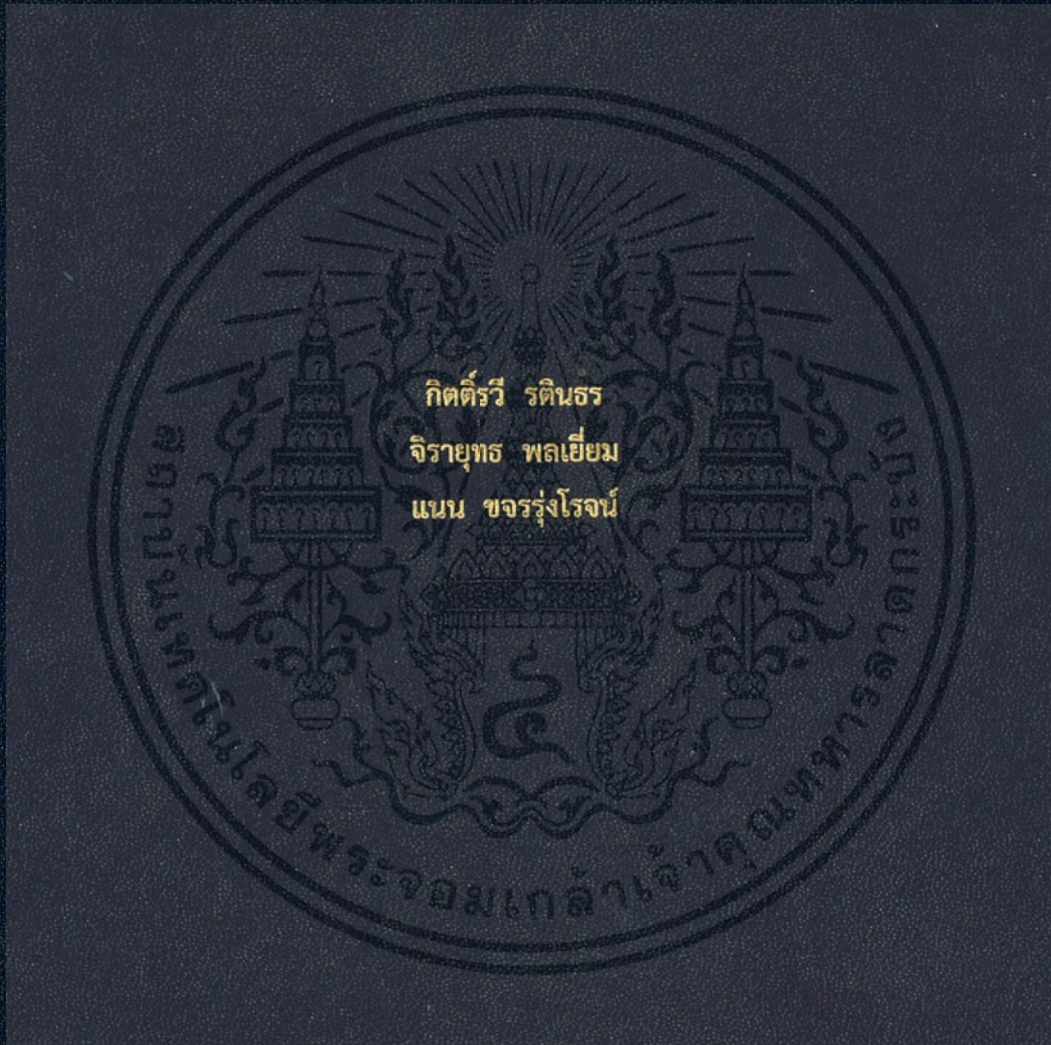


การพัฒนาชุดทดลองเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของ
แบบจำลองย่อส่วนชุดล้อเพลลาเดี่ยว

DEVELOPMENT OF MOTION STABILITY APPARATUS OF
A SCALED SINGLE WHEELSET



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การพัฒนาชุดทดลองเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของ
แบบจำลองย่อส่วนชุดล้อเพลลาเดี่ยว

DEVELOPMENT OF MOTION STABILITY APPARATUS OF
A SCALED SINGLE WHEELSET



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF MOTION STABILITY APPARATUS OF
A SCALED SINGLE WHEELSET



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2561

สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของแบบจำลองย่อส่วนชุดล้อเพลลาเดี่ยว
Development of Motion Stability Apparatus of a Scaled Single Wheelset

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกิตติ์รวี รตินธร รหัสประจำตัว 58010105
2. นายจิรายุทธ พลเยี่ยม รหัสประจำตัว 58010201
3. นางสาวแนน ขจรรุ่งโรจน์ รหัสประจำตัว 58010689

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาชุดทดลองเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของแบบจำลองย่อส่วนชุดล้อเพลาดียว

นางสาวกิตติ์วี รตินธร 58010105
นายจิรายุทธ พลเยี่ยม 58010201
นางสาวแนน ขจรรุ่งโรจน์ 58010689
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของชุดล้อรถไฟเพลาดียว (single wheelset) โดยวิธีการทดลองและทฤษฎี แบบจำลองทางทฤษฎีสมมติให้มีการตอบสนองการสั่นในแนวด้านข้างแบบไม่มีตัวหน่วง และมีองศาอิสระเท่ากับสอง (two degree of freedom) คือ การเคลื่อนที่แนวด้านข้าง (lateral) และการเคลื่อนที่หมุนส่าย (yaw) จากนั้นนำสมการการเคลื่อนที่ที่ได้มาทำการหาปริพันธ์หาผลเฉลยในรูปขนาดของความเร่ง ความเร็ว และการกระจัดที่เกิดขึ้น ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรสำคัญ เช่น มวล ค่าโมเมนต์เฉื่อย เป็นต้น ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤติ และพัฒนาสร้างชุดทดลองย่อส่วนขนาด 1:10 เท่าของชุดล้อรถไฟจริงด้วยหลักการความสัมพันธ์คล้ายคลึงทางกล (mechanical similarity law) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีพบว่า รูปแบบการเคลื่อนที่ส่ายของชุดล้อมุมกรวย 1/20 และ 1/40 ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เสถียร (stable motion) สามารถเปรียบเทียบผลค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความเร่ง มีค่าความผิดพลาดในช่วง 8 – 47 % ในลักษณะการเคลื่อนที่เสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) ค่าความเร็ววิกฤติในของชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 7.52 m/s และ 9.32 m/s ตามลำดับ (ความเร็วที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 23.94%) และมีความผิดพลาดเท่ากับ 28.55% และ 12.70% ตามลำดับที่ค่าความเร็วชุดทดลองเกินค่าความเร็ววิกฤติ สามารถเห็นการเคลื่อนที่ไม่เสถียร (unstable motion) ได้อย่างชัดเจน และผลลัพธ์จากการศึกษาค่าตัวแปรสำคัญจากทฤษฎี พบว่าเมื่อค่ามวล ค่าโมเมนต์เฉื่อย และค่ามุมกรวยล้อยมีค่าลดลงจะทำให้ค่าความเร็ววิกฤติเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อ ค่าสปริง ค่ารัศมีล้อสัมผัส ค่าระยะห่างสปริงและค่าความกว้างรางเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็ววิกฤติที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of Motion Stability Apparatus of a Scaled Single Wheelset

Kitrawee Ratinthorn 58010105
Jirayut Phonyiam 58010201
Nan Khajornrunrod 58010689
Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn Advisor
Year 2018

ABSTRACT

This project presents the motion stability analysis of a scaled single wheelset by experimental and theoretical methods. In the study, the theoretical model was assumed as the lateral and yaw undamped vibration, a two degrees of freedom system. Therefore, the theoretical solutions in the form of acceleration, velocity and displacement levels can be found by numerically integrating the derived equations of motion with MATLAB and use them to study the effect of key parameters such as mass, mass moment of inertia, etc., on the critical speed. The experimental apparatus of 1:10 scaled single wheelset model was developed by using mechanical similarity law. From the experimental and theoretical results, the hunting motion responses of 1/20 and 1/40 cone of wheels were found to be stable when the wheelset speed was less than the critical speed. Additionally, the root mean square of the acceleration amplitudes, arms, were compared with the theoretical results and the discrepancy was in the range of 8-47%. In the case of marginal stable motion, the critical speeds were 7.52 m/s and 9.32 m/s (23.94% increasing). When comparing with the theoretical results, the discrepancies were 28.55% and 12.70%, respectively. When the wheelset speed was more than the critical speed, the unstable motion was clearly seen. Moreover, the theoretical results show that the critical speed increases when mass, mass moment of inertia and wheel tread angle decrease. Furthermore, when the suspension stiffness, wheel contact radius, spring attachment distance and track width increase, the critical speed increases.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ผู้ควบคุมดูแลปริญญาานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง รวมทั้งปรับปรุงแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำโครงการด้วยความเอาใจใส่เสมอมา รวมถึง ผศ.ดร.เอกพจน์ ตันตราภิววัฒน์ และ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็นแก่คณะผู้จัดทำ ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณนายเจตจำนง เกษประติษฐ์ (พี่เจต) และนายจุลวิษณุ มาฟัก (พี่บี) ที่ช่วยในการให้คำปรึกษาในการออกแบบและสร้างแบบจำลองย่อส่วนชุดล้อเพลาดียว

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการสร้างแรงบันดาลใจในการดำเนินโครงการนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี รวมถึงบุคคลท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ที่คอยช่วยเหลือในการดำเนินงานครั้งนี้ ทางผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย



กิตติ์วี รตินธร
จิรายุทธ พลเยี่ยม
แนน ขจรรุ่งโรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ (Basic Knowledge of Train).....	4
2.2.2 ทฤษฎีการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง.....	6
2.2.2.1 การคืบ (Creepage).....	6
2.2.2.2 การคืบระหว่างล้อกับราง.....	7
2.2.2.3 ทฤษฎีของเฮิร์ต.....	8
2.2.2.4 ทฤษฎีแรงคืบเชิงเส้นของคาลเคอร์.....	10
2.2.3 สมการการเคลื่อนที่ของชุดล้อรถไฟ.....	14
2.2.3.1 ระบบการสั่นสะเทือนหลายองศาความอิสระ.....	14
2.2.3.2 การสั่นสะเทือนด้านข้างของชุดล้อเพลลาเดี่ยว โดยมีองศาอิสระ เท่ากับสอง.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4	หลักความคล้ายคลึงทางกล (Mechanical Similarity Law)	19
2.2.5	การคำนวณรอบและค่ากำลังมอเตอร์	21
2.2.6	ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (RMS, Root Mean Square Value)	23
2.2.7	ค่าความแข็งสปริง	23
2.2.8	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาด	23
บทที่ 3	วิธีดำเนินการและชุดทดลอง	24
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	24
3.2	การออกแบบพัฒนาชุดล้อเพลาดียว (Single Wheelset)	25
3.2.2	ส่วนประกอบ	25
3.2.3	ค่าพารามิเตอร์จากการย่ออัตราส่วน 1:10	28
3.3	การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	30
3.4	การสอบเทียบค่าความแข็งของสปริง	31
3.5	การพัฒนาโปรแกรม MATLAB	33
3.5.1	การเขียนโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้	33
	การเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่า ω และ ωd	35
บทที่ 4	วิธีการและผลการทดลอง	37
4.1	บทนำ	37
4.2	วิธีการทดลอง	37
4.2.1	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม MATLAB GUI ด้วยสถานการณ์จำลอง	37
4.2.2	การคำนวณผลทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่าน GUI	38
4.2.3	การวัดค่าความเร่งจากผลการตอบสนองของชุดล้อ	39
4.3	ผลการทดลอง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 ผลการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านหน้าต่าง GUI.....	43
4.3.2 ผลการวัดค่าความเร่งจากผลการตอบสนองของชุดล้อย.....	46
4.3.3 ผลการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย.....	51
4.3.4 ผลการศึกษาค่าตัวแปรในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤติ	54
4.3.4.1 ผลของมวลชุดล้อยต่อความเร็ววิกฤติ.....	54
4.3.4.2 ผลของโมเมนต์เฉื่อยต่อความเร็ววิกฤติ.....	55
4.3.4.3 ผลของรัศมีล้อยต่อความเร็ววิกฤติ.....	55
4.3.4.4 ผลของความแข็งสปริงต่อความเร็ววิกฤติ.....	56
4.3.4.5 ผลของระยะห่างของสปริงต่อความเร็ววิกฤติ.....	57
4.3.4.6 ผลของความกว้างรางรถไฟต่อความเร็ววิกฤติ.....	57
4.3.4.7 ผลของมุมกรวยล้อยต่อความเร็ววิกฤติ.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 บทนำ.....	59
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.3 ปัญหาจากการศึกษา.....	59
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	60
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ชุดทดลองการสั่นสะเทือนในแนวด้านข้าง แบบจำลองย่อขนาดของชุดล้อยเพลลา เดี่ยว.....	63
ภาคผนวก ข. แบบชุดล้อยและราง.....	74
ภาคผนวก ค. แผนผังแสดงขั้นตอนการทำของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาด้วยโปรแกรม MATLAB.....	77
ภาคผนวก ง. การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงคืบในแนวการกลิ้งและแนวด้านข้าง.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2 . 1 Hertz Coefficients m and n.....	9
2 . 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การคืบและการกลิ้งของคาลเคอร์.....	12
3 . 1 ตารางค่าพารามิเตอร์ในชุดทดลอง.....	29
4 . 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB.....	37
4 . 2 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากชุดทดลองใช้ในการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB.....	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2 . 1 รูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานของชุดล้อเพลลา	4
2 . 2 รูปทรงเรขาคณิตของชุดล้อทรงกรวยบนทางโค้ง	5
2 . 3 การส่ายของชุดล้อทรงกรวยในทางตรง.....	5
2 . 4 ล้อกลิ้งไปตามราง.....	7
2 . 5 พิกัดสัมผัส (contact frame)	7
2 . 6 รัศมีความโค้งของล้อและราง.....	8
2 . 7 พื้นที่สัมผัสรูปวงรีของล้อและราง	10
2 . 8 การสั่นสะเทือนตามแนวด้านข้างของรถไฟที่มีองศาอิสระเท่ากับสอง	15
2 . 9 แสดงทิศทางของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง.....	15
2 . 10 แสดงทิศทางของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบหมุนควง.....	16
2 . 11 แสดงลักษณะเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของล้อซ้ายและขวาขณะเคลื่อนที่ ณ เวลาใด ๆ	18
2 . 12 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงขนาดและทิศทางของแรงและโมเมนต์ของชุดทดลอง	21
2 . 13 แผนภาพวัตถุอิสระของ Roller Rig และเพลลา	21
3 . 1 แผนผัง (flowchart) แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	24
3 . 2 แบบจำลองย่อขนาดของชุดล้อเพลลาเดียวในโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	26
3 . 3 แบบจำลองย่อขนาดของชุดล้อเพลลาเดียวที่ทำงานจากสแตนด์เลส และกล่องควบคุมความเร็ว ..	27
3 . 4 แสดงการวัดความเร็วรอบเปรียบเทียบกันระหว่างกล่องควบคุมความเร็วกับเครื่องมือวัด Tachometer.....	30
3 . 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เกิดขึ้นกับความถี่ที่ Tachometer วัดได้.....	30
3 . 6 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งของสปริง.....	31
3 . 7 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะยืดของสปริง ที่มีค่าความแข็งของ คำนวณได้เท่ากับ 956.3 N/m.....	32
3 . 8 ภาพแสดงหน้าต่าง Graphic User Interface ที่ถูกพัฒนาขึ้น.....	34
3 . 9 ภาพแสดงหน้าต่าง GUI ที่แสดงรายละเอียดค่า ω และ ωd หลังคลิกที่ปุ่ม INFO.....	35
3 . 10 ภาพแสดงการบันทึกไฟล์ .xlsx หลังคลิกที่ปุ่ม EXPORT.....	35
4 . 1 ภาพแสดงหน้าต่าง GUI MATLAB เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยค่าพารามิเตอร์ อ้างอิง.....	38
4 . 2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง	39

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4 . 3 หน้าต่าง Channel set up.....	40
4 . 4 หน้าต่าง Measure.....	41
4 . 5 กล่องควบคุมความเร็ว.....	41
4 . 6 หน้าต่างบันทึกค่าสัญญาณ.....	42
4 . 7 ตัวอย่างไฟล์ค่าความเร่งที่ได้จากการทดลอง.....	42
4 . 8 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 2.87 Hz (172 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 1.35 m/s.....	43
4 . 9 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 12.41 Hz (745 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 5.85 m/s (Critical velocity).....	44
4 . 10 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 13.79 Hz (828 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 6.5 m/s.....	44
4 . 11 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 3.77 Hz (226 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 1.77 m/s.....	45
4 . 12 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 17.55 Hz (1053 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 8.27 m/s (Critical velocity).....	45
4 . 13 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 19.10 Hz (1146 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 9 m/s.....	46
4 . 14 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 2.87 Hz (172 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 1.35 m/s.....	47
4 . 15 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 15.97 Hz (958 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 7.52 m/s (ช่วงของ Critical velocity).....	47
4 . 16 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 เมื่อความถี่กระตุ้นหรือ ความเร็ว เกินค่าวิกฤติ	48
4 . 17 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 3.77 Hz (226 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 1.77 m/s.....	48
4 . 18 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 19.78 Hz (1187 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 9.32 m/s	49
4 . 19 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 เมื่อความถี่กระตุ้นหรือ ความเร็ว เกินค่าวิกฤติ	49

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4 . 20 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สองกำลังสอง เฉลี่ยกับความถี่กระตุ้น ของชุดล้อยี่มุมกรวย 1/20	53
4 . 21 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สองกำลังสอง เฉลี่ยกับความถี่กระตุ้น ของชุดล้อยี่มุมกรวย 1/40.....	53
4 . 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและมวลของชุดล้อยี่มุมกรวย	54
4 . 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและโมเมนต์เฉื่อย	55
4 . 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและรัศมีล้อยี่มุมกรวย	55
4 . 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและค่าความแข็งของสปริง	56
4 . 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและระยะห่างของสปริง.....	57
4 . 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและความกว้างรางรถไฟ.....	57
4 . 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและมุมกรวยล้อยี่มุมกรวย	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ระบบขนส่งมวลชนรถไฟของประเทศไทยในปัจจุบันกำลังพัฒนา ทั้งรถไฟฟ้ามวลชนในตัวเมือง รถไฟทางไกล รวมไปถึงรถไฟความเร็วสูง ในแต่ละขบวนจะมีความเร็วที่จำกัดในการให้บริการ เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุรถไฟตกราง ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความเร็ว คือ การเคลื่อนที่สั่นในแนวด้านข้าง (lateral vibration) และการเคลื่อนที่สั่นแบบหมุนควง (yaw vibration) ที่เกิดจากการล้อยรถไฟที่กำลังหมุน และเคลื่อนที่ไปในแนวด้านข้าง (lateral displacement) เนื่องด้วยความลาดเอียงพื้นล้อยรถไฟ ทำให้รัศมีที่ล้อสัมผัสรางทั้งสองฝั่งมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการหมุนสายกลับไปมา (yaw motion) จากปัจจัยดังกล่าวจะบ่งบอกลักษณะในการเคลื่อนที่ได้แก่ เสถียร (stable motion) เสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) และ ไม่เสถียร (unstable motion)

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงศึกษาเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของรถไฟ และหาความเร็ววิกฤติที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรในการเคลื่อนที่ อันเป็นเหตุเกิดความเสียหายที่รางและบังใบ จนไปถึงการเกิดอุบัติเหตุตกรางได้ ซึ่งการศึกษาจากรถไฟขนาดจริงจะมีต้นทุนที่สูง การทดลองและการซ่อมบำรุงทำได้ยาก ทางผู้วิจัยจึงพัฒนาสร้างชุดทดลองชุดล้อเพลาดียว (single wheelset) ที่ย่อขนาด 1:10 เท่าของรถไฟจริง ที่มีองศาความอิสระเท่ากับสอง (two degree of freedom) และตอบสนองการสั่นในแนวด้านข้าง แบบไม่มีตัวหน่วง รวมทั้งพัฒนาโปรแกรม MATLAB GUI เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปรในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤติของรถไฟ จากนั้นนำผลที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดได้จริง โดยชุดจำลองและการย่อส่วนด้วยหลักความคล้ายคลึงทางกล (mechanical similarity law) พัฒนาต่อจากงานวิจัยของ ณัฐพล ประเสริฐพันธ์และคณะ [1] และ Hyun-Moo Hur และคณะ [4]

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อประยุกต์ใช้หลักความคล้ายคลึงทางกล พัฒนาสร้างชุดทดลองชุดล้อเพลาดียว (single wheelset) ย่อขนาด 1:10 เท่าของชุดล้อยรถไฟจริง
2. เพื่อพัฒนาโปรแกรม GUI MATLAB ศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปร ได้แก่ มวลของชุดล้อยรถไฟ โมเมนต์เฉื่อย รัศมีล้อ ความแข็งสปริง ระยะห่างของสปริง ความกว้างรางรถไฟ มุมกรวยล้อ ในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤติของรถไฟ
3. เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการสั่นสะเทือนของแบบจำลองรถไฟ ในลักษณะการเคลื่อนที่เสถียร (stable motion) เสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) และไม่เสถียร (unstable motion)

รวมทั้งเปรียบเทียบผลค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร่งระหว่างผลทางทฤษฎีกับผลจากการทดลอง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาการออกแบบชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset) โดยใช้มุมกรวยล้อ 1/40 และ 1/20 และรางรุ่น UIC 60 ที่มีสมการการเคลื่อนที่องศาความอิสระเท่ากับสอง (two degree of freedom) และตอบสนองการสั่นในแนวด้านข้าง แบบไม่มีตัวหน่วง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาสร้างชุดทดลองชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset) ที่ใช้ในการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเรื่องการสั่นสะเทือนทางกลได้
2. สามารถพัฒนาโปรแกรมศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปร ในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤตของรถไฟได้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีการเคลื่อนที่ของรถไฟและชุดล้อเพลลาเดี่ยว
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมการการเคลื่อนที่ การออกแบบชุดทดลอง และหลักความคล้ายคลึงทางกล
3. พัฒนาออกแบบชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset) ศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปร ได้แก่ มวลของชุดล้อรถไฟ โมเมนต์เฉื่อย รัศมีล้อ ความแข็งสปริง ระยะห่างของสปริง ความกว้างรางรถไฟ มุมกรวยล้อ ในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤตของรถไฟ
4. สร้างชุดทดลองจำลองชุดล้อเพลลาเดี่ยว
5. ทดลองและบันทึกผล
6. นำข้อมูลทางทฤษฎีและการทดลองมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล
7. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาและออกแบบชุดทดลองเครื่องแคร่รถไฟ ทางผู้วิจัยได้มีการศึกษาข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณัฐพล, ธนะพงศ์ และจนิตตรา [1] ได้ออกแบบและสร้างแบบจำลองรถไฟแบบครึ่งแคร่ อัตราส่วนย่อขนาด 1:10 ที่มีองศาอิสระเท่ากับสองโดยใช้ความสัมพันธ์คล้ายคลึงทางกล (Mechanical Similarity Law) เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนในแนวด้านข้าง และหาความเร็ววิกฤต

Iwnicki และ Wickens [2] ได้ออกแบบแทนหมุนจำลองอัตราส่วนย่อขนาด 1:5 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมพลศาสตร์ของรถไฟ โดยติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดตำแหน่งและอัตราเร่งของตัวรถ ตรวจสอบความสัมพันธ์พฤติกรรมของแทนหมุนจำลองกับแบบจำลองในคอมพิวเตอร์เชิงเส้นสร้างขึ้นใน โปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์เบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ีระหว่างพฤติกรรมจากแทนหมุนจำลองและที่คาดการณ์โดยแบบจำลอง

Hiroshi [3] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพการเคลื่อนที่สายด้วยตัวหน่วง gyroscopic ซึ่งช่วยเพิ่มค่าความเร็ววิกฤตที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สาย โดยใช้ทฤษฎีวิเคราะห์เชิงเส้นของ eigenvalue พิจารณาจากแบบจำลองชุดล้อที่องศาอิสระเท่ากับสองกับแทนหมุนจำลอง

Hyun-Moo [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของการสีกหรือของโปรไฟล์ล้อที่มีผลต่อความเร็ววิกฤต โดยการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟจำลองอัตราส่วนย่อขนาด 1:5 และแทนหมุนจำลองย่อส่วน ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้แบบจำลองย่อส่วนในการวิเคราะห์อิทธิพลของโปรไฟล์ล้อที่สีกหรือโดยมีการเคลื่อนที่แบบเสถียรมีความเป็นไปได้เพียงพอที่จะใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโบกี้จริง

Yabuno [5] ได้ศึกษาผลกระทบลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของการเคลื่อนที่สาย โดยทดลองเปลี่ยนแปลงของตัวแปร เนื่องจากการระบับรองรับสปริงเชิงเส้นในทิศทางด้านข้างและพิจารณาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะที่ไม่เชิงเส้นของการเคลื่อนที่สาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความมั่นคงด้านข้าง (Lateral Stiffness) ผลที่ได้คือให้การปรับปรุงเสถียรภาพของชุดล้อ จากการรบกวนระบบรองรับสปริง

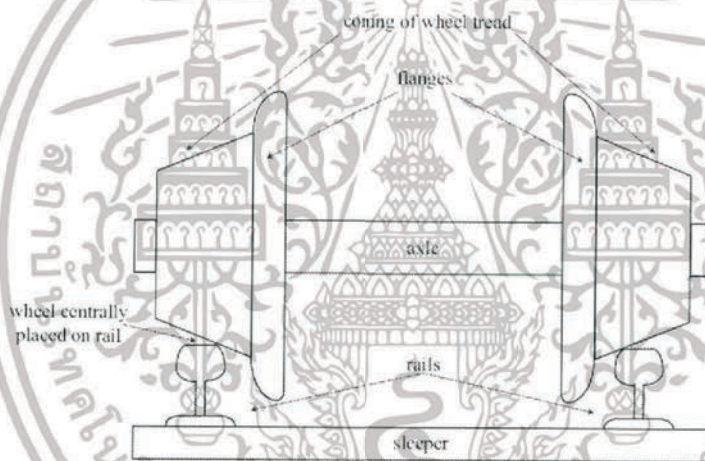
Yoshino [6] ได้ศึกษาทฤษฎีและทำการทดลอง เพื่อรักษาเสถียรภาพของการเคลื่อนที่สาย (Hunting Motion) โดยใช้ RUNNING GEAR ที่ทำหน้าที่เหมือนโจโรสโคป เมื่อใช้การวิเคราะห์ Eigenvalues พบว่าความเร็ววิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มรอบโรเตอร์ของตัวหน่วงโจโรสโคป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ (basic knowledge of train)

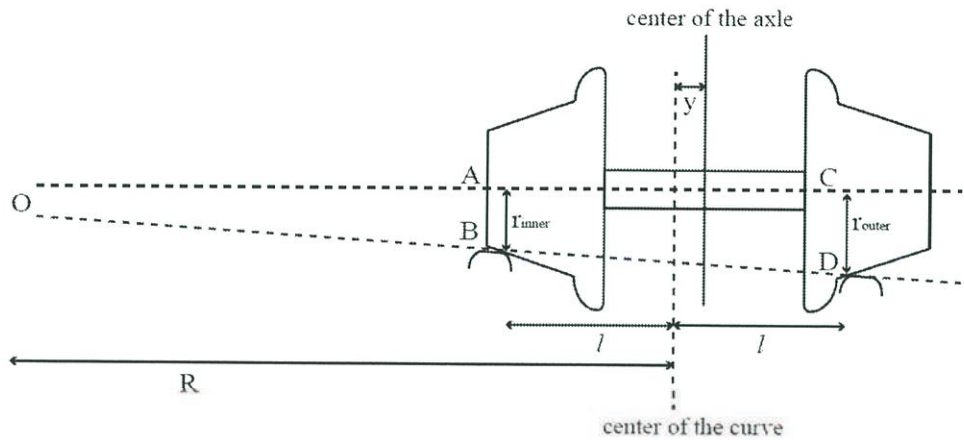
1. รูปทรงทางเรขาคณิตพื้นฐานของชุดเพลาล้อ

ชุดเพลาล้อแบบทั่วไปจะประกอบด้วยสองล้อเหล็กยึดติดอยู่กับเพลลา ทำให้แต่ละล้อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม และมีระยะทางคงที่ระหว่างสองล้อ แต่ละล้อมีบังใบ (flange) เพื่อเป็นแนวในการเคลื่อนที่ไปตามทางรถไฟ และป้องกันการตกราง โดยปัจจุบันจะกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างรางและบังใบประมาณ 7-10 มิลลิเมตร โดยผิวล้อรถไฟจะถูกทำให้เป็นทรงกรวยเล็กน้อยเพื่อลดการเสียดสีของบังใบกับรางในการเคลื่อนที่ของรถไฟในทางโค้ง ค่าความกรวยของล้อ (conicity) จะถูกกำหนดด้วยค่ามุมเอียงพื้นล้อ (wheel tread angle) เป็นค่าความชันของพื้นล้อในแนวนอนทิศทางตั้งฉากกับทางรถไฟ มีค่าอัตราส่วน 1/20 หรือ 1/40 สำหรับรถไฟความเร็วสูง ซึ่งความชันนี้เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของชุดล้อทั้งในทางตรงและทางโค้ง



