ชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน

Braking System Apparatus of Half-Rolling Stock Scaled Model

นายนพณัฐ ตีระพงศ์ไพบูลย์
นายพงศนาถ ยิ่งยงดำรงกุล
นายนพัตธรณ์ จันจันทึก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน

Braking System Apparatus of Half-Rolling Stock Scaled Model

นายนพณัฐ ตีระพงศ์ไพบูลย์
นายพงศนาถ ยิ่งยงดำรงกุล
นายนพัตธรณ์ จันจันทึก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Braking System Apparatus of Half-Rolling Stock Scaled Model

NOPPANUT TEERAPONGPAIBUL
PONGSANAT YINGYONGDAMRONGGUN
NAPATTHORN CHANCHANTUK

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
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน

Braking System Apparatus of Half-Rolling Stock Scaled Model

ผู้จัดทำ

1.นายนพณัฐ ตีระพงศ์ไพบูลย์ รหัสประจำตัว 56010637

2.นายพงศนาถ ยิ่งยงดำรงกุล รหัสประจำตัว 56010781

3.นายพงศนาถ ยิ่งยงดำรงกุล รหัสประจำตัว 56011485

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน

นายนพณัฐ ตีระพงศ์ไพบูลย์ 56010637
นายพงศนาถ ยิ่งยงดำรงกุล 56010781
นายนพัตธรณ์ จันจันทึก 56011485
ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นออกแบบและสร้างชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน ซึ่งจะนำมาศึกษาหาระยะทางในการห้ามล้อและอัตราหน่วงของการห้ามล้อ โดยการออกแบบใช้ความสัมพันธ์คล้ายคลึงทางกล (Mechanical Similarity Law) ซึ่งต้องคำนวณหาอัตราการย่อส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ความยาว เวลา มวล แรงบิดของการห้ามล้อและความหน่วงการห้ามล้อ ผลจากการออกแบบได้แบบจำลองแคร่รถไฟที่มีอัตราส่วนการย่อขนาดเท่ากับ 1:8 อัตราส่วนการย่อมวล 1:512 อัตราส่วนการย่อเวลาเท่ากับ 1:2.83 อัตราส่วนการย่อแรงบิด 1: 4096 และอัตราส่วนการย่อความหน่วงเท่ากับ 1:1 จากนั้นนำแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคันพร้อมกับระบบห้ามล้อไปติดตั้งบนชุดลูกกลิ้งที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ในการทดลองค่าความเร็วของชุดเพลาล้อถูกวัดด้วยเซ็นเซอร์ความเร็วและเก็บข้อมูลด้วยระบบรับค่าสัญญาณ ผลการทดลองได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา และสามารถนำมาคำนวณหาระยะทางและอัตราหน่วงของการห้ามล้อ ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของระยะห้ามล้อถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากทฤษฎี พบว่ามีค่าความแตกต่างกันอยู่ในช่วง 3-10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Braking System Apparatus of Half-Rolling Stock Scaled Model

NOPPANUT TEERAPONGPAIBUL 56010637
PONGSANAT YINGYONGDAMRONGGUN 56010781
NAPATTHORN CHANCHANTUK 56011485
Asst.Prof. Dr.Unnat Pinsopon Advisor
Asst.Prof. Dr.Monsak Pimsarn Co. Advisor
Year 2016

ABSTRACT

This project is concerned with design and fabrication of the braking system apparatus of half-rolling stock scaled model which will be utilized to study braking distance and deceleration. In the design stage, the mechanical similarity law was used to calculate various scale factors, such as, length, time, mass, braking torque and deceleration of the model. The resulted scale factors of the model are 1:8, 1: 2.83, 1:512, 1: 4096 and 1:1, respectively. Later, the half-rolling scaled model with the braking system was installed on the roller rigs, driven by a motor. In the experiment, the wheelset speed is measured by a speed sensor and recorded using the data acquisition system. The experimental result obtained is the graph showing the relationship between the speed and time. This result was later used to calculate the braking distance and deceleration. The analyzed results of the braking distance were compared with the theoretical results and found that the discrepancy was in the range of 3-10%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากการร่วมมือและความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความใส่ใจ ความเมตตา และความรักแก่พวกเราคณะผู้จัดทำเป็นอย่างมาก รวมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำที่เปี่ยมไปด้วยความรู้และประสบการณ์ซึ่งทำให้พวกเราคณะผู้จัดทำซาบซึ้งมากจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ อาจารย์มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และอาจารย์จิตราภรณ์ วงศางาม ที่ให้ความรู้เพิ่มเติมและแนะนำหนังสือที่เกี่ยวข้องอันเป็นประโยชน์หลายเล่มให้แก่พวกเรา คณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความรู้และแรงบันดาลใจสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงเพื่อนๆ จากสาขาวิศวกรรมขนส่งทางรางและวิศวกรรมเครื่องกลสำหรับกำลังใจและคำปรึกษาต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดาและมารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนทั้งหมดมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสูงสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายนพณัฐ ตีระพงศ์ไพบูลย์
นายพงศนาถ ยิ่งยงดำรงกุล
นายนพัตธรณ์ จันจันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VIII
สารบัญรูป (ต่อ) IX
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 1
1.4 สมมติฐานของการศึกษา 1
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย 2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน 2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 หัวข้อที่ศึกษา 3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.3 บทนำเกี่ยวกับรถไฟ 4
2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบห้ามล้อรถไฟ (Basic Knowledge of Train) 4
2.4 การห้ามล้อรถไฟและระบบห้ามล้อรถไฟ 5
2.5 ทฤษฎีความคล้ายคลึงทางกล 13
2.5.1 อัตราส่วนการย่อ (Scaling Factors) 13
2.5.2 การคำนวณหาอัตราหน่วงของรถไฟ (Deceleration Calculation) 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สมการการเคลื่อนที่ของเพลาหมุนในสภาวะการห้ามล้อของรถไฟ
และการคำนวณหาระยะห้ามล้อ 15
2.6.1 สมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) 15
2.6.2 การหาระยะการห้ามล้อ 16
2.6.3 การคำนวณแรงห้ามล้อ (Braking Force) 18
2.6.4 สมการการหาความดัน 19
2.6.5 สมการการหาแรงบิด 20
2.7 การประมวลผลข้อมูลการทดลอง 20
2.7.1 การคำนวณค่าความแตกต่าง 20
2.7.2 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root-Mean-Square Value) 20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและการออกแบบชุดทดลอง 21
3.1 บทนำ 21
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน 21
3.3 อุปกรณ์การทดลอง 21
3.3.1 แคร่รถไฟจำลองแบบครึ่งคัน 21
3.3.2 แท่นหมุนจำลองการเคลื่อนที่ (Small-Scale Roller Rigs) 22
3.3.3 อัตราส่วนการย่อที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ 26
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลลัพธ์ 31
4.1 บทนำ 31
4.2 ผลลัพธ์การสอบเทียบค่าเซ็นเซอร์ 31
4.3 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็ว 32
4.4 วิธีการทดลอง 32
4.4.1 การคำนวณระยะทางจากทฤษฎี 32
4.4.2 การคำนวณระยะทางจากการทดลอง 33
4.5 ผลการทดลอง 33
4.5.1 การทดสอบการเปลี่ยนความดันเพื่อเปรียบเทียบค่าความเร่ง
โดยความเร็วคงที่ที่ 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การเปรียบเทียบรูปร่างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา 44
4.5.3 การทดสอบการห้ามล้อรถไฟจำลองเพื่อหาระยะทางเทียบกับรถไฟของจริง 46
4.5.4 การทดลองการห้ามล้อเพื่อลดความเร็วจาก 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
เป็น 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 62
5.1 บทนำ 62
5.2 สรุปผลการทดลอง 62
5.3 ปัญหาจากการศึกษา 62
5.4 ข้อเสนอแนะ 63
เอกสารอ้างอิง 64
ภาคผนวก 65
ภาคผนวก ก แบบจำลองแคร่รถไฟกับตู้โดยสารแบบครึ่งคัน 66
ภาคผนวก ข แบบแคร่รถไฟ PC-25 79
ภาคผนวก ค โค้ดที่ใช้คำนวณความเร็วของเพลาที่ชุดแคร่ด้วยโปรแกรม ARDUINO 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 แสดงสัดส่วนระหว่างรถไฟจริงต่อรถไฟจำลอง....27

3.2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระหว่างขนาดรถไฟจริงกับแบบจำลอง....27

4.1 เวลาที่ใช้วิ่งจนหยุดนิ่ง ที่ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....33

4.2 เวลาที่ใช้วิ่งจนหยุดนิ่ง ที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....34

4.3 เวลาที่ใช้วิ่งจนหยุดนิ่ง ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....34

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับอัตราหน่วงของชุดขับเคลื่อน....34

4.5 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 1 ที่ความดัน 2.8 บาร์....35

4.6 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 2 ที่ความดัน 3.0 บาร์....36

4.7 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 3 ที่ความดัน 3.2 บาร์....37

4.8 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 4 ที่ความดัน 3.4 บาร์....38

4.9 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 5 ที่ความดัน 3.6 บาร์....38

4.10 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 6 ที่ความดัน 3.8 บาร์....39

4.11 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 7 ที่ความดัน 4.0 บาร์....40

4.12 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 8 ที่ความดัน 4.2 บาร์....40

4.13 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 9 ที่ความดัน 4.4 บาร์....41

4.14 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 10 ที่ความดัน 4.6 บาร์....42

4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหน่วงที่ความดันช่วง 2.8 บาร์ ถึง 3.6 บาร์....43

4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหน่วงที่ความดันช่วง 3.8 บาร์ ถึง 4.6 บาร์....43

4.17 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....47

4.18 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....50

4.19 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....53

4.20 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
เมื่อเพิ่มน้ำหนักกด 10 กิโลกรัม....56

4.21 ตารางเก็บค่าเวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบในการชะลอความเร็ว....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงหลักการทำงานของการห้ามล้อแบบพลวัต....5

2.2 แสดงหลักการทำงานของรีเยนเนอเรทีฟเบรค....5

2.3 แสดงถึงอุปกรณ์และสภาวะในการห้ามล้อของห้ามล้อลมอัดตรง....6

2.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบห้ามล้อลมอัดอัตโนมัติ....6

2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมในท่อลมห้ามล้อกับกระบอกห้ามล้อ....7

2.6 รูปแบบจานห้ามล้อที่ล้อ....7

2.7 รูปแบบจานห้ามล้อที่เพลา....7

2.8 รูปแบบจานห้ามล้อในชุดทดลอง....8

2.9 แสดงถึงอุปกรณ์หลักในระบบห้ามล้อลมอัดอัตโนมัติ....8

2.10 แสดงช่วงเวลาที่ลมเข้าสู่กระบอกห้ามล้อตามจำนวนรถพ่วง....9

2.11 แสดงแรงที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการห้ามล้อ ซ้ายแบบกดผ้าห้ามล้อลงผิวหน้าล้อ
ขวาแบบกดผ้าห้ามล้อลงจานห้ามล้อ....10

2.12 แสดงระบบห้ามล้อของรถไฟที่มีใช้งาน....11

2.13 แสดงระยะห้ามล้อเพื่อชะลอระหว่างระยะห้ามล้อทฤษฎีกับห้ามล้อจริง....12

2.14 แสดงถึงระยะห้ามล้อเพื่อหยุดในทางทฤษฎีและการห้ามล้อจริง....13

2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาในรถไฟของจริง....17

2.16 แสดงทิศทางของแรงห้ามล้อ....19

2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผ้าห้ามล้อกับความเร็ว....19

3.1 ส่วนประกอบของแท่นลูกกลิ้งจำลองการเคลื่อนที่....23

3.2 แท่นจำลองการเคลื่อนที่ขนาดจริง (Full Scale Roller Rigs) 23

3.3 แผนภาพแสดงระบบลมของรถไฟ....24

3.4 แบบจำลองแคร่รถไฟแบบครึ่งคันที่ทำขึ้นจากเหล็ก

ก) ชุดล้อและเพลา

ข) ชุดโครงแคร่

ค) ชุดรับน้ำหนักส่วนล่าง

ง) ชุดรับน้ำหนักส่วนบน....24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า
3.5 ขั้นตอนการประกอบแบบจำลองแคร่รถไฟแบบครึ่งคัน
ก) ประกอบชุดรับแรงส่วนล่างและบน
ข) ประกอบชุดรับแรงทั้งสองชุดเข้ากับโครงแคร่
ค) ประกอบโครงแคร่เข้ากับชุดล้อและเพลา.....25
3.6 แบบจำลองแคร่รถไฟแบบครึ่งคันเมื่อประกอบเข้ากับแท่นลูกกลิ้ง.....26
3.7 แสดงระยะจากจุดหมุนและระยะดึงในชุดห้ามล้อ.....29
3.8 แสดงการเขียนแผนภาพการกระจายแรง.....29
4.1 แสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ.....31
4.2 แสดงกราฟการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ.....31
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็ว.....32
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราหน่วงกับความเร็ว.....35
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหน่วง.....43
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง.....49
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง.....52
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง.....55
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
มีการถ่วงมวลเพิ่ม 10 กิโลกรัม โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง.....58
4.10 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา
เมื่อลดความเร็วจาก 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเหลือ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ระบบห้ามล้อรถไฟเป็นระบบที่ใช้ในการชะลอหรือหยุดรถไฟให้ได้ตามระยะทางที่ต้องการ เพราะเมื่อรถไฟมีความเร็วในการให้บริการเพิ่มมากขึ้นการจัดการการเดินรถจะมีความยากเพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งระยะทางที่ใช้ในการห้ามล้อมีความสำคัญต่อการจัดการการเดินรถ ในการออกแบบการเดินรถการคำนวณระยะในการห้ามล้อจึงเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบอาณัติสัญญาณและความถี่ในการให้บริการรถไฟ

เพื่อศึกษาให้เกิดความเข้าใจในหลักการของระบบการห้ามล้อของรถไฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยอัตราหน่วงของรถไฟเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว ระยะทางและเวลา ซึ่งการหน่วงเกิดขึ้นได้จากการแรงกดจากผ้าห้ามล้อกระทำต่อจานห้ามล้อจะส่งผลให้ความเร็วลดลง

หนึ่งในวิธีที่ใช้ศึกษาการหาอัตราหน่วงของรถไฟคือการสร้างแบบจำลองระบบห้ามล้อโดยใช้หลักของความคล้ายคลึงทางกล (Mechanical Similarity Law) และทำการจำลองขนาดระบบที่ต้องการศึกษาให้มีขนาดเล็กลงอย่างมีความสอดคล้องกัน การสร้างแบบจำลองทำให้ช่วยลดต้นทุนในการศึกษาในสร้างระบบห้ามล้อขนาดเท่ากับขนาดจริง และควบคุมได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงและซ่อมบำรุงได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับระบบขนาดจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างเครื่องจำลองการห้ามล้อรถไฟตัวต้นแบบ

1.2.2 เพื่อใช้ในการศึกษาระบบห้ามล้อรถไฟให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

1.2.3 สามารถหาอัตราหน่วงและระยะทางของการห้ามล้อของชุดเครื่องจำลองการห้ามล้อได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เลือกแบบห้ามล้อเพียงแบบบีบจานห้ามล้อ

1.3.2 เลือกใช้ระบบห้ามล้อแบบท่อลมบังคับการเดี่ยว (Single Pipe) ในการทำเครื่องทดลอง

1.3.3 จำลองแรงด้วยน้ำหนักกดหนึ่งเพลาล้อ

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

1.4.1 ชุดล้อกับชุดลูกกลิ้งไม่เกิดการไถล

1.4.2 ชุดล้อไม่เกิดการส่ายตัว

1.4.3 สมมติให้แคร่เป็นวัตถุแข็งเกร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาชนิดของห้ามล้อในรถไฟ

1.5.2 ศึกษาข้อมูลรูปแบบรถไฟที่ใช้งานจริงในปัจจุบัน

1.5.3 ขอข้อมูลและแบบแปลนจากรถไฟไทยเพื่อใช้ในการศึกษาออกแบบชิ้นงานต้นแบบ

1.5.4 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกฎการย่อขนาดแบบจำลอง

1.5.5 ออกแบบและสร้างแบบจำลองห้ามล้อของรถไฟ

1.5.6 ติดตั้งและทำการทดสอบระบบเซ็นเซอร์และการส่งข้อมูลด้วยโปรแกรมArduino

1.5.7 ทำการวัดความเร็วและคำนวณระยะทางเมื่อทำการห้ามล้อเทียบกับของจริงเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน

1.5.8 ทำการบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อผิดพลาด

1.5.9 สรุปและจัดทำรายงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1.6.1 ช่วยเพิ่มความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบห้ามล้อรถไฟ

1.6.2 ให้ความรู้แก่ผู้ที่มาดูโครงงานทำให้เข้าใจภาพรวมของห้ามล้อรถไฟให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น

1.6.3 สามารถหาอัตราหน่วงและสามารถคำนวณระยะทางในการห้ามล้อได้

1.6.4 สามารถนำมาใช้เป็นชุดทดลองสำหรับการเรียนการสอนในหลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หัวข้อที่ศึกษา

ในการศึกษาเรื่องการจำลองห้ามล้อ จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบลมขั้นพื้นฐานการย่อขนาดของแคร่โดยสารและน้ำหนักครึ่งหนึ่งของรถไฟโดยสารบวกกับน้ำหนักของผู้โดยสาร และระบบห้ามล้อซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Moritz และ Alfred [1] ได้ออกแบบชุดเพลาล้อโดยการย่อขนาดของแคร่รถไฟจริงมาเป็นแคร่รถไฟจำลองขนาด 1:5 ซึ่งได้มาจากกฎความคล้ายคลึงทางกล อาศัยการคำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ของล้อและรางตามทฤษฎีของคาลเคอร์ (Kalker's Theory) ที่เป็นสมการตั้งต้นเพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนย่อขนาดต่างๆ ได้แก่ ความยาว เวลา ค่าความแข็งของระบบรองรับ ความหนาแน่นของแบบจำลอง และแรงที่มากระทำ แบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาทดสอบในสภาวะการเคลื่อนที่โดยการวิ่งบนลูกกลิ้งและศึกษาระบบห้ามล้อของรถไฟ ผลที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับรถไฟขนาดจริง

Paolo และ คณะ [2] ได้ทำการศึกษาการจำลองห้ามล้อฉุกเฉินโดยใช้ร้อยละน้ำหนักกดห้ามล้อเทียบกับระยะหยุดเฉลี่ยในความเร็วที่ต่างกันภายใต้ทางรถไฟในแนวราบ, ความยาวขบวนเฉลี่ยและอุปกรณ์ห้ามล้อเดียวกัน แต่สถานการณ์ห้ามล้อและสภาพแวดล้อมต่างกัน ซึ่งข้อมูลที่ได้ศึกษามาจากสมการขององค์กรรถไฟนานาชาติเล่มที่ 544-1 ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์และปรับใช้เพื่อความปลอดภัยในการห้ามล้อฉุกเฉินหรือการชะลอความเร็วขบวนรถอย่างกะทันหันให้มากยิ่งขึ้น

Rakesh และ คณะ [3] ได้ศึกษารูปแบบการทำงานของระบบห้ามล้อแบบต่างๆที่มีใช้ในระบบราง รวมทั้งศึกษาการคำนวณระยะห้ามล้อ ผลการศึกษาพบว่าระบบห้ามล้อแบบลมอัดมีประสิทธิภาพที่สูงแต่ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นห้ามล้อฉุกเฉินเนื่องจากมีโอกาสที่จะเกิดการลื่นไถลของล้อรถไฟ

Gyu Eom และ คณะ [4] ได้ออกแบบชุดศึกษาการเคลื่อนที่แบบพลวัตของแคร่รถไฟโดยใช้กฎความคล้ายคลึงทางกลในการย่อขนาดแคร่รถไฟจริงเป็นแคร่จำลองขนาด 1:5 เพื่อใช้ศึกษาสาเหตุของการตกรางและเป็นเครื่องมือช่วยสืบสวนการตกรางของรถไฟ ในการวิจัยได้มีการสร้างฐานลูกกลิ้งเพื่อใช้สำหรับขับเคลื่อนล้อรถไฟให้เกิดการการจำลองสถานการณ์ในการเคลื่อนที่ของรถไฟจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alfred และ คณะ [5] ได้ทำการศึกษาการออกแบบและสร้างฐานลูกกลิ้งจำลองการเคลื่อนที่แบบพลวัตสำหรับล้อเลื่อนในระบบรางสำหรับศึกษาการเคลื่อนที่ของแคร่รถไฟความเร็วสูงโดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนที่จริงและการเคลื่อนที่จำลอง ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าฐานลูกกลิ้งสามารถจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่แบบพลวัตได้ใกล้เคียงรถไฟของจริง ในการศึกษาการสร้างฐานลูกกลิ้งนี้เป็นการศึกษาข้อมูลจากฐานลูกกลิ้งอื่นๆที่มีใช้ทดสอบทั่วโลกและทำการลดข้อด้อย เพิ่มประสิทธิภาพของฐานลูกกลิ้งให้สามารถจำลองได้ใกล้เคียงการเคลื่อนที่จริงได้มากขึ้น โดยการออกแบบและสร้างฐานลูกกลิ้งได้ใช้กฎความคล้ายคลึงทางกลในการออกแบบ

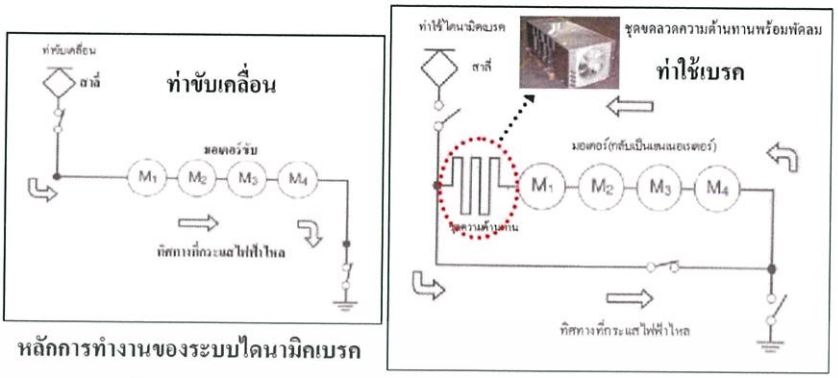
2.3 บทนำเกี่ยวกับรถไฟ

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบห้ามล้อรถไฟ (Basic Knowledge of Train)

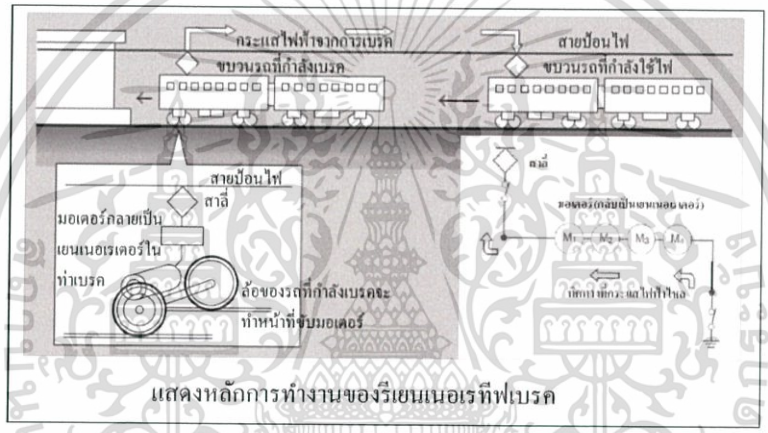
ระบบห้ามล้อรถไฟเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการขับเคลื่อนรถไฟ ห้ามล้อรถไฟมีมากมายหลายชนิดหลายรูปแบบการทำงาน แต่ในปัจจุบันระบบห้ามล้อรถไฟมีใช้กันอยู่ 2 แบบหลักๆ คือระบบห้ามล้อไฟฟ้าใช้เพื่อชะลอขบวนรถ และระบบห้ามล้อลมอัดใช้เพื่อชะลอขบวนรถและทำให้ขบวนรถหยุดสนิท ซึ่งระบบห้ามล้อแบบลมอัดจะมีรูปแบบการจับห้ามล้ออยู่อีก 2 แบบคือการกดผ้าห้ามล้อลงบนผิวหน้าล้อ และการกดผ้าห้ามล้อลงบนจานห้ามล้อ โดยทั่วไปในรถไฟรูปแบบรถไฟฟ้าราง (EMUs) จะใช้ห้ามล้อไฟฟ้าในการชะลอความเร็วของขบวนรถไฟจนถึงช่วงความเร็วต่ำที่ห้ามล้อไฟฟ้าไม่สามารถสร้างแรงห้ามล้อสูงได้ระบบห้ามล้อจะถูกสลับไปใช้ห้ามล้อลมอัดแทนเพื่อให้ขบวนรถสามารถหยุดนิ่งสนิทได้ ในขณะเดียวกันรถไฟรูปแบบหัวรถจักรลาก (Locomotive Hauled) จะไม่สามารถใช้ห้ามล้อไฟฟ้าได้เนื่องจากในตู้พ่วงไม่มีมอเตอร์ จึงจำเป็นต้องใช้ระบบห้ามล้อลมอัดเพียงอย่างเดียว

หลักการของระบบห้ามล้อแบบห้ามล้อไฟฟ้าคือการใช้มอเตอร์เป็นตัวหน่วงความเร็ว เมื่อมอเตอร์มีการหน่วงจะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าส่วนเกินจะมีวิธีกำจัดออกจากวงจรสองรูปแบบ คือ การนำไฟฟ้าส่วนเกินไปเผาผ่านตัวต้านทาน (Dynamic Brake) และการนำกระแสไฟฟ้าส่วนเกินส่งกลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้า (Regenerative Brake) ในปัจจุบันการกำจัดไฟฟ้าส่วนเกินนิยมใช้วิธีการนำกระแสไฟฟ้าส่วนเกินส่งกลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้า เพราะสามารถลดการใช้ไฟฟ้าและไม่สิ้นเปลืองขบวนรถไฟขบวนที่วิ่งตามหลังสามารถใช้ไฟฟ้าที่ส่งกลับเข้าสู่ระบบจ่ายไฟได้ แต่ระบบห้ามล้อแบบไฟฟ้าในปัจจุบันยังไม่มีศักยภาพเพียงพอที่จะทำให้รถไฟหยุดสนิทได้ จึงจำเป็นต้องใช้ระบบห้ามล้อลมช่วยหยุดรถในช่วงท้ายของการห้ามล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของการห้ามล้อแบบพลวัต [13]



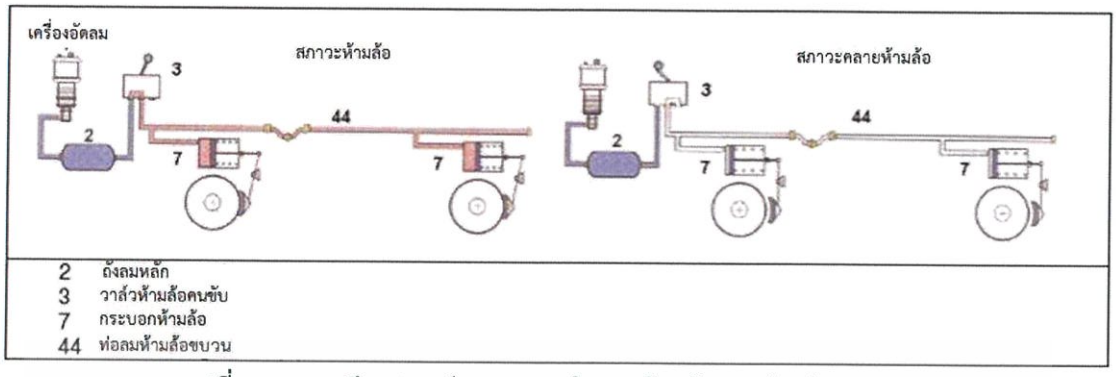
รูปที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานของรีเยนเนอเรทีฟเบรค [13]

