

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของแพนโทกราฟ  
EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF PANTOGRAPH



ฉัตรชัย อ้ามุทะ  
ชินพัฒน์ วิริยะเดโชชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของแพนโทกราฟ

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF PANTOGRAPH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF PANTOGRAPH



2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2562

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของแพนโทกราฟ

EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF PANTOGRAPH

ผู้จัดทำ

1. นาย ฉัตรชัย อามุกะ รหัสประจำตัว 56010229

2. นาย ชินพัฒน์ วิริยะเดโชชัย รหัสประจำตัว 56010313

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการสึกหรอของแพนโทกราฟ

นายฉัตรชัย อามุกะ 56010229

นายชินวัฒน์ วิริยะเดโชชัย 56010313

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบการสึกหรอของแถบสัมผัสเหนือหัวที่ทำจากคาร์บอน ภายใต้การสัมผัสแบบสไลด์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอที่แถบสัมผัสบนแพนโทกราฟโดยชุดทดสอบสามารถปรับเปลี่ยนอัตราเร็วตั้งแต่ 3.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมงถึง 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใต้ภาระขนาด 25 นิวตัน ในการทดสอบนี้สามารถสรุปว่าอัตราการสึกหรอของแถบสัมผัสเหนือหัวที่ทำจากคาร์บอนมีค่าลดลงเนื่องจากคาร์บอนมีพฤติกรรมเป็นสารหล่อลื่น อัตราเร็วไม่มีผลต่อค่าของอัตราการสึกหรอ ระยะทางการเคลื่อนที่ของแถบสัมผัสที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสึกหรอมีค่าลดลง นอกจากนี้ในปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทาง ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนากระบบส่งกำลังเหนือหัวของรถไฟ

## EXPERIMENTAL STUDY ON WEAR BEHAVIOR OF PANTOGRAPH

Chatchai Ammukka 56010229  
Chinnapat Viriyadaychochai 56010313  
Asst. Prof. Dr.Monsak Pimsarn Advisor  
Year 2019

### **ABSTRACT**

This thesis describes the design and development of wear test on the sliding contact between contact wire and contact strip, which made of carbon. The wear behavior of contact strip on a pantograph was experimentally studied at the speed varied from 3.6 to 56 km/hr. and the applied load is 25 N. In this investigation, it can be concluded that the wear rate of the carbon contact strip was decreased because carbon behaves as solid lubricant. The wear rate of contact strip was not affected by the speed, but wear rate was decreased as the sliding distance was increased. Moreover this thesis proposed the wear rate equation as a function of sliding distance which can be used as a guideline to design and develop the pantograph and catenary system.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และ รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำปริญญา นิพนธ์และขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความรู้ซึ่งสามารถนำมา ประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็น อย่างสูง

ขอขอบคุณ นายสิริพงษ์ ดาวเจริญพร ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในด้านการออกแบบ และการวิเคราะห์การทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญา นิพนธ์เล่มนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องอุปกรณ์เครื่องมือคณะเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความ ช่วยเหลือคำแนะนำและกำลังใจในการทำงานสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน

นายฉัตรชัย อ้ามุกคะ

นายชินพัฒน์ วิริยะเดโชชัย

# 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
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ส่วนประกอบของระบบจ่ายไฟฟ้า(Pantograph-catenary system).....	3
2.2 ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์(Hertz contact theory).....	4
2.3 ทฤษฎีของเฮิร์ตซ์สำหรับการสัมผัสแบบอีลาสติก(Hertz elastic contact theory).....	5
2.4 การสึกหรอ(Wear).....	6
2.4.1 ชนิดของการสึกหรอ.....	6
2.4.1.1 การสึกหรอแบบยึด(Adhesive wear).....	6
2.4.1.2 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear).....	7
2.4.1.3 การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosion wear).....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ (ต่อ)

2.4.2 การสึกหรอในระบบจ่ายไฟฟ้า (Wear in pantograph-catenary system).....	8
2.4.3 สมการพื้นฐานของการสึกหรอ (Archard's Wear Equation).....	9
2.5 แรงเสียดทาน(Friction force).....	9
2.5.1 การเสียดทานแบบไถล (Sliding friction).....	10
2.5.1.1 กลไกพื้นฐานของการเกิดการเสียหายแบบไถล.....	11
2.5.1.2 แรงยึดเหนี่ยว.....	12
2.5.1.3 แรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ(Deformation Force).....	13
2.5.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction).....	14
2.5.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient).....	15
2.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	17
2.6.1 Voltage Regulator .....	17
2.6.2 เครื่องวัดความเร็วรอบ.....	17
2.6.3 เครื่องชั่งสปริงแบบแขวน.....	18
2.6.4 เครื่องชั่งดิจิตอล.....	18
2.6.5 แท่งคาร์บอน.....	19
2.6.6 ชุดทดลองอัตราการสึกหรอ.....	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	20
3.1 การทดลองและชุดทดลอง.....	20
3.2 การปรับแต่งความเร็ว.....	20
3.2.1 ความเร็ว 3.6 7.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 10.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	20
3.2.2 ความเร็ว 47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	21
3.3 ขั้นตอนการทดลองและบันทึกผล.....	21

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	22
4.1 การหาอัตราการสีกหรือ.....	22
4.1.1 อัตราการสีกหรือที่ความเร็ว 3.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	22
4.1.2 อัตราการสีกหรือที่ความเร็ว 7.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	23
4.1.3 อัตราการสีกหรือที่ความเร็ว 10.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	24
4.1.4 อัตราการสีกหรือที่ความเร็ว 47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	25
4.1.5 อัตราการสีกหรือที่ความเร็ว 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	26
4.2 เขียนสมการความสัมพันธ์(Regression model equation).....	28
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	29
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	29
เอกสารอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก.....	31
ภาคผนวก ก.....	32
ภาคผนวก ข.....	33

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขนส่งทางราง เป็นการคมนาคมแบบหนึ่งที่มีประโยชน์เป็นอย่างมาก และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและประเทศไทยได้ริเริ่มเอาเทคโนโลยีทางระบบรางมาใช้เช่น รถไฟ รถไฟฟ้าหรือรถไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อทำให้เกิดสะดวกต่อการขนส่งมวลขนการขนส่งสินค้า และช่วยให้ประเทศมีความเจริญก้าวหน้าในด้านการคมนาคมการติดต่อค้าขายเพื่อพร้อมที่รองรับการเข้าร่วมประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน

ในปัจจุบันงานวิจัยและการศึกษาทางด้านคมนาคมและขนส่งทางรางมีจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับประโยชน์ในการใช้งานทางด้านคมนาคมและขนส่งทางรางของประเทศไทย โดยเฉพาะงานวิจัยทางการส่งกำลังเหนื่อหัว ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการพัฒนาระบบรถไฟความเร็วสูง ในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีการศึกษาและพัฒนาระบบส่งกำลังเหนื่อหัวเพื่อใช้ในระบบจ่ายกำลังสำหรับรถไฟความเร็วสูงและนอกจากนี้ยังมีการศึกษาปัญหาด้านการสึกหรอของระบบส่งกำลังเหนื่อหัว โดยการสึกหรอนั้นเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างลวดตัวนำไฟฟ้ากับแถบสัมผัสบนแพนโทกราฟซึ่งจะเกิดการสึกหรออย่างต่อเนื่องในขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่

ดังนั้นในการศึกษาและงานวิจัยนี้จึงได้สร้างชุดทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของแถบสัมผัสบนแพนโทกราฟโดยการทดลองหาค่าอัตราการสึกหรอที่ภาระขนาดคงที่และอัตราเร็วที่แตกต่างกันออกไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างชุดจำลองการสัมผัสกันของระบบส่งกำลังเหนื่อหัว
2. ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของแถบสัมผัสภายใต้การสัมผัสแบบสลับโหลด

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. อัตราการสึกหรอของแถบสัมผัส ควรมีความมากขึ้นเมื่อระยะทางมากขึ้น
2. ผงคาร์บอนสามารถลดอัตราการสึกหรอของแถบสัมผัสได้

## 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงพฤติกรรมการสีกหรือของแถบสัมผัสบนแพนโทกราฟที่อัตราเร็วของจุดสัมผัสต่างกันด้วยการสร้างชุดทดสอบที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2.ออกแบบการทดสอบและชุดการทดสอบโดยอ้างอิงจากมาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์และสร้างชุดศึกษาทดสอบ
- 4.ทำการทดสอบหาอัตราการสีกหรือที่ความเร็วต่างๆและวิเคราะห์พฤติกรรมการสีกหรือของแถบสัมผัสบนแพนโทกราฟ

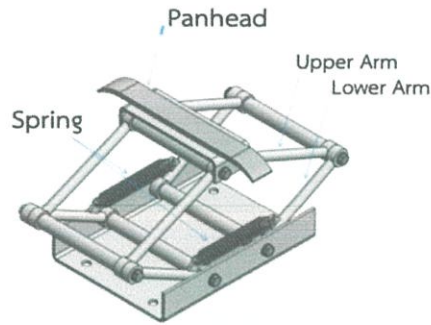


## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ส่วนประกอบของระบบจ่ายไฟฟ้า(Pantograph-catenary system)