รูปที่ 2.1 รูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานของชุดล้อเพลลา

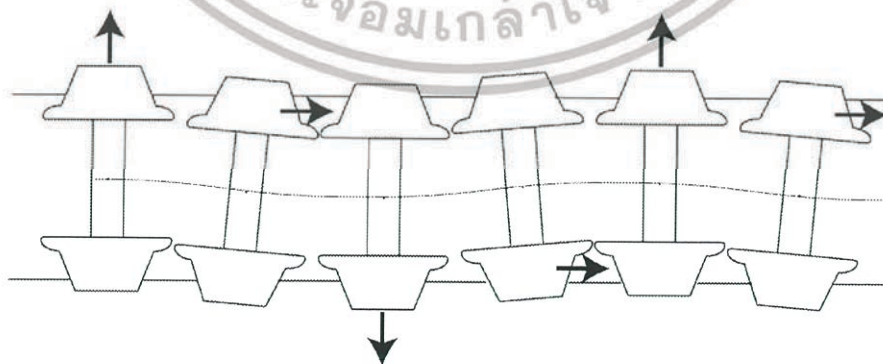
เนื่องจากค่าความกรวยของล้อ (conicity) จะช่วยให้ล้อด้านนอกเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและได้ระยะทางมากขึ้น ความกรวยล้อนี้จะรักษาการกลิ้งในทางโค้ง โดยการเคลื่อนที่ออกทางด้านข้าง (ตามแนวแกน y จากศูนย์กลางของทาง) และปรับเปลี่ยนตำแหน่งรัศมีของล้อ โดยล้อด้านนอกโค้งวิ่งด้วยรัศมี (r_{outer}) ของล้อที่มากกว่าและสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากขึ้น ในขณะที่ล้อด้านในโค้งเคลื่อนที่ด้วยรัศมี (r_{inner}) ของล้อที่น้อยกว่าจะได้ระยะทางที่น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปทรงเรขาคณิตของชุดล้อทรงกรวยบนทางโค้ง

2. จลศาสตร์การสั่นในแนวด้านข้างและสั่นแบบหมุนสายในทางตรง

การเคลื่อนที่ในทางตรงนี้จะพิจารณาเฉพาะความเอียงของพื้นล้อ ไม่พิจารณาบังใบ และ ขณะที่ชุดเพลาล้อ (wheelset) วิ่งบนรางโดยที่กึ่งกลางเพลาล้ออยู่บนจุดกึ่งกลางทาง สมมติชุดเพลาล้อที่มีความเอียงพื้นล้อ และอีกชุดไม่มีความเอียง กำลังเคลื่อนที่อยู่บนรางด้านใดด้านหนึ่งถูกรบกวนอันเนื่องมาจากรางผิดรูปแบบ ชุดล้อที่ไม่มีความเอียงพื้นล้อจะวิ่งตรงไปในทิศทางเดียวกับที่ถูกกระทำ หรือถูกรบกวน ส่วนชุดล้อที่มีความเอียงพื้นล้อจะยังคงวิ่งบนรางต่อไปได้ ในการเคลื่อนที่แนวด้านข้างแบบเล็กน้อย (เนื่องจากรางผิดรูป) ชุดล้อจะเหมือนถูกผลักทำให้รัศมีล้อสัมผัสแตกต่างกัน ด้วยชุดล้อพิจารณาเป็นวัตถุแข็งเกร็งจะมีความเร็วเชิงมุมเท่ากันทั้งสองล้อ ดังนั้นล้อที่มีรัศมีสัมผัสมากกว่า (r_{outer}) จะกลิ้งได้ระยะมากกว่าล้ออีกฝั่ง (r_{inner}) ทำให้เกิดการหมุนสายและมีแนวโน้มทำให้กึ่งกลางเพลาล้อกลับมาตำแหน่งเดิม หากเกินตำแหน่งเดิมจะทำให้เกิดระยะในแนวด้านข้างเหมือนเดิม ดังนั้นการเคลื่อนที่ที่กลับไปมาจะทำให้เกิดการสั่นทั้งในแนวด้านข้างและสั่นแบบหมุนสายตลอดทาง หรือเรียกว่า hunting oscillation ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การส่ายของชุดล้อทรงกรวยในทางตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความเร็ววิกฤติการสั่นในแนวด้านข้างและสั่นแบบหมุนสายในทางตรง

เนื่องจาก hunting motion หรือ self-exciting oscillation จะเกิดแรงคืบของหน้าสัมผัสระหว่างรางกับล้อ ซึ่งในหัวข้อ 2.2.2 ทฤษฎีการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง จะแสดงให้เห็นว่าการสั่นจะขึ้นอยู่กับความเร็ว ซึ่งชุดล้อที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็ววิกฤติเมื่อชุดล้อถูกรบกวนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างจะเกิดการสั่น self-exciting เมื่อเวลาผ่านไปพลังงานจะสูญเสียไปในรูปต่างๆ ทำให้การสั่นหายไป เรียกรูปแบบลักษณะนี้ว่ามีความเสถียร (stable motion) ในการเคลื่อนที่หากชุดล้อมีความเร็วเท่าความเร็ววิกฤติ ถูกรบกวนในแบบเดียวกัน การสั่นจะรุนแรงมากขึ้น เรียกรูปแบบลักษณะนี้ว่าการเคลื่อนที่ที่มีความเสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) และที่ความเร็วเกินค่าวิกฤติ การสั่นจะรุนแรงยิ่งขึ้นเกิดความเสียหายทั้งล้อและราง นำไปสู่การตกรางได้ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่มีความเสถียร (unstable motion)

2.2.2 ทฤษฎีการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง

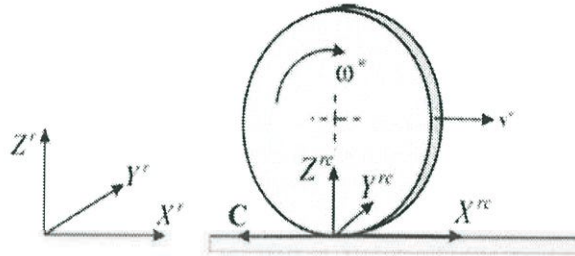
2.2.2.1 การคืบ (Creepage)

ปรากฏการณ์คืบ

ถ้าวัตถุที่สัมผัสกันมีความแตกต่างของความเร็วหรือความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุมีค่ามากกว่าศูนย์จะส่งผลให้วัตถุทั้งสองมีการเคลื่อนที่กลิ้ง (rolling motion) และไถล (sliding motion) ระหว่างวัตถุ ความเร็วที่จุดสัมผัสของวัตถุมีค่าต่างกัน วัตถุต่างกันจะมีองค์ประกอบของความเร็วเชิงมุมสัมพัทธ์ที่มีทิศทางตั้งฉากกับผิววัตถุทั้งสองที่จุดสัมผัสเรียกว่าการ “ หมุนควง (spin) ”

ในกรณีของวัตถุที่สัมผัสกันและอยู่ใต้แรงกด จุดสัมผัสบางจุด บนพื้นผิวสัมผัสอาจจะมีการเคลื่อนที่แบบไถลระหว่างกัน (slip motion) ในขณะที่จุดอื่น ๆ จะติดกัน (stick) และความแตกต่างระหว่างความเครียดในแนวสัมผัส (tangential strain) ของวัตถุทั้งสองในบริเวณพื้นที่ผิวที่ติดกันจะก่อให้เกิดการสั่นไถลระหว่างกัน (slip) แบบน้อย ๆ ซึ่งเรียกว่า “การคืบ (creepage)” ดังนั้นการคืบเกิดจากการผสมผสานกันเองของการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและความเสียดทาน

2.2.2.2 การคืบระหว่างล้อกับราง



รูปที่ 2.4 ล้อลิ่งไปตามราง

พิจารณาล้อลิ่งอยู่บนราง ดังรูปที่ 2.5 กำหนดให้ t_1^r และ t_2^r คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวสัมผัสกับรางที่จุดสัมผัส P ในทิศทางตามแนวยาวและทิศทางตามขวาง เวกเตอร์ทั้งสองตั้งฉากกันหรือทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 พิกัดสัมผัส (contact frame)

กำหนดให้ n^r คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสที่จุดสัมผัส P และหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$n^r = \frac{t_1^r \times t_2^r}{|t_1^r \times t_2^r|} \quad (2.1)$$

ความเร็วสมบูรณ์ของล้อ กำหนดให้ v^w คือขนาดของความเร็วตามแนวเวกเตอร์สัมผัสทิศทางตามแนวยาวสามารถหาได้ดังนี้

$$V = v^w t_1^r \quad (2.2)$$

การคืบที่เกิดขึ้น ค่าของมันจะขึ้นอยู่กับค่านอร์มอลไลซ์ของความเร็วสัมผัส และมีนิยามดังนี้

$$\xi_x = \frac{(v^w - v^r)^T t_1^r}{v} \quad (2.3)$$

$$\xi_y = \frac{(v^w - v^r)^T t_2^r}{v} \quad (2.4)$$

$$\xi_{sp} = \frac{(\omega^w - \omega^w)^T n^r}{v} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ξ_x คือ ค่าการคืบตามแนวการกลิ้ง

ξ_y คือ ค่าการคืบตามแนวด้านข้าง

ξ_{sp} คือ ค่าการคืบหมุนควง

v^w, v^r คือ ความเร็วสัมผัสของล้อและราง

ω^w, ω^r คือ ความเร็วเชิงมุมสัมผัสของล้อและราง

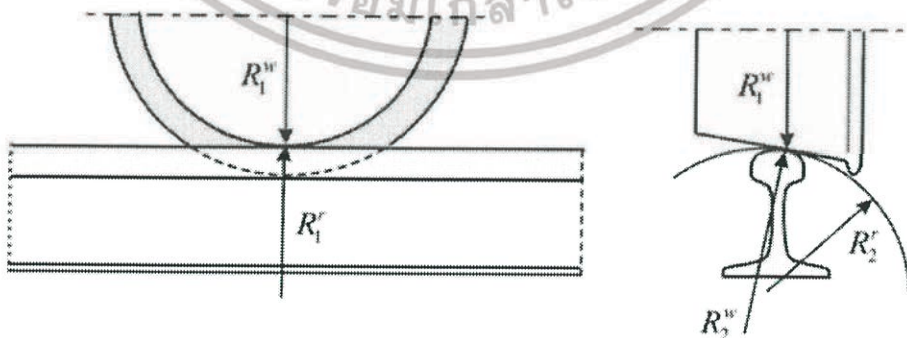
2.2.2.3 ทฤษฎีของเฮิร์ต

เฮิร์ตได้นำเสนอทฤษฎีการสัมผัสของวัตถุสองชิ้น ซึ่งการสัมผัสเป็นแบบไม่สอดรับกันของเฮิร์ตใช้เพื่อหาขนาดและรูปร่างของการสัมผัสสมมติฐานดังนี้

1. พื้นผิวของวัตถุทั้งสองต้องมีความต่อเนื่องและเป็นการสัมผัสแบบไม่สอดรับกัน
2. ความเครียดหรือการเสียรูปมีค่าน้อย
3. ไม่มีความเค้นในบริเวณที่ไกลมากจากพื้นที่สัมผัส
4. ไม่มีความเสียดทานบนพื้นผิวของวัตถุทั้งสอง
5. วัสดุทั้งสองเป็นวัสดุยืดหยุ่นและมีการเสียรูปในบริเวณพื้นที่สัมผัสเป็นแบบยืดหยุ่น

การวิเคราะห์การสัมผัสของล้อกับรางด้วยทฤษฎีของเฮิร์ต

ในการวิเคราะห์การสัมผัสกันของล้อและราง กำหนดให้ล้อเป็นวัตถุ w และรางเป็นวัตถุ r และวัตถุทั้งสองมีรัศมีความโค้งแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รัศมีความโค้งของล้อและราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป R_1^w และ R_1^r คือค่ารัศมีความโค้งหลักแนวกลิ้งของล้อและราง

R_2^w และ R_2^r คือค่ารัศมีความโค้งหลักแนวขวางของล้อและราง

เมื่อรู้ค่า 1. แรงสัมผัสตั้งฉาก (Normal Contact Force , F_n)

2. รัศมีความโค้งแกนหลัก รัศมีความโค้งหลักแนวขวางของล้อและราง (หาได้จากข้อมูลทางเรขาคณิต)

3. ค่าสัมประสิทธิ์ m และ n ซึ่งหาได้จากตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 Hertz Coefficients m and n

Hertz Coefficients m and n								
θ (deg)	m	n	θ (deg)	m	n	θ (deg)	m	n
0.5	61.4	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.486	0.717
1	36.89	0.1314	20	3.813	0.4125	65	1.378	0.759
1.5	27.48	0.1522	30	2.731	0.493	70	1.284	0.802
2	22.26	0.1691	35	2.397	0.530	75	1.202	0.846
3	16.5	0.1964	40	2.136	0.567	80	1.128	0.893
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.604	85	1.061	0.944
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.641	90	1.0	1.0
8	7.86	0.285	55	1.611	0.678			

Note. From "Dynamics of Railway Vehicle Systems" by VijayK, Rao, 1984., Wheel-Rail Rolling Contact Theories, Vol.11, pp.107.

โดยที่ ค่า θ สามารถหาได้จากสมการ

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{K_1}{K_3}\right) \quad (2.6)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ K_3 K_4 หรือค่าสัมประสิทธิ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา θ หรือความยาวแกนหลัก (a) และแกนลอง (b) ของพื้นที่สัมผัสรูปวงรีตามลำดับ สามารถใช้สมการข้างล่างได้ ดังนี้

$$K_1 = \frac{1 - (v^w)^2}{\pi E^w} \quad (2.7)$$

$$K_2 = \frac{1 - (v^r)^2}{\pi E^r} \quad (2.8)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1^w} + \frac{1}{R_2^w} + \frac{1}{R_1^r} + \frac{1}{R_2^r} \right) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_4 = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1^w} - \frac{1}{R_2^w}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_1^r} - \frac{1}{R_2^r}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1^w} - \frac{1}{R_2^w}\right)\left(\frac{1}{R_1^r} - \frac{1}{R_2^r}\right) \cos 2\psi} \quad (2.10)$$

โดยที่ K_1, K_2	คือ ค่าคงที่ที่เกิดขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุของล้อยและราง
K_3, K_4	คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเรขาคณิตของล้อยและราง
v^w, v^r	คือ ค่าอัตราส่วนพัวของของล้อยและราง
E^w, E^r	คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของล้อยและราง
R_1^w, R_1^r	คือ ค่ารัศมีความโค้งหลักแนวกลิ้งของล้อยและราง
R_2^w, R_2^r	คือ ค่ารัศมีความโค้งหลักแนวขวางของล้อยและราง
ψ	คือ ความเร็วการหมุนสาย

จากนั้น หาค่าครึ่งหนึ่งของความยาวแกนหลัก (a) และค่าครึ่งหนึ่งของความยาวแกนรอง (b) ของพื้นที่สัมผัสรูปวงรีดังรูปที่ 2.7 จากสมการที่ (2.11) และสมการ (2.12)



รูปที่ 2.7 พื้นที่สัมผัสรูปวงรีของล้อยและราง

$$a = m(3\pi F_n (K_1 + K_2)/4K_3)^{1/3} \quad (2.11)$$

$$b = n(3\pi F_n (K_1 + K_2)/4K_3)^{1/3} \quad (2.12)$$

2.2.2.4 ทฤษฎีแรงคืบเชิงเส้นของคาลเคอร์

คาลเคอร์ ได้นำเสนอทฤษฎีที่ว่าถ้าการคืบมีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นพื้นที่ส่วนการไถลจะมีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นผลของการไถลนี้ไม่ต้องนำมาคิด ดังนั้นพื้นที่สัมผัสถือว่าเป็นพื้นที่ส่วนยึดติดอย่างเดียว นอกจากนี้ คาลเคอร์ ยังอธิบายพฤติกรรมของจุดสัมผัสไว้ว่า ตามเส้นที่ขนานกับทิศทางการกลิ้งอนุภาคเริ่มที่จะแทรกเข้ามาในพื้นที่สัมผัส ในขณะที่ถือว่าไม่มีการสั่นไถล แรงเฉือน

(traction) จะเริ่มเพิ่มมากขึ้น ส่วนของอนุภาคที่เริ่มหลุดออกจากพื้นที่สัมผัสแรงเฉือนนี้จะมีค่ากลายเป็นศูนย์ซึ่งสมการความสัมพันธ์ เชิงเส้นระหว่างแรงคืบและการคืบดังนี้

แรงคืบตามแนวยาว

$$F_x = - f_{33}\xi_x \quad (2.13)$$

แรงคืบด้านข้าง

$$F_y = - f_{11}\xi_y - f_{12}\xi_{sp} \quad (2.14)$$

โมเมนต์หมุนคืบ

$$M_z = - f_{12}\xi_y - f_{22}\xi_{sp} \quad (2.15)$$

โดยที่

F_x คือ แรงคืบในทิศทางการกลิ้ง

F_y คือ แรงคืบในทิศทางด้านข้าง

M_z คือ โมเมนต์การหมุนคืบ

ξ_x คือ ค่าการคืบตามแนวยาว

ξ_y คือ ค่าการคืบตามแนวด้านข้าง

ξ_{sp} คือ ค่าการคืบหมุนควง

$$f_{11} = (ab)Gc_{22} \quad (2.16)$$

$$f_{12} = (ab)^{3/2}Gc_{23} \quad (2.17)$$

$$f_{22} = (ab)^2Gc_{33} \quad (2.18)$$

$$f_{33} = (ab)Gc_{11} \quad (2.19)$$

เมื่อ f_{11} , f_{12} , f_{22} และ f_{33} เป็นสัมประสิทธิ์คืบ (Creep Coefficients)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a คือ ค่าครึ่งหนึ่งของแกนหลักของพื้นวงรีในทิศทางการกลิ้ง

b คือ ค่าครึ่งหนึ่งของแกนรองของพื้นวงรีในทิศด้านข้าง

G คือ โมดูลัสความแข็งเกร็ง

c_{ij} คือ สัมประสิทธิ์คืบการคืบและการหมุนคืบ (creepage and spin coefficients) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพัวของและอัตราส่วนแกนของพื้นวงรี (a/b) โดยหาค่าได้จากตาราง 2.2

ตารางที่ 2. 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การคืบและการกลิ้งของคาลเคอร์

Kalker's Creepage and Spin Coefficients

g	c ₁₁			c ₂₂			c ₂₃ = -c ₁₂			c ₃₃		
	v = 0	0.25	0.5	v = 0	0.25	0.5	v = 0	0.25	0.5	v = 0	0.25	0.5
(a/b)												
0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.53	0.334	0.473	0.731	6.42	8.28	11.7
0.2	2.59	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809	3.46	4.27	5.66
0.3	2.68	3.44	4.8	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889	2.49	2.96	3.72
0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977	2.02	2.32	2.77
0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07	1.74	1.93	2.22
0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18	1.56	1.68	1.86
0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29	1.43	1.50	1.60
0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40	1.34	1.37	1.42
0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51	1.27	1.27	1.27
(b/a)												
1.0	3.4	3.12	3.2	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63	1.21	1.19	1.16
0.9	3.51	4.22	5.3	3.51	3.81	4.16	1.44	1.57	1.77	1.16	1.11	1.06
0.8	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94	1.10	1.04	0.954
0.7	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18	1.05	0.965	0.852
0.6	4.06	4.78	5.8	4.06	4.50	5.04	2.01	2.25	2.50	1.01	0.892	0.751
0.5	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96	0.958	0.819	0.650
0.4	4.84	5.57	6.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70	0.912	0.747	0.549
0.3	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01	0.868	0.674	0.446
0.2	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89	0.828	0.601	0.341
0.1	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0	0.795	0.526	0.228

Note: $g = 0$, $c_{11} = \pi^2/4(1 - \nu)$; $c_{22} = \pi^2/4$; $c_{33} = -c_{12} = \pi^2/g \{1 + \nu(0.5\Delta + \ln 4 - 5)/3(1 - \nu)\}$; $\Delta = \ln(16/g^2)$; and $c_{33} = \pi^2/16(1 - \nu)g$.

Note. From "The Tangential Force Transmitted by Two Elastic Bodies Rolling Over Each Other With Pure Creepage" by Kalker, J. J., 1968., Wear, Vol.11, pp.421-430.

เนื่องจากแรงคืบและโมเมนต์ในสมการก่อนหน้าก็คือฟังก์ชันของการคืบในแต่ละล้อเกิดการคืบด้านข้าง(ξ_y) ตามแนวยาว(ξ_x) และการหมุนคืบ(ξ_{sp}) ซึ่งจะถูกกำหนดเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุมระหว่างล้อและรางทั้งล้อซ้ายและล้อขวาจะได้สมการดังนี้

ล้อซ้าย (Left)

$$\xi_{xL} = \left(\frac{1}{V}\right) \left\{ V \left[1 - \left(\frac{r_L}{r_0}\right) \right] - a\psi \right\}, \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi_{yL} = \left(\frac{1}{V}\right) [\dot{Y} + r_L \dot{\theta} - V\psi], \quad (2.21)$$

$$\xi_{spL} = \left(\frac{1}{V}\right) [\dot{\psi} - \Omega\delta_L], \quad (2.22)$$

ล้อขวา (Right)

$$\xi_{xR} = \left(\frac{1}{V}\right) \left\{ V \left[1 - \left(\frac{r_R}{r_0}\right) \right] - a\psi \right\}, \quad (2.23)$$

$$\xi_{yR} = \left(\frac{1}{V}\right) [\dot{Y} + r_R \dot{\theta} - V\psi], \quad (2.24)$$

$$\xi_{spR} = \left(\frac{1}{V}\right) [\dot{\psi} - \Omega\delta_R], \quad (2.25)$$

โดยที่ V คือ ความเร็ว (Velocity)

ψ คือ มุมหมุนสายรอบแกน z (yaw angle)

$r_{L,R}$ คือ รัศมีกึ่งล้อซ้าย, ล้อขวา (left and right rolling radius)

r_0 คือ รัศมีล้อปกติ (nominal wheel-axle set rolling radius)

d_0 คือ ครึ่งความกว้างราง (one-half the gauge)

\dot{Y} คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของการเคลื่อนที่แนวด้านข้าง แกน y เทียบกับเวลา

$\dot{\theta}$ คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งมุมโคลงรอบแกน X เทียบกับเวลา

$\dot{\psi}$ คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งมุมหมุนสายรอบแกน z เทียบกับเวลา

Ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุมปกติ (the nominal angular velocity)

$\delta_{L,R}$ คือ ค่ามุมล้อสัมผัสผัสราง ล้อซ้าย , ล้อขวา (left and right contact wheel)

พฤติกรรมแรงคืบโมเมนต์ สำหรับองศาความอิสระในแนวด้านข้างและการหมุนสาย เพื่อความง่ายในการเข้าใจตัวแปร ทางผู้วิจัยจึงกำหนดให้ $f_{33} = f_x$ และ $f_{11} = f_y$ จะลดรูปสมการได้ดังนี้

ล้อด้านซ้าย

$$F_{xL} = -\left(\frac{k_x}{V}\right) \left\{ V \left[1 - \left(\frac{r_L}{r_0}\right) \right] - a\psi \right\}, \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{yL} = -\left(\frac{f_y}{V}\right) [\dot{Y} - V\psi] \quad (2.27)$$

ล้อย้านขวา

$$F_{xR} = -\left(\frac{f_x}{V}\right) \left\{ V \left[1 - \left(\frac{r_R}{r_0}\right) \right] + a\dot{\psi} \right\} \quad (2.28)$$

$$F_{yR} = -\left(\frac{f_y}{V}\right) [\dot{Y} - V\psi] \quad (2.29)$$

2.2.3 สมการการเคลื่อนที่ของชุดล้อรถไฟ

2.2.3.1 ระบบการสั่นสะเทือนหลายองศาความอิสระ

(Multiple Degree of Freedom System)

สำหรับการสั่นสะเทือนที่มีองศาอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไป สามารถใช้พีชคณิตทางเมทริกซ์มาช่วยวิเคราะห์ในการแก้ไขปัญหา ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.30)

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = 0 \quad (2.30)$$

โดยที่

[M] คือ เมทริกซ์มวล มีขนาด $n \times n$

[C] คือ เมทริกซ์ความหน่วง มีขนาด $n \times n$

[K] คือ เมทริกซ์ความแข็ง มีขนาด $n \times n$

x คือ เวกเตอร์การกระจัด มีขนาด $n \times 1$

\dot{x} คือ เวกเตอร์ความเร็ว มีขนาด $n \times 1$

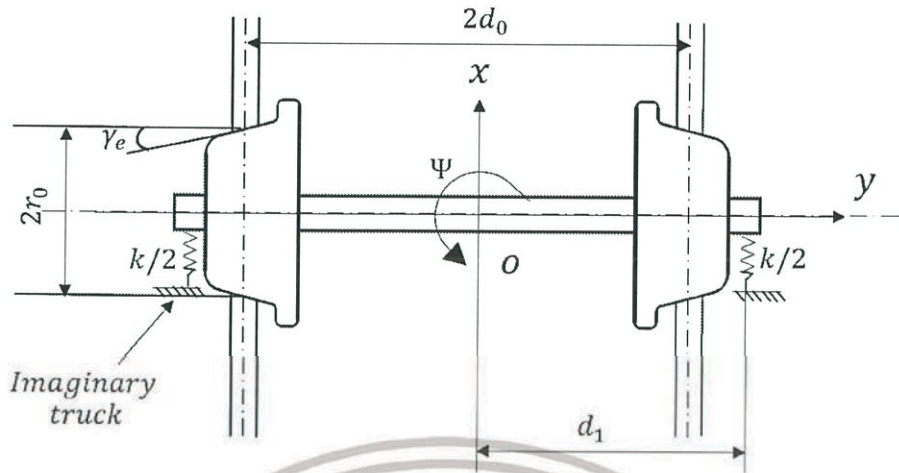
\ddot{x} คือ เวกเตอร์ความเร่ง มีขนาด $n \times 1$

0 คือ เวกเตอร์ศูนย์ มีขนาด $n \times 1$

2.2.3.2 การสั่นสะเทือนด้านข้างของชุดล้อเพลลาเดี่ยว โดยมีองศาอิสระเท่ากับสอง

(Lateral vibration of single wheelset in two degree of freedoms)

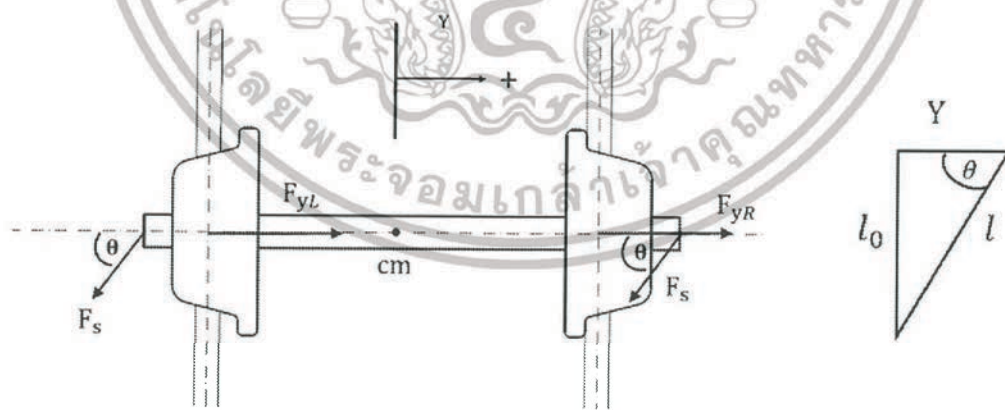
การเคลื่อนที่ของชุดล้อเดี่ยว (single wheelset) ในทิศ x ตามรูป ขณะเกิดการสั่นสะเทือนในแนวด้านข้างแนวแกน y และเกิดการหมุนสายรอบแกน z จะสามารถเขียนแบบจำลองแบบไม่มีตัวหน่วงเพื่อหาสมการการเคลื่อนที่ โดยองศาอิสระเท่ากับสอง ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง (lateral motion, Y) และองศาอิสระที่สองคือ การเคลื่อนที่แบบหมุนควง (yawing motion, ψ) ซึ่งสมมติให้ ค่าการกระจัดของ Y และ ψ มีค่าน้อยมาก



รูปที่ 2.8 การลั่นสะเทือนตามแนวด้านข้างของรถไฟที่มีองศาอิสระเท่ากับสอง

- โดยที่ k คือ ค่านิยของสปริง (N/m)
 $2d_0$ คือ ความกว้างของราง (m)
 $2d_1$ คือ ระยะห่างระหว่างสปริงทั้ง 2 ด้าน (m)
 γ_e คือ มุมกรวยของล้อ (rad)
 r_0 คือ รัศมีของล้อ (m)

จากรูปที่ 2.8 สามารถวาด free body diagram พร้อมอธิบายได้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงทิศทางของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	Y	คือ การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง (m)
	F_s	คือ แรงของสปริง (N)
	F_{yL}	คือ แรงค้ำในแนวด้านข้างของล้อซ้าย (N)
	F_{yR}	คือ แรงค้ำในแนวด้านข้างของล้อขวา (N)
	l_0	คือ ความยาวเริ่มต้นของสปริง (m)
	L	คือ ความยาวของสปริงที่สภาวะใด ๆ (m)