2.4 การห้ามล้อรถไฟและระบบห้ามล้อรถไฟ

หลักการของระบบห้ามล้อแบบห้ามล้อลมอัดคือการใช้แรงดันลมในการดันลูกสูบในกระบอกห้ามล้อและส่งแรงไปยังระยางห้ามล้อเพื่อกดผ้าห้ามล้อลงบนผิวล้อหรือจานห้ามล้อ ซึ่งการจ่ายแรงดันลมของห้ามล้อลมอัดมีด้วยกันสองรูปแบบหลักคือแบบลมอัดตรง (Straight Air Brake) และแบบลมอัดอัตโนมัติ (Automatic Air Brake) โดยทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

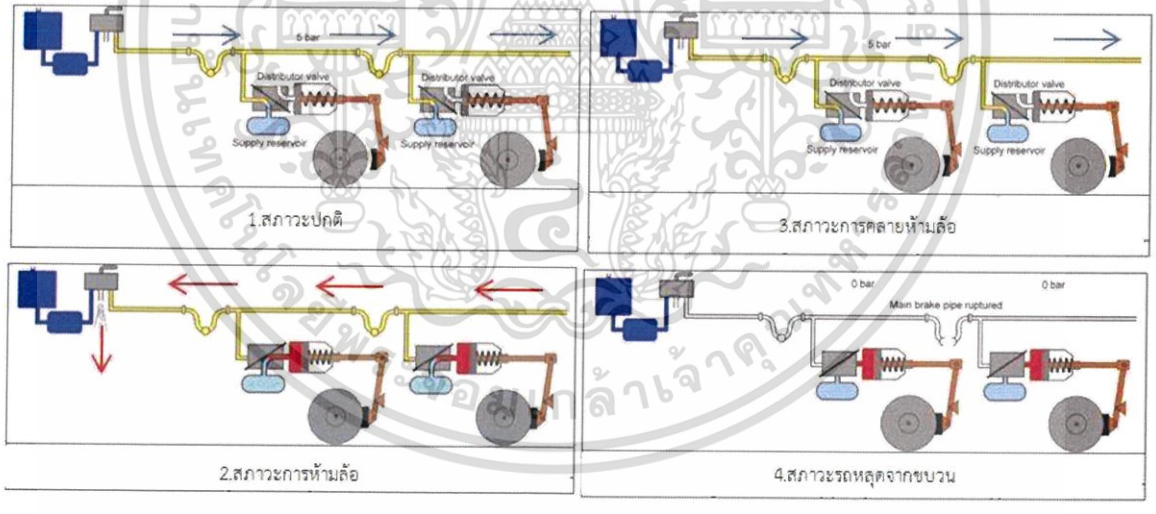
ในรูปแบบลมอัดตรงจะเป็นการนำลมจากถังลมหลักส่งตรงไปยังกระบอกห้ามล้อตรงๆ โดยใช้วาล์วลมห้ามล้อคนขับในการควบคุมแรงดันลมสู่ท่อลมห้ามล้อ ในสภาวะปกติ วาล์วห้ามล้อคนขับจะปิดลมจากถังลมหลัก ทำให้ในท่อลมห้ามล้อไม่มีลม แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะการห้ามล้อ วาล์วห้ามล้อคนขับจะเปิดทางลมให้ลมดันลูกสูบห้ามล้อเพื่อส่งแรงไปยังระยาง เมื่อถึงสภาวะคลายห้ามล้อวาล์วห้ามล้อคนขับจะปิดทางลมจากถังลมหลัก และลมในท่อลมจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ สปริงในกระบอกห้ามล้อจะดันลูกสูบห้ามล้อกลับสู่ตำแหน่งคลายตัว ห้ามล้อลมอัดตรงนั้นเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน แต่เมื่อเกิดเหตุการณ์รถหลุดจากขบวน ตู้ที่หลุดจะไม่สามารถเกิดการห้ามล้อได้เองและเป็นอันตราย จึงไม่นิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



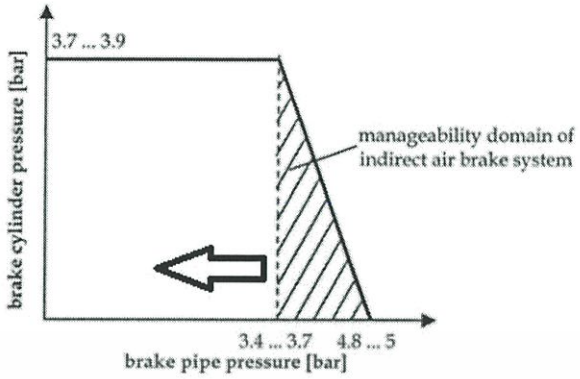
รูปที่ 2.3 แสดงถึงอุปกรณ์และสภาวะในการห้ามล้อของห้ามล้อลมอัดตรง [11]

ในการห้ามล้อนั้นผู้ขับจะทำการสับวาล์วห้ามล้อคนขับ(หมายเลข 3)โดยที่วาล์วห้ามล้อจะมีการปรับเป็นขั้นลำดับ ยิ่งผู้ขับปรับวาล์วห้ามล้อคนขับเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันในท่อลมห้ามล้อขบวน(หมายเลข 44)มีแรงดันตกลง จะทำให้หม้อลมห้ามล้อปรับแรงดันจากถังลมหลักเข้าสู่กระบอกห้ามล้อ(หมายเลข 7)มากขึ้นเรื่อยๆตามแรงดันลมในท่อลมหลักที่ตกลงไป และจะแบ่งเป็นช่วงการทำงาน 2 ช่วงดังนี้ 1. ช่วงการห้ามล้อปกติแรงดันลมอยู่ในช่วง 4.8 ถึง 3.7 บาร์ 2. ช่วงการห้ามล้อฉุกเฉินแรงดันลมจะอยู่ในช่วง 3.7 ถึง 0 บาร์ ซึ่งจะแสดงขั้นตอนการทำงานการทำงานดังภาพด้านล่าง



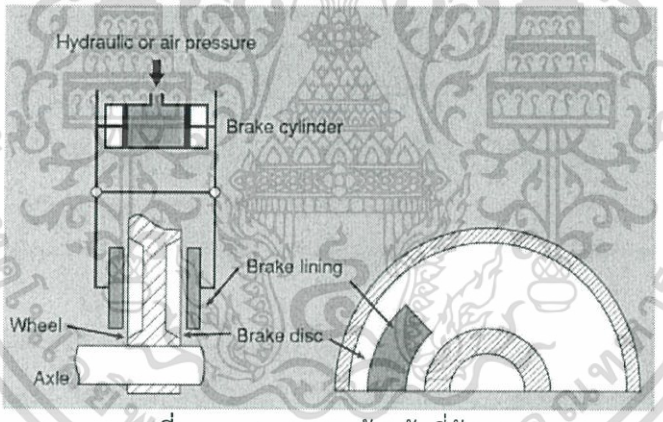
รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบห้ามล้อลมอัดอัตโนมัติ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

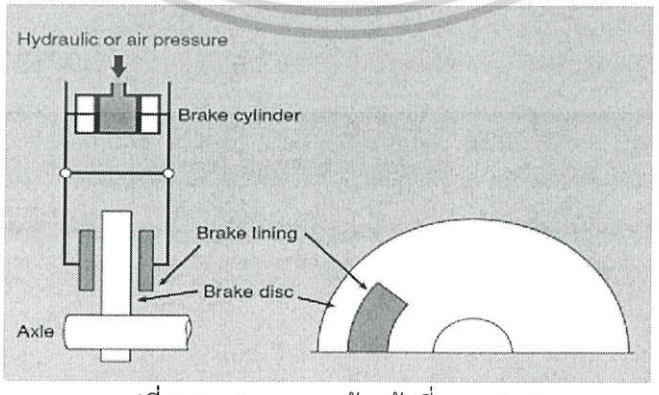


รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมในท่อลมห้ามล้อกับกระบอกห้ามล้อ [12]

ในแบบจำลองจะใช้รูปแบบผ้าห้ามล้อ ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการห้ามล้อในรูปแบบแท่งห้ามล้อเล็กน้อยตรงอุปกรณ์ในการจับห้ามล้อ ซึ่งจะประกอบด้วยจานห้ามล้อและผ้าห้ามล้อโดยมีวิธีจับสองแบบคือ แบบจานห้ามล้อที่ล้อ และแบบจานห้ามล้อที่เพลา

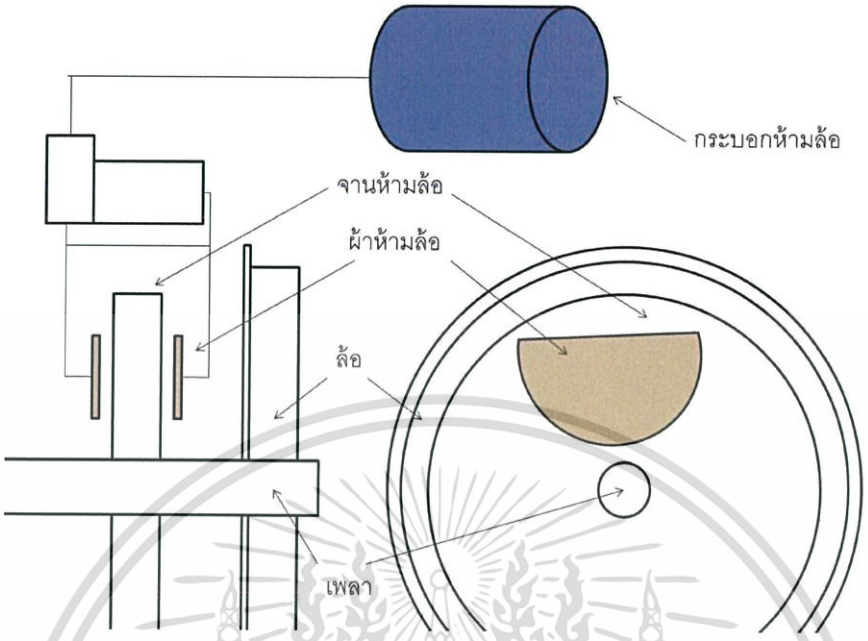


รูปที่ 2.6 รูปแบบจานห้ามล้อที่ล้อ [12]



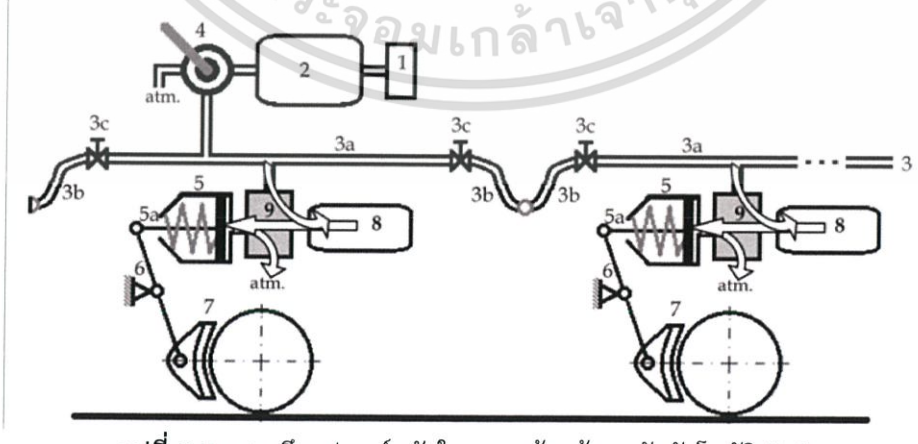
รูปที่ 2.7 รูปแบบจานห้ามล้อที่เพลา [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปแบบจานห้ามล้อในชุดทดลอง

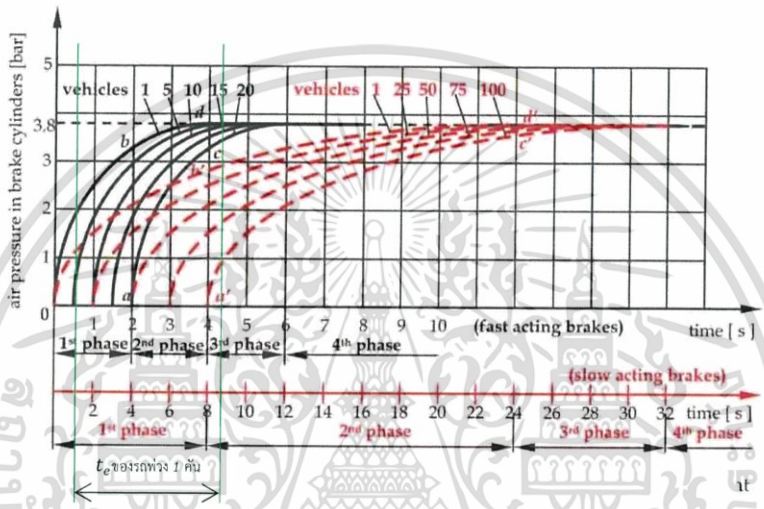
ส่วนประกอบอุปกรณ์ในระบบห้ามล้อลมอัดอัตโนมัติจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ 9 ส่วนได้แก่ 1.เครื่องอัดลม 2.ถังลมหลัก 3a.ท่อลมห้ามล้อขบวน 3b.สายลมเชื่อมต่อระหว่างคัน 3c.ก๊อกปิดทางลม 4.วาล์วห้ามล้อคนขับ 5.กระบอกห้ามล้อ 5a.ก้านลูกสูบ 6.ระยางห้ามล้อ 7.ผ้าห้าล้อ/แท่งห้ามล้อ 8.ถังลมสำรอง 9.หม้อลมห้ามล้อ โดยในโครงงานนี้จะทำการจำลองอุปกรณ์และชิ้นส่วนสำคัญของรถไฟเพียงช่วงการทำงานของ หม้อลมห้ามล้อและชุดระยางห้ามล้อให้มีขนาดเล็กลงด้วยหลักการความคล้ายคลึงทางกลเพื่อจำลองและศึกษารูปแบบการห้ามล้อบนชุดลูกกลิ้ง (Roller Rigs)



รูปที่ 2.9 แสดงถึงอุปกรณ์หลักในระบบห้ามล้อลมอัดอัตโนมัติ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้ามล้อรถไฟในรูปแบบลมอัดจะมีประสิทธิภาพที่สูงในความเร็วต่ำ ที่ความเร็วสูงห้ามล้อลมอัดไม่สามารถใช้แรงกดห้ามล้อสูงๆได้ โดยแรงห้ามล้อรถไฟจะไม่สามารถมีแรงมากกว่าแรงยึดเกาะระหว่างล้อกับรางได้ ถ้าแรงห้ามล้อมาค่ามากกว่าแรงยึดเกาะระหว่างล้อกับรางรถไฟ ล้อรถไฟจะเกิดการไถล (Slip) สร้างความเสียหายให้กับล้อและรางได้ อีกทั้งระบบห้ามล้อลมอัดจะใช้ระยะทางในการห้ามล้อมากกว่าระบบห้ามล้อไฟฟ้าเนื่องจากต้องมีเวลาในการระบายลมออกจากท่อลมและเวลาในการที่ลมจากถังลมสำรองเข้าสู่ระบบห้ามล้อ ยิ่งขบวนรถมีความยาวมากยิ่งใช้เวลามากตามไปด้วย ทำให้เมื่อสั่งการห้ามล้อรถไฟไม่สามารถห้ามล้อได้ทันทีดั่งเช่นรถยนต์

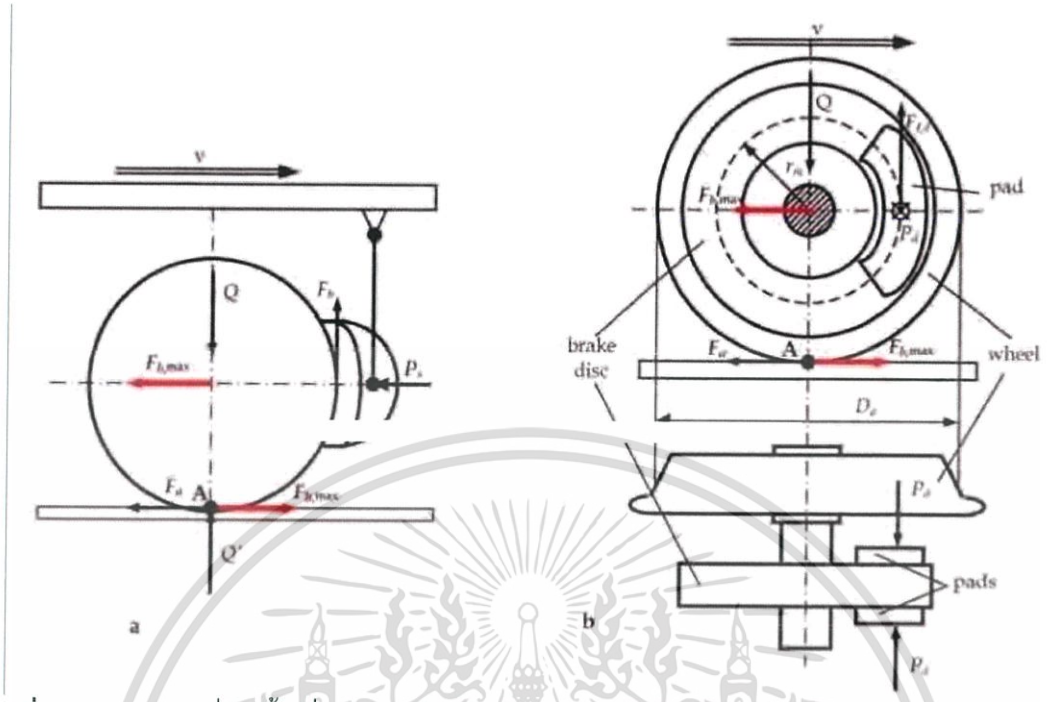


รูปที่ 2.10 แสดงช่วงเวลาที่ลมเข้าสู่กระบอกห้ามล้อตามจำนวนรถพ่วง [12]

ในเริ่มแรก ระบบห้ามล้อรถไฟจะใช้แรงจากคนในการดึงก้านห้ามล้อแต่มีปัญหาในการควบคุมแรงห้ามล้อเนื่องจากแรงและเวลาลงห้ามล้อในแต่ละคนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการกระชากและไม่มีประสิทธิภาพ ต่อมาจึงมีการคิดค้นระบบห้ามล้อที่สามารถทำงานได้พร้อมกันและสร้างแรงห้ามล้อได้สูง เกิดเป็นระบบห้ามล้อลมดูด (Vacuum Brake) โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำของรถจักรไอน้ำหรือเครื่องปั๊มลมเป็นตัวสร้างสุญญากาศดูดลูกสูบห้ามล้อขึ้นมา แต่ห้ามล้อสุญญากาศก็มีปัญหาในการสร้างแรงห้ามล้อที่มีกำลังมากกว่า 1 บรรยากาศ ถ้าต้องการสร้างแรงห้ามล้อมากๆต้องมีหม้อลมดูดและกระบอกสูบที่ใหญ่มาก จึงได้มีการพัฒนาระบบห้ามล้อลมอัดขึ้นและใช้งานเป็นระบบห้ามล้อหลักจนถึงปัจจุบัน

อย่างไรก็ดี ระบบห้ามล้อลมอัดในช่วงแรกก็มีปัญหาในเรื่องการกดห้ามล้อ การกดห้ามล้อรถไฟในช่วงแรกใช้วิธีการกดลงบนผิวหน้าล้อรถไฟ ถ้าใส่แรงห้ามล้อที่มากเกินไปผิวหน้าล้อรถไฟอาจเกิดแผลขึ้นได้ สร้างแรงสั้นสะเทือนและเสียงในขณะวิ่งสูง มีความเสี่ยงในการตกรางมากกว่า จึงได้เริ่มมีการใช้จานห้ามล้อในรถไฟ ในปัจจุบันระบบห้ามล้อลมที่ใช้การกดห้ามล้อผ่านจานห้ามล้อเป็นที่นิยมในรถไฟโดยสาร แต่ในรถไฟสินค้ายังคงใช้การกดผ้าห้ามล้อลงบนผิวหน้าล้อดังเดิมเนื่องจากมีต้นทุนที่ถูกกว่าและความยุ่งยากในการเปลี่ยนอุปกรณ์น้อยกว่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



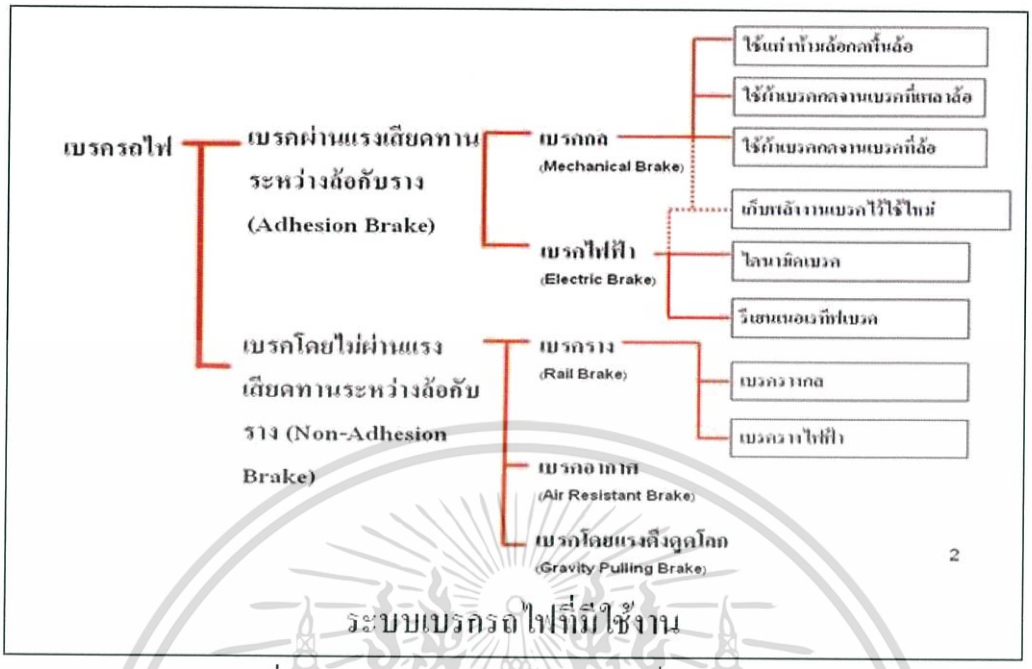
รูปที่ 2.11 แสดงแรงที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการห้ามล้อ ซ้ายแบบกดผ้าห้ามล้อลงผิวหน้าล้อ ขวาแบบกดผ้าห้ามล้อลงจานห้ามล้อ [12]

ระบบห้ามล้อรถไฟนั้นมีทั้งหมดด้วยกัน 10 ชนิด โดยหลักๆแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่การห้ามล้อโดยผ่านแรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง และห้ามล้อโดยไม่ผ่านแรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง ซึ่งทั้งสองแบบนั้นแบ่งแยกย่อยอีกหลายชนิด อย่างการห้ามล้อโดยผ่านแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางจะแบ่งออกไปได้อีกสองแบบคือห้ามล้อกลและห้ามล้อไฟฟ้า

ห้ามล้อกลยังแบ่งแยกย่อยได้สามแบบคือใช้แท่งห้ามล้อกดพื้นล้อ ใช้ผ้าห้ามล้อกดจานห้ามล้อที่เพลา และใช้ผ้าห้ามล้อกดจานห้ามล้อที่ข้างล้อ ส่วนห้ามล้อไฟฟ้าแบ่งแยกย่อยอีก 2 แบบคือไดนามิกและรีเยนเนอร์เรทีฟ แต่จะมีห้ามล้อที่ทั้งห้ามล้อกลและห้ามล้อไฟฟ้าควบรวมกันอยู่อีก 1 แบบคือระบบห้ามล้อแบบเก็บพลังงานห้ามล้อไว้ในล้อช่วยแรง

การห้ามล้อโดยไม่ผ่านแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางนั้นแยกออกไปอีก 3 แบบ ได้แก่ ห้ามล้อราง ห้ามล้ออากาศ และห้ามล้อโดยใช้แรงดึงดูดของโลก แต่จะมีเพียงห้ามล้อรางเท่านั้นที่มีการแยกย่อยออกไปอีกคือห้ามล้อรางกลและห้ามล้อรางไฟฟ้า ระบบห้ามล้อที่ใช้กันแพร่หลายทั่วโลกและเป็นห้ามล้อหลักที่ใช้ในการหยุดรถไฟคือระบบห้ามล้อแบบห้ามล้อกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงระบบห้ามล้อของรถไฟที่มีใช้งาน [13]

ในระบบห้ามล้อกลจะมีการใช้ระบบลม 2 รูปแบบคือ ระบบลมดูดหรืออีกชื่อคือระบบห้ามล้อแบบใช้สุญญากาศ และระบบลมอัด ซึ่งระบบลมดูดนั้นเกิดมาก่อนโดยใช้วิธีการนำไอน้ำพ่นผ่านหัวพ่นไอน้ำด้วยความเร็วสูง เกิดเป็นสุญญากาศขึ้น แล้วต่อท่อนำสุญญากาศมาใช้งาน

ต่อมาจึงเปลี่ยนจากการใช้ไอน้ำมาเป็นเครื่องสร้างสุญญากาศแบบลูกสูบ แต่การสร้างสุญญากาศจะทำได้สูงที่สุดเพียง 76 เซนติเมตร.ปรอท ในขณะที่การใช้งานจริงจะตั้งไว้ที่ 52-54 เซนติเมตร.ปรอท ห้ามล้อแบบสุญญากาศจึงสามารถสร้างแรงห้ามล้อได้จำกัด หากต้องการเพิ่มแรงห้ามล้อให้สูงขึ้นก็จะต้องใช้ลูกสูบขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเริ่มมีการคิดค้นระบบห้ามล้ออีกแบบหนึ่งที่ใช้งานในปัจจุบันคือ ระบบลมอัด โดยระบบลมอัดจะคล้ายคลึงกับการห้ามล้อโดยใช้การปล่อยไอน้ำแรงดันสูงเข้าไปดันลูกสูบในกระบอกห้ามล้อ เพียงแต่ใช้ลมอัดแรงดันสูงแทน ระบบนี้ดีกว่าระบบห้ามล้อแบบใช้สุญญากาศตรงที่สามารถสร้างแรงดันลมที่ใช้สำหรับดันลูกสูบในกระบอกห้ามล้อได้สูงกว่า (ค่าตามมาตรฐานขององค์กรรถไฟนานาชาติ คือ 3.5 ถึง 3.8 บาร์) สามารถใช้กระบอกห้ามล้อขนาดเล็กและใช้ระยางห้ามล้อที่มีอัตราการได้เปรียบเชิงกลต่ำกว่าเมื่อต้องการสร้างแรงห้ามล้อเท่ากัน ระบบห้ามล้อแบบลมอัดจึงสามารถตอบสนองคำสั่งได้ดีกว่า การบำรุงรักษาง่ายกว่าและมีปัญหาในการใช้งานน้อยกว่า