โดยทั่วไป ระบบส่งกำลังเหนือหัวจะประกอบไปด้วย แพนโทกราฟ (Pantograph) และระบบส่งกำลัง(Catenary) ซึ่งจะเกิดการส่งกำลังเมื่อเกิดการสัมผัสกันระหว่างระบบส่งกำลังกับแพนโทกราฟ ระบบส่งกำลังประกอบด้วยลวดส่งกำลัง(Messenger wire) ลวดสัมผัส(Contact wire) และ Dropper โดยที่กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าผ่านลวดส่งกำลัง(Messenger wire) มาสู่ลวดสัมผัส(Contact wire) โดยผ่าน Dropper ที่เชื่อมระหว่างลวดส่งกำลังและลวดสัมผัสเพื่อใช้ในการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าผ่านจุดสัมผัสไปที่แถบสัมผัสเหนือหัว(Panhead) แล้วส่งกำลังไปที่ระบบไฟฟ้าของรถไฟเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟ จากการเคลื่อนที่ของรถไฟพบว่าลักษณะของการสัมผัสกันระหว่างลวดสัมผัสและแถบสัมผัสเหนือหัวเป็นการสัมผัสแบบไถล ในการออกแบบชุดทดลองเพื่อหาการสึกหรอของแถบสัมผัสเหนือหัวเป็นการจำลองการสัมผัสกันระหว่างแถบสัมผัสเหนือหัวและลวดสัมผัสเพื่อให้เกิดการสัมผัสแบบไถล จำเป็นต้องทำให้เกิดความเร็วที่แตกต่างกันของผิวสัมผัสหรือความเร็วสัมพัทธ์ของผิวสัมผัสและภายใต้ข้อจำกัดของชุดทดลองที่ต้องการให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ของผิวสัมผัสอย่างต่อเนื่องจึงได้ทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์จากการเคลื่อนที่ของลวดสัมผัสโดยทำการดัดให้ลวดสัมผัสมีลักษณะเป็นวงกลมที่มีรัศมีมากพอที่จะสามารถอนุมานได้ว่าเป็นเส้นตรง รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของแพนโทกราฟประกอบด้วยตัวนำแถบสัมผัสเหนือหัว(Panhead) ซึ่งทำมาจากโครงแขนบน(Upper Arm) โครงแขนล่าง(Lower Arm) และสปริง(Spring) โดยที่โครงแขนบนโครงแขนล่างและสปริง มีหน้าที่ให้ความยืดหยุ่นกับแถบสัมผัสหรือเป็นกลไกที่ทำให้แถบสัมผัสสามารถทำตัวขึ้นลงได้ และแบบจำลองของลวดสัมผัสที่ใช้ในการทดลองได้ใช้ลวดวัสดุมาริตให้เป็นวงกลมที่มีรัศมีขนาด 1 เมตรดังรูปที่ 2.2



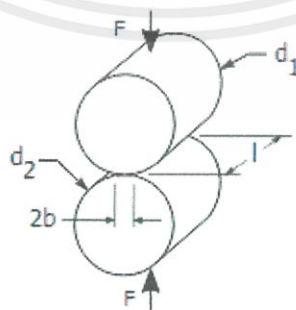
รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือหัว



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของลวดตัวนำสัมผัส (Wire contact) [6]

## 2.2 ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz contact theory)

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟจริงให้อยู่ในรูปของชุดทดลองจะต้องมีการหาค่าของตัวแปรต่างๆเพื่อที่จะทำให้การทดลองเสมือนกับของจริงหนึ่งในตัวแปรสำคัญคือโหนดที่กระทำกับล้อรถไฟซึ่งสามารถหาได้จากทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ซึ่งจากการทดลองเป็นการสัมผัสของทั้งล้อและรางรถไฟจะเป็นแบบการสัมผัสของทรงกระบอก 2 อัน (Cylinder-cylinder contact) ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ทรงกระบอก 2 อันมีความยาวที่สัมผัสกันด้วยแรงกด  $F$  และความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรูปวงรีที่มีความกว้างเท่ากับ  $2b$  [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้จาก

$$b = K_b \sqrt{F} \quad (2.1)$$

โดยที่

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

เมื่อ  $F$  : แรงที่กระทำระหว่างล้อและรางรถไฟ

$K_b$  : ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ

$\nu_1, \nu_2$  : 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 รางรถไฟแถบสัมผัสเหนือหัวจะได้  
ว่า  $d_2 = \infty$

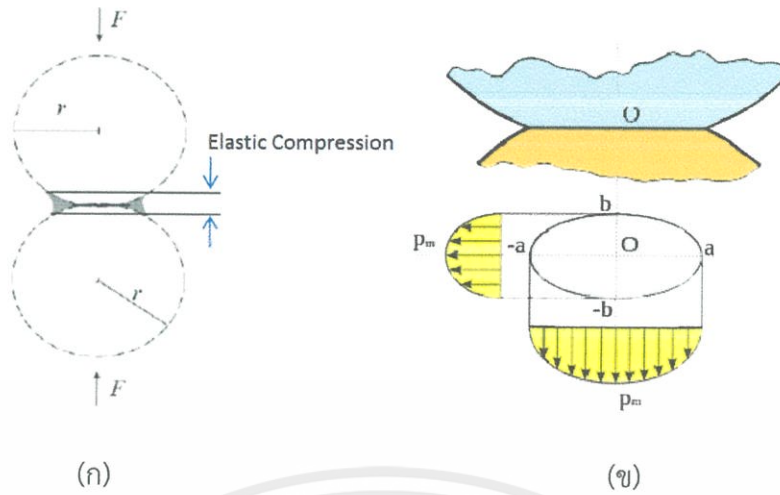
ค่าความดันสัมผัสสูงสุดระหว่างทรงกระบอก 2 อัน เกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi b l} \quad (2.3)$$

### 2.3 ทฤษฎีของเฮิร์ตซ์สำหรับการสัมผัสแบบอีลาสติก (Hertz elastic contact )

ลักษณะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นแบบรูปวงรีซึ่งการเกิดความดันในพื้นที่ผิวสัมผัส จะถูกพิจารณาแบบ General profiles โดยความดันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา ภายใต้พื้นที่ผิวสัมผัสที่สมการดังนี้

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



รูปที่ 2.4 ก) พื้นผิวสัมผัสแบบอีลาสติกของทรงกระบอก 2 ชิ้น  
 ข) ความเค้นสัมผัสที่เกิดเป็นรูปร่างรีที่มีความกว้างเท่ากับ  $2b$ [3]

จะได้สมการในการสร้างรูปแบบการเกิดความดันตามทฤษฎีของเฮิร์ตซ์ดังนี้

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

และโหลดทั้งหมดที่กระทบบนพื้นที่สัมผัสวงรีหาได้จาก

$$F_{total} = \left( \frac{2}{3} \right) P_{max} \pi ab \quad (2.6)$$

## 2.4 การสึกหรอ(Wear)

การสึกหรอของวัสดุโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสีกันของผิวสัมผัส อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาของการสัมผัสซึ่งมีตัวประกอบอื่นๆที่ต้องพิจารณาอีกมากมายเช่น ลักษณะผิวสัมผัสสออุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุ ความแข็ง ความเปราะ และอื่นๆ

### 2.4.1 ชนิดของการสึกหรอ

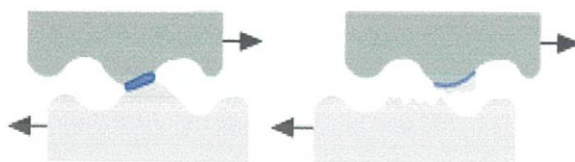
#### 2.4.1.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)

การสึกหรอที่เกิดจากการสัมผัสกันของผิวหน้าชิ้นงาน 2 ชิ้นที่มีการเคลื่อนที่อันส่งผลให้เกิดความเค้นสัมผัส(Contact Stress) ที่สูงและเกิดขึ้นเนื่องจากธรรมชาติของความหยาบของผิวหน้าวัสดุหรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าวัสดุ 2 ชนิดเสียดสีกันทำให้เกิดความเครียดเกินจุดครากของวัสดุเมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ไปชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะพาเอาเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าไปด้วย ดังรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดการสึกหรอขึ้นถ้าผิวหน้าที่เคลื่อนที่มีการเสียดสีกันอย่างต่อเนื่องค่าความเค้นแรงเฉือนที่บริเวณที่เกิดพันธะอะตอมมีจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเกินขีดจำกัดของอีกวัสดุหนึ่งและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทำให้จุดที่สัมผัสกันเกิดการแตกพร้อมทั้งนำชิ้นส่วนติดมาด้วยชิ้นส่วนที่เกิดการแตกสามารถหลุดออกมาเป็นเศษชิ้นโลหะหรือยังคงเหลือพันธะอะตอมมิควับนผิวหน้าชิ้นงานที่อยู่ฝั่งตรงกันข้ามการสึกหรอแบบยึดติดยังมีชื่อเรียกอื่น ๆ อีกคือ scoring, scuffing, galling



รูปที่ 2.5 ผิวของวัสดุเมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็นจุดสัมผัสขึ้น ณ ยอดสูงของผิวสัมผัสนั้น  
เมื่อมีพันธะแบบแนบติดเกิดขึ้น[5]



รูปที่ 2.6 ยอดบนผิวของวัสดุเมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็นจุดสัมผัสขึ้น ณ ยอดสูงของผิวสัมผัสนั้น  
เมื่อมีการขูดถูเกิดขึ้น การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวหน้าจึงทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้[5]

#### 2.4.1.2 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear)

การเซาะร่อง การขีดข่วน และการขูดผิว เป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับการเสียหายด้วยรูปแบบดังกล่าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผิวหน้าชิ้นงานที่เป็นวัสดุแข็งมีการเปลี่ยนที่หรือมีการเคลื่อนที่ของวัสดุที่มีผลมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผิวหน้าของวัตถุอื่นหรืออนุภาคอื่น โดยอนุภาคสามารถฝังลึกลงไปผิวหน้าของวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันและมีการเคลื่อนที่เสียดสีระหว่างกันทำให้เกิดการเสียดสี (การเปลี่ยนที่และการเคลื่อนที่ของผิวหน้าวัสดุ) ของผิวหน้าวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่า แหล่งที่มาของอนุภาคอาจเกิดจากสารแปลกปลอม (ที่มาจากสิ่งแวดล้อมด้านนอก) เศษชิ้นส่วนที่เกิดจากการสึกหรอหรืออนุภาคของแข็งที่เจือปนอยู่ในของไหล ในอีกนัยหนึ่ง การสึกหรอจากการเสียดสีสามารถเกิดได้จากกรณีที่ไม่มีเศษวัสดุหลุดออกมา แต่เกิดขึ้นเนื่องจากความหยาบของผิวหน้าวัสดุอีกอันหนึ่งทำให้เกิดการเสียดสี กลไกการสึกหรอนี้ต่างจากการสึกหรอแบบยึดติดคือไม่มีพันธะอะตอม-มิควับนผิวหน้าทั้งสอง การสึกกร่อนแบบขัดสี (Abrasive Erosion) อาจเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีอนุภาคของแข็งเจือปนและมีทิศทางการเคลื่อนที่ขนานกับผิวหน้าของวัสดุ และอนุภาคเหล่านั้นก็ทำให้ผิวหน้าวัสดุค่อยๆ เกิดการเสื่อมสภาพทีละเล็กทีละน้อยความแข็งของวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญต่ออัตราการสึกหรอแบบขัดสีของผิวหน้าชิ้นงาน คือ ถ้าผิวหน้าวัสดุมีความแข็งสูงจะทำให้อัตราการสึกหรอต่ำ และถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งของผิวหน้าวัสดุมีค่าสูงกว่าความแข็งของอนุภาคที่มาขัดสี เราอาจจะสังเกตเห็นการสึกหรอแม้เพียงเล็กน้อย และอนุภาคเหล่านั้นอาจจะแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยได้ วัสดุที่มีสมบัติด้านความแข็งและความแกร่งสูงจะเหมาะสำหรับใช้งานที่ด้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสี ยกตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผิวหน้ามีความแข็งสูง โลหะผสมโคบอลต์ และเซรามิกส์ เป็นต้น

