไฮดรอลิก.....	36
5.1 ไดอัลเกจและชนิดของตัวเลื่อนปลาย.....	37
5.2 การใช้งานไดอัลเกจกับฐานแม่เหล็ก เพื่อวัดค่าจากอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่างๆ.....	38

5.3 การวัดค่าการสึกหรอด้วยเครื่องมือวัดไดอัลเกจ.....	39
6.1 รอยสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแผ่นล้อทดสอบที่ 1,000,000 รอบ.....	40
6.2 กราฟแสดงการสึกหรอของล้อแต่ละกรณีนี้ที่ 1,000,000 รอบ.....	40
6.3 กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อกับแผ่นรางปกติ 0 mm.....	41
6.4 กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อกับแผ่นรางเยื้องศูนย์ 3 mm.....	41
6.5 กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อกับแผ่นรางเยื้องศูนย์ 5 mm.....	42
7.1 กราฟแสดงรูปแบบความดันสัมผัส (Pressure Profile) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของแผ่นล้อ และแผ่นรางทดสอบตามทฤษฎีของเฮิร์ต แบบ 3 มิติ.....	43
7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับระยะทางที่ไกล.....	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบัน การคมนาคมและการขนส่งทางราง ถือเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาประเทศ เพื่อให้สะดวกต่อการขนส่งมวลชน และการขนส่งสินค้า อีกทั้งยังช่วยให้ประเทศมีความเจริญก้าวหน้าในด้านการคมนาคม และพร้อมที่รองรับการเข้าร่วมประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน ที่จะมาถึงในเร็ววันนี้

เนื่องจากในประเทศไทย ทางรถไฟที่ใช้ในการคมนาคมส่วนใหญ่ ใช้รางรถไฟหลายเส้นต่อกัน กลายเป็นทางรถไฟยาวหนึ่งเส้น ซึ่งรอยต่อระหว่างรางรถไฟแต่ละเส้น มีความต่างระดับกันระหว่างรางรถไฟ เรียกรางรถไฟชนิดนี้ว่า “ รางเยื้องศูนย์ ” มีผลทำให้ขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านบริเวณช่วงรอยต่อของรางแต่ละเส้น เกิดการสีกหรือที่บริเวณล้อและรางมากกว่าปกติ รวมทั้งยังทำให้เกิดการกระแทกของช่วงล่างรถไฟ ทำให้เกิดความเสียหายที่เพลลา แบริ่ง รวมถึงช่วงล่างของรถไฟ ซึ่งถือเป็นปัญหาหลักสำหรับการขนส่งทางราง จึงมีความจำเป็นในการสร้างแบบจำลองลักษณะพฤติกรรมของการเกิดการสีกหรือของล้อและรางภายใต้รางเยื้องศูนย์ ซึ่งสามารถช่วยในการพัฒนาและออกแบบระบบช่วงล่าง ระบบของล้อและรางรถไฟ ทำให้สามารถประเมินระยะเวลาในการทำงานเกี่ยวกับการซ่อมบำรุงรถไฟได้ รวมไปถึงการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ผลิตล้อและรางรถไฟ เพื่อที่จะลดต้นทุนในการผลิต ค่าบำรุงรักษา อันเนื่องมาจากการซ่อมบำรุง รวมไปถึงเพิ่มอายุการใช้งานของล้อและรางรถไฟ

ในการศึกษานี้ จำเป็นต้องสร้างชุดทดลองซึ่งเป็นแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของล้อรถไฟบนรางแนวตรงและรางเยื้องศูนย์ ส่วนของรางจะหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งใช้ค่าความเร็วรอบเพียงค่าเดียวตลอดการทดลอง และมีโพลดิไฮดรอลิกส์กั้นระหว่างล้อหมุนในแนวรัศมี

ชิ้นงานที่ผ่านการทดลอง ถูกนำมาวัดการสีกหรือโดยใช้เครื่องมือวัดไดอัลเกจ และใช้ทฤษฎีของเฮิร์ต (Hertz's theory) ในการพิจารณารูปแบบของการเกิดความดันที่ตำแหน่งต่างๆของบริเวณผิวสัมผัส และวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองเป็นภาพ 3 มิติ เปรียบเทียบกับแบบจำลองของการทดลองภายใต้รางแนวตรง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมของการเกิดการสึกหรอของล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์กลาง
2. เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพฤติกรรมของการเกิดการสึกหรอภายใต้รางเยื้องศูนย์กลางกับรางแนวตรง
3. ใช้ทฤษฎีของเฮิร์ตในการวิเคราะห์แบบจำลองความดันของผิวสัมผัส
4. เพื่อให้สามารถทำนายอายุการใช้งานของล้อรถไฟได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

รางเยื้องศูนย์กลางมีผลต่อลักษณะพฤติกรรมของการเกิดการสึกหรอของล้อรถไฟ และทำให้ล้อรถไฟมีอายุการใช้งานลดลง

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้แสดงขอบเขตการศึกษาเกี่ยวกับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์กลาง โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำล้อและรางรถไฟ คือ เหล็ก S22C เป็นวัสดุเหล็กตามมาตรฐาน JIS G4051 มีค่าความแข็งเหล็กก่อนลึงอยู่ที่ 232HB ความแข็งเหล็กหลังลึงอยู่ที่ 200HB จัดเป็นล้อรถไฟประเภท Class L ตามมาตรฐาน AAR M107 และ ASTM A504-89

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองและชุดการทดลอง โดยอ้างอิงจากมาตรฐานการตรวจสอบ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. ทำการทดลองและวัดค่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนแผ่นล้อรถไฟ
4. วิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ
5. ทำนายอายุการใช้งานของล้อรถไฟ

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ผิวของล้อและรางเป็นแบบผิวเรียบ (Smooth surface)
2. ลักษณะพื้นที่สัมผัสของล้อและรางรถไฟเป็นรูปวงรี (Elliptical region)

บทที่ 2

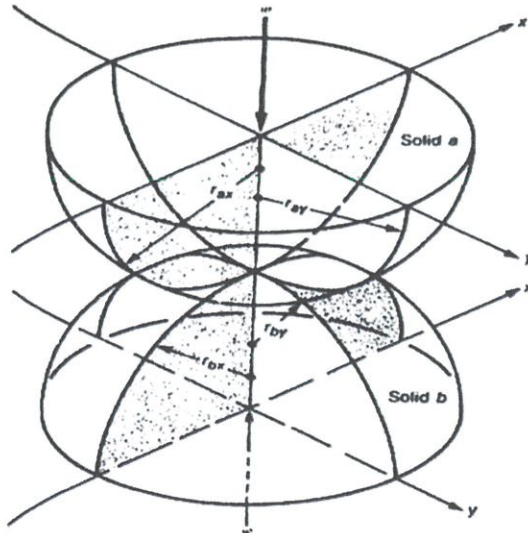
ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วิธีการแก้ปัญหาอย่างง่ายสำหรับค่าความเค้นและการเปลี่ยนรูปร่าง

2.1.1 ผลบวกและลบของผิวความโค้ง

ผิวสัมผัสของแข็งไม่มีรูปแบบทางเรขาคณิตที่สมบูรณ์ ดังนั้นแสดงในเทอมทั่วไปว่าเป็นรูปร่างรีที่มีผิวสัมผัสกัน จากรูปที่ 2.1 รัศมีของผิวสัมผัสของของแข็งสองชนิด จะมีความแตกต่างกันในระนาบ x และ y ต้องผ่านเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งที่สัมผัสอยู่ที่จุดๆหนึ่งภายใต้โหลดที่กระทำเป็นศูนย์ เงื่อนไขนี้เรียกว่า จุดสัมผัส และแสดงดังรูปที่ 2.1 รัศมีความโค้ง แทนด้วย r

ในการสมมติฐานของผิวสัมผัสที่ทับซ้อน ผิวความโค้งแสดงค่าเป็นบวก และถ้าผิวสัมผัสเว้าเข้าไปด้านใน ผิวความโค้งแสดงค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าศูนย์กลางของเส้นความโค้งที่เป็นของแข็งรัศมีของผิวความโค้งเป็นบวก ถ้าศูนย์กลางของเส้นความโค้งอยู่ด้านนอกของแข็ง รัศมีความโค้งเป็นลบ ดังที่รูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงการคิดเครื่องหมายของรัศมีความโค้งสำหรับชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต่างๆ อาทิเช่น ชิ้นส่วนโรลลิงและแบร์ริง ความสำคัญของเครื่องหมายของรัศมีความโค้งจะแสดงอยู่ในบทนี้



รูปที่ 2.1 รูปแบบเรขาคณิตของการสัมผัสการยึดหยุ่นของของแข็ง

ดังนั้น ค่าโคออร์ดิเนตสำหรับแกน x และ y จะใช้เป็นอย่างเช่น

$$\frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}} \geq \frac{1}{r_{ay}} + \frac{1}{r_{by}} \quad (2.1)$$

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

การบวกและการลบของผิวโค้งจะเป็นปริมาณที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นของผิวสัมผัสที่มีการคือรูปร่าง

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (2.2)$$

$$R_d = R \left(\frac{1}{R_x} - \frac{1}{R_y} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_{ay}} + \frac{1}{r_{by}} \quad (2.5)$$

สมการ (2.4) และ (2.5) ถูกนิยามถึงประสิทธิภาพของปัญหาที่เป็นของรูปร่าง 2 ชั้น แสดงถึงเทอมของความสัมพันธ์ของรัศมีของของแข็ง R_x และ R_y อยู่ในระนาบซึ่งแสดงค่าเป็นลบของความโค้งในสมการ 2.3 เป็นสมการที่ไม่มีหน่วย

อัตราส่วนรัศมี α_r จะนิยมในสมการ (2.6) จะเหมือนกันสำหรับในบทนี้

$$\alpha_r = \frac{R_y}{R_x} \quad (2.6)$$

ดังนั้น ถ้า $\alpha_r > 1$ แสดงว่า คำนับยอมรับได้ และ $\alpha_r < 1$ แสดงว่า คำนับยอมรับไม่ได้

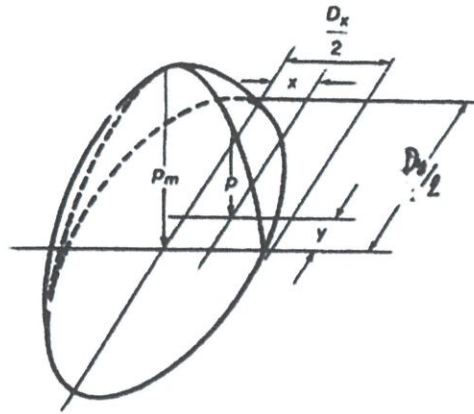
2.1.2 ความเค้นของผิวและการเปลี่ยนรูปร่าง

เมื่อของแข็งมีความยืดหยุ่นและกระทำต่อโหลด ความเค้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มโหลด ความเค้นจะทำให้เกิดการคืนรูปร่าง ซึ่งถูกนิยามโดยค่าของความเครียด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น

และความเครียดจะมีทิศทางเดียวกัน ดังเช่น ของแข็งที่มีความยืดหยุ่น จะมีค่าความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับความเครียด ค่าคงที่ของการยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) เป็นค่าตัวแปรที่มีความสำคัญทั้งสองตัว

ในขณะที่ความเค้นเพิ่มขึ้น วัสดุเกิดความยืดหยุ่นในช่วงวัสดุคืนรูปร่างอย่างถาวร พฤติกรรมการยืดหยุ่นแสดงที่จุด “ yield stress ” ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุในการคืนรูปร่าง ในที่นี้พิจารณาพฤติกรรมการเกิดความยืดหยุ่นด้วย

เมื่อของแข็งยืดหยุ่นสองชนิดถูกนำมาพิจารณาด้วยกันภายใต้โหลดที่กระทำและบริเวณจุดสัมผัสถูกพัฒนาไปพร้อมกับวัสดุแต่ละชนิด เมื่อมีโหลดมากกระทำต่อชิ้นของแข็ง และบริเวณจุดสัมผัสเป็นรูปวงรี สำหรับในกรณี $r_{ax} = r_{ay}$ และ $r_{bx} = r_{by}$ ผลที่สัมผัสจะเป็นรูปวงกลมมากกว่ารูปวงรี และเมื่อ r_{ay} และ r_{by} จะเป็นเส้นตรงที่ไม่มีที่สิ้นสุด บริเวณจุดสัมผัสนั้นจะถูกพิจารณาให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2.2 การกระจายของความดันภายใต้พื้นที่สัมผัสรูปวงรี

สำหรับความดันสัมผัสภายใต้พื้นที่สัมผัสรูปวงรีตามทฤษฎีของ Hertz (1881) มีสมการดังต่อไปนี้

$$p = p_m \left[1 - \left(\frac{2x}{D_x} \right)^2 - \left(\frac{2y}{D_y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

เมื่อ D_x = เส้นผ่านศูนย์กลางของผิวสัมผัสวงรีในทิศทางแกน x

D_y = เส้นผ่านศูนย์กลางของผิวสัมผัสวงรีในทิศทางแกน y

โดยความดันสัมผัสสูงสุด สามารถหาได้โดย

$$p_m = \frac{6w_z}{\pi D_x D_y} \quad (2.8)$$

เมื่อ w_z คือ ค่าของโพลดปกติที่กระทำ โดยสมการที่ 2.7 ใช้ในการหาค่าความดันที่เกิดขึ้นหรือความเค้นบนส่วนที่เกี่ยวข้องของผิวสัมผัส ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของบริเวณผิวสัมผัสและลดลงจนเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์

ค่าพารามิเตอร์ของรูปที่เป็นวงรี แสดงได้เป็น k ซึ่งถูกนิยามเช่นเดียวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณจุดสัมผัสของรูปวงรีในแนวแกน y (ทิศทางตามขวาง) ทหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณผิวสัมผัสที่เป็นรูปวงรีในแนวแกน x ดังสมการต่อไปนี้

$$k = \frac{D_y}{D_x} \quad (2.9)$$

ถ้าสมการ 2.6 เป็นไปได้ $\alpha_r > 1$ จุดสัมผัสจะมีทิศทางตามขวางสำหรับการเคลื่อนที่ ดังนั้น $K > 1$ และถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวแกนหลักเป็นเส้นตามยาวตามแนวการเคลื่อนที่ จะได้ $\alpha_r < 1$ และ $K < 1$ เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสน ในการแก้ปัญหาสำหรับการเปลี่ยนรูปร่างของผิวสัมผัสและความเค้น จะถูกแสดงให้เป็น $\alpha_r > 1$ เป็นการแก้ปัญหาที่ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ สำหรับในกรณี $\alpha_r < 1$ Harris (1996) ได้แสดงค่าพารามิเตอร์ของรูปวงรี และสามารถเขียนเป็นสมการที่สัมพันธ์กับการลบของผิวส่วนโค้งดังสมการ (2.3) และค่า τ จะแสดงความสัมพันธ์ของรูปวงรีตัวแรก และ ζ จะแสดงตัวที่สองดังสมการ

$$k = \left[\frac{2\tau - \zeta(1 + R_d)}{\zeta(1 - R_d)} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

$$\tau = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \phi \right]^{-1/2} \quad (2.11)$$

$$\zeta = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \sin^2 \phi \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

วิธีการกำหนดจุดที่นำมาใช้โดย Hamrock และ Anderson (1973) สามารถหาค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปวงรีได้ดังนี้

$$k_n + 1 \cong k_n \quad (2.13)$$

เมื่อทำตามขั้นตอนจนถึง $k_n + 1$ ค่าแตกต่างจาก k_n น้อยกว่า 10×10^{-7} ซึ่งสามารถแสดงถึงค่าพารามิเตอร์ของรูปวงรีเป็นฟังก์ชันของรัศมีของผิวความโค้งของแข็ง ดังนี้

$$k = f(r_{ax}, r_{bx}, r_{ay}, r_{by}) \quad (2.14)$$

2.1.3 ความเค้นของพื้นผิวย่อย

ความล้าโดยปกติอยู่ที่ผิวที่มีความลึกแน่นอนในระนาบที่ขนานกับทิศทางการหมุน เพราะที่เป็นเช่นนี้เป็นกรณีเพิ่มเติมโดยให้ช่วงของค่าความเค้นเฉือนอยู่ในแนวระนาบ ยิ่งไปกว่านี้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดอยู่ที่ค่าความลึกที่อยู่ภายใต้ผิวสัมผัสจากการวิเคราะห์ โดย Lundberg และ Palmgren (1947) ซึ่งใช้เพื่อให้นิยามความเค้นนี้ ความเค้นจะถูกอ้างอิงถึงพิกัดมุมฉากกับจุดกำเนิดที่ศูนย์กลางของการสัมผัส แกน z โดยปกติเกี่ยวข้องกับรูปร่าง โดยต้องพิจารณาแกน x ในทิศทางของการหมุนและแกน y ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุน ในการวิเคราะห์ สมมติให้ $y = 0$ จากทฤษฎีของ Lundberg และ Palmgren (1947) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\tau_{zx} = \frac{6w_z \cos^2 \phi_a \sin \phi_a \sin y_a}{\pi(D_y^2 \tan^2 y_a + D_x^2 \cos^2 \phi_a)} \quad (2.15)$$

$$x = \frac{1}{2}(D_x^2 + D_y^2 \tan^2 y_a)^{1/2} \sin \phi_a \quad (2.16)$$

$$z = \frac{D_y}{2} \tan y_a \cos \phi_a \quad (2.17)$$

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

ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด ถูกนิยามตามสมการดังต่อไปนี้