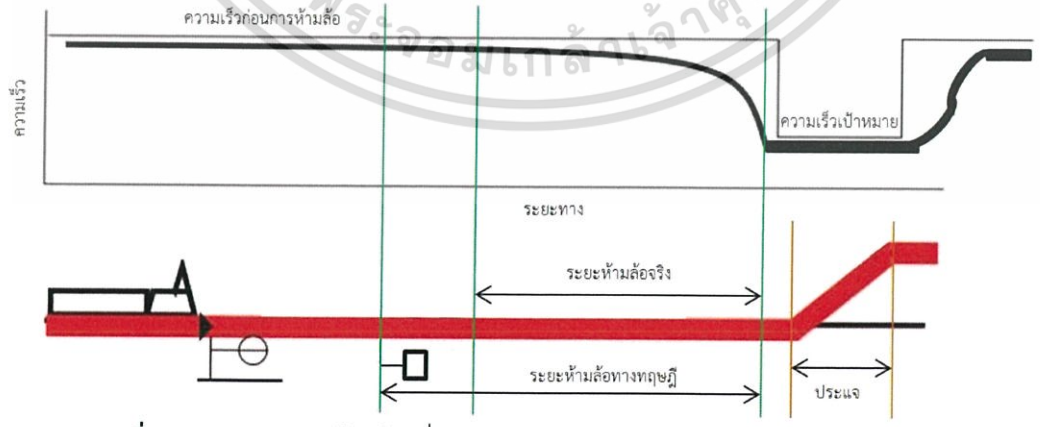
ระบบห้ามล้อแบบลมอัดที่การรถไฟแห่งประเทศไทยนำมาใช้เป็นแบบท่อลมบังคับการเดี่ยว (Single Pipe) คือใช้ท่อบังคับการห้ามล้อ (Brake Pipe) ท่อเดียวและมีคุณสมบัติตามที่กำหนดเป็นมาตรฐานขององค์กรรถไฟนานาชาติซึ่งเรียกว่าระบบ กราดูเอทรีลีสแอนด์แอปพลิเคชัน (Graduate release and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

application) หมายความว่า สามารถกำหนดได้ว่าจะให้การห้ามล้อรุนแรงขนาดไหนและจะคลายห้ามล้อแค่ไหน เครื่องจำลองระบบห้ามล้อรถไฟเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบห้ามล้อว่าห้ามล้อรถไฟทำงานอย่างไร เริ่มต้นจากตรงไหน มีส่วนสำคัญอะไรบ้าง และเมื่อระบบทำงานแล้วระยะทางที่รถไฟใช้ในการหยุดหรือชะลอความเร็วมีระยะทางเท่าไหร่ ในปัจจุบันระบบห้ามล้อแบบลมอัดมีการใช้วิธีกดผ้าห้ามล้อด้วยกัน 2 แบบคือการกดผ้าห้ามล้อลงไปที่หน้าผิวล้อและการกดผ้าห้ามล้อในระบบจานห้ามล้อ เครื่องจำลองระบบห้ามล้อรถไฟสามารถกำหนดความเร็วต้นก่อนที่ขบวนรถจะทำการชะลอความเร็วหรือห้ามล้อโดยที่จะมีการจำลองอุปกรณ์ห้ามล้อต่างๆและจำลองโบกี้รถไฟพร้อมระยางห้ามล้อเพื่อให้เห็นภาพได้มากขึ้น

ในการห้ามล้อรถไฟจะมีรูปแบบการห้ามล้อทั้งหมด 3 รูปแบบด้วยกันได้แก่ 1. การห้ามล้อรถไฟเพื่อชะลอความเร็ว 2.การห้ามล้อรถไฟเพื่อหยุดขบวน 3.การห้ามล้อรถไฟฉุกเฉิน โดยในการห้ามล้อ 2 รูปแบบแรกจะต้องคำนวณระยะห้ามล้อทางทฤษฎีเพื่อออกแบบการวางตำแหน่งของระบบอาณัติสัญญาณเพื่อความปลอดภัยในการเดินรถ ส่วนการห้ามล้อแบบฉุกเฉินนั้นจะทำการห้ามล้อขบวนรถให้สามารถหยุดได้ในระยะทางที่สั้นที่สุดโดยล้อรถไฟต้องไม่เกิดการลื่นไถล

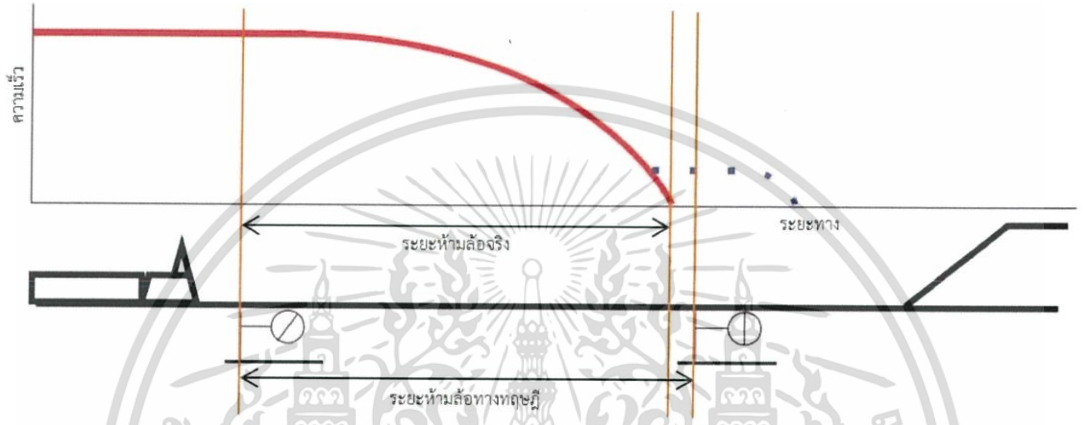
การห้ามล้อเพื่อชะลอจะใช้งานเมื่อทางข้างหน้ามีการจำกัดความเร็ว เช่นขบวนรถเข้าทางโค้ง ขบวนรถวิ่งเข้าประแจ หรือมีการซ่อมบำรุงทางแต่สามารถผ่านได้ด้วยความเร็วต่ำ การเตือนคนขับให้ทราบถึงความเร็วเป้าหมายล่วงหน้านั้นจำเป็นต้องมีการวางเสาระบุความเร็ว โดยเสาระบุความเร็วจะต้องวางไว้ก่อนหน้าจุดกำหนดความเร็วตามระยะห้ามล้อของขบวนรถไฟ เพื่อความปลอดภัยจึงต้องมีการคำนวณระยะห้ามล้อของขบวนรถและทำการวางเสาเตือนไว้ตามระยะห้ามล้อ ตัวอย่างรูปแบบการห้ามล้อรถไฟเพื่อชะลอความเร็วเพื่อเข้าประแจ



รูปที่ 2.13 แสดงระยะห้ามล้อเพื่อชะลอระหว่างระยะห้ามล้อทฤษฎีกับห้ามล้อจริง
(ที่มา : UIC ETCS Implementation Handbook)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การห้ามล้อเพื่อหยุดจะใช้งานเมื่อทางข้างหน้ามีการใช้งานยังไม่ได้รับอนุญาตให้เข้าไปได้หรือขบวนรถเตรียมตัวเข้าสู่สถานีเพื่อหยุดรับส่งผู้โดยสาร การเตือนคนขับให้ทราบถึงจุดหยุดล่วงหน้านั้นจำเป็นต้องมีการวางเสาไฟสัญญาณ โดยเสาไฟสัญญาณจะต้องวางไว้ตามระยะห้ามล้อในความเร็วสูงสุดที่ทำได้ในเส้นทาง เพื่อความปลอดภัยจึงต้องมีการคำนวณระยะห้ามล้อของขบวนรถและทำการวางเสาไฟสัญญาณไว้ตามระยะห้ามล้อ ตัวอย่างรูปแบบการห้ามล้อรถไฟเพื่อหยุด



รูปที่ 2.14 แสดงถึงระยะห้ามล้อเพื่อหยุดในทางทฤษฎีและการห้ามล้อจริง
(ที่มา : UIC ETCS Implementation Handbook)

การห้ามล้อฉุกเฉินจะใช้งานเมื่อมีเหตุต้องหยุดรถในทันทีหรือการฝ่าฝืนไฟสัญญาณของคนขับ การห้ามล้อฉุกเฉินจะมีลักษณะการห้ามล้อเหมือนการห้ามล้อเพื่อหยุด เพียงแต่การห้ามล้อฉุกเฉินจะใช้อัตราการหน่วงที่มากกว่าและระยะทางการหยุดที่สั้นกว่า การห้ามล้อฉุกเฉินต้องคำนึงถึงแรงห้ามล้อต้องไม่มากเกินกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างล้อกับรางเพื่อป้องกันการลื่นไถลของล้อที่จะสร้างความเสียหายกับอุปกรณ์และระยะหยุดที่เพิ่มขึ้น

2.5 ทฤษฎีความคล้ายคลึงทางกล

2.5.1 อัตราส่วนการย่อ (Scaling Factors) [1]

อัตราส่วนการย่อ คือค่าอัตราส่วนเปรียบเทียบค่าตัวแปรค่าต่างๆที่วัดได้จากขนาดจริงเทียบกับตัวแปรเดียวกันที่วัดได้จากแบบจำลอง โดยหลักการย่อขนาดเป็นไปตามหลักการของความคล้ายคลึงทางกลของ Reynold จากงานวิจัยของ G.Moritz และ J.Alfred ได้นิยามอัตราส่วนการย่อความยาว (Length Scaling Factor, φ_l)ดังสมการที่(2.1)

$$\varphi_l = \frac{l_1}{l_0} \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ l_1 คือขนาดความยาวจริงและ l_0 คือขนาดความยาวของแบบจำลอง ในลักษณะเดียวกันสามารถนิยามอัตราส่วนการย่อของเวลา(Time Scaling Factor, φ_t) อัตราส่วนการย่อมวล (Mass Scaling Factor,φ_m) อัตราส่วนความหนาแน่น (Density Scaling Factor, φ_ρ) อัตราส่วนความเร่ง (Acceleration Scaling Factor,φ_a),อัตราส่วนแรง (Force scaling Factor,φ_F) ดังสมการที่ (2.2) (2.3) (2.4) (2.5) (2.6)ตามลำดับ

$$\varphi_t = \frac{t_1}{t_0} \tag{2.2}$$

$$\varphi_m = \frac{m_1}{m_0} \tag{2.3}$$

$$\varphi_\rho = \frac{\rho_1}{\rho_0} \tag{2.4}$$

$$\varphi_a = \frac{\varphi_l}{\varphi_t^2} \tag{2.5}$$

$$\varphi_F = \frac{m_1 a_1}{m_0 a_0} \tag{2.6}$$

$$\varphi_I = \varphi_m \times \varphi_l^2 \tag{2.7}$$

โดยที่ t_1คือ เวลาของจริง (วินาที)

t_0 คือ เวลาของแบบจำลอง (วินาที)

m_1คือ มวลของรถไฟจริง (กิโลกรัม)

m_0คือ มวลของรถไฟจำลอง (กิโลกรัม)

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของวัสดุรถไฟจริง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_0 คือ ความหนาแน่นของรถไฟจำลอง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

a_1 คือ ความเร่งของรถไฟจริง (เมตรต่อวินาที^{2})

a_0 คือ ความเร่งของรถไฟจำลอง (เมตรต่อวินาที^{2})

2.5.2 การคำนวณหาอัตราหน่วงของรถไฟ (Deceleration Calculation) [2]

เมื่อเราทราบ ความเร็ว ระยะทางที่ใช้ในการห้ามล้อ และเวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบสามารถคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการเคลื่อนที่

$$v^2 = v_0^2 + 2ds_{ef} \tag{2.8}$$

และระยะเบรกหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$s_b = s_p + s_{ef} \ [m] \tag{2.9}$$

โดยที่ s_b คือ ระยะเบรกทั้งหมด (เมตร)

s_p คือ ระยะเตรียมการเบรก(ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ) (เมตร)

s_{ef} คือ ระยะที่เบรกทำงานเต็มประสิทธิภาพ (เมตร)

จากสมการการเคลื่อนที่เราสามารถหาอัตราหน่วงได้ดังนี้

เมื่อ $v = 0$ เมตรต่อวินาที จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$d = \frac{[\frac{v_o}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_o}{3.6}]]} \tag{2.10}$$

โดยที่ v_0 คือ ความเร็วเริ่มต้นก่อนทำการเบรก (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

t_e คือ เวลาที่ลมเต็มกระบอกสูบ(ค่าที่แนะนำ 4.35 วินาที) (วินาที)

s_b คือ ระยะเบรกทั้งหมด (เมตร)

หมายเหตุ 1.ค่า 3.6 คือการเปลี่ยนหน่วยความเร็วจากกิโลเมตรต่อชั่วโมงเป็นเมตรต่อวินาที

2.6 สมการการเคลื่อนที่ของเพลาหมุนในสภาวะการห้ามล้อของรถไฟและการคำนวณหาระยะห้ามล้อ

2.6.1 สมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) [1]

สมการการเคลื่อนที่ทางกลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร่งความเร่งเชิงมุมสามารถหาได้จากสมการการเคลื่อนที่ขั้นพื้นฐานทั่วไปดังนี้

$$I \times \ddot{\theta} = \tau \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของรถไฟ (กิโลกรัม-เมตร^2)

$\ddot{\theta}$ คืออัตราเร่งเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที^{2})

τ คือแรงบิดที่ใช้ (นิวตันเมตร)

จากสมการ (2.11) จะหาอัตราหน่วงเชิงมุมได้ดังนี้

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau}{I} \tag{2.12}$$

จากสมการ (2.12) จะหาอัตราหน่วงเชิงเส้นได้ดังนี้

$$d = \ddot{\theta} \times r \tag{2.13}$$

ย้ายข้างสมการจะได้

$$\ddot{\theta} = \frac{d}{r} \tag{2.14}$$

นำสมการที่ (2.14) แทนลงในสมการที่ (2.12) จะได้สมการการหาอัตราหน่วงดังนี้

$$\frac{d}{r} = \frac{\tau}{I}$$

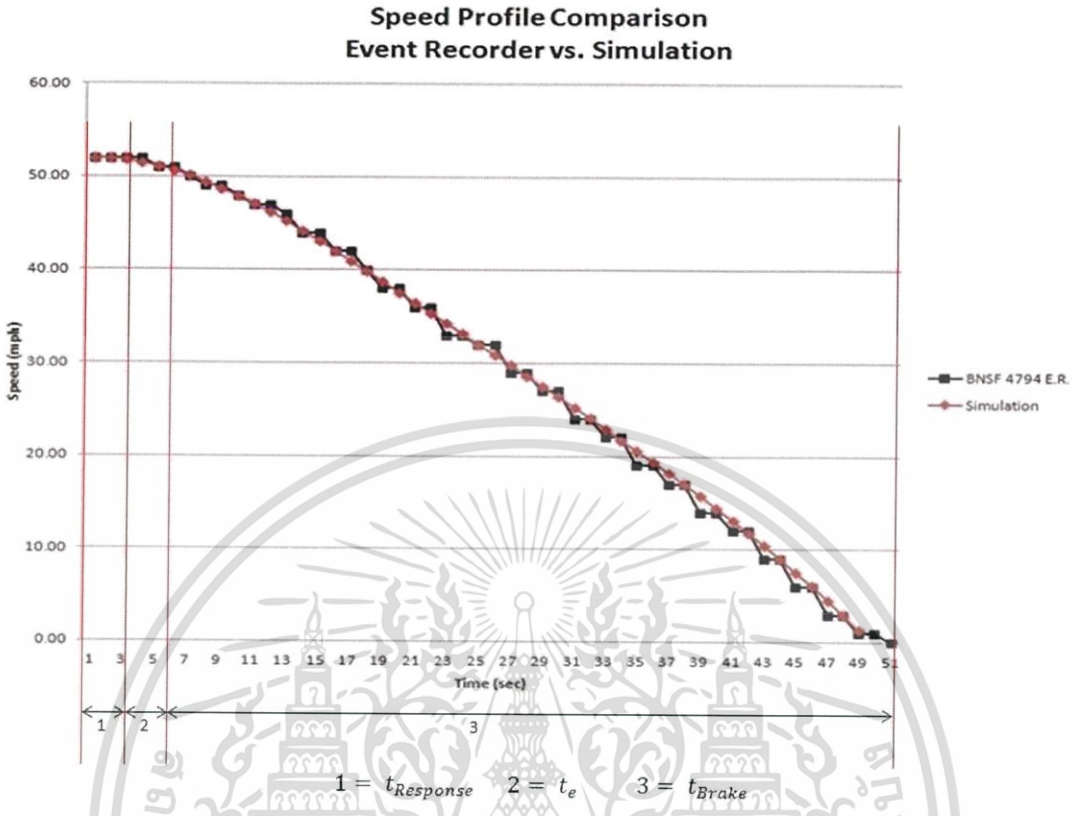
ย้ายข้างสมการ

$$d = \frac{\tau \times r}{I} \tag{2.15}$$

2.6.2 การหาระยะการห้ามล้อ

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างการทดลองและทฤษฎีดังนั้นการหาระยะทางจะแบบออกไป 3 ช่วงได้แก่ ช่วงที่ 1 คือ ความคลาดเคลื่อนในการตอบสนองของมนุษย์ ช่วงที่ 2 คือ เป็นช่วงที่ลมเข้าสู่กระบอกห้ามล้อ และช่วงที่ 3 คือ ช่วงที่อัตราหน่วงคงที่แล้วช่วงนี้เป็นช่วงที่ส่งผลต่อระยะทางมากที่สุด สามารถหาระยะทางการห้ามล้อได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$1 = t_{Response}$ $2 = t_e$ $3 = t_{Brake}$

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาในรถไฟของจริง

ช่วงที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนในการตอบสนองต่อมนุษย์

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ลมเข้าสู่กระบอกสูบห้ามล้อ

การหาระยะการห้ามล้อ ช่วงที่ 1 กับ ช่วงที่ 2

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$adt = dv$$

$$\int_{t_0}^{t_2} adt = \int_{v_0}^{v_2} dv$$

$$at = v_2 - v_1$$

$$v_1 + at_e = v_2$$

$$\int_{t_0}^{t_2} (v_1 + at_e)dt = \int_{s_0}^{s_2} ds$$

$$v_1 t_1 + \frac{1}{2} a t_e^2 = s$$

หมายเหตุ

ในที่นี้ a คืออัตราหน่วง เพราะว่าป้องกันการสับสนระหว่าง d ของอัตราหน่วงและd ของการอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากสมการการหาระยะทางครั้งนี้มีค่าน้อยมากจากการทดลองเทียบระยะหยุดของรถไฟจริง 1000 เมตร

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ส่งผลมากสุดโดยหาระยะหยุดของรถไฟได้ดังนี้

ซึ่งการหาระยะทางห้ามล้อของช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ลมเข้าเต็มกระบอกห้ามล้อแล้วและมีอัตราหน่วงคงที่ ดังนั้นความเร็วก็ลดลงอย่างคงที่จึงหาระยะทางจากการห้ามล้อได้ดังนี้

$$s = \frac{1}{2} \cdot (time) \times (velocity)$$

ซึ่งจะคิดระยะการห้ามล้อจากช่วงที่ 3 เป็นหลักเพราะส่งผลมากที่สุดต่อระยะทางการห้ามล้อรถไฟจริง ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ (2.8) เพื่อหาระยะทางของรถไฟจริงโดยคิดเฉพาะช่วงที่ 3 เมื่ออัตราหน่วงคงที่

2.6.3 การคำนวณแรงห้ามล้อ (Braking Force) [2]

เพื่อการออกแบบแรงห้ามล้อซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแรงขับเคลื่อนถ้าหากใช้แรงห้ามล้อมากกว่าแรงแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางล้อจะเกิดการไถล ดังนั้นการคำนวณแรงห้ามล้อสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_{b,max} = \frac{4\mu_d r_m \sum_{i=1}^{n} P_{d,i}}{D_o} \leq \mu_a \times \mathrm{Q_U} \qquad (2.16)$$

โดยที่ F_b คือ แรงห้ามล้อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อกับราง (นิวตัน)

μ_d คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผ้าห้ามล้อกับจานห้ามล้อ

r_m คือ รัศมีตรงกลางของแรงเสียดทาน (จานห้ามล้อ) (เมตร)

n คือ จำนวนจานห้ามล้อ (เมตร)

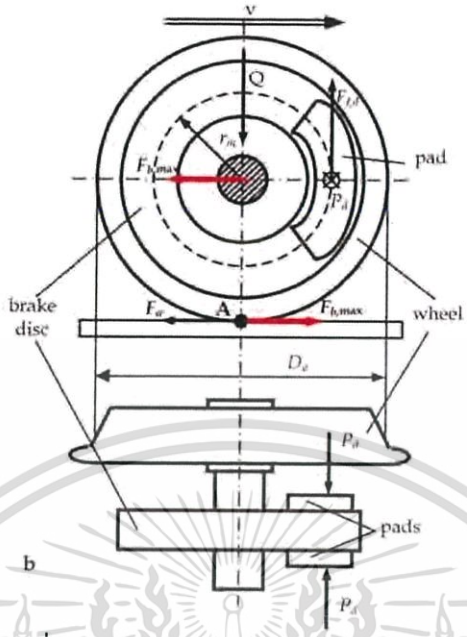
P_d คือ แรงหนีบผ้าห้ามล้อ (นิวตัน)

D_0 คือ เส้นผ่าศูนย์กลางล้อรถไฟ (เมตร)

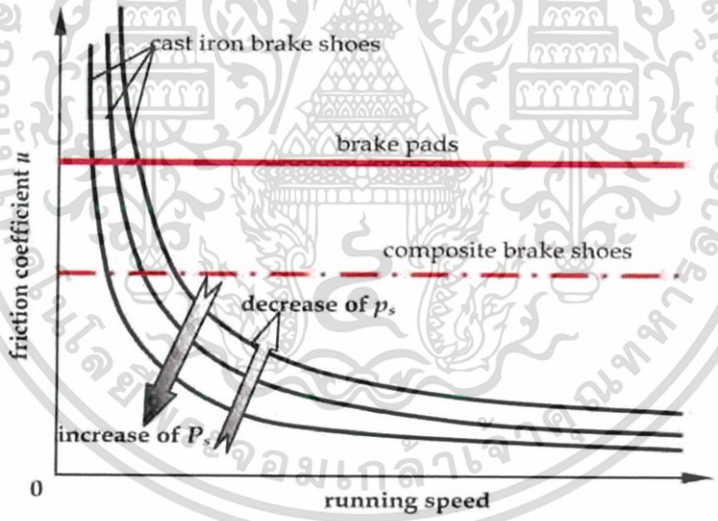
μ_a คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง

Q_U คือ น้ำหนักของตัวรถไฟ (นิวตัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงทิศทางของแรงห้ามล้อ [12]



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผ้าห้ามล้อกับความเร็ว [12]

2.6.4 สมการการหาความดัน[6]

จากนิยามของกลศาสตร์ของไหลจะอธิบายได้โดยความดันหมายถึง แรงที่กระทำบนพื้นที่หนึ่งตารางหน่วยในแนวตั้งฉากกับพื้นที่นั้น

$$P = \frac{F}{A} \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P คือ ความดัน (นิวตันต่อตารางเมตร)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ (นิวตัน)

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับแรง (ตารางเมตร)

2.6.5 สมการการหาแรงบิด[7]

นิยามการหาแรงบิดนั้นหาได้จากแรงคูณกับรัศมีที่ตั้งฉากกัน

$$\tau = F \times r \tag{2.18}$$

โดยที่ τ คือ แรงบิด (นิวตันเมตร)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับรัศมี (นิวตัน)

r คือ รัศมีที่ตั้งฉากกับแรง (เมตร)

2.7 การประมวลผลข้อมูลการทดลอง

2.7.1 การคำนวณค่าความแตกต่าง

การคำนวณหาค่าความแตกต่างที่ได้จากการทดลองสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.19

$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100 \tag{2.19}$$

2.7.2 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root-Mean-Square Value)

การคำนวณหาค่าเฉลี่ยของขนาดความเร็วที่ได้จากการทดลองดังสมการที่ 2.20

$$v = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} v_i^2} \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานและการออกแบบชุดทดลอง

3.1 บทนำ

ขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มตั้งแต่ การวิเคราะห์ปัญหา จนกระทั่งถึงการวิเคราะห์ผลข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วย วิธีการออกแบบและการสร้างแบบจำลองแคร่รถไฟ การใช้งานของชุดทดลอง เป็นต้น

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มต้นตั้งแต่การศึกษาว่ารถไฟหยุดได้อย่างไรและศึกษาองค์ประกอบของแคร่รถไฟรวมถึงขนาดต่างๆ ซึ่งจะนำค่าข้อมูลเหล่านี้มาย่อเป็นแบบจำลองแล้วออกแบบแบบจำลองแคร่รถไฟและระบบห้ามล้อ หลังจากนั้นจึงสร้างแบบจำลองนี้ขึ้นมา จากนั้นนำแบบจำลองแคร่รถไฟนี้มาทดลองบนแท่นหมุนโดยจะนำค่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากค่าของรถไฟที่จำลองขึ้น

1. เลือกรถไฟที่นำมาสร้างแบบจำลองย่อส่วนและศึกษาข้อมูลของตัวรถไฟและระบบห้ามล้อ
2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการห้ามล้อชุดล้อพร้อมเพลาของรถไฟ
3. ศึกษาการสร้างแบบจำลองย่อส่วนรถไฟครึ่งคันโดยใช้การใช้กฎความคล้ายคลึงทางกล
4. สร้างแบบจำลงย่อส่วนรถไฟครึ่งคัน
5. ออกแบบและสร้างแท่นหมุนจำลองการเคลื่อนที่
6. ออกแบบและสร้างวงจรการเก็บข้อมูลและการควบคุม
7. การสอบเทียบเซ็นเซอร์
8. การทำลองการห้ามล้อชุดทดลองเทียบกับทฤษฎี

3.3 อุปกรณ์การทดลอง

3.3.1 แคร่รถไฟจำลองแบบครึ่งคัน

แคร่รถไฟ PC-25 เป็นแคร่รถไฟแบบสองเพลาที่ผลิตในประเทศญี่ปุ่นที่ใช้กับรถไฟโดยสารความเร็วที่ใช้วิ่งคือ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามขนาดต่างๆที่ได้ระบุไว้ (ภาคผนวก ก และ ข) แคร่รถไฟจำลองแบบครึ่งคันจะประกอบไปด้วยแคร่รถไฟ 1 แคร่ ชุดรองรับหลักและชุดรองรับรองอย่างละ 1 ชุด โดยไม่มีตัวหน่วง, สปริง และส่วนของตัวรถครึ่งคัน โดยได้ทำการออกแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการสร้างขึ้นจากวัสดุหลักที่เป็นเหล็กและอลูมีเนียม สามารถแบ่งองค์ประกอบได้ดังนี้