#### 2.4.1.3 การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosion wear)

เมื่ออิทธิพลของการกัดกร่อนและการสึกหรอเกิดขึ้นร่วมกัน การเสื่อมสภาพของผิวหน้าวัสดุอาจจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นที่ทราบกันดีโดยเราจะเรียกว่า การสึกหรอจากการกัดกร่อน ดังนั้นการสร้างฟิล์มหรือชั้นเคลือบจะนิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปกป้องโลหะพื้น (Base Metal) หรือโลหะผสมจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงจนนำไปสู่ปัญหาการกัดกร่อน ถ้าผิวหน้าของชั้นเคลือบอยู่ภายใต้สภาวะการรับแรงจากการสึกหรอแบบขัดสีและแบบยึดติด จะทำให้เกิดการสูญเสียชั้นเคลือบจากผิวหน้าของวัสดุได้ ในขณะเดียวกันผิวหน้าของโลหะพื้นที่สูญเสียชั้นเคลือบก็สามารถเกิดการกัดกร่อนต่อเนื่องไปได้อีก ในอีกนัยหนึ่ง ผิวหน้าที่เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดออกซิไดซ์อาจจะทำให้สมบัติทางกลลดลงและมีอัตราการสึกหรอสูงขึ้น นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่มีอนุภาคของออกไซด์ที่หลุดออกมาจากผิวหน้าของวัสดุสามารถทำตัวเป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดการเสียดสีต่อไปได้เช่นกัน

#### 2.4.2 การสึกหรอในระบบจ่ายไฟฟ้า (Wear in pantograph-catenary system)

ปรากฏการณ์เครื่องกลไฟฟ้าจะควบคุมลักษณะของการสัมผัสระหว่าง panhead และสาย catenary ปัจจุบัน ในการทดสอบก่อนหน้านี้ แลกสัมผัสหลายรายการที่มีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันเพื่อกำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของหน้าสัมผัส มีรายงานว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดสำหรับทองแดงไม่มีการหล่อลื่นที่สัมผัสกับทองแดง และมีความเหมาะสมในช่วงของ 0.2-0.24 สำหรับหน้าสัมผัสคาร์บอนทองแดง ได้รับการสรุปเพิ่มเติมว่า plastic deformation ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นปัจจัยสำคัญในช่วงแรกสุดที่สัมผัสกับลวดในโลหะของการสัมผัสแบบไกล ศึกษาผลกระทบของการปล่อยไฟฟ้าหรือการเกิดประกายไฟในอัตราการสึกหรอของทองแดงชูปต่อแถบสัมผัสสรุปว่าอัตราการสึกหรอเป็นสัดส่วนกับพลังงานการปล่อยไฟฟ้า นอกจากนี้พลังงานที่เกิดจากประกายไฟทำให้เกิดผลกระทบทางความร้อนต่างๆเช่นละลายระเหยแยกอนุภาคทองแดงชูปและการเกิดออกซิเดชันของคาร์บอน อุณหภูมิในระหว่างสภาวะการทำงานสูงถึง 200-550 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้การใช้จาระบีมีประสิทธิภพน้อยลง และมันก็สรุปได้ว่ามีผลกระทบอย่างรุนแรงต่ออุปกรณ์การเก็บรวบรวมปัจจุบันและอัตราการสึกหรอของหัวตัดเป็นสัดส่วนต่อการปล่อยพลังงานในมาตราส่วนลอการิทึม สำหรับโลหะผสมทองแดงชูปคาร์บอนไฟเบอร์เสริมแถบเก็บรวบรวมคาร์บอน มีการติดตั้งสายการติดต่อกับคาร์บอนบริสุทธิ์และลวดทองแดงติดต่อกันในการสอบสวนเพื่อสรุปว่าค่าสัมประสิทธิ์แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดทานของผู้ติดต่อกันจะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ต้องกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามาในสายการสัมผัส และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ลดลงด้วยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าและแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัส อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนบนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพบว่าไม่มีนัยสำคัญ ในงานเขียนเปิดเผยว่าจำนวนมากของการทดสอบการพัฒนาและการวิจัยความพยายามเพื่อให้เข้าใจกลไกการสึกหรอของระบบการเก็บรวบรวมปัจจุบันของรถไฟและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบของพวกเขาซึ่ง ได้รับอิทธิพลจากหลายอย่างที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.3 สมการพื้นฐานของการสึกหรอ (Archard's Wear Equation)

การสึกหรอของวัสดุโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสีของผิวสัมผัส อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางของการสัมผัสซึ่งมีองค์ประกอบอื่นๆที่ต้องพิจารณาอีกมากมาย เช่น ลักษณะของผิวสัมผัส อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุ ความแข็ง ความเปราะ และอื่นๆ ดังสมการการสึกหรอ

$$A = \frac{k_F F_C V}{H} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $A$  คืออัตราการสึกหรอ ( $m^3/m$ )  
 $k_F$  คือสัมประสิทธิ์การสึกหรอ ( $s/m$ )  
 $F_C$  คือแรงกดสัมผัส ( $N$ )  
 $H$  คือค่าความแข็ง ( $N/m^2$ )  
 $V$  คืออัตราเร็วของจุดสัมผัส ( $m/s$ )

## 2.5 แรงเสียดทาน (Friction force)

ความเสียดทานเป็นแรงต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิว 2 ผิวลักษณะของการเคลื่อนที่เป็นการลื่นไถลหรือการกลิ้งของผิวหนึ่งไปบนผิวหนึ่งซึ่งอาจสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลวหรือมีฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ปัญหาสำคัญของความเสียดทานคือการที่ผิวเกิดความเสียดทานระหว่างผิววัสดุซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้พลังงานที่สูญเสียไปนี้เมื่อนำมารวมกันพบว่ามีความสำคัญในการลดแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในวิทยาการสมัยใหม่ ทั้งในการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำและการออกแบบระบบให้เกิดความเสียดทานน้อยที่สุดเป็นต้นแต่ในบางกรณีความเสียดทานก็เป็นที่ต้องการเช่นการเดิน การขับเคลื่อนของรถยนต์การหยิบจับสิ่งของถ้าไม่มีความเสียดทานระหว่างผิวกิจกรรมต่างๆเหล่านี้จะเกิดขึ้นไม่ได้ดังนั้นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานจึงประกอบด้วยการศึกษาเพื่อลดความเสียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทานให้ต่ำที่สุดในกรณีที่ไม่ต้องการและการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานให้เพียงพอกับความ ต้องการในการทำงานบางอย่างนอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่ต้องการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานใน ช่วงเวลาแคบๆให้สามารถควบคุมได้เช่นในระบบเบรกรถยนต์ซึ่งการทำงานของเบรกไม่ต้องการให้ หยุดในทันที ต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดของรถไม่ให้ช้าหรือเร็วจนเกินไปเพื่อการนุ่มนวลใน การขับขี่เป็นต้นขนาดหรือระดับของค่าความเสียดทานโดยทั่วไปเราใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นตัววัดค่าโดยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.7 และคำนวณค่าได้ตาม สมการ 2.8

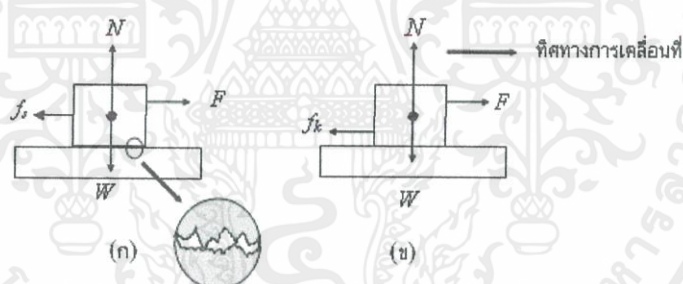
$$f = \mu N \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\mu$  : ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

$f$  : แรงที่ทำให้เคลื่อนที่

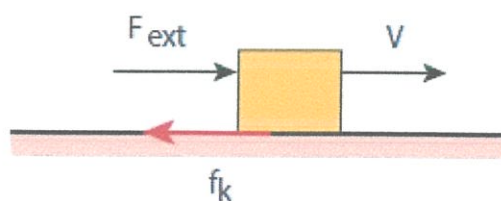
$N$  : แรงตั้งฉาก

$w$  : น้ำหนัก



รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน[3]

### 2.5.1 การเสียดทานแบบไถล (Sliding friction)



รูปที่ 2.8 แสดงถึงการเสียดทานแบบไถล[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่ค้นพบเรื่องความเสียดทานคือ Leonardo da Vinci หลังจากนั้น Amontons ได้ทำการสังเกตและตั้งกฎพื้นฐานของความเสียดทานไว้ 2 ข้อซึ่งได้รับการกล่าวถึงและมีการนำไปอ้างอิงเป็นที่แพร่หลายต่อมากฎข้อที่ 3 ก็ได้ตั้งขึ้นมาจากการสังเกตของ Coulomb ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้คือ

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

กฎข้อที่ 2 ของความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส (Apparent area of contact)

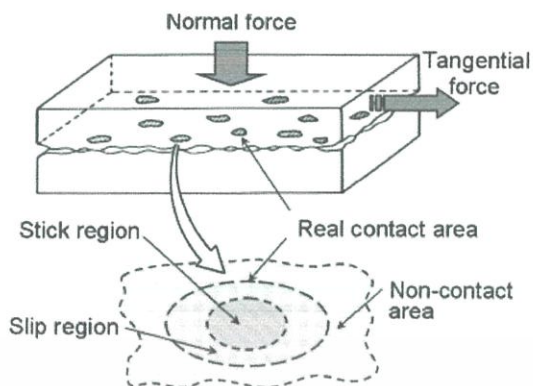
กฎข้อที่ 3 แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