จากรูป 2.9 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ตามกฎของนิวตัน (Newton's Law) ได้ดังนี้

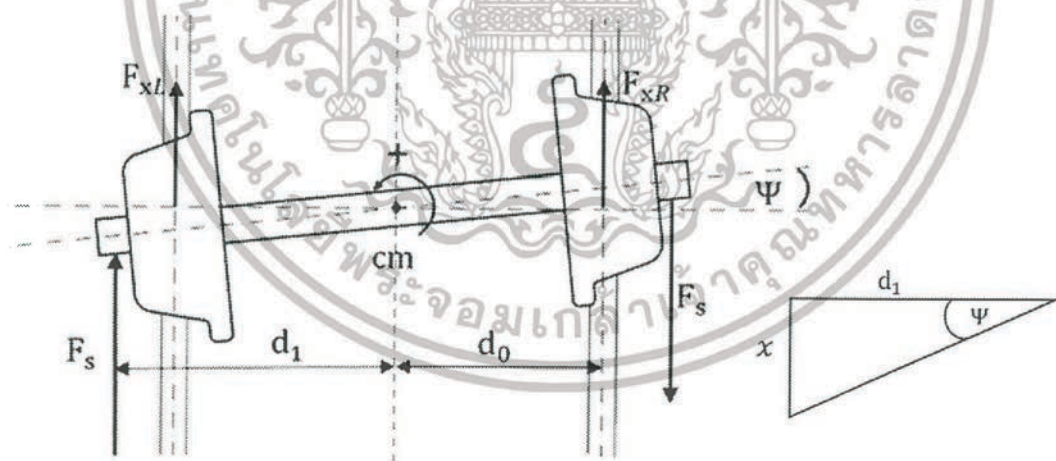
$$\rightarrow \sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (2.31)$$

โดยที่ m คือ มวลของชุดล้อเพลาดียว (kg)
 \vec{a} คือ ความเร่งในทิศด้านข้าง (m/s^2)

$$-2F_s \cos\theta + F_{yL} + F_{yR} = m\ddot{Y} \quad (2.32)$$

โดยที่ $F_s = \frac{k}{2}(l-l_0)$ และ $\cos\theta = \frac{Y}{l}$ แทนลงในสมการที่ (2.32) และจัดรูปใหม่จะได้

$$m\ddot{Y} + k\left(1 - \frac{l_0}{l}\right)Y - F_{yL} - F_{yR} = 0 \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.10 แสดงทิศทางของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบหมุนควง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ ψ คือ การเคลื่อนที่แบบหมุนควง (rad)
 x คือ การเคลื่อนที่แนวตามยาว (m)
 F_{xL} คือ แรงค้ำในแนวกลิ่งของล้อซ้าย (N)
 F_{xR} คือ แรงค้ำในแนวกลิ่งของล้อขวา (N)

จากรูป 2.10 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ตามกฎของออยเลอร์ (Euler's Law) ได้ดังนี้

$$+\sum \vec{M}_{cm} = (I\alpha)_{cm} \quad (2.34)$$

โดยที่ I_{cm} คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

α คือ ความเร่งเชิงมุมของชุดเพลาล้อ (rad/s^2)

$$F_{xR}d_0 - F_{xL}d_0 - 2F_s d_1 = I_{cm}\ddot{\psi} \quad (2.35)$$

โดยที่ $F_s = \frac{k}{2}(x)$ และ $x = \psi d_1$ เมื่อ $\psi \rightarrow 0$ หรือมีค่าน้อยมาก แทนในสมการที่ (2.35) และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$I_{cm}\ddot{\psi} + kd_1^2\psi + F_{xL}d_0 - F_{xR}d_0 = 0 \quad (2.36)$$

จากสมการ (2.26), (2.27), (2.28) และ (2.29) แทนค่าลงในสมการที่ (2.33) และ (2.36) จะได้ได้ดังนี้

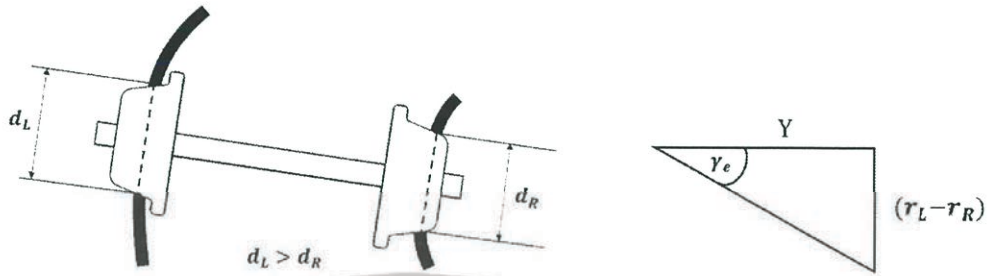
$$m\ddot{Y} + k\left(1 - \frac{l_0}{l}\right)Y + \left(\frac{f_y}{V}\right)[\dot{Y} - V\psi] + \left(\frac{f_y}{V}\right)[\dot{Y} - V\psi] = 0 \quad (2.37)$$

$$\ddot{Y} + 2\frac{f_y}{V}\dot{Y} + k\left(m1 - \frac{l_0}{l}\right)Y - 2f_y\psi = 0 \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{cm}\ddot{\psi} + kd_1^2\dot{\psi} - \left(\frac{f_x}{V}\right)\left\{V\left[1 - \left(\frac{r_L}{r_0}\right)\right] - a\dot{\psi}\right\}d_0 + \left(\frac{f_x}{V}\right)\left\{V\left[1 - \left(\frac{r_R}{r_0}\right)\right] + a\dot{\psi}\right\}d_0 = 0 \quad (2.39)$$

$$I_{cm}\ddot{\psi} + kd_1^2\dot{\psi} - \frac{2f_x d_0^2}{V}\dot{\psi} + \frac{f_x d_0}{r_0}(r_L - r_R) = 0 \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของล้อซ้ายและขวาขณะเคลื่อนที่ ณ เวลาใด ๆ

พิจารณา จากรูป 2.11 จะได้สมการ $\frac{1}{2}(r_L - r_R) = \gamma_e Y$ นำไปแทนในสมการ (2.37) ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ จึงเป็นสมการที่ (2.41) และ (2.42)

$$m\ddot{Y} + 2\frac{f_x}{V}\dot{Y} + k\left(1 - \frac{l_0}{l}\right)Y - 2f_y\dot{\psi} = 0 \quad (2.41)$$

$$I_{cm}\ddot{\psi} + \frac{2f_x d_0^2}{V}\dot{\psi} + kd_1^2\dot{\psi} + \frac{2f_x \gamma_e d_0}{r_0}Y = 0 \quad (2.42)$$

โดยสมการที่ (2.41) และสมการที่ (2.42) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[M]\ddot{\underline{X}} + [C]\dot{\underline{X}} + [K]\underline{X} = \underline{0} \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_{cm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\frac{f_x}{V} & 0 \\ 0 & \frac{2f_x d_0^2}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k\left(1 - \frac{l_0}{l}\right) & -2f_y \\ \frac{2f_x \gamma_e d_0}{r_0} & kd_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 หลักความคล้ายคลึงทางกล (mechanical similarity law)

การย่ออัตราส่วนด้วยหลักความคล้ายคลึงทางกล (mechanical similarity law) โดยคุณสมบัติของวัสดุเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการใช้วิธีปรับขนาดย่อส่วนและยังมีผลต่อเงื่อนไขที่กำหนดในเรื่องของความคล้ายคลึงกัน ในการย่อจะสามารถทำโดยปรับขนาดรูปทรงทางเรขาคณิต นิยามเป็นอัตราส่วนความยาว จากงานวิจัยของ Hyun Moo และคณะ จะได้ว่า

อัตราส่วนการย่อของความยาว (ϕ_l) คือ

$$\phi_l = \frac{l_0}{l_1} = \phi \quad (2.45)$$

l_0 คือ ขนาดความยาวจริง

l_1 คือ ขนาดความยาวของแบบจำลอง

และ ϕ คือ ขนาดการย่อส่วน

ดังนั้นอัตราส่วนการย่อของส่วนต่าง ๆ จะสามารถทำได้เช่นเดียวกัน

อัตราส่วนการย่อของเวลา (ϕ_t) คือ

$$\phi_t = \frac{t_0}{t_1} \quad (2.46)$$

อัตราส่วนการย่อของความหนาแน่น (ϕ_p) คือ

$$\phi_p = \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (2.47)$$

อัตราส่วนการย่อของปริมาตร (ϕ_v) คือ

$$\phi_v = \phi_l \phi_l \phi_l = \phi_l^3 = \phi^3 \quad (2.48)$$

อัตราส่วนการย่อของความเร่ง (ϕ_a) คือ

$$\phi_a = \frac{\phi_l}{\phi_t^2} = \phi \quad (2.49)$$

อัตราส่วนการย่อของมวล (ϕ_m) คือ

$$\phi_m = \phi_p \phi_v^3 = \phi^3 \quad (2.50)$$

อัตราส่วนการย่อของโมเมนต์ความเฉื่อย (ϕ_I) คือ

$$\phi_I = \phi_m \phi_l^2 = \phi_l^3 \phi_l^2 = \phi_l^5 = \phi^5 \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนการย่อของค่าความแข็งของสปริง (φ_k) คือ

$$\varphi_k = \frac{\varphi_F}{\varphi_1} = \frac{\varphi_p \varphi_1^3}{\varphi_1^2} = \varphi^3 \quad (2.52)$$

อัตราส่วนการย่อของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (φ_g) คือ

$$\varphi_g = \frac{g_0}{g_1} \quad (2.53)$$

อัตราส่วนการย่อของค้ำยังมอดูลัส (φ_E) คือ

$$\varphi_E = \frac{E_0}{E_1} \quad (2.54)$$

อัตราส่วนการย่อของค่าอัตราส่วนของปีวของ (φ_v) คือ

$$\varphi_v = \frac{v_0}{v_1} \quad (2.55)$$

อัตราส่วนการย่อของค่าโมดูลัสความแกร่ง (φ_G) คือ

$$\varphi_G = \frac{G_0}{G_1} \quad (2.56)$$

อัตราส่วนการย่อของแรงคืบ (Creep force Scaling Factor) (φ_f) คือ

$$\varphi_f = \frac{f_1}{f_0} \quad (2.57)$$

จากสมการของ Hertz's Theory สมการที่ (2.11), (2.12)

$$a = m(3\pi F_n (K_1 + K_2) / 4K_3)^{1/3}$$

$$b = n(3\pi F_n (K_1 + K_2) / 4K_3)^{1/3}$$

$$f_x = (ab)Gc_{22} \quad (2.58)$$

$$f_y = (ab)Gc_{11} \quad (2.59)$$

$$\varphi_{K1} = \varphi_{K2} = \frac{1}{\varphi_E} \quad (2.60)$$

$$\varphi_{K3} = \frac{1}{\varphi_1} = \frac{1}{\varphi} \quad (2.61)$$

$$\varphi_{N(\text{normal force})} = \varphi_m \varphi_g = \varphi^3 \quad (2.62)$$

$$\varphi_{a,b} = \left(\frac{\varphi^3}{1/\varphi}\right)^{1/3} = \varphi^{4/3} \quad (2.63)$$

$$\varphi_{fx} = \varphi_{fy} = \varphi^{4/3} \varphi^{4/3} = \varphi^{8/3} \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การคำนวณรอบและค่ากำลังมอเตอร์

การคำนวณค่ากำลังมอเตอร์

ในการเลือกหาขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสม เราคำนวณจากกำลังการขับของมอเตอร์ได้จาก

$$P = \tau\omega \quad (2.65)$$

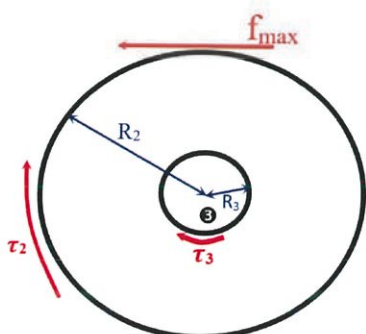
โดยที่	P	คือ กำลังของมอเตอร์ (W)
	τ	คือ ทอร์กของมอเตอร์ (N*m)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)



รูปที่ 2.12 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงขนาดและทิศทางของแรงและโมเมนต์ของชุดทดลอง

เนื่องจาก Roller rig (R_2) เป็นตัวขับเคลื่อนให้ล้อที่หยุดนิ่งเคลื่อนที่ โดยอาศัยแรงจากมอเตอร์ที่ส่งผ่านเพลา (R_3) มายัง Roller rig (R_2) เอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างล้อ (R_1) และ Roller rig (R_2)

$$\text{- Roller rig } (R_2) \quad + \sum M_o; \sum M = 0 \quad (2.66)$$



$$\tau_2 - f_{\max} = 0 \quad (2.67)$$

$$\tau_2 - \mu NR_2 = 0 \quad (2.68)$$

$$\tau_2 - \mu mgR_2 = 0 \quad (2.69)$$

รูปที่ 2.13 แผนภาพวัตถุอิสระ

ของ Roller Rig และเพลา

ในการจะหาลำดับมอเตอร์นั้น เราจะพิจารณาที่ Roller rig คือ R_2 ซึ่งมีเพลา (R_3) เดียวกับมอเตอร์ทำให้ Roller rig และมอเตอร์มีทอร์กเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_2 = \tau_3 \quad (2.70)$$

การหาความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (ω) พิจารณาที่พื้นผิวที่สัมผัสกันจะมีความเร็วเชิงเส้น (v) เท่ากัน
จะได้ว่า

$$\omega_i R_i = \omega_n R_n \quad (2.71)$$

โดยที่ ω_i, ω_n คือ ความเร็วเชิงมุมของพื้นผิว i และพื้นผิว n ที่สัมผัสกัน

R_i, R_n คือ รัศมีของพื้นผิว i และพื้นผิว n ที่สัมผัสกัน

กรณีนี้เราทราบความเร็วเชิงมุมของล้อ (ω_1) จากการคำนวณสมการดังกล่าว ทำให้สามารถ
ทราบความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (ω_3) แล้วนำค่า ω_3 และ τ_3 ที่ทราบไปแทนในสมการ (2.65) เพื่อ
หาค่ากำลังของมอเตอร์ และนำไปหาขนาดของมอเตอร์ที่เหมาะสม

การคำนวณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

ในการเลือกหาขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสมกับชุดทดลอง เราสามารถหาขนาดมอเตอร์ได้จากความเร็ว
รอบของมอเตอร์ได้อีกวิธีหนึ่ง

$$\omega = 2\pi N \quad (2.72)$$

จัดรูปจะได้

$$N = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.73)$$

เมื่อต้องการเปลี่ยนหน่วย N จาก RPM เป็น RPS จะได้ว่า $N = \frac{\omega \times 60}{2\pi} \text{ (RPS)}$ (2.74)

โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)

N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)

จาก $v = \omega r$ (2.75)

จัดรูปจะได้ $\omega = \frac{v}{r}$ (2.76)

โดยที่ v คือ ความเร็วมอเตอร์ (m/s)

r คือ รัศมีของล้อ (m)

นำสมการ (2.76) ไปแทนในสมการ (2.73) ได้ความเร็วรอบของมอเตอร์ แล้วนำไปเลือกขนาดมอเตอร์
ที่เหมาะสมต่อไป

2.2.6 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (RMS, root mean square value)

ในการคำนวณความเร่งของการสั่นสะเทือน จะใช้วิธีการหาค่ารากที่สองกำลังสองของกำลังสองเฉลี่ย โดยนำขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัดในโดเมนเวลาที่เกิดขึ้นช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาที่พิจารณาและถอดรากที่สอง จำได้ตั้งสมการที่ (2.77)

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T a^2(t) dt \right)} \quad (2.77)$$

โดย a_{rms} คือ ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย

a คือ ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาใด ๆ

T คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา

2.2.7 ค่าความแข็งสปริง

การออกแบบสปริงขดให้มีค่าความแข็งตามที่ต้องการ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.78

$$k = \frac{F}{y} = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (2.78)$$

โดยที่ k คือ ค่าความแข็งของสปริง (N/m)

F คือ ขนาดของแรงที่กระทำ ต่อสปริง (N)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริง (m)

G คือ ค่า Shear Modulus of Rigidity ของวัสดุที่ทำสปริง (Pa)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริง (m)

N_a คือ จำนวนขดทำงานของสปริง

2.2.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาด

เป็นการหาค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าในทางทฤษฎีและค่าจริงที่ได้ เพื่อดูว่ามีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนน้อยก็เปอร์เซ็นต์ หากผลที่ได้เป็นบวกแสดงว่าค่าจริงน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีและในทางกลับกันผลเป็นลบแสดงว่าค่าจริงมากกว่าค่าทางทฤษฎี

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าจากทฤษฎี} - \text{ค่าจริง}}{\text{ค่าจากทฤษฎี}} \times 100 \quad (2.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

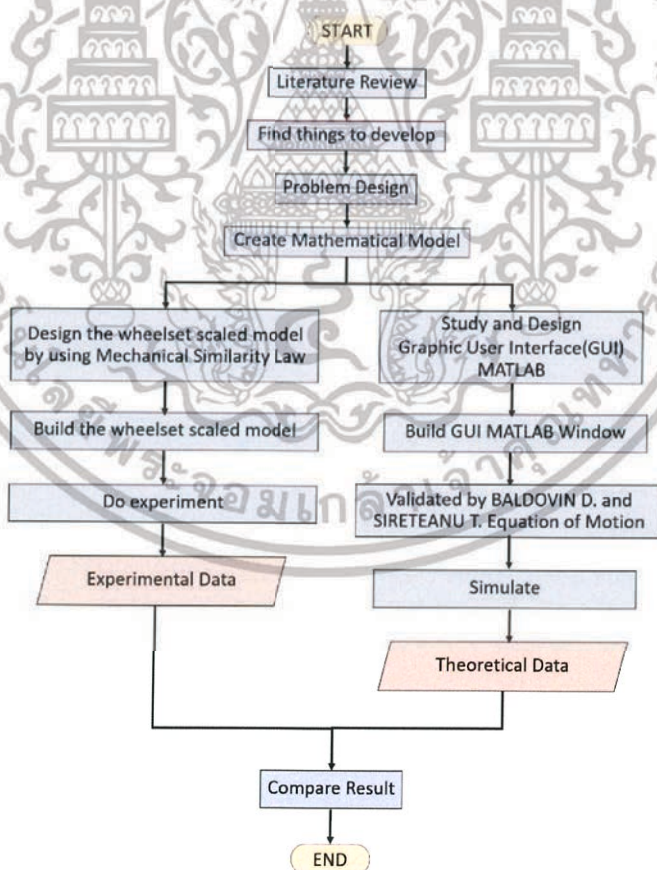
บทที่ 3

วิธีดำเนินการและชุดทดลอง

วิธีดำเนินการและพัฒนาแบบชุดล้อเพลาดเดี่ยว (single wheelset) โดยใช้หลักความคล้ายคลึงทางกล (mechanical similarity law) และการเขียนแผนผังการทำงานของโปรแกรม ซึ่งจะประกอบด้วย ขั้นตอนการดำเนินงาน การออกแบบชุดทดลองชุดล้อเพลาดเดี่ยว (single wheelset) การเขียนแผนผังการทำงานของโปรแกรม การใช้งานชุดทดลอง และวิธีการทดลองให้ได้ผลจริงมาวิเคราะห์เทียบกับทฤษฎีคำนวณ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มที่ศึกษาปัญหาการสั่นของชุดล้อ ศึกษาส่วนประกอบประกอบขนาดของรถไฟ การสัมพันธ์กันระหว่างผิวรางและผิวล้อ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาเขียนสมการการเคลื่อนที่และออกแบบชุดทดลอง



รูปที่ 3 . 1 แผนผัง (flowchart) แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

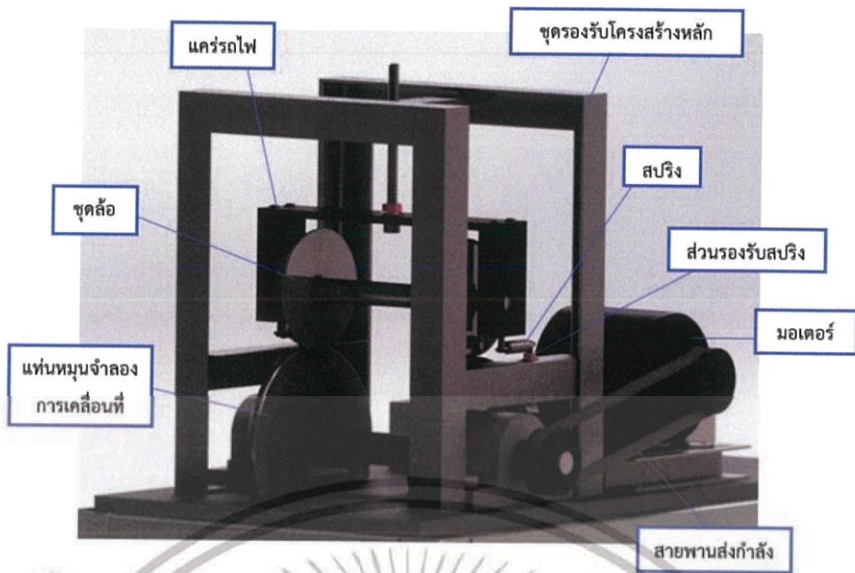
3.2 การออกแบบพัฒนาชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset)

จากการศึกษาการออกแบบชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset) พัฒนาโดยใช้ขนาด track gauge 1.435 เมตร , ราง 60UIC , ชุดล้อรถไฟ S1002 และน้ำหนักรวมถึงค่าสปริงในตัวรถขนาดจริง จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Hyun-Moo Hur ซึ่งจะทำการเขียนแบบจำลองในโปรแกรม SOLIDWORKS ในการย่อส่วนขนาดความยาว 1:10 และยังสามารถทำนายผลของน้ำหนักชุดล้อและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้ด้วย โดยได้ทำการออกแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.2 และทำการสร้างขึ้นด้วยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless) ในส่วนประกอบหลักของชุดทดลอง ดังรูปที่ 3.3

3.2.2 ส่วนประกอบ

1. ชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset) คือ ส่วนจำลองของเพลลาล้อรถไฟ ซึ่งมีชุดล้อทั้งหมด 2 ขนาดความเอียงล้อ ได้แก่ 1/20 และ 1/40 โดยย่อขนาดจากรูปแบบล้อรถไฟ S1002
2. ชุดล้อแทนหมุน (roller rig) คือ ส่วนที่จำลองหัวราง ราง 60UIC และเป็นชุดขับเคลื่อนหมุนด้วยมอเตอร์ ส่งผลให้ชุดล้อเพลลาเดี่ยวเกิดการเคลื่อนที่
3. ตัวปรับระยะสปริง คือ ส่วนช่วยปรับระยะของสปริงยึด เพื่อให้ได้แรงดึงเริ่มต้นที่เหมาะสม และมีแรงดึงที่ใกล้เคียงกันทั้งสองฝั่ง
4. โครง คือ ส่วนที่ประคองการเคลื่อนที่ของชุดเพลลาล้อเพื่อไม่ให้เคลื่อนที่หลุดจากชุดล้อแทนหมุน (roller rig) และเป็นส่วนติดตั้งตัวปรับระยะสปริง
5. ฐานรองรับชุดทดลอง คือ ส่วนที่รองรับน้ำหนักทั้งหมดของชุดทดลอง โดยฐานจะมีขาฉิ่งไว้ปรับระดับเพื่อให้ได้ระนาบ
6. ชุดมอเตอร์ คือ ส่วนกำลังขับเคลื่อนชุดล้อแทนหมุนส่งผ่านกำลังไปยังชุดเพลลาล้อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น มีขนาด 24 Vdc โดยจะมีกล่องแปลงแรงไฟและชุดควบคุมความเร็ว
7. ชุดเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ คือ ส่วนวัดความเร็วรอบ โดยใช้เซนเซอร์อินฟาเรดและใช้ Arduino คำนวณค่าสามเร็วที่วัดได้แสดงผลออกจากจอ LCD

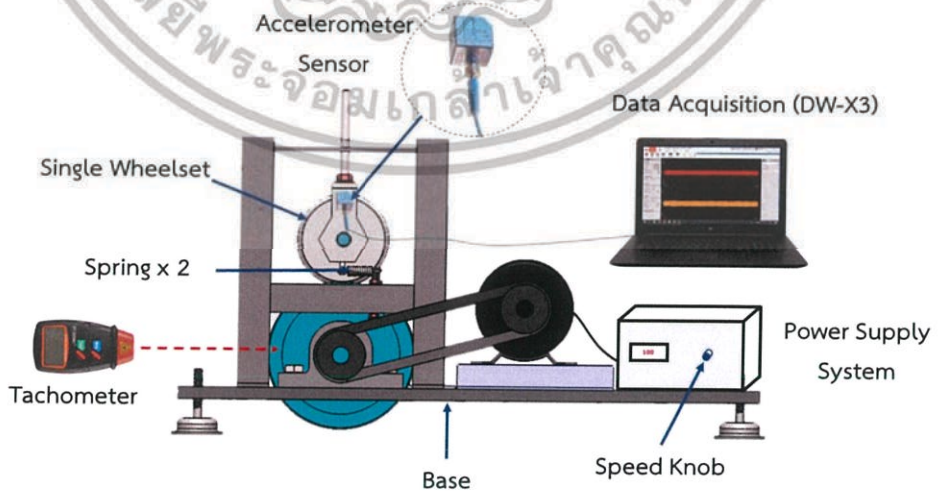
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 . 2 แบบจำลองย่อขนาดของชุดล้อเพลลาเดี่ยวในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

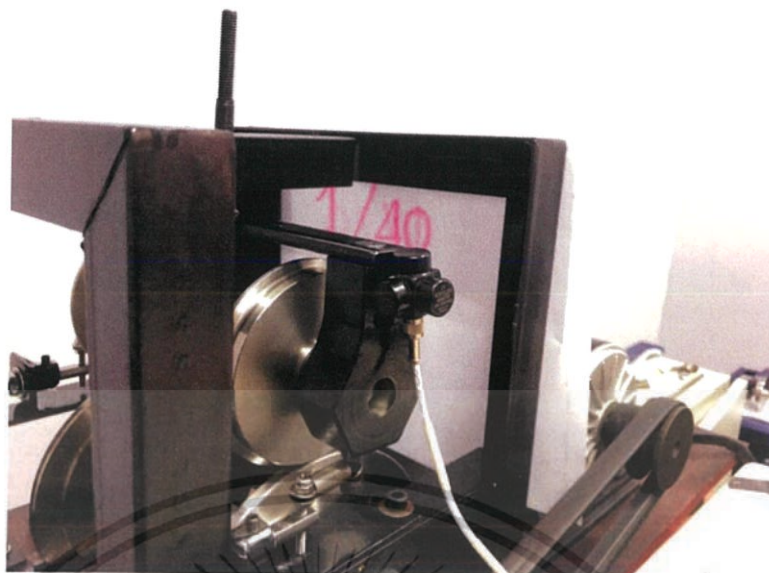


ก.) ชุดโครงสร้างหลักพร้อมชุดล้อเพลลาเดี่ยว และกล่องควบคุมความเร็วรอบ (RPM)



ข.) แผนผังไดอะแกรมการติดตั้งชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค.) ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์และตำแหน่งของสปริง



ง.) ตำแหน่งการสัมผัสระหว่างแบบจำลองล้อ (Wheelset) และล้อกลิ้ง (Roller rig)

รูปที่ 3.3 แบบจำลองย่อขนาดของชุดล้อเพลาคู่เดี่ยวที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส และกล่องควบคุมความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ค่าพารามิเตอร์จากการย่ออัตราส่วน 1:10

ในการหาค่าพารามิเตอร์จากการย่ออัตราส่วนในชุดทดลองเพื่อนำไปใช้ ในการคำนวณค่าทางทฤษฎีและสร้างชุดทดลอง ด้วยวิธีในหัวข้อ 2.2.4

อัตราส่วนของความยาว	$\varphi_l = 10 = \varphi$
อัตราส่วนของเวลา	$\varphi_t = 1$
อัตราส่วนของความหนาแน่น	$\varphi_\rho = 1$
อัตราส่วนของปริมาตร	$\varphi_v = \varphi^3 = 10^3$
อัตราส่วนของความเร่ง	$\varphi_a = \varphi = 10$
อัตราส่วนของมวล	$\varphi_m = \varphi^3 = 10^3$
อัตราส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อย	$\varphi_J = \varphi^5 = 10^5$
อัตราส่วนของค่าความแข็งของสปริง	$\varphi_k = \varphi^3 = 10^3$
อัตราส่วนของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก	$\varphi_g = 1$
อัตราส่วนของค้ำยมอดูลัส	$\varphi_E = 1$
อัตราส่วนของค่าอัตราส่วนของปัวซอง	$\varphi_\nu = 1$
อัตราส่วนของค่าโมดูลัสความแกร่ง	$\varphi_G = 1$
อัตราส่วนของแรงค้ำ	$\varphi_{F_x} = \varphi_{F_y} = \varphi^{8/3} = 10^{8/3}$