1) แคร่รถไฟ (Bogie) เหล็กแท่งถูกนำมาตัดตามแบบจำนวนสองท่อนและทำการเพิ่มเติมกระบอกตันแทนสปริงเพื่อเชื่อมโครงเฟรมกับส่วนรองรับเพลาเข้าด้วยกันได้พอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เพลาและล้อ (Wheelsets) เพลาและล้อมีหน้าที่สำคัญเพื่อเป็นแกนในการขับเคลื่อนรถไฟให้วิ่งได้ โดยต้องมีการสวมลูกปืนและยึดกับส่วนรองรับเพลา โดยมีบังใบล้อทำหน้าที่คุมทิศทางไม่ให้ออกไปนอกราง
3) ส่วนรองรับเพลา (Axle Box) ทำหน้าที่รองรับแรงจากโครงแคร่รถไฟและยึดชุดเพลาล้อให้อยู่กับที่ โดยชุดส่วนรองรับเพลาจะเจาะรูตรงกลางเพื่อให้สวมใส่ลูกปืนได้
4) ส่วนรองรับหมุดตัวรถ (Bolster) ทำหน้าที่ยึดตัวรถกับแคร่เข้าด้วยกัน โดยจะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักรถและเป็นจุดหมุนของแคร่ ในชุดทดลองจะใช้ทำหน้าที่ยึดให้แคร่อยู่กับที่
5) จานห้ามล้อ (Disc Brake) เป็นหน้าสัมผัสในการกดผ้าห้ามล้อ ติดอยู่กับเพลา ทำจากอลูมีเนียม มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเจาะรูตรงกลาง
6) ตัวยึดผ้าห้ามล้อ (Brake Caliper) ทำหน้าที่ยึดผ้าห้ามล้อและส่งแรงกดให้ผ้าห้ามล้อ มีก้านระยางทำหน้าที่ส่งแรง
7) ผ้าห้ามล้อ (Brake Pad) ทำหน้าที่สร้างแรงหน่วง โดยการเสียดสีระหว่างผ้าห้ามล้อกับจานห้ามล้อ ผ้าห้ามล้อทำจากเหล็กหล่อและมีระยะการสึกที่เร็วกว่าจานห้ามล้อ

3.3.2 แท่นหมุนจำลองการเคลื่อนที่ (Small-Scale Roller Rigs)

ชุดจำลองการเคลื่อนที่ที่ใช้ในชุดทดลองจำลองมาจากแท่นหมุนการเคลื่อนที่ขนาดจริงของสถาบันวิจัยรถไฟแห่งชาติญี่ปุ่น (RTRI) การขับเคลื่อนจะทำโดยอาศัยมอเตอร์ส่งผ่านกำลังผ่านสายพานทำให้ชุดลูกกลิ้งเกิดการหมุน เมื่อชุดลูกกลิ้งเกิดการหมุนจะทำให้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟแบบสมจริงขึ้น โดยเราสามารถวัดค่าความเร็วและระยะทางด้วยเซ็นเซอร์ ซึ่ง ชุดลูกกลิ้ง มีส่วนประกอบหลักด้วยกันทั้งหมดดังนี้

1. แบบจำลองชุดแคร่รถไฟ (Half Rolling Stock Scale Model) แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นถูกนำมาวางบนลูกกลิ้งของแท่นจำลองการหมุนโดยมีเสาตรงกลางทำหน้าที่จำลองการยึดตัวรถกับตัวแคร่และติดตั้งระบบห้ามล้อไว้ที่บนแคร่

2. ชุดระบบลม (Pneumatic System) ชุดระบบลมเป็นชุดสร้างแรงห้ามล้อ ประกอบด้วยถังลม วาล์วหรี่ลม สวิตช์เปลี่ยนทางลมและกระบอกห้ามล้อ

3. ตู้ควบคุม (Controller) ตู้ควบคุมปรับเปลี่ยนความถี่เพื่อเปลี่ยนแปลงรอบความเร็วของมอเตอร์เพื่อเปลี่ยนความเร็วของลูกกลิ้ง

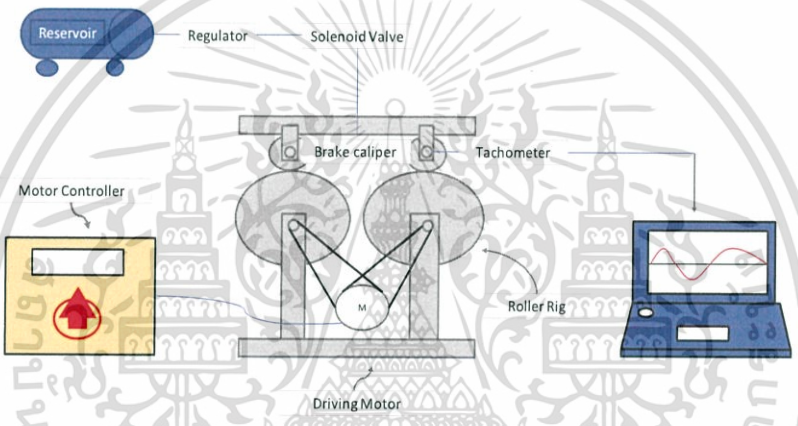
4. มอเตอร์ขับ (Driving Motor) มอเตอร์ถูกควบคุมด้วยตู้ความคุมและเชื่อมต่อกับลูกกลิ้งผ่านด้วยสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

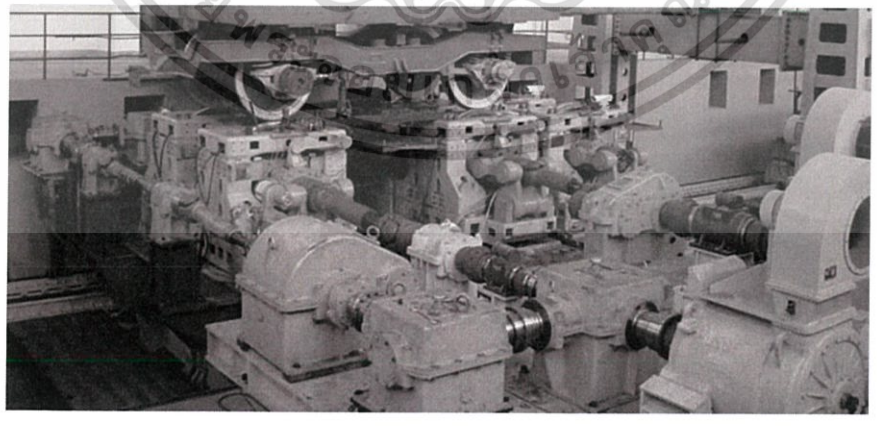
5. ลูกกลิ้ง (Roller) ลูกกลิ้งทำจากเหล็กเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของรางรถไฟโดยย่อส่วนมาจากลูกกล้องขนาดจริงของสถาบันวิจัยรถไฟแห่งชาติญี่ปุ่น

6. ทาโคมิเตอร์ (Tachometer) ใช้การวัดค่าจากตัวรับค่าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ในการวัดรอบความเร็วของเพลา

7. ระบบรับค่าสัญญาณ (Acquisition System) รับส่งสัญญาณจากเซ็นเซอร์และบันทึกค่าความเร็วกับระยะทางเพื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟอัตราเร่งให้นักศึกษาผู้ทำการทดลองได้วิเคราะห์ผล



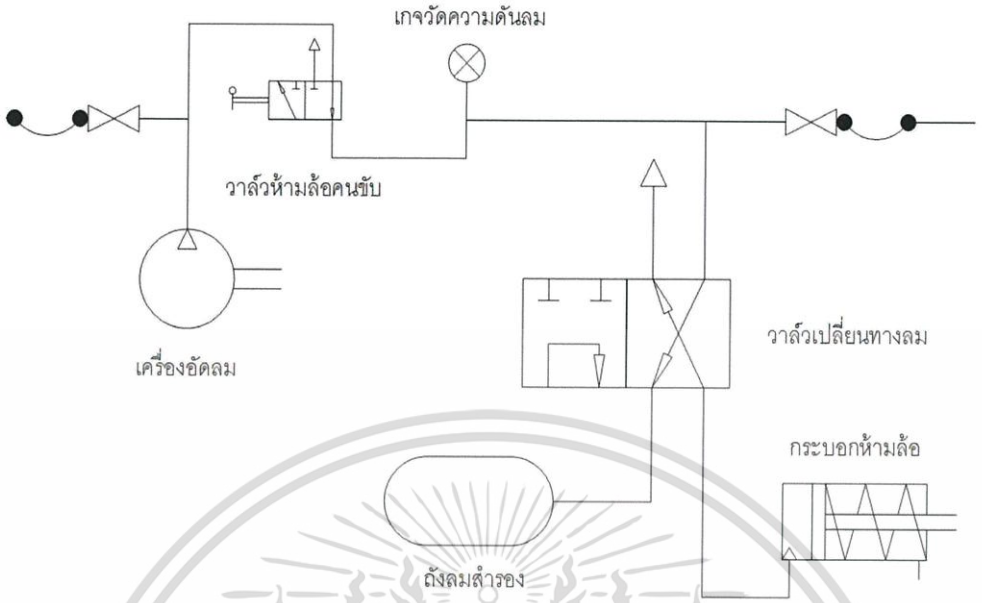
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของแท่นลูกกลิ้งจำลองการเคลื่อนที่



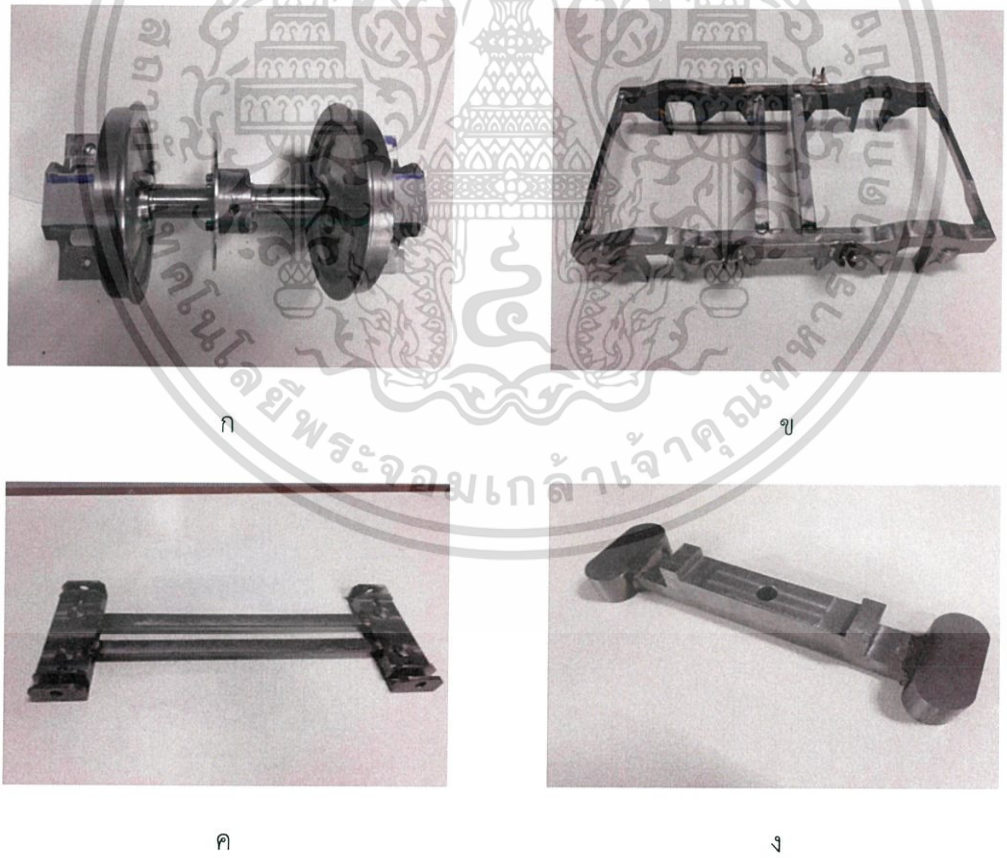
รูปที่ 3.2 แท่นจำลองการเคลื่อนที่ขนาดจริง (Full Scale Roller Rigs)

(ที่มา : Handbook of Railway vehicle dynamic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

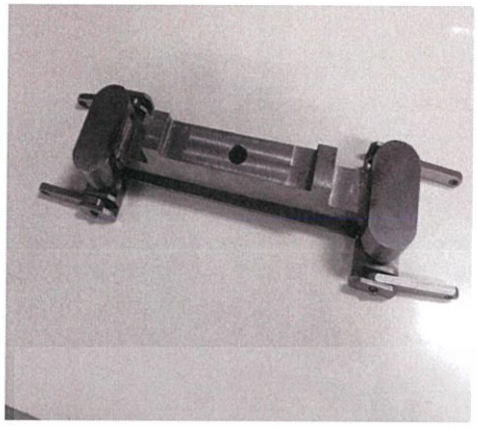


รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบลมของรถไฟ

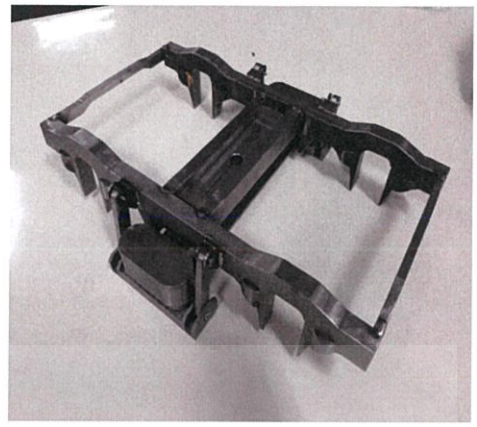


รูปที่ 3.4 แบบจำลองแคร่รถไฟแบบครึ่งคันที่ทำขึ้นจากเหล็ก ก) ชุดล้อและเพลา ข) ชุดโครงแคร่ ค) ชุดรับน้ำหนักส่วนล่าง ง) ชุดรับน้ำหนักส่วนบน

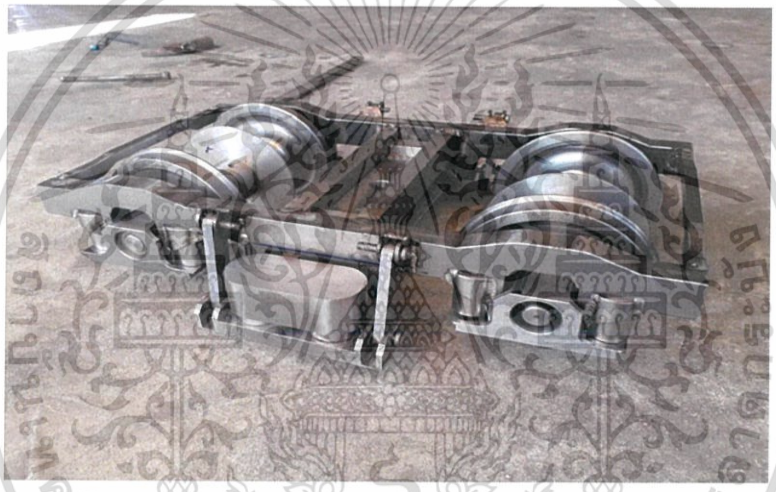
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก



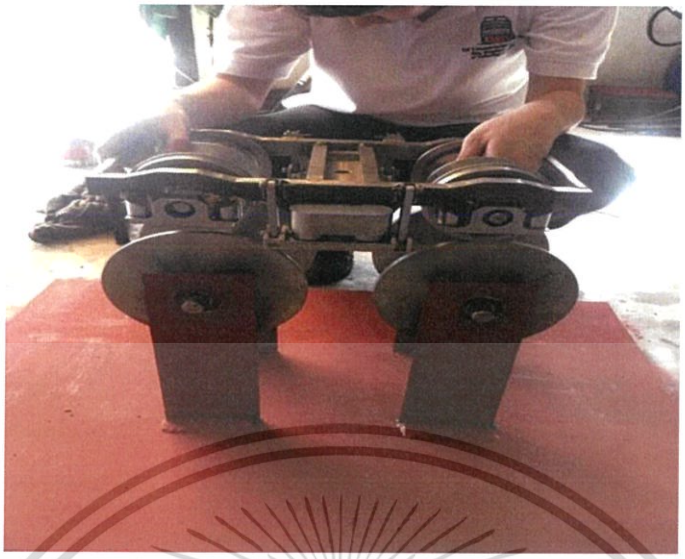
ข



ค

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการประกอบแบบจำลองแคร่รถไฟแบบครึ่งคัน ก) ประกอบชุดรับแรงส่วนล่างและบน ข) ประกอบชุดรับแรงทั้งสองชุดเข้ากับโครงแคร่ ค) ประกอบโครงแคร่เข้ากับชุดล้อและเพลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แบบจำลองแคร่รถไฟแบบครึ่งคันเมื่อประกอบเข้ากับแท่นลูกกลิ้ง

3.3.3 อัตราส่วนการย่อที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่

พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถไฟจากการเคลื่อนที่ของแคร่รถไฟครึ่งหนึ่งของตัวรถโดยสารโดยอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.11) เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สอดคล้องกับแบบจำลองแคร่รถไฟที่มีอัตราส่วนการย่อความยาวเท่ากับ 1:8 ($\varphi_l = 8$) ค่าอัตราส่วนการย่อต่างๆที่นิยามไว้จึงถูกนำมาคูณกับสมการที่ (2.11) เป็นสมการที่ (3.1) ตามลำดับดังนี้

$$I\ddot{\theta} \times \frac{\varphi_I}{{\varphi_t}^2} = \tau \times \varphi_\tau \tag{3.1}$$

เพื่อให้สมการที่ (3.1) เป็นจริงตามสมการ (2.11) ดังนั้น

$$\frac{\varphi_I}{{\varphi_t}^2} = \varphi_\tau = \frac{\tau_1}{\tau_0} \tag{3.2}$$

โดยที่ τ_1 คือแรงบิดต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นที่จานห้ามล้อของรถไฟจริง (นิวตันเมตร)

τ_0 คือแรงบิดต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นที่จานห้ามล้อของรถไฟจำลอง (นิวตันเมตร)

จากสมการที่ (2.7) แทนค่าลงในสมการที่ (3.2) จะได้อัตราส่วนแรงบิดเท่ากับ

$$\varphi_\tau = \frac{\varphi_m \times \varphi_l^2}{\varphi_t^2} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปลต่างๆที่เลือกมาใช้ในการย่อขนาดเชิงกลมีดังต่อไปนี้เพื่อเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการย่อแต่ละชนิดจากการออกแบบและเลือกวัสดุมาใช้ในการสร้างแบบจำลองพบว่า $\varphi_\rho = 1$ และ $\varphi_m = 512$ อ้างอิงจากงานวิจัยของ G.Moritz และ J.Alfred เลือกใช้ $\varphi_t = \sqrt{\varphi_l}$ และ $\varphi_a = \frac{\varphi_l}{\varphi_t^2}$ แล้วหาค่า φ_v จาก $\frac{\varphi_l}{\varphi_t}$

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนระหว่างรถไฟจริงต่อรถไฟจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าอัตราส่วน
φ_l	8
φ_a	1
φ_I	32768
φ_τ	4096
φ_v	2.83
φ_m	512
φ_t	2.83
φ_ρ	1

จากค่าอัตราส่วนการย่อขนาดในตารางที่ (3.1) สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆเปรียบเทียบระหว่างขนาดรถไฟจริงกับแบบจำลองดังตารางที่ (3.2)

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระหว่างขนาดรถไฟจริงกับแบบจำลอง

พารามิเตอร์	**รถไฟจริง**	**รถไฟจำลอง**
มวลตัวรถ(1/2)	15,380 กิโลกรัม	30 กิโลกรัม
มวลแคร่+ชุดล้อ	5043 กิโลกรัม	9.85 กิโลกรัม
โมเมนต์ความเฉื่อยของชุดล้อพร้อมเพลา	4915.2 กิโลกรัม-เมตร^2	0.15 กิโลกรัม-เมตร^2
แรงบิดในการห้ามล้อ	1264.64 นิวตัน-เมตร	2.47 นิวตัน-เมตร
ความเร็ว	120 กิโลเมตร/ชั่วโมง	42.4 กิโลเมตร/ชั่วโมง
เวลา	4.35 วินาที	1.54 วินาที
ความหนาแน่น	7700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	7700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
อัตราหน่วง	0.65 เมตรต่อวินาที^{2}	0.65 เมตรต่อวินาที^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ (3.2) คือค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อให้มีความสอดคล้องกับขนาดรถไฟจริงตามกฎความคล้ายคลึงทางกล

การคำนวณหาแรงบิดของแรงห้ามล้อได้ดังนี้

$$\tau = F \times r \tag{3.4}$$

โดยที่ τ คือ แรงบิด (นิวตันเมตร)

F คือ แรงที่กดผ้าห้ามล้อ (นิวตัน)

r คือ รัศมีจานห้ามล้อ (เมตร)

สมการการหาความดัน

$$P = \frac{F}{A} \tag{3.5}$$

โดยที่ F คือ แรงกด (นิวตัน)

A คือ พื้นที่ตั้งฉากที่แรงดันกระทำ (ตารางเมตร)

แรงบิดที่เกิดขึ้นที่ผ้าห้ามล้อหาได้ดังนี้

$$\tau = \mu \times N \times r = \mu \times P \times A \times r \tag{3.6}$$

โดยที่ μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผ้าห้ามล้อกับจานห้ามล้อ

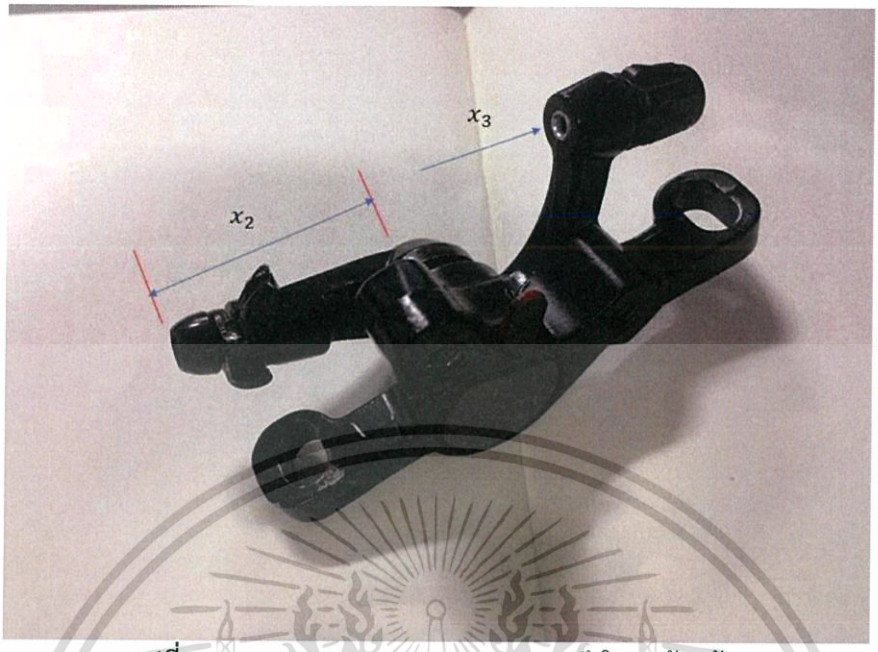
N คือ แรงปฏิกิริยาที่กระทำระหว่างผ้าห้ามล้อกับจานห้ามล้อ (นิวตัน)

r คือ รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อ (เมตร)

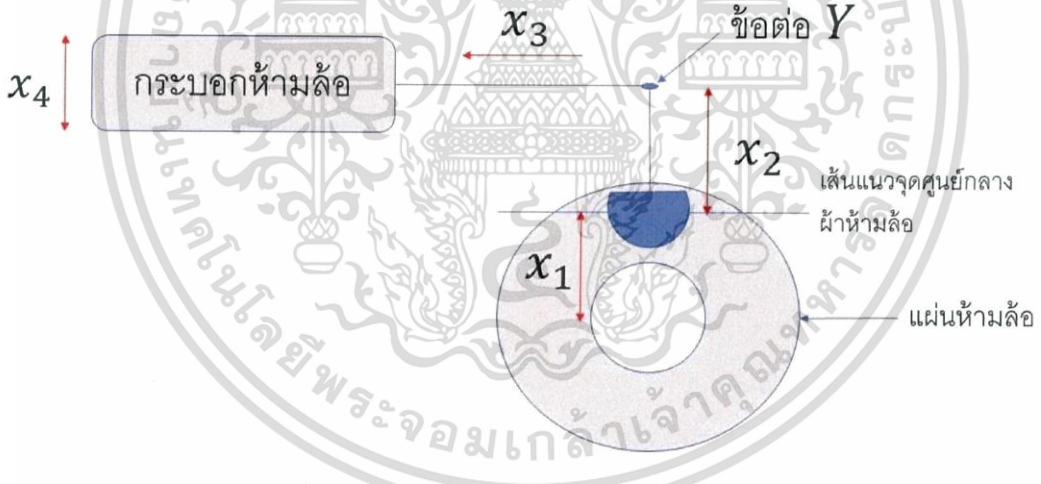
P คือ ความดัน (นิวตันต่อตารางเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกห้ามล้อ (ตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงระยะจากจุดหมุนและระยะดึงในชุดห้ามล้อ



รูปที่ 3.8 แสดงการเขียนแผนภาพการกระจายแรง

โดยที่ x_1 คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางผ้าห้ามล้อกับจุดศูนย์กลางแผ่นห้ามล้อ (เมตร)

x_2 คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางแผ่นห้ามล้อถึงระยะข้อต่อ Y (เมตร)

x_3 คือ แรงดึงจากกระบอกห้ามล้อ (นิวตัน)

x_4 คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกห้ามล้อมีค่าเท่ากับ 25 มิลลิเมตร

ในส่วนของแบบจำลอง ความหนาของจาน คือ 2 มิลลิเมตร ซึ่งค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ซึ่งได้จากการคำนวณทางโปรแกรมออกแบบ AutoCAD ค่าอัตราหน่วงของรถไฟคือ 0.65 เมตรต่อวินาที^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมีที่ผ้าห้ามล้อกดวัดจากจุดศูนย์กลางแผ่นห้ามล้อ คือ 0.0395 เมตร และระยะจากจุดศูนย์กลางผ้าห้ามล้อถึงข้อต่อ Y คือ 0.04 เมตร

เพื่อการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจึงนำสมการที่ (2.11) เท่ากับสมการที่ (3.6) จะได้ดังนี้

$$\mu \times P \times A \times r = I \times \ddot{\theta} \tag{3.7}$$

โดยใช้ความดันที่ 3.4 บาร์ และเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร จากสมการข้างต้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแผ่นห้ามล้อคือ 0.37

การหาค่าความผิดพลาดหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100 \tag{3.8}$$

หมายเหตุ ต้องเลือกค่าแรงบิดเผื่อจากการคำนวณทางทฤษฎีจึงทำให้เกิดค่าความเคลื่อนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

