

การศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ

STUDY OF LATERAL FORCE ACTING ON TRAIN WHEELSET



มนตรี กุลประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ

มนตรี กุลประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ
Study of Lateral Force Acting on Train Wheelset
ชื่อ – นามสกุล นายมนตรี กุลประดิษฐ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทอดเกียรติ ลิมปีทีปการ, Ph.D.
ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.)

..... กรรมการ
(อาจารย์กรธรรม สติรกุล, Ph.D.)

..... กรรมการ
(อาจารย์สถาพร ทองวิค, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทอดเกียรติ ลิมปีทีปการ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ
ชื่อ – นามสกุล	นายมนตรี กุลประดิษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทอดเกียรติ ลิมปิที่ปรากฏ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ในการประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ การวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่ชุดเพลาล้อรถไฟถือว่ามีผลสำคัญอย่างยิ่ง ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการวัดและวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ และประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟขณะเข้าโค้ง โดยปกติอัตราส่วนความปลอดภัยคือค่าระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อแรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าว (Y/Q) ของการวิ่งของรถไฟในทางตรงต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2

การวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ แบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่งเท่านั้น

จากผลการทดลองในขณะรถไฟจำลองหยุดนิ่งพบว่า แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองสูงสุดจากการวัดความเครียดและการวัดความเร่งคือ 22.2 N และ 12.4 N ตามลำดับ แรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดจากการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คือ 13.1 N และ 24.7 N ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี และจากผลการทดลองในขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่พบว่า ในทางโค้งไม่มีการยกโค้งที่รถไฟจำลองมีความเร็ว 0.84 m/s และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยของการวิ่งของแบบจำลองจะได้ค่าประมาณ 1.5 ซึ่งสูงกว่าค่ากำหนดตามมาตรฐาน 1.2 ทั้งนี้แบบจำลองสามารถวิ่งผ่านทางโค้งได้โดยไม่ตกรางซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการวัดค่าแรงกระทำด้านข้างที่ได้ค่าเคลื่อนสูงกว่าความเป็นจริง

คำสำคัญ: แรงกระทำในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้าง ความสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง ชุดเพลาล้อรถไฟ การตกรางของรถไฟ ความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ

Thesis Title Study of Lateral Force Acting on Train Wheelset
Name - Surname Mr. Montree Khunpradit
Program Mechanical Engineering
Thesis advisor Assistant Professor Terdkiat Limpeteeparakarn, Ph.D.
Academic Year 2018

ABSTRACT

To assess the safety of the running of the train, measurement of the force acting on the wheel axle is crucial. This research aims to find out how to measure and analyze the lateral force on the wheel axle, and to estimate security value in running of the train while running on a curved railway. Normally, safety ratio is the value between the lateral force (Y) and the vertical force (Q) of which the straight-run ratio (Y / Q) of the train must not exceed 0.8 and the curved-run ratio must not exceed 1.2.

Measurement of the lateral force acting on the wheel axle was divided into two cases. The first case was measured while the model train had stopped which was subdivided into 2 types of measurement: stress and acceleration measurement in comparison with the theory of both classical calculation and a computational method of finite element analysis. The second one was measured while the train was moving by using an acceleration measurement.

The findings of this experimental research revealed that while the model train stopped, the maximum of the lateral force acting on the wheel axle based on stress and speed measurement were 22.2 N and 12.4 whereas the maximum lateral forces with classical calculation and finite element analysis were 13.1 N and 24.7 N, respectively. When comparing with the lateral force gained from the measurement, the value was close to the theory. It was also found that at curvature with no elevation and a train speed of 0.84 m/s the maximum lateral force was 220 N. When analyzing the safety ratio of the model train running, it was found that the value of the train model is 1.5 which is higher than the standard value of 1.2. Although the train model can run without derailment, this may be caused by an error of the lateral force measurement that is higher than its actuality.

Keywords: vertical and lateral forces, wheel/rail interaction, train wheelset, derailment, safety of running train

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผศ.ดร. เทอดเกียรติ ลิมปิทีปการ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการการสอบ วิทยานิพนธ์และให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรอง ผลงานการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา จนผู้วิจัยสามารถนำเอา หลักการและความรู้ มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัชบุรีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร ตลอดจนบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัชบุรีทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน ในทุกๆ เรื่องตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษา

ขอขอบคุณครอบครัว กุลประดิษฐ์ญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนและคำแนะนำ

คุณค่าที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

มนตรี กุลประดิษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์.....	16
1.3 สมมติฐานและกรอบแนวคิด.....	16
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับการตรวจวัดและการทดสอบอุปกรณ์ของระบบราง.....	19
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับล้อรถไฟ.....	20
2.3 ลักษณะการระเหิดที่กระทำต่อล้อ.....	22
2.4 นิยามของ Degree of Freedom ของรถไฟ.....	22
2.5 การประเมินการตกรางของรถไฟ.....	23
2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรถไฟ.....	24
2.7 การเข้าโค้งของรถไฟ.....	25
2.8 ลักษณะแรงกระทำต่อล้อและราง.....	26
2.9 การประเมินตัวแปรของความเสี่ยงต่อการตกราง.....	29
2.10 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการหาค่าแรงกระทำด้านข้างและการคำนวณ.....	30
2.11 ทบทวนวรรณกรรม.....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	55
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	55
3.2 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการหาค่าแรงกระทำด้านข้างและการคำนวณ.....	56
3.3 แผนผังการคำนวณและการหาแรงกระทำด้านข้าง.....	59
3.4 วิธีการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง.....	60
3.5 วิธีการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่แบบความเร่ง.....	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	72
4.1 ผลการทดลอง.....	72
4.2 การวิเคราะห์ผล.....	79
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผล.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก การสร้างชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างด้วยโปรแกรม ไฟไนต์อีลิเมนต์.....	88
ภาคผนวก ข แบบวาดโบกี้รถไฟจำลองและทางรถไฟจำลอง.....	92
ภาคผนวก ค การติดตั้งเซนเซอร์ที่ล้อของรถไฟจำลองและการติดตั้งหัววัดความเร่ง กับแกนตลับลูกปืนของล้อของรถไฟจำลอง.....	99
ภาคผนวก ง การหาแรงกระทำด้านข้างโดยใช้ความเครียดเปรียบเทียบกับทฤษฎี.....	103
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณ.....	106
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	130

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานระบบตัวรถไฟ.....	19
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลอง หยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	73
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลอง หยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวัดความเครียด.....	73
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลอง หยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวัดความเร่ง.....	74
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างแบบต่างๆ ในทางยกโค้งขณะที่รถไฟ จำลองหยุดนิ่ง.....	74
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีการวัดความเร่งในทางโค้ง มีการยกโค้ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่.....	76
ตารางที่ 4.6 ผลการตรวงของรถไฟจำลองในความเร็วที่ยอมให้ผ่านโค้งในทางโค้ง มีการยกโค้ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่.....	77
ตารางที่ 4.7 การประเมินค่าความปลอดภัยของรถไฟจำลองเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.84 m/s ในทางโค้งมีการยกโค้ง.....	78
ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบช่วงของค่าแรงกระทำด้านข้างในการวิ่งทางตรงด้วยวิธีการวัด แบบความเร่ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ที่ความชันต่างๆ.....	78