ดังนั้นอัตราส่วนดังกล่าวจะสามารถนำไปหาควาขนาดของชุดจำลอง ได้ค่าดังตารางดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

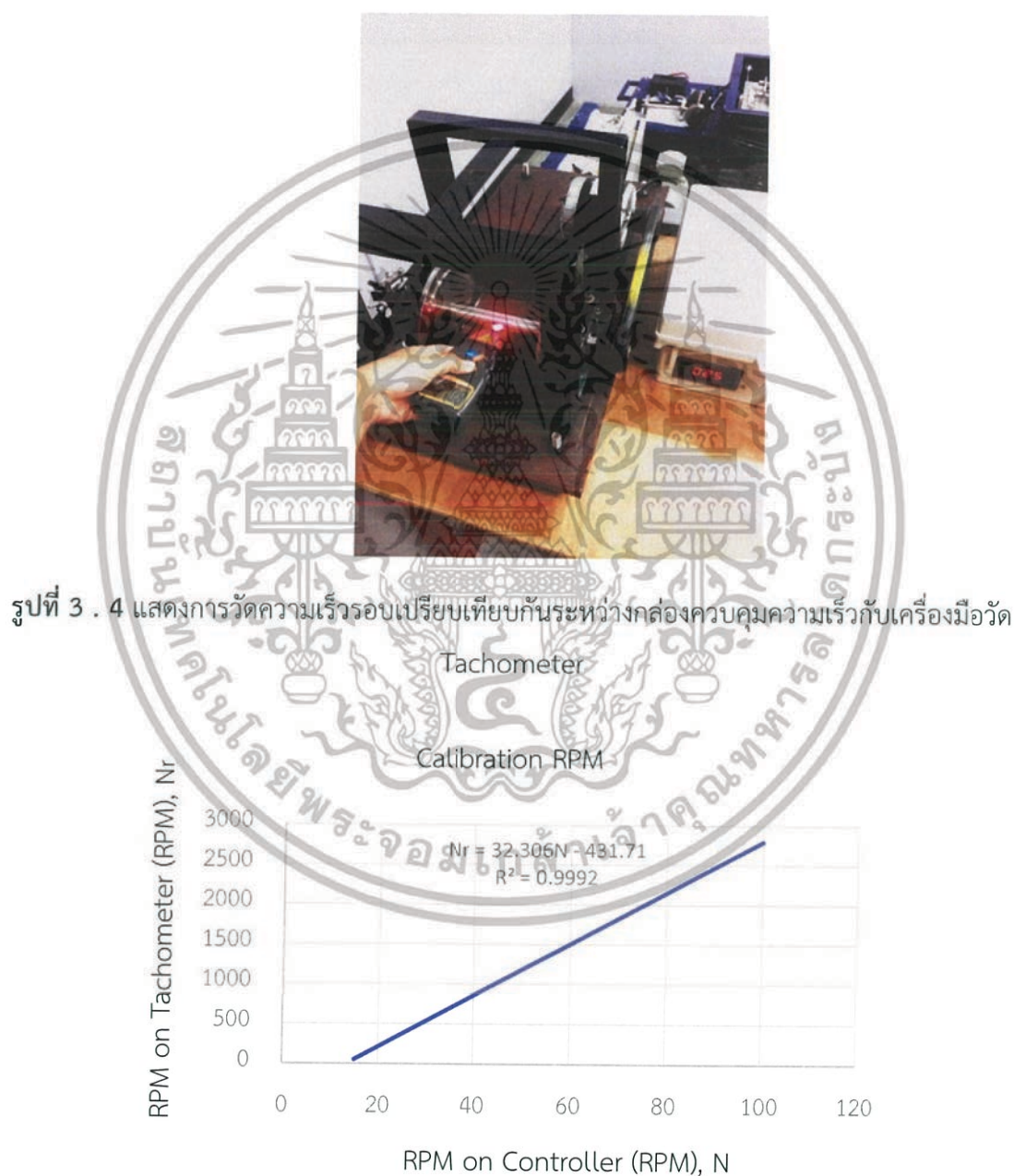
ตารางที่ 3 . 1 ตารางค่าพารามิเตอร์ในชุดทดลอง ($\varphi = 10$)

ค่าพารามิเตอร์	ขนาดจริง	สเกล	ขนาดจำลอง	หน่วย
มวลชุดเพลาล้อ (wheelset)	2755	$1/\varphi^3$	2.755	kg
โมเมนต์ความเฉื่อยชุดเพลาล้อรอบแกน Z	1932	$1/\varphi^5$	0.01932	kgm ²
รัศมีล้อ (wheel radius)	0.425	$1/\varphi$	0.0425	m
ครึ่งความกว้างรางรถไฟ (half of track width)	0.75	$1/\varphi$	0.075	m
สปริงแครแนวแกน X	2,000,000	$1/\varphi^3$	2,000	N/m
รัศมีล้อแทนหมุน (roller radius)	0.75	$1/\varphi$	0.075	m
ค่าสัมประสิทธิ์แรงคืบแนวตามยาว ล้อ1/20	3,795,800	$1/\varphi^{8/3}$	8,177.8	N
ค่าสัมประสิทธิ์แรงคืบแนวตามขวาง ล้อ1/20	3,429,900	$1/\varphi^{8/3}$	7,389.5	N
ค่าสัมประสิทธิ์แรงคืบแนวตามยาว ล้อ1/40	3,798,200	$1/\varphi^{8/3}$	8,182.97	N
ค่าสัมประสิทธิ์แรงคืบแนวตามขวาง ล้อ1/40	3,432,100	$1/\varphi^{8/3}$	7,394.24	N
ค่า Young's Modulus	207	1	207	GPa
ค่าแรงโน้มถ่วง (gravity)	9.81	1	9.81	m/s ²
ค่าโมดูลัสความแกร่ง	79.3	1	79.3	GPa
ค่าอัตราส่วนของปัวซอง	0.29	1	0.29	
ค่าระยะห่างสปริงจากจุดกึ่งกลางของขนาดทาง (d_1)			0.101	m
ค่าความยาวของสปริงในตำแหน่งสมดุล (length of spring in the equilibrium state)			0.03513	m
ค่าความยาวของสปริง (free length of spring)			0.035	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

เนื่องจากค่าที่แสดงบนกล่องควบคุมความเร็วรอบไม่ได้แสดงถึงความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น จึงทำการวัดเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบบนเพลาชุดล้อกลิ้ง(Roller rig axle) ที่วัดด้วย Tachometer เปรียบเทียบกับค่าที่แสดงบนกล่องควบคุมความเร็วรอบ รูปที่ 3.4 จากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบบนกล่องควบคุมและความเร็วรอบที่วัดได้จริงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3 . 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เกิดขึ้นกับความถี่ที่ Tachometer วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าความเร็วรอบมีความสัมพันธ์กันเป็นลักษณะเชิงเส้น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$N_r = 32.306N - 431.71 \quad (3.1)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบที่แสดงบนกล่องควบคุม ,RPM

N_r คือ ความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจริง ,RPM

นำค่าความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจริง (N_r) ที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่า ความถี่กระตุ้น (Hz) และ ความเร็ว (m/s) ที่จุดสัมผัสระหว่างล้อจำลอง (wheelset) และชุดล้อกลิ้ง (roller rig) โดยรัศมีของล้อกลิ้ง คือ 75 mm

$$\text{ความถี่กระตุ้น (exciting frequency ,}f\text{)} = \frac{N_r}{60} \text{ Hz} \quad (3.2)$$

$$\text{ความเร็วที่จุดสัมผัส (velocity ,}v\text{)} = \frac{2\pi N_r}{60} \times 0.075 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

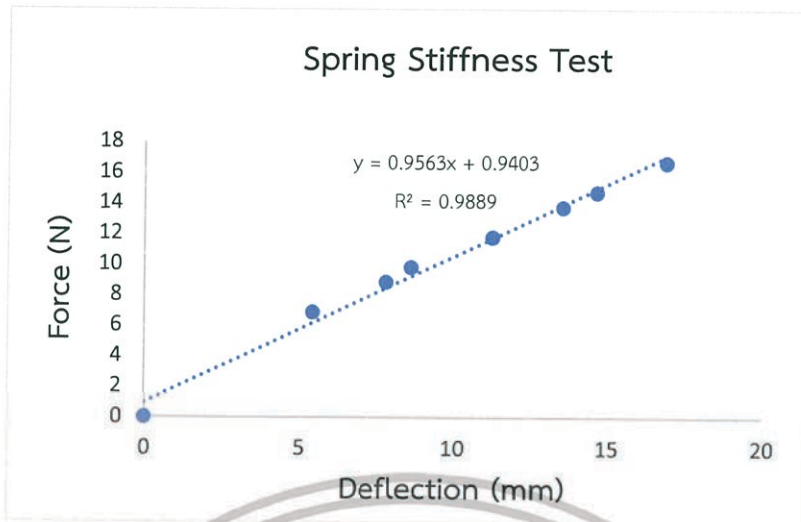
3.4 การสอบเทียบค่าความแข็งของสปริง

เพื่อให้สปริงมีค่าความแข็งเท่ากับค่าที่คำนวณและออกแบบไว้ ต้องทำการทดสอบความแข็งของสปริงที่จัดหาได้ ซึ่งควรมีค่าเท่ากันหรือน้อยกว่าที่คำนวณได้ การทดสอบค่าความแข็งของสปริงสามารถทำได้โดยนำสปริงที่ต้องการทดสอบมาประกอบกับมวลมาตรฐาน จากนั้นทำการใส่มวลทั้งหมด และนำ Dial gauge มาวัดระยะหดของสปริงเมื่อมวลลดลง จากนั้นบันทึกค่าระยะหดของสปริงดังรูปที่ 3.6 แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังกราฟที่ 3.7



รูปที่ 3 . 6 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งของสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะยืดของสปริง ที่มีค่าความแข็งของค่านวมได้เท่ากับ 956.3 N/m

จากการสอบเทียบได้ค่าความแข็งจริงของสปริง เท่ากับ 956.3 N/m (ต่อสปริง 1 ตัว) และค่าความแข็งทางทฤษฎีของสปริงเท่ากับ 1050 N/m (ต่อสปริง 1 ตัว) สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ 2.79 ได้เท่ากับ 8.924 % ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.5 การพัฒนาโปรแกรม MATLAB

การเคลื่อนที่ของชุดล้อเพลลาเดี่ยวสามารถวิเคราะห์ได้เป็นดังสมการ (2.44) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองของระยะกระจัดและมุมส่าย นั่นคือ ตัวแปร y และ ψ ตามลำดับ ซึ่งต้องทำการปริพันธ์เทียบกับเวลาเพื่อหาผลเฉลยของทั้งสองตัวแปร โดยในการหาปริพันธ์ จำเป็นต้องมีเงื่อนไขเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ (Initial condition) โดยทั่วไปคือ ค่าระยะกระจัดเริ่มต้นและความเร็วเริ่มต้นของทั้งสองตัวแปร หรือสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\underline{x}_0 = \begin{Bmatrix} Y_0 \\ \Psi_0 \end{Bmatrix} \text{ และ } \dot{\underline{x}}_0 = \begin{Bmatrix} \dot{Y}_0 \\ \dot{\Psi}_0 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

การเขียนโปรแกรมคำนวณการวิเคราะห์ผลเฉลยของสมการ (2.44) ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ Toolbox คำสั่งการหาค่าปริพันธ์เชิงตัวเลข ด้วยคำสั่ง ode45 (Runge - Kutta fourth order) ต้องมีการสร้าง state variables ดังนี้

$$\underline{x} = \begin{Bmatrix} Y \\ \Psi \\ \dot{Y} \\ \dot{\Psi} \end{Bmatrix} \text{ และ } \dot{\underline{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\Psi} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\Psi} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.44) และ (3.5) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ \underline{x} และ $\dot{\underline{x}}$ ในสมการ (3.6) ได้ดังนี้

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \underline{x} + [B]F \quad (3.6)$$

และเงื่อนไขเริ่มต้นของการหาปริพันธ์ คือ $\underline{x}_0 = \begin{Bmatrix} Y_0 \\ \Psi_0 \\ \dot{Y}_0 \\ \dot{\Psi}_0 \end{Bmatrix}$ ซึ่งในโครงงานนี้จะมีค่าดังนี้

$$\underline{x}_0 = \begin{Bmatrix} Y_0 = 0.003 \text{ m} \\ \Psi_0 = 0 \\ \dot{Y}_0 = 0 \\ \dot{\Psi}_0 = 0 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

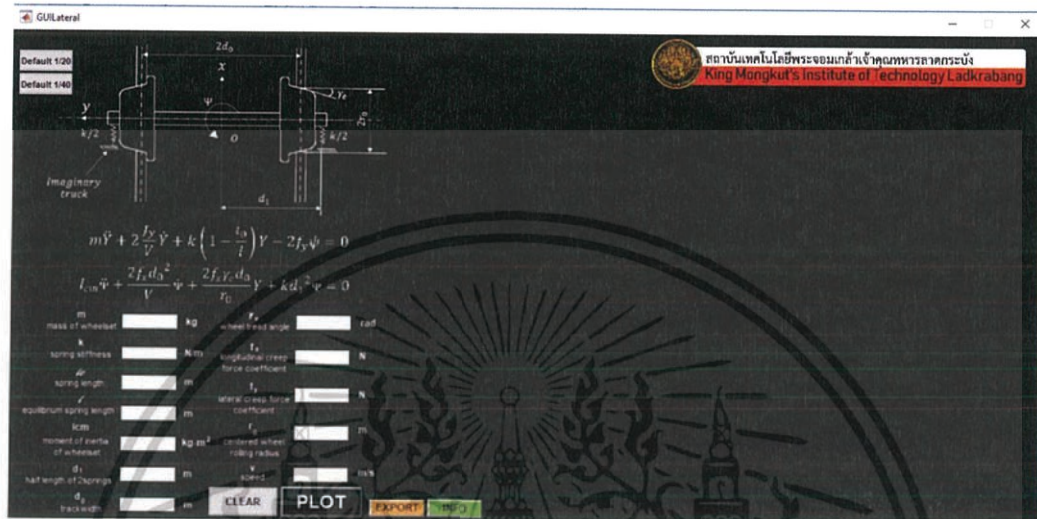
3.1.1 การเขียนโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้

(Graphic User Interface, GUI)

ในการคำนวณทางทฤษฎีผ่านโปรแกรม MATLAB นั้น หากต้องการจะศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ เราจำเป็นจะต้องเข้าไปแก้ไขโค้ดในโปรแกรมที่ได้สร้างไว้ ในโครงงานนี้จึงได้มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

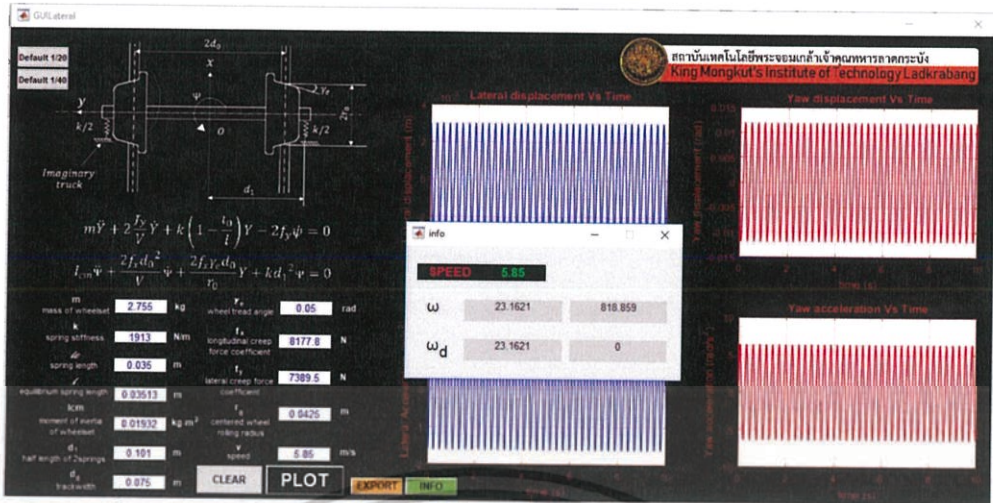
พัฒนาส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ หรือ Graphic User Interface (GUI) (ภาคผนวก ค) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ที่มีต่อความเร็ววิกฤตได้สะดวกมากขึ้น คือเมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์แต่ละตัว สามารถแก้ไขผ่านหน้าต่าง GUI ได้ในทันที โดยไม่จำเป็นต้องเข้าแก้ไขภายในโค้ดของโปรแกรม ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดความผิดพลาดของโค้ดขึ้นได้



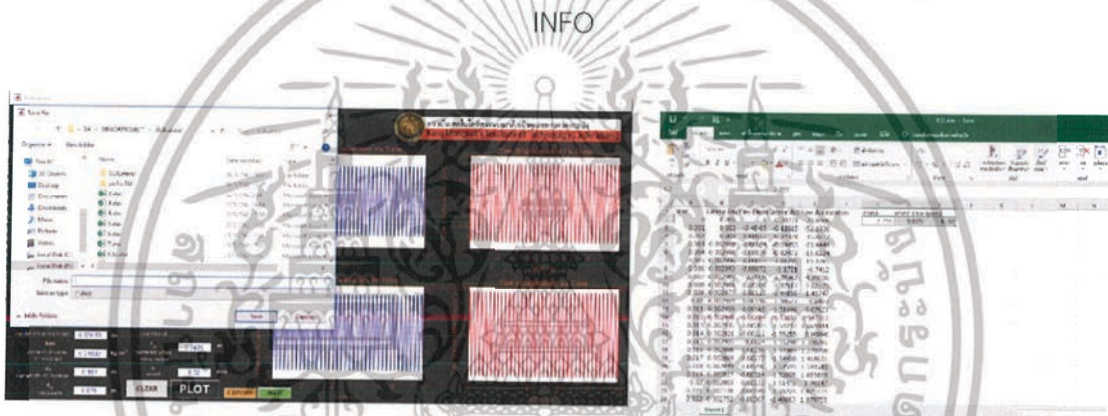
รูปที่ 3.8 ภาพแสดงหน้าต่าง Graphic User Interface ที่ถูกพัฒนาขึ้น

นอกจากนี้ในโครงงานนี้ยังพัฒนาให้แสดงค่า ω และ ω_y บนหน้าต่าง GUI ผ่านการคลิกที่ปุ่ม INFO และยังมีการพัฒนาให้สามารถบันทึกค่าระยะกระจัดแนวด้านข้าง (lateral displacement) ระยะกระจัดมุมควง (yaw displacement) ความเร่งแนวด้านข้าง (lateral acceleration) และความเร่งการหมุนควง (yaw acceleration) ลงในไฟล์ .xlsx ผ่านการคลิกที่ปุ่ม EXPORT เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ออกมาทดลองคำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB ไปใช้ในการวิเคราะห์ต่าง ๆ ได้ต่อไป ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงหน้าต่าง GUI ที่แสดงรายละเอียดค่า ω และ ω_d หลังคลิกที่ปุ่ม



ก.) หน้าต่างการบันทึกไฟล์ ข.) ไฟล์ .xlsx ที่ได้

รูปที่ 3.10 ภาพแสดงการบันทึกไฟล์ .xlsx หลังคลิกที่ปุ่ม EXPORT

การเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่า ω และ ω_d

จากการจัดรูปสมการเมทริกซ์ในสมการที่ 3.35 ทำให้ได้เมทริกซ์ของมวล [M], เมทริกซ์ของตัวหน่วง [C] และเมทริกซ์ของค่าความแข็งของสปริง [K] ดังสมการที่ 3.8, 3.9 และ 3.10

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_{cm} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 2\frac{f_y}{v} & 0 \\ 0 & \frac{2f_y d_0^2}{v} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k\left(1-\frac{l_0}{l}\right) & -2f_y \\ \frac{2f_y \gamma_e d_0}{r_0} & kd_1^2 \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ค่า ω และ ω_d ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้คำสั่ง eig คือการหา Eigenvalues และ Eigenvectors ซึ่งต้องมีการสร้าง State Matrix จะได้ว่า

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

จากนั้นนำเมทริกซ์ที่ได้จากการหา Eigenvalues ไปคำนวณหาจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ เพื่อนำไปคำนวณหา ω และ ω_d ต่อไป (ภาคผนวก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะทราบถึงวิธีการหาผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB วิธีการใช้ชุดทดลอง วิธีการทดลอง และผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลอง รวมไปถึงวิธีการวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลอง

4.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การจำลองสถานการณ์ในโปรแกรมที่ได้พัฒนาไว้เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง การคำนวณผลการตอบสนองทางทฤษฎี และการวัดผลตอบสนองความเร่งจากการทดลอง

4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม MATLAB GUI ด้วยสถานการณ์จำลอง

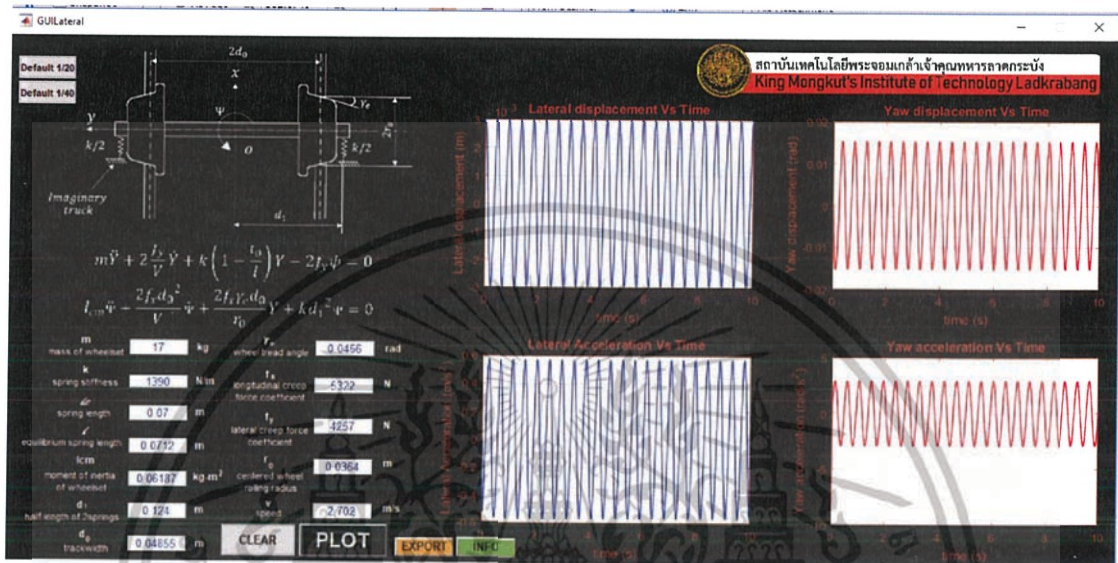
ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของหลักการทำงานในโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้น จึงได้มีการอ้างอิงค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากงานวิจัยของ YOSHINO และคณะ มาเป็นสถานการณ์จำลองให้กับโปรแกรม ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 นี้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB

mass of wheelset	$m = 17 \text{ kg}$
spring stiffness	$k = 1390 \text{ N/m}$
spring length	$l_0 = 0.07 \text{ m}$
equilibrium spring length	$l = 0.0712 \text{ m}$
moment of inertia of wheelset	$I_{cm} = 0.06187 \text{ kgm}^2$
half-length of 2 springs	$d_1 = 0.124 \text{ m}$
half-length of trackwidth	$d_0 = 0.04855 \text{ m}$
wheel tread angle	$\gamma_c = 0.0466 \text{ rad}$
creep force coefficients	$f_x = 5322 \text{ N}$ $f_y = 4257 \text{ N}$
centered wheel rolling radius	$r_0 = 0.0364 \text{ m}$
initial condition	$Y_0 = 3 \text{ mm}$ $\Psi_0 = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนข้อมูลสถานการณ์จำลองดังกล่าวลงในหน้าต่าง GUI ได้ค่า ความเร็ววิกฤต (V_{cr}) 2.702 m/s ซึ่งได้ผลกราฟ ดังรูปที่ 4.1 จากนั้นนำไปเทียบหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความเร็ววิกฤตของงานวิจัยอ้างอิง เท่ากับ 2.7 m/s และค่าความเร็ววิกฤตที่โปรแกรม GUI ด้วยสมการที่ 2.79 จะได้ เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดกับ 0.074 %



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงหน้าต่าง GUI MATLAB เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยค่าพารามิเตอร์อ้างอิง

4.2.2 การคำนวณผลทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่าน GUI

การคำนวณผลตอบสนองทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้วิธีการเชิงตัวเลข ด้วยคำสั่ง ode45 (ภาคผนวก ค) ในการแก้สมการอนุพันธ์ที่ (2.41) และ (2.42) โดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่คำนวณได้จากกฎความคล้ายคลึงทางกลดังตารางที่ 3.1 โดยเขียนชุดคำสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณขนาดของความเร่งตอบสนองในช่วงเวลา 10 วินาที และเขียนกราฟ บันทึกค่าที่ได้และกราฟไว้ใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากชุดทดลอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากชุดทดลองใช้ในการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรมเป็นไปตามตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

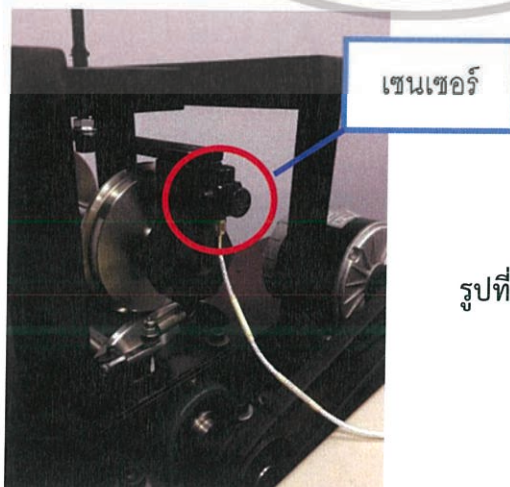
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์จริงที่วัดได้จากชุดทดลองใช้ในการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB

mass of wheelset	$m = 2.755 \text{ kg}$
practical spring stiffness	$k = 1913 \text{ N/m}$
spring length	$l_0 = 0.03513 \text{ m}$
equilibrium spring length	$l = 0.035 \text{ m}$
moment of inertia of wheelset	$I_{cm} = 0.01932 \text{ kgm}^2$
half-length of 2 springs	$d_1 = 0.101 \text{ m}$
half-length of trackwidth	$d_0 = 0.075 \text{ m}$
wheel tread angle; taper 1/20	$\gamma_e = 0.05 \text{ rad}$
wheel tread angle; taper 1/40	$\gamma_e = 0.025 \text{ rad}$
creep force coefficients; taper 1/20	$f_x = 8177.80 \text{ N}$ $f_y = 7389.50 \text{ N}$
creep force coefficients; taper 1/40	$f_x = 8182.97 \text{ N}$ $f_y = 7394.24 \text{ N}$
centered wheel rolling radius	$r_0 = 0.0425 \text{ m}$
initial condition	$Y_0 = 3 \text{ mm}$ $\Psi_0 = 0$

4.2.3 การวัดค่าความเร่งจากผลการตอบสนองของชุดล้อ

วิธีการหาผลลัพธ์จากการทดลอง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนชุดล้อเพลาดียวในตำแหน่งกึ่งกลางของล้อเลื่อน (Roller rig)
2. ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่ตำแหน่งบริเวณแครงจำลอง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง

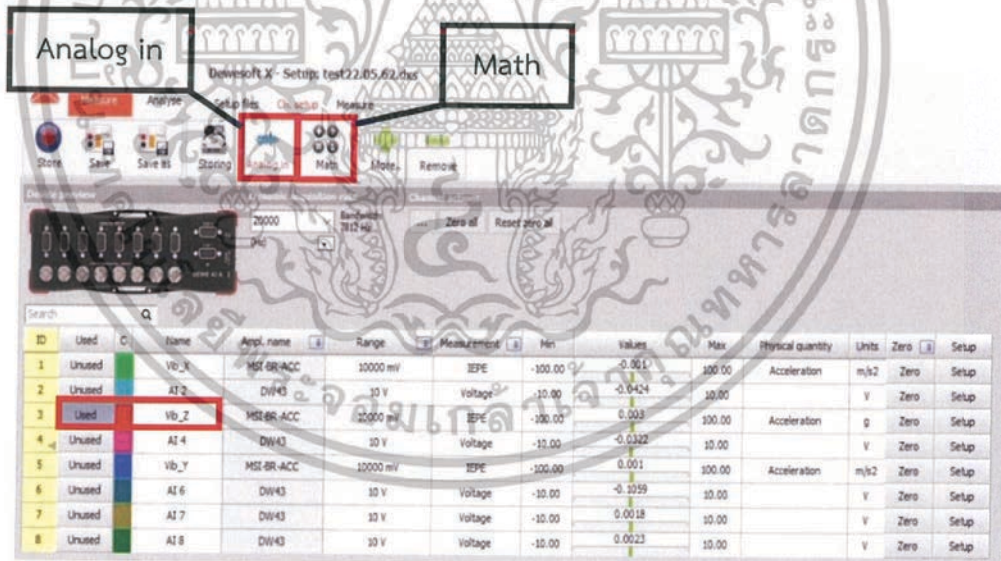
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต่อสาย USB เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล
4. เปิดโปรแกรม Dewesoft X3 ขึ้นมา
5. ตั้งค่าโปรแกรมที่ channel setup (ดังรูปที่ 4.3)