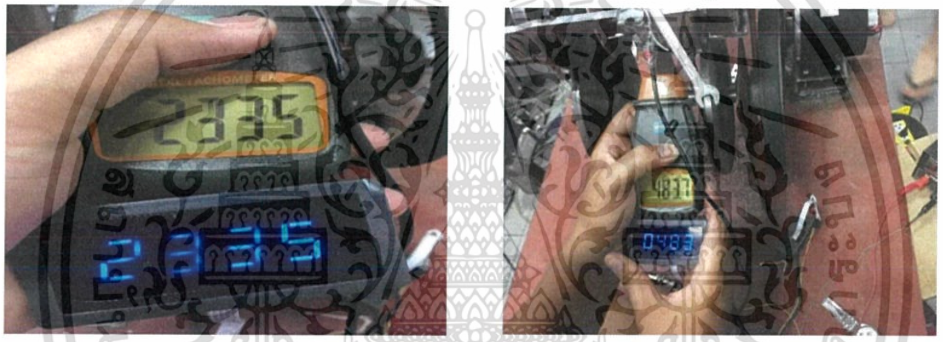
บทที่ 4
วิธีการทดลองและผลลัพธ์

4.1 บทนำ

หลังจากที่ทราบขั้นตอนการดำเนินงานและอุปกรณ์การทดลองแล้ว ในบทนี้จะทราบถึงการหาผลที่ได้มาจากการคำนวณจากโปรแกรม ARDUINO วิธีการทดลองซึ่งรวมถึงการใช้ชุดทดลอง ผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลอง รวมไปถึงวิธีการวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลที่เก็บได้

4.2 ผลลัพธ์การสอบเทียบค่าเซ็นเซอร์

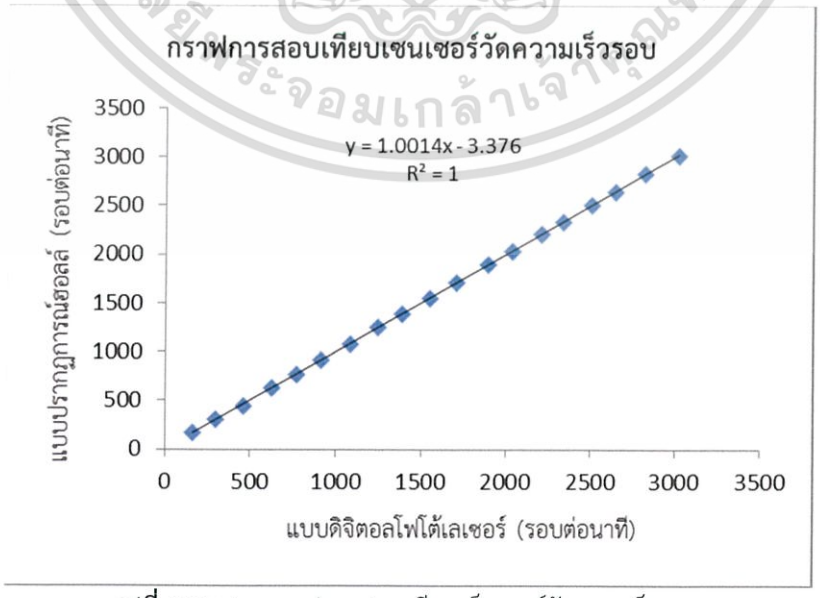
การเทียบค่าเซ็นเซอร์วัดรอบนั้นเราได้ทำการใช้เซ็นเซอร์ 2 ตัวได้แก่ แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ และ แบบดิจิตอลโฟโต้เลเซอร์ ใช้ในการวัดเทียบค่าความเร็วรอบที่เพลาเดียวกันดังแสดงในรูปต่อไปนี้



a b

รูปที่ 4.1 แสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ

จากการสอบเทียบเซ็นเซอร์ 19 ค่า จะได้ความสัมพันธ์ออกมาเป็นกราฟดังต่อไปนี้

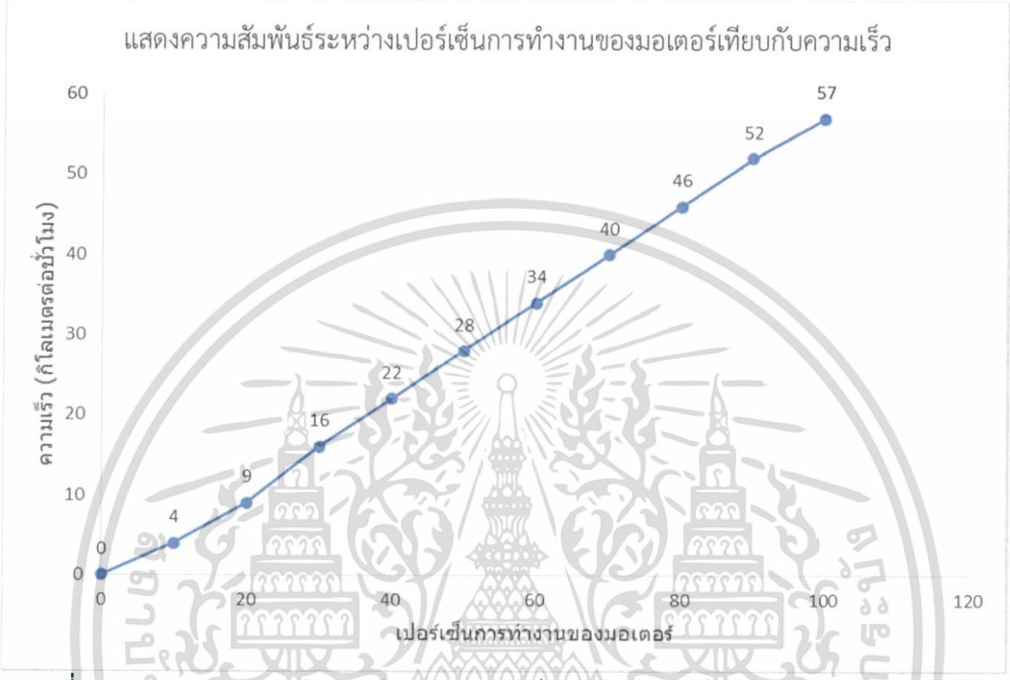


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็ว

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็ว เพื่อที่จะนำความสัมพันธ์นี้ไปหาเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์ในความเร็วที่กำหนดให้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็ว

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็วดังนี้

$$v_0 = 5.8909 \times (P_m) - 7.3455 \quad (4.1)$$

โดยที่ v_0 คือ ความเร็วเริ่มต้นก่อนห้ามล้อ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

P_m คือ เปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์

4.4 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การคำนวณระยะทางจากทฤษฎีและการคำนวณระยะทางจากการทดลอง โดยอิงจากความเร็วและเวลา

4.4.1 การคำนวณระยะทางจากทฤษฎี

การคำนวณระยะทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการที่ (2.10) โดยป้อนพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากกฎความคล้ายคลึงทางกลในตารางที่ (3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การคำนวณระยะทางจากการทดลอง

ก่อนที่จะได้ผลลัพธ์จากการทดลอง ต้องอาศัยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งชุดโบกี้จำลองลงในชุดล้อขับเคลื่อน
2. ติดตั้ง Hall Effect Sensor ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ให้ดังรูป
3. ต่อสายไฟสีดำเข้าที่ช่องที่ 2 Digital Input สีน้ำตาลเข้าที่แหล่งจ่ายไฟ 5V น้ำเงินเข้าที่ GND
4. ต่อสาย USB เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล
5. เปิดโปรแกรม Arduino ขึ้นมา
6. ตั้งค่าโปรแกรมตาม Code ที่ได้ให้เอาไว้
7. เปิด Serial Monitor ในโปรแกรม Arduino ด้วยการกด Ctrl + Shift + M
8. เปิด Motor Controller และเปิดสวิตซ์สายสัญญาณเพื่อความเร็วที่ต้องการใช้ในการห้ามล้อ
9. ปิดสวิตซ์สายสัญญาณและหน้าต่าง Serial Monitor
10. ทำการเปิดหน้าต่าง Serial Monitor อีกครั้ง
11. เมื่อพร้อมแล้วให้ทำการเปิดสวิตซ์สายสัญญาณ เปิดวาล์วลมและปิด Motor Controller พร้อมกัน
12. นำค่าที่ได้จากหน้าต่าง Serial Monitor มาเก็บค่าไว้ใน Microsoft Excel
13. ทำการพล็อตกราฟ ความเร็วกับเวลา โดยที่ความเร็ว 1 ค่าเทียบเป็นเวลา 0.1 วินาที

4.5 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 แบบได้แก่ การเปลี่ยนค่าความดันของรถไฟเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราหน่วง การเปลี่ยนค่าความเร็วของรถไฟเพื่อวัดระยะห้ามล้อของรถไฟและการเพิ่มมวลถ่วงเพิ่มขึ้นอีกเพื่อพิจารณาการห้ามล้อและระทางการห้ามล้อของแบบจำลองและผลทางทฤษฎี

ก่อนเริ่มการทดลองจะทำการหาอัตราหน่วงโดยการไม่ใส่ชุดแคร่รถไฟจำลองลงบนชุดขับเคลื่อน โดยใช้สมการ

$$v = v_0 + dt \tag{4.2}$$

กำหนดให้ v=0 เมตรต่อวินาที v_0 คือความเร็วเริ่มต้น

โดยที่จะทำการเก็บค่าเวลาการหน่วงทั้งหมดสามค่าความเร็ว ความเร็วละ 5 ครั้งการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 เวลาที่ใช้วิ่งจนหยุดนิ่ง ที่ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่ไม่ใส่ชุดแคร่	6.79	6.91	6.85	6.66	6.85	6.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ได้อัตราหน่วงโดยที่ไม่มีโหลดจากชุดแคร่จากสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{53}{6.81} \times \frac{5}{18} = 2.16 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ตารางที่ 4.2 เวลาที่ใช้วิ่งจนหยุดนิ่ง ที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่ไม่ใส่ชุดแคร่	5.80	5.60	5.70	5.86	5.77	5.70

จะทำให้ได้อัตราหน่วงโดยที่ไม่มีโหลดจากชุดแคร่จากสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{5.7} \times \frac{5}{18} = 2.06 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้วิ่งจนหยุดนิ่ง ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่ไม่ใส่ชุดแคร่	3.01	3.00	3.07	3.01	3.00	3.02

จะทำให้ได้อัตราหน่วงโดยที่ไม่มีโหลดจากชุดแคร่จากสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{20}{3.02} \times \frac{5}{18} = 1.84 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

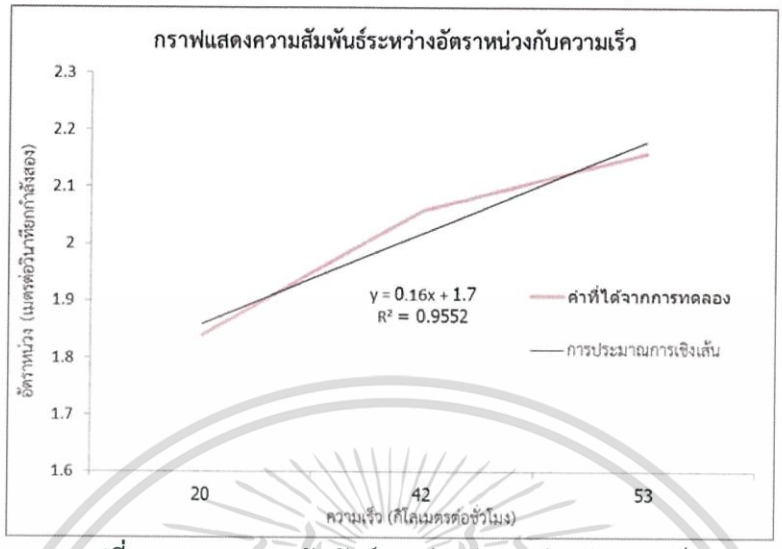
เมื่อทำการทดลองด้านบนเสร็จแล้วก็นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับอัตราหน่วงจะได้ตารางออกมาด้านล่างดังนี้

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับอัตราหน่วงของชุดขับเคลื่อน

ความเร็ว	20	42	53
อัตราหน่วงของชุดขับเคลื่อน	1.84	2.06	2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับอัตราหน่วงของชุดขับเคลื่อนดังรูป



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราหน่วงกับความเร็ว

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นการทำงานของมอเตอร์เทียบกับความเร็วดังนี้

$$d = 0.16 \times (v_0) + 1.7 \qquad (4.3)$$

4.5.1 การทดสอบการเปลี่ยนความดันเพื่อเปรียบเทียบค่าความเร่งโดยความเร็วคงที่ที่ 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เมื่อทำการทดลองปรับค่าความดันทั้งหมด 10 ความดัน ในช่วง 2.8 บาร์ ถึง 4.6 บาร์ เพื่อดูผลการตอบสนองของความดันกับอัตราหน่วงของแบบจำลองรถไฟที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังการทดลองข้างล่างนี้

การทดลองครั้งที่ 1

ใช้ความดันที่ 2.8 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.5 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 1 ที่ความดัน 2.8 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	5.0	4.9	5.0	4.80	5.0	4.94
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 2.8 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.94} \times \frac{5}{18} = 2.38 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.38 - 2.06 = 0.32 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 2

ใช้ความดันที่ 3 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.6 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 2 ที่ความดัน 3.0 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.70	4.80	4.80	4.70	4.80	4.76
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 3 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.76} \times \frac{5}{18} = 2.47 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$2.47 - 2.06 = 0.41 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 3

ใช้ความดันที่ 3.2 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.7 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 3 ที่ความดัน 3.2 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.40	4.50	4.60	4.10	4.50	4.50
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 3.2 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.50} \times \frac{5}{18} = 2.62 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.38 - 2.06 = 0.56 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 4

ใช้ความดันที่ 3.4 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 4 ที่ความดัน 3.4 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.40	4.30	4.40	4.40	4.30	4.36
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 3.4 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.36} \times \frac{5}{18} = 2.70 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.70 - 2.06 = 0.64 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 5

ใช้ความดันที่ 3.6 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.9 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 5 ที่ความดัน 3.6 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.20	4.10	4.10	4.20	4.10	4.14
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 3.7 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.14} \times \frac{5}{18} = 2.84 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.84 - 2.06 = 0.78 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 6

ใช้ความดันที่ 3.8 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.10 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 6 ที่ความดัน 3.8 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.00	4.00	4.10	4.20	4.00	4.06
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 3.8 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.06} \times \frac{5}{18} = 2.90 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.90 - 2.06 = 0.84 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 7

ใช้ความดันที่ 4 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.11 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 7 ที่ความดัน 4.0 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	3.90	3.90	3.70	3.90	3.80	3.84
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 4 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{3.84} \times \frac{5}{18} = 3.07 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$3.07 - 2.06 = 1.01 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 8

ใช้ความดันที่ 4.2 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.12 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 8 ที่ความดัน 4.2 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	3.70	3.60	3.60	3.90	3.80	3.72
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 4.2 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{3.72} \times \frac{5}{18} = 3.16 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$3.16 - 2.06 = 1.10 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 9

ใช้ความดันที่ 4.4 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.13 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 9 ที่ความดัน 4.4 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	3.70	3.60	3.60	3.60	3.70	3.64
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 4.4 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{3.64} \times \frac{5}{18} = 3.23 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$3.23 - 2.06 = 1.17 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

การทดลองครั้งที่ 10

ใช้ความดันที่ 4.6 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

ตารางที่ 4.14 ตารางการเก็บค่าเวลาการทดลองครั้งที่ 10 ที่ความดัน 4.6 บาร์

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	3.30	3.50	3.40	3.50	3.50	3.44
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.58	0.57	0..50	0.49	0.56	0.54

การคำนวณ

ใช้ความดันที่ 4.6 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกห้ามล้อคือ 25 มิลลิเมตร รัศมีที่แผ่นห้ามล้อกดลงบนจานห้ามล้อคือ 0.0395 เมตร และ ค่า $I = 0.15$ กิโลกรัม-เมตร^2 ระยะข้อต่อถึงก้านห้ามล้อ 0.04 เมตร

นำค่าเวลาที่ใช้ในการห้ามล้อมาคำนวณหาความหน่วงที่มีโหลดรถไฟจากสมการที่ (4.2) จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{3.44} \times \frac{5}{18} = 3.42 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$3.42 - 2.06 = 1.36 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

จากการทดลองจะทำให้ได้ค่าอัตราหน่วงที่ความดันต่างๆเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ตามตารางด้านล่างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

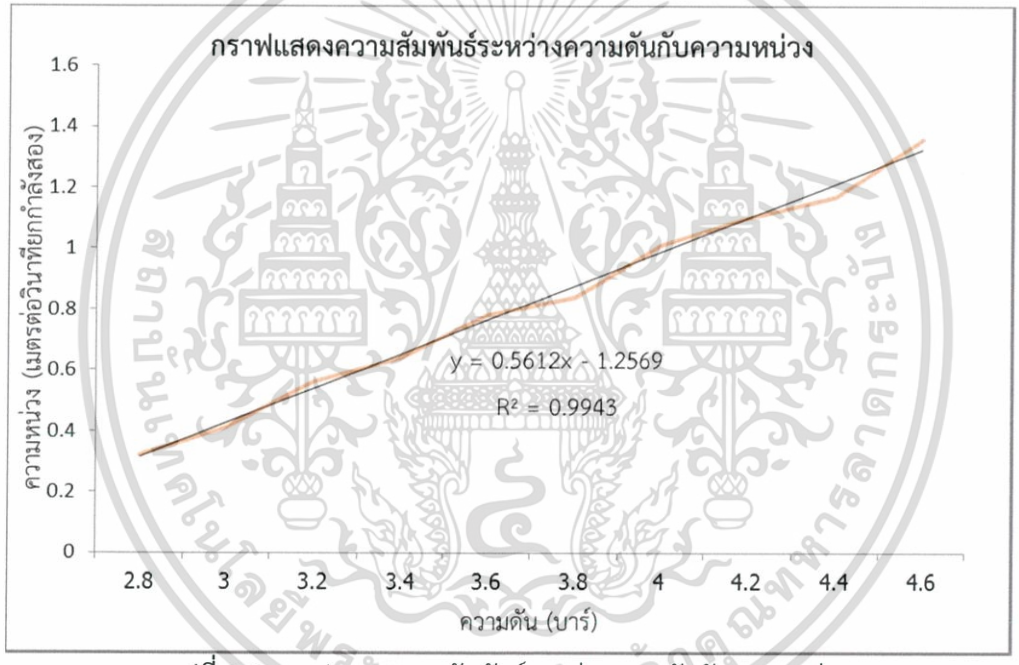
ตารางที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหน่วงที่ความดันช่วง 2.8 บาร์ ถึง 3.6 บาร์

ความดัน	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
ความหน่วง	0.32	0.41	0.56	0.64	0.78

ตารางที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหน่วงที่ความดันช่วง 3.8 บาร์ ถึง 4.6 บาร์

ความดัน	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6
ความหน่วง	0.84	1.01	1.10	1.17	1.36

จากการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร่งดังนี้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหน่วง

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราหน่วงดังนี้

$$d = 0.5612 \times (P) - 1.2569 \qquad (4.4)$$

โดยที่ d คือ อัตราหน่วง (เมตรต่อวินาที^{2})

P คือ ความดัน (บาร์)

ซึ่งค่าที่ได้จากสมการต้องรวมค่าความผิดพลาด ± 0.0057 เข้าไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การเปรียบเทียบรูปร่างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา

เมื่อทำการทดลองโดยการปรับค่าความเร็วของรถไฟจำลองดังนี้ ตามค่าดังนี้ การทดลองครั้งที่ 1 ใช้ค่าความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดลองครั้งที่ 2 ใช้ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดลองครั้งที่ 3 ใช้ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และการทดลองครั้งที่ 4 ใช้ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีการเพิ่มมวลเข้าไป 10 กิโลกรัม

การหาพื้นที่ใต้กราฟหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ช่วงที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนในการตอบสนองต่อมนุษย์

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ลมเข้าสู่กระบอกสูบห้ามล้อ

การหาพื้นที่ใต้กราฟ ช่วงที่ 1 กับ ช่วงที่ 2

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$adt = dv$$

$$\int_{t_0}^{t_2} adt = \int_{v_0}^{v_2} dv$$

$$at = v_2 - v_1$$

$$v_1 + at_e = v_2$$

$$\int_{t_0}^{t_2} (v_1 + at_e)dt = \int_{s_0}^{s_2} ds$$

$$v_1 t_1 + \frac{1}{2} at_e^2 = s$$

ในที่นี้ a คืออัตราหน่วง

แต่เนื่องจากสมการการหาระยะทางครั้งนี้มีค่าน้อยมากจากการทดลองเทียบระยะหยุดของรถไฟจริง 1000 เมตร

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ส่งผลมากสุดโดยหาระยะหยุดของรถไฟได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.2 กราฟในช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่อัตราหน่วงคงคงทำให้กราฟในช่วงที่ 3 มีความเร็วลดลงด้วยความเร็วคงที่สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$s = \frac{1}{2} \times (time) \times (velocity)$$

เมื่อได้ระยะทางจากสมการข้างต้นแล้วสามารถนำมาเปรียบเทียบกับสมการสมการขององค์กรรถไฟนานาชาติสามารถพิสูจน์ได้จากสมการที่ (2.8) ดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่

$$v^2 = {v_0}^2 + 2ds_{ef}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระยะห้ามล้อหาได้จากสมการที่ (2.9)

$$s_b = s_p + s_{ef} \ [m]$$

โดยที่ s_b คือ ระยะห้ามล้อทั้งหมด (เมตร)

s_p คือ ระยะเตรียมการห้ามล้อ(ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ) (เมตร)

s_{ef} คือ ระยะที่ห้ามล้อทำงานเต็มประสิทธิภาพ (เมตร)

จากสมการการเคลื่อนที่เราสามารถหาอัตราหน่วงได้จากสมการที่ (2.10) ดังนี้

เมื่อ v = 0 เมตรต่อวินาที

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

โดยที่ v_0 คือ ความเร็วเริ่มต้นก่อนทำการห้ามล้อ

t_e คือ เวลาที่ลมเต็มกระบอกสูบ(ค่าที่แนะนำ 4.35 วินาที)

s_b คือ ระยะห้ามล้อทั้งหมด (เมตร)

จากสมการการเคลื่อนที่เราสามารถหาอัตราหน่วงได้ดังนี้
เมื่อ $v = 0$ (เมตรต่อวินาที)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

โดยที่ v_0 คือ ความเร็วเริ่มต้นก่อนทำการห้ามล้อ

t_e คือ เวลาที่ลมเต็มกระบอกสูบ(ค่าที่แนะนำ 4.35 วินาที)

s_b คือ ระยะห้ามล้อทั้งหมด (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 การทดสอบการห้ามล้อรถไฟจำลองเพื่อหาระยะทางเทียบกับรถไฟของจริง

ในการทดลองนี้เป็นการคำนวณหาระยะทางในการห้ามล้อในความเร็วต่างๆดังนี้ 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยแต่ละค่าทำการทดลอง 5 ค่า เพื่อเก็บค่าเวลาที่นำไปใช้การหาอัตราหน่วง โดยใช้ความดันที่ 3.4 บาร์ ในอีกการทดลองคือการเพิ่มน้ำหนัก 10 กิโลกรัม วิ่งที่ความเร็ว 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อสังเกตดูว่าการเพิ่มมวลแก่แคร่และใช้ความดันที่กระบอกห้ามล้อเท่าเดิมจะส่งผลต่อระยะทางการห้ามล้ออย่างไรเพื่อนำไปเทียบกับสมการที่ (2.10) และใช้สมการที่ 2.13 เพื่อหาค่าเฉลี่ยความเร็วจากการทดลองได้

การทดลองครั้งที่ 1

กำหนดให้วิ่งด้วยความเร็ว 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยใช้อัตราหน่วงที่ 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้ากระบอกสูบเป็นเวลา 4.35 วินาที และกำหนดระยะการห้ามล้อจากสมการที่ (2.10) ได้ดังนี้

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ทำให้ได้ระยะทางการห้ามล้อเท่ากับ 1516.7 เมตร ในรถไฟจริง

จากทฤษฎี อัตราย่อส่วนเชิงกล ($\varphi_v = 2.83, \varphi_t = 2.83, \varphi_a = 1$)
จะได้ ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมงหรือ 14.7 เมตรต่อวินาที อัตราหน่วง 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 1.54 วินาที

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ระยะทางที่ได้คือ 189.4 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางการทดลอง

ตารางที่ 4.17 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	5.2	5.4	5.3	5.3	5.4	5.32
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.64	0.92	0..98	0.72	0.74	0.80

หาอัตราหน่วงมอเตอร์ได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0$ เมตรต่อวินาที จากตารางที่ 4.1 ค่าเวลาของการหน่วงมอเตอร์คือ 6.81 วินาที จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{53}{6.81} \times \frac{5}{18} = 2.16 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

หาอัตราหน่วงชุดทดลองได้จากได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0$ เมตรต่อวินาที

จากตารางเก็บค่าเวลาข้างบนจะได้ค่าเวลาของการหน่วงชุดทดลองคือ 5.32 วินาที

จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{53}{5.32} \cdot \frac{5}{18} = 2.77 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

$$2.77 - 2.16 = 0.61 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการทดลองจะได้ความเร็ว 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราหน่วง 0.61 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 0.80 วินาที

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

จะได้ระยะทาง 181.1 เมตร

ดังนั้นเมื่อเราใช้หลักการ ขยายอัตราส่วนเชิงกล กลับเพื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับของจริงจะได้

$181.1 \times 8 = 1448.8$ เมตร

หาค่าความคลาดเคลื่อนจาก

$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

จะได้

$$\frac{|1516.7 - 1448.8|}{1516.7} \times 100 = 4.5\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงกราฟแนวโน้มที่ความเร็ว 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในการทดลอง 5 ครั้ง(เฉลี่ย)ได้ดังนี้

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง

การทดลองครั้งที่ 2

กำหนดให้วิ่งด้วยความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยใช้อัตราหน่วง 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้ากระบอกสูบเป็นเวลา 4.35 วินาที และกำหนดระยะการห้ามล้อจากสมการที่ (2.10) จากการคำนวณดังนี้

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ทำให้ได้ระยะทางการห้ามล้อเท่ากับ 999.7 เมตร ในรถไฟจริง

จากทฤษฎี อัตรายอ่ส่วนเชิงกล ($\varphi_v = 2.83, \varphi_t = 2.83, \varphi_a = 1$)

จะได้ ความเร็ว 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 11.77 เมตรต่อวินาที อัตราหน่วง 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 1.54 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ระยะทางที่ได้คือ 124.84 เมตร

ในทางการทดลอง

ตารางที่ 4.18 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.4	4.3	4.4	4.4	4.3	4.36
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.64	0.92	0..98	0.72	0.74	0.80

หาอัตราหน่วงมอเตอร์ได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0$ เมตรต่อวินาที จากตารางที่ 4.2 ค่าเวลาของการหน่วงมอเตอร์คือ 5.70 วินาที

จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{5.70} \times \frac{5}{18} = 2.06 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

หาอัตราหน่วงชุดทดลองได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0\frac{m}{s^2}$ จากตารางเก็บค่าเวลาข้างบนจะได้ค่าเวลาของการหน่วงชุดทดลองคือ 4.36 วินาที
จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{53}{4.36} \times \frac{5}{18} = 2.70 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

$$2.70 - 2.06 = 0.64 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการทดลองจะได้ความเร็ว 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราหน่วง 0.64 เมตรต่อวินาที^{2}เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 0.80 วินาที

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

จะได้ระยะทาง 117.8 เมตร

ดังนั้นเมื่อเราใช้หลักการ ขยายอัตราส่วนเชิงกล กลับเพื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับของจริงจะได้ $117.8 \times 8 = 942.4$ เมตร