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

ค่าแอมพลิจูดของ τ_0 หาได้จาก

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

สำหรับจุดที่มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุด ;

$$\tan^2 \phi_a = t^* \quad (2.18)$$

$$\tan^2 y_a = t^* - 1 \quad (2.19)$$

$$\frac{D_x}{D_y} = \left\{ (t^*)^2 - 1 \right\} (2t^* - 1)^{1/2} \quad (2.20)$$

เมื่อ t^* เป็นค่าพารามิเตอร์รวม ตำแหน่งสูงสุดสามารถหาได้จาก

$$z_0 = \zeta^* \frac{D_x}{2} \quad (2.21)$$

$$x_0 = \pm \zeta^* \frac{D_x}{2} \quad (2.22)$$

$$\zeta^* = \frac{1}{(t^* + 1)(2t^* - 1)^{1/2}} \quad (2.23)$$

$$\zeta^* = \frac{t^*}{t^* + 1} \left(\frac{2t^* - 1}{2t^* + 1} \right)^{1/2} \quad (2.24)$$

ขนาดของความเค้นเฉือนสูงสุด แสดงในเทอมของ t^* ให้โดย

$$\tau_0 = P_m \frac{(2t^* - 1)^{1/2}}{2t^*(t^* - 1)} \quad (2.25)$$

τ_0 แสดงถึงค่าระยะตรงกลางที่จุดสูงสุดของผิวย่อยที่มีความเค้นเฉือนและไม่คำนึงถึงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของผิวย่อยที่เกิดขึ้นได้จุดศูนย์กลางบริเวณสัมผัสบนระนาบทำมุม 45° กับพื้นผิว Lundberg และ Palmgren ได้ทำนายถึงค่าความล้า เป็นพื้นฐานถึงการคำนวณของ τ_0 และถูกจำกัดโดยเส้นตัดตามขวางในระนาบของบริเวณการหมุน ($y=0$)

2.1.4 การแก้ปัญหาง่าย

การแก้ปัญหาของ Hertz จะแสดงให้เห็นในเนื้อเรื่องก่อนหน้านี้อีกเพื่อต้องการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของผิวสัมผัสวงรี k และค่าความสัมพันธ์ของวงรีที่สมบูรณ์ของชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 τ และ ζ วิธีการแก้ปัญหาล้ำยากับสมการที่สัมพันธ์กับค่า k , τ และ ζ บริเวณสัมผัสที่เป็นรูปเรขาคณิต

ของของแข็ง โดยปกติจะประสบผลสำเร็จต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขที่บรรยายโดย Hamrock และ Anderson (1973) หรือใช้วิธีการหาจากแผนภาพที่แสดงโดย Jones (1946)

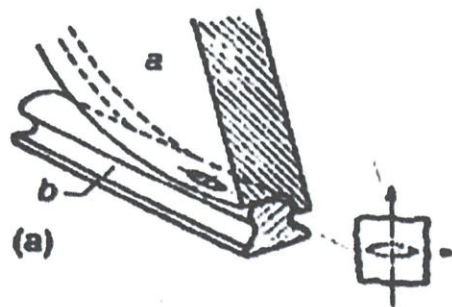
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าอัตราส่วนรัศมีต่างๆ α_r จะมีค่าแปรผันกับค่า k , r และ ξ ซึ่งได้มาจากกระบวนการทางตัวเลขที่แสดงโดย Hamrock และ Brewster (1983) ซึ่งใช้วิธีการ Linear Regression โดยวิธีการที่เรียกว่า Least Squares เพื่อหาข้อมูลที่เป็นชุดได้อย่างเหมาะสม

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

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของค่ารัศมีต่างๆ α_r และค่าที่ได้จะแปรผันกับค่าพารามิเตอร์รอง t^* ซึ่งใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งและค่าของผิวย่อยที่มีความเค้นเฉือนสูงสุด การแก้ปัญหาที่แน่นอนสำหรับ t^* ได้จากวิธีทางตัวเลขที่แสดงโดย Hamrock และ Anderson (1973) สำหรับชุดข้อมูล $[(t^*, \alpha_r, i), i = 1, 2, \dots, 44]$ จะแสดงในตารางที่ 2 สูตรอย่างง่ายจะได้จาก Hamrock และ Brewster (1983)

$$t^* = 1 + 0.16 \csc h \frac{k}{2} \quad (2.26)$$

เปอร์เซ็นต์สำหรับค่าผิดพลาด e_r ใช้สำหรับค่าพารามิเตอร์ตัวรองในตารางที่ 2.2 ค่าที่ยอมรับอยู่ระหว่างค่าที่แน่นอนและค่าที่ได้จากการประมาณของ t^* เป็นค่าที่ยอมรับได้ดีที่อัตราส่วนรัศมีน้อยเกินไป ($\alpha_r \leq 3$) สำหรับค่าของ t^* เป็นการหาตำแหน่งและค่าผิวย่อยสูงสุด



รูปที่ 2.3 การสัมผัสของล๊อบนรางรถไฟ

ตาราง 2.1 การเปรียบเทียบทางตัวเลขกับค่าตัวแปรของความโค้งที่เป็นรูปรีภาคณิต ($R_x = 1.0$ 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

ตาราง 2.2 ปรากฏการณ์ของอัตราส่วนรัศมีบนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณความเค้นของ
ผิวสัมผัส

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	-22.17	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

2.2 โหลดปกติของอีลาสติก, ไอโซโทรปิกปราศจากการเคลื่อนไหวอื่นๆ

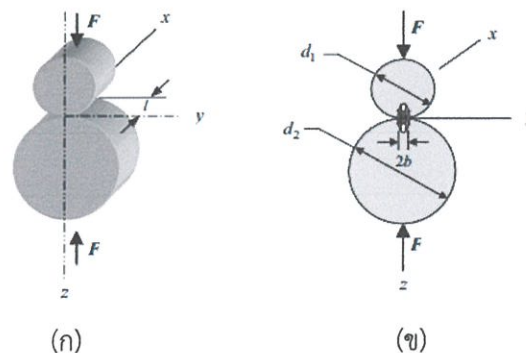
เรื่องนี้ถูกศึกษาโดยเฮิร์ต งานของเฮิร์ตได้รับการอธิบายโดยจอห์นสันในเอกสารต่างๆและในหนังสือชื่อ Contact Mechanics วิธีการบางส่วนของจอห์นสันถูกสรุปอยู่ในที่นี้ กล่าวคือ วัตถุของแข็ง 2 ชิ้นจะสัมผัสกันเป็นจุดเสมอ ยกเว้นในกรณีของการสัมผัสแบบทรงกระบอก การสัมผัสกันแบบนี้จะสัมผัสกันแบบเส้น พื้นผิวที่ยืดหยุ่นจะถูกบีบอัด และเกิดเป็นพื้นที่ในรูปแบบของการสัมผัส

ข้อสมมติฐานของทฤษฎีเฮิร์ต

- พื้นผิวมีความผิ
- พื้นผิวมีความต่อเนื่องและพื้นผิวไม่เหมือนกัน
- พื้นที่การสัมผัสเป็นพื้นที่ที่เล็กมากๆ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรโดยรวมของวัตถุทั้ง 2 ชิ้น
- ความเค้นสัมผัสจะมากเมื่อเปรียบเทียบกับกับความเค้นอื่นๆในวัตถุทั้ง 2 ชิ้น
- ความเครียดต้องมีค่าน้อย
- วัตถุแต่ละชิ้นต้องมีพื้นที่ครึ่งหนึ่งของความยืดหยุ่นที่จำกัด โดยระนาบ $z=0$

2.3 ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ต

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟจริง ให้อยู่ในรูปของชุดทดลอง จะต้องมีการหาค่าของตัวแปรต่างๆเพื่อที่จะทำให้การทดลองเสมือนกับของจริง หนึ่งในตัวแปรสำคัญคือโหลดที่กระทำกับล้อรถไฟ ซึ่งสามารถหาได้จากทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ต ซึ่งจากการทดลองเป็นการสัมผัสของทั้งล้อและรางรถไฟจะเป็นแบบการสัมผัสของทรงกระบอก 2 อัน (Cylinder-cylinder contact)



รูปที่ 2.4 ก) ทรงกระบอก 2 อันมีความยาว l ที่สัมผัสกันด้วยแรงกด F และ

ข) ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรูปวงรีที่มีความกว้างเท่ากับ $2b$

ขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้จาก

$$b = K_b \sqrt{F} \quad (2.27)$$

$$\text{เมื่อ } K_b = \sqrt{\frac{2(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{\pi d \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}}$$

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 : เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของทรงกระบอก 1 และ 2

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

ค่าความดันสัมผัสสูงสุดระหว่างทรงกระบอก 2 อัน เกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$p_{\max} = \frac{2F}{\pi b l} \quad (2.28)$$

ภาวะของความเค้น (State of stress) สามารถหาได้จาก

$$\sigma_3 = \sigma_z = -p_{\max} \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_b^2}} \quad (2.29)$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} \sigma_x & \text{for } 0 \leq \zeta_b < 0.436 \\ \sigma_y & \text{for } 0.436 \leq \zeta_b \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\tau_{\max} = \begin{cases} \sigma_z - \sigma_x & \text{for } 0 \leq \zeta_b < 0.436 \\ \sigma_z - \sigma_y & \text{for } 0.436 \leq \zeta_b \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\text{เมื่อ } \zeta_b = z/b \quad (2.32)$$

$$\sigma_x = -2\nu p_{\max} \left[\sqrt{1+\zeta_b^2} - |\zeta_b| \right] \quad (2.33)$$

$$\sigma_y = -p_{\max} \left[\left(\frac{1+2\zeta_b^2}{\sqrt{1+\zeta_b^2}} \right) - 2|\zeta_b| \right] \quad (2.34)$$

2.4 ทฤษฎีของเฮิร์ตสำหรับการสัมผัสแบบอีลาสติก

ลักษณะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นแบบรูปวงรี ซึ่งการเกิดความดันในพื้นที่ผิวสัมผัสจะถูกพิจารณาแบบ General profiles โดยความดันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาภายใต้พื้นที่ผิวสัมผัสที่สมการดังนี้

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 - 1 = 0 \quad (2.35)$$

จะได้สมการในการสร้างรูปแบบการเกิดความดันตามทฤษฎีของเฮิร์ตดังนี้

$$p = p_{\max} \left\{ 1 - (x/a)^2 - (y/b)^2 \right\}^{1/2} \quad (2.36)$$

และโหลดทั้งหมดที่กระทำบนพื้นที่สัมผัสวงรีหาได้จาก

$$F_{Total} = (2/3)p_{\max} \pi ab \quad (2.37)$$

2.5 การสึกหรอ

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

2.5.1 สมการพื้นฐานของการสึกหรอ (Archard's wear equation)

$$Q = \frac{kWl}{H} \quad (2.38)$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ (Wear Coefficient)
 W = แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Normal load), N
 l = ระยะทางของการเคลื่อนที่ (Sliding Distance), m
 Q = ปริมาตรของการสึกหรอ (Volume Removed), mm^3

2.5.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการศึกษาหรือ

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

2.6 คุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมการสึกหรอ

ความเสียหายจากการสึกหรอสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณผิวนำภายนอกและผิวนำภายในซึ่งมักมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่างสสาร 2 ตัวที่สัมผัสกัน กล่าวคือ

- ผิวแข็งเคลื่อนที่บนผิวแข็ง
- อนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามาในช่องเหลวหรือก๊าซ มาปะทะลงบนผิวแข็ง
- การไหลของของเหลวหรือก๊าซบนผิวแข็ง

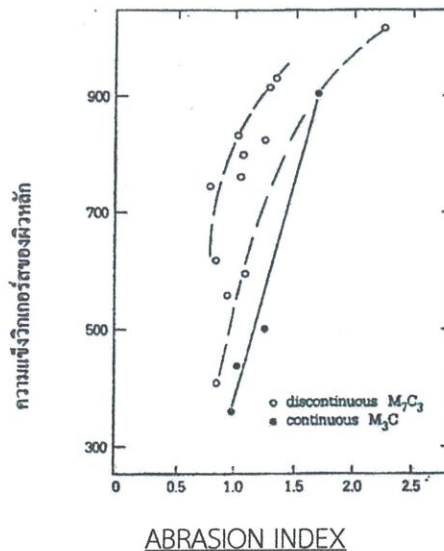
ในแต่ละกรณีข้างต้น ความเสียหายจากการสึกหรอ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางกล ทางเคมี และทางความร้อน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้น ลักษณะและขอบเขตของความเสียหายที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังต่อไปนี้

- โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสทั้ง 2 หน้า และโครงสร้างของเนื้อชิ้นงาน
- ประเภทของวัสดุที่มาสัมผัสกัน และอัตราการหล่อลื่นระหว่างผิว
- การเคลื่อนที่สัมผัสของผิวหน้า
- แรงกระทำ ณ บริเวณจุดสัมผัส

ปัจจัยเหล่านี้ได้ครอบคลุมถึงคุณสมบัติของวัสดุหลายอย่าง รวมทั้งคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการ คือ ความเสียดทาน และความแข็ง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานกับการสึกหรอ หรือความแข็งกับการสึกหรอเป็นกลไกที่ซับซ้อนมาก โดยทั่วไปแล้ว ค่าความเสียดทานที่ต่ำมักส่งผลให้อัตราการสึกหรอมีค่าต่ำด้วย

ตาราง 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียหายและอัตราการสึกหรอของคู่มือสัมผัสบางประเภท

คู่มือสัมผัส	ค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียหาย μ	อัตราการสึกหรอ ($\text{cm}^3/\text{cm} \times 10^{-12}$)
เหล็กกล้าคาร์บอน 0.2% บนผิวชนิดเดียวกัน	0.62	157000
Cu-37% Zn-3%	0.6	24000
อัลลอย Stellite บนเหล็กกล้าคาร์บอน	0.6	320
เหล็กกล้าไร้สนิมบนเหล็กกล้าคาร์บอน	0.53	270
ทังสเตนคาร์ไบด์บนผิวชนิดเดียวกัน	0.35	2
โลหะผิวสะอาดในสูญญากาศบนผิวชนิดเดียวกัน	1-5 หรือสูงกว่า	-
โลหะในบรรยากาศออกซิเจนบนผิวชนิดเดียวกัน	0.4-0.1	-
พอลิเมอร์บนผิวโลหะ	0.1-0.3	-
กรณีที่มีสารหล่อลื่นปกคลุมผิววัสดุบางส่วน	0.1	-



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระหว่างจุลภาค (Microhardness) ณ บริเวณผิวสัมผัสกับดัชนีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion index) ของโลหะผสมที่มีอนุภาคของคาร์ไบด์แบบต่อเนื่อง (M_3C) และแบบไม่ต่อเนื่อง (M_7C_3) ผสมอยู่ในโครงสร้าง

ในหลายกรณี การเปลี่ยนแปลงค่าความเสียหายเพียงเล็กน้อยกลับมีผลให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้อย่างมหาศาล ส่วนคุณสมบัติความแข็งที่สูง ทำให้มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดี ดังรูป

ที่ 2.5 แต่ในบางกรณี โครงสร้างที่แข็งแกร่งสึกหรออย่างรวดเร็ว เนื่องจากการแตกและหลุดออกของเนื้อวัสดุที่แข็งแต่เปราะ นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงโพลดที่กระทำ ความเร็วของการเคลื่อนที่ และสภาวะแวดล้อมเพียงเล็กน้อยก็สามารถมีผลกระทบต่อกลไกและอัตราการสึกหรอได้

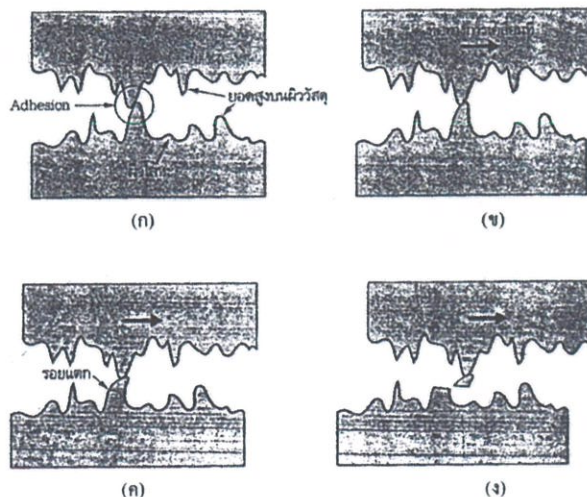
คุณสมบัติของวัสดุ ส่งผลกระทบต่อปฏิริยาระหว่างผิวหน้า ขณะที่เกิดการสึกหรอจะแตกต่างกันไปในแต่ละกรณี ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ได้แก่

1. การสึกหรอแบบพันธะแนบติด (Adhesive wear)
2. การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive wear)
3. การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Fatigue wear)