- เลือกที่ Analog in เพื่อทำการเลือก (used) ช่องทางรับสัญญาณ และทำการตั้งชื่อ จากนั้นไปที่ Set up โดยที่กำหนด sensitivity 100 mV/g ตามชนิดของ acceleration meter รุ่น Kistler 8690C50 ตั้งค่า range 100 g Unit เลือกหน่วย g และ Sample rate 20000

- เลือกที่ Math ไปที่ Add math เพื่อใช้ IIR Filter กรองสัญญาณด้วย Butterworth อันดับ 5, เลือกช่วง Band pass ที่ความถี่ที่เกิดขึ้นที่เพลาล้อ wheelset หาโดยกำหนดให้ความเร็วที่จุดสัมผัสระหว่างล้อ (wheelset) ที่ และชุดล้อกลิ้ง (roller rig) เท่ากัน ที่มีรัศมี 42.5 mm และ 75 mm ตามลำดับ จะหาสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความถี่ที่เกิดขึ้นที่เพลาล้อ Wheelset} = \frac{N_r}{60} \times \frac{0.075}{0.0425} \text{ Hz} \quad (4.1)$$

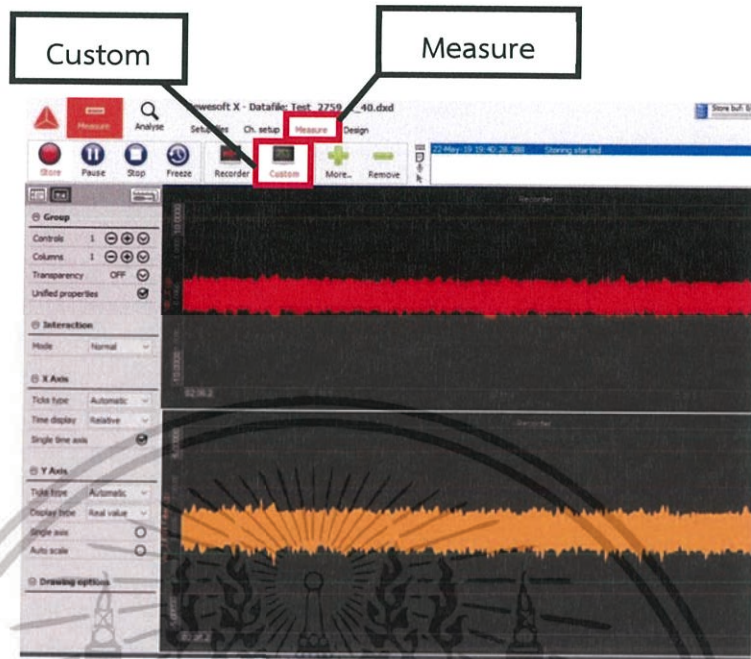


รูปที่ 4.3 หน้าต่าง channel set up ของโปรแกรม Dewesoft X3

โดยใช้เครื่องมือ acceleration meter รุ่น Kistler 8690C50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตั้งค่าโปรแกรมที่ Measure ไปที่ Custom (ดังรูปที่ 4.4) แล้วทำการ Design



รูปที่ 4 . 4 หน้าต่าง Measure

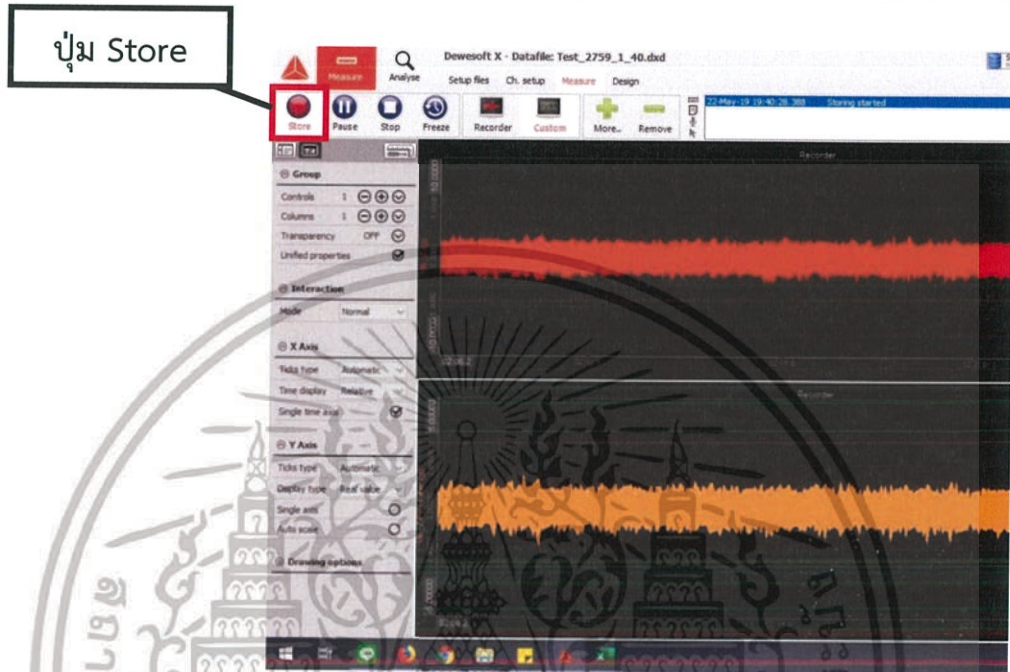
- เพื่อดูค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดและค่าสัญญาณที่ผ่านการกรอง
6. ปรับค่าความถี่จากกล่องควบคุม โดยหมุนปรับตามค่าความเร็วที่ต้องการวัด



รูปที่ 4 . 5 กล่องควบคุมความเร็ว

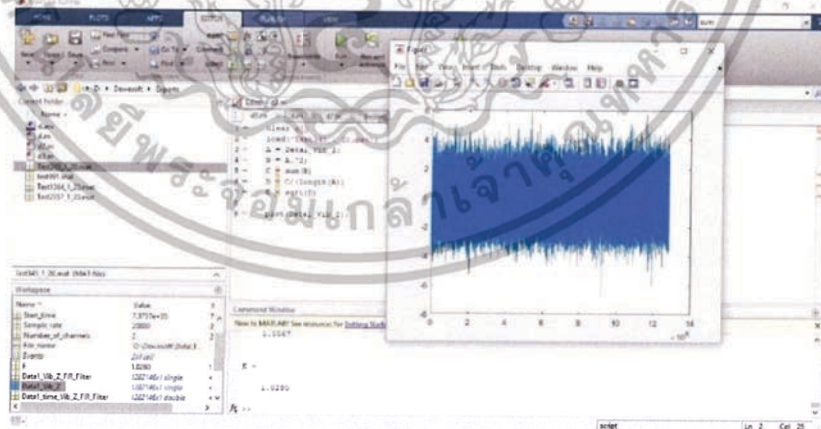
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการเริ่มบันทึกค่า โดยไปกดที่ Store
8. หลังจากเริ่มบันทึก จากนั้นรอประมาณ 10-20 วินาที แล้วทำการ Stop
9. เพื่อนำค่าสัญญาณที่วัดได้มาวิเคราะห์ ให้เปิดไฟล์ที่ทำการบันทึกข้อมูลไว้ กด Export จากนั้นเลือกที่ File Export เพื่อเลือกประเภทไฟล์ที่ Export เป็นโปรแกรม MATLAB แล้วนำมา



รูปที่ 4. 6 หน้าต่างบันทึกค่าสัญญาณ

คำนวณหาค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4. 7 ตัวอย่างไฟล์ค่าความเร่งที่ได้จากการทดลอง

ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมในแต่ละ Channel มีหน่วยเป็น “g” หรือ 9.81 m/s^2 นำค่าความเร่ง RMS ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ไปเปรียบเทียบกับค่าความเร่ง RMS ที่ได้จากทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

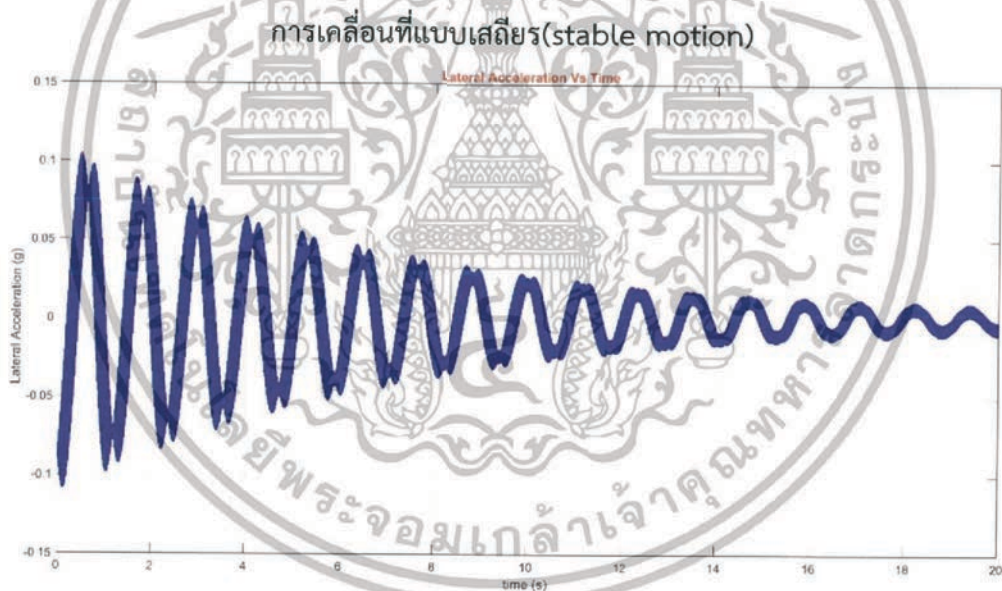
4.3 ผลการทดลอง

ผลของการศึกษาจะแบ่งออกเป็นการเปรียบเทียบ 2 ลักษณะ ได้แก่ การเปรียบเทียบรูปร่างลักษณะของความเร่งในการสั่นสะเทือนระหว่างการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลอง และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย โดยศึกษาล้อที่มีค่ามุมกรวยล้อ 2 แบบ ได้แก่ มุมกรวยล้อ $1/20$ และมุมกรวยล้อ $1/40$

4.3.1 ผลการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านหน้าต่าง GUI

เมื่อทำการจำลองสถานการณ์การสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม MATLAB GUI โดยจำลองที่ช่วงการเกิดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบเสถียร (stable motion) แบบเสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) และแบบไม่เสถียร (unstable motion) ซึ่งการคำนวณทางทฤษฎีผลการตอบสนองของความเร่งของแบบจำลองที่ได้ ถูกนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้

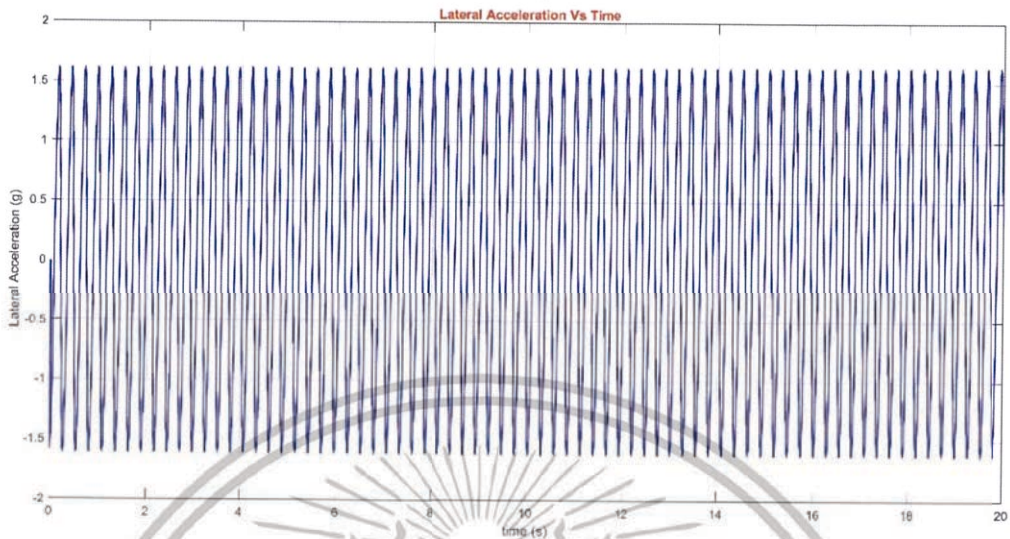
1. ผลคำนวณทางทฤษฎีของมุมกรวยล้อ $1/20$



รูปที่ 4 . 8 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ $1/20$ ที่ความถี่กระตุ้น 2.87 Hz (172 RPM) คำนวณค่าความเร็วได้ 1.35 m/s

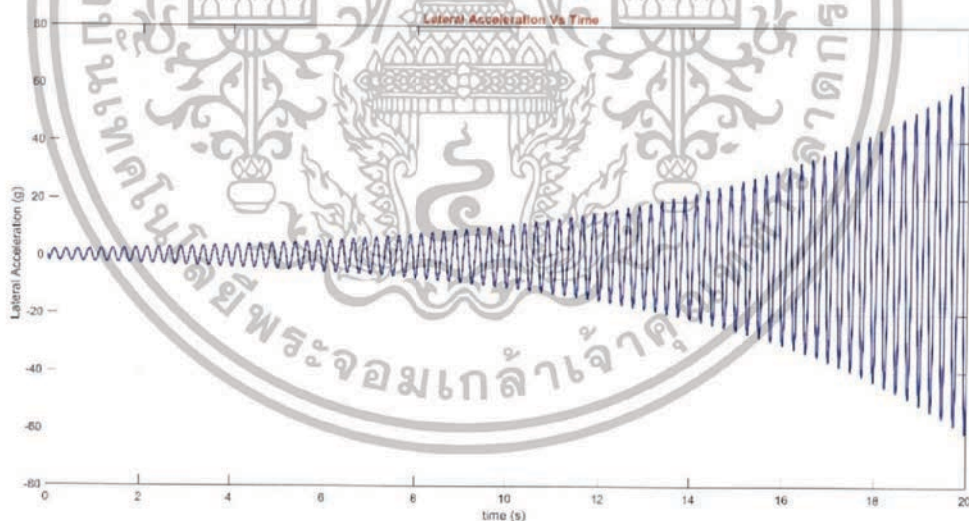
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่แบบเสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 12.41 Hz (745 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 5.85 m/s (critical velocity)

การเคลื่อนที่แบบไม่เสถียร (unstable motion)

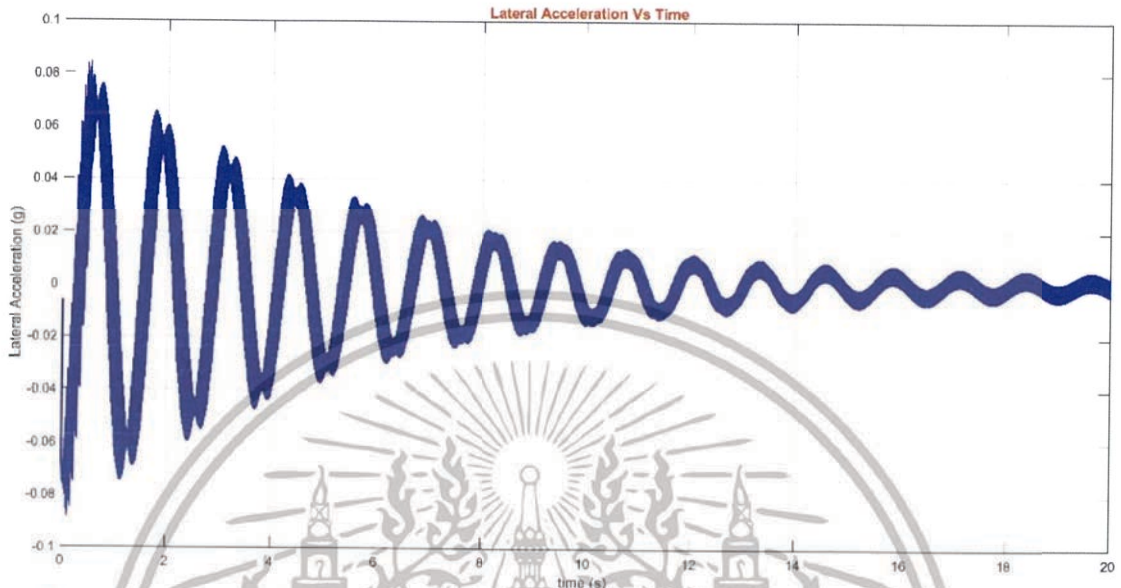


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 13.79 Hz (828 RPM) คำนวนค่าความเร็วได้ 6.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

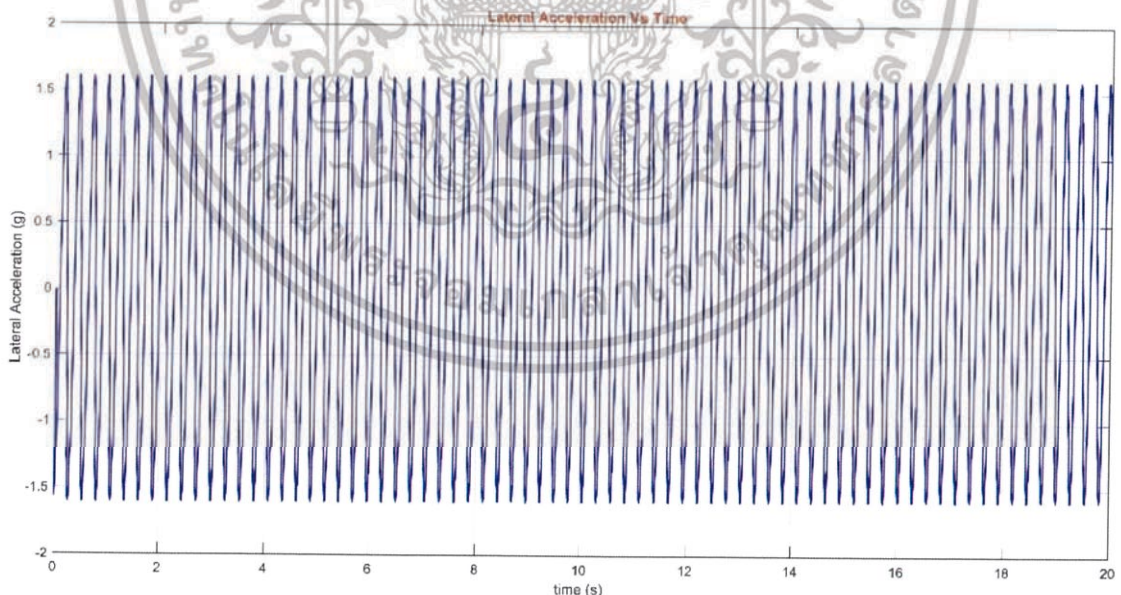
2. ผลคำนวณทางทฤษฎีของมุมกรวยล้อย 1/40

การเคลื่อนที่แบบเสถียร (stable motion)



รูปที่ 4. 11 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อย 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 3.77 Hz (226 RPM) ค่าวนค่าความเร็วได้ 1.77 m/s

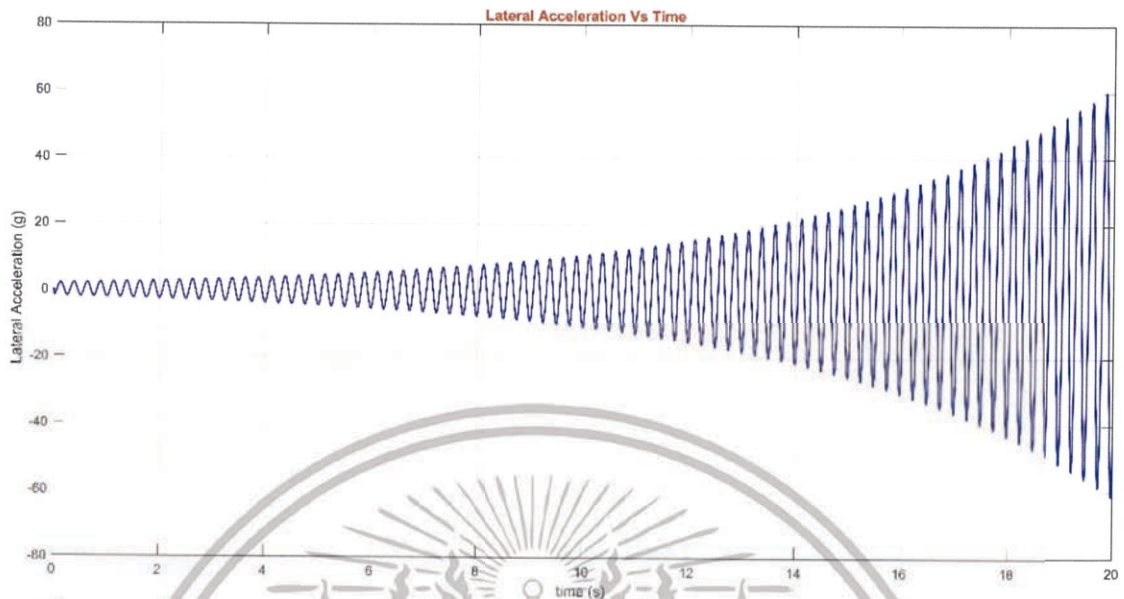
การเคลื่อนที่แบบเสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion)



รูปที่ 4. 12 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อย 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 17.55 Hz (1053 RPM) ค่าวนค่าความเร็วได้ 8.27 m/s (critical velocity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่แบบไม่เสถียร (unstable motion)



รูปที่ 4 . 13 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 19.10 Hz (1146 RPM) คำนวณค่าความเร็วได้ 9 m/s

จากผลการคำนวณทางทฤษฎีของทั้งสองมุมกรวยล้อจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่แบบเสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) จะแสดงถึงค่าความเร็ววิกฤติ (critical velocity) ของมุมกรวยล้อ 1/20 และ 1/40 ที่ 5.85 m/s และ 8.27 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเร็ววิกฤติที่เพิ่มขึ้นเมื่อมุมกรวยล้อลดลง คิดเป็น 41.37 เปอร์เซ็นต์ ดังที่แสดงการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ ความเร็ววิกฤติที่เพิ่มขึ้น} = \frac{8.27 - 5.85}{5.85} \times 100$$

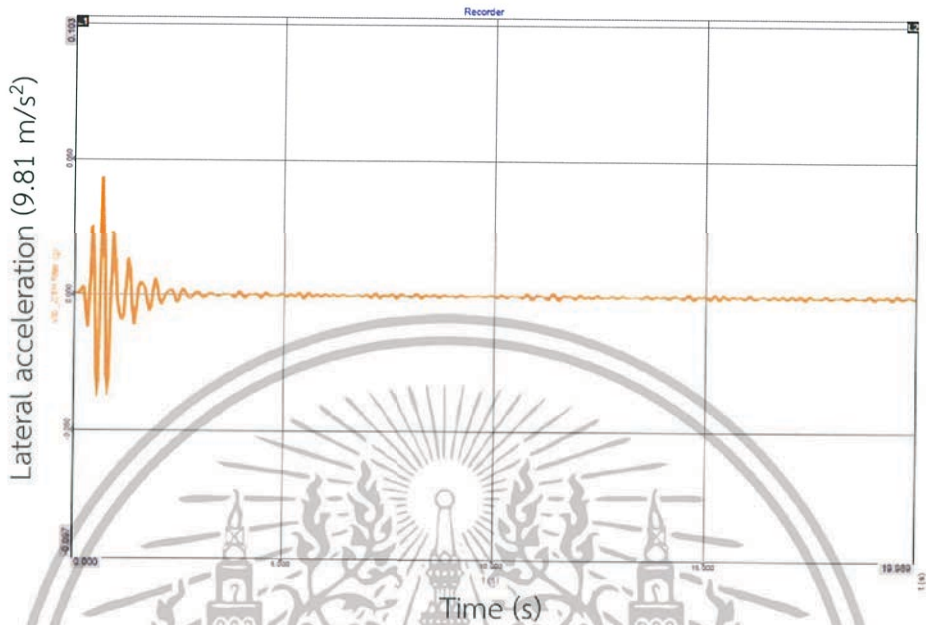
ณ ที่ความเร็วต่ำกว่าค่าวิกฤติจะแสดงพฤติกรรมแบบเสถียร (stable Motion) นั่นคือลักษณะของกราฟจะลูเข้าหาจุดสมดุล และที่ความเร็วสูงกว่าค่าวิกฤติ จะแสดงพฤติกรรมแบบไม่เสถียร (unstable Motion) เห็นได้จากลักษณะของกราฟที่มีการการลู่ออก

4.3.2 ผลการวัดค่าความเร่งจากผลการตอบสนองของชุดล้อ

การทดลองวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือน (m/s^2) ที่ช่วงความเร็วรอบ 160-2800 RPM หรือช่วงความถี่กระตุ้น 2.67 – 46.67 Hz โดยปรับเพิ่มค่าด้วยกล่องควบคุมความเร็วรอบของชุดทดลองเพื่อดูพฤติกรรมผลการตอบสนองของความเร่งชุดล้อเพลาล้อเดียว ในช่วงเสถียร (stable), เสถียรเล็กน้อย (marginal stable), และไม่เสถียร (unstable) จะได้รูปลักษณะกราฟดังนี้

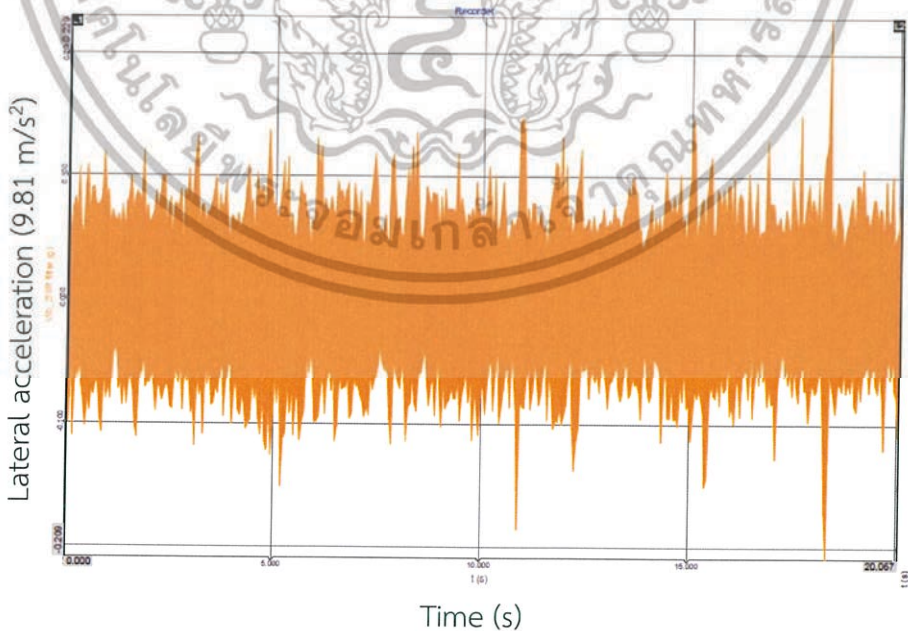
1. ผลการทดลองของมุมกรวยล้อย 1/20

การเคลื่อนที่แบบเสถียร(stable motion)



รูปที่ 4 . 14 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อย 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 2.87 Hz (172 RPM) ค่าวนค่าความเร็วได้ 1.35 m/s

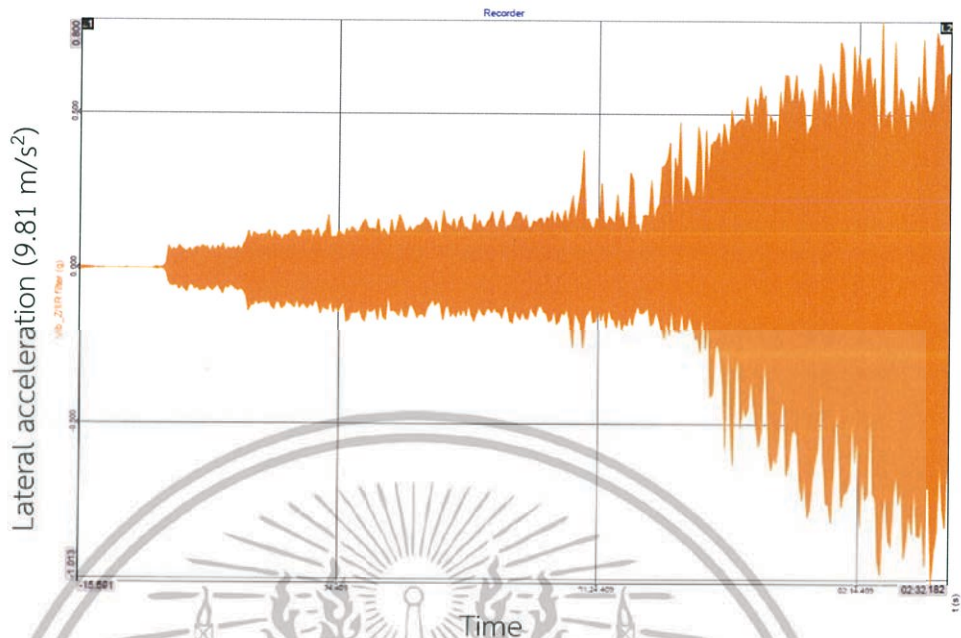
การเคลื่อนที่แบบเสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion)