หาค่าความคลาดเคลื่อนจาก

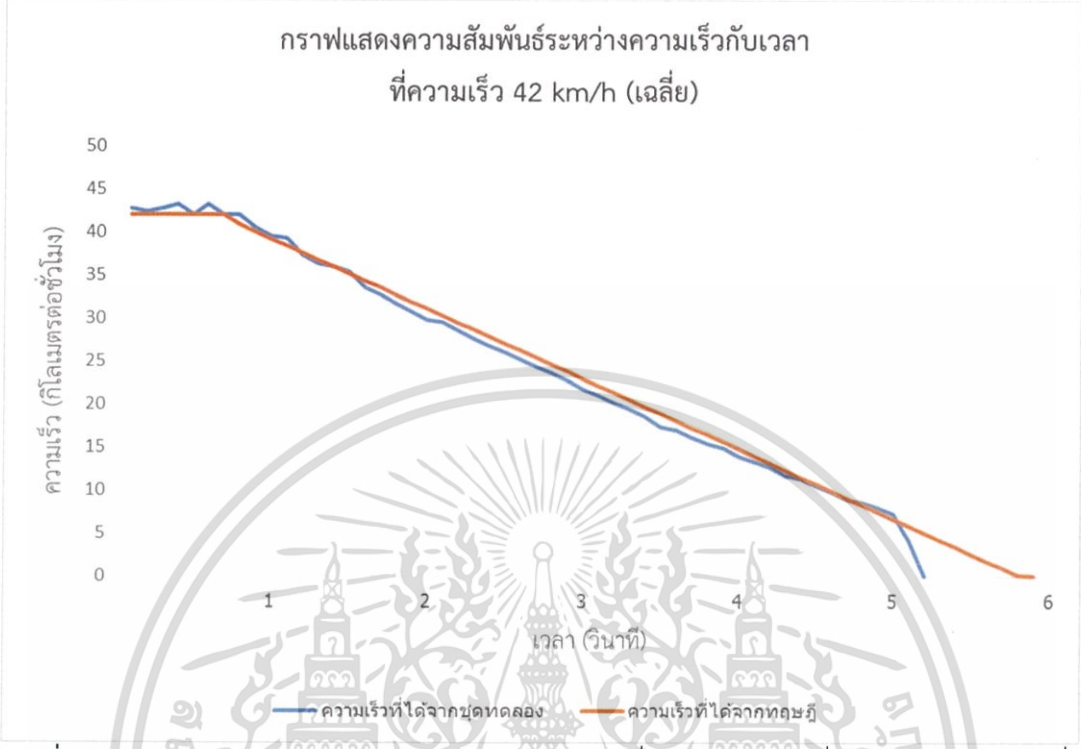
$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

จะได้

$$\frac{|999.7 - 942.4|}{999.7} \times 100 = 5.7\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงกราฟแนวโน้มที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในการทดลอง 5 ครั้ง(เฉลี่ย)ได้ดังนี้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง

การทดลองครั้งที่ 3

กำหนดให้วิ่งด้วยความเร็ว 56.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยใช้อัตราหน่วงที่ 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้ากระบอกสูบเป็นเวลา 4.35 วินาที และกำหนดระยะการห้ามล้อจากสมการที่ (2.10) ดังนี้

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ทำให้ได้ระยะทางการห้ามล้อเท่ากับ 258.5 เมตร ในรถไฟจริง

จากทฤษฎี อัตราย่อส่วนเชิงกล ($\varphi_v = 2.83, \varphi_t = 2.83, \varphi_a = 1$)
จะได้ ความเร็ว20 กิโลเมตรต่อวินาที หรือ 5.56 เมตรต่อวินาที อัตราหน่วง 0.65 เมตรวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 1.54 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ระยะทางที่ได้คือ 32.3 เมตร

ในทางการทดลอง

ตารางที่ 4.19 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	2.20	2.40	2.20	2.20	2.30	2.26
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.64	0.92	0..98	0.72	0.74	0.80

หาอัตราหน่วงมอเตอร์ได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0$ เมตรต่อวินาที

จากตารางที่ 4.3 ค่าเวลาของการหน่วงมอเตอร์คือ 3.02 วินาที
จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{20}{3.02} \times \frac{5}{18} = 1.84 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

หาอัตราหน่วงชุดทดลองได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0$ เมตรต่อวินาที

จากตารางเก็บค่าเวลาข้างบนจะได้ค่าเวลาของการหน่วงชุดทดลองคือ 2.26 วินาที

จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{20}{2.26} \times \frac{5}{18} = 2.40 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดขับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.40 - 1.84 = 0.56 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

และจากการทดลองจะได้ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอัตราหน่วง 0.56 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 0.80 วินาที

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

จะได้ระยะทาง 32 เมตร

ดังนั้นเมื่อเราใช้หลักการ ขยายอัตราส่วนเชิงกล กลับเพื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับของจริงจะได้ $32 \times 8 = 256$ เมตร

หาค่าความคลาดเคลื่อนจาก

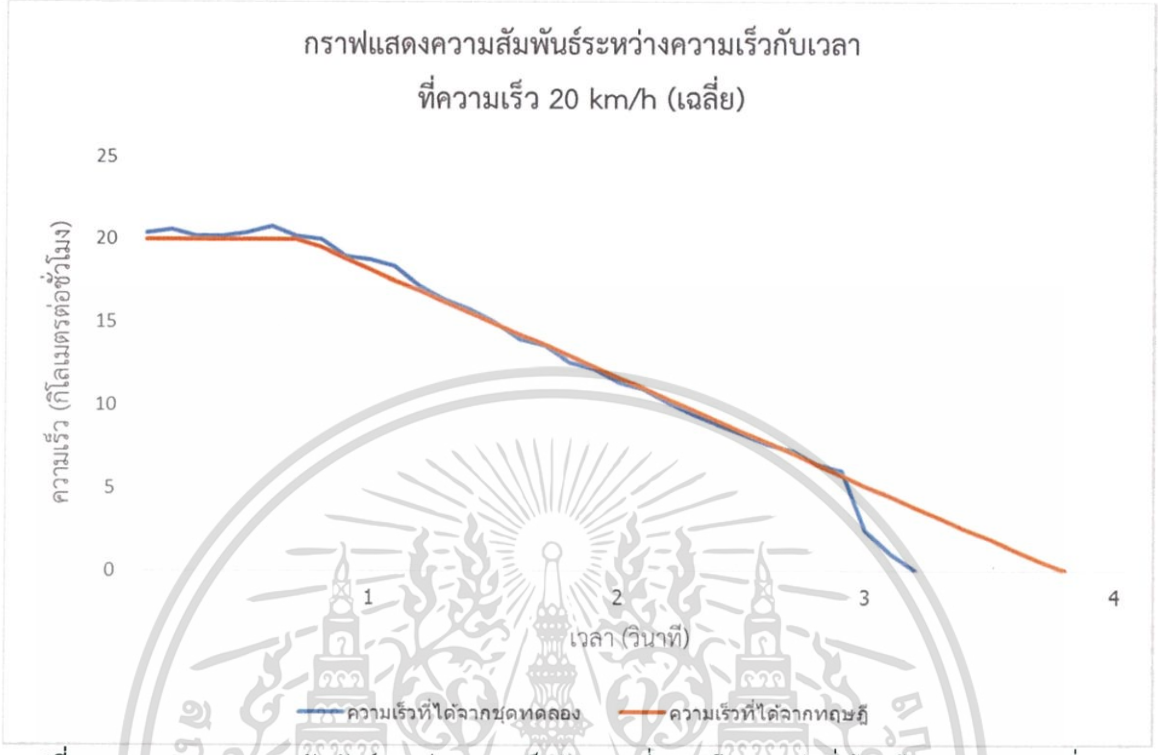
$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

จะได้

$$\frac{|258.7 - 256|}{258.7} \times 100 = 1.04\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงกราฟแนวโน้มที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในการทดลอง 5 ครั้ง(เฉลี่ย)ได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง

การทดลองครั้งที่ 4

กำหนดให้วิ่งด้วยความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยใช้อัตราหน่วงที่ 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้ากระบอกสูบเป็นเวลา 4.35 วินาที และทำการเพิ่มมวลเข้าไปอีก 10 กิโลกรัม กำหนดระยะการห้ามล้อจากสมการที่ (2.10) ดังนี้

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ทำให้ได้ระยะทางการห้ามล้อเท่ากับ 999.7 เมตร ในรถไฟจริง

จากทฤษฎี อัตราย่อส่วนเชิงกล ($\varphi_v = 2.83, \varphi_t = 2.83, \varphi_a = 1$)

จะได้ ความเร็ว 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 11.77 เมตรต่อวินาที อัตราหน่วง 0.65 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 1.54 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

ระยะทางที่ได้คือ 124.84 เมตร

ในทางการทดลอง

ตารางที่ 4.20 ตารางเก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มน้ำหนัก 10 กิโลกรัม

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลาที่เกิดจากการห้ามล้อ	4.50	4.40	4.50	4.40	4.40	4.44
เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ	0.64	0.92	0..98	0.72	0.74	0.80

หาอัตราหน่วงมอเตอร์ได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0$ เมตรต่อวินาที

จากตารางที่ 4.2 ค่าเวลาของการหน่วงมอเตอร์คือ 5.70 วินาที

จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{5.70} \times \frac{5}{18} = 2.06 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

หาอัตราหน่วงชุดทดลองได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = v_0 + dt$$

โดยที่ $v = 0\frac{m}{s^2}$ จากตารางเก็บค่าเวลาข้างบนจะได้ค่าเวลาของการหน่วงชุดทดลองคือ 4.44 วินาที

จะได้

$$d = \frac{v_0}{t} = \frac{42.4}{4.44} \times \frac{5}{18} = 2.65 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราจะได้ความหน่วงของรถไฟจำลองคือ

$$d_{\text{ชุดทดลองทั้งหมด}} - d_{\text{ชุดชับเคลื่อน}} = d_{\text{ของชุดรถไฟจำลอง}}$$

จะได้

$$2.65 - 2.06 = 0.59 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

และจากการทดลองจะได้ความเร็ว 42.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอัตราหน่วง 0.59 เมตรต่อวินาที^{2} เวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ (t_e) 0.80 วินาที

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2.10)

$$d = \frac{[\frac{v_0}{3.6}]^2}{2[s_b - t_e[\frac{v_0}{3.6}]]}$$

จะได้ระยะทาง 127 เมตร

ดังนั้นเมื่อเราใช้หลักการ ขยายอัตราส่วนเชิงกล กลับเพื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับของจริงจะได้ $127 \times 8 = 1016$ เมตร

หาค่าความคลาดเคลื่อนจาก

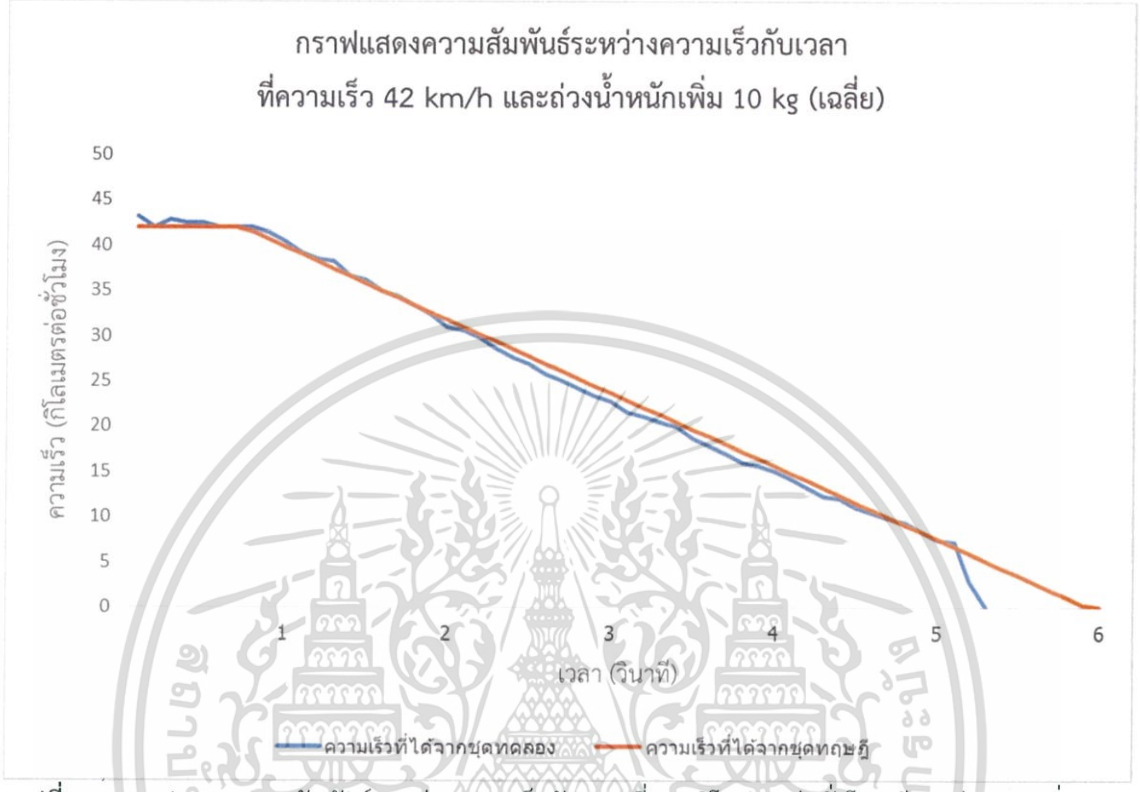
$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

จะได้

$$\frac{|1016 - 999.7|}{999.7} \times 100 = 1.6\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงกราฟแนวโน้มที่ความเร็ว 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและถ่วงน้ำหนักเพิ่ม 10 กิโลกรัมในการทดลอง 5 ครั้ง(เฉลี่ย)ได้ดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ 42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีการถ่วงมวลเพิ่ม 10 กิโลกรัม โดยการทดสอบที่ความเร็วเดิม 5 ครั้ง (เฉลี่ย)

สรุปผลการทดลอง

ผลจากการเปรียบเทียบกราฟระหว่างความเร็วกับเวลาจากแบบจำลองกับทฤษฎีพบว่าค่าจากกราฟแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับแบบทฤษฎีโดยส่วนมาก โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นมาจากเวลาที่เข้ากระบอกสูบห้ามล้อนั้นคุมเวลาได้ไม่ตรงตามทฤษฎี

ผลจากการเปรียบเทียบจากการคำนวณระยะทางจากการย่อแล้วทำการขยายอัตราส่วนเชิงกลขึ้นไปเปรียบเทียบกับระยะทางจริงนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแบบของจริง ทั้งนี้โดยค่าความผิดพลาดนั้นมาจากควบคุมความเร่งให้ตรงตามทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยากและเซ็นเซอร์ไม่สามารถเก็บความเร็วในตอนท้ายของการทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 การทดลองการห้ามล้อเพื่อลดความเร็วจาก 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ในการทดลองนี้เป็นการคำนวณหาระยะทางในการห้ามล้อชะลอที่ความเร็ว 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมงลดลงเหลือ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ว่ามีระยะทางในการชะลอความเร็วเท่าใดโดยที่จะให้เวลาในการลดความเร็วมาเพื่อที่จะเลือกอัตราหน่วงและความดันที่ใช้การชะลอและจะระยะการห้ามล้อจากสมการขององค์กรรถไฟนานาชาติ

ในการทดลอง

กำหนดให้เวลาในการห้ามล้อ 4 s, อัตราหน่วง 0.64 เมตรต่อวินาที^{2}, $t_e = 4.35$ วินาที ความเร็วที่ใช้คือ 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และลดลงเหลือ 56.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถหาระยะทางห้ามล้อได้ดังนี้

$$\mathrm{d} = \frac{\left(\frac{V}{3.6}\right)^2 - \left(\frac{v_0}{3.6}\right)^2}{2\left(s - t_e\frac{v_0}{3.6}\right)} \qquad (4.5)$$

จะได้ระยะทางที่ชะลอความเร็วคือ 964 เมตร

การทดลอง

ทางทฤษฎี อัตราย่อส่วนเชิงกล

$(\varphi_v = 2.83, \varphi_t = 2.83, \varphi_a = 1)$

ทางทฤษฎี $t_e = 1.54$ วินาที

ความเร็วที่ใช้คือ 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

สามารถหาระยะทางห้ามล้อทางทฤษฎีจากสมการที่ (4.5) ได้ดังนี้

$$\mathrm{d} = \frac{\left(\frac{V}{3.6}\right)^2 - \left(\frac{v_0}{3.6}\right)^2}{2\left(s - t_e\frac{v_0}{3.6}\right)}$$

จะได้ระยะทางที่ชะลอความเร็วคือ 120.3 เมตร

ในการทดลองจะได้อัตราหน่วงรถไฟคือ 0.62 เมตรต่อวินาที^{2}

การเก็บค่าเวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ตารางเก็บค่าเวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบในการชะลอความเร็ว

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
เวลา	0.64	0.92	0.98	0.72	0.74	0.80

หาระยะทางจากการทดลองได้ดังสมการที่ 4.5

$$\mathrm{d} = \frac{\left(\frac{V}{3.6}\right)^2 - \left(\frac{v_0}{3.6}\right)^2}{2\left(s - t_e \frac{v_0}{3.6}\right)}$$

จะได้ระยะทางทางทฤษฎีคือ 120.3 เมตร

เมื่อ ขยายอัตราส่วนเชิงกล ขึ้นไปจะได้ระยะทางคือ 962.4 เมตร

หาค่าความคลาดเคลื่อนจาก

$$\frac{|\text{ค่าทฤษฎี} - \text{ค่าที่ได้}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

จะได้

$$\frac{|964 - 962.4|}{964} \times 100 = 0.2\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงกราฟแนวโน้มการลดความเร็วจาก 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เหลือ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในการทดลอง 5 ครั้ง(เฉลี่ย)ได้ดังนี้

รูปที่ 4.10 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาเมื่อลดความเร็วจาก 53 km/h เหลือ 20 km/h โดยการทดสอบ 5 ครั้ง (เฉลี่ย)

และเมื่อได้อัตราเร่งจากการทดลองมาแล้วจึงกลับไปดูตารางความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร่งจะได้ ความดันที่จะใช้เพื่อให้ได้อัตราหน่วงเท่ากับ 3.4 บาร์

สรุปผลการทดลอง

การชะลอความเร็วที่ได้จากการคำนวณนั้นใกล้เคียงกับทฤษฎี และในการเปรียบเทียบระยะทางการห้ามล้อจากกราฟและทางทฤษฎีนั้นมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากความหน่วงที่ไม่อาจเป็นไปตามทางทฤษฎีและเวลาที่ลมเข้าเต็มกระบอกสูบนั้นไม่อาจควบคุมได้ตามทฤษฎี การย่อส่วนข้างต้นจึงทำให้เกิดความไม่แม่นยำในการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ การเปลี่ยนค่าความเร็วของรถไฟเพื่อวัดระยะห้ามล้อของรถไฟและการเพิ่มมวลถ่วงเพิ่มขึ้นอีกเพื่อพิจารณาการห้ามล้อและระทางการห้ามล้อของแบบจำลองและผลทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อได้ผลการทดลองจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีแล้ว ผู้ทำการทดลองจะได้ทราบถึงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ รวมถึงความผิดพลาดและข้อเสนอแนะในการนำมาซึ่งการพัฒนาชุดการทดลองนี้เป็นลำดับต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. การสร้างชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน โดยใช้กฎความคล้ายคลึงทางกลพบว่า เมื่อทำการลดขนาดความยาวลงในอัตราส่วน 1:8 ทำให้มวลสามารถลดลงได้ 512 เท่าจากของจริงซึ่งง่ายต่อการดำเนินงานและติดตั้งอุปกรณ์เป็นอย่างมาก โดยสามารถลดมวลรถไฟจากมวลจริง 15,360 กิโลกรัมเหลือเพียง 30 กิโลกรัม

2. ชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน สามารถทำให้เห็นภาพการทำงานของอุปกรณ์ห้ามล้อจริงได้อย่างชัดเจน โดยเห็นภาพรวมในการทำงานจนถึงกระบวนการคลายห้ามล้อได้

3. เมื่อทำการทดลองพบว่า ชุดทดลองระบบห้ามล้อของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคันสามารถสร้างอัตราหน่วงได้ใกล้เคียงกับอัตราหน่วงในรถไฟจริง และเมื่อคิดระยะทางพร้อมขยายอัตราส่วนทางกลจะพบว่า ระยะทางการห้ามล้อในการทดลองมีค่าใกล้เคียงระยะห้ามล้อจากการคำนวณทางทฤษฎี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 3-10% เมื่อเทียบกับระยะห้ามล้อทางทฤษฎี

5.3 ปัญหาจากการศึกษา

ในการสร้างค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรถไฟจำลองทำได้แค่ค่าโดยประมาณหรือค่าใกล้เคียงกับค่าตัวแปลที่ที่คำนวณได้เท่านั้นไม่สามารถทำให้เป็นค่าที่เที่ยงตรงและแม่นยำได้เนื่องจากค่าวัสดุต่างๆที่ใช้นั้นมีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากันทุกชิ้น รวมไปถึงพื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสัมผัสผ้าห้ามล้อกับจานห้ามล้อนั้นอาจจะไม่แม่นยำรวมไปถึงค่าความเสียดทานนั้นอาจจะไม่เหมือนกับของจริงแม้กระทั้งใช้วัสดุเหมือนกันซึ่งก็ส่งผลต่อความแม่นยำโดยรวม อีกทั้งยังการส่งลมผ่านสายลมไปยังกระบอกสูบนั้นมีการสูญสียแรงดันลมออกไปทางข้อต่อต่างๆทำให้กระบอกสูบทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพซึ่งต้องทำการปรับแรงดันลมให้สูงขึ้นกว่าความเป็นจริงเพื่อให้เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในชุดทดลองนี้ยังไม่สามารถทำการทดลองในรูปแบบการชะลอความเร็วได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากไม่สามารถกำหนดแรงดันไฟได้และไม่มีเซ็นเซอร์ที่สามารถคลายลมห้ามล้อได้เมื่อถึงความเร็วที่ต้องการ ในอนาคตสามารถปรับปรุงชุดการทดลองโดยการเปลี่ยนชุดควบคุมมอเตอร์แบบที่กำหนดแรงดันได้

2. กระบอกห้ามล้อของชุดทดลองมีขนาดเล็กและไม่สามารถกำหนดแรงกระทำได้เหมือนกระบอกห้ามล้อของจริง ทำให้เวลาที่ลมเข้าสู่กระบอกสูบห้ามล้อเร็วกว่าความเป็นจริง ในอนาคตสามารถปรับปรุงชุดการทดลองโดยการเปลี่ยนกระบอกห้ามล้อใหม่และสปริงของกระบอกห้ามล้อได้

3. ในการศึกษาการห้ามล้อรถไฟจำลองนั้นต้องคำนึงถึงตัวแปลที่มีผลหลักคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยสิ่งที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นได้แก่ อุณหภูมิ, พื้นที่ผิวสัมผัส และ แรงกดที่ผิวห้ามล้อ ในการทดลองจึงใช้ได้เพียงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกับการรถไฟจริงเท่านั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านงบประมาณที่ใช้สร้างเครื่องทดสอบระบบห้ามล้อ จึงข้อแนะนำให้ใช้วัสดุผ้าห้ามล้อเดียวกับการรถไฟจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Moritz Gretzschel and Alfred Jaschinski(2004). Design of an active wheelset on a scaled roller rig.Vehicle.

[2] Paolo Presciani, Monica Malvezzi, Giuseppe Luigi Bonacci and Monica Balli, DEVELOPMENT OF A BRAKING MODEL FOR SPEED SUPERVISION SYSTEMS, University of Florence.

[3] Rakesh Chandmal Sharma, Manish Dhingra and Rajeev Kumar Pathak, (2015), Braking Systems in Railway Vehicles, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181.

[4] Beom-Gyu Eom, Bu-Byoung Kang, Hi Sung Lee, (2011), Design of Small-Scale Derailment Simulator for Investigating Bogie Dynamic, International Journal of Railway.

[5] Alfred Jaschinski, Hugues Chollet, Simon Iwnicki, Alan Wickens and Jurgen Von Wurzen, (1999), The Application of Roller Rigs to Railway Vehicle Dynamic, Manchester Metropolitan University.

[6] Cătălin Cruceanu (2012). Train Braking, Reliability and Safety in Railway, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), ISBN: 978953-51-0451-3, InTech.

[7] David Barney, David Haley and George Nikandros, Calculating Train Braking Distance, Signal and Operational Systems Queensland Rail.

[8] Ferdinand Beer, Russell Johnston, John Dewolf, David Mazurek and Sanjeev Sanghi (2012), Mechanic of Materials.

[9] Izumi Hasegawa and Seigo Uchida, (1999), Japan Railway & Transport Review 20, EJRCF.

[10] Matej PACHA, (2016), Pneumatic Brake Force Modelling and Verification for Train Simulator Software, University of Zilina.

[11] BELGIAN RAILWAYS, (2007), Basics of pneumatic brakes SNCB, SNCB (แก้รูป)

[12] Bruce R Munson, Donald F Young, Theodore H Okiishi, Wade W Huebsch (2010), Fundamentals of Fluid Mechanics (แก้รูป)

[13] นคร จันทศร, (2554), ช่างรถไฟความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ(ฉบับที่ 1), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (แก้รูป)

[14] ภาณุฤทธิ์ ยุกตะทัต (2554) การออกแบบเครื่องจักรกล.