กฎข้อที่ 1 และ 2 โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับมีเพียงบางกรณีที่ไม่เป็นไปตามกฎเช่นในกรณีวัสดุที่แข็งมากๆ เช่น เพชรหรือกรณีที่วัสดุอ่อนมากๆ เช่น PTFE (Teflon) พบว่าอาจเกิดความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ( $f = CN^x$ ) ได้ นอกจากนี้ในกรณีที่วัสดุอ่อนนิ่มแต่ฟิล์มแข็งเคลือบอยู่ในสภาวะทำงานที่มีค่าความเค้นต่ำ ฟิล์มแข็งที่เคลือบอยู่จะมีผลกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นซึ่งการวัดความเสียดทานระหว่างฟิล์มเคลือบกับวัตถุที่มากกระทำ แต่เมื่อความเค้นที่มากกระทำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ฟิล์มเคลือบแตกเนื้อของวัสดุภายในจะเป็นตัวที่มีอิทธิพลกับค่าความ-เสียดทานที่เปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและแรงกดจึงเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 คือกรณีที่ผิวงานเรียบมากและสะอาดมาก จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสูงจึงทำให้แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเค้นที่มากกระทำแต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สัมผัส ส่วนกฎข้อที่ 3 มีการโต้แย้งกันมากจากที่ทราบทั่วไปว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Static friction coefficient :  $\mu_s$ ) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction coefficient :  $\mu_k$ ) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจะมีค่าแปรตามช่วงเวลาในการสัมผัสกันของผิว 2 ผิวถ้าสัมผัสกันเป็นช่วงเวลาสั้นๆ  $\mu_s$  มีค่าต่ำหรือมีค่าเทียบเท่ากับ  $\mu_k$  และเมื่อ 2 ผิวสัมผัสกันเป็นระยะเวลาสั้นก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนที่  $\mu_s$  มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic flow) และเคลือบของวัสดุ ซึ่งในส่วนของ  $\mu_k$  มีการทดลองมากมายที่ยืนยันว่า  $\mu_k$  แปรผันตามความเร็วของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ซึ่งก็จะไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 3 จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าทั้ง 3 ข้อที่ตั้งขึ้นมานั้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาความเสียดทานเท่านั้นในทางปฏิบัติต้องนำปัจจัยอื่นๆมารวมพิจารณาในการวิเคราะห์หาค่าความเสียดทานด้วย

### 2.5.1.1 กลไกพื้นฐานของการเกิดความเสียดทานแบบไถล

เป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นผิวทางวิศวกรรมไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริงถึงแม้มองเห็นว่าเรียบด้วยตาเปล่าแต่เมื่อมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูงพบว่า มีลักษณะที่เป็นคลื่นขรุขระอยู่แบบจำลองของความเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่สัมผัสกันจริงดังแสดงในรูป 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงถึงผิวสัมผัสจริงกับผิวสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิร์ตซ์[4]

สมมติฐานว่าบริเวณที่สัมผัสกันของผิววัสดุจะเกิดความเค้นสูงที่จุดสัมผัสระหว่าง 2 ผิว เนื่องจากเป็นบริเวณเล็กๆจึงเกิดเป็นการเชื่อมติดกัน และถูกเขียนให้แยกออกจากกันเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัส ภายหลังจากพบว่าความเค้นสูงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสไม่ได้เกิดการเชื่อมยึดติดกันแต่มีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ค่าหนึ่งถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสแรงที่ใช้ต้องมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวนี้ได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมผัสส่วนที่เป็นยอดสูงของส่วนที่แข็งแกร่งกว่าของคู่สัมผัสจะขูดลงบนผิวที่อ่อนกว่าเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจึงต้องการแรงหรือพลังงานอีกส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนรูปของผิวที่อ่อนกว่าดังนั้นแรงเสียดทานซึ่งเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัส แรง  $F$  จึงต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว  $F_a$  และแรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ  $F_d$  เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

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

### 2.5.1.2 แรงยึดเหนี่ยว

พื้นผิวเล็กๆบริเวณที่สัมผัสกันจริงจะเกิดการยึดเหนี่ยวซึ่งอาจเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี แรงยึดเหนี่ยวเกิดได้ง่ายบนพื้นผิวที่เรียบสะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสได้นั้นจะต้องมีแรงกระทำและการเฉือนที่เพียงพอเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวนี้ บริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดก็จะฉีกขาดซึ่งอาจจะเป็นที่ผิวสัมผัสหรือเนื้อของวัสดุตัวใดตัวหนึ่งในกรณีที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสแข็งแกร่งกว่าเนื้อในของวัสดุนั้น

จากทฤษฎีของ Bowden และ Tabor

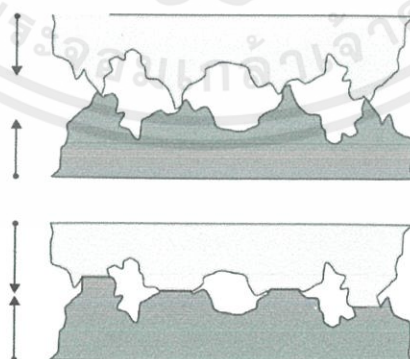
กรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Dry friction) พบว่า	กรณีที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Partial liquid) พบว่า
$F_a = A_r + \tau_a$	$F_a = A_r[\alpha\tau_a + (1 - \alpha)\tau_1]$

- เมื่อ  $A_r$ : พื้นที่สัมผัสจริงของผิว  
 $\tau_a$ : ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว  
 $\alpha$ : อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสจริงต่อพื้นที่สัมผัสทั้งหมด  
 $\tau_1$ : ค่าความแข็งแรงเฉือนของของเหลวที่คั่นอยู่

ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลทางกายภาพและทางเคมีของพื้นผิวทั้งคู่โดยทั่วไปความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวมีค่าต่ำถ้ามีพื้นที่ที่สัมผัสจริงต่ำเช่นในกรณีมีฟิล์มบางกั้นหรือมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลด บริเวณการสัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัส แต่ถ้าผิวสัมผัสกันในสุญญากาศไม่มีอนุภาคอื่น ๆ มากั้นระหว่างกลางจะทำให้ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวสูงซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็จะสูงด้วย

### 2.5.1.3 แรงในการเปลี่ยนรูปวัสดุ(Deformation force)

เนื่องจากบริเวณที่สัมผัสกันจริงของผิวคู่สัมผัสมักเป็นบริเวณเล็กๆ ของยอดสูง (Asperity) ขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง 2 ผิวจึงมักเกิดกลไกการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของผิวคู่สัมผัสส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวสัมผัสที่แข็งแรงกว่าจะขูดไบบนผิวที่อ่อนกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเกิดการแตกหักและการฉีกขาดของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า



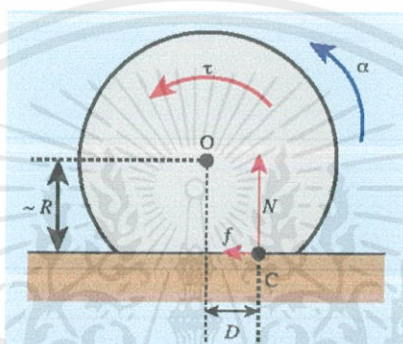
รูปที่ 2.10 แสดงถึงพื้นผิวการเปลี่ยนรูปถาวรในกรณีเกิดการไถล[1]

ดังนั้นเพื่อให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์อย่างต่อเนื่องแรงในการเคลื่อนที่จึงต้องมากพอในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่อ่อนกว่านอกเหนือจากนั้นผิววัสดุบางส่วนที่ถูกขูดจนเกิดการแตกหักเมื่อหลุดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผิวชิ้นงานก็จะกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งสูงเนื่องจากกลไกการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุที่ทำให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียดอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้มีอิทธิพลในการเพิ่ม ที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่และสามารถขูดไปบนผิวชิ้นงานเหมือนกับ ส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวแข็ง ถ้าหากต้องการลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างวัสดุในส่วนนี้สามารถทำได้โดยปรับสภาพผิวคู่สัมผัสให้มีความเรียบสูงซึ่งช่วยลดปริมาณของยอดสูงและลดการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุให้น้อยลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผิวที่มีความแข็งสูงต้องทำให้เรียบมากยิ่งขึ้น

### 2.5.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling friction)



รูปที่ 2.11 แสดงถึงการสัมผัสแบบกลิ้ง [4]

ในการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวที่ผิวลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลิ้งเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า กล่าวคือระบบคู่สัมผัสจะต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ต่ำกว่าลักษณะการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล แต่เคลื่อนที่แบบกลิ้งมักเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่วัสดุคู่สัมผัสหนึ่งมีลักษณะกลมหรือเกือบกลมเท่านั้น ในกรณีของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งพลังงานในการเคลื่อนที่สัมผัสของระบบจะต้องสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและแรงในการเปลี่ยนรูปได้ซึ่งก็เหมือนกับการเคลื่อนที่แบบไถลแต่มีความแตกต่างที่ทิศทางในการเข้าหา และการเคลื่อนที่ของบริเวณผิวสัมผัสซึ่งจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวไม่ได้เกิดในทิศทางที่สัมผัสกับผิวเหมือนการไถล โดยปกติในขณะที่เกิดการกลิ้ง จะมีการเคลื่อนที่รูปแบบอื่นอยู่ด้วยคือการไถลและการหมุนถึงแม้ว่าการไถลและการหมุนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งแต่ก็เป็นตัวสร้างความต้านทานการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดตามสมการของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบกลิ้งดังต่อไปนี้

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

เมื่อ  $V_S$  : ค่าความเร็วของการไถล

$V_R$  : ค่าความเร็วของการกลิ้ง



$\mu_k$  : ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ในสภาวะการเคลื่อนที่แบบไถล

กฎการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

- 1 แรงเสียดทานแปรผกผันกับค่ารัศมีความโค้งของผิวที่กลิ้ง
- 2 ผิวที่เรียบจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าผิวที่หยาบ
- 3 ความเสียดทานสถิตมีค่าสูงกว่าความเสียดทานจลน์