2.7 การสึกหรอแบบพันธะแนบติด (Adhesive wear)

2.7.1 ลักษณะของคูผิวสัมผัส

เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิว เคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะโลหะ สามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูง (Asperity) ของวัสดุมาแตะกันนี้ เรียกว่า พันธะแนบติด (Adhesion) ในขณะที่ผิวหน้า 2 ผิว เคลื่อนที่สัมผัสระหว่างกัน พันธะแบบแนบติดจะสามารถขยับและหลุดออกจากกันได้ ในขณะที่เดียวกัน ยอดสูงเหล่านี้ก็อาจแตกหักออกได้เช่นกันถ้าหากความแข็งแรงของพันธะโลหะนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของยอดสูงของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นก็แตกและทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้กับคูผิวสัมผัส ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผิวของวัสดุ เมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็นจุดสัมผัสขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบแนบติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้

ในช่วงที่เกิดการสึกหรอ การสร้างพันธะแบบแนบติดและการแตกหักของผิววัสดุตั้งที่กล่าวมา จะเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตลอดเวลา ซึ่งมักเกิดขึ้น 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าวัสดุทั้ง 2 มีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้าง (Structural compatibility) ที่ดี เนื่องจากค่าความเสียดทานระหว่างวัสดุขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้นี้ เช่น โลหะโครเมียมกับทองแดงมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างที่ต่ำ ดังนั้น ความเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ผิวนี้จึงมีค่าที่ต่ำด้วย

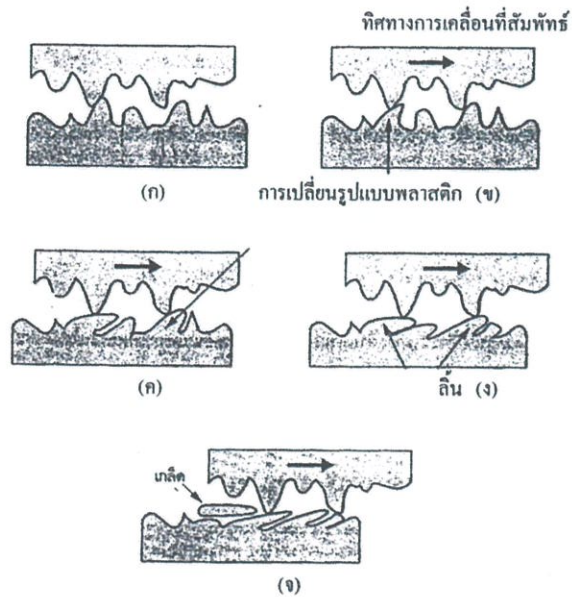
ถ้าหากวัสดุ A มีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุ B โดยรวม วัสดุ B จะสูญเสียให้กับวัสดุ A ในขณะที่วัสดุแตกออก ผิวหน้าใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยแตกจะเกิดการออกซิเดชัน ซึ่งปฏิกิริยาถูกเร่งโดยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีทำให้เกิดออกไซด์บนผิววัสดุที่แตกออก ซึ่งมาทับถมบนผิวหน้า สร้างเป็นชั้นขึ้นมาซึ่งชั้นนี้ก็จะมือออกไซด์ของเหล็กปะปนอยู่ด้วย (ออกไซด์ที่ฝังตัวอยู่จะทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนั้นแตกง่าย) บางครั้งชั้นของเศษทับถมก็จะหลุดล่อนออกมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากทั้ง 2 ผิวสัมผัส

ดังนั้น พฤติกรรมการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุทั้ง 2 ที่เข้ามาสัมผัสกัน โดยพันธะแบบแนบติดจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า หากผิวสัมผัสมีความสะอาดปราศจากออกไซด์บนผิวหน้า (มือออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่น้อย) และคู่วัสดุมีความคล้ายคลึงกันหรือเข้ากันได้ทางเคมีและทางโครงสร้างวัสดุ

วิธีการป้องกันความเสียหายจากการสึกหรอวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงมาก คือ การใช้สารหล่อลื่นของเหลวหรือของแข็งกึ่งของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจารบี โดยใช้สารหล่อลื่นนี้กระจายตัวเป็นฟิล์ม ปกคลุมผิวชิ้นงานเอาไว้ หน้าที่หลักของสารหล่อลื่น เช่น ที่ใช้ในระบบเกียร์หรือลูกปืนแบร์ริงต่างๆ คือ เพื่อแยกผิวสัมผัสทั้งสอง ให้อยู่ห่างออกจากกัน เพื่อป้องกันการเกิดพันธะแบบแนบติดและลดการไถครูดจากยอดสูง นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังสามารถช่วยการหล่อเย็นของผิววัสดุเพื่อลดอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสได้อีกด้วย

2.7.2 ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) และการต้านทานความล้า (Fatigue)

ถ้าหากพันธะแบบติดที่กล่าวไว้ข้างต้นไม่ได้เกิดขึ้น วัสดุที่มีความอ่อนนุ่มอาจเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกในบริเวณยอดสูงที่สัมผัสกับผิวหนึ่งเมื่อโดนแรงกระทำในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ได้ เมื่อถูกดันไปในทิศทางหนึ่ง ยอดสูงเหล่านี้จะถูกอัดให้แบนออกเป็นแผ่นและยืดยาวออกไปในทิศทางนั้นเป็นลักษณะคล้ายเส้นแรงกระทำซ้ำๆ ในลักษณะนี้จะทำให้ล้นแตกและหลุดออกเป็นเศษเกล็ดเล็กๆ ที่เกิดจากการสึกหรอ (Wear debris) การสึกหรอในลักษณะนี้เรียกว่า “การหลุดล่อน” (Delamination) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงปฏิภยาระหว่างผิวสัมผัสเมื่อไม่มีพันธะโลหะแบบแนบติดเกิดขึ้น ผิวที่มีความอ่อนนิ่มของวัสดุมากกว่าจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งนำไปสู่การหลุดล่อนของเศษเกล็ดเล็กๆในที่สุด

นอกจากนี้ ความล้าที่เกิดขึ้นจากแรงกดและจากการไครูดของยอดสูงและอนุภาคแข็งอิสระที่ติดอยู่ระหว่างผิว จะทำให้มีรอยแตกเกิดขึ้นภายในผิววัสดุ ซึ่งทำให้เกิดการสึกหรอต่อไป

ดังนั้น ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับ ความแข็ง ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) และความสามารถล้า

2.7.3 ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน

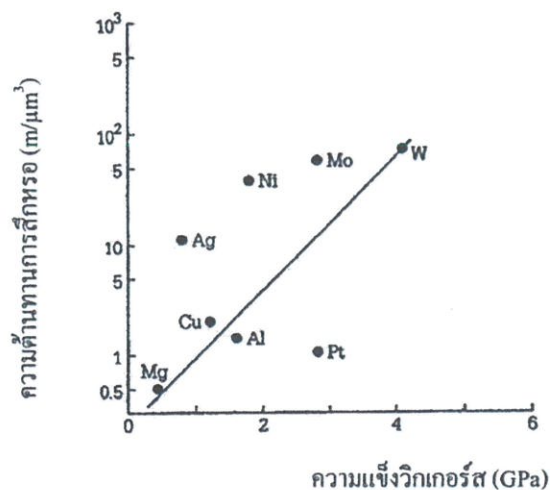
ก่อนหน้าที่ผิวของวัสดุ จะเข้ามาสัมผัสกัน มักมีชั้นฟิล์มบางๆ ของออกไซด์ปกคลุมผิวอยู่แล้ว ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่อยู่ในลักษณะนี้มัก ทำให้การสึกหรอที่กำลังจะเกิดทวีความรุนแรงมากขึ้น แต่ถ้าหากว่าฟิล์มออกไซด์มีความหนาแน่นและมีแรงยึดเกาะสูงพอ จะทำให้พันธะที่เกิดขึ้นบริเวณยอดสูงถูกจำกัดเนื่องจากโลหะกับออกไซด์ซึ่งเป็นเซรามิกมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้น อัตราการสึกหรอก็จะลดลงด้วยตามที่กล่าวไว้ในข้างต้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากว่าฟิล์มออกไซด์นี้เกิดแตกขึ้นมา เช่น ในกรณีที่แรงกดจากภายนอกเพิ่มสูงขึ้น เนื้อโลหะของยอดสูงที่เปลือยออกก็สามารถสัมผัสและเกิดพันธะแบบแนบติดขึ้นได้ นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในกรณีที่เป็นการเสียดสีแบบแห้ง กล่าวคือไม่มีการใช้สารหล่อลื่น หรือมีการหล่อลื่นไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดโครงสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆ ขึ้นอีกบนผิว ซึ่งจะแตกออกเมื่อถูกเสียดสี ส่วนหนึ่งของออกไซด์จะปะปนอยู่ในชั้นเศษของการสึกหรอที่ทับถมกัน ดังกล่าวไปแล้วข้างต้น และอีกส่วนหนึ่งจะหลุดเป็นอิสระออกจากผิวของพันธะที่เกิดขึ้น

ประกอบกับเศษออกไซด์ที่แตกออก จะทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสียังอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้น และอาจเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปของชิ้นงานนั้นอีกด้วย ซึ่งในกรณีที่ผิวของวัสดุมีการสัมผัสกับสารเคมีของผิวหน้าของวัสดุนั้น สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนได้

2.8 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive Wear)

วัสดุที่สามารถต้านทานการสึกหรอจากการขัดถูได้ดี มักมีโครงสร้างจุลภาคแบบแบ่งเป็นเฟส ซึ่งประกอบด้วย เนื้อหลัก หรือ Matrix (เฟสที่มีความต่อเนื่อง เป็นตัวกลางหรือตัวประสานในวัสดุ) ที่มีความเหนียว (Toughness) และอนุภาคแข็งขนาดเล็ก เช่น สารประกอบคาร์ไบด์หรือยูเทคติกคาร์ไบด์ กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อหลัก ขณะที่เกิดการขัดถูวัสดุนี้จะสึกหรอออกไปด้วยสาเหตุต่างๆ ได้แก่

1. การสึกหรอและการกัดกร่อนเฉพาะที่บริเวณเนื้อหลักเท่านั้น (Selective removal)
2. การสึกหรอโดยการเปลี่ยนรูปของเนื้อหลัก
3. การแตกของอนุภาคแข็งภายในเนื้อหลักเนื่องจาก
 - แรงกระทำภายนอก เช่น แรงกดแบบ Indentation
 - การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือการสึกหรอของเนื้อหลักรอบอนุภาคนั้น
 - การแตกของรอยต่อระหว่างอนุภาคแข็งและเนื้อหลัก
4. การแตกจากความล้าเนื่องจากการกระทำซ้ำๆ ของแรงกดและการไถครูด



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโลหะบริสุทธิ์ที่เสียดสีบนโลหะชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่นกับความแข็งวิกเกอร์ส

ในสภาวะการใช้งานส่วนมากการสึกหรอแบบขัดถู มักเกิดในกรณีที่มีแรงกระทำที่ชิ้นงานอยู่ด้วย ซึ่งในการเลือกใช้วัสดุสำหรับผลิตชิ้นงานหนึ่งๆ ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติหลายประการ รวมถึงความแข็ง เพื่อป้องกันการสึกหรอ การยุบตัว และความเหนียวเพื่อป้องกันการแตกหักของชิ้นงาน

คุณสมบัติด้านความแข็ง ถูกนำมาเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แต่ค่าความแข็งรวมของเนื้อวัสดุเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านทานการสึกหรอได้ดีเท่าไรนัก สังเกตได้จากการกระจายตัวของข้อมูลกราฟ ดังนั้น เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ 2 ตัวนี้มีความหมายมากที่สุด จึงควรพิจารณาตั้งแต่ ค่าความแข็งเริ่มแรกของวัสดุ ค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นจากความเครียดเมื่อผ่านการใช้งาน (Work hardening) และความลึกของความแข็งดังกล่าว ความแข็งของเฟสต่างๆ ในเนื้อวัสดุ การกระจายตัวของเฟสนั้นๆ และผลกระทบของอุณหภูมิและใช้งานที่มีต่อความแข็ง

ดังนั้น สำหรับการสึกหรอแบบขัดถู ต้องคำนึงถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมความแข็งรวมถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยความเครียด ความเหนียว และที่สำคัญพฤติกรรมการกัดกร่อน เนื่องจากในการนำชิ้นส่วนไปใช้งานมักจะต้องมีของเหลวหรือก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเข้ามาเกี่ยวข้อง

2.9 การสึกหรอเนื่องจากความล้า (Fatigue Wear)

การสึกหรอที่เกิดจากความล้านี้ ปัจจัยที่สำคัญที่สุด คือ หลังจากการแตกหัก ดังนั้น สมบัติที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้การสึกหรอประเภทนี้ก็คือ ความเหนียว การสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการสะสมของการเสียหายที่เห็นไม่เด่นชัดนักจากการให้แรงซ้ำไปซ้ำมา หรือการให้แรงกระทำแบบวงรอบ (Cyclic load) เป็นจำนวนมาก จนในที่สุดการเสียหายก็เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ เกิดการหลุดออกของอนุภาคจากพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า การสึกหรอแบบนี้มักไม่รุนแรง และเกิดเมื่อมีการหมุนหรือการไถลของวัสดุ การสึกหรอแบบนี้มักพบควบคู่ไปกับการเกิดการสึกหรอแบบขัดถู และการสึกหรอแบบแนบติด ถึงแม้ว่าการสึกหรอประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุเช่นเดียวกัน แต่อาจมีผลมาจากความล้าของตัวเนื้อวัสดุทั้งหมด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกและการเติบโตของรอยแตกนั้นๆ ดังนั้น พอลิเมอร์ที่มีความเหนียวสูงจึงมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและการฉีกขาดได้เป็นอย่างดี

2.10 แรงเสียดทาน (Friction force)

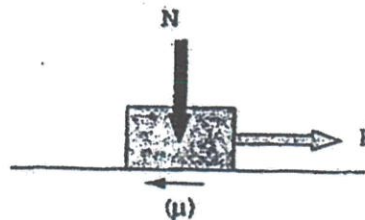
ความเสียดทานเป็นแรงต้านทานการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิว 2 ผิว ลักษณะของการเคลื่อนที่อาจเป็นการเลื่อนไถล (Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจสัมผัสกันโดยตรง หรือมีของเหลว หรือมีฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมผัส ปัญหาสำคัญของความเสียดทาน คือ การที่ผิวเกิดความเสียดทานระหว่างผิววัสดุ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบ เพื่อเอาชนะแรง

เสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้ พลังงานที่สูญเสียไปนี้เมื่อนำมารวมกัน พบว่ามีมูลค่ามหาศาล การศึกษาที่มุ่งเน้นในการลดแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในวิทยาการสมัยใหม่ทั้งในการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และการออกแบบระบบให้เกิดความเสียดทานน้อยที่สุด เป็นต้น แต่ในบางกรณีความเสียดทานก็เป็นที่ต้องการ เช่น การเดิน การขับเคลื่อนของรถยนต์ การหยิบจับสิ่งของ ถ้าไม่มีความเสียดทานระหว่างผิว กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นไม่ได้ ดังนั้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานระหว่างผิว กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ก็จะเกิดขึ้นไม่ได้ ดังนั้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานจึงประกอบด้วยการศึกษาเพื่อลดความเสียดทานให้ต่ำที่สุดในกรณีที่ไม่ต้องการ และการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานให้เพียงพอกับความต้องการในการทำงานบางอย่าง นอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่ต้องการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานในช่วงเวลาแคบๆ ให้สามารถควบคุมได้ เช่น ในระบบเบรกรถยนต์ ซึ่งการทำงานของเบรกไม่ต้องการให้หยุดในทันที ต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดของรถไม่ให้ช้าหรือเร็วจนเกินไปเพื่อการนุ่มนวลในการขับขี่ เป็นต้น

โดยสมการสำหรับแรงเสียดทาน คือ

$$\mu = F / N \quad (2.39)$$

เมื่อ μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
 F = แรงที่ทำให้เคลื่อนที่
 N = แรงตั้งฉาก, น้ำหนัก



รูปที่ 2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ขนาดหรือระดับของค่าความเสียดทาน โดยทั่วไปเราใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นตัววัดค่า โดยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถคำนวณหาได้ตามรูปที่ 2.9

2.10.1 การเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)

ผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่ค้นพบเรื่องความเสียดทาน คือ Leonardo da Vinci หลังจากนั้น Amontons ได้ทำการสังเกตและตั้งกฎพื้นฐานความเสียดทานไว้ 2 ข้อ ซึ่งได้รับการกล่าวถึงและมีการนำไปอ้างอิงเป็นที่แพร่หลาย ต่อมากฎข้อที่ 3 ก็ได้ตั้งขึ้นมาจากการสังเกตของ Coulomb ซึ่งมีเนื้อหาดังนี้ คือ

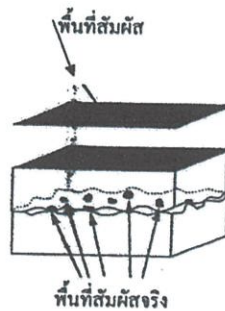
กฎข้อที่ 1 แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงตั้งฉาก ($F = \mu N$)