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบความเครียด.....	15
รูปที่ 1.2 วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส.....	15
รูปที่ 1.3 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	16
รูปที่ 1.4 แนวคิดการทดลอง.....	17
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของชุดล้อรถไฟ.....	20
รูปที่ 2.2 ล้อรีดทีบ (Monobloc wheel).....	21
รูปที่ 2.3 ล้อมีปลอก (Tyred wheel).....	21
รูปที่ 2.4 ลักษณะการระเหิดที่กระทำต่อล้อ.....	22
รูปที่ 2.5 Degree of Freedom ของรถไฟ.....	22
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรถไฟ.....	24
รูปที่ 2.7 ลักษณะการเข้าโค้งของรถไฟและตัวแปรสำหรับการคำนวณ.....	25
รูปที่ 2.8 ลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางในทางตรง.....	26
รูปที่ 2.9 ลักษณะเบี่ยงเบนของล้อและเพลานในทางโค้ง.....	27
รูปที่ 2.10 จุดสัมผัสของล้อรถไฟกับรางรถไฟในทางโค้ง.....	28
รูปที่ 2.11 แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) และแรงกระทำด้านข้าง (Y) ในขณะที่รถไฟเข้าโค้ง...	29
รูปที่ 2.12 แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางจากน้ำหนักรถไฟ.....	30
รูปที่ 2.13 ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและราง.....	31
รูปที่ 2.14 วิธีการหาแรงกระทำแบบความเครียด โดยการติดตั้งสเตรนเกจ.....	34
รูปที่ 2.15 วิธีการหาแรงกระทำแบบการโก่งตัวของล้อรถไฟ โดยการติดตั้งชุดเซนเซอร์ วัดระยะแบบไม่สัมผัส.....	34
รูปที่ 2.16 ชุดทดสอบการหาแรงกระทำแบบความเครียด.....	35
รูปที่ 2.17 ชุดทดสอบการหาแรงกระทำแบบเซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส.....	36
รูปที่ 2.18 หน้าตัดลักษณะและการแบ่งหน่วยย่อยของล้อรถไฟ.....	36
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของล้อรถไฟ.....	37
รูปที่ 2.20 หน้าตัดลักษณะและการแบ่งหน่วยย่อยของรางรถไฟ.....	37
รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรางรถไฟ.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.22 ระยะห่างในแนวดิ่งของชุดเพลาล้อและแนวราง.....	38
รูปที่ 2.23 ตำแหน่งการสัมผัสระหว่างล้อและราง.....	39
รูปที่ 2.24 ระบบอ้างอิงที่เกี่ยวข้องของตัวรถ.....	39
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างล้อและราง โดยใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์.....	40
รูปที่ 2.26 การกลับทิศทางการใช้งานของโบกี้รถไฟ.....	40
รูปที่ 2.27 หมายเลขของล้อรถไฟสำหรับการทดสอบ.....	41
รูปที่ 2.28 รูปร่างและตัวแปรที่เกี่ยวข้องของล้อรถไฟ.....	41
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความลาดเอียงล้อรถไฟกับระยะทางที่ ใช้งาน.....	41
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความหนาขอบล้อรถไฟกับระยะทางที่ ใช้งาน.....	42
รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับสมการของนาตาล ($\mu_1=0.5$, $\mu_2=0.4$, $\delta=60$, $V=12,500$ pounds)	42
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับสมการของนาตาล ($\beta = 90, 60, 30, 0$ degrees).....	43
รูปที่ 2.33 โครงสร้างของรูปแบบ Multi-Body-Simulation (BMS).....	43
รูปที่ 2.34 ตัวอย่างโครงสร้างแบบ 3 องศาอิสระ.....	44
รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความคืบ.....	44
รูปที่ 2.36 การติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการโก่งตัวของล้อรถไฟ.....	45
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดัดกับความเร็วที่มีความโค้ง.....	46
รูปที่ 2.38 ตัวอย่างการประเมินรูปร่างของล้อรถไฟหลังการใช้งาน.....	47
รูปที่ 2.39 ตัวอย่างการประเมินรูปร่างของรางรถไฟหลังการใช้งาน.....	47
รูปที่ 2.40 ล้อที่เสียหายจากการใช้งาน.....	48
รูปที่ 2.41 ความผิดปกติของรางระหว่างรอยต่อ.....	48
รูปที่ 2.42 แรงกระทำที่ผิดปกติที่เกิดจากรางรถไฟ.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.43 แรงกระทำที่ผิดปกติที่เกิดจากล้อรถไฟ.....	49
รูปที่ 2.44 แรงกระทำที่ล้อรถไฟ.....	49
รูปที่ 2.45 ตำแหน่งการติดสเตรนเกจ และการต่อวงจรสเตรน.....	50
รูปที่ 2.46 ตัวแปรการสัมผัสระหว่างล้อและราง และแรงกระทำที่เกิดขึ้น.....	51
รูปที่ 2.47 ชุดทดสอบการตรวจของชุดเพลาล้อรถไฟ.....	51
รูปที่ 2.48 ความสัมพันธ์ของการสึกหรอของทางกับน้ำหนักบรรทุก.....	52
รูปที่ 2.49 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อและราง.....	53
รูปที่ 2.50 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดความเค้น (Von-mises) จากผิวของหัวราง กับมุมเอียงราง.....	53
รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดความเค้นเฉือน (Tresca) จากผิวของหัวราง กับมุมเอียงราง.....	54
รูปที่ 3.1 แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางจากน้ำหนักรถไฟ.....	56
รูปที่ 3.2 ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและราง.....	57
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดสอบการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่งและ เคลื่อนที่.....	59
รูปที่ 3.4 การสร้างชิ้นงาน.....	60
รูปที่ 3.5 การใส่ชนิดของชิ้นงาน.....	60
รูปที่ 3.6 ลักษณะและตำแหน่งของแรงกระทำและบริเวณจับยึด.....	61
รูปที่ 3.7 การแบ่งหน่วยย่อยของชิ้นงาน.....	62
รูปที่ 3.8 การคำนวณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงและแรงกระทำที่เกิดขึ้น.....	62
รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบสี.....	63
รูปที่ 3.10 การเตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลองที่ 1.7°.....	64
รูปที่ 3.11 การติดสเตรนเกจไว้ที่ล้อของรถไฟจำลอง.....	64
รูปที่ 3.12 การเชื่อมต่อสายสัญญาณ.....	65
รูปที่ 3.13 การเปิดการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ.....	65
รูปที่ 3.14 การทำงานและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้นโดยประมาณ.....	66
รูปที่ 3.16 การยกโค้งทางรถไฟจำลอง.....	67
รูปที่ 3.17 การเตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลองที่ 1.7°.....	67
รูปที่ 3.18 การติดหัววัดความเร่งกับชุดเพลาล้อรถไฟจำลอง.....	68
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างค่าความเร่งที่เกิดขึ้นเชิงกราฟ.....	69
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างค่าความเร่งที่เกิดขึ้นเชิงตัวเลข.....	69
รูปที่ 3.21 การเตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลอง.....	70
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างแบบต่างๆ ในทางยกโค้ง ขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง.....	75
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีการวัดความเร่ง ในทางโค้งมีการยกโค้ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่.....	76
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบช่วงของค่าแรงกระทำด้านข้างในการวิ่งทางตรงด้วยวิธีการวัด แบบความเร่ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ที่ความชันต่างๆ.....	79