### 2.5.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient)

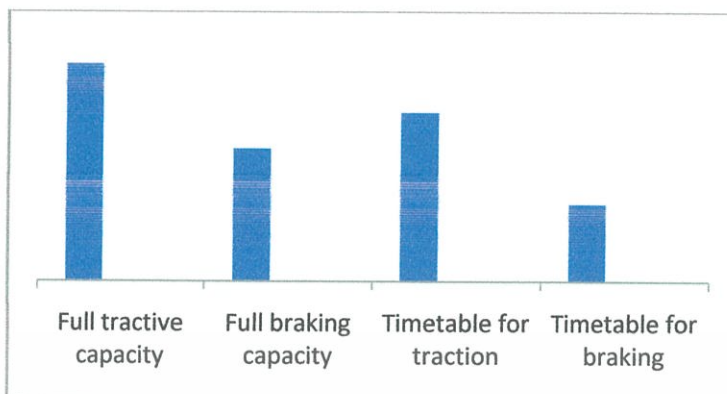
วัตถุวัสดุที่ต่างชนิดกันจะมีพื้นผิวรอยขรุขระที่ไม่เหมือนกัน แรงเสียดทานจะต่างกัน ถ้าเลื่อนก้อนยางไปบนผิวของยางจะทำได้ยากกว่าถ้าเลื่อนก้อนยางบนผิวของเหล็กตัวชี้บอกขนาดของแรงเสียดทานของวัตถุต่างๆที่นิยมคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคืออัตราส่วนของแรงกระทำ กับน้ำหนักของวัตถุตั้งนั้นถ้าพื้นสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเท่ากับ 1 หมายความว่าต้องออกแรงขนาด 10 กิโลกรัมถักน้ำหนักที่มีขนาด 10 กิโลกรัม แต่ถ้าพื้นนั้นลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานให้เหลือเท่ากับ 0.1 จะออกแรงเพียง 1 กิโลกรัมก็ทำให้น้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัมเคลื่อนที่ได้

ในความเป็นจริง ส่วนหนึ่งของแรงเสียดทานจะใช้แรงต้านข้าง แรงของการหมุนและภาระที่ไม่เท่ากันของการกระจายระหว่างเพลลาและล้อการยึดเกาะสูงสุด(หรือการเสียดทาน) ในทิศทางตามแนวยาวจะมีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานทั้งหมด ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการยึดเกาะส่วนใหญ่จะกำหนดให้แรงเสียดทานใช้ได้เฉพาะเมื่อเกิดการยึดเกาะค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีขนาดใหญ่กว่าค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะภายใต้เงื่อนไขทั้งสะอาดและการปนเปื้อนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแสดงในรูปของค่าคงที่เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและแรงยึดเกาะในความเป็นจริงสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานไม่คงที่

ค่าสัมประสิทธิ์ของการยึดเกาะที่ต้องการสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท 1.การขับเคลื่อนหรือเบรกของรถไฟขณะที่บรรทุกเต็มความจุ 2.การควบคุมรถไฟให้ตรงตามตารางเวลาที่กำหนดและ 3.การควบคุมรถบนความปลอดภัย รูปที่ 2.12 แสดงเป็นแผนผังค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะทั้งสามประเภท เป็นข้อสังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่ต้องการนั้น ขึ้นอยู่กับประเภทของรถไฟประเภทของรางรถไฟ ระบบเบรก จำนวนเพลลาขับ ฯลฯ ตัวอย่างเช่นรถไฟฟ้าใต้ดินหรือรถไฟฟ้าโดยสารจะต้องมีการเร่งและการชะลอตัวค่อนข้างสูงเนื่องจากมีช่วงเวลาสั้นๆ ระหว่างจากสถานีไปอีกสถานี รถไฟฟ้าใต้ดินวัดค่าความเร่งได้  $1.5 \text{ m/s}^2$  และต้องการค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะอย่างน้อย 0.15 เป็นรูปแบบอย่างง่ายที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเร่งกับการลดความเร็วและค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแสดงในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะที่ต้องการในการขนส่งทางรถไฟ[1]

ในทางกลับกันสัมประสิทธิ์การยึดเกาะจะถูกจำกัดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อและรางแม้จะมีปัจจัยอื่นๆเช่นการกระแสน้ำสะเทือนแบบไม่คงที่สำหรับเหล็กกับเหล็ก ภายใต้เงื่อนไขแบบแห้งสะอาดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานประมาณ 0.6 แต่อย่างไรก็ตามล้อและรถไฟเป็นระบบเปิดซึ่งอาจจะมีสิ่งปนเปื้อนระหว่างผิวสัมผัส และส่งผลกระทบต่อระดับแรงเสียดทานทำให้แรงยึดของล้อและรางรถไฟสูงเกินไปหรือต่ำเกินไปตารางที่ 2.1 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขบางอย่างที่แสดงอยู่ในตารางด้านล่างซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1 นั้นหมายถึง สัมประสิทธิ์การยึดเกาะจริงจะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเพื่อความปลอดภัย

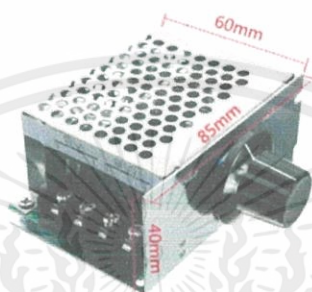
Conditions	Temperature(°C)	Friction coefficient
Sunshine, dry rail	19	0.6-0.7
Recent rain on rail	5	0.2-0.3
A lot of grease on rail	8	0.05-0.1
Damp leaf film on rail	8	0.05-0.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

## 2.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย

### 2.6.1 Voltage Regulator

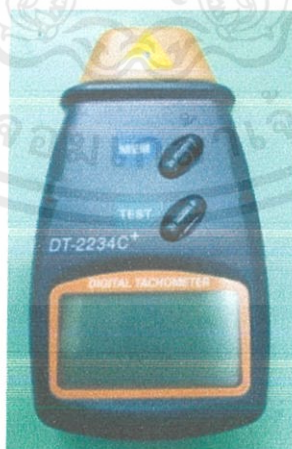
Voltage regulator คืออุปกรณ์รับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 220 โวลต์สามารถใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์เพื่อใช้ในการทดลองได้



รูปที่ 2.13 Voltage Regulator[3]

### 2.6.2 เครื่องวัดความเร็วรอบ

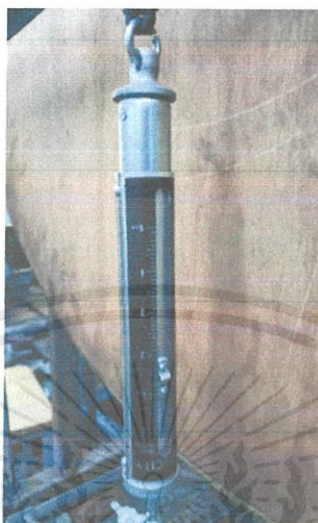
เครื่องวัดความเร็วรอบ คือเครื่องที่ใช้วัดความเร็ววัดความเร็วรอบต่อนาทีโดยมีช่วงการวัดกว้างและความละเอียดสูงใช้ในการวัดค่าความแม่นยำสูงเวลาในการตรวจวัดที่รวดเร็วและระยะตรวจจับระยะยาวได้ถึง 500 มม. (20 นิ้ว) ด้วยเลเซอร์ ใช้ในการวัดความเร็วของมอเตอร์และความเร็วของลวดทองเหลืองที่สัมผัสกับแพนโทกราฟได้



รูปที่ 2.14 เครื่องวัดความเร็วรอบ

### 2.6.3 เครื่องชั่งสปริงแบบแขวน

ใช้ตาชั่งสปริงแบบแขวนโดยแสดงตามรูปที่ 2.15 ปรับน้ำหนักกดขนาด 25 นิวตัน



รูปที่ 2.15 เครื่องชั่งสปริงแบบแขวน

### 2.6.4 เครื่องชั่งดิจิตอล

เครื่องชั่งดิจิตอลคืออุปกรณ์ที่ใช้ชั่งน้ำหนักของแผ่นคาร์บอน ที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราการสึกหรอในช่วงเวลาที่ต่างกันได้

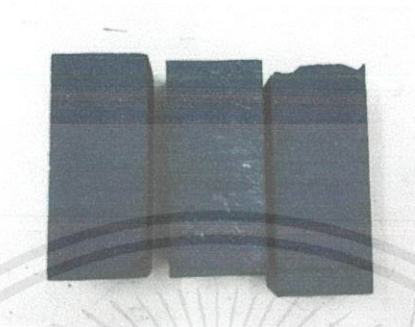


รูปที่ 2.16 เครื่องชั่งดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.5 แท่งคาร์บอน

แท่งคาร์บอนใช้ในสัมผัสกับขดลวดทองเหลืองในความเร็วที่แตกต่างกัน ที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราการสึกหรอในช่วงความเร็วและระยะทางที่แตกต่างกันได้



รูปที่ 2.16 แท่งคาร์บอน

### 2.6.6 ชุดทดลองอัตราการสึกหรอ

ชุดทดลองอัตราการสึกหรอประกอบด้วยขดลวดทองเหลืองที่สัมผัสกับแท่งคาร์บอน และมอเตอร์ส่งกำลังที่สามารถปรับความเร็วที่แตกต่างกัน เพื่อใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราการสึกหรอระหว่างขดลวดทองเหลืองกับแท่งคาร์บอน



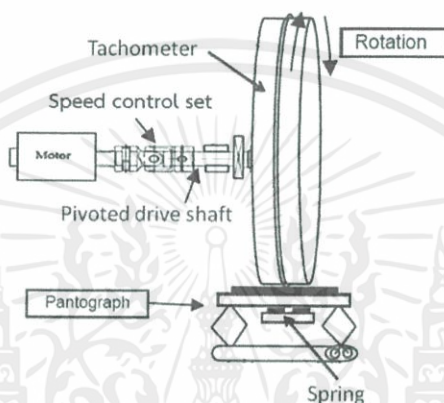
รูปที่ 2.17 ชุดทดลองอัตราการสึกหรอ

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.1 การทดลองและชุดทดลอง

ในการทดลองใช้ชุดทดลองซึ่งจำลองมาจากการเคลื่อนที่ของแพนโทกราฟ โดยย่อขนาดให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมตามงานวิจัยและสามารถทดลองจริงได้



รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองของชุดทดลอง

ชุดทดลองนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 375วัตต์ (½แรงแม้า) 1ตัว ไปเข้ากับชุดปรับความเร็วซึ่งประกอบด้วยมูเลย์ตัวขับเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2,4 นิ้ว ขับผ่านสายพานซึ่งจับกับมูเลย์ตัวตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8,12 นิ้ว มีตาชั่งสปริงแบบแขวนปรับเป็นโหลดขนาด 25 นิวตัน และทดลองภายใต้เงื่อนไขการสัมผัสแบบไกลภายใต้ความเร็วที่สัมผัสกับแพนโทกราฟ 3.6 7.2 10.8 47 และ 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งในแต่ละความเร็วของการทดลองหากการสึกหรอ ใช้เวลาการทดลองต่างกัน จะทำการวัดมวลที่สึกหรอโดยใช้เครื่องชั่งบอกความละเอียดสูงวัดมวลที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะนำไปพิจารณาหาอัตราการสึกหรอต่อไปได้

#### 3.2 การปรับแต่งความเร็ว

##### 3.2.1 ความเร็ว 3.6 7.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและ 10.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ชุดปรับความเร็วทั้ง 3 ความเร็วนี้ จะประกอบไปด้วยมูเลย์ตัวขับเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ขับผ่านสายพานซึ่งจับกับมูเลย์ตัวตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และมี Voltage Regulator เป็นตัวปรับรอบความเร็ว และทำการยืนยันโดยอุปกรณ์วัดรอบ ซึ่งวัดค่าได้ 19 38 และ 58 รอบต่อนาที ตามลำดับ

### 3.2.2 ความเร็ว 47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ชุดปรับความเร็วทั้ง 2 ความเร็วนี้ จะประกอบไปด้วยมู่เลย์ตัวขับเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ขับผ่านสายพานซึ่งจับกับมู่เลย์ตัวตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และ 8 นิ้วตามลำดับ ความเร็ว และทำการยืนยันโดยอุปกรณ์วัดรอบ ซึ่งวัดค่าได้ 250 และ 297 รอบต่อนาทีตามลำดับ

### 3.3 ขั้นตอนการทดลองและบันทึกผล

เริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำมาสู่การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำที่สัมผัสกับแพนโทกราฟ หลังจากนั้นจึงออกแบบชุดทดลอง กำหนดและจัดซื้ออุปกรณ์เพื่อสร้างชุดทดลองตามที่ได้ออกแบบ เมื่อสร้างชุดทดสอบเสร็จสิ้นจึงเริ่มทดสอบ ปรับปรุงแก้ไข และบันทึกผล



## บทที่ 4

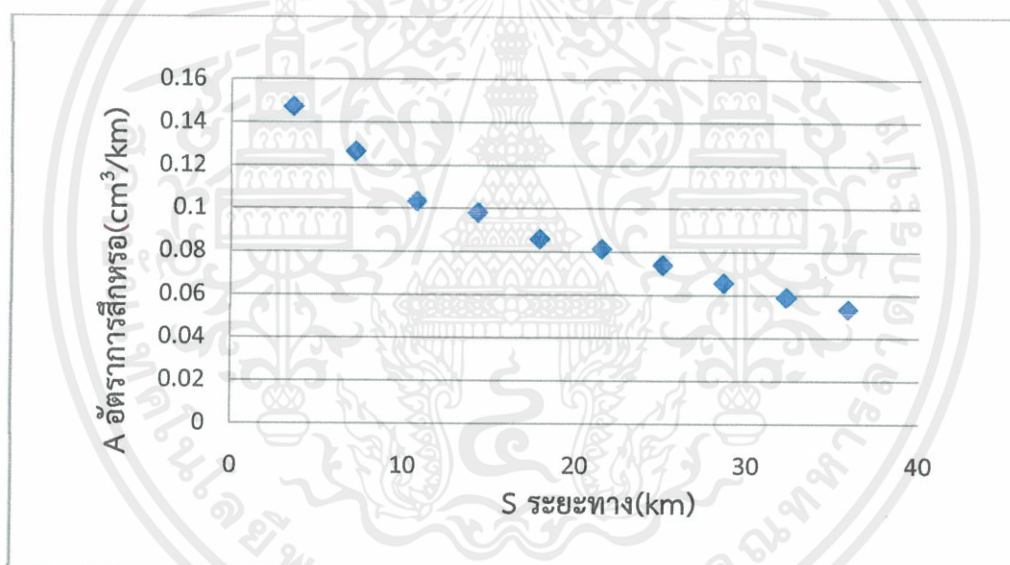
### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การหาอัตราการสึกหรอ

ในการหาอัตราการสึกหรอของงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 5 กรณี โดยในแต่ละกรณีที่แตกต่างกันออกไปมีน้ำหนักกดทับเท่ากันคือ 25 นิวตัน แต่ใช้ซึ่งในการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลมวลที่สึกหรอทุก 20 นาที

โดยงานวิจัยนี้จะนำมวลที่สึกหรอ(ในหน่วยกรัม)หารด้วยความหนาแน่นของมวล(1.82กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) จะคำนวณได้ปริมาตรที่สึกหรอ(ในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร)

##### 4.1.1 อัตราการสึกหรอที่ความเร็ว 3.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

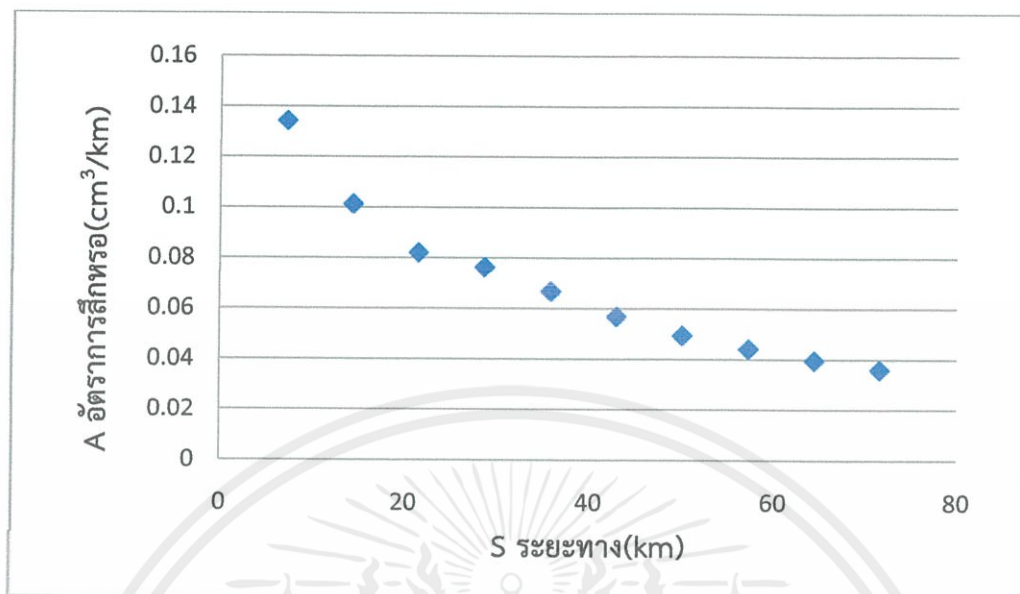


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทางที่ความเร็ว 3.6 km/hr

จากรูปที่ 4.1 ผลการทดลองสำหรับความเร็ว 3.6 km/hr น้ำหนักกดขนาด 25N แสดงอัตราการสึกหรอที่ระยะทาง 3.6 km มีค่าเท่ากับ 0.147 cm<sup>3</sup>/km ที่ระยะทาง 21.49 km มีค่าเท่ากับ 0.0813 cm<sup>3</sup>/km และที่ระยะทาง 32.2 km มีค่าเท่ากับ 0.059 cm<sup>3</sup>/km ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอมีค่าลดลง



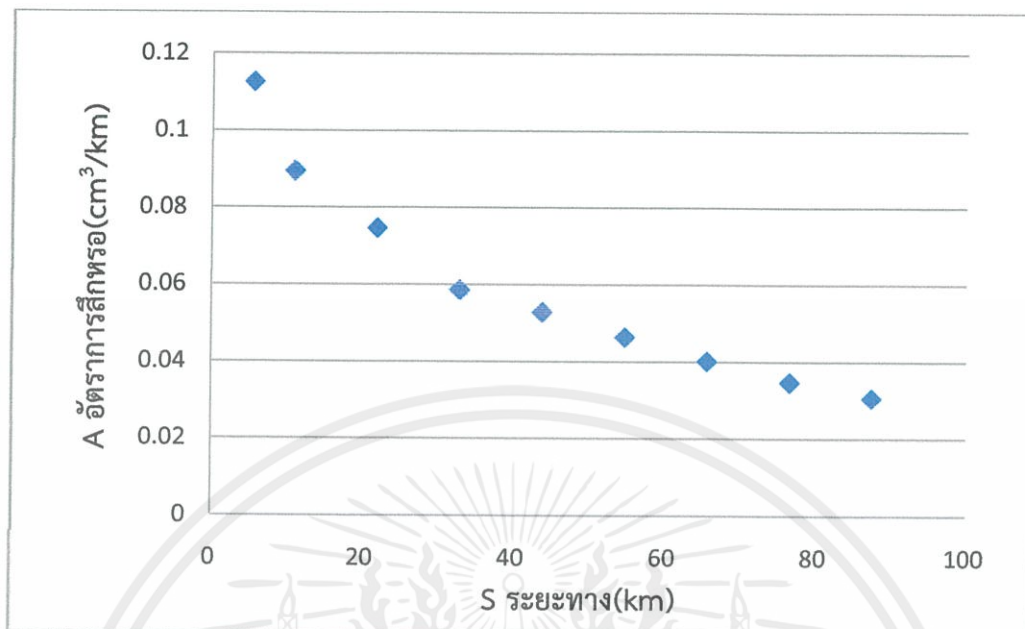
#### 4.1.2 อัตราการสึกหรอที่ความเร็ว 7.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทางที่ความเร็ว 7.2 km/hr