กฎข้อที่ 2 ความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส (Apparent area of contact)

กฎข้อที่ 3 แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่สัมผัส

กฎข้อที่ 1 และ 2 โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับ มีเพียงบางกรณีที่ไม่เป็นไปตามกฎ เช่น ในกรณีวัสดุที่แข็งมากๆ เช่น เพชร หรือกรณีที่วัสดุอ่อนมาก เช่น PTFE (Teflon) พบว่าอาจเกิดความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ($F = CN^2$) ได้ นอกจากนี้ในกรณีที่วัสดุอ่อนนุ่มแต่ฟิล์มแข็งเคลือบอยู่ในสภาวะทำงานที่มีค่าความเค้นต่ำฟิล์มแข็งที่เคลือบอยู่จะมีผลกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น จึงเป็นการวัดความเสียดทานระหว่างฟิล์มเคลือบกับวัตถุที่มากกระทำ แต่เมื่อความเค้นที่มากกระทำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ฟิล์มเคลือบแตกเนื้อของวัสดุภายในจะเป็นตัวที่มีอิทธิพลกับค่าความเสียดทานเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและแรงกดจึงเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 คือ กรณีที่ผิวงานเรียบมากและสะอาดมากจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสูง จึงทำให้แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเค้นที่มากกระทำ 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 ซึ่งก็จะเป็นไปตามกฎข้อที่ 3

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าทั้ง 3 ข้อที่ตั้งขึ้นมานั้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาความเสียดทานเท่านั้น ในทางปฏิบัติ ต้องนำปัจจัยอื่นๆ มาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์หาค่าความเสียดทานด้วย



รูปที่ 2.10 พื้นที่สัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป

- กลไกพื้นฐานของการเกิดความเสียหายแบบไหล

เป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นผิวทางวิศวกรรมไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริง ถึงแม้มองเห็นว่าเรียบด้วยตาเปล่าแต่เมื่อมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะที่เป็นคลื่นขรุขระอยู่ แบบจำลองของความเสียหายจึงขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่สัมผัสกันจริง (Real area of contact) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 Bowen และ Tabor สร้างสมมุติฐานว่า บริเวณที่สัมผัสกันของผิววัสดุจะเกิดความเค้นสูงที่จุดสัมผัสระหว่าง 2 ผิว เนื่องจากเป็นบริเวณเล็กๆ จึงเกิดเป็นการเชื่อมติดกัน และถูกฉีกให้แยกออกจากกันเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัส

ภายหลังพบว่า ความเค้นสูงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสไม่ได้เกิดการเชื่อมยึดติดกัน แต่มีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัส แรงที่ใช้ต้องมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวนี้ได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัส ส่วนที่เป็นยอดสูงของส่วนที่แข็งกว่าของคู่สัมผัสจะขูดลงบนผิวที่อ่อนกว่า เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจึงต้องการแรงหรือพลังงานอีกส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนรูปของผิวที่อ่อนกว่า ดังนั้น แรงเสียหายซึ่งเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัส (F) จึงต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว (F_a) และแรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ (F_d) เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$F = F_a + F_d \quad (2.40)$$

- แรงยึดเหนี่ยว (Adhesive Force)

พื้นผิวเล็กๆบริเวณที่สัมผัสกันจริงจะเกิดการยึดเหนี่ยวซึ่งอาจเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาทางกายภาพหรือทางเคมี แรงยึดเหนี่ยวเกิดได้ง่ายบนพื้นผิวที่เรียบ สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรก ในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสได้นั้นจะต้องมีแรงกระทำที่เพียงพอในการฉีกเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวนี้ บริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดก็จะฉีกขาด ซึ่งอาจจะเป็นที่ผิวสัมผัส หรือเนื้อของวัสดุตัวใดตัวหนึ่งในกรณีที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสแข็งแรงกว่าเนื้อในของวัสดุตัวนั้น

จากทฤษฎีของ Bowden และ Tabor

กรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Dry friction) พบว่า	กรณีที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (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

- แรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ (Deformation Force)

เนื่องจากบริเวณที่สัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัส มักเป็นบริเวณเล็กๆ ของยอดสูง (Asperity) ขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง 2 ผิว จึงมักเกิดกลไกการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของผิวคู่สัมผัส ส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวสัมผัสที่แข็งแรงกว่าจะขูดไปบนผิวที่อ่อนกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร เกิดการแตกหัก หรือการฉีกขาดของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า ดังนั้น เพื่อให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์อย่างต่อเนื่อง แรงในการเคลื่อนที่จึงต้องมากเพียงพอในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่อ่อนกว่านอกเหนือจากนั้นผิววัสดุบางส่วนที่ถูกขูดจนเกิดการแตกหัก เมื่อหลุดออกจากผิวชิ้นงานก็จะกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากกลไกการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียด (Work hardening) อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้มีอิทธิพลในการเพิ่มแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่เพราะสามารถขูดไปบนผิวชิ้นงานเหมือนกับส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวแข็ง ถ้าหากต้องการลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปวัสดุในชิ้นงานนี้ สามารถทำได้โดยปรับสภาพผิวคู่สัมผัสให้มีความเรียบสูง ซึ่งช่วยลดปริมาณของยอดสูงและลดการเปลี่ยนรูปของวัสดุให้น้อยลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผิวที่มีความแข็งแรงสูงต้องทำให้เรียบมากยิ่งขึ้น

2.10.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)

ในการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างพื้นผิว ลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลิ้งเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า กล่าวคือ ระบบคู่สัมผัสจะต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ต่ำกว่าลักษณะการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล แต่การเคลื่อนที่แบบกลิ้งมักเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่วัตถุคู่สัมผัสหนึ่งมีลักษณะกลมหรือเกือบกลมเท่านั้น ในกลไกของการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พลังงานในการเคลื่อนที่สัมผัสของระบบจะต้องสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและแรงในการเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งก็เหมือนกับการเคลื่อนที่แบบไถล แต่มีความแตกต่างที่ทิศทางในการเข้าหา (Approach) และการเคลื่อนที่ (Separation) ของบริเวณสัมผัสซึ่งจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิว ไม่ได้เกิดในทิศทางที่สัมผัสกับผิวเหมือนการไถล โดยปกติในขณะที่เกิดการกลิ้ง จะมีการเคลื่อนที่รูปแบบอื่นอยู่ด้วย คือการไถลและการหมุน ถึงแม้ว่าการไถลและการหมุนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง แต่ก็เป็นตัวสร้างความต้านทานการเคลื่อนที่ ส่วนใหญ่ของการเคลื่อนที่ทั้งหมด ตามสมการของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบกลิ้ง ดังต่อไปนี้

$$\mu_R = \frac{V_s}{V_R} \mu_k \quad (2.41)$$

โดยที่ V_s คือ ค่าความเร็วของการไถล
 V_R คือ ความเร็วของการกลิ้ง
 μ_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ในสภาวะการเคลื่อนที่แบบไถล

กฎการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

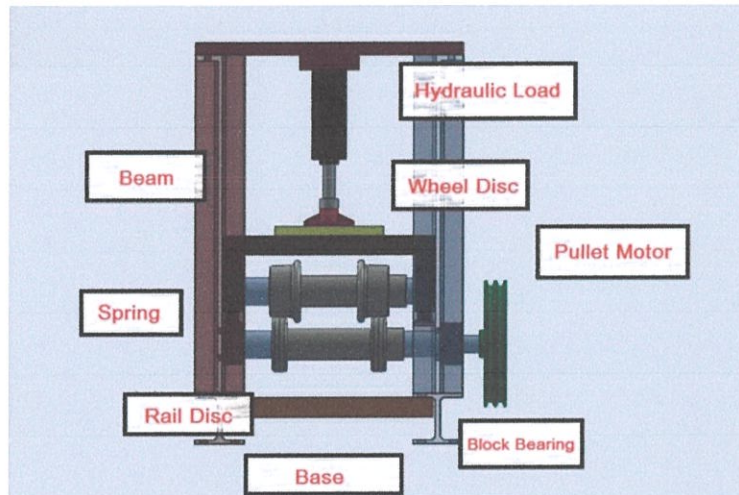
1. แรงเสียดทานแปรผกผันกับค่ารัศมีความโค้งของผิวที่กลิ้ง
2. ผิวที่เรียบจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าผิวที่หยาบ
3. ความเสียดทานสถิต (Static friction) มีค่าสูงกว่าความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction)

บทที่ 3

การออกแบบการทดลองและชุดทดลอง

3.1 การทดลองและชุดทดลอง

ในการทดลองใช้ชุดทดลองซึ่งจำลองมาจากการเคลื่อนที่ของล้อและรางรถไฟจริง โดยย่อขนาดให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมและสามารถทดลองจริงได้



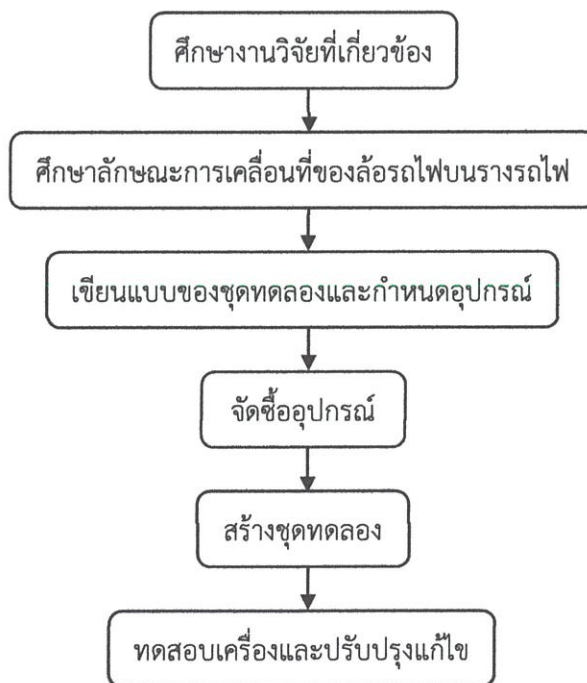
รูปที่ 3.1 แผนภาพของชุดทดลองการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ

ชุดทดลองนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 12.5 กิโลวัตต์ 1 ตัวที่เพลลาของแผ่นรางรถไฟซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร และขับแผ่นล้อรถไฟซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร มีโหลดไฮดรอลิกกระทำในแนวรัศมีขนาด 550 กิโลกรัม (แผ่นล้อรถไฟ 1 ล้อรับภาระโหลดอยู่ที่ 275 กิโลกรัม) ซึ่งหามาได้จากการพิจารณาโดยใช้ทฤษฎีความเค้นสัมผัสสูงสุดของเฮิร์ตเทียบกับล้อรถไฟจริงซึ่งรับภาระโหลดจริงอยู่ที่ 7.5 ตันต่อหนึ่งล้อรถไฟ (ค่าความดันสูงสุดของเฮิร์ตประมาณ 600 เมกะปาสคาล) โดยในการทดสอบนี้ใช้รางทั้งหมด 3 แบบคือ รางปกติระดับต่างกัน 0 มิลลิเมตร, รางเอียงศูนย์กลางระดับต่างกัน 3 มิลลิเมตร และรางเอียงศูนย์กลางระดับต่างกัน 5 มิลลิเมตร ซึ่งในแต่ละกรณีทดสอบที่จำนวนรอบ 100,000 500,000 และ 1,000,000 รอบ แล้วใช้เครื่องมือวัดไดอัลเกจ วัดความสึกหรอที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ในแต่ละครั้งตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ข้างต้น



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ

3.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

3.3 แผ่นล้อและแผ่นรางทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ทำล้อและรางรถไฟในการทดสอบ คือ เหล็ก S22C เป็นวัสดุเหล็กตามมาตรฐาน JIS G4051 ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้

ตาราง 3.1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก JIS G4051-S22C

MECHANICAL PROPERTIES	METRIC
TENSILE STRENGTH	425 MPa
YIELD STRENGTH	360 MPa
SHEAR MODULUS	80.0 GPa
BULK MODULUS	140 GPa
ELASTIC MODULUS	210 GPa
POISSON'S RATIO	0.30
ELONGATION AT BREAK	15%

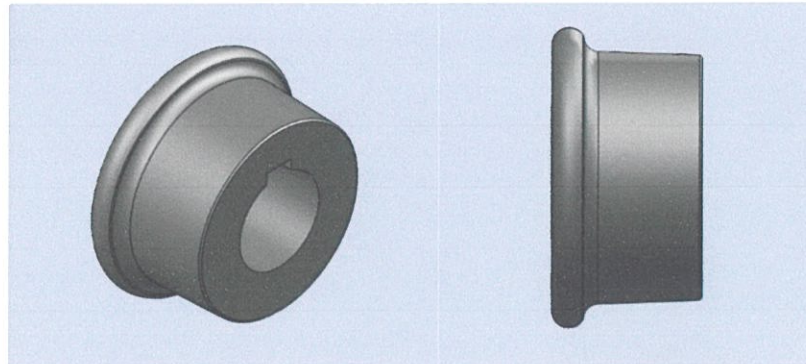
โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการทำล้อและรางรถไฟ ได้เลือกมาตามมาตรฐาน AAR M107 และ ASTM A504-89 ซึ่งจัดประเภทของล้อรถไฟแบ่งเป็น 5 ประเภท คือ ประเภท U, L, A, B และ C โดยวัสดุที่ใช้จัดอยู่ในล้อรถไฟประเภท L

ตาราง 3.2 การแบ่งประเภทของล้อรถไฟตามมาตรฐาน ASTM A504-89

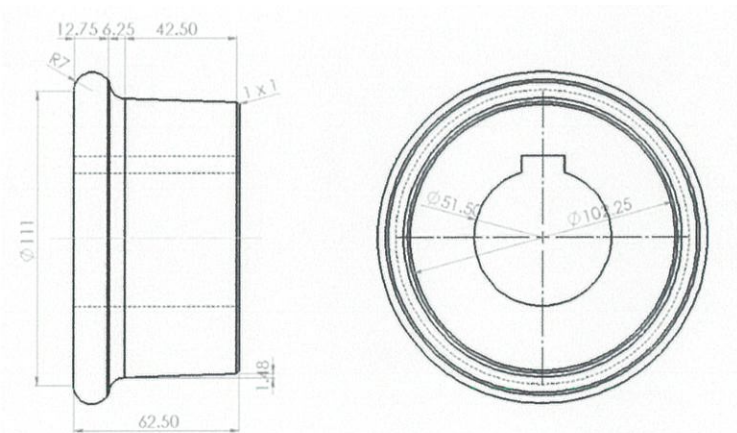
Class	w/o C	BHN	Service Condition
U	0.65-0.77	-	General service where an untreated wheel is satisfactory
L	≤ 0.47	197-277	Light wheel loads, high speed service, more severe braking conditions than other classes
A	0.47-0.57	255-321	Moderate wheel loads, high speed service, severe braking conditions
B	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

3.3.1 แบบของแผ่นล้อรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ

แผ่นล้อที่ใช้ในการทดสอบ มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงโคน (Cone shape) ซึ่งเหมือนกับล้อรถไฟจริง เพียงแต่ถูกย่อขนาดให้เล็กลง เพื่อให้สามารถทดลองในห้องปฏิบัติการได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดเท่ากับ 125 มิลลิเมตร และมีความเอียงของหน้าผิวล้อตรงบริเวณโคนเท่ากับ 2 องศา



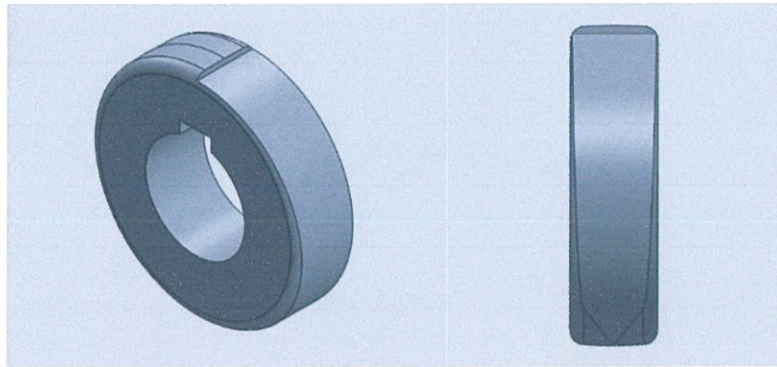
รูปที่ 3.4 แบบของแผ่นล้อที่ใช้ในการทดลอง 3 มิติ และ 2 มิติด้านข้าง