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

EN	European Standard
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
UIC	International Union of Railways
m	เมตร
mm	มิลลิเมตร
m/s	เมตรต่อวินาที
m/s ²	เมตรต่อวินาทีต่อวินาที
N	นิวตัน
<i>a</i>	ความเร่ง
<i>c</i>	ระยะแรงถึง Strain gauge
<i>E</i>	โมดูลัสของยังส์
<i>F, P</i>	แรงกระทำ
<i>g</i>	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก
<i>I</i>	โมเมนต์ความเฉื่อย
<i>L</i>	ความยาว
<i>m</i>	มวล
<i>M</i>	โมเมนต์
<i>Q</i>	แรงกระทำในแนวตั้ง
<i>y</i>	ระยะกึ่งกลางชิ้นงานถึง Strain gauge
<i>Y</i>	แรงกระทำด้านข้าง
α	มุมประทะ
δ	ความยาวที่เปลี่ยนไป
ε	ค่าความเครียด
θ	มุมของการยกโค้ง
μ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
σ	ความเค้นตั้งฉาก

บทที่ 1

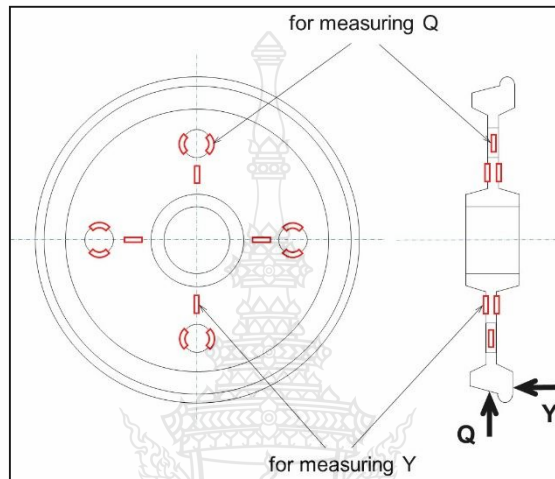
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

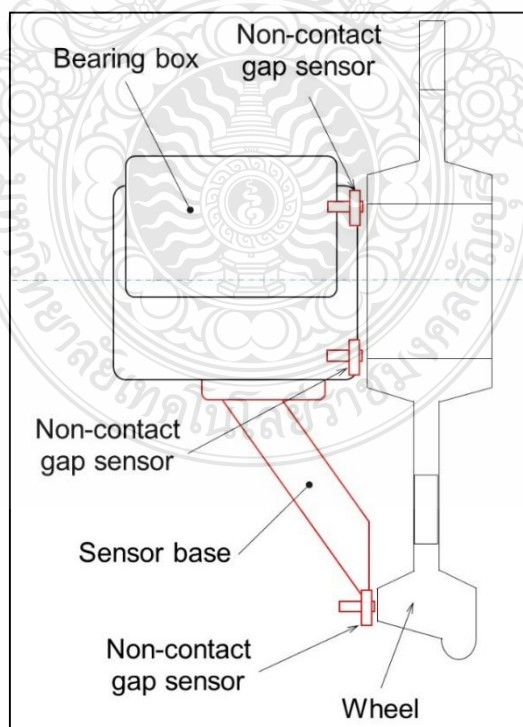
การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและระบบโลจิสติกส์ โดยการลดต้นทุนโลจิสติกส์ของประเทศ ซึ่งเน้นทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนามาตรฐานการขนส่ง โดยเฉพาะการขนส่งทางรางทั้งขนส่งสินค้าและผู้โดยสาร ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งนั้นทำได้หลายวิธี วิธีการหนึ่งก็คือ การเพิ่มความเร็วของขบวนรถไฟ โดยเฉพาะการเปลี่ยนทางรถไฟจากทางเดี่ยวให้เป็นทางคู่ทั่วประเทศ แต่กระนั้นก็อาจยังไม่เพียงพอเนื่องจากความเร็วเฉลี่ยที่ใช้อยู่ในปัจจุบันค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่รถไฟจำเป็นต้องลดความเร็วขณะวิ่งผ่านทางโค้ง ดังนั้นการเพิ่มความเร็วในการเข้าโค้งจึงถือเป็นอีกช่องทางที่ง่ายที่สุดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้า ในการเพิ่มความเร็วที่ทางโค้งนั้น ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ความปลอดภัยในขณะที่เข้าโค้งคือ แรงกระทำที่เกิดขึ้นที่บริเวณชุดเพลาล้อรถไฟทั้งในส่วนของหัวรถจักร ตู้โดยสาร หรือตู้สินค้า แต่การตรวจวัดแรงกระทำดังกล่าวมีความจำเป็นต้องการเข้าใจหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงพฤติกรรมการทำงานของชุดเพลาล้อที่ติดตั้งอยู่กับโบกี้ของรถไฟ นอกจากนี้ยังต้องอาศัยวิธีการและอุปกรณ์ที่ค่อนข้างสลับซับซ้อนในการวัด และยังไม่สามารถทำการวัดได้อย่างต่อเนื่องอีกด้วย เนื่องจากล้อรถไฟต้องมีการเจาะรูเพื่อติดตั้งเซนเซอร์สำหรับการวัดจึงทำให้สามารถใช้ล้อรถไฟได้เฉพาะช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น

โดยแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่ชุดเพลาล้อรถไฟที่มากเกินไปสามารถเป็นเหตุให้รถไฟเกิดการตกรางได้ ซึ่งแรงกระทำหลักนี้มาจาก 2 ส่วน คือ 1) แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของรถไฟและน้ำหนักบรรทุก และ 2) แรงกระทำด้านข้าง (Y) ที่เกิดขึ้นทั้งในการวิ่งของรถไฟบนทางตรงและทางโค้ง การทราบค่าแรงกระทำดังกล่าวสามารถใช้ประเมินความเสี่ยงต่อการตกรางของรถไฟได้ แต่ก็ต้องอาศัยเครื่องมือวัดที่มีราคาแพงและมีวิธีการวัดที่ซับซ้อน ไม่ว่าจะเป็นการวัดแรงกระทำโดยใช้สเตรนเกจหรือการวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส ตามมาตรฐาน UIC 518 ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟในทางตรง (Y/Q) ต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างที่ถูกรับรองได้แก่วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบความเครียดแสดงดังรูปที่ 1.1 และวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัสแสดงดังรูปที่ 1.2 แต่ที่

ได้รับการยอมรับมากคือวิธีการวัดแรงกระทำแบบความเครียด (Strain measurement method) แต่ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ค่อนข้างซับซ้อนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบใช้ความเร่ง (Acceleration measurement method) โดยวิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงกระทำแบบใช้ความเร่งนี้มีความสะดวกในการติดตั้ง ทดสอบ มีความต่อเนื่องและยังสามารถหาค่าของแรงกระทำที่เกิดขึ้นต่อเพลาล้อรถไฟในขณะรถไฟเคลื่อนที่ได้อีกด้วย



รูปที่ 1.1 วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบความเครียด [16]