รูปที่ 4 . 15 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อย 1/20 ที่ความถี่กระตุ้น 15.97 Hz (958 RPM) ค่าวนค่าความเร็วได้ 7.52 m/s (ช่วงของ critical velocity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

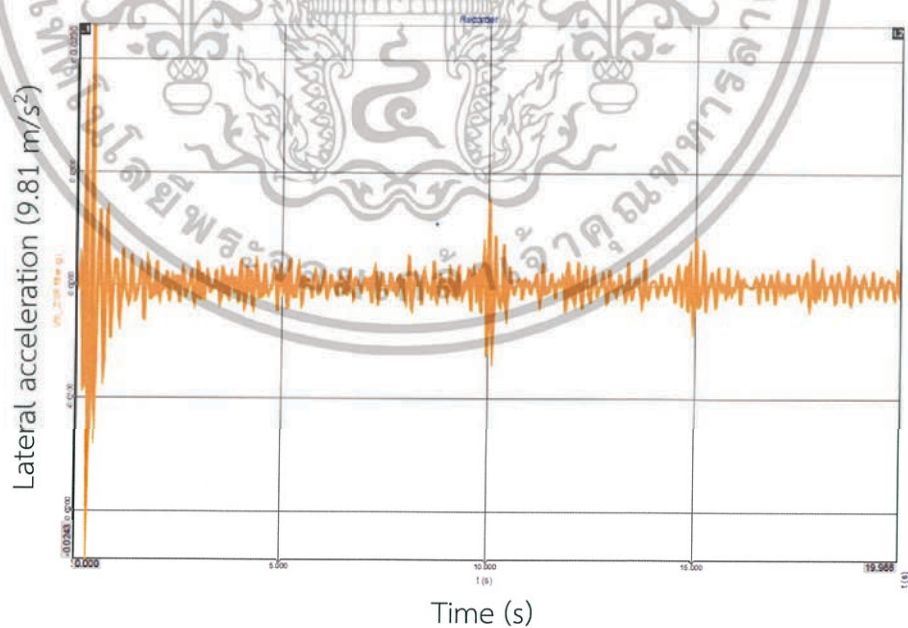
การเคลื่อนที่แบบไม่เสถียร (unstable motion)



รูปที่ 4 . 16 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/20 เมื่อความถี่กระตุ้นหรือความเร็วเกินค่าวิกฤติ

2. ผลการทดลองของมุมกรวยล้อ 1/40

การเคลื่อนที่แบบเสถียร (stable motion)

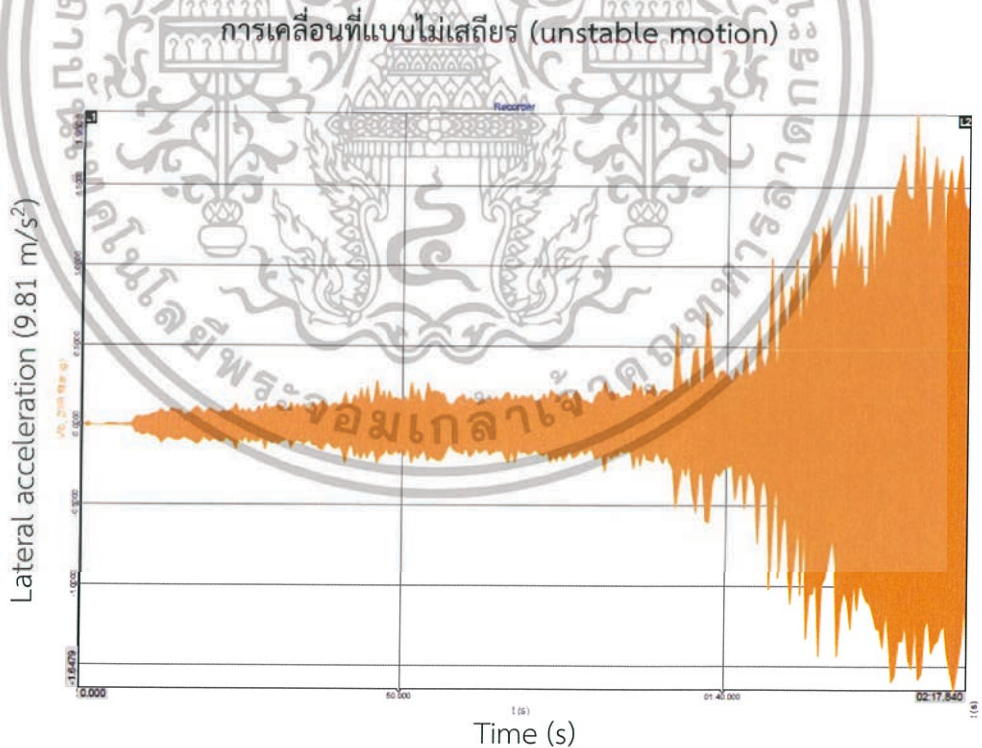


รูปที่ 4 . 17 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 3.77 Hz (226 RPM) คำนวณค่าความเร็วได้ 1.77 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 . 18 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 ที่ความถี่กระตุ้น 19.78 Hz (1187 RPM) คำนวณค่าความเร็วได้ 9.32 m/s



รูปที่ 4 . 19 กราฟแสดงผลของความเร่งตอบสนองของชุดเพลาล้อ 1/40 เมื่อความถี่กระตุ้นหรือความเร็วเกินค่าวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในช่วงความเร็วรอบต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่แบบเสถียร (stable motion) ของมุมกรวยล้อยี่ 1/20 และ 1/40 ที่ความเร็ว 1.35 m/s และ 1.77 m/s พบว่าลักษณะกราฟจะลู่เข้าสู่จุดสมดุลเหมือนผลการทดลองที่ความเร็วเดียวกัน

ณ จุดช่วงความเร็ววิกฤติของผลการทดลองของมุมกรวยล้อยี่ 1/20 และ 1/40 จะได้ช่วงความเร็วที่ 7.52 m/s และ 9.32 m/s ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับค่าที่หาได้ในทางทฤษฎีด้วยสมการที่ 2.79 จะได้ค่า -28.55 % และ -12.70 % ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกรวยล้อยลดลง คิดเป็น 23.29 เปอร์เซ็นต์

$$\% \text{ ความเร็ววิกฤติที่เพิ่มขึ้น} = \frac{9.32-7.52}{7.52} \times 100$$

สำหรับช่วงความเร็วเกินค่าวิกฤติจากผลการทดลองของทั้งสองมุมกรวยล้อ ในการทดลองผู้วิจัยได้เก็บค่าการทดลองโดยการค่อยๆ เพิ่มค่าความเร็วรอบให้มากขึ้นจนเลยค่าความเร็ววิกฤติ จะเห็นได้ชัดเจนว่า ลักษณะของผลกราฟทดลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลู่ออกเหมือนกับผลกราฟในทางทฤษฎี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย

เนื่องจากการสังเกตรูปร่างลักษณะของกราฟเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความแม่นยำของการทดลองได้ ดังนั้นเพื่อตรวจสอบว่าขนาดแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีความใกล้เคียงกันระหว่างการทดลองกับทฤษฎี จึงได้ข้อมูลความเร่งที่ได้จากการคำนวณและทดลองนำมาหาค่าความเร่งเฉลี่ยรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย โดยให้ $\Delta t=0.0005$ (ตาม Sampling Rate) จากนั้นนำค่ามาเปรียบเทียบกันโดยหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดด้วยสมการที่ 2.79 ดังแสดงผลในตารางและเขียนกราฟเปรียบเทียบดังนี้

ตารางที่ 4 . 3 ตารางเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของชุดล้อที่มุมกรวย 1/20

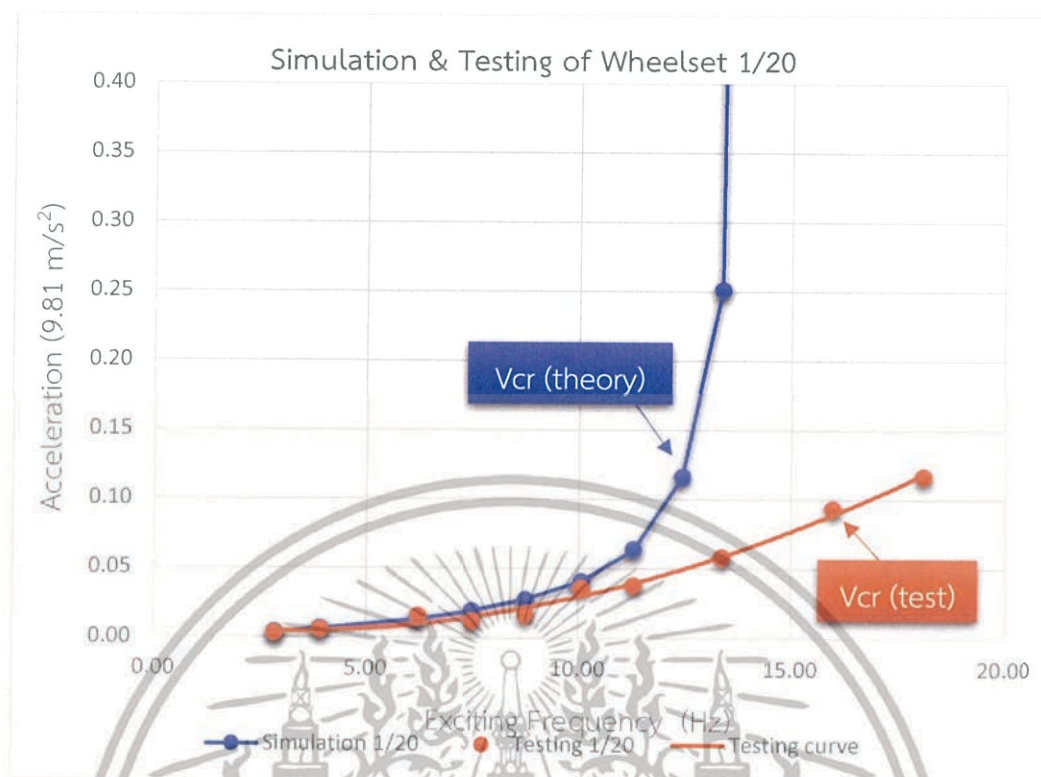
ผลเปรียบเทียบค่าความเร่ง RMS ของมุมกรวยล้อ 1/20					
ความเร็วรอบ เพลลา Roller rig (RPM)	ความถี่ กระตุ้น(Hz)	ความเร็ว (m/s)	ค่าความเร่ง RMSทฤษฎี (9.81m/s ²)	ค่าความเร่ง RMSทดลอง (9.81m/s ²)	ค่าความ ผิดพลาด %
172	2.87	1.35	0.0038	0.0032	15.66
237	3.95	1.86	0.0062	0.0057	8.30
373	6.22	2.93	0.0134	0.0156	-16.10
449	7.48	3.53	0.0192	0.0118	38.68
526	8.77	4.13	0.0274	0.0160	41.68
604	10.07	4.74	0.0404	0.0353	12.69
677	11.28	5.32	0.0635	0.0375	40.90
745	12.42	5.85	0.1159	NA	NA
802	13.37	6.30	0.2511	0.0578	76.98
958	15.97	7.52	10.5856	0.0930	99.12
1084	18.07	8.51	1111.402	0.1168	99.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

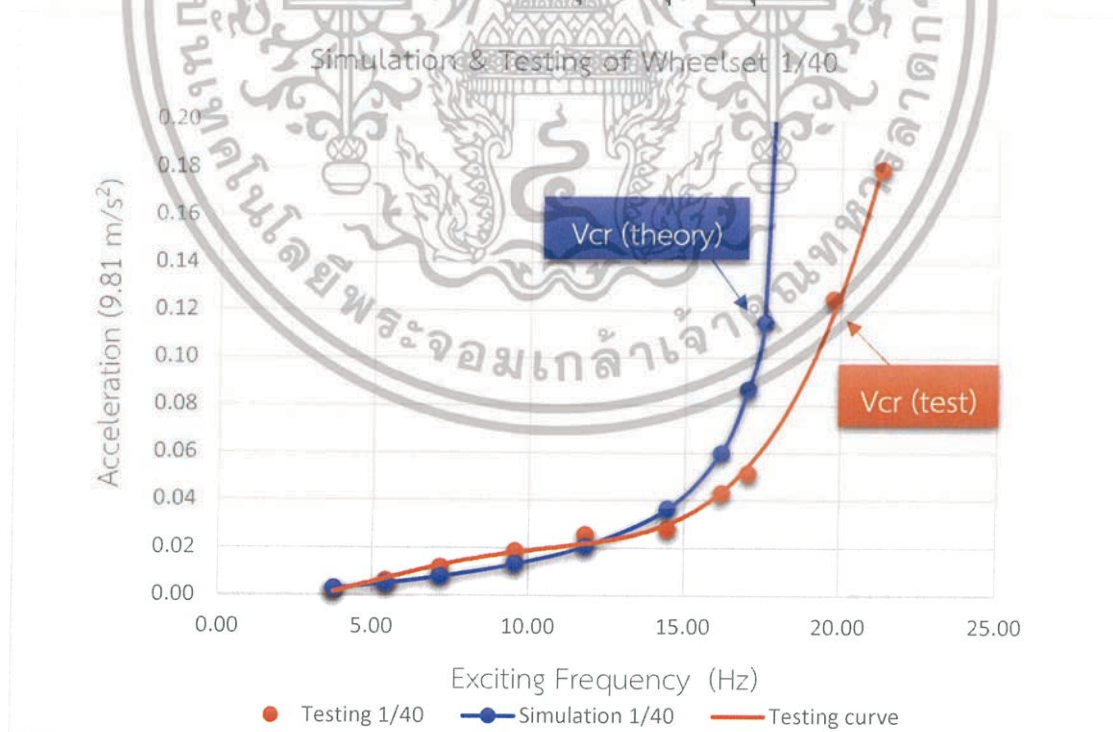
ตารางที่ 4 . 4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สอง
กำลังสองเฉลี่ยของชุดล้อยี่มุมกรวย 1/40

ผลเปรียบเทียบค่าความเร่ง RMS ของมุมกรวยล้อยี่ 1/40					
ความเร็วรอบ เพลลาRoller rig (RPM)	ความถี่ กระตุ้น(Hz)	ความเร็ว (m/s)	ค่าความเร่ง RMSทฤษฎี (9.81m/s ²)	ค่าความเร่ง RMSทดลอง (9.81m/s ²)	ค่าความ ผิดพลาด %
226	3.77	1.77	0.0029	0.0025	12.62
327	5.45	2.57	0.0051	0.0064	-26.65
430	7.17	3.38	0.0079	0.0117	-47.76
574	9.57	4.51	0.0133	0.0186	-40.03
711	11.85	5.58	0.0208	0.0257	-23.59
868	14.47	6.82	0.0364	0.0281	22.73
970	16.17	7.62	0.0599	0.0429	28.43
1022	17.03	8.03	0.0867	0.0513	40.80
1053	17.55	8.27	0.1150	NA	NA
1187	19.78	9.32	0.8924	0.1248	86.02
1277	21.28	10.03	54.49630	0.1793	99.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 . 20 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยกับความถี่กระตุ้น ของชุดล้อที่มุมกรวย 1/20



รูปที่ 4 . 21 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยกับความถี่กระตุ้น ของชุดล้อที่มุมกรวย 1/40

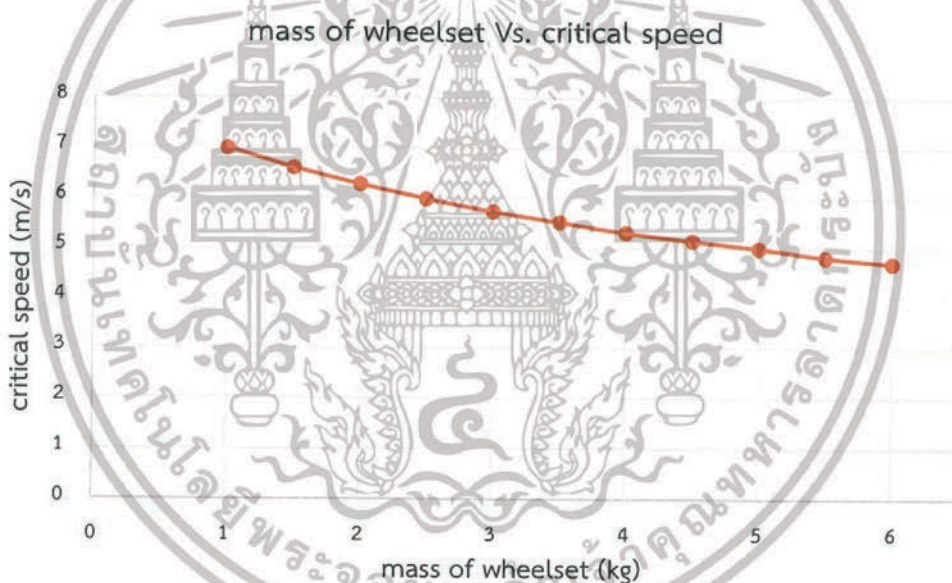
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 , 4.6 และรูปที่ 4.20 , 4.21 เปรียบเทียบระหว่างผลทดลองและผลทางทฤษฎีของค่าความเร่งรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยกับความถี่กระตุ้น ของชุดล้อที่มุมกรวย 1/20 และ 1/40 จะเห็นได้ว่าในแต่ละความถี่กระตุ้น (Hz) ผลกราฟทดลองจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทางเดียวกับผลในทางทฤษฎีทั้ง และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างผลการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อค่าความเร็วของผลทดลองเกินค่าความเร็ววิกฤติของผลทฤษฎี (5.85 m/s และ 8.25 m/s ตามลำดับ) ดังนั้นเพื่อให้เปรียบเทียบผลได้ชัดเจนทางผู้วิจัยจึงเลือกเปรียบเทียบผลทดลองได้ถึงช่วงความเร็ววิกฤติของที่ 7.52 m/s และ 9.32 m/s ตามลำดับ

4.3.4 ผลการศึกษาค่าตัวแปรในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤติ

4.3.4.1 ผลของมวลชุดล้อต่อความเร็ววิกฤติ

ทำการทดลองเปลี่ยนค่ามวลของชุดล้อ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤติและมวลของชุดล้อ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.22



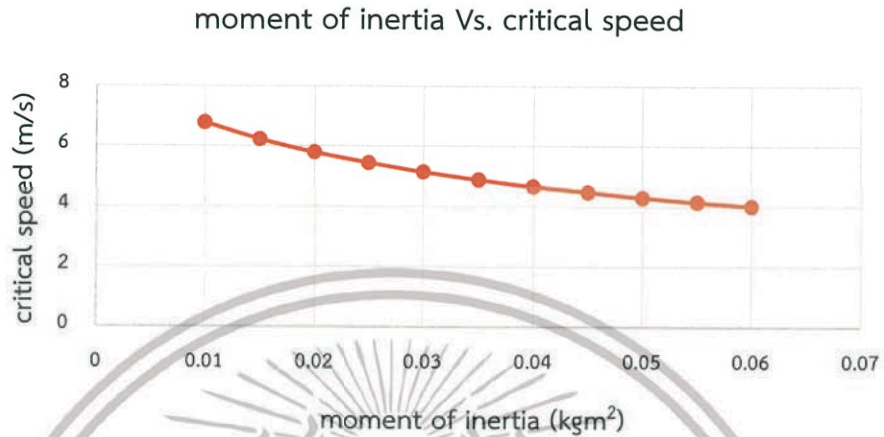
รูปที่ 4 . 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤติและมวลของชุดล้อ

จากรูปที่ 4.22 ในการแทนค่ามวลต้องคำนึงถึงค่า creep force coefficients (f_x , f_y) โดยคำนวณจากรูปร่างของการสัมผัสระหว่างล้อและราง (a, b) ซึ่งเปลี่ยนไปตามค่า Normal force (F_n) ดังในสมการที่ 2.11 และ 2.22 จะเห็นได้ว่ามวลของชุดล้อและความเร็ววิกฤติมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผันกัน คือเมื่อมวลของชุดล้อเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความเร็ววิกฤติมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความเร็วมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งสามารถอธิบายทางทฤษฎีได้ว่า $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ เมื่อ k คือ ค่าความแข็งของสปริง และ $m =$ มวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.2 ผลของโมเมนต์เฉื่อยต่อความเร็ววิกฤต

ทำการทดลองเปลี่ยนค่าโมเมนต์เฉื่อย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและโมเมนต์เฉื่อย จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.23

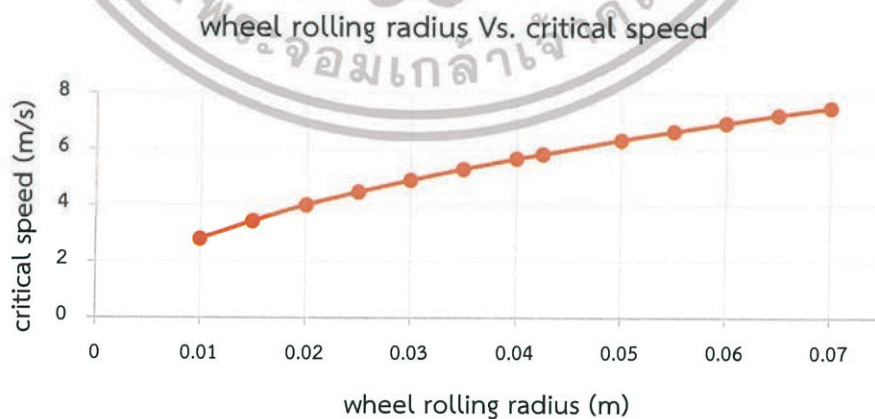


รูปที่ 4 . 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและโมเมนต์เฉื่อย

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ความเฉื่อยและความเร็ววิกฤตมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผันกัน สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของ โมเมนต์เฉื่อยและมวล $I_{cm} = mr^2$ เมื่อ m คือ มวล และ r คือ รัศมี เห็นได้ว่าค่าโมเมนต์เฉื่อยและมวลจะแปรผันตรง ดังนั้นโมเมนต์เฉื่อยเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความเร็ววิกฤตมีค่าลดลง ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับ รูปที่ 4 . 24

4.3.4.3 ผลของรัศมีล้อต่อความเร็ววิกฤต

ทำการทดลองเปลี่ยนค่ารัศมีล้อ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและรัศมีล้อ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.24



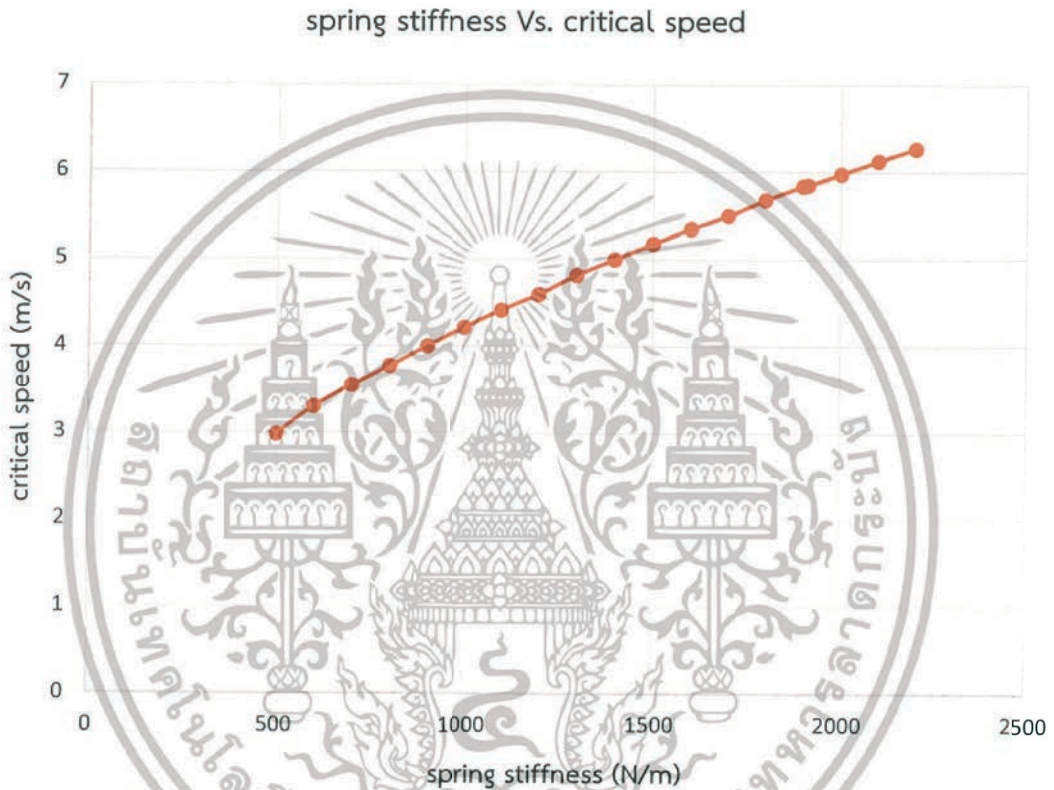
รูปที่ 4 . 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและรัศมีล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่ารัศมีล้อและความเร็ววิกฤตมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรงกัน คือเมื่อรัศมีล้อเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความเร็ววิกฤตมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

4.3.4.4 ผลของความแข็งสปริงต่อความเร็ววิกฤต

ทำการทดลองเปลี่ยนค่าความแข็งสปริง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและความแข็งสปริง จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.25

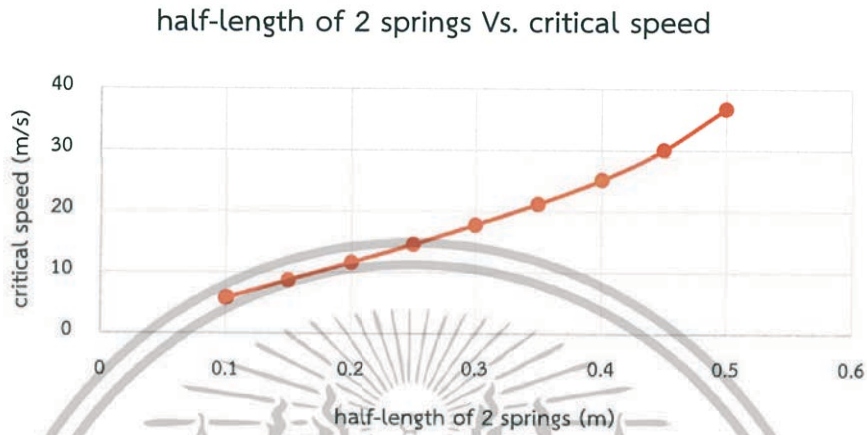


รูปที่ 4 . 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและค่าความแข็งของสปริง

จากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าความเร็ววิกฤตและความแข็งของสปริงมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน เมื่อค่าความแข็งสปริงเพิ่มมากขึ้น ค่าความเร็ววิกฤตก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากค่าความเร็วมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งสามารถอธิบายทางทฤษฎีได้ว่า $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ เมื่อ k คือ ค่าความแข็งของสปริง และ m คือ มวล ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่สวนทางกันกับ รูปที่ 4 . 27

4.3.4.5 ผลของระยะห่างของสปริงต่อความเร็ววิกฤต

ทำการทดลองเปลี่ยนค่าระยะห่างของสปริง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและระยะห่างของสปริง จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.26

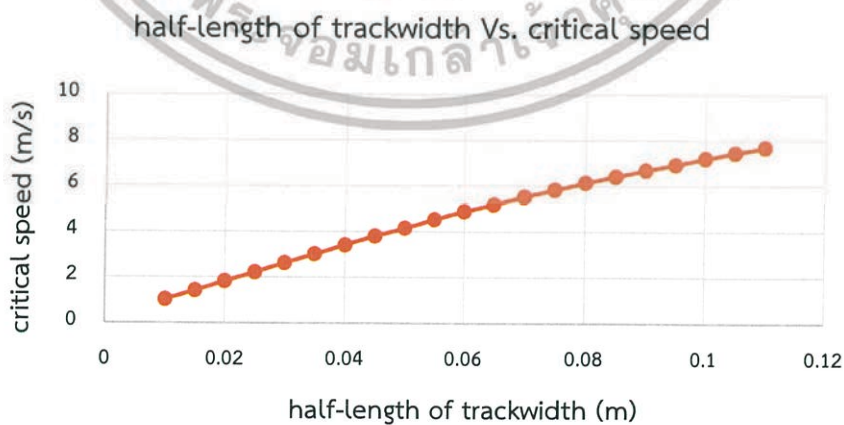


รูปที่ 4 . 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและระยะห่างของสปริง

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าระยะห่างของสปริงและความเร็ววิกฤตมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรงกัน คือเมื่อระยะห่างของสปริงเพิ่มขึ้น ค่าความเร็ววิกฤตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.4.6 ผลของความกว้างรางรถไฟต่อความเร็ววิกฤต

ทำการทดลองเปลี่ยนค่าความกว้างรางรถไฟ โดยรักษาระยะห่างระหว่างทางรถไฟและสปริงคงที่ ที่ระยะ 0.026 เมตร เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและความกว้างรางรถไฟ จะได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.27