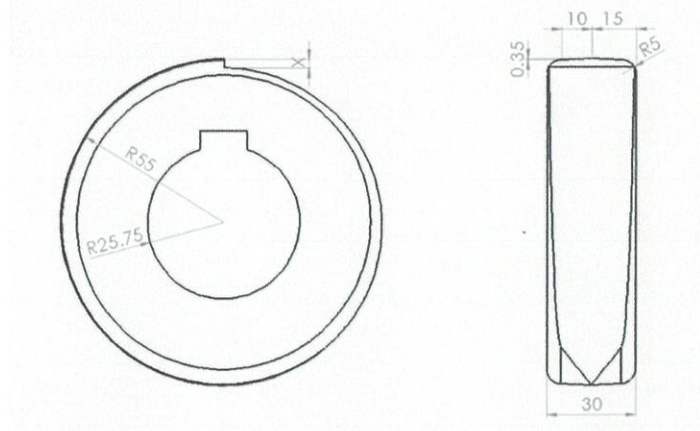
รูปที่ 3.5 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นล้อ

3.3.2 แบบของแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ

แผ่นรางที่ใช้ในการทดสอบ ถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมือนกับรางรถไฟจริง โดยมีรูปร่างเหมือนหลังเต่า ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดเท่ากับ 110 มิลลิเมตร และมีความเอียงของหลังเต่าเท่ากับ 2 องศา โดยแผ่นรางที่ใช้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี ซึ่งในแต่ละกรณี มีความต่างระดับของผิวราง X แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 3.3



รูปที่ 3.6 แบบของแผ่นรางที่ใช้ในการทดลอง 3 มิติ และ 2 มิติด้านหน้า



รูปที่ 3.7 แบบ Drawing และ Dimension ต่างๆของแผ่นราง

ตาราง 3.3 ชนิดของแผ่นรางในการทดสอบ

Case	X value (mm.)
1 (Alignment 0 mm.)	0
2 (Misalignment 3 mm.)	3
3 (Misalignment 5 mm.)	5

3.4 โหลดกระทำที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษานิวตริกการเกิดการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเกิดการสึกหรอ คือ โหลดที่กระทำต่อล้อและรางรถไฟ ในการทดลอง ค่าโหลดที่กระทำต่อแผ่นล้อและแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ คำนวณมาได้จากทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ต โดยใช้ค่าโหลดกระทำที่ทำให้ความดันสัมผัสสูงสุดของแผ่นล้อและแผ่นรางทดสอบ กับ ล้อและรางรถไฟจริงมีค่าเท่ากัน

3.4.1 ล้อและรางรถไฟจริง

จากการสัมผัสของล้อและรางรถไฟจริงเป็นแบบการสัมผัสของทรงกระบอกกับระนาบ (Cylinder-plane contact)

ตาราง 3.4 ค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณความดันสัมผัสสูงสุดของล้อและรางรถไฟจริง

	Conventional Wheel	Conventional Rail
Normal force, F	73,575 N	
Contact diameter, d	854 mm	∞
Effective length for contact, l	17.6 mm	
Young Modulus, E	210,000 MPa	210,000 MPa
Poission Ratio, v	0.30	0.30

จาก
$$K_b = \sqrt{\frac{2}{\pi d} \frac{(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{(1/d_1) + (1/d_2)}}$$

จะได้

$$K_b = \sqrt{\frac{2}{\pi(17.6)} \frac{(1-0.3^2)/210,000 + (1-0.3^2)/210,000}{(1/854) + (1/\infty)}} = 0.01636$$

ขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้จาก

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

จะได้

$$b = 0.01636 \sqrt{73,575} = 4.4382 \text{ มิลลิเมตร}$$

ความดันสัมผัสสูงสุดสามารถหาได้จาก

$$P_{\max} = \frac{2F}{\pi b l}$$

จะได้

$$P_{\max} = \frac{2 \times 73,575}{\pi \times 4.4382 \times 17.6} \approx 600 \text{ เมกะปาสคาล}$$

ดังนั้น ความดันสัมผัสของล้อและรางรถไฟจึงเท่ากับประมาณ 600 เมกะปาสคาล

3.4.2 แผ่นล้อและแผ่นรางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ

จากการทดลองการสัมผัสของแผ่นล้อและแผ่นรางรถไฟเป็นแบบการสัมผัสของทรงกระบอก 2 อัน (Cylinder-cylinder contact)

ตาราง 3.5 ค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาโหนดที่กระทำของแผ่นล้อและแผ่นรางทดสอบ

	Test Wheel	Test Rail
Maximum Pressure, P_{\max}	600 MPa	
Contact diameter, d	55 mm	55 mm
Effective length for contact, l	10 mm	
Young Modulus, E	210,000 MPa	210,000 MPa
Poisson Ratio, ν	0.30	0.30

จาก
$$K_b = \sqrt{\frac{2}{\pi d} \frac{(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{(1/d_1) + (1/d_2)}}$$

จะได้

$$K_b = \sqrt{\frac{2}{\pi(10)} \frac{(1-0.3^2)/210,000 + (1-0.3^2)/210,000}{(1/55) + (1/55)}} = 0.0055$$

ขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้จาก

$$b = 0.0055\sqrt{F}$$

ความดันสัมผัสสูงสุดสามารถหาได้จาก

$$600 = \frac{2 \times F}{\pi \times b \times 10}$$

ดังนั้น โหนดที่ใช้ในการทดลอง เท่ากับ 2,705.89 นิวตัน หรือประมาณ 275 กิโลกรัมแรงต่อล้อ และมีความยาวของแกนโทสำหรับพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 0.2861 มิลลิเมตร

ตาราง 3.6 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการเคลื่อนที่ของรถไฟจริง กับค่าที่ใช้ในการทดลอง

	Conventional Wheel	Test Wheel
Wheel load (kgf per wheel)	7,500	275
Maximum pressure (MPa)	599.64	600.62
Major half axis a (mm)	8.8000	5.0000
Minor half axis b (mm)	4.4382	0.2861
Approach of both bodies (mm)	0.0593	0.0071
Maximum shear stress (MPa)	180.06	180.25

3.5 การคำนวณขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า

ความต้องการกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าหาได้จาก

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

เมื่อ $\mu_T = 0.5$ and $\omega = 450$ รอบต่อวินาที

โดยความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้จาก

$$v = \omega \cdot r = \left(\frac{2\pi(450)}{60} \right) (55 \times 10^{-3}) = 2.59 \text{ m/s}$$

จะได้ว่าความเร็วเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 2.59 เมตรต่อวินาที

ความต้องการกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= (0.5)(550 \times 9.81) \cdot (2.59) \\ &= 6,987.17 \text{ W} = 6.99 \text{ kW} \end{aligned}$$

ดังนั้น มอเตอร์ไฟฟ้าควรมีขนาดเท่ากับ 12.5 กิโลวัตต์ (ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.79)

บทที่ 4

การสอบเทียบไฮดรอลิก

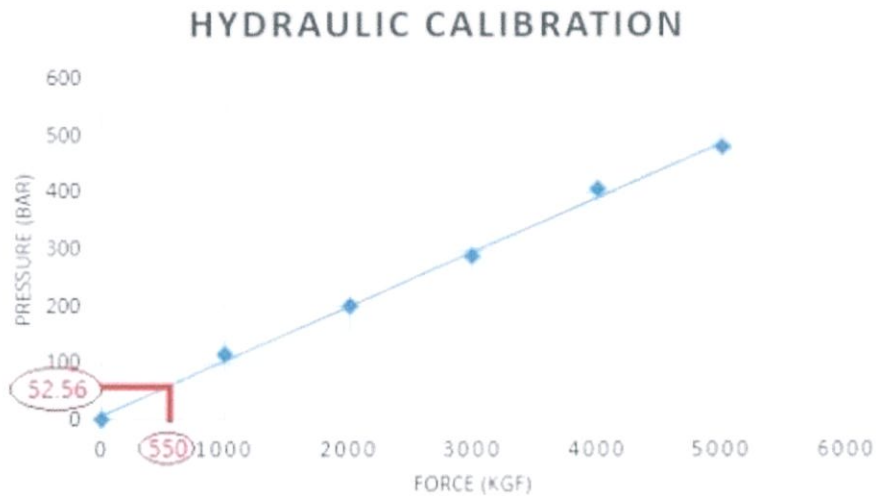
ในการทดสอบการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ โหลดที่กระทำต่อล้อรถไฟ ถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการสึกหรอของล้อรถไฟ จึงจำเป็นต้องหาค่าโหลดที่ถูกต้องในการทดสอบ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบกับความเป็นจริงได้ จากการคำนวณโหลดกระทำที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 550 กิโลกรัม โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้โหลดกระทำกับล้อและราง คือ กระบอกลิไฮดรอลิก ซึ่งการใช้กระบอกลิไฮดรอลิกในการให้โหลดกระทำนั้น จำเป็นต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) อุปกรณ์ก่อนเพื่อให้ทราบค่าความดันที่ให้ค่าโหลดกระทำเท่ากับ 550 กิโลกรัมแรง

ในการสอบเทียบนั้น นำกระบอกลิไฮดรอลิกต่อเข้ากับเครื่องอัดแรงไฮดรอลิกในรูปของแรงดันในหน่วยตัน (Ton) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสอบเทียบกระบอกลิไฮดรอลิกกับเครื่องอัดแรงไฮดรอลิก

ทำการสอบเทียบไฮดรอลิกจำนวน 5 จุด ที่ 1,000, 2,000, 3,000, 4000 และ 5,000 กิโลกรัมแรงตามลำดับ และอ่านค่าความดันที่กระบอกไฮดรอลิกในแต่ละจุด แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่กระทำกับความดันของกระบอกไฮดรอลิก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่กระทำและความดันของกระบอกไฮดรอลิก

จากกราฟในรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่กระทำและความดันของกระบอกไฮดรอลิก ที่โหลดกระทำ 550 กิโลกรัมแรง กระบอกไฮดรอลิกต้องมีความดันเท่ากับ 52.56 บาร์

บทที่ 5

การวัดค่าการสีกหรือของแผ่นล้อยทดสอบ

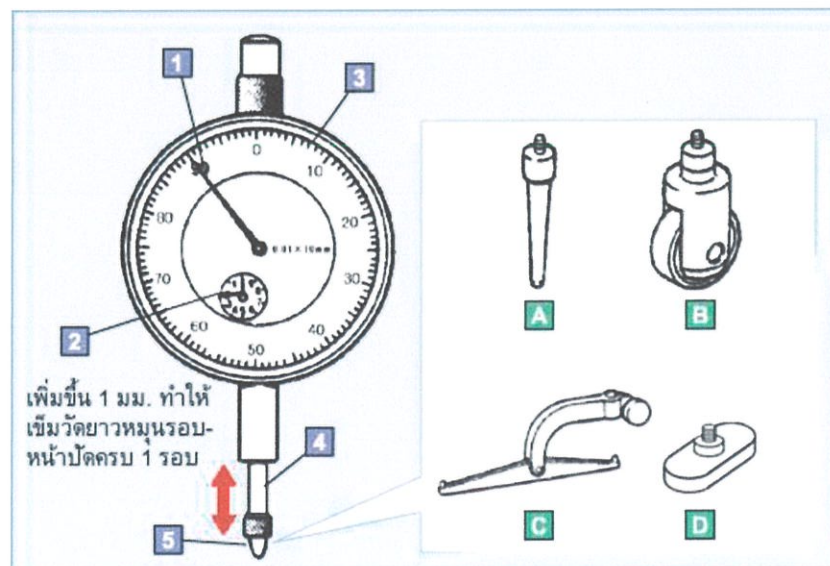
การศึกษาลักษณะการเกิดการสีกหรือของล้อและรางรถไฟแบบรางแนวตรงหรือรางเยื้องศูนย์ สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการวัดค่าจากการทดสอบ เนื่องจากการวัดที่เที่ยงตรง ถูกต้อง และแม่นยำ ทำให้ทราบค่าที่เกิดขึ้นจริง และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ที่อธิบายลักษณะการเกิดการสีกหรือที่เป็นจริงได้

5.1 เครื่องมือวัดไดอัลเกจ

ไดอัลเกจ เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดด้านความยาวและมิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม โดยนำมาวัดค่าและตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงานให้ได้ตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ยังมีการใช้งานในด้านการติดตั้งเครื่องจักร และปรับแต่งอุปกรณ์ โดยมีจุดมุ่งหมายให้เครื่องจักรมีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง ตามมาตรฐานของเครื่องจักรเหล่านั้น

5.1.1 หลักการทำงานของไดอัลเกจ

การเคลื่อนขึ้นหรือลงของแกนวัด ทำให้เกิดการการหมุนของเข็มวัดทั้งเข็มยาวและเข็มสั้น ใช้สำหรับวัดค่าความคลาดเคลื่อนหรือความโค้งงอของเพลลาและพื้นผิวที่แกว่งไปมาของหน้าแปลน โดยสามารถเปลี่ยนชนิดของตัวเลื่อนปลายให้เหมาะสมกับลักษณะงานต่างๆได้ดังนี้

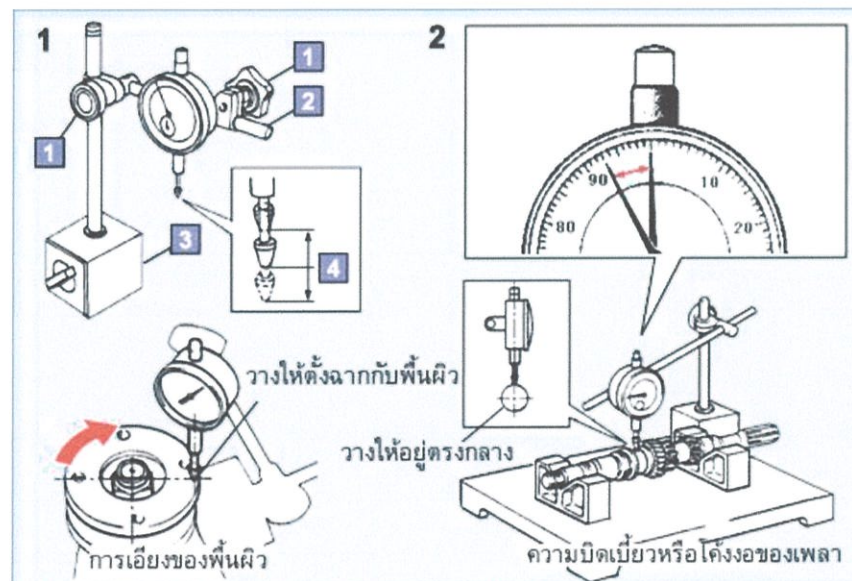


รูปที่ 5.1 ไดอัลเกจและชนิดของตัวเลื่อนปลาย

- A แบบยาว : ใช้วัดชิ้นส่วนในพื้นที่ที่จำกัด
 B แบบล้อเลื่อน : ใช้วัดผิวโค้งหรือเว้าของหน้ายาง
 C แบบโยกขึ้นลง : ใช้วัดชิ้นส่วนที่แกว่งไปมา ไม่สามารถสัมผัสได้โดยตรง
 D แบบแผ่นแบน : ใช้วัดผิวขนานของลูกสูบ

5.1.2 การใช้ไดอัลเกจวัดค่า

1. โดยทั่วไปใช้ไดอัลเกจยึดกับฐานแม่เหล็ก ปรับตำแหน่งไดอัลเกจให้อยู่ในตำแหน่งที่วัดและปรับจุดสัมผัสก้านวัดให้ได้ระยะศูนย์กลางของการเคลื่อนที่
2. หมุนชิ้นส่วนที่ถูกวัดและอ่านค่าที่เปลี่ยนไปของเข็ม



รูปที่ 5.2 การใช้งานไดอัลเกจกับฐานแม่เหล็ก เพื่อวัดค่าจากอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่างๆ

5.1.3 การอ่านค่าจากไดอัลเกจ

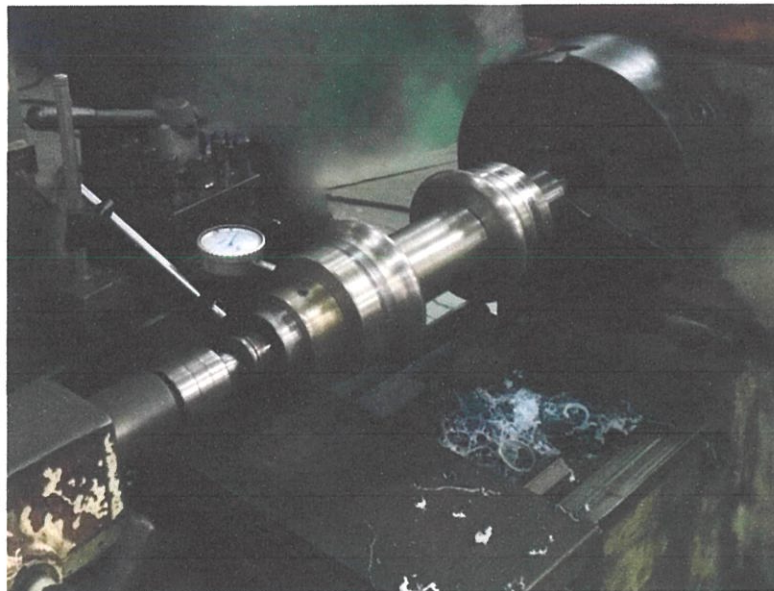
ค่าที่อ่านได้จากไดอัลเกจ มาจาก 2 สเกล ดังต่อไปนี้