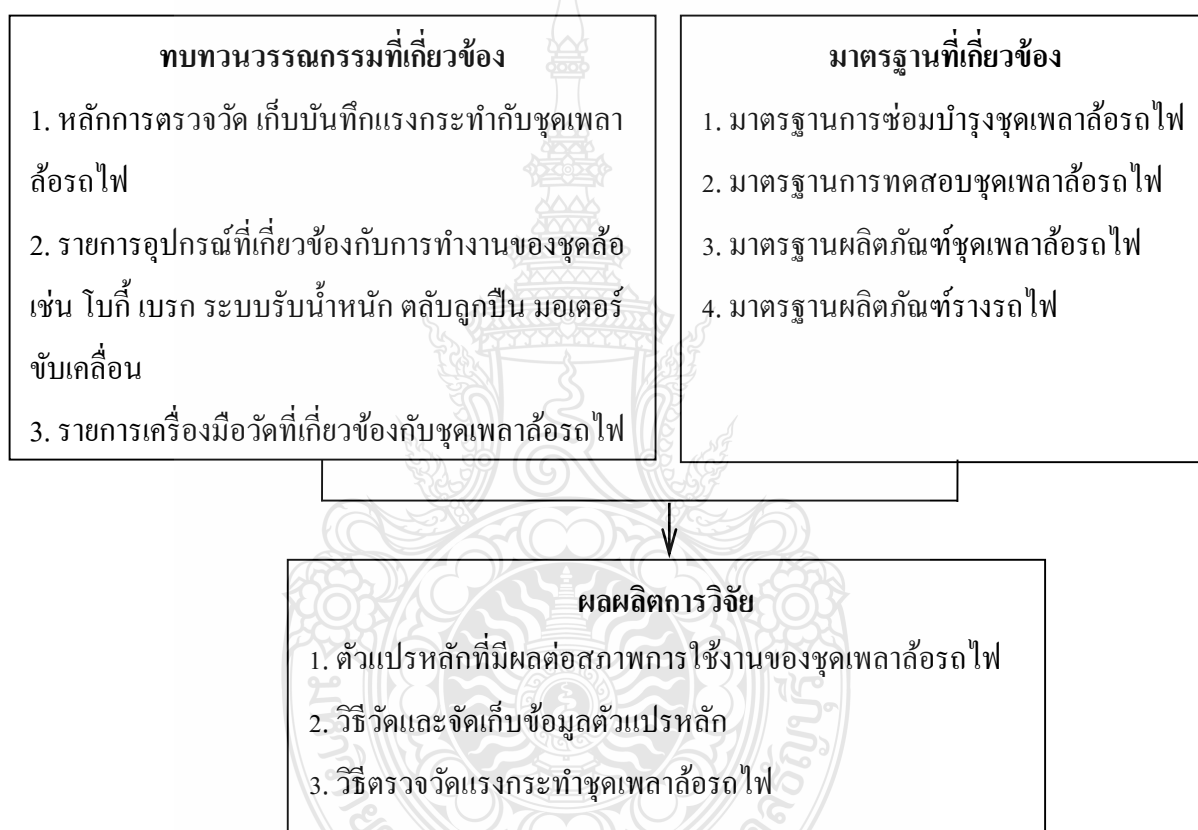
รูปที่ 1.2 วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส [16]

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อหาวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อเพลาล้อของโบกี้รถไฟ
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อเพลาล้อของโบกี้รถไฟ

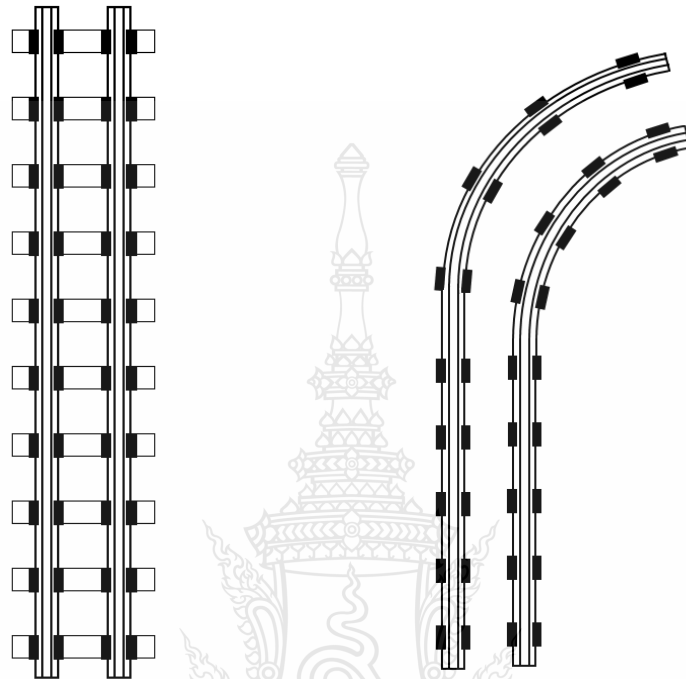
1.3 สมมติฐานและกรอบแนวคิด

- 1.3.1 องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 1.3 กรอบแนวคิดการวิจัย

1.3.2 แนวคิดการทดลอง
การจำลองลักษณะทางรถไฟทางตรงและทางโค้ง



(ก) รูปจำลองทางรถไฟทางตรง

(ข) รูปจำลองทางรถไฟทางโค้ง

รูปที่ 1.4 แนวคิดการทดลองการวัดแรงกระทำด้านข้างของชุดเพลาล้อรถไฟทางตรงและทางโค้ง

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างของชุดเพลาล้อรถไฟจำลองขนาด กว้าง 36 เซนติเมตร × ยาว 98 เซนติเมตร × สูง 45 เซนติเมตร

1.4.2 ทดสอบและเปรียบเทียบวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างของชุดเพลาล้อรถไฟในขณะรถไฟหยุดนิ่งจากรถไฟจำลองหนัก 60 kg

1.4.3 ทดสอบวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างของชุดเพลาล้อรถไฟในขณะรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3 ระดับ

1.4.4 ทางรถไฟจำลองสามารถปรับเอียงเพื่อทดสอบการยกโค้งและขึ้น-ลงทางชันได้ 3 ระดับ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ทราบถึงวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อของโบกี้รถไฟ
- 1.5.2 ได้ทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างของชุดเพลาล้อรถไฟในขณะรถไฟจำลองหยุดนิ่งและรถไฟจำลองเคลื่อนที่
- 1.5.3 ได้เผยแพร่วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อของโบกี้รถไฟจำลอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างของชุดเพลาล้อรถไฟจริง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานเกี่ยวกับการตรวจวัดและการทดสอบอุปกรณ์ของระบบราง ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับล้อรถไฟ ลักษณะภาระโหลดที่กระทำต่อล้อ สาเหตุของการตกรางของรถไฟ ลักษณะการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรถไฟ การเข้าโค้งของรถไฟ ลักษณะแรงกระทำต่อล้อและราง การประเมินตัวแปรของความเสี่ยงต่อการตกราง การคำนวณแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ และการทบทวนวรรณกรรม

2.1 มาตรฐานเกี่ยวกับการตรวจวัดและการทดสอบอุปกรณ์ของระบบราง

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานระบบตัวรถไฟ [1]

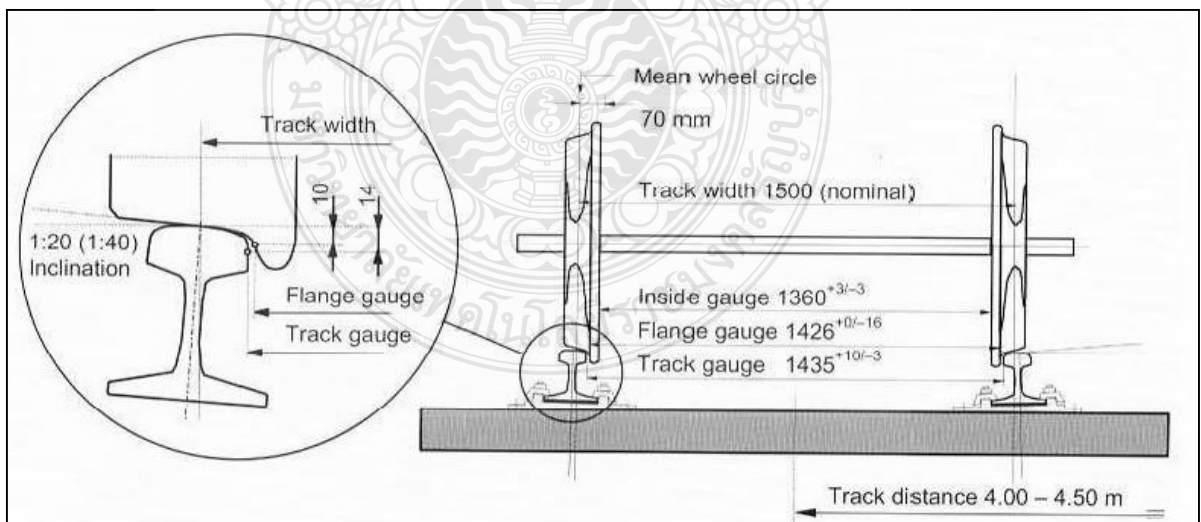
Standard	Description
EN 13103, EN 13104	Wheel, axles, axle boxes and wheelsets
EN 50153	Protective provision relation to electrical hazards
EN 50155	Electronic equipment used on rolling stock
EN 50343	Rules for installation of cabling
EN 61373	Shock and vibration testing
IEC 61133	Rules for testing of electric rolling stock on completion of construction and before entry into service (excluding weight balance)
IEC60349	Rules for rotation electrical machines for rail and road vehicles
UIC 505 – 1/5	Kinematic Envelope
UIC 518	Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior - Safety - Track fatigue - Ride quality
UIC 651	Layout of Driver's Cabs in Multiple Unit Trains
ISO 2631	Ride Quality