จากรูปที่ 4.2 ผลการทดลองสำหรับความเร็ว 7.2 km/hr น้ำหนักกดขนาด 25N แสดงอัตราการสึกหรอที่ระยะทาง 7.16 km มีค่าเท่ากับ 0.134 cm<sup>3</sup>/km ที่ระยะทาง 42.98 km มีค่าเท่ากับ 0.0569 cm<sup>3</sup>/km และที่ระยะทาง 71.63 km มีค่าเท่ากับ 0.036 cm<sup>3</sup>/km ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอมีค่าลดลง

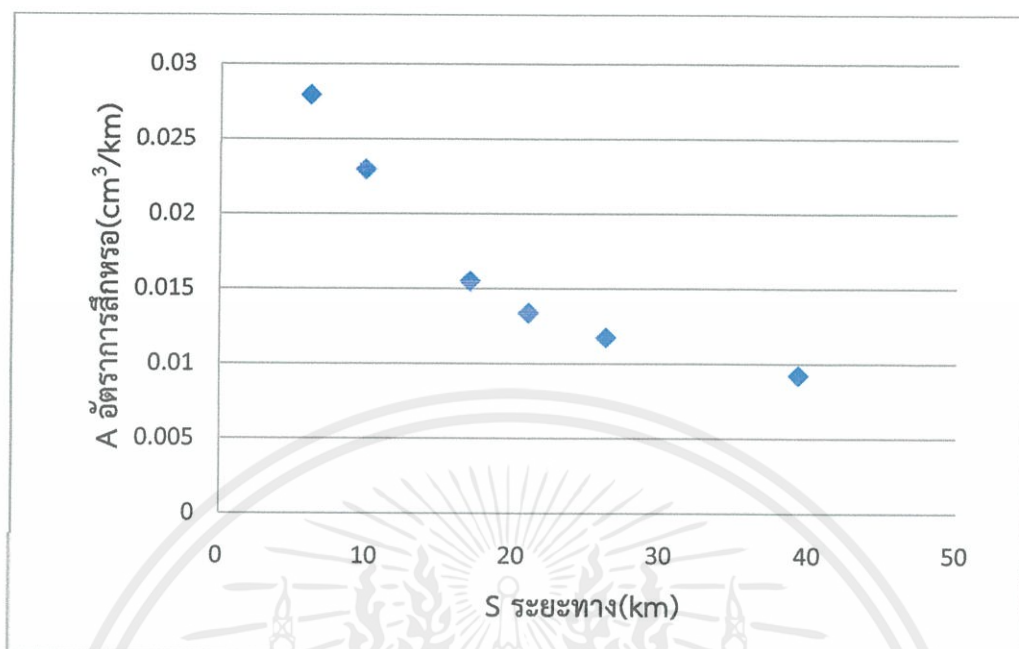
#### 4.1.3 อัตราการสึกหรอที่ความเร็ว 10.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทางที่ความเร็ว 10.8 km/hr

จากรูปที่ 4.3 ผลการทดลองสำหรับความเร็ว 10.8 km/hr น้ำหนักกดขนาด 25N แสดงอัตราการสึกหรอที่ระยะทาง 10.93 km มีค่าเท่ากับ 0.0895 cm<sup>3</sup>/km ที่ระยะทาง 54.66 km มีค่าเท่ากับ 0.0464 cm<sup>3</sup>/km และที่ระยะทาง 87.46 km มีค่าเท่ากับ 0.0307 cm<sup>3</sup>/km ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอมีค่าลดลง

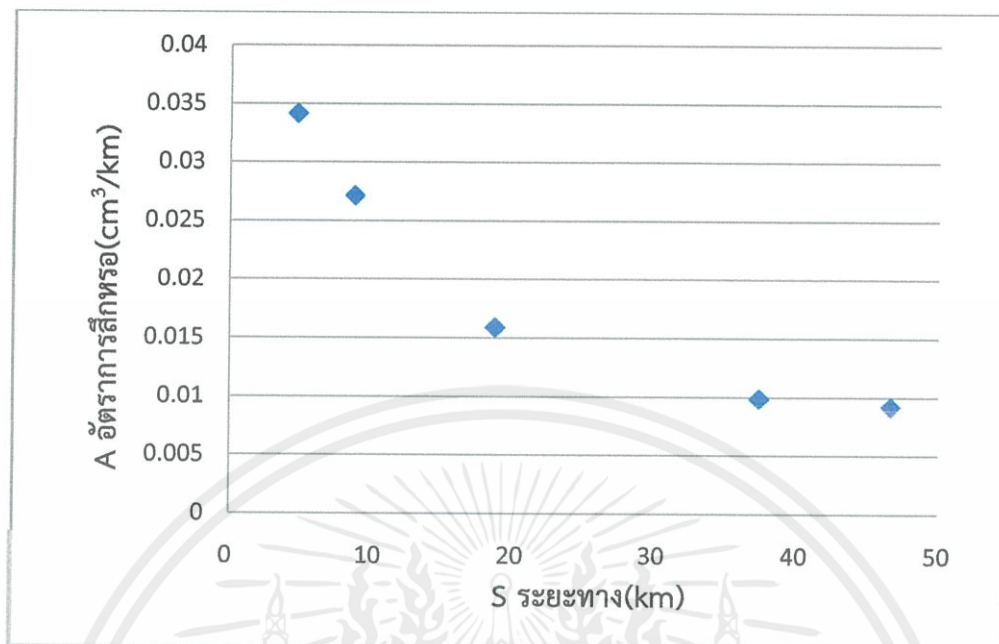
#### 4.1.4 อัตราการสึกหรอที่ความเร็ว 47 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทางที่ความเร็ว 47 km/hr

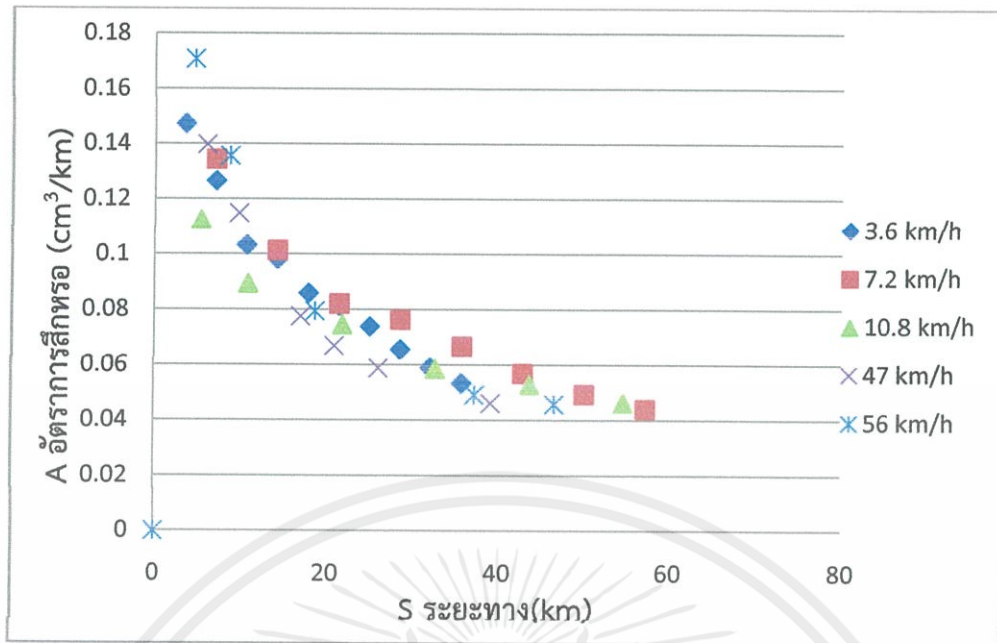
จากรูปที่ 4.4 ผลการทดลองสำหรับความเร็ว 47 km/hr น้ำหนักกดขนาด 25N แสดงอัตราการสึกหรอที่ระยะทาง 6.1 km มีค่าเท่ากับ 0.028 cm<sup>3</sup>/km ที่ระยะทาง 20.93 km มีค่าเท่ากับ 0.015 cm<sup>3</sup>/km และที่ระยะทาง 39.24 km มีค่าเท่ากับ 0.009 cm<sup>3</sup>/km ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอมีค่าลดลง

#### 4.1.5 อัตราการสึกหรอที่ความเร็ว 56 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทางที่ความเร็ว 56 km/hr

จากรูปที่ 4.5 ผลการทดลองสำหรับความเร็ว 56 km/hr น้ำหนักกดขนาด 25N แสดงอัตราการสึกหรอที่ระยะทาง 8.71 km มีค่าเท่ากับ 0.1357 cm<sup>3</sup>/km ที่ระยะทาง 37.32 km มีค่าเท่ากับ 0.0493 cm<sup>3</sup>/km และที่ระยะทาง 46.65 km มีค่าเท่ากับ 0.0459 cm<sup>3</sup>/km ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอัตราการสึกหรอมีค่าลดลง

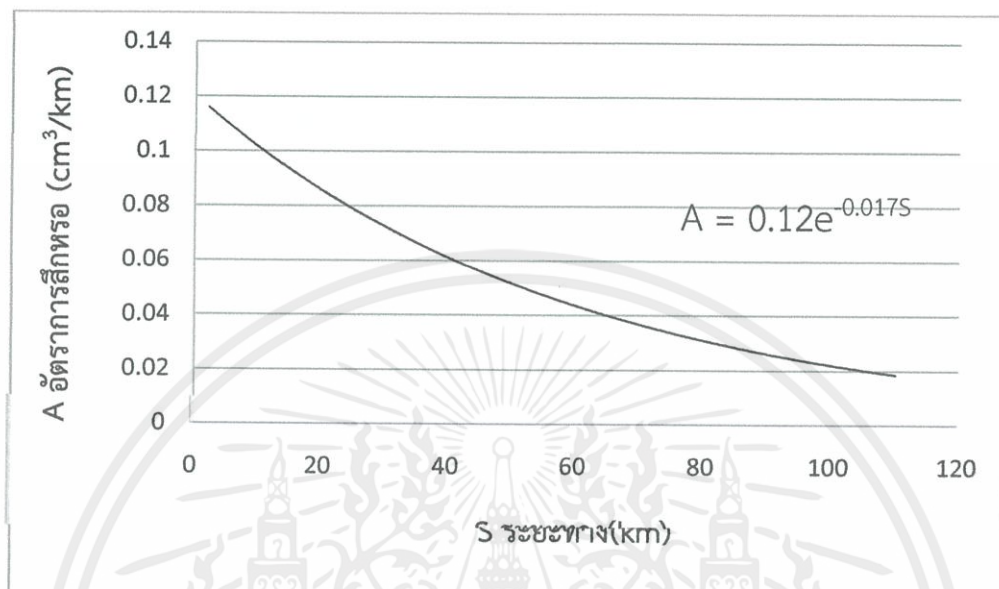


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับระยะทาง  
ที่ความเร็ว 3.6 7.2 10.8 47 และ 56 km/h