1. สเกลละเอียด คือ สเกลรอบนอกที่ใช้เข็มยาวบอกค่า มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร แบ่งสเกลไว้ 100 ช่อง แต่ละช่องมีค่าเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร และถ้าเข็มยาวหมุนได้ 1 รอบหรือหมุนครบ 100 สเกล ค่าที่ได้มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ถ้าเข็มยาวหมุนตามเข็มนาฬิกา แสดงว่าชิ้นงานที่กำลังวัดนั้นมีค่าเป็นบวกหรือมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเข็มยาวหมุนทวนเข็มนาฬิกา แสดงว่าชิ้นงานที่วัดอยู่นั้นมีค่าเป็นลบ

2. สเกลหยาบ คือ สเกลเล็กหรือสเกลเข็มสั้น เพื่อบอกค่า แต่ละสเกลมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร สเกลหยาบมีการทำงานสอดคล้องกันกับสเกลละเอียด คือ เมื่อสเกลละเอียดหมุนครบ 1 รอบ สเกลหยาบ จะหมุนไปเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

5.2 ขั้นตอนในการวัดค่าการสึกหรอ

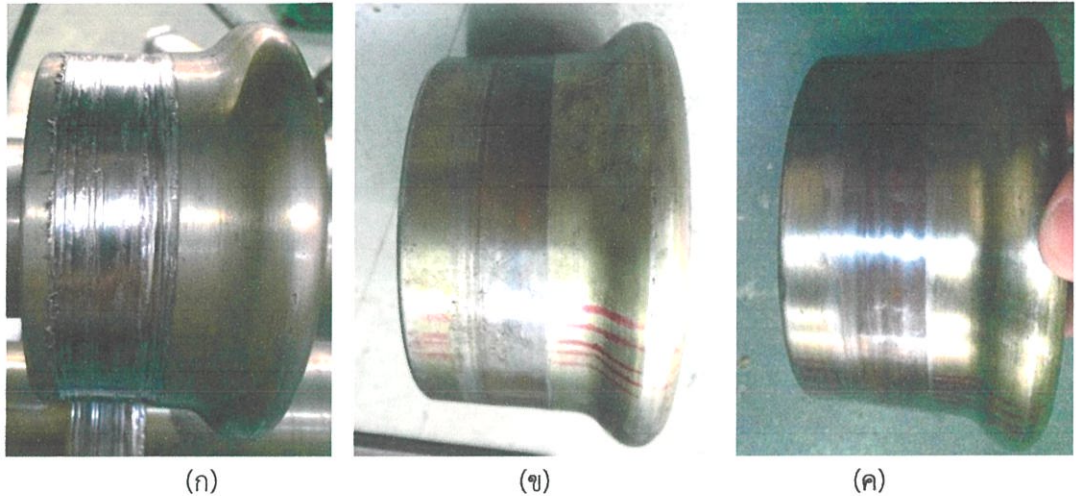
1. ติดตั้งเพลลาที่มีแผ่นล้อทดสอบเข้ากับเครื่องกลึง
2. ทำการตั้งศูนย์เพลลากับเครื่องกลึง ให้เพลลาอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของเครื่องกลึง
3. ปรับมุมของฐานตั้งไดอัลเกจให้ทำมุมเท่ากับความเอียงของผิวแผ่นล้อรถไฟที่ 2 องศา เพื่อให้การวัดได้ค่าที่ถูกต้อง
4. ในการวัดครั้งแรกของแต่ละกรณี (การวัดการสึกหรอที่ 100,000 รอบ) ต้องใช้ไดอัลเกจวัด โดยรอบของแผ่นล้อเพื่อหาจุดที่มีการสึกหรอมากที่สุดก่อน และใช้ปากกาขีดเส้นที่ตำแหน่งนั้น เพื่อให้การวัดค่าการสึกหรอในครั้งต่อไปได้ค่าที่ตำแหน่งเดิมตลอดการเก็บค่าการทดสอบ
5. ทำการวัดค่าการสึกหรอตามแนวแกนโดยมีระยะห่างระหว่างจุดก่อนหน้าและจุดถัดไปเท่ากับ 3 มิลลิเมตร
6. ทำการวัดในกรณีต่อไป โดยวัดการสึกหรอจากเส้นที่ทำการขีดไว้ในกรณีแรก



รูปที่ 5.3 การวัดค่าการสึกหรอด้วยเครื่องมือวัดไดอัลเกจ

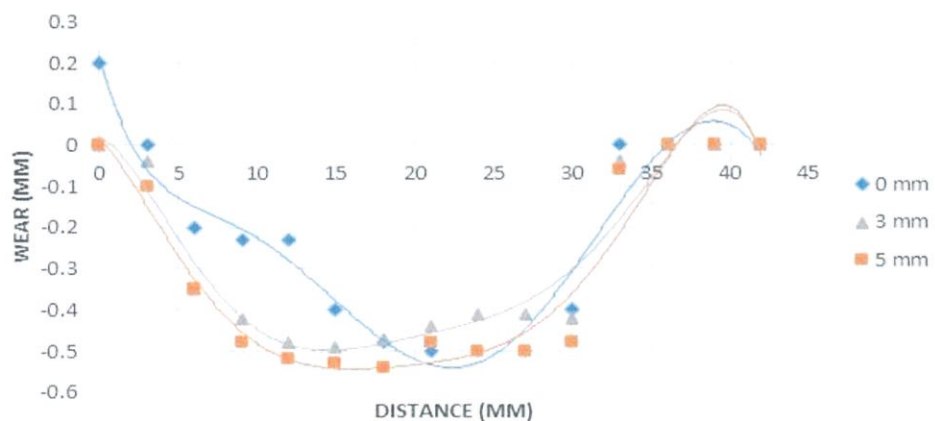
บทที่ 6

การสึกหรอของล้อและผลการทดลอง



รูปที่ 6.1 รอยสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแผ่นล้อทดสอบที่ 1,000,000 รอบ (ก) แผ่นล้อที่หมุนบนแผ่นรางปกติ (ข) แผ่นล้อที่หมุนบนแผ่นรางเยื้องศูนย์ 3 มิลลิเมตร (ค) แผ่นล้อที่หมุนบนแผ่นรางเยื้องศูนย์ 5 มิลลิเมตร

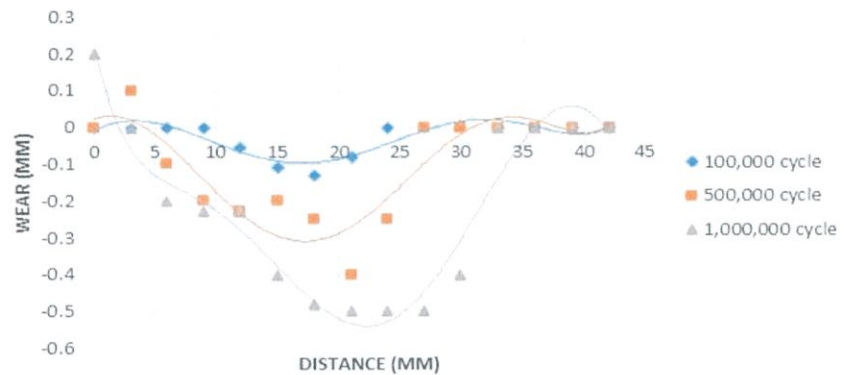
จากการทดสอบ พบว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ขนาดของรอยสึกมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของแผ่นล้อและแผ่นรางมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นถึงรอยสึกที่เกิดขึ้นของแต่ละกรณี เมื่อแผ่นล้อและแผ่นรางหมุนครบ 1,000,000 รอบ



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงการสึกหรอของล้อแต่ละกรณีนี้ที่ 1,000,000 รอบ

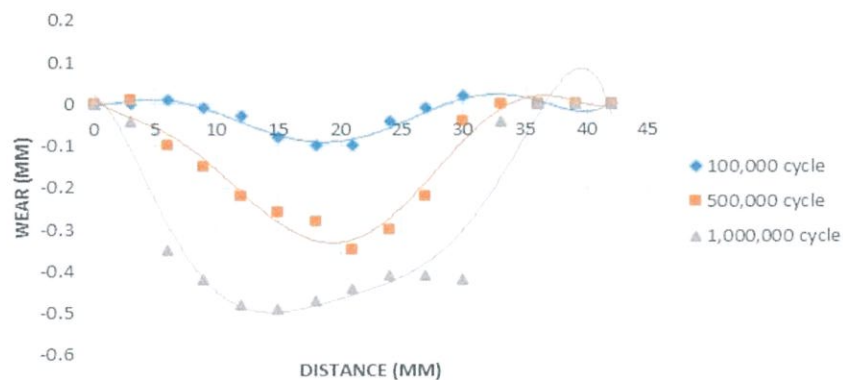
เมื่อนำแผ่นล้อยู่วัดค่าการสึกหรอ สามารถเขียนเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 6.2 จากกราฟทำให้ทราบว่า แผ่นล้อยู่ที่หมุนบนแผ่นรางเอียงศูนย์ 5 มิลลิเมตร มีการสึกหรอมากที่สุด และแผ่นล้อยู่ที่หมุนบนแผ่นรางปกติ 0 มิลลิเมตร จึงมีการสึกหรอน้อยที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบค่าการสึกหรอ โดยเทียบจากจำนวนรอบ 100,000 500,000 และ 1,000,000 รอบ จะเป็นดังรูป 6.3, 6.4 และ 6.5

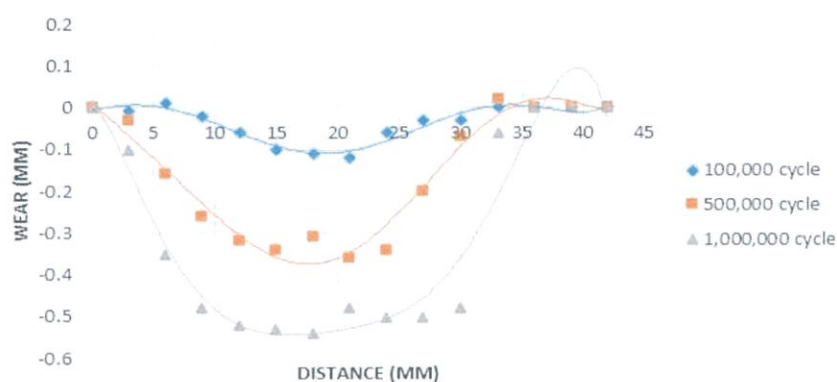


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อยู่กับแผ่นรางปกติ 0 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ความลึกของรอยสึกที่เกิดขึ้นบนแผ่นล้อยู่ทดสอบ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ความกว้างของตำแหน่งที่สึกที่สุดของรอยสึก มีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากการกดน้ำหนักของแผ่นล้อยู่ลงบนแผ่นรางที่ตำแหน่งเดิมซ้ำๆ เป็นเวลานานทำให้ตำแหน่งที่แผ่นล้อยู่สัมผัสกับแผ่นราง ขณะทำการทดสอบอยู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทำให้ความกว้างของรอยสึก เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อยู่กับแผ่นรางเอียงศูนย์ 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อกับแผ่นรางเยื้องศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 6.4 และ 6.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ขนาดของรอยสึกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งความลึกและความกว้างของรอยสึก โดยแผ่นล้อที่หมุนบนแผ่นรางเยื้องศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร มีการสึกหรอมากกว่าแผ่นล้อที่หมุนบนแผ่นรางเยื้องศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เนื่องจากในขณะที่แผ่นล้อทดสอบหมุน เกิดช่วงที่แผ่นล้อไม่สัมผัสแผ่นรางซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นล้อทดสอบลอยอยู่เหนือจุดสัมผัส ซึ่งทำให้เมื่อเกิดการตกกระทบบนแผ่นรางทดสอบ ตำแหน่งที่เป็นจุดสัมผัสของแผ่นล้อและแผ่นรางจะเปลี่ยนแปลงไป ทุกรอบที่หมุนผ่านจุดเยื้องศูนย์กลางของแผ่นราง ทำให้ความกว้างของรอยสึก มีค่ามากกว่าแผ่นล้อที่หมุนบนแผ่นรางปกติ

บทที่ 7

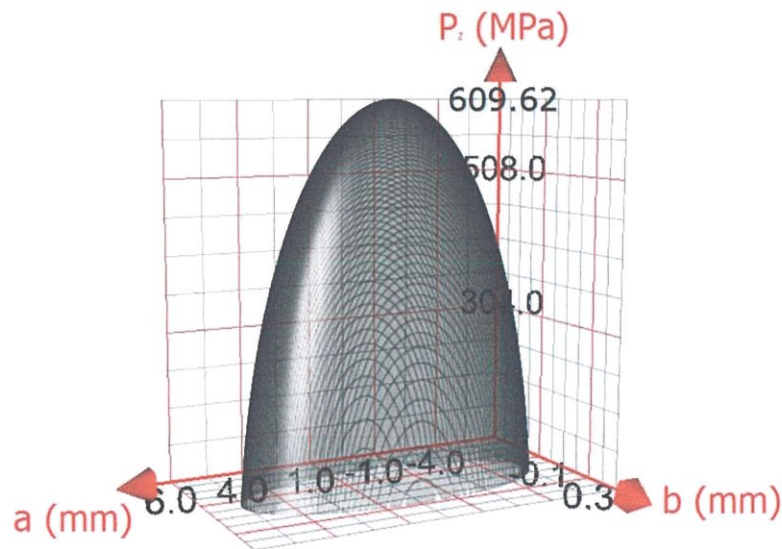
การวิเคราะห์ผลการทดลอง

7.1 รูปแบบความดันสัมผัสของเฮิร์ต

จากค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอของล้อและรางรถไฟ สามารถพิจารณาการเกิดรูปแบบความดัน (Pressure Profile) ตามทฤษฎีของเฮิร์ตได้โดยความดันสัมผัสสูงสุด $P_{\max} = 609.62$ เมกะปาสคาล เกิดบนพื้นที่สัมผัสวงรี มีแกนเอก $a = 5.00$ มิลลิเมตร และ แกนโท $b = 0.2816$ มิลลิเมตร ซึ่งสามารถสร้างเป็นแบบจำลองรูปแบบความดันสัมผัส 3 มิติ ตามสมการดังต่อไปนี้

$$p = 609.62 \left\{ 1 - \left(\frac{x}{5.00} \right)^2 - \left(\frac{y}{0.2816} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

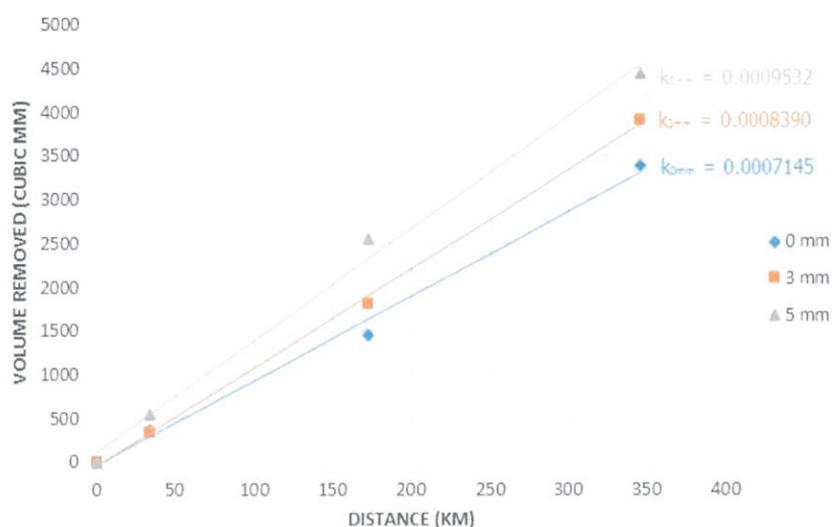
แสดงดังรูปที่ 7.1 จากกราฟทำให้ทราบว่าตำแหน่งที่มีความดันสูงสุดคือจุดตรงกลางของผิวสัมผัสรูปวงรี ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าการสึกหรอที่มากที่สุดบนแผ่นล้อ อยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของผิวสัมผัสระหว่างแผ่นล้อและแผ่นรางเช่นกัน



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงรูปแบบความดันสัมผัส (Pressure Profile) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของแผ่นล้อและแผ่นรางทดสอบตามทฤษฎีของเฮิร์ต แบบ 3 มิติ

7.2 สมการอาร์ชาร์ด

เมื่อนำล้อใหม่และล้อที่สึกหรอแล้วในแต่ละกรณี มาหาปริมาณของการสึกหรอ ที่ 100,000 500,000 และ 1,000,000 รอบ โดยใช้โปรแกรมในการคำนวณหาปริมาตรที่หายไป แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟเชิงเส้นตามสมการอาร์ชาร์ด (Archard Equation) จะได้เป็นดังรูปที่ 7.2 ซึ่งจากการทดลองสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอ k ของเหล็ก S22C (ที่ 0 mm) ได้เท่ากับ 7.145×10^{-4}



รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับระยะทางที่ไกล

จากกราฟในรูปที่ 7.2 พบว่าความสัมพันธ์ของปริมาตรการสึกหรอต่อระยะทางที่ไกลเป็นเส้นตรงตามสมการของอาร์ชาร์ด และยิ่งแสดงให้เห็นว่าความชันของกราฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มช่วงการเยื้องศูนย์ของล้อและรางรถไฟ ดังนั้น ความสูงของช่วงการตกกระแทกของล้อรถไฟจึงมีผลต่อการสึกหรอของล้อรถไฟ