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับล้อรถไฟ

การออกแบบล้อรถไฟที่ใช้ในประเทศไทยนั้น จำเป็นต้องออกแบบโดยคำนึงถึงการ สัมผัสเทือนของล้อรถไฟโดยทั่วไป ที่เป็นผลจากการออกแบบล้อ ซึ่งแนวคิดที่วิศวกรออกแบบ สามารถสรรค์สร้าง และต่อเติมแนวคิดอื่น เพื่อให้เกิดความนุ่มนวล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบ ล้อและรางของขบวนรถโดยสารที่วิ่งด้วยความเร็วสูง มิติการออกแบบที่เกี่ยวข้องซึ่งวิศวกรสามารถ ไล่ความคิดริเริ่มใหม่ๆเข้าไป ได้แก่ มุมเอียงที่บังใบล้อ (Flange Slope) ความลาดเอียงที่พื้นล้อ (Slope on the wheel) การบิดเบี้ยวของตัวรถ (Twist on Vehicle) ระยะว่าง (Clearance) ระหว่างที่อุปกรณ์ใน ระบบรองรับน้ำหนักของขบวนรถไฟ ความสมบูรณ์ของระบบรองรับน้ำหนักและโช้คอัพ รูปร่างของ หัวราง รัศมีความโค้งของทางรถไฟ ความลาดเคลื่อนของมิติสำคัญของทางรถไฟ ซึ่งการออกแบบ ล้อที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ ล้อรีดทึบ (Monobloc wheel) และล้อมีปลอก (Tyred wheel)

2.2.1 องค์ประกอบของชุดล้อรถไฟ [2,3]

ล้อรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะประกอบด้วยล้อและเพลลาในกรณีเป็นแบบล้อรีดทึบ ส่วนล้อมี ปลอกจะมีส่วนประกอบมากกว่า ได้แก่ ปลอกล้อ แวนล้อ แหวนบังคับปลอกล้อและเพลลา

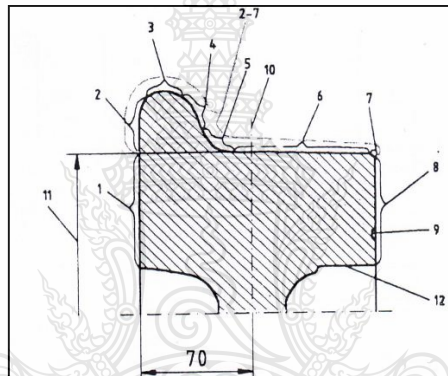


รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของชุดล้อรถไฟ [3]

2.2.2 ประเภทของล้อรถไฟ

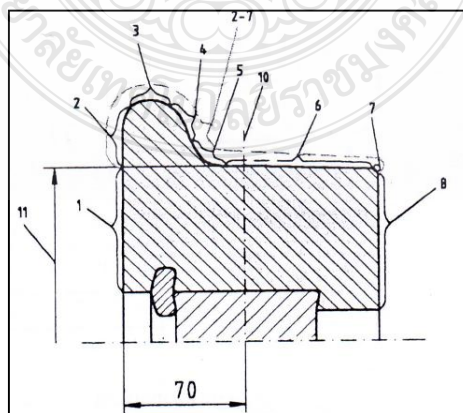
ล้อของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เมื่อใช้งานจะเกิดการสึกหรอและเปลี่ยนรูปไปจากเดิม ล้อที่ผ่านการใช้งานหากเกิดการสึกหรอ และเปลี่ยนรูปไปจากเดิมจะทำให้การถ่ายตัวผิดแปลกไปจากที่ออกแบบไว้ ผลก็คือทำให้ค่า Ride Index เปลี่ยนไปในทางลบ โดยผู้โดยสารจะรู้สึกไม่ค่อยสบาย และถ้าปล่อยให้การสึกเกินพิกัดไปมากก็อาจเป็นอันตรายต่อขบวนรถได้ เพื่อให้เกิดการสันตะเทือนกลับไปสู่สภาพตามที่ออกแบบไว้รถที่ผ่านการใช้งานไปแล้วระยะหนึ่งจึงต้องกลึงขึ้นรูปล้อเสียใหม่ให้มีสภาพเหมือนก่อนที่จะสึกหรอ

2.2.2.1 ล้อรีดทีบ (Monobloc wheel) มีส่วนประกอบคือ ล้อและเพลลา



รูปที่ 2.2 ล้อรีดทีบ (Monobloc wheel) [3]

2.2.2.2 ล้อมีปลอก (Tyred wheel) มีส่วนประกอบคือ ปลอกล้อ แวนล้อ แหวนบังคับ ปลอกล้อและเพลลา

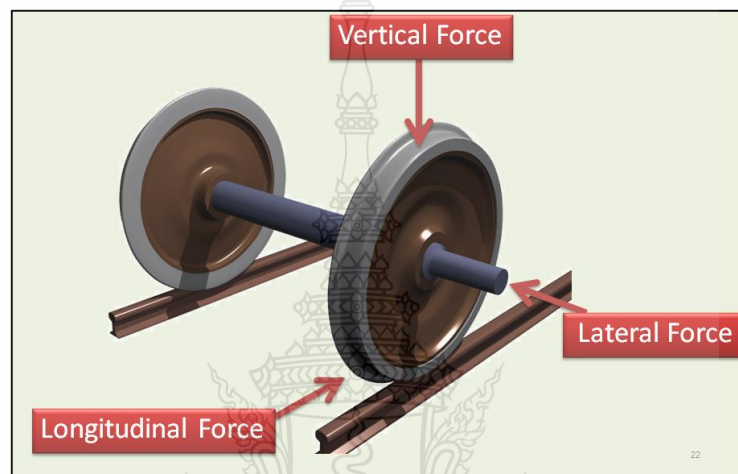


รูปที่ 2.3 ล้อมีปลอก (Tyred wheel) [3]

2.3 ลักษณะภาระโหลดที่กระทำต่อล้อ [4]