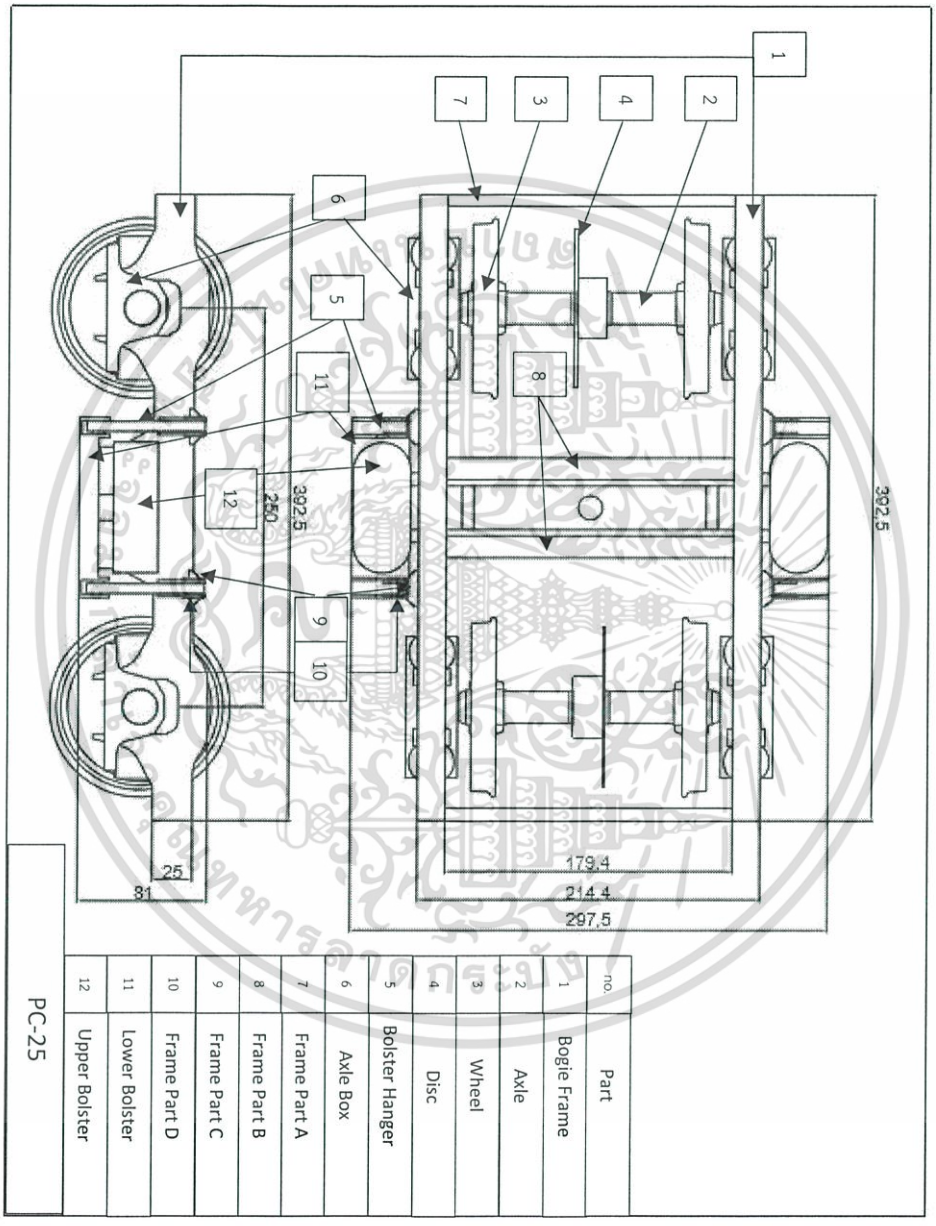
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

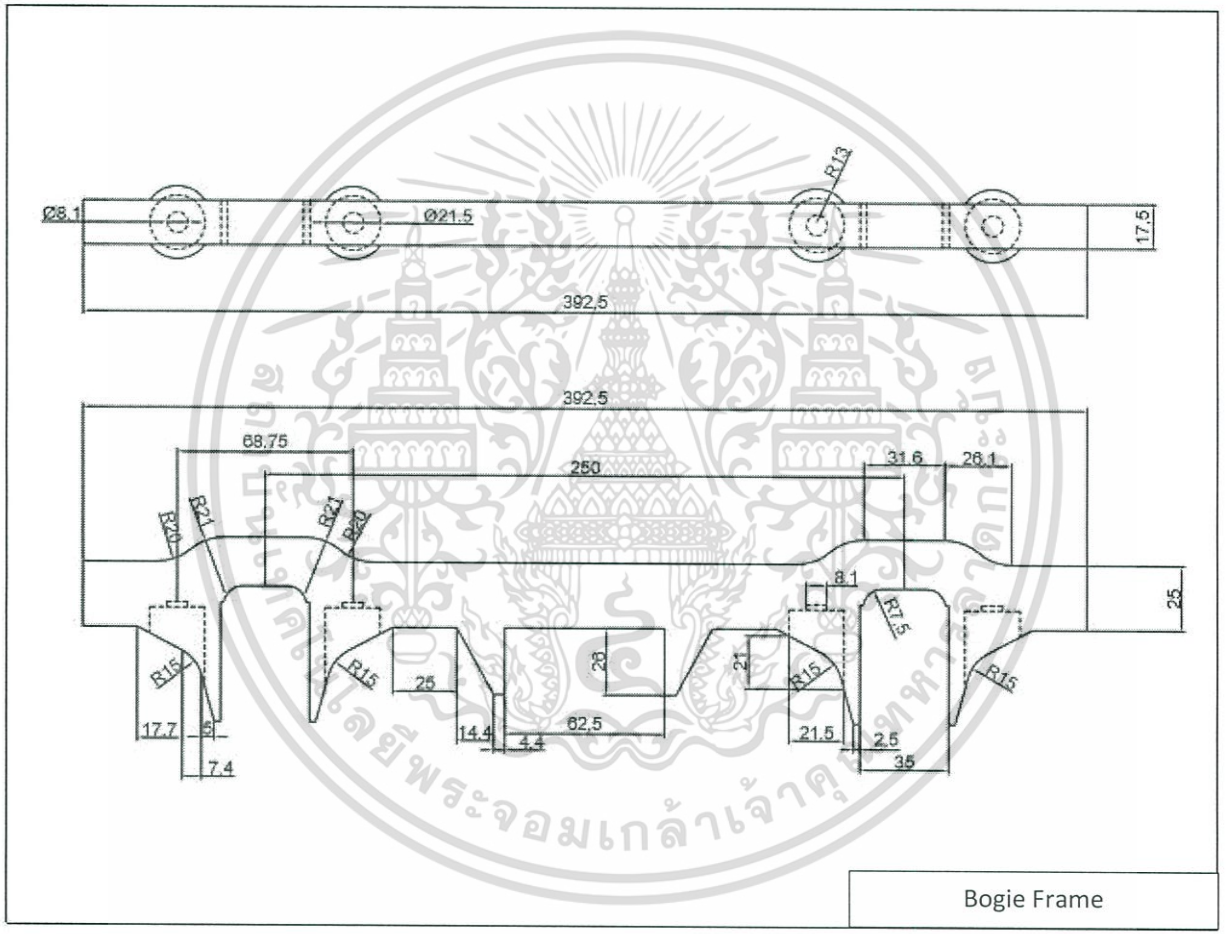
ภาคผนวก ก

แบบจำลองแคร่รถไฟกับตู้โดยสารแบบครึ่งคัน

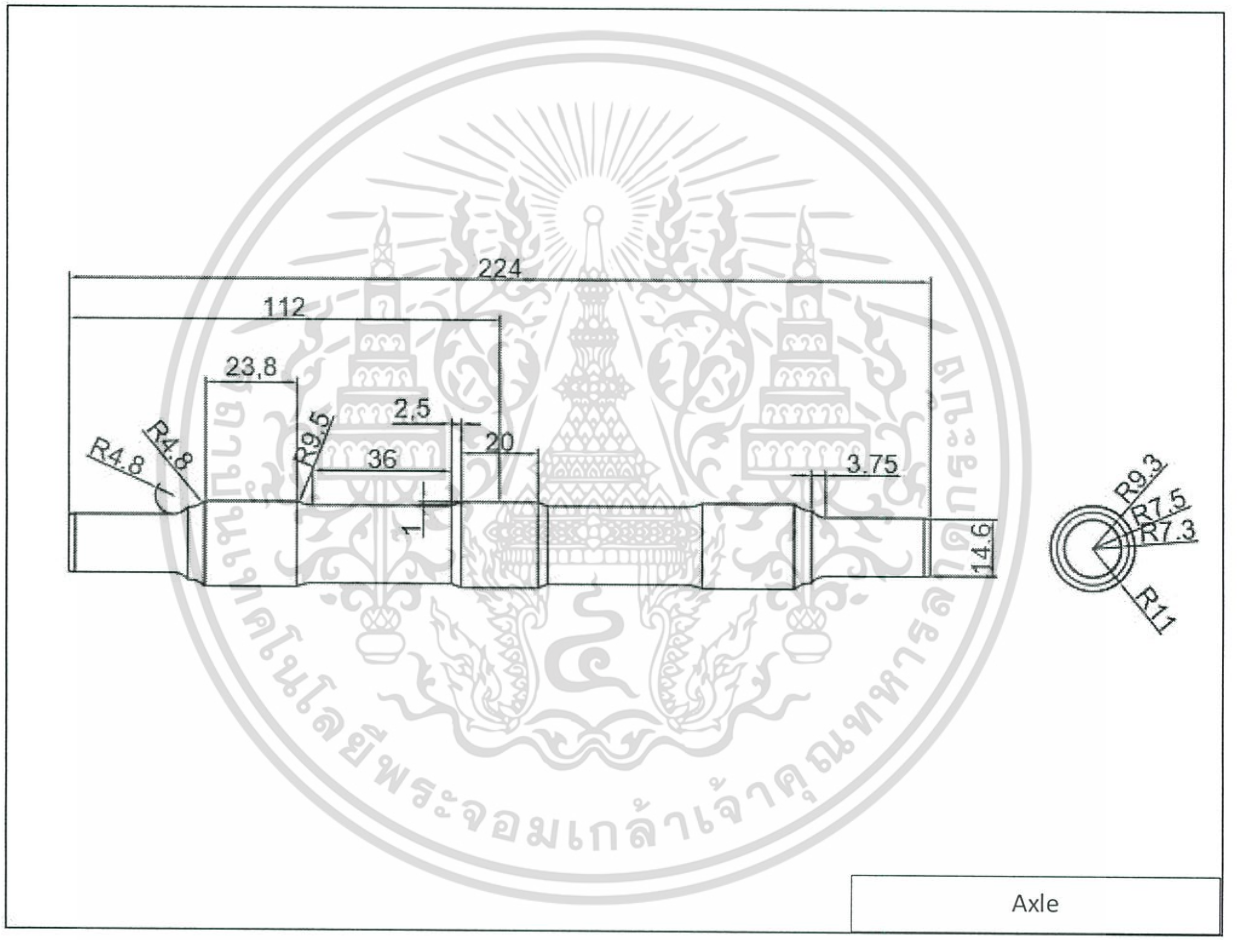


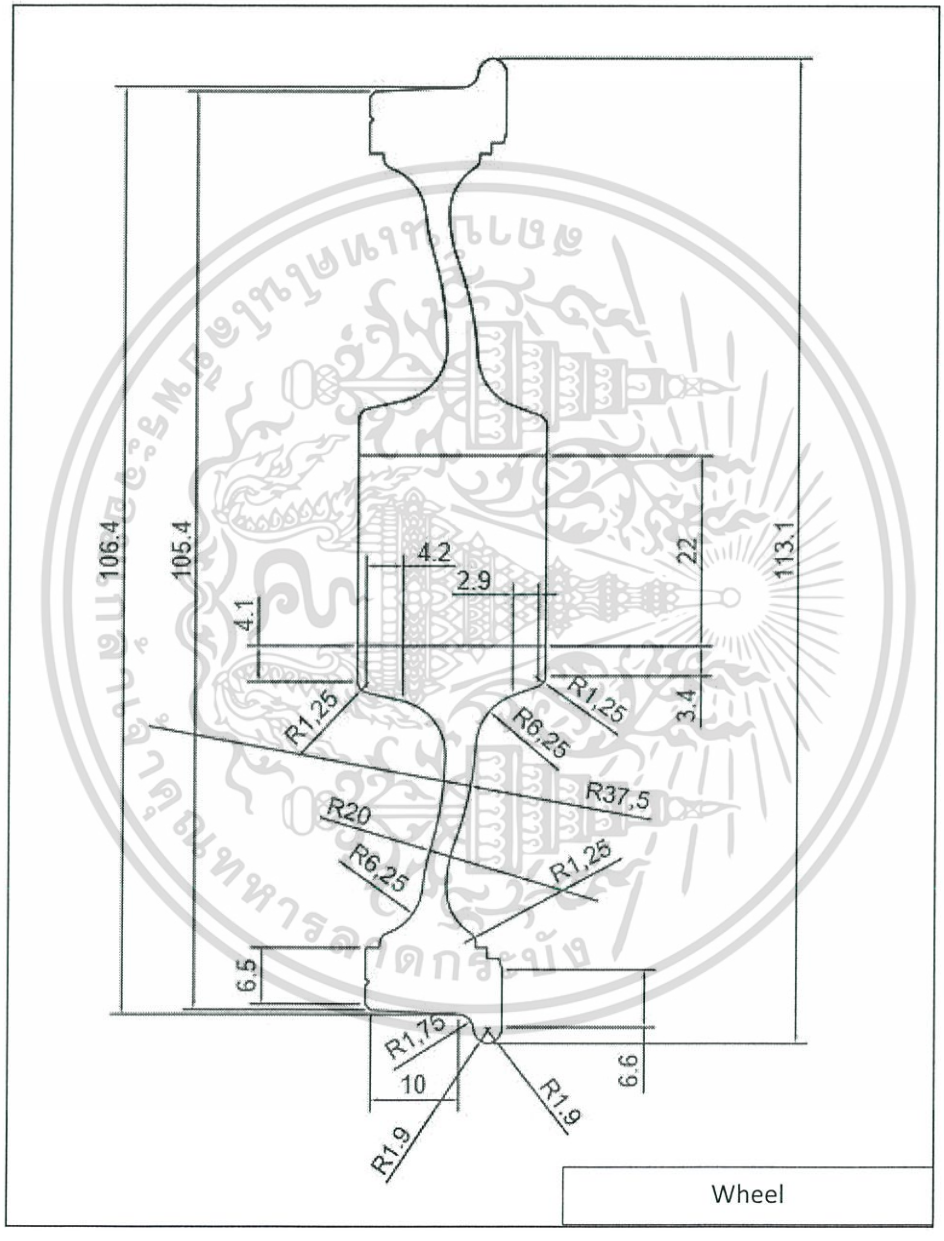
PC-25

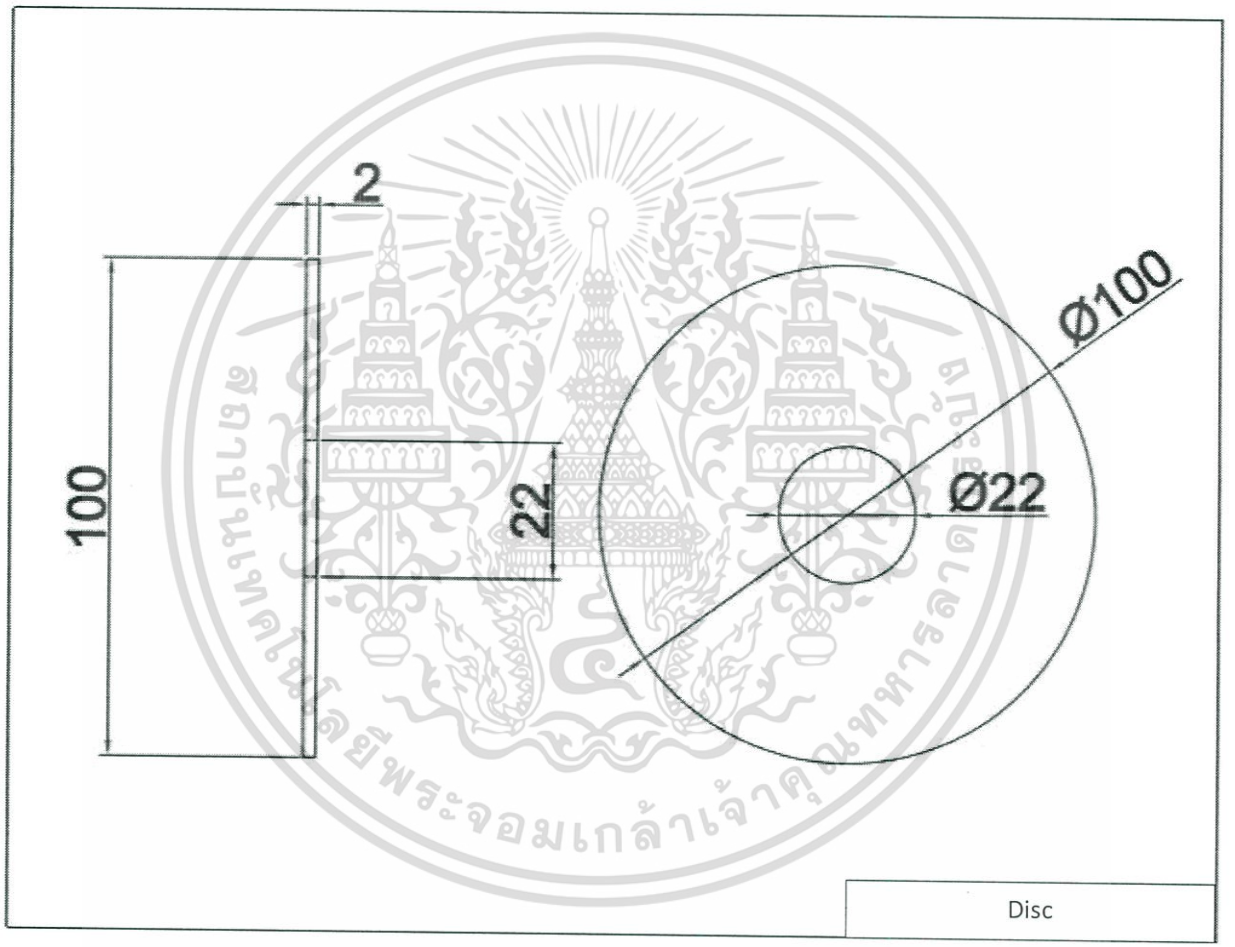
no.	Part
1	Bogie Frame
2	Axle
3	Wheel
4	Disc
5	Bolster Hanger
6	Axle Box
7	Frame Part A
8	Frame Part B
9	Frame Part C
10	Frame Part D
11	Lower Bolster
12	Upper Bolster

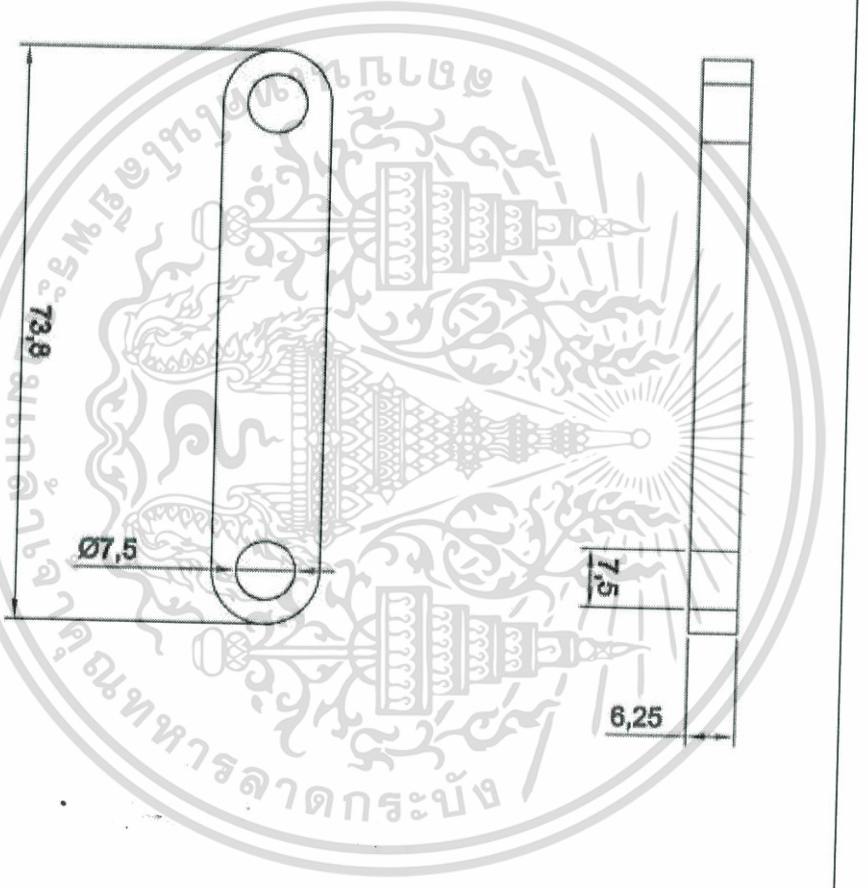

Ø8.1
Ø21.5
R13
17.5
392.5
392.5
68.75
250
31.6
26.1
R20
R21
R21
R20
8.1
R7.5
25
R15
R15
25
28
21
R15
R15
17.7
7.4
14.4
4.4
62.5
21.5
2.5
35

Bogie Frame

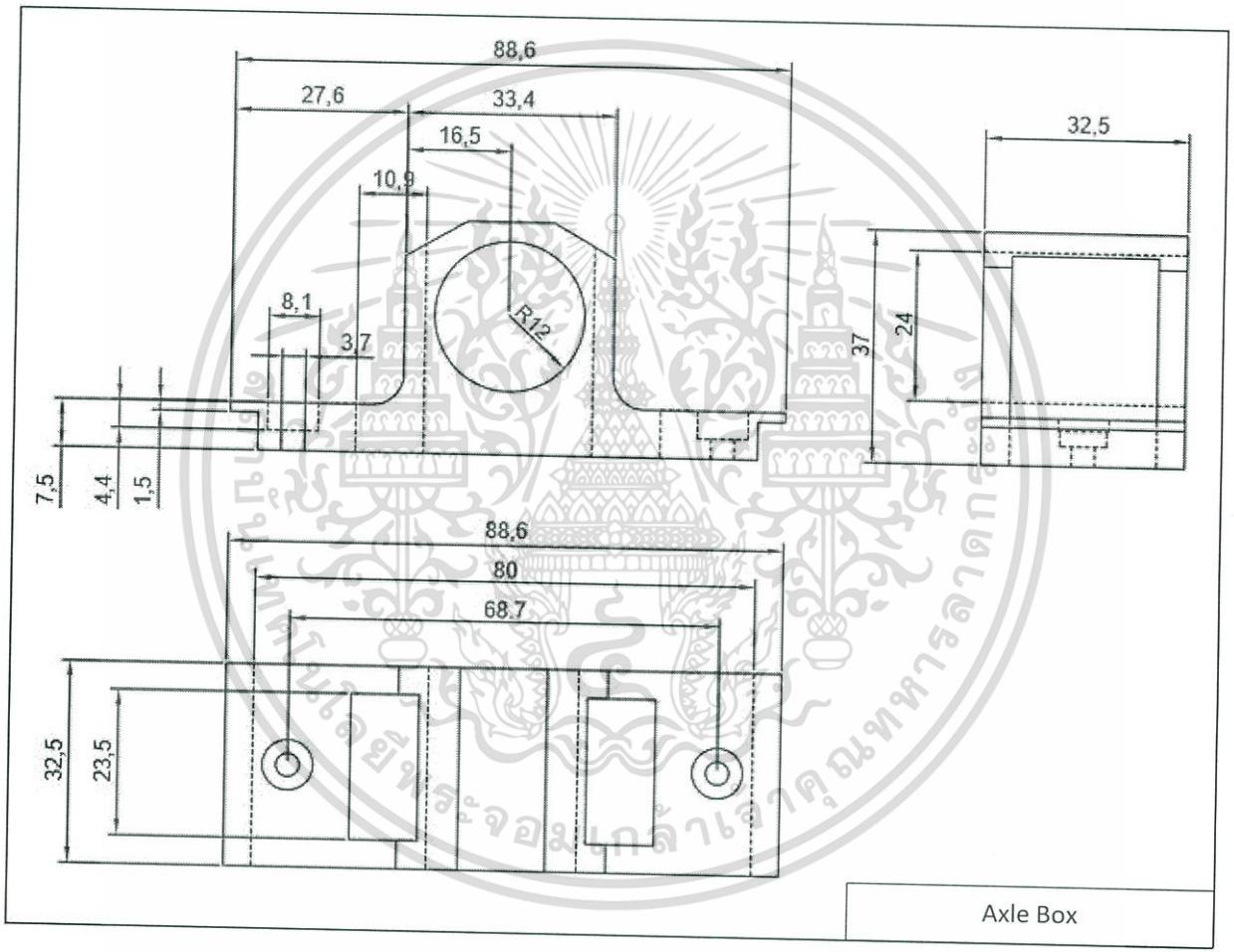

224
112
23.8
2.5
20
36
3.75
R4.8
R4.8
R9.5
1
14.6
R9.3
R7.5
R7.3
R11
Axle

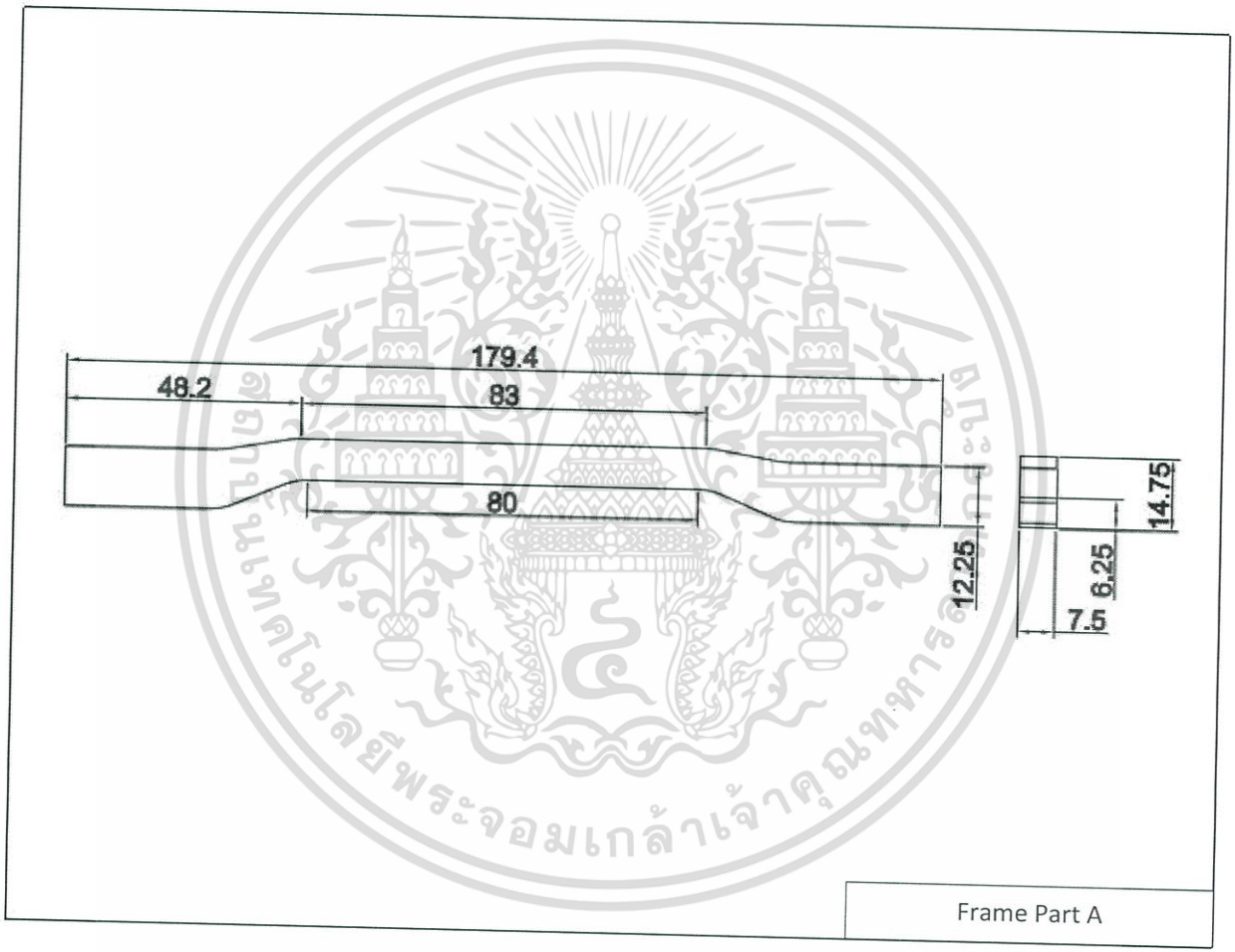

106.4
105.4
4.2
2.9
4.1
22
113.1
R1,25
R1,25
3.4
R6,25
R37,5
R20
R6,25
R1,25
6.5
R1,75
10
R1.9
R1.9
6.6
Wheel