7.3 การทำนายอายุการใช้งานของล้อรถไฟ

7.3.1 มาตรฐานการซ่อมบำรุงของการรถไฟไทย

ในการทำนายอายุการใช้งานของล้อรถไฟ ใช้เงื่อนไขการใช้งานของล้อรถไฟตามมาตรฐานการซ่อมบำรุงของการรถไฟไทย 2 ข้อดังนี้

1. ความลึกของรอยสึกที่เกิดขึ้นบนล้อรถไฟเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ต้องทำการกลึงหน้าล้อใหม่

2. เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใช้งานของล้อรถไฟลดลงเท่ากับ 46 มิลลิเมตร ต้องทำการเปลี่ยนล้อใหม่

7.3.2 มาตรฐาน ASTM-A504

แผ่นล้อรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ วัสดุถูกจัดอยู่ในล้อรถไฟประเภท L ซึ่งโหลดการใช้งานที่เหมาะสมกับล้อรถไฟประเภทนี้คือ โหลดเบา (Light wheel load) ซึ่งมีค่าโหลดกระทำสูงสุดเท่ากับ 12 ตันต่อขบวนรถไฟ หรือเท่ากับ 1 ตันต่อล้อรถไฟ

7.3.3 วิธีการคำนวณอายุการใช้งาน

ในการคำนวณอายุการใช้งานของล้อรถไฟ ใช้สมการอาร์ชาร์ดในการคำนวณระยะทางที่ใช้ในการไถล เพื่อให้เกิดปริมาตรสูญเสียที่ความลึกของรอยสึก 3 มิลลิเมตร โดยมีสมการดังนี้

$$Q = KWl$$

สำหรับกรณีรางแนวตรง ;

จากรูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอของล้อรถไฟ K เท่ากับ 0.0007145 จะได้ระยะทางที่ไถลของล้อรถไฟ ก่อนนำไปกลิ้งใหม่เท่ากับ

$$l = \frac{746,435.89}{0.0007145 \times 9810} = 106,493.05 \text{ กิโลเมตร}$$

เมื่อพิจารณาเส้นทางรถไฟที่มีระยะทางไกลที่สุดที่รถไฟสามารถเคลื่อนที่ได้ภายใน 1 วัน จาก กรุงเทพ ไป สุโขทัย มีความยาวทั้งหมดประมาณ 1,200 กิโลเมตร

สามารถคำนวณเป็นระยะเวลาก่อนนำล้อรถไฟไปกลิ้งใหม่ ได้เท่ากับ

$$t = 106,493.05 / 1,200 = 88.74 \approx 88 \text{ วัน}$$

ดังนั้น อายุการใช้งานของล้อรถไฟเมื่อเคลื่อนที่อยู่บนรางแนวตรง เท่ากับ

$$L = \frac{88}{365} \times \frac{23}{3} = 1.85 \text{ ปี หรือประมาณ } \underline{1 \text{ ปี } 10 \text{ เดือน}}$$

สำหรับกรณีรางเอียงศูนย์ 5 มิลลิเมตร ;

จากรูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอของล้อรถไฟ K เท่ากับ 0.0009532
จะได้ระยะทางที่ไกลของล้อรถไฟ ก่อนนำไปกลิ้งใหม่เท่ากับ

$$l = \frac{769,633.89}{0.0009532 \times 9810} = 82,305.93 \text{ กิโลเมตร}$$

สามารถคำนวณเป็นระยะเวลาก่อนนำล้อรถไฟไปกลิ้งใหม่ ได้เท่ากับ

$$t = 82,305.93 / 1,200 = 68.58 \approx 68 \text{ วัน}$$

ดังนั้น อายุการใช้งานของล้อรถไฟเมื่อเคลื่อนที่อยู่บนรางแนวตรง เท่ากับ

$$L = \frac{68}{365} \times \frac{23}{3} = 1.43 \text{ ปี หรือประมาณ } \underline{1 \text{ ปี } 5 \text{ เดือน}}$$

∴ อายุการใช้งานของล้อรถไฟนี้ มีค่าอยู่ในช่วง 1 ปี 5 เดือน ถึง 1 ปี 10 เดือน

ตาราง 7.1 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของล้อรถไฟภายใต้รางแนวตรงและรางเอียงศูนย์ 5 มิลลิเมตร

	Rail alignment	5mm rail misalignment
Sliding distance (before turning)	106,493.05 km	82,305.93 km
Useful wheel time (before turning)	88 days	68 days
Wheel life	1 year 10 months	1 year 5 months

บทที่ 8

สรุปผลงานวิจัย

8.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับลักษณะพฤติกรรมการสีกหรือของระบบล้อและรางรถไฟภายใต้รางเยื้องศูนย์ โดยสร้างชุดทดสอบซึ่งจำลองมาจากการเคลื่อนที่ของล้อและรางรถไฟจริง ใช้เครื่องมือวัดไดอัลเกจในการวัดค่าการสีกหรือของล้อรถไฟที่เคลื่อนที่บนรางแนวตรง และรางเยื้องศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้ง 3 กรณี สามารถอธิบายได้ดังนี้

จากกราฟแสดงการสีกหรือของแผ่นล้อรถไฟ รอยสีกหรือที่เกิดขึ้นบนแผ่นล้อรถไฟ มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการหมุนของแผ่นล้อและรางรถไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบขนาดของรอยสีกทั้ง 3 กรณี พบว่าขนาดความลึกของรอยสีกของแผ่นล้อรถไฟที่เคลื่อนที่บนแผ่นรางรถไฟทั้ง 3 กรณี มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ขนาดรอยสีกของแผ่นล้อรถไฟที่หมุนบนแผ่นรางเยื้องศูนย์ 5 มิลลิเมตร มีความกว้างของรอยสีกมากที่สุด และขนาดรอยสีกของแผ่นล้อรถไฟที่หมุนบนแผ่นรางแนวตรง 0 มิลลิเมตร มีความกว้างของรอยสีกน้อยที่สุด

ตำแหน่งที่มีการสีกหรือมากที่สุด คือ จุดตรงกลางของผิวสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ทฤษฎีของเฮิร์ต ทำให้ทราบว่าจุดตรงกลางของผิวสัมผัสรูปวงรี เป็นตำแหน่งที่เกิดความดันสัมผัสสูงสุด ดังนั้นบริเวณตรงกลางของผิวล้อรถไฟส่วนที่สัมผัสกับรางรถไฟจึงมีความลึกของรอยสีกมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ

สมการอาร์ชาร์ดใช้ในการทำนายปริมาณการสีกหรือของล้อรถไฟ จากการทดสอบพบว่ารางเยื้องศูนย์ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการสีกหรือมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ล้อรถไฟจะสีกหรือเร็วกว่าปกติ และเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของการสีกหรือที่เกิดขึ้นกับระยะทางที่ไกลเป็นแบบเชิงเส้น จึงทำให้ง่ายต่อการทำนายมากขึ้น

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ระยะเยื้องศูนย์ของรางรถไฟมีผลต่อการสีกหรือของล้อรถไฟ ถ้าระยะเยื้องศูนย์ของรางรถไฟมีค่ามาก ปริมาณของการสีกหรือก็ยิ่งมากขึ้น อายุการใช้งานของล้อรถไฟก็น้อยลงไปด้วย

8.2 ปัญหาที่พบและวิธีแก้ปัญหา

ในการทดลอง ปัญหาที่พบส่วนใหญ่มาจากการสร้างชุดทดลองที่มีความเหมาะสมและแข็งแรงต่อการทดลองที่โหลดกระทำ 550 กิโลกรัมแรง และความเร็ว 450 รอบต่อนาที โดยชุดทดลองที่ใช้ถูกพัฒนาและแก้ไขมาจากชุดทดลองแรกที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งมีปัญหาและวิธีแก้ไขดังนี้

ปัญหา	วิธีแก้ไข
การใช้กระบอกไฮโดรลิกกดโดยตรงที่บริเวณเพลลา ทำให้ไม่เกิดความสมดุลในระบบ และเพลลาไม่ได้แนวระดับขณะเกิดการเคลื่อนที่ จุดสัมผัสระหว่างล้อและรางจึงไม่ใช่ตำแหน่งเดิมตลอดการเคลื่อนที่	ใช้กระบอกไฮโดรลิกกดลงที่คานเหล็ก ซึ่งกดบนแบร็ริงทั้งสองข้าง ซึ่งทำให้เกิดความสมดุลขณะเคลื่อนที่มากขึ้น
ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูงมากเกินไป ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของระบบมากเกินไป ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงเหล็กของชุดทดลอง	ลดความเร็วในการทดลองลง โดยเพิ่มขนาดพูลเล่ต์ที่ต่อกับเพลลาของแผ่นรางทดสอบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีค่าความเร็วรอบเท่ากับการเคลื่อนที่ของรถไฟจริง
โครงเหล็กของชุดทดลองมีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการรับโหลดกระทำและความเร็วรอบ	เปลี่ยนชนิดของเหล็กที่ใช้ในการทำโครงเหล็กชุดทดลอง
ลักษณะของแผ่นล้อรถไฟเป็นรูปโคน เหมือนกับลักษณะของล้อรถไฟจริง เมื่อเคลื่อนที่บนแผ่นรางที่มีผิวเป็นแบบเรียบ คมของแผ่นรางจะเสียดสีกับหน้าผิวของแผ่นล้อ ทำให้เกิดการสึกหรอที่รุนแรง ซึ่งไม่เหมือนกับการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงของการเคลื่อนที่ของรถไฟ	เปลี่ยนลักษณะของผิวแผ่นรางทดสอบเป็นแบบรางหลังเต่า ซึ่งมีลักษณะเหมือนรางรถไฟจริง ซึ่งทำให้การสึกหรอที่เกิดขึ้นเหมือนกับการสึกหรอของล้อรถไฟจริงมากขึ้น
การใช้ล้อและรางเดี่ยวในการทดลอง ทำให้ควบคุมตำแหน่งของจุดสัมผัสได้ยาก เนื่องจากลักษณะของล้อที่เป็นแบบโคน	เปลี่ยนแบบชุดทดลองโดยการใช้ล้อและรางคู่ ทำให้เกิดความสมดุลขณะทำการทดลองมากขึ้น
ในขณะที่ทดลอง อุณหภูมิของแบร็ริง มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการทดลองที่ใช้เวลานาน	ใช้จารบีทาบริเวณขอบของแบร็ริง เพื่อเป็นการลดการเสียดสี และลดอุณหภูมิของแบร็ริง
สายพานขาด เนื่องจากความตึงของสายพานแต่ละเส้นที่ไม่เท่ากัน	เปลี่ยนสายพานใหม่ โดยใช้สายพานที่มีขนาดความยาวเท่ากัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.L. Johnson. **Contact Mechanics**. Cambridge : Cambridge University Press, Inc. 1987.
- [2] Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY USA (2012). *Wear*, URL: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/F2012/FWM/Notes/ch06.pdf>, access on 21/02/2014.
- [3] Annual Book of ASTM Standards Vol. 01.04, **Standard Test Method A504-89**, ASTM, Philadelphia, PA, 1992, 302-8.
- [4] K. Knothe. S. Liebelt. **Determination of temperatures for sliding contact with applications for wheel-rail systems**. *Wear* 189 (1995) 91–99.
- [5] Chang Chongyi. Wang Chengguo. Jin Ying. **Study on numerical method to predict wheel/rail profile evolution due to wear**. *Wear* 269 (2010) 167–173.
- [6] A. Rovira. A. Roda. M.B. Marshall. H. Brunskill. R. Lewis. **Experimental and numerical modelling of wheel-rail contact and wear**. *Wear* 271 (2011) 911–924.
- [7] J.J. Kalker. **Wheel-rail rolling contact theory**. *Wear* 144 (1991) 243–261.
- [8] J. Yin. **A study on wear mechanism of high-speed wheel/rail(2004c9)**. in: China-Korea-Japan Railway Research Technical Meeting, 2006.
- [9] M.B Marshall. R. Lewis. R.S. Dwyer-Joyce. U. Olofsson. S. Bjorklund. **Experimental characterization of wheel-rail contact patch evolution**. *Journal of Tribology Transactions of the ASME* 128 (3) (2006) 493–504.
- [10] Dwyer-Joyce. R.S. Drinkwater. B.W. **Analysis of Contact Pressure using Ultrasonic Reflection**. *Experimental Mechanics. Proceedings of 11th Annual Conference on Experimental Mechanics* 1998, Balkema, Rotterdam, pp747-754.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการสืบทอดของแผ่นลื้อทดสอบ

1. กรณีร่างแนวตรง 0 mm

ที่ 100,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0
6	0
9	0
12	-0.055
15	-0.11
18	-0.13
21	-0.08
24	0
27	0
30	0
33	0
36	0
39	0
42	0

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0
6	0
9	0
12	0.01
15	-0.02
18	-0.03
21	-0.04
24	-0.035
27	0
30	0
33	0
36	0
39	0
42	0

ที่ 500,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0.1
6	-0.1
9	-0.2
12	-0.23
15	-0.2

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0.01
3	0.02
6	-0.04
9	-0.02
12	-0.01
15	-0.03

18	-0.25
21	-0.4
24	-0.25
27	0
30	0
33	0
36	0
39	0
42	0

18	-0.03
21	-0.02
24	-0.03
27	-0.02
30	-0.01
33	-0.03
36	0
39	0
42	0

ที่ 1,000,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0.2
3	0
6	-0.2
9	-0.23
12	-0.23
15	-0.4
18	-0.48
21	-0.5
24	-0.5
27	-0.5
30	-0.4
33	0
36	0
39	0
42	0

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.03
6	-0.04
9	-0.04
12	-0.02
15	-0.03
18	-0.05
21	-0.06
24	-0.08
27	-0.03
30	-0.02
33	0.01
36	0
39	0
42	0

2. กรณีรางเยื้องศูนย์ 3 mm

ที่ 100,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0
6	0.01
9	-0.01
12	-0.03
15	-0.08
18	-0.1
21	-0.1
24	-0.04
27	-0.01
30	0.02
33	0
36	0
39	0
42	0

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0.01
6	-0.01
9	-0.01
12	-0.03
15	-0.02
18	-0.01
21	-0.01
24	-0.01
27	-0.02
30	0.02
33	0
36	0
39	0
42	0

ที่ 500,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0.01
6	-0.1
9	-0.15
12	-0.22
15	-0.26

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0.02
6	-0.02
9	-0.02
12	-0.02
15	-0.04

18	-0.28
21	-0.35
24	-0.3
27	-0.22
30	-0.04
33	0
36	0
39	0
42	0

18	-0.05
21	-0.04
24	-0.03
27	-0.03
30	0.02
33	0
36	0
39	0
42	0

ที่ 1,000,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.04
6	-0.35
9	-0.42
12	-0.48
15	-0.49
18	-0.47
21	-0.44
24	-0.41
27	-0.41
30	-0.42
33	-0.04
36	0
39	0
42	0

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.01
6	-0.02
9	-0.02
12	-0.05
15	-0.09
18	-0.09
21	-0.04
24	-0.05
27	-0.07
30	-0.06
33	-0.04
36	0
39	0
42	0

3. กรณีรางเยื้องศูนย์ 5 mm

ที่ 100,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.01
6	0.01
9	-0.02
12	-0.06
15	-0.1
18	-0.11
21	-0.12
24	-0.06
27	-0.03
30	-0.03
33	0
36	0
39	0
42	0

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0.01
6	-0.02
9	-0.03
12	-0.03
15	-0.03
18	-0.04
21	-0.04
24	-0.04
27	-0.03
30	-0.04
33	-0.04
36	0.01
39	0
42	0

ที่ 500,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.03
6	-0.16
9	-0.26
12	-0.32
15	-0.34

แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	0.01
6	-0.03
9	-0.03
12	-0.05
15	-0.02

18	-0.31
21	-0.36
24	-0.34
27	-0.2
30	-0.07
33	0.02
36	0
39	0
42	0

18	-0.03
21	-0.05
24	-0.05
27	-0.03
30	-0.06
33	0
36	0
39	0
42	0

ที่ 1,000,000 รอบ ;

แผ่นล้อทดสอบด้านซ้าย

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.1
6	-0.35
9	-0.48
12	-0.52
15	-0.53
18	-0.54
21	-0.48
24	-0.5
27	-0.5
30	-0.48
33	-0.06
36	0
39	0
42	0