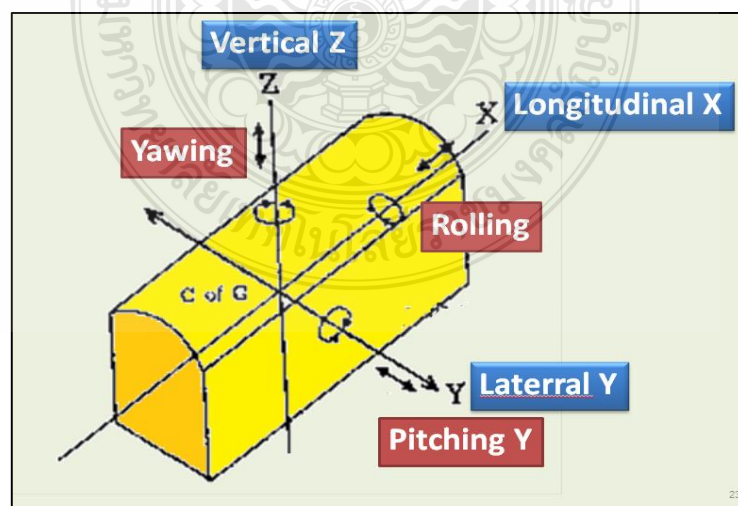
โดยทั่วไปลักษณะภาระโหลดที่กระทำต่อล้อรถไฟ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

- 1) Vertical Force คือแรงกระทำด้านบน ตั้งฉากกับทิศของการเคลื่อนที่
- 2) Lateral Force คือแรงกระทำด้านข้างของล้อรถไฟ
- 3) Longitudinal Force คือแรงกระทำตามทิศการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.4 ลักษณะภาระโหลดที่กระทำต่อล้อ [4]

2.4 นิยามของ Degree of Freedom ของรถไฟ [4]



รูปที่ 2.5 Degree of Freedom ของรถไฟ [4]

เมื่อล้อพร้อมเพลลาเซอร์ออกปทางด้านใด ล้อด้านนั้นก็จะวิ่งไปบนรางด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางที่โตกว่าล้อด้านตรงข้าม เป็นผลให้ล้อด้านนั้นวิ่งล้าหน้าไป เพลาล้อจึงส่ายออกหน้าจากแนวแกนที่ตั้งฉากกับรางรถไฟ ทำให้เกิดการบังคับทิศทางให้ล้อพร้อมเพลลาเคลื่อนที่กลับ (Self-Steering) ล้อด้านที่วิ่งด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางที่โตกว่าก็จะส่ายกลับเอาแกนด้านตรงข้าม นำหน้าใหม่ สลับกันไปเช่นนี้ ผลก็คือเกิดการเคลื่อนที่ของล้อพร้อมเพลลาในลักษณะงูเลื้อยดังกล่าวแล้ว ถ้าความถี่ในการส่ายแบบงูเลื้อยของล้อพร้อมเพลลาหน้าและหลังไม่ทับรอย กัน (Out of phase) เท่ากับ 180° พอดี ตัวรถด้านหน้าและด้านหลังก็จะส่ายไปคนละด้าน ทำให้เกิดการส่ายของตัวรถรอบแกน Z หรือที่เรียกว่า Hunting การส่ายของเพลาล้อหน้าและหลังอาจจะไม่ทับรอยกัน 180° พอดี ซึ่งจะทำให้ศูนย์กลางของการส่าย (Center of Gravity: CG) เคลื่อนออกทางด้านข้างในแนวแกน Y เรียกว่าการไกว หรือ Swaying และในทำนองเดียวกัน ถ้าการยุบตัวของสปริงรับน้ำหนักที่ล้อแต่ละด้านสั้นไม่ทับรอยกัน (Out phase) ก็จะทำให้ CG ของตัวรถเด่นขึ้นลงในแนวแกน Z หรือที่เรียกว่า Bouncing ส่วนการกระดกหน้ากระดกหลังรอบแกน Y ที่เรียกว่า Yawing หรือ Pitching จะเกิดจากการยุบตัวของสปริงรับน้ำหนักที่ไม่ทับรอยกัน 180° การสั่นสะเทือนประเภทสุดท้ายคือ การกระตุกในแนวแกน X หรือที่เรียกว่า Fore & Aft เกิดจากผลของ Gyroscopic อันเนื่องมาจากล้อพร้อมเพลลาที่มีน้ำหนักเป็นต้นหมุนรอบเพลลาซึ่งส่ายไปมา ในขณะที่ล้อเคลื่อนที่ไปตามแนวรางรถไฟ นอกจากนั้นหากล้อรถไฟมีน้ำหนักไม่สมดุล ก็อาจจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบนี้มากยิ่งขึ้น รถไฟที่วิ่งเร็วกว่า 160 กม/ชม. จึงต้องถ่วงล้อเหมือนรถยนต์เพื่อลดการกระตุกลง การสั่นสะเทือนของรถไฟในสภาพที่เป็นจริง จะเกิดจากการผสมผสานของการสั่นสะเทือนทั้ง 6 แนวแกนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน นอกจากนั้น หากมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นบนรางรถไฟ เช่น รางยุบตัวหรือเมื่อรถวิ่งผ่านประแจ ความผิดปกติเหล่านี้ก็จะกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงยิ่งขึ้น และการสั่นสะเทือนนี้ก็จะส่งผลตั้งแต่ทำให้ล้อและรางสึก ทำให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สบาย ไปจนถึงการที่รุนแรงมากจนถึงเป็นเหตุให้รถไฟตกรางได้

2.5 สาเหตุของการตกรางของรถไฟ

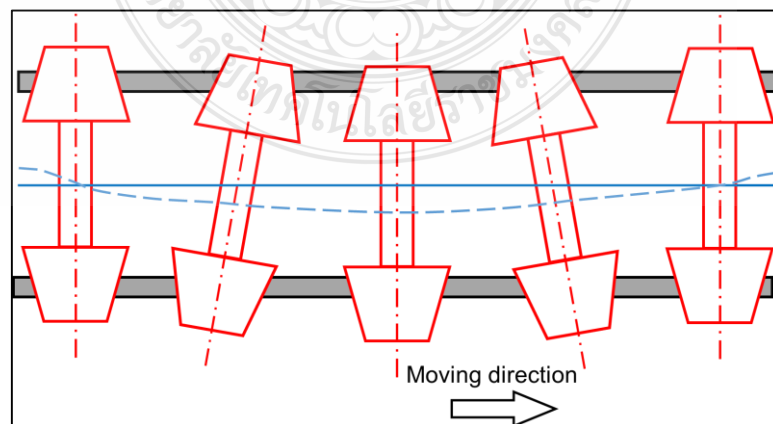
โดยทั่วไปรถไฟจะต่อกันแบบขบวนและเคลื่อนที่ด้วยหัวรถจักรเป็นตัวลากจูง หรือการใช้เครื่องยนต์ภายในขบวนรถไฟเองเป็นตัวขับเคลื่อนอย่างไรก็ตามการตกรางของรถไฟก็เป็นปัญหาที่

สำคัญอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้บริการและสร้างความเสียหายแก่รถไฟและโครงสร้างอื่นๆอีกด้วย อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่ออื่นๆ เช่น การเสียเวลาการทำงานบวกลดไป การเสียโอกาสด้านธุรกิจการขนส่งและบริการ การเสียงบประมาณจากการซ่อมบำรุงทั้งรถไฟและโครงสร้าง เป็นต้น โดยสาเหตุของการตรวจของรถไฟมีดังนี้ [5]