จะเห็นได้ว่าระยะทางการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นของแถบสัมผัสทั้ง 5 กรณี จะทำให้ค่าของอัตราการสึกกร่อนลดลงแบบตดถอยซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันตามรูปที่ 4.6

## 4.2 เขียนสมการความสัมพันธ์(Regression model equation)

นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนเป็นสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยที่ความเร็ว 3.6 7.2 10.8 47 และ 56 km/h พร้อมสมการการสีกหรือตามรูปที่ 4.7



รูปที่4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับระยะทาง

## บทที่ 5

### สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า อัตราการสึกหรอจะลดลง เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีการสึกหรอตามข้อสมมติฐานที่ตั้งไว้ และเมื่อทำการสังเกตลวดตัวนำพบว่า มีรอยดำเกิดขึ้นและสีที่คล้ำขึ้น จึงได้สมมติว่ามีเศษผงคาร์บอนเข้าไปติดอยู่บนผิวของลวดสัมผัส ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าลักษณะของการสึกหรอในช่วงแรกเป็นการสัมผัสกันระหว่างลวดสัมผัสกับแถบสัมผัสเหนือหัวซึ่งทำมาจากคาร์บอน เป็นผลให้อัตราการสึกหรอของแถบสัมผัสเหนือหัวมากเพราะค่าความแข็งของลวดสัมผัสมีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของแถบสัมผัสเหนือหัว และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า อัตราการสึกหรอมีค่าลดลง เนื่องจากมีการสึกหรอของแถบสัมผัสเหนือหัวซึ่งทำมาจากคาร์บอน และเศษของคาร์บอนที่เกิดจากการสึกหรอไปติดอยู่ที่ผิวของลวดสัมผัส ส่งผลให้ลดการสัมผัสกันระหว่างวัสดุของลวดสัมผัสกับวัสดุของแถบสัมผัสเหนือหัวแล้วเปลี่ยนเป็นการสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนสัมผัสกับคาร์บอนด้วยกันเองซึ่งค่าความแข็งของคาร์บอนที่สัมผัสกับคาร์บอนมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งระหว่างเนื้อวัสดุของลวดสัมผัสจึงทำให้เกิดการลดลงของอัตราการสึกหรอ ดังนั้นอัตราการสึกหรอของแถบสัมผัสเหนือหัวมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนที่หลุดจากแถบสัมผัสแสดงพฤติกรรมการหล่อลื่น และเมื่อศึกษาผลของอัตราเร็วพบว่าอัตราการสึกหรอไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราเร็วแต่มีความสัมพันธ์แบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบลดออยเทียบกับระยะทาง

## 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
- [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



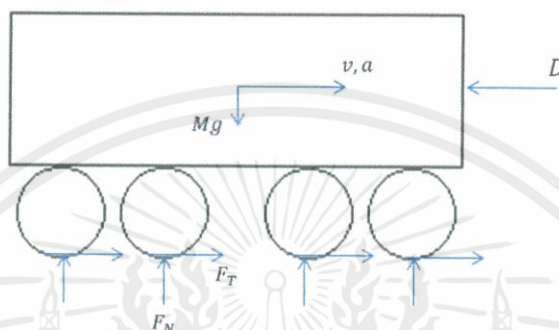


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### รูปแบบอย่างง่ายในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวที่ต้องการ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง/ลดความเร็ว กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะสามารถอธิบายโดยแบบจำลองอย่างง่าย



รูปที่ ก-1 แบบจำลองอย่างง่าย

จากรูปที่ ก-1 สมมติให้รถวิ่งด้วยความเร่งและที่มิโหลลดกระทำกระจายเท่ากันระหว่างเพลลาและล้อ ซึ่งเพลลาและล้อทั้งหมดมีแรงขับเคลื่อน โดยที่รถภายใต้แรงโน้มถ่วง คือ  $Mg$  และแรงต้านทาน คือ  $D$  แรงปกติ คือ  $F_N$  และ  $F_T$  คือ แรงยึดเกาะของแต่ละเพลลา เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\sum F = Mg \quad \text{ก-1}$$

$$F_T = \mu_a F_N \quad \text{ก-2}$$

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

$$F_a = Ma + D \quad \text{ก-4}$$

โดยที่  $\mu_a$  คือสัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะ และ  $F_a$  คือแรงยึดเกาะทั้งหมด จากสมการ ก-3 และ ก-4 จะได้

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

## ภาคผนวก ข

สมการความสัมพันธ์ (Regression model equation)

$$A = k_1 e^{k_2 S}$$

$$\ln A = \ln k_1 + k_2 S \ln e$$

$$\ln A = \ln k_1 + k_2 S \quad \text{ข-1}$$

$$S \ln A = S \ln k_1 + k_2 S^2 \quad \text{ข-2}$$

จากสมการที่ ข-1

$$\sum_{i=1}^N \ln A_i = N \ln k_1 + k_2 \sum_{i=1}^N S_i \quad \text{ข-3}$$

จากสมการที่ ข-2

$$\sum_{i=1}^N S_i \ln A_i = \ln k_1 \sum_{i=1}^N S_i + k_2 \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad \text{ข-4}$$

$$\text{ถ้า } \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}$$

$$\text{จะได้ } \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{ad-bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}$$

$$\text{ดังนั้น } \begin{bmatrix} \ln k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{N \sum_{i=1}^N S_i^2 - \sum_{i=1}^N S_i \sum_{i=1}^N S_i} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N S_i^2 & -\sum_{i=1}^N S_i \\ -\sum_{i=1}^N S_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \ln A_i \\ \sum_{i=1}^N S_i \ln A_i \end{bmatrix}$$

$$N = 42$$

$$\sum_{i=1}^N S_i = 1432.941$$

$$\sum_{i=1}^N S_i^2 = 77,837.45753$$

$$\sum_{i=1}^N \ln A_i = -113.3317$$

$$\sum_{i=1}^N S_i \ln A_i = 4,359.3855$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ln k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{(42)(77,837.46) - (1,432.941)^2} \begin{bmatrix} 77,837.46 & -1,432.941 \\ -1,432.941 & 42 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -113.3317 \\ -4,359.3855 \end{bmatrix} \\ &= 8.225 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} -2,574,709.17 \\ -20,696.5515 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -2.1177 \\ -0.017 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

จะได้ว่า  $k_1 = 0.1$   $k_2 = -0.017$

ได้สมการการสีกหรือดังนี้  $A = 0.12e^{-0.017s}$

No	Distance(S)	$S^2$	Wear rate(A)	$\ln A$	$S \ln A$
1	3.581416	12.8265379	0.147280456	-1.915416646	-6.859903104
2	7.162831	51.3061515	0.126569142	-2.066966543	-14.80533255
3	10.74425	115.438841	0.103300876	-2.270109423	-24.39061606
4	14.32566	205.224606	0.098186971	-2.320881751	-33.24816866
5	17.90708	320.663447	0.0859136	-2.454413139	-43.95136782
6	21.48849	461.755364	0.081311085	-2.509472925	-53.92479326
7	25.06991	628.500356	0.073859395	-2.605592061	-65.32195682
8	28.65133	820.898424	0.065585828	-2.724395643	-78.05754499
9	32.23274	1038.94957	0.058980368	-2.830550636	-91.23640447
10	35.81416	1282.65379	0.053389165	-2.930147456	-104.9407588
11	7.162831	51.3061515	0.134239999	-2.008126044	-14.38386798
12	14.32566	205.224606	0.101255314	-2.29011009	-32.80734424
13	21.48849	461.755364	0.082078171	-2.500083181	-53.72302181
14	28.65133	820.898424	0.076325028	-2.572754374	-73.7128217
15	35.81416	1282.65379	0.066736457	-2.707003894	-96.94906042
16	42.97699	1847.02145	0.05689219	-2.866597206	-123.1977123
17	50.13982	2514.00142	0.049422236	-3.007354835	-150.7882263
18	57.30265	3283.5937	0.044107428	-3.121127075	-178.8488524
19	64.46548	4155.79827	0.03954753	-3.230252039	-208.2397522
20	71.62831	5130.61515	0.03597632	-3.324894335	-238.1565704
21	5.466371	29.8812143	0.112576441	-2.184122813	-11.93922607
22	10.93274	119.524857	0.089458065	-2.413985311	-26.39147963
23	21.86548	478.099429	0.074632149	-2.595183913	-56.74495458
24	32.79823	1075.72371	0.058633563	-2.836447999	-93.03046619
25	43.73097	1912.39771	0.05289585	-2.939430393	-128.5441415
26	54.66371	2988.12143	0.046437782	-3.069641884	-167.7980204
27	65.59645	4302.89486	0.040205872	-3.213742224	-210.8100959
28	76.5292	5856.718	0.034749361	-3.359594096	-257.1070385
29	87.46194	7649.59085	0.030656977	-3.484895008	-304.7956762
30	98.39468	9681.51343	0.027418171	-3.59654931	-353.8813253

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31	109.3274	11952.4857	0.024877383	-3.693796202	-403.8332246
32	6.09528	37.1524383	0.139722597	-1.968096272	-11.99609785
33	9.81	96.2361	0.114818922	-2.164398983	-21.23275402
34	17.004	289.136016	0.077551242	-2.556816374	-43.47610562
35	20.928	437.981184	0.066948533	-2.703831119	-56.58577766
36	26.16	684.3456	0.058809692	-2.833448608	-74.12301558
37	39.24	1539.7776	0.046207615	-3.074610668	-120.6477226
38	4.665	21.762225	0.170783129	-1.767360779	-8.244738033
39	8.708	75.829264	0.135659013	-1.997610799	-17.39519484
40	18.66	348.1956	0.079502491	-2.531966924	-47.24650281
41	37.32	1392.7824	0.04932099	-3.009405528	-112.3110143
42	46.65	2176.2225	0.045934773	-3.080532867	-143.7068582
Total	1432.941	77837.4575	3.15875817	-113.3317174	-4359.385507



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้