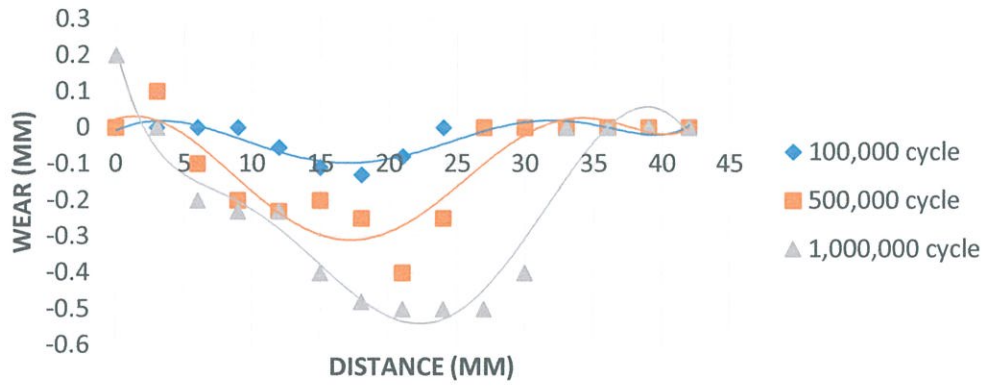
แผ่นล้อทดสอบด้านขวา

Distance (mm)	Wear (mm)
0	0
3	-0.01
6	-0.05
9	-0.09
12	-0.1
15	-0.09
18	-0.12
21	-0.08
24	-0.07
27	-0.11
30	-0.07
33	0
36	0
39	0
42	0

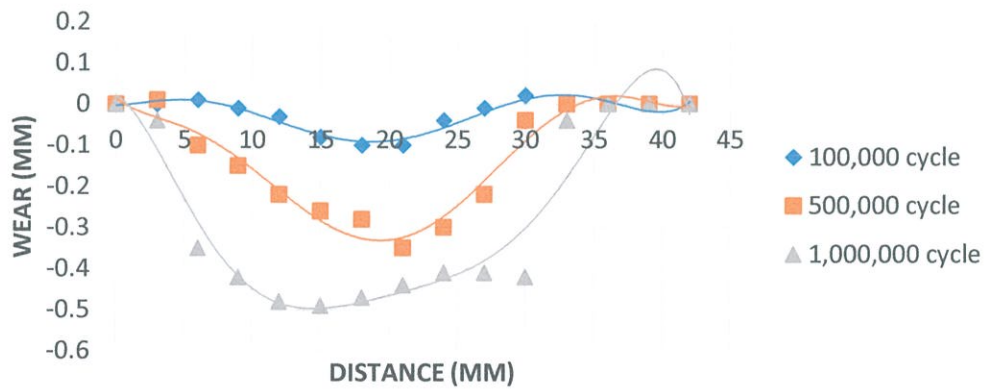
ภาคผนวก ข

กราฟแสดงการสึกหรอของแผ่นล้อทดสอบ

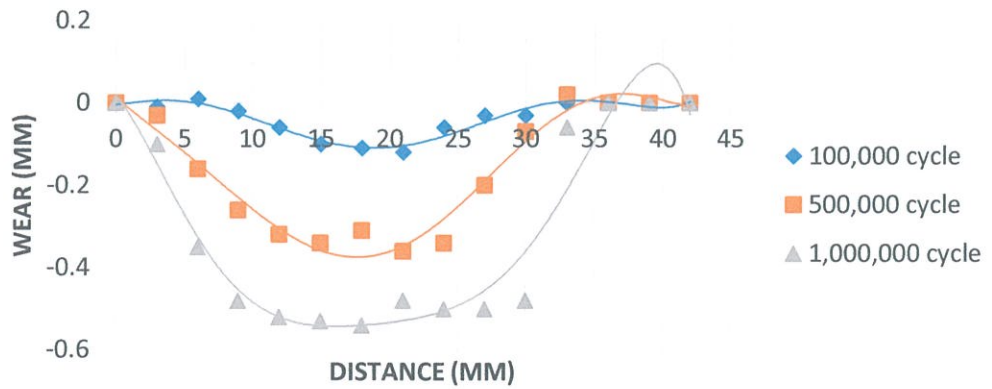
0MM LEFT-WHEEL WEAR



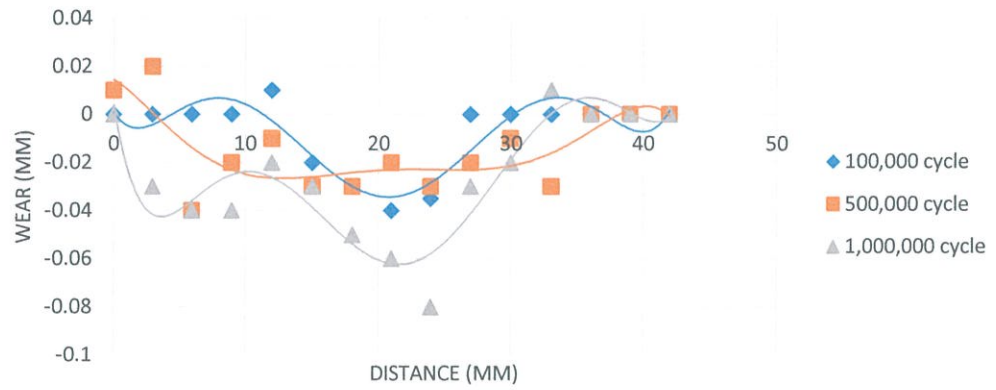
3MM LEFT-WHEEL WEAR



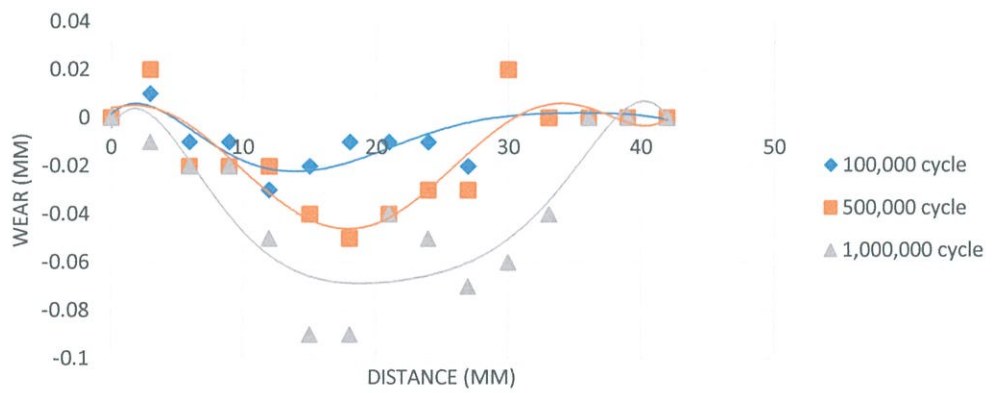
5MM LEFT-WHEEL WEAR



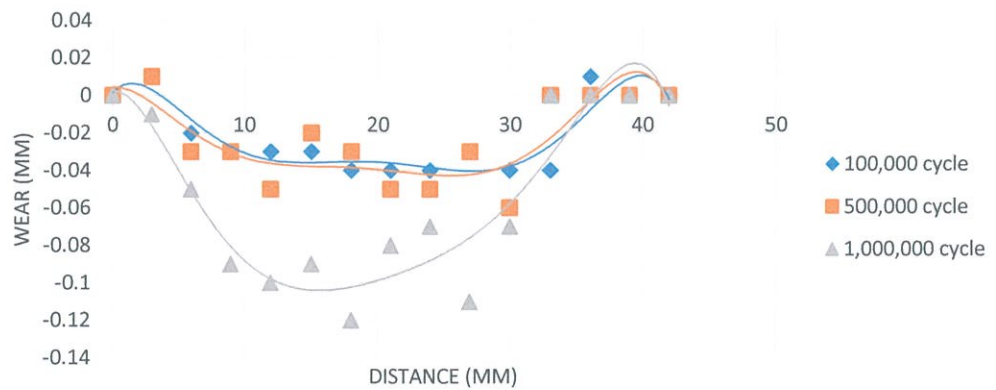
0MM RIGHT-WHEEL WEAR



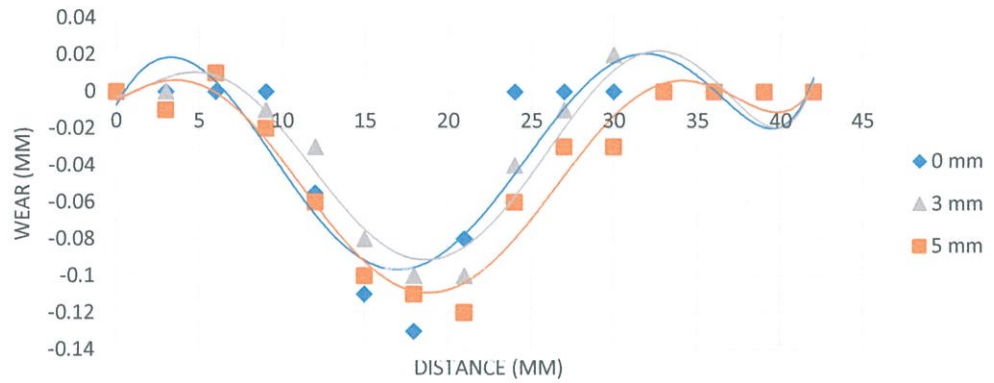
3MM RIGHT-WHEEL WEAR



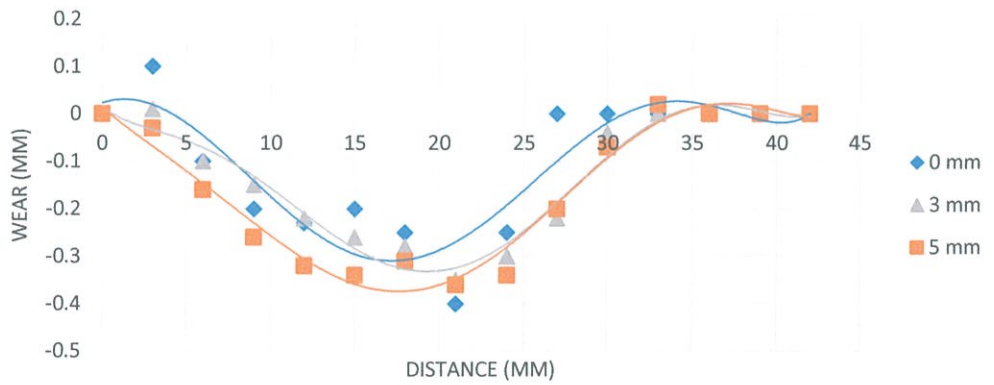
5MM RIGHT-WHEEL WEAR



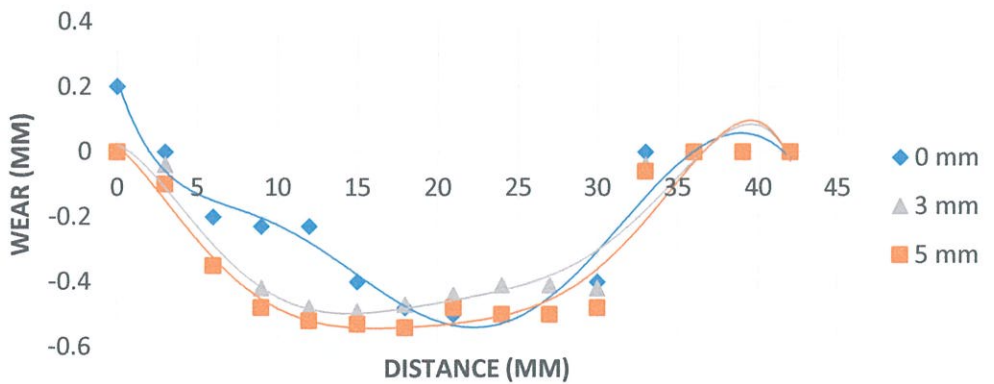
WEAR AT 100,000 CYCLE (LEFT)



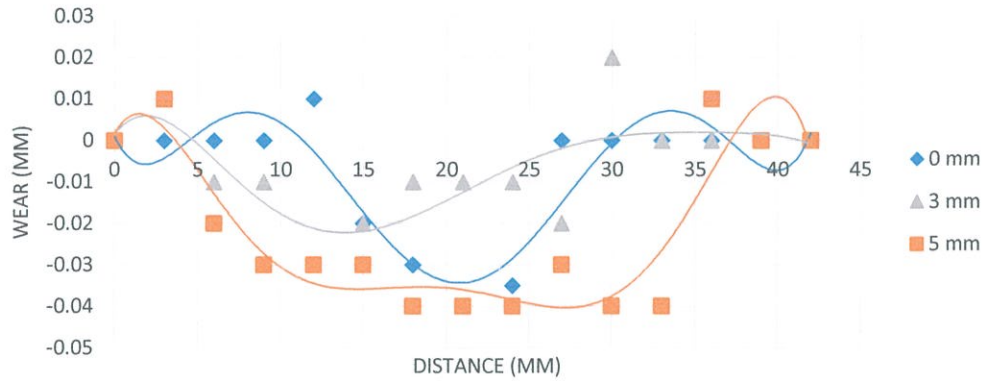
WEAR AT 500,000 CYCLE (LEFT)



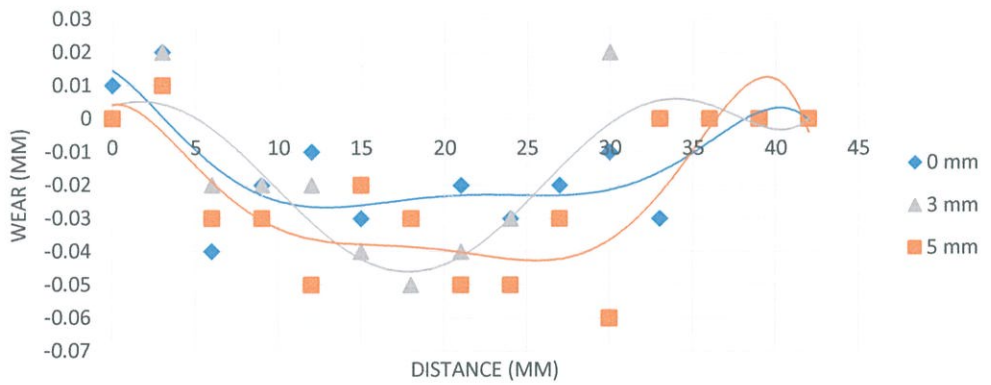
WEAR AT 1,000,000 CYCLE (LEFT)



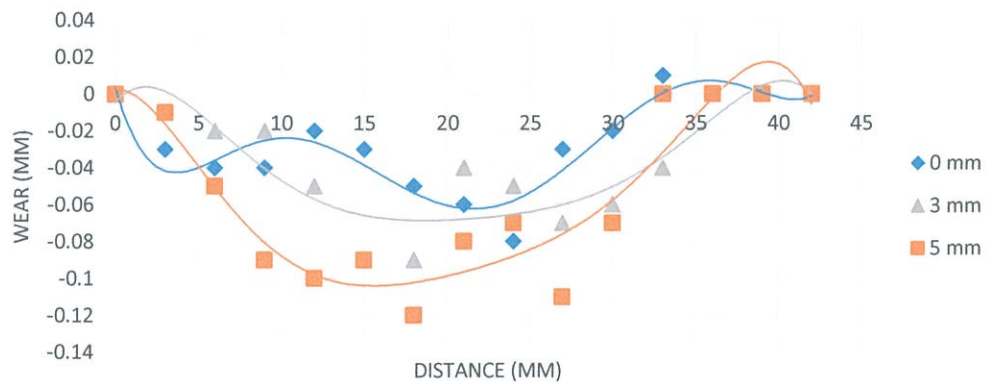
WEAR AT 100,000 CYCLE (RIGHT)



WEAR AT 500,000 CYCLE (RIGHT)



WEAR AT 1,000,000 CYCLE (RIGHT)



ภาคผนวก ค

ตารางแสดงปริมาตรที่หายไปของการสึกหรอของแผ่นล้อทดสอบ
และล้อรถไฟจริง โดยการใช้โปรแกรม Solidworks 2013

ตาราง 1 ปริมาตรทั้งหมดของแผ่นล้อทดสอบ และปริมาตรที่หายไปของแผ่นล้อทดสอบหลังจากครบจำนวนรอบของการหมุนที่กำหนด โดยการใช้โปรแกรม Solidworks 2013 ในการประมาณค่าปริมาตรของแผ่นล้อทดสอบ

Case	Number of Cycle	Wheel Volume (mm ³)	Volume Removed (mm ³)
New-Wheel	0	439,897.08	0
0 mm	100,000	439,520.73	376.35
0 mm	500,000	438,460.02	1,437.06
0 mm	1,000,000	436,509.54	3,387.54
New-Wheel	0	439,897.08	0
3 mm	100,000	439,552.51	344.57
3 mm	500,000	438,092.86	1,804.22
3 mm	1,000,000	435,987.79	3,909.29
New-Wheel	0	439,897.08	0
5 mm	100,000	439,354.08	543.00
5 mm	500,000	437,350.02	2,547.06
5 mm	1,000,000	435,462.58	4,434.50

ตาราง 2 ปริมาตรทั้งหมดของปลอกล้อรถไฟจริง และปริมาตรที่หายไปของปลอกล้อรถไฟ เมื่อความลึกของรอยสึกเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยการใช้โปรแกรม Solidworks 2013 ในการประมาณค่าปริมาตรของปลอกล้อรถไฟจริง

Type of Rail	Wheel Volume (mm ³)	Volume Removed (mm ³)
New-Wheel	28,993,206.65	0
0mm Rail Alignment	28,246,770.76	746,435.89
5 mm Rail Misalignment	28,223,572.76	769,633.89