- 1) การใช้ความเร็วที่มากเกินไป ในบริเวณทางโค้ง หรือประแจสับราง ซึ่งทำให้เกิดแรงเหวี่ยง
- 2) การลดความเร็วกะทันหัน ซึ่งทำให้ขบวนรถไฟเสียสมดุลในการชะลอความเร็ว ทำให้ล้อป็นรางได้
- 3) อุปกรณ์เสียหาย/ขัดข้อง เช่น ปดล็อกล้อแตก บังใบล้อแตก การสับเปลี่ยนประแจขณะทำงานผ่าน ทางรถไฟมีการชำรุด อากาศที่ร้อนทำให้รางขยายตัว เป็นต้น
- 4) อุบัติเหตุจากการใช้ทางตัดผ่าน ทางร่วมของรถยนต์ หรือมีสัตว์เข้ามาในทางรถไฟ

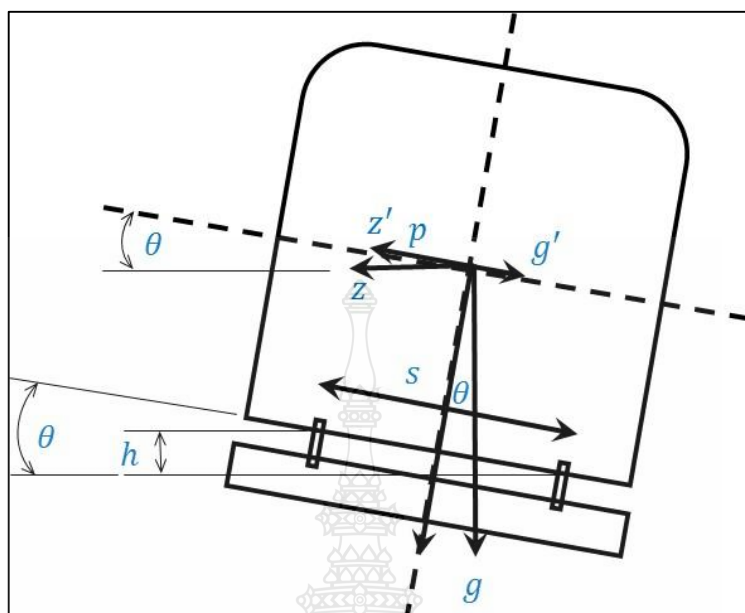
2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรถไฟ [6]

โดยทั่วไปล้อรถไฟจะมีลักษณะเป็นกรวยเพื่อช่วยให้รถไฟวิ่งบนรางได้อย่างสมดุลและมีบังใบล้อเพื่อป้องกันรถไฟตกราง แต่จากลักษณะดังกล่าวทำให้ชุดเพลาล้อรถไฟมีการส่ายตัวในการปรับสมดุล ดังรูปที่ 2.7 ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างจากการวิ่งของรถไฟในทางตรงและในทางโค้งนั้นมีความแตกต่างของแรงกระทำด้านข้างที่เปลี่ยนไป มีตัวแปรหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การยกโค้งทางรถไฟ ความเร็วการเข้าโค้ง แรงหนีศูนย์กลางในขณะที่รถไฟเข้าโค้ง แรงเสียดทานระหว่างล้อและราง เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรถไฟ [6]

2.7 การเข้าโค้งของรถไฟ [2,7,8]



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเข้าโค้งของรถไฟและตัวแปรสำหรับการคำนวณ [7,8]

p = ความเร่งลัพท์ในแนวนานกับพื้นรถ (m/s^2)

z = ความเร่งหนีศูนย์กลาง หรือความเร่งด้านข้าง (m/s^2)

v = ความเร็วขบวนรถ (km/hr)

R = รัศมีโค้ง (m)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

h = ค่ายกโค้ง (mm)

s = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางกลางของราง 2 เส้น

$s = 1,060$ mm. (ราง 80 ปอนด์)

จากรูปที่ 2.8 จะได้ว่า [8]

$$p = z' - g' \tag{2.1}$$

$$z' = v^2/R = z \cos \theta \approx z \tag{2.2}$$

$$g' = g \sin \theta = gh/s \tag{2.3}$$

ดังนั้น

$$p = v^2/R - gh/s \tag{2.4}$$

การยกโค้งให้ได้ผลดีที่สุดคือ $p = 0$, จะได้

$$v^2/R = gh/s \quad (2.5)$$

แทนค่า g, s และแปลงหน่วยจะได้

$$h = 8.338 v^2/R \quad (2.6)$$

เพื่อความสบายสบายของผู้โดยสารการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ได้กำหนด $p = 0.46 \text{ m/s}^2$ จะได้

$$h_{min} = (8.338 v^2/R) - 50 \quad (2.7)$$

และ

$$h_{max} \leq 90 \quad (2.8)$$

แต่เงื่อนไขการยกโค้งจริงคือ

- 1) ความเร็วของรถไฟที่วิ่งผ่านโค้งแต่ละขบวนนั้นต่างกัน
- 2) รฟท. ใช้ค่า $2/3h$ และเพื่อความเร็วยุคของรถไฟที่วิ่งผ่านอีก 5 km/hr

ดังนั้นจะได้

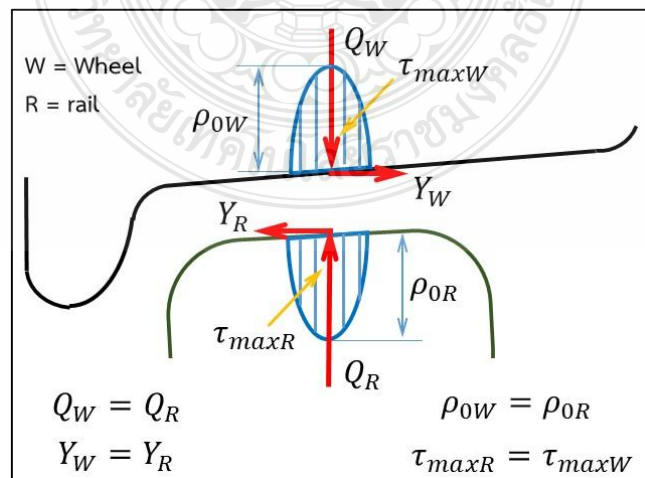
$$h = 5.5587(v_{max} + 5)^2/R \quad (2.9)$$

และความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ผ่านโค้งคือ

$$v_{max} = [(h + 50)R/8.338]^{1/2} \quad (2.10)$$

2.8 ลักษณะแรงกระทำต่อล้อและราง [9]

2.8.1 ลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับราง

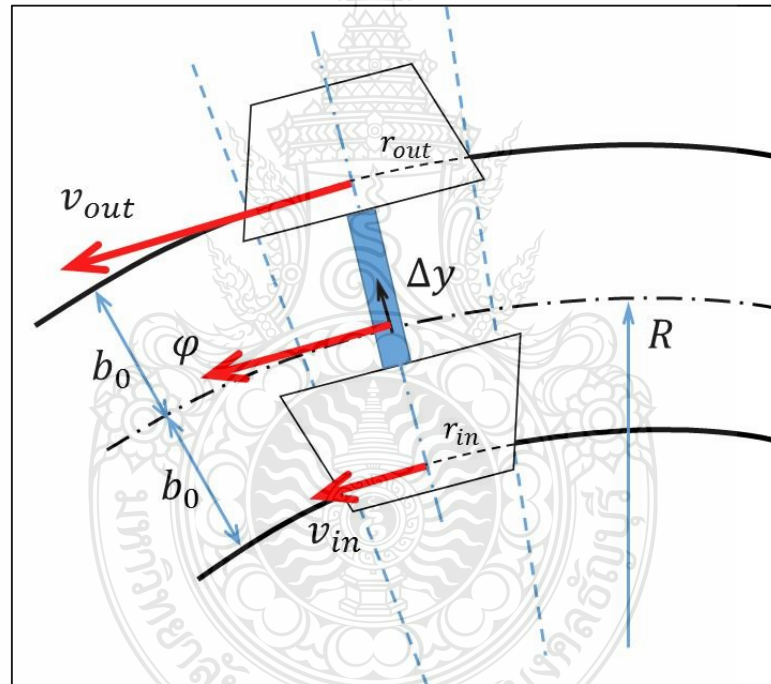


รูปที่ 2.8 ลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางในทางตรง [9]