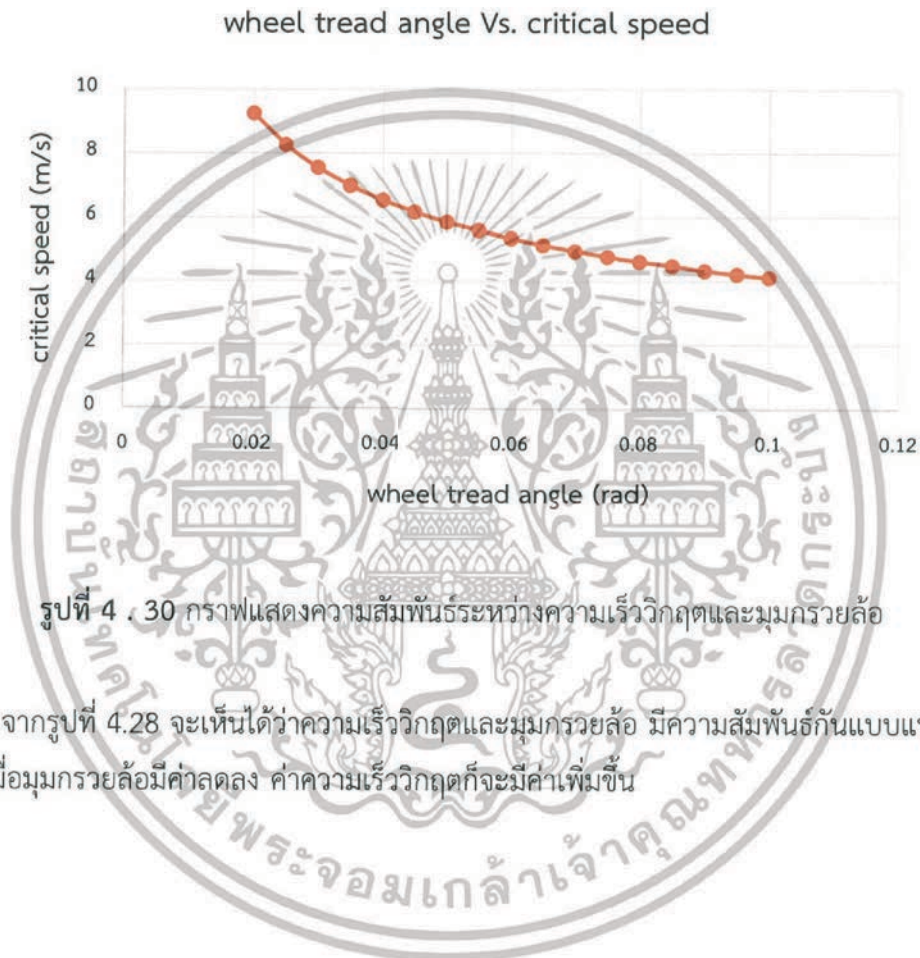
รูปที่ 4 . 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและความกว้างรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าความกว้างของรางรถไฟและความเร็ววิกฤตมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผันกัน คือ เมื่อความกว้างของรางรถไฟมากขึ้น จะทำให้ความเร็ววิกฤตสูงขึ้นตามไปด้วย

4.3.4.7 ผลของมุมกรวยล้อต่อความเร็ววิกฤต

ทำการทดลองเปลี่ยนค่ามุมกรวยล้อ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ววิกฤตและมุมกรวยล้อ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อได้ผลการทดลองจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลคำนวณทางทฤษฎี รวมถึงการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเร็ววิกฤติ ผู้วิจัยจะทราบถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวไว้ในบทนี้รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาชุดทดลองต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถใช้หลักความคล้ายคลึงทางกล พัฒนาสร้างชุดทดลองชุดล้อเพลลาเดี่ยว (single wheelset) ย่อขนาด 1:10 เท่าของรถไฟจริงได้ ซึ่งมีชุดล้อจำลองขนาดมุมกรวยล้อ 1/20 และ 1/40

2. สามารถพัฒนาโปรแกรม GUI MATLAB ศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปรในสมการการเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อค่าความเร็ววิกฤติของรถไฟได้ โดยพบว่าค่ามวล ค่าโมเมนต์เฉื่อย และค่ามุมกรวยล้อมีค่าลดลงจะทำให้ค่าความเร็ววิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อ ค่าสปริง ค่ารัศมีล้อสัมผัส ค่าระยะห่างสปริงและค่าความกว้างรางมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็ววิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

3. สามารถเปรียบเทียบรูปแบบการสั่นสะเทือนของชุดล้อ 1/20 และ 1/40 ได้ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่เสถียร (stable motion) เกิดขึ้นที่ความเร็วต่ำกว่าค่าความเร็ววิกฤติ และที่ค่าความเร็ววิกฤติในลักษณะการเคลื่อนที่เสถียรเล็กน้อย (marginal stable motion) ของชุดทดลองจะมีค่าอยู่ที่ 7.52 m/s และ 9.32 m/s ตามลำดับ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความเร็ว ได้ 23.94% โดยมีค่าความเร็วมากกว่าการคำนวณทางทฤษฎีที่มีค่า 5.85 m/s และ 8.27 m/s ตามลำดับ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของความเร็ว ได้ 41.37%) และคำนวณค่าความผิดพลาดได้ 28.55% และ 12.70% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มค่าความเร็วของชุดทดลองมากกว่าค่าความเร็ววิกฤติ สามารถเห็นการเคลื่อนที่ไม่เสถียร (unstable motion) ได้อย่างชัดเจน ในการเปรียบเทียบผลค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความเร่ง จะสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองและในทางทฤษฎีได้ในช่วง เสถียร และไม่เสถียรเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งมีค่าความผิดพลาดในช่วง 8 - 47 % และจะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเกินค่าความเร็ววิกฤติเข้าสู่ช่วงไม่เสถียร เนื่องจากล้อ มีบังใบประคองไว้ไม่ให้หลุดออกจากล้อกลิ้งจำลอง (roller rig) ในขณะที่การคำนวณผลทางทฤษฎีไม่ได้คำนึงถึงข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของชุดล้อรถไฟเมื่อเกินค่าความเร็ววิกฤติ

5.3 ปัญหาจากการศึกษา

1. การสร้างชุดทดลองนั้นไม่สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้จากโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ตรงตามกำหนดได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดทางงานช่าง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งประมาณ เพราะชิ้นงานที่ต้องการมีสเกลที่เล็กทำให้ได้ค่ากรวยล้อยไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ที่ 1/20 และ 1/40

2. สปริงที่มีค่าความแข็งไม่เป็นไปตามที่กำหนด ส่งผลต่อการเกิดการส่ายของชุดล้อยเพลลาเดี่ยว เมื่อสปริงมีค่าความแข็งที่มากเกินไปจะทำให้เห็นพฤติกรรมการสั่นไม่ชัดเจน

3. การเกิดเสียงดังเมื่อเครื่องทดลองทำงาน เนื่องจากเสียดสี การกระทบกันระหว่างแบบจำลองล้อยและล้อยลิ่งจำลอง

4. ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อวัสดุของล้อยและล้อยลิ่งจำลอง โดยเมื่อทำการทดลองที่ความเร็วมากกว่าความเร็ววิกฤตมาก ๆ ชุดล้อยเพลลาเดี่ยวจะเกิดการส่ายไปมาอย่างรุนแรง จนเกิดการกระทบกันระหว่างบังใบของแบบจำลองล้อยและล้อยลิ่งจำลอง

5.4 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการใช้เครื่องมือ Tachometer วัดเทียบความเร็วรอบกับกล่องควบคุมความเร็ว ทำให้ได้ผลความเร็วรอบที่ไม่แม่นยำตรงตามความเป็นจริง ทางผู้วิจัยจึงแนะนำให้ติดตั้ง incremental encoder motor ที่เพลลาของ roller rig เพื่อที่จะสามารถกำหนดความเร็วรอบได้แม่นยำมากขึ้น ในส่วนการปรับ pretension tension spring ควรออกแบบและติดตั้งให้สามารถปรับได้ง่ายขึ้น รวมถึงตัวปรับระยะมอเตอร์ เพราะหากสายพานหย่อนอาจจะทำให้เกิดการสั่นและส่งผลในการทดลองได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพล, ธนะพงศ์ และจนิตรรา. (2017). ชุดทดลองการสั่นสะเทือนในแนวด้านข้างของแบบจำลองย่อขนาดชุดล้อเพลลาเดี่ยว.
- [2] S.D Iwnicki, & A.H. Wickens (n.d.). Validation of a MATLAB Railway Vehicle Simulation. The Rail Technology Unit, 1.
- [3] Y. Hiroshi, T. Hirokazu, & O. Hirokazu. (2008). Stabilization Control of Hunting Motion of Railway. Journal of Vibration and Control, 209–230.
- [4] Hyun-Moo Hur, Joon-Hyuk Park , Won-Hee You , & Tae-Won Park. (2009). A study on the critical speed of worn wheel profile using a scale model. Journal of Mechanical Science and Technology 23, 2790-2800.
- [5] H. Yabuno, T. Okamoto., & N. Aoshima. (2002). Effect of Lateral Linear Stiffness on Nonlinear Characteristics. Meccanica 37, 555–568.
- [6] H. Yoshino, T. Hosoya, H. Yabuno, & S.P. Lin. (2013). Theoretical And experimental Analyses on Stabilization of Hunting Motion by Utilizing the Running Gear as A Gyroscopic Damper. 1st International Conference on Vibration Problems.
- [7] จันทร น. (2554). ข้างรถไฟความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ (ฉบับที่ 1), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [8] Voestalpine Schienen GmbH. Profile Programm Section Programme. 60E1 (UIC60, SBBVI).
- [9] เจษฎา อุบโยคิน. ระบบรถไฟฟ้า. หัวข้อชุดล้อ เรื่องชนิดประเภทและพิกัดโครงร่าง.

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

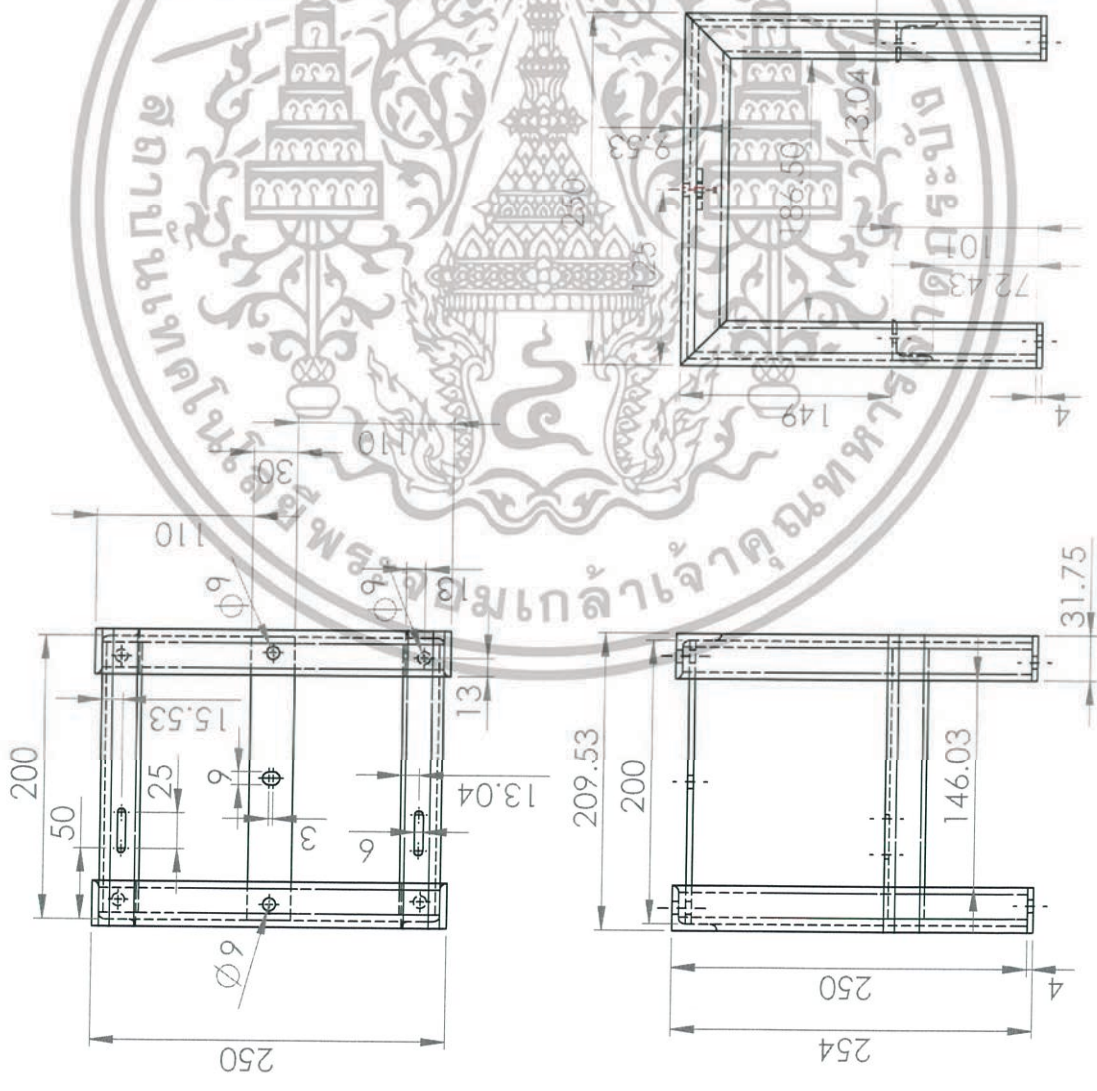
ภาคผนวก ก.

ชุดทดลองการสั้นสะเทือนในแนวด้านข้าง แบบจำลองย่อขนาดของชุดล้อ
เพลลาเดี่ยว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 2 3 4 5 6



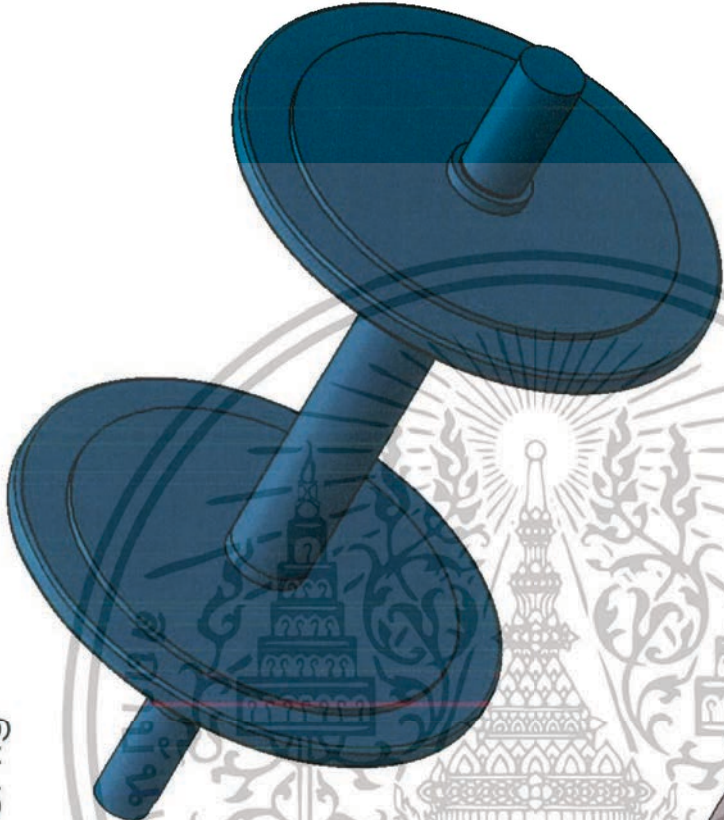
DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
TITLE: Frame		
DWG NO.	1	A4
SCALE: 1:5		
SHEET 1 OF 1		

1 2 3 4 5 6

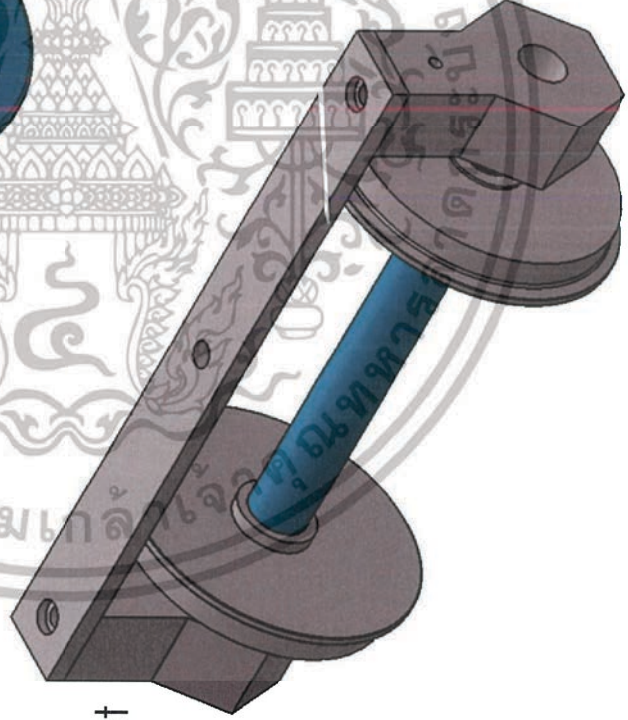
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1
2
3
4
5
6

Roller rig



wheelset



DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
TITLE:	Wheelset & Roller rig	
DWG NO.	2	A4
SCALE:1:5	SHEET 1 OF 7	

1
2
3
4
5
6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 2 3 4 5 6



DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
TITLE		
Wheelset 1:40 of cone		
DWG NO.	2	A4
SCALE:1:2	SHEET 2 OF 6	

1 2 3 4 5 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 2 3 4 5 6



DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
TITLE: Wheelset 1:20 of cone		
DWG NO.	2	A4
SCALE:1:2	SHEET 3 OF 6	

1 2 3 4 5 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 5 4 3 2 1

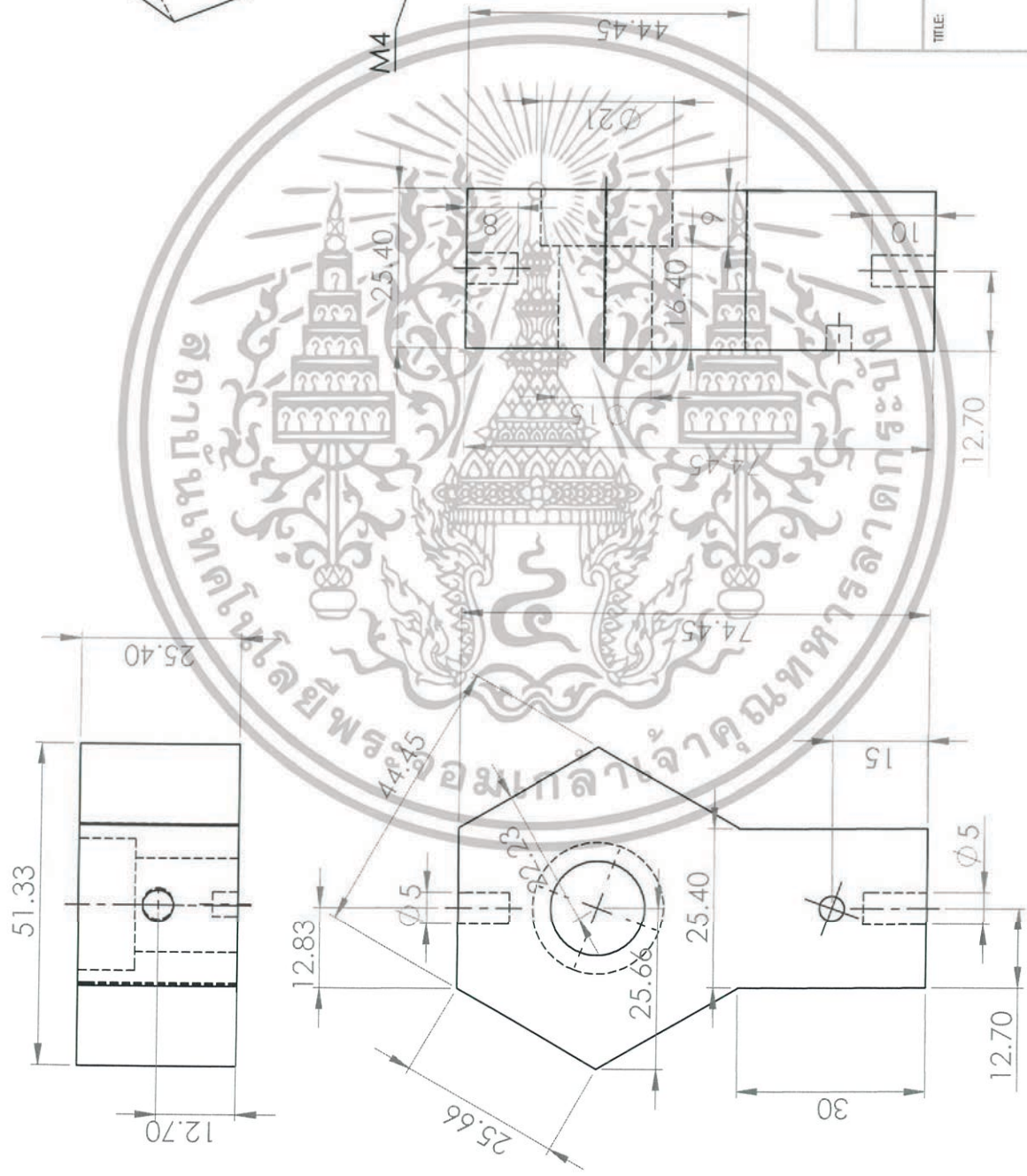
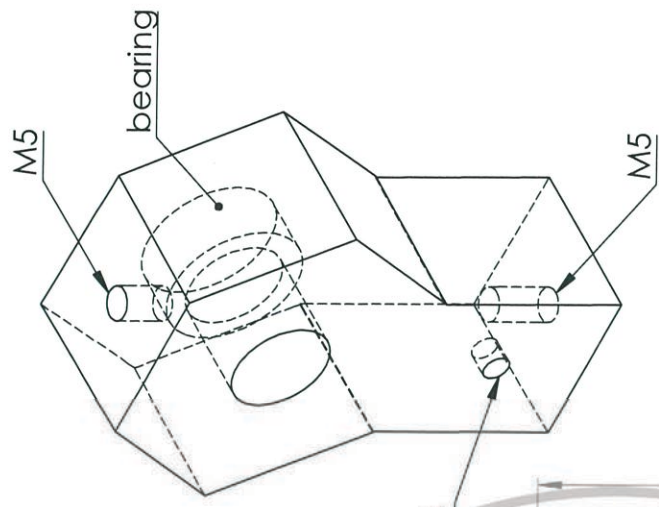


DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
Axle of Wheelset		
DWG NO.	2	
SCALE: 1:5	SHEET 4 OF 6	

6 5 4 3 2 1 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 5 4 3 2 1

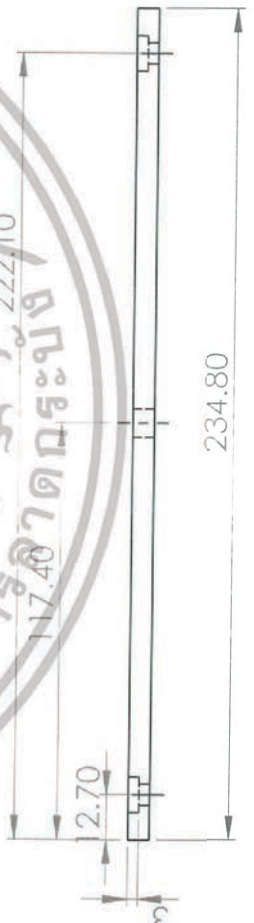
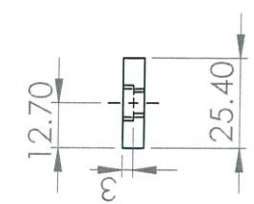
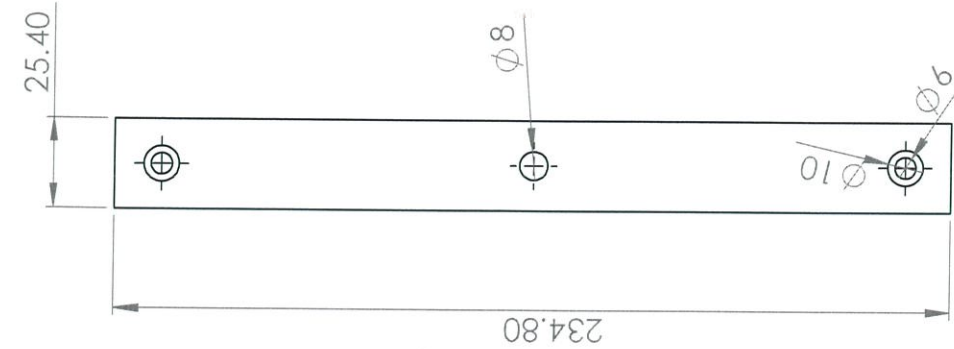


DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
Frame of Wheelset 1		
TITLE		
DWG NO.	2	
A4		A4
SCALE:1:2		
SHEET 5 OF 6		

6 5 4 3 2 1 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

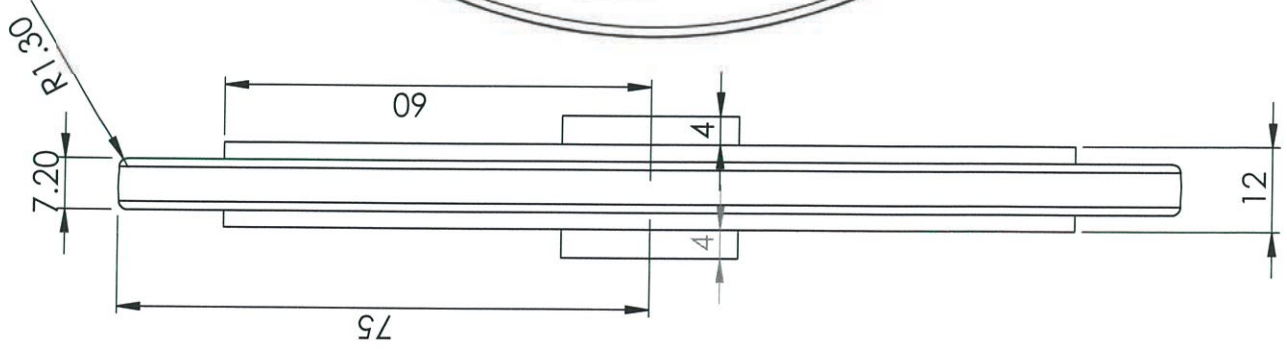
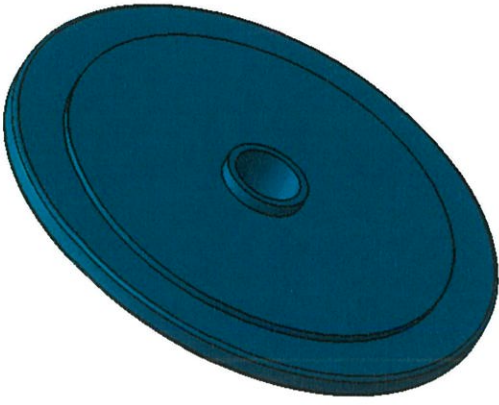
1
2
3
4
5
6



DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
TITLE		
Frame of Wheelset 2		
DWG NO.	2	A4
SCALE:1:5	SHEET 6 OF 6	

1
2
3
4
5
6

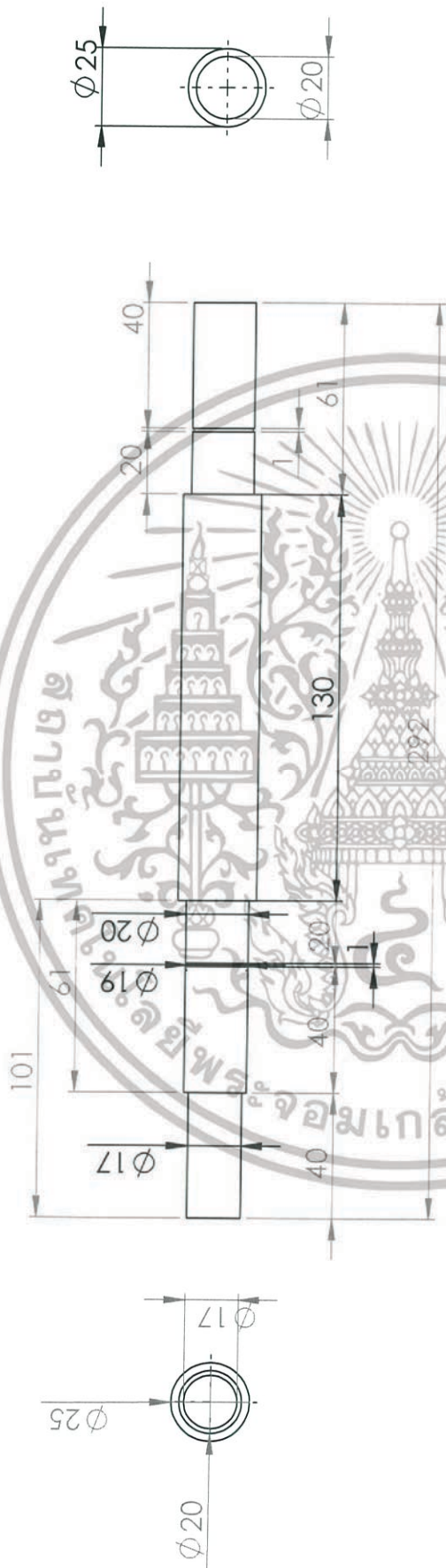
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
Wheel of Roller rig		
DWG NO.	3	A4
SCALE:1:5	SHEET 1 OF 2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1
2
3
4
5
6



DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
Axle of Roller rig		
DWG NO.	3	A4
SCALE:1:5	SHEET 2 OF 2	

1
2
3
4
5
6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 2 3 4 5 6



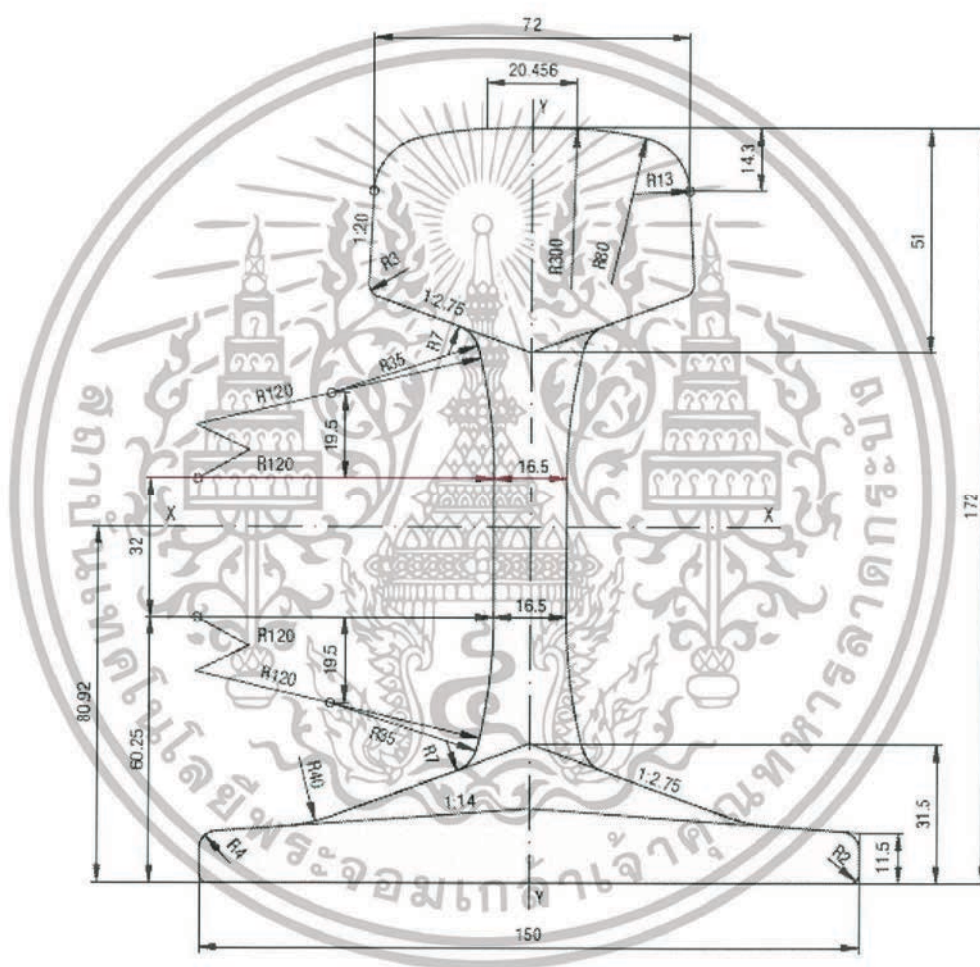
DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	A
Hunting motion Project		
TITLE	Base	
DWG NO.	4	
SCALE:1:10	A4	
SHEET 1 OF 1		

1 2 3 4 5 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

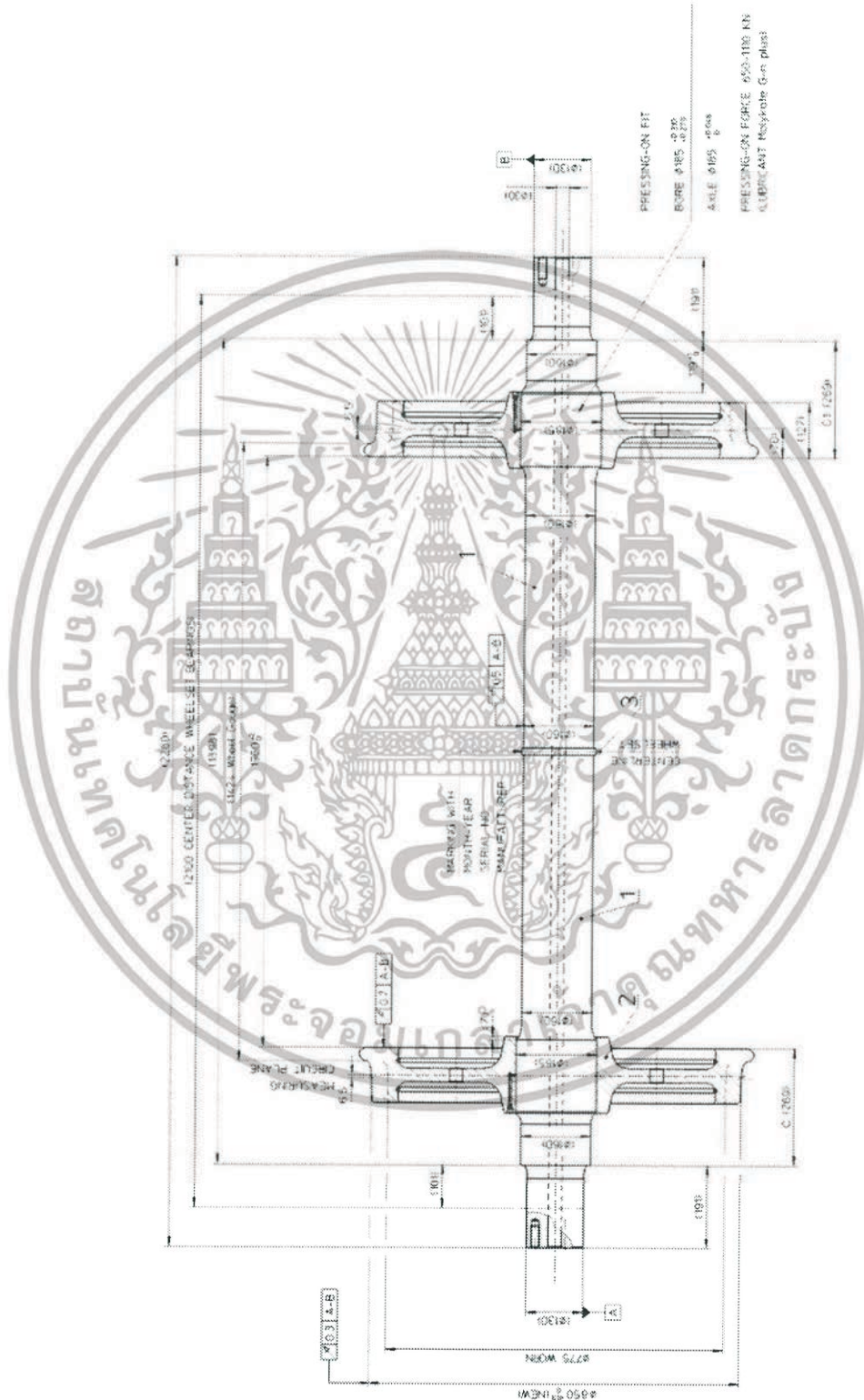
ภาคผนวก ข.
แบบชุดลื้อและราง

แบบราง 60E1 (UIC 60)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบชุดล้อ MRTA INITIAL SYSTEM PROJECT Rolling stock wheel set trailer bogie



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S1002 profile

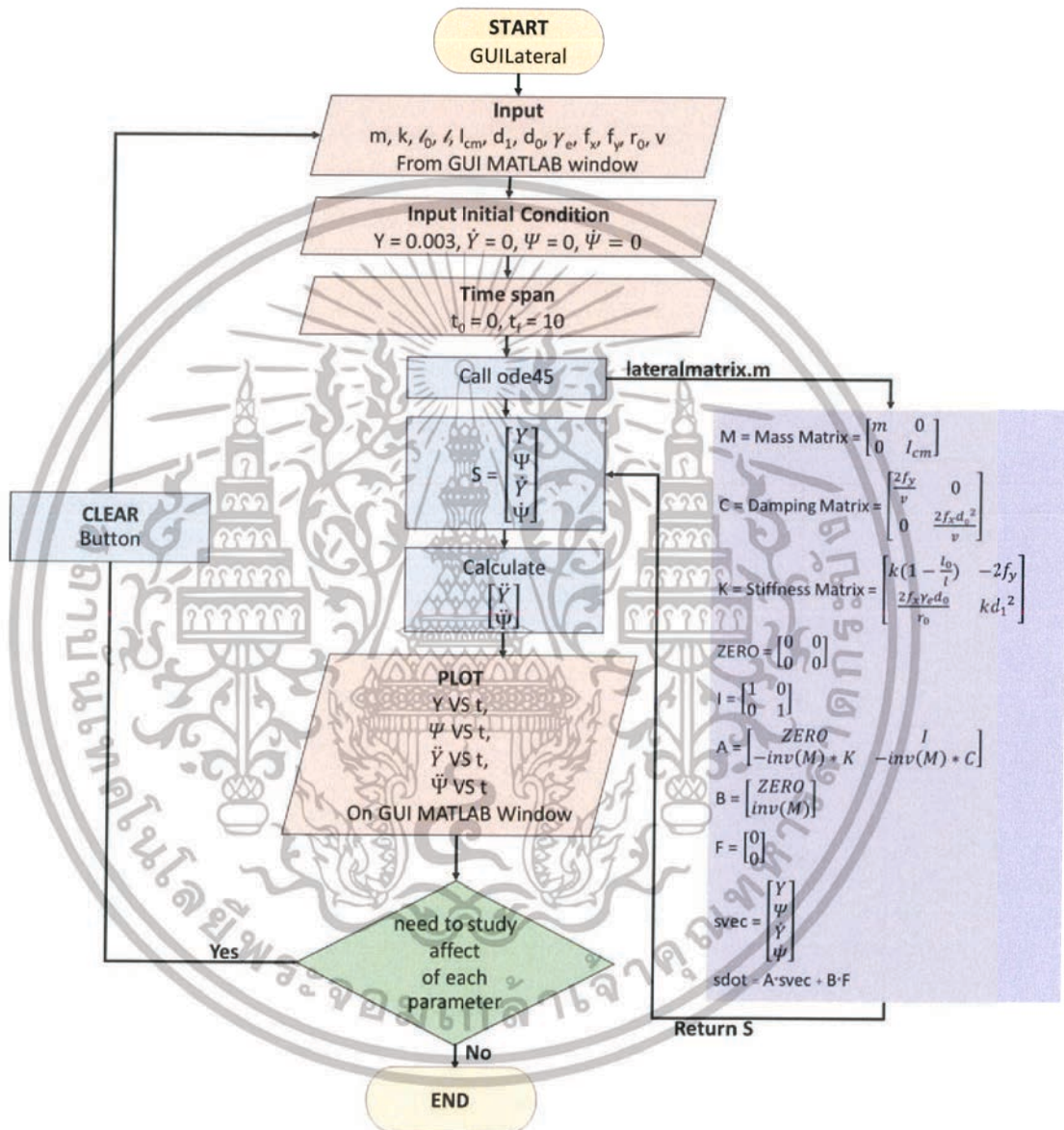


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาด้วยโปรแกรม MATLAB

ค.1 แผนผังขั้นตอนในการคำนวณในโปรแกรม MATLAB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 การสร้างหน้าต่าง GUI รับข้อมูลและคำนวณค่าความเร่งการตอบสนองที่ความเร็วต่าง ๆ

```

function varargout = GUI_Lateral(varargin)
% GUI_LATERAL MATLAB code for GUI_Lateral.fig
%   GUI_LATERAL, by itself, creates a new GUI_LATERAL or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = GUI_LATERAL returns the handle to a new GUI_LATERAL or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   GUI_LATERAL('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in GUI_LATERAL.M with the given input arguments.
%
%   GUI_LATERAL('Property','Value',...) creates a new GUI_LATERAL or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before GUI_Lateral_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to GUI_Lateral_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
%
% Edit the above text to modify the response to help GUI_Lateral
%
% Last Modified by GUIDE v2.5 25-May-2019 23:18:23
%
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUI_Lateral_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @GUI_Lateral_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
%
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

%
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before GUILateral is made visible.
function GUILateral_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to GUILateral (see VARARGIN)

% Choose default command line output for GUILateral
handles.output = hObject;

equa1=imread('equationcapture1.jpg');
axes(handles.axes1);
imshow(equa1);

equa2=imread('equationcapture2.jpg');
axes(handles.axes2);
imshow(equa2);

logo=imread('KMITLLogo.png');
axes(handles.axes3);
imshow(logo);

model=imread('Modeldraw.png');
axes(handles.axes8);
imshow(model);

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes GUILateral wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

setappdata(0,'HandleMainGUI',hObject);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = GUILateral_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
global t y yaw yawdotdot ydotdot
global m k l lw d1 d0 re fx fy r0 v
m = str2double(get(handles.edit1,'string')); %% mass of wheelset
k = str2double(get(handles.edit2,'string')); %% spring stiffness ( 2 springs )
l0 = str2double(get(handles.edit3,'string')); %% spring length
l = str2double(get(handles.edit4,'string')); %% equilibrium spring length
lw = str2double(get(handles.edit5,'string')); %% Moment of inertia of wheelset
d1 = str2double(get(handles.edit6,'string')); %% half length of two spring
d0 = str2double(get(handles.edit7,'string')); %% track gauge
re = str2double(get(handles.edit8,'string')); %% wheel tread angle
fx = str2double(get(handles.edit9,'string')); %% longitudinal creep force coefficient
fy = str2double(get(handles.edit10,'string')); %% lateral creep force coefficient
r0 = str2double(get(handles.edit11,'string')); %% centered wheel rolling radius
v = str2double(get(handles.edit12,'string')); %% input frequency ** Found critical speed

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%initial conditions
IC = [0.003,0,0,0];

%timespan
t0 = 0;
tf = 10;
tspan = [t0:0.001:tf];

%Numerical Integration
[t,s] = ode45(@lateralmatrix,tspan,IC);
y = s(:,1);
yaw = s(:,2);
ydot = s(:,3);
yawdot = s(:,4);
ydotdot=((2*fy*yaw)-(2*fy*ydot/v)*(k*(1-l0/l)*y))/m;
yawdotdot=((-2*fx*re*d0*y)/r0)-((2*fx*yawdot*d0*d0)/v)-(k*yaw*d1*d1)/lw;

%figure(1)
axes(handles.axes4);
plot(t,y,'b-','LineWidth',1);
xlabel('time (s)');
ylabel('Lateral displacement (m)');
title('Lateral displacement Vs Time','Color',[0.8500, 0.3250, 0.0980]);
ax1 = gca; % current axes
ax1.XColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
ax1.YColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
grid on
grid minor

%figure(2)
axes(handles.axes5);
plot(t,yaw,'r-','LineWidth',1);
xlabel('time (s)');
ylabel('Yaw displacement (rad)');
title('Yaw displacement Vs Time','Color',[0.8500, 0.3250, 0.0980]);
ax2 = gca; % current axes
ax2.XColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
ax2.YColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
grid on
grid minor

%figure(3)
axes(handles.axes6);
plot(t,ydotdot,'b-','LineWidth',1)
xlabel('time (s)');
ylabel('Lateral Acceleration (m/s^2)');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

title('Lateral Acceleration Vs Time','Color',[0.8500, 0.3250, 0.0980]);
ax3 = gca; % current axes
ax3.XColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
ax3.YColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
grid on
grid minor

%figure(4)
axes(handles.axes7);
plot(t(10:end),yawdotdot(10:end),'r-','LineWidth',1)
xlabel('time (s)');
ylabel('Yaw acceleration (rad/s^2)');
title('Yaw acceleration Vs Time','Color',[0.8500, 0.3250, 0.0980]')
ax4 = gca; % current axes
ax4.XColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
ax4.YColor = '[0.8500, 0.3250, 0.0980]';
grid on
grid minor

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%   str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% --- Executes on key press with focus on pushbutton1 and none of its controls.
function pushbutton1_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on key press with focus on edit1 and none of its controls.
function edit1_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmp(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit2);

    % call the callback
    edit1_Callback(handles.edit1,[],handles);
end

% --- Executes on key press with focus on edit2 and none of its controls.
function edit2_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmp(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit3);

    % call the callback
    edit2_Callback(handles.edit2,[],handles);
elseif strcmp(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end

% --- Executes on key press with focus on edit3 and none of its controls.
function edit3_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit4);

    % call the callback
    edit3_Callback(handles.edit3,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit2);
end

% --- Executes on key press with focus on edit4 and none of its controls.
function edit4_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit5);

    % call the callback
    edit4_Callback(handles.edit4,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit3);
end

% --- Executes on key press with focus on edit5 and none of its controls.
function edit5_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit6);

    % call the callback
    edit5_Callback(handles.edit5,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit4);
end

% --- Executes on key press with focus on edit6 and none of its controls.
function edit6_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit7);

    % call the callback
    edit6_Callback(handles.edit6,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit5);
end

% --- Executes on key press with focus on edit7 and none of its controls.
function edit7_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit8);

    % call the callback
    edit7_Callback(handles.edit7,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit6);
end

% --- Executes on key press with focus on edit8 and none of its controls.
function edit8_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit9);

    % call the callback
    edit8_Callback(handles.edit8,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit7);
end

% --- Executes on key press with focus on edit9 and none of its controls.
function edit9_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit10);

    % call the callback
    edit9_Callback(handles.edit9,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit8);
end

% --- Executes on key press with focus on edit10 and none of its controls.
function edit10_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit11);

    % call the callback
    edit10_Callback(handles.edit10,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit9);
end

% --- Executes on key press with focus on edit11 and none of its controls.
function edit11_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
% Key: name of the key that was pressed, in lower case
% Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
% Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
    % set focus to the button
    uicontrol(handles.edit12);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% call the callback
edit11_Callback(handles.edit11,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
% set focus to the button
uicontrol(handles.edit10);
end

% --- Executes on key press with focus on edit12 and none of its controls.
function edit12_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
%   Key: name of the key that was pressed, in lower case
%   Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
%   Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift) pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
keyPressed = eventdata.Key;

if strcmpi(keyPressed,'return')
% set focus to the button
uicontrol(handles.pushbutton1);

% call the callback
edit12_Callback(handles.edit12,[],handles);
pushbutton1_Callback(handles.pushbutton1,[],handles);
elseif strcmpi(keyPressed,'space')
% set focus to the button
uicontrol(handles.edit11);
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.edit1,'String','');
set(handles.edit2,'String','');
set(handles.edit3,'String','');
set(handles.edit4,'String','');
set(handles.edit5,'String','');
set(handles.edit6,'String','');
set(handles.edit7,'String','');
set(handles.edit8,'String','');
set(handles.edit9,'String','');
set(handles.edit10,'String','');
set(handles.edit11,'String','');
set(handles.edit12,'String','');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cla(handles.axes4);
cla(handles.axes5);
cla(handles.axes6);
cla(handles.axes7);

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
m = str2double(set(handles.edit1,'string',2.755)); %% mass of wheelset
k = str2double(set(handles.edit2,'string',1913)); %% spring stiffness ( 2 springs )
l0 = str2double(set(handles.edit3,'string',0.035)); %% spring length
l = str2double(set(handles.edit4,'string',0.03513)); %% equilibrium spring length
lw = str2double(set(handles.edit5,'string',0.01932)); %% Moment of inertia of wheelset
d1 = str2double(set(handles.edit6,'string',0.101)); %% half length of two spring
d0 = str2double(set(handles.edit7,'string',0.075)); %% track gauge
re = str2double(set(handles.edit8,'string',0.05)); %% wheel tread angle
fx = str2double(set(handles.edit9,'string',8177.8)); %% longitudinal creep force coefficient
fy = str2double(set(handles.edit10,'string',7389.5)); %% lateral creep force coefficient
r0 = str2double(set(handles.edit11,'string',0.0425)); %% centered wheel rolling radius

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton6.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global t y yaw yawdotdot ydotdot
global m k l l w d1 d0 re fx fy r0 v
[FileName,PathName] = uiputfile('*.xlsx','Save file,');
fname = fullfile(PathName, FileName);
col_header1={'time','Lateral Displacement','Yaw Displacement','Lateral Acceleration','Yaw Acceleration'};
xlswrite(fname, col_header1, sheet1, 'A1');
xlswrite(fname,[t(:),y(:),yaw(:),ydotdot(:),yawdotdot(:)], sheet1, 'A2');
col_header2={'mass','wheel tread angle','speed'};
xlswrite(fname,col_header2,sheet1,'G1');
xlswrite(fname,[m,re,v],sheet1,'G2');
winopen(fname);

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
sendtext = str2double(get(handles.edit12,'string'));
Test;
W1=W(1,1);
W2=W(3,3);
Wd1=Wd(1,1);
Wd2=Wd(3,3);
info(sendtext,W1,W2,Wd1,Wd2);

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
m = str2double(set(handles.edit1,'string',2.755)); %% mass of wheelset
k = str2double(set(handles.edit2,'string',1913)); %% spring stiffness ( 2 springs )
l0 = str2double(set(handles.edit3,'string',0.035)); %% spring length
l = str2double(set(handles.edit4,'string',0.03513)); %% equilibrium spring length
Iw = str2double(set(handles.edit5,'string',0.01932)); %% Moment of inertia of wheelset
d1 = str2double(set(handles.edit6,'string',0.101)); %% half length of two spring
d0 = str2double(set(handles.edit7,'string',0.075)); %% track gauge
re = str2double(set(handles.edit8,'string',0.025)); %% wheel tread angle
fx = str2double(set(handles.edit9,'string',8182.97)); %% longitudinal creep force coefficient
fy = str2double(set(handles.edit10,'string',7394.24)); %% lateral creep force coefficient
r0 = str2double(set(handles.edit11,'string',0.0425)); %% centered wheel rolling radius

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 สร้างฟังก์ชันสมการการเคลื่อนที่

```
function sdot = lateralmatrix(t,s)
```

```
global m k l0 l lw d1 d0 re fx fy r0 v
```

```
%mass matrix
```

```
M = [m, 0; 0, lw];
```

```
%damping matrix
```

```
C = [2*fy/v, 0; 0, 2*fx*d0*d0/v];
```

```
%stiffness matrix
```

```
K = [k*(1-l0/l), -2*fy; 2*fx*re*d0/r0, k*d1*d1];
```

```
%identity matrix
```

```
ZERO = zeros(2,2);
```

```
I = eye(2,2);
```

```
A = [ZERO, I; -inv(M)*K, -inv(M)*C];
```

```
B = [ZERO; inv(M)];
```

```
F = [0;0];
```

```
Svec = [s(1); s(2); s(3); s(4)];
```

```
sdot = A*Svec + B*F;
```

```
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 สร้างฟังก์ชันคำนวณหา Ω และ Ω_n

```

global m k l0 l lw d1 d0 re fx fy r0 v
m = str2double(get(handles.edit1,'string')); %% mass of wheelset
k = str2double(get(handles.edit2,'string')); %% spring stiffness ( 2 springs )
l0 = str2double(get(handles.edit3,'string')); %% spring length
l = str2double(get(handles.edit4,'string')); %% equilibrium spring length
lw = str2double(get(handles.edit5,'string')); %% Moment of inertia of wheelset
d1 = str2double(get(handles.edit6,'string')); %% half length of two spring
d0 = str2double(get(handles.edit7,'string')); %% track gauge
re = str2double(get(handles.edit8,'string')); %% wheel tread angle
fx = str2double(get(handles.edit9,'string')); %% longitudinal creep force coefficient
fy = str2double(get(handles.edit10,'string')); %% lateral creep force coefficient
r0 = str2double(get(handles.edit11,'string')); %% centered wheel rolling radius
v = str2double(get(handles.edit12,'string')); %% input frequency ** Found critical
speed

%mass matrix
M = [m, 0; 0, lw];

%damping matrix
C = [2*fy/v, 0; 0, 2*fx*d0*d0/v];

%stiffness matrix
K = [k*(1-l0/l), -2*fy; 2*fx*re*d0/r0, k*d1*d1];

% compute the state matrix
n=2;
A=[zeros(n) eye(n); -M\K -M\C]
[V,D]=eig(A)

% compute the real and imaginary parts

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Re}D=(D+D')/2;$$

$$\text{Im}D=(D'-D)*i/2;$$

$$W=\text{sqrt}(\text{Re}D^2+\text{Im}D^2)$$

$$\text{Zeta}=(-\text{Re}D/W);$$

$$Wd= W*(\text{sqrt}(1-(\text{Zeta}^2)))$$

$$W1=W(1,1)$$

$$W2=W(3,3)$$

$$Wd1=Wd(1,1)$$

$$Wd2=Wd(3,3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงคืบในแนวการกลิ้งและแนวด้านข้าง

ง. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คืบจากโปรแกรม MATLAB

```

clear all;
%% Input section
Ew = 207e9; %% Young's modulus(wheel),N/m^2
Er = 207e9; %% Young's modulus(rail),N/m^2
nuw = 0.29; %% Poisson's ratio(wheel)
nur = 0.29; %% Poisson's ratio(rail)
Fn10 = 2755*9.81/2*cos(atan(0.1))
Fn20 = 2755*9.81/2*cos(atan(0.05))
Fn40 = 2755*9.81/2*cos(atan(0.025))
R1w = 0.425; %% Rolling radius of wheel(m)
R2w = 1e500; %% Transvers radius of wheel(m)
R1r = 1e500; %% Longitudinal radius of rail(m)
%Rlr2 = 1 %Longitudinal radius of roller rig (m)
R2r = 0.300; %% Transvers radius of rail(m)
Si = 0; %% Yaw rotation angle(rad)
%% Calculation section
K1 = (1 - nuw^2)/(pi*Ew)
K2 = (1 - nur^2)/(pi*Er)
K3 = ((1/R1w)+(1/R2w)+(1/R1r)+(1/R2r))/2
c1 = ((1/R1w)-(1/R2w));
c2 = ((1/R1r)-(1/R2r));
c3 = c1^2+c2^2+2*c1*c2*cos(2*Si);
K4 = sqrt(c3)/2
theta = acos(K4/K3)
A_B = (K3-K4)/(K3+K4);
%Beta = (A_B - 0.4903)*(0.3215 - 0.3322)/(0.7041-0.4903) + 0.3322;
Am = -1.086419052477;
Bm = -0.106496432832;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Cm = 1.350000000000;
Dm = 1.057885958251;
An = -0.773444080706;
Bn = 0.256695354565;
Cn = 0.200000000000;
Dn = -0.280958376499;
m = Am*tan(theta - pi/2) + Bm/(theta^Cm) + Dm
n = 1/(An*tan(theta - pi/2)+1) + Bn*(theta^Cn) + Dn*sin(theta)

```

```

%% Calculate ellipse area dimensions
%for conicity= 1/10
a10 = m*(3*pi*Fn10*(K1+K2)/(4*K3))^(1/3); %% Major semi-axis
b10 = n*(3*pi*Fn10*(K1+K2)/(4*K3))^(1/3); %% Minor semi-axis
%for conicity= 1/20
a20 = m*(3*pi*Fn20*(K1+K2)/(4*K3))^(1/3) %% Major semi-axis
b20 = n*(3*pi*Fn20*(K1+K2)/(4*K3))^(1/3) %% Minor semi-axis
%for conicity= 1/40
a40 = m*(3*pi*Fn40*(K1+K2)/(4*K3))^(1/3); %% Major semi-axis
b40 = n*(3*pi*Fn40*(K1+K2)/(4*K3))^(1/3); %% Minor semi-axis
%% Calculate coefficient creep
c10=b10/a10;
c20=b20/a20
c40=b40/a40;
% c from Kalker's table 2.2
c11=4.6280;
c22=4.1819;

```

```

G=79.3e9; %modulus of rigidity
%for conicity= 1/40
f114=a40*b40*G*c22 %f11=fy
f334=a40*b40*G*c11 %f33=fx
f114s=f114*(1/(10^(8/3)))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{334s} = f_{334} * (1 / (10^{(8/3)}))$$

% % %for conicity= 1/20

$$f_{112} = a_{20} * b_{20} * G * c_{22} \quad \%f_{11} = f_y$$

$$f_{332} = a_{20} * b_{20} * G * c_{11} \quad \%f_{33} = f_x$$

$$f_{112s} = f_{112} * (1 / (10^{(8/3)}))$$

$$f_{332s} = f_{332} * (1 / (10^{(8/3)}))$$

% % %for conicity= 1/10

$$f_{111} = a_{10} * b_{10} * G * c_{22} \quad \%f_{11} = f_y$$

$$f_{331} = a_{10} * b_{10} * G * c_{11} \quad \%f_{33} = f_x$$

$$f_{111s} = f_{111} * (1 / (10^{(8/3)}))$$

$$f_{331s} = f_{331} * (1 / (10^{(8/3)}))$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้