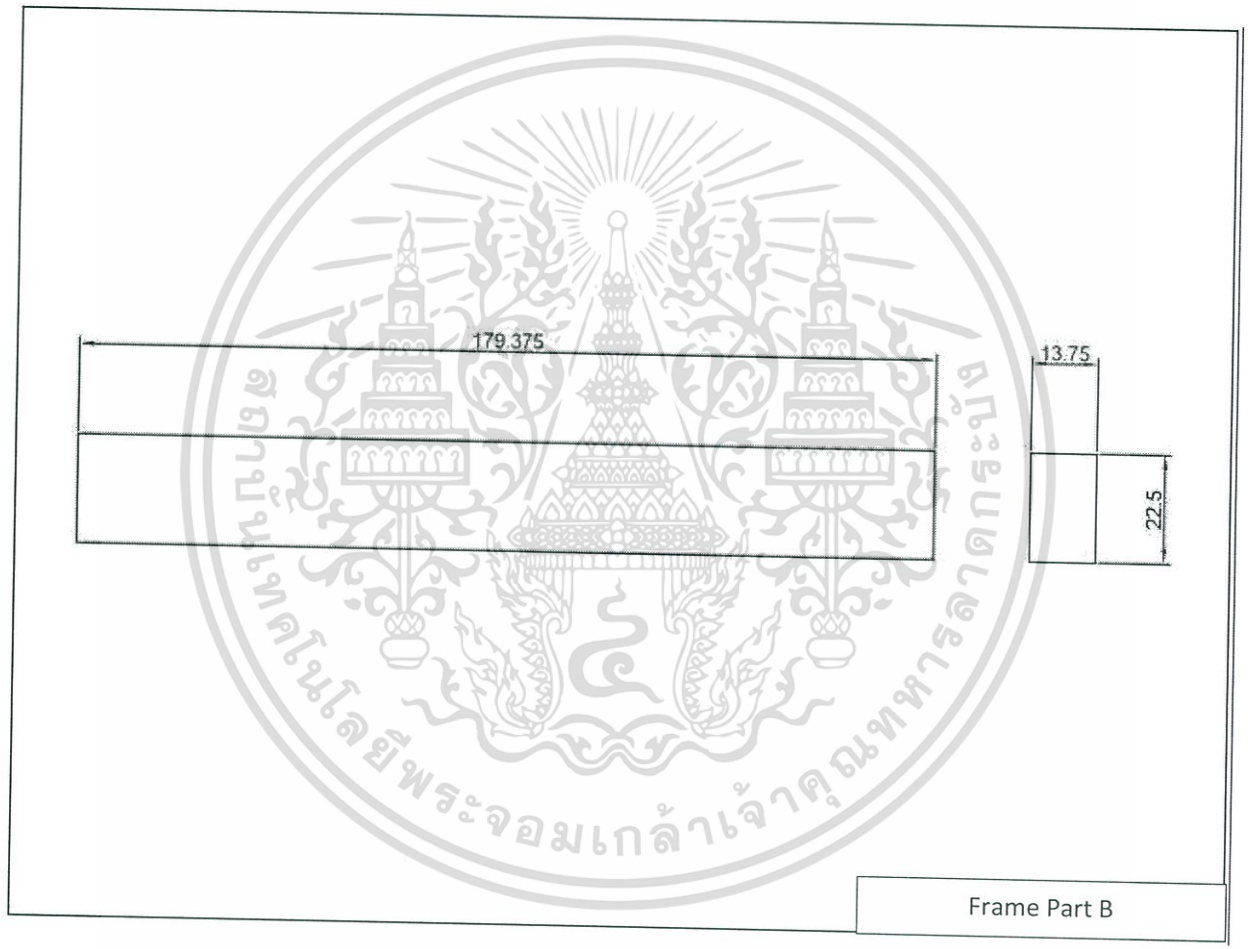

2
100
22
Ø100
Ø22
Disc

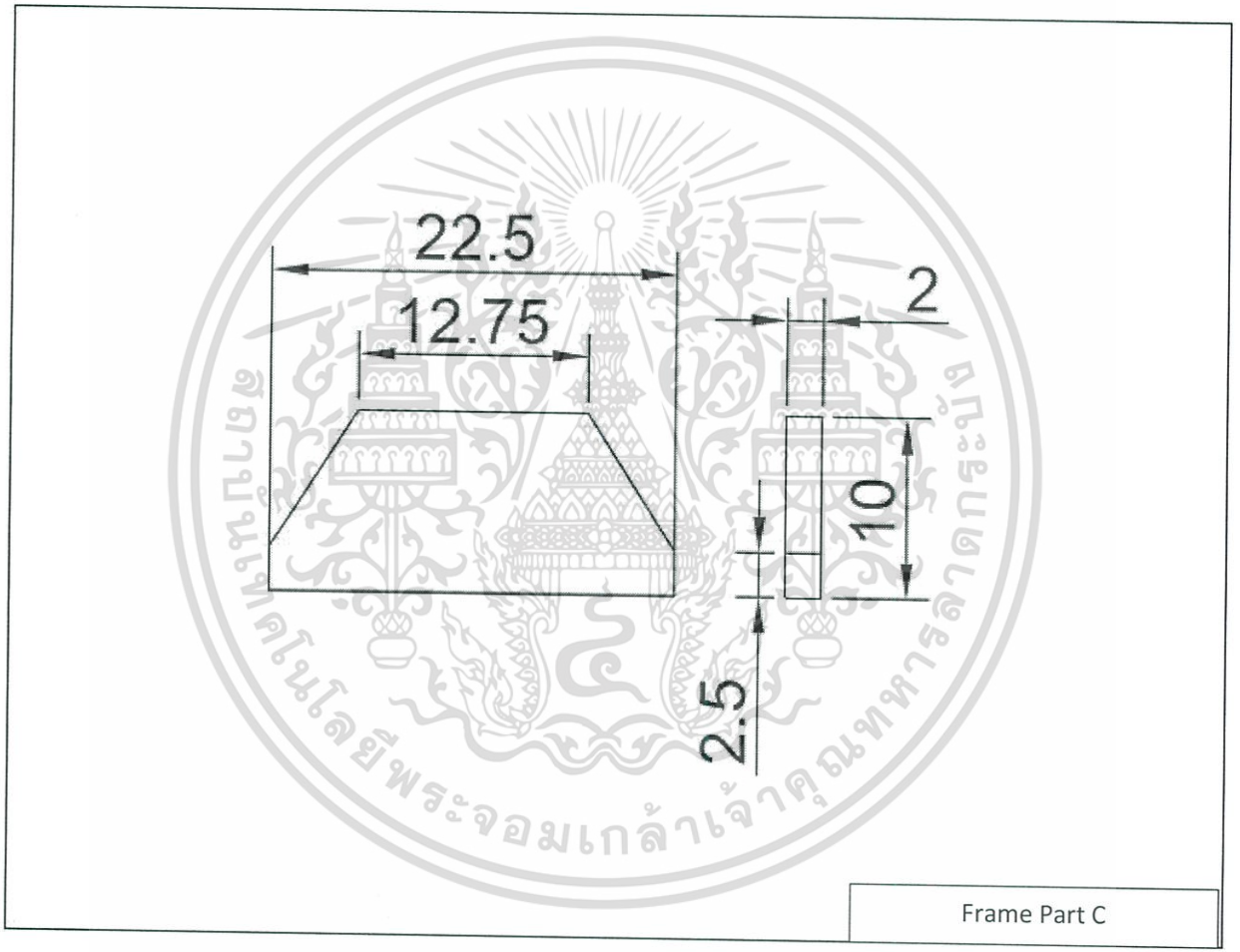


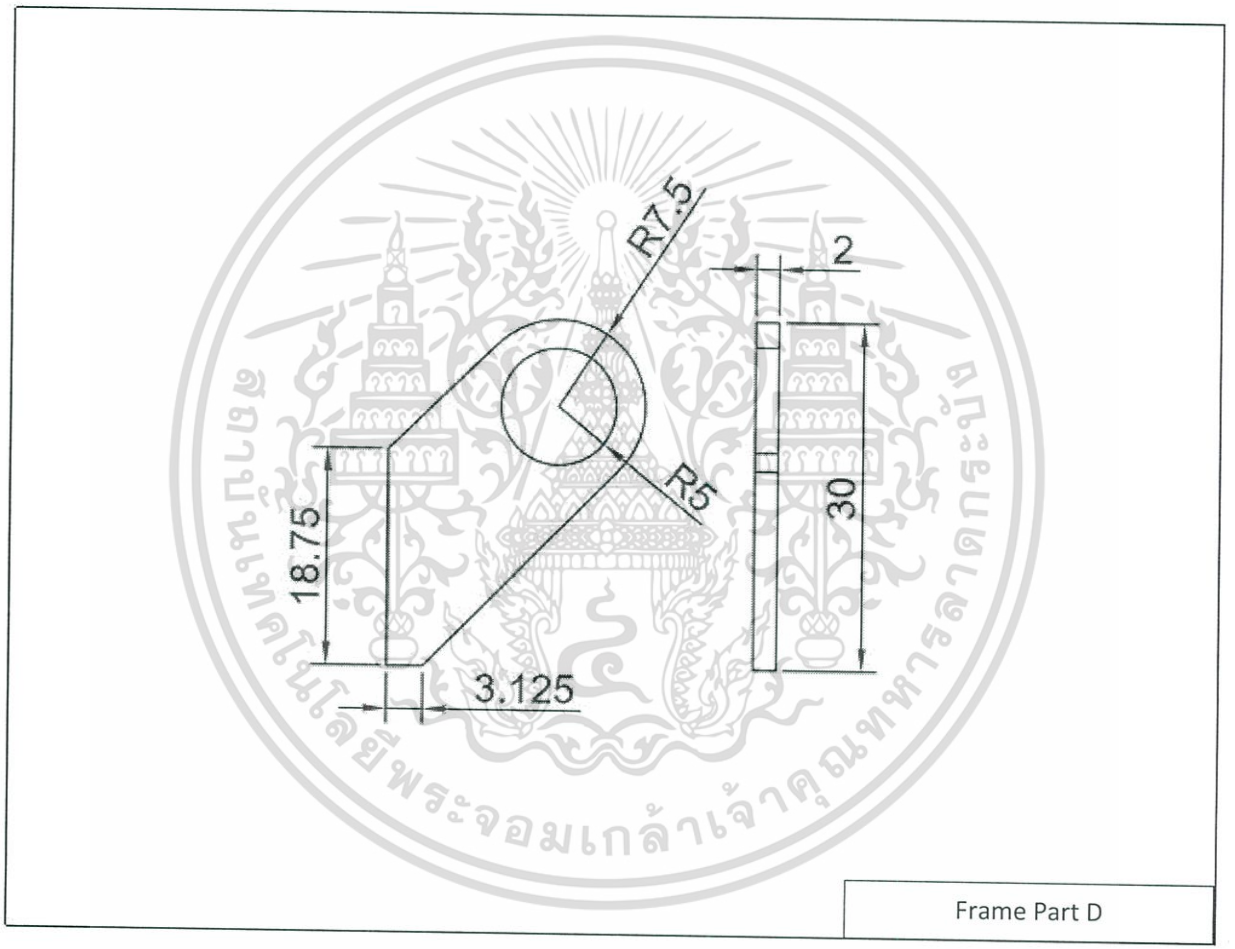
Bolster Hanger


88,6
27,6
33,4
16,5
10,9
8,1
3,7
R12
32,5
37
24
7,5
4,4
1,5
88,6
80
68,7
32,5
23,5
Axle Box

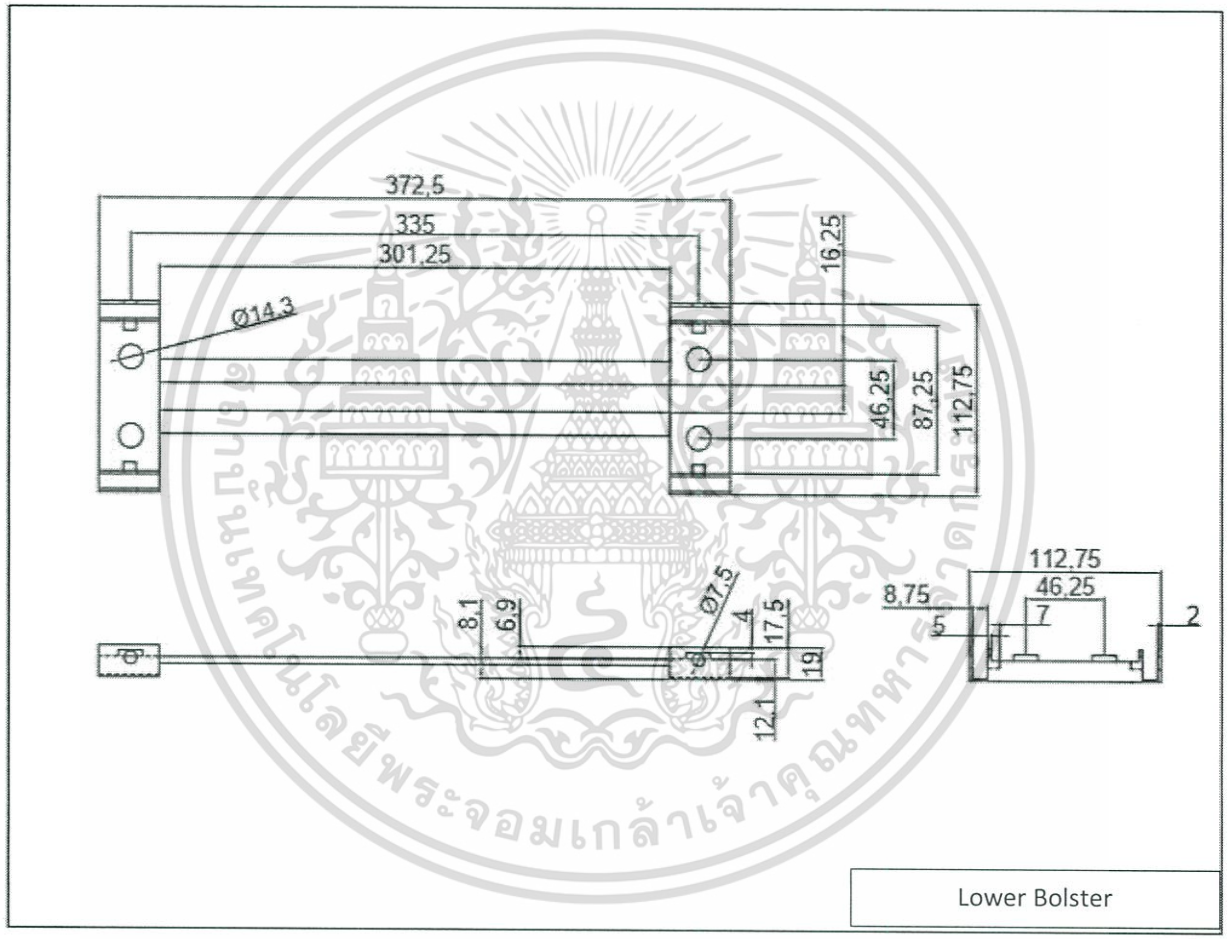

179.4
48.2
83
80
12.25
14.75
6.25
7.5
Frame Part A

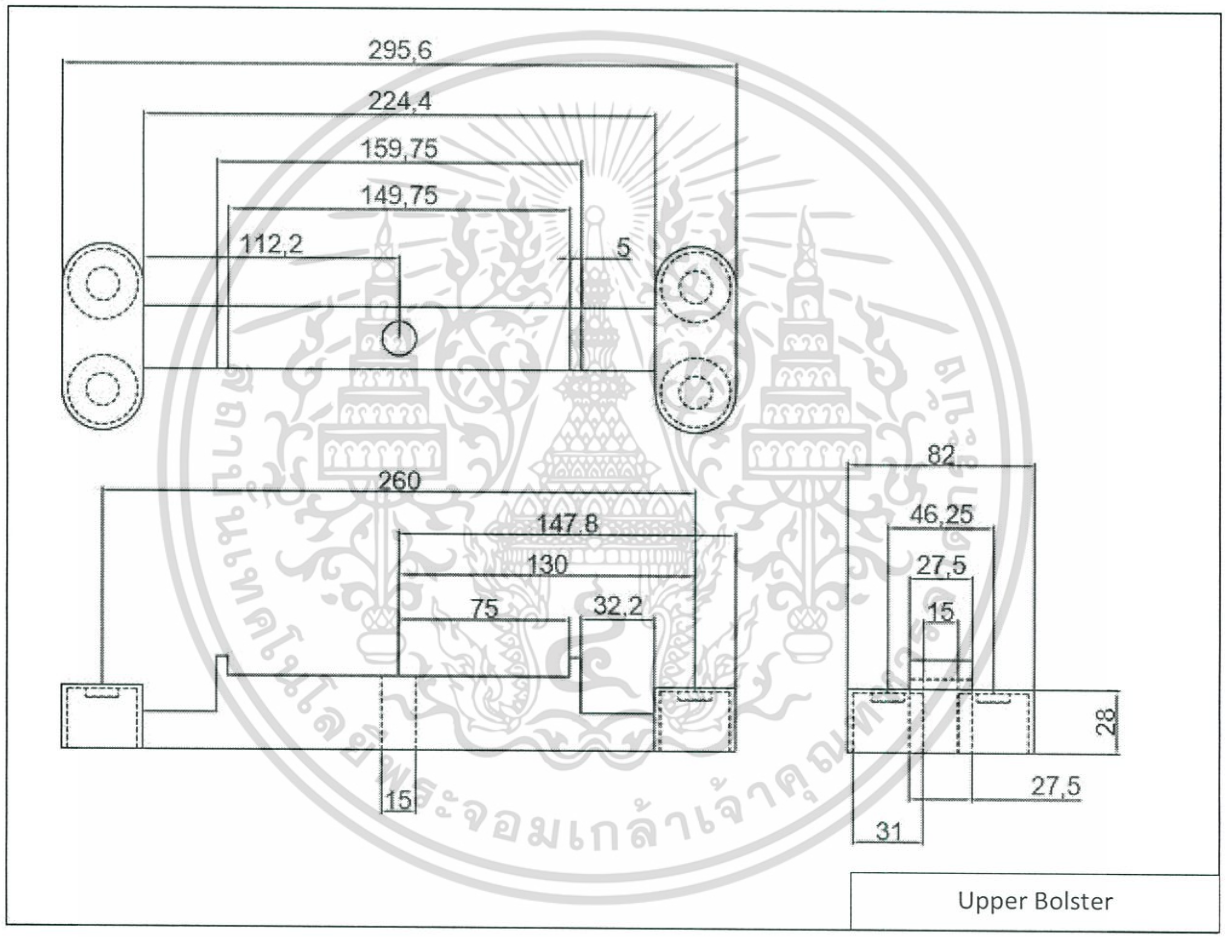

179.375
13.75
22.5
Frame Part B


22.5
12.75
2
10
2.5
Frame Part C



Frame Part D

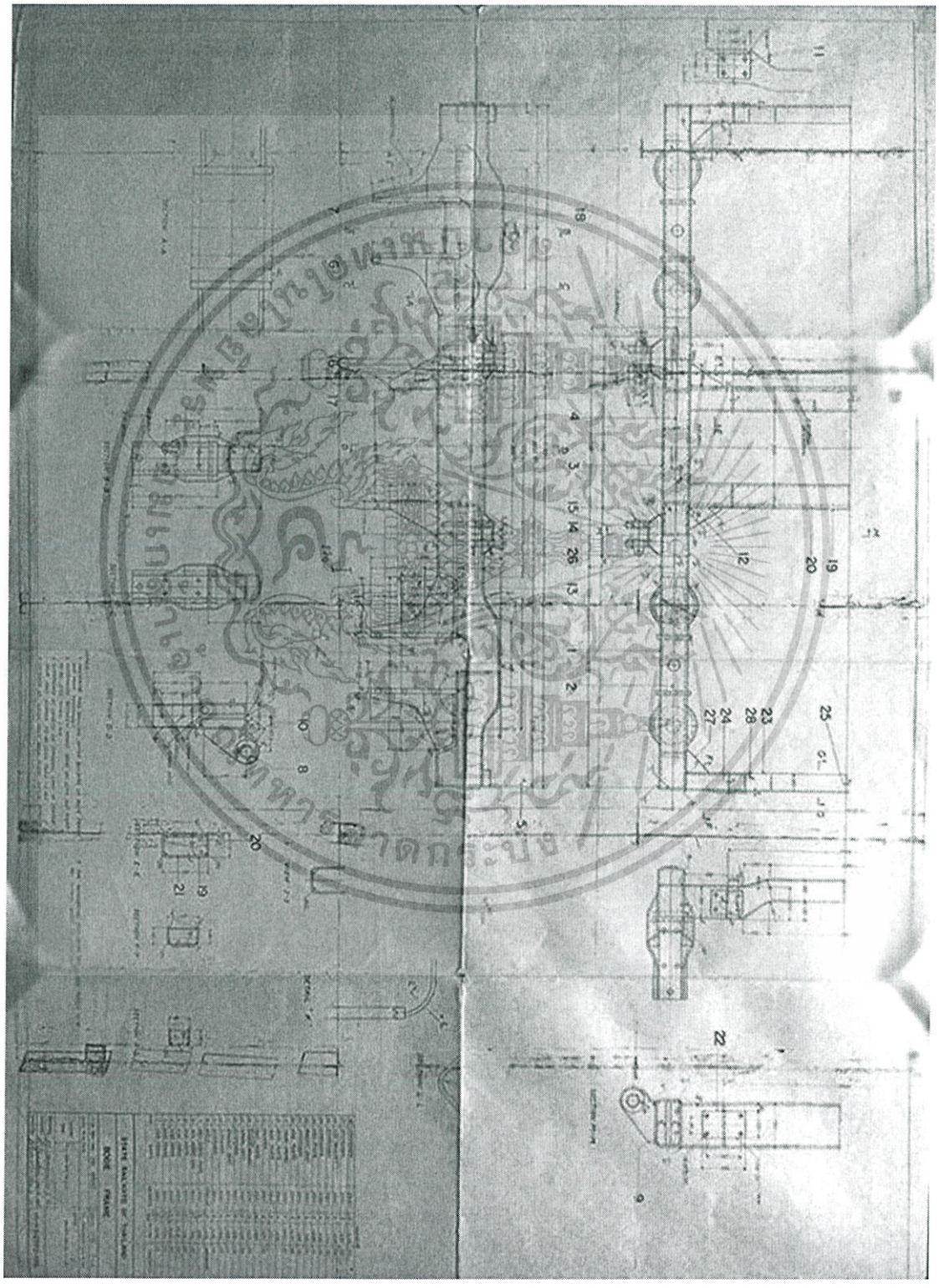

372,5
335
301,25
Ø14,3
16,25
46,25
87,25
112,75
112,75
46,25
8,75
7
5
2
8,1
6,9
Ø7,5
4
17,5
19
12,1
Lower Bolster

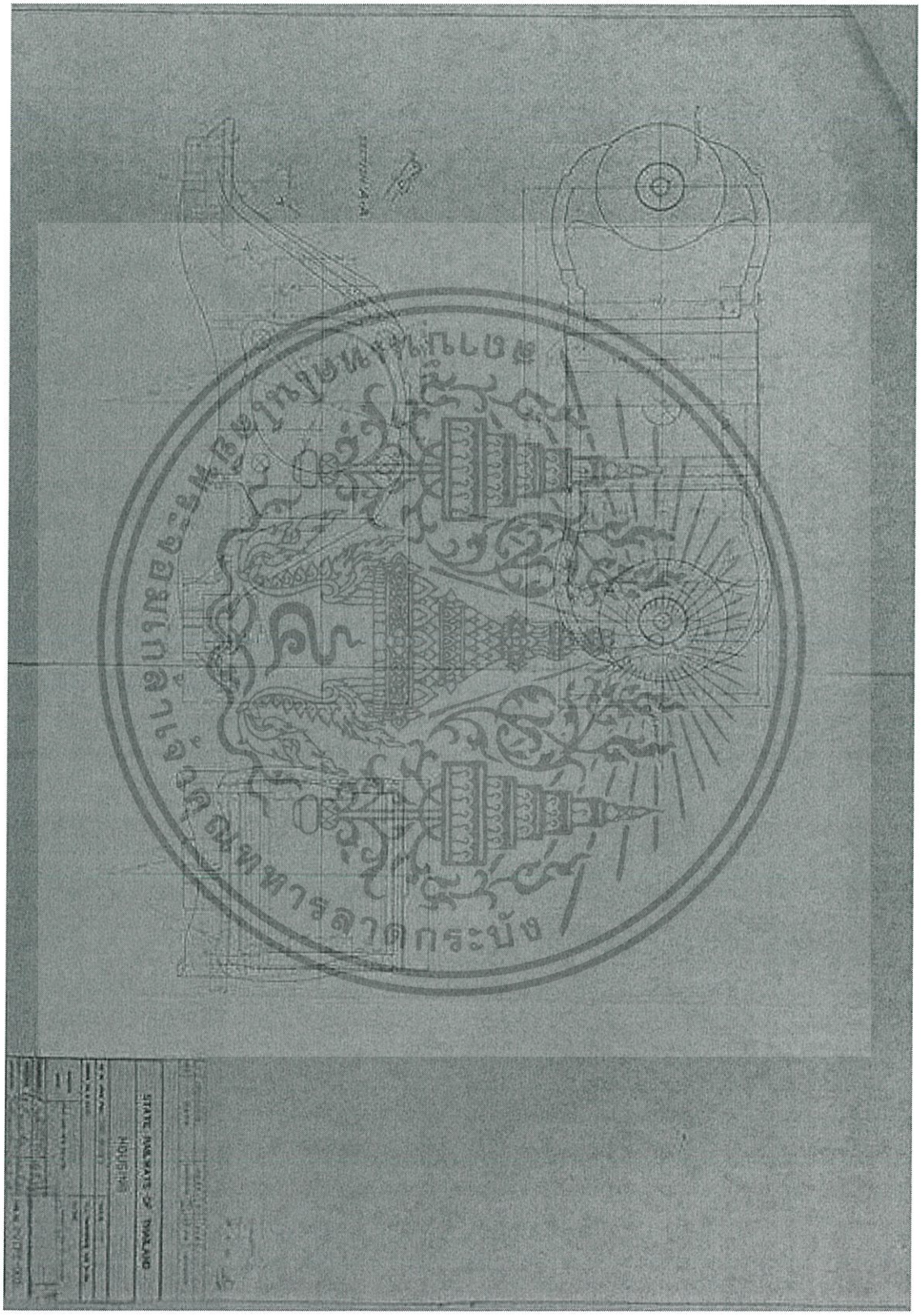


Upper Bolster

ภาคผนวก ข

แบบแคร่รถไฟ PC-25




STATE RAILWAYS OF THAILAND
HOUSING

ภาคผนวก ค
โค้ดที่ใช้คำนวณความเร็วของเพลาที่ชุดแคร่ด้วยโปรแกรม ARDUINO

```
volatile unsigned long oldMillis = 0;
volatile unsigned long dt = 0;
volatile unsigned char firstPulse = 0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(0, Trig, FALLING); //Interrupt 0 is pin 2
  Serial.println("Setup Complete...");
}
void loop()
{
  if (firstPulse) {
    int SPEED = (60000 * 0.0003341 * 60) / (dt * 1);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(SPEED, DEC);
  }
  delay(100);
}
void Trig()
{
  if (firstPulse) {
    dt = millis() - oldMillis;
    oldMillis = millis();
  } else {
    firstPulse = 1;
    oldMillis = millis();
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้