โดยทั่วไปการวิ่งในทางตรงของรถไฟ การเคลื่อนที่ของล้อและเพลามีลักษณะเหมือนการเคลื่อนที่ของงูเมื่อเทียบกับรางรถไฟ และลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางจะเป็นเหมือนภาพที่สะท้อนของกระจก ซึ่งจากรูปที่ 2.9 แรง Q คือแรงกระทำในแนวตั้งซึ่งเกิดจากน้ำหนักจากการบรรทุก/โดยสารและน้ำหนักจากโบกี้รถไฟ ที่ถูกถ่ายเทน้ำหนักจากล้อสู่รางรถไฟ และแรง Y คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นจากทั้งในการวิ่งของรถไฟบนทางตรงและทางโค้ง

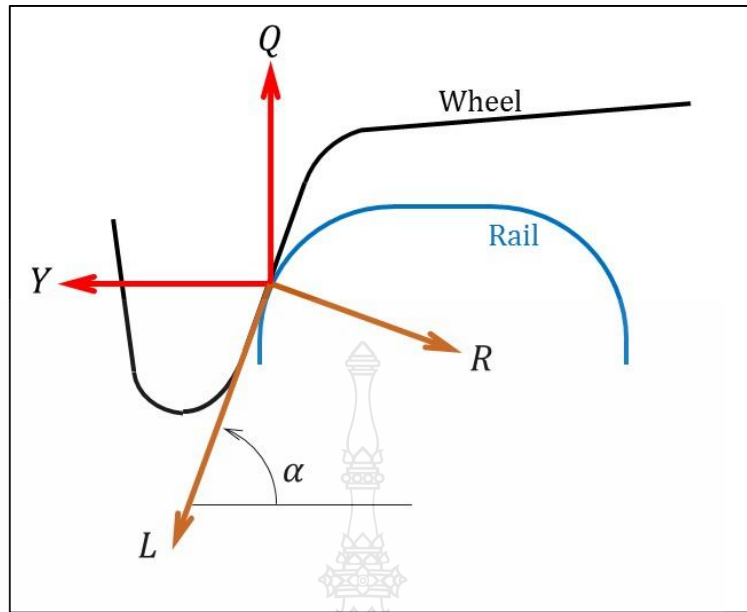
2.8.2 สมการการคำนวณแรงที่ล้อรถไฟของขนาด [10-13]

การวิ่งของรถไฟในทางโค้ง ล้อและเพลามีลักษณะเบี่ยงเบนไปโดยที่ล้อบริเวณขอบรัศมีเล็กจะสัมผัสกับรางในที่มีรัศมีแคบ และล้อบริเวณขอบรัศมีใหญ่จะสัมผัสกับรางนอกที่มีรัศมีกว้างดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ลักษณะเบี่ยงเบนของล้อและเพลานในทางโค้ง [10]

แต่ในการวิ่งของรถไฟในทางโค้งที่มีการยกโค้ง ล้อและเพลามีลักษณะเบี่ยงเบนที่ต่างออกไปซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น ความสูงของการยกโค้ง ความเร็วของรถไฟขณะเข้าโค้ง น้ำหนักของรถไฟ เป็นต้น การเข้าโค้งของรถไฟนี้ทำให้เกิดการป็นรางของล้อรถไฟ โดยมีลักษณะคือบังใบของล้อรถไฟสัมผัสกับรางรถไฟ และมีการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นโดย “สูตรของขนาด” ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 จุดสัมผัสของล้อรถไฟกับรางรถไฟในทางโค้ง [12]

สูตรของนาตาลเป็นสมการในการออกแบบรถไฟ ที่เกี่ยวข้องกับแรง กระทำต่อ ล้อและ โบกี้รถไฟ เมื่อรถไฟมีแรงมากกระทำกับตัวล้อและโบกี้ จะส่งผลให้ตัวรถเกิดการเซ แรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะพิจารณาได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ แรงด้านบน แรงด้านข้าง และแรงตามแนวการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถพิจารณาจุดสัมผัสได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

ใน สมการนี้ Y และ Q หมายถึง แรงด้านข้างและแรงด้านบนที่กระทำต่อล้อและราง α คือมุมกระทำเมื่อหน้าแปลนล้อที่อยู่ติดกับบัง โบล้อและ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางรถไฟ

จะคำนวณได้จากสมการ

$$Y = L \cos \alpha - R \sin \alpha \quad (2.11)$$

และ

$$-Q = L \sin \alpha + R \cos \alpha \quad (2.12)$$

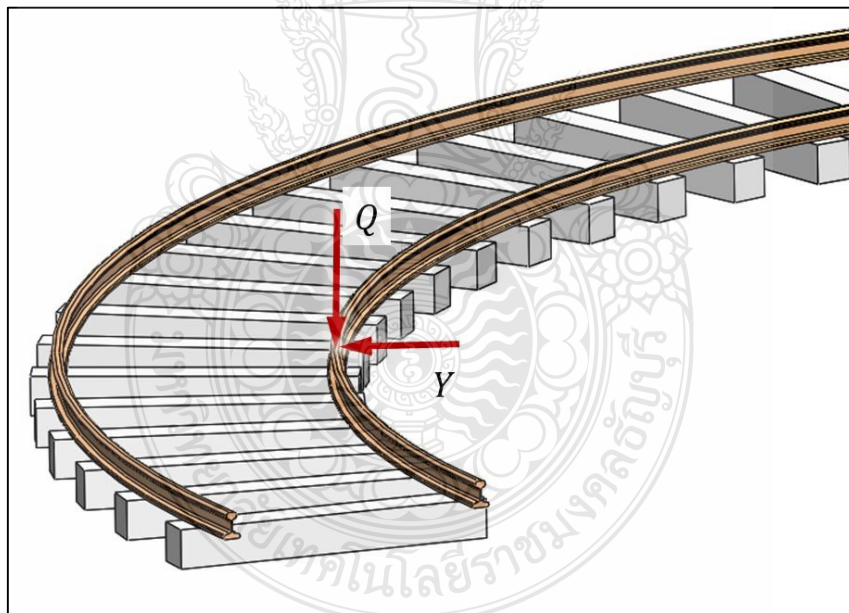
เนื่องจาก $L = \mu R$ จะได้

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (2.13)$$

2.9 การประเมินตัวแปรของความเสี่ยงต่อการตกราง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.12 การประเมินความเสี่ยงต่อการตกรางของรถไฟเมื่อเข้าโค้งนั้นจะเห็นได้ว่า มีแรงกระทำหลักมาจาก 2 ส่วน คือ 1) แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของรถไฟและน้ำหนักบรรทุก และ 2) แรงกระทำด้านข้าง (Y) ที่เกิดขึ้นในการวิ่งของรถไฟในทางโค้ง ซึ่งตามมาตรฐาน UIC 518 ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ [14] ในทางตรง Y/Q ต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 ซึ่งในปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มาตรฐานการวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้ จึงเป็นข้อเสียเปรียบในการทำความเร็วในขณะที่เข้าโค้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วการเข้าโค้งของรถไฟอีกด้วย

โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อชุดเพลาล้อรถไฟในขณะที่รถไฟเข้าโค้งเท่านั้น ส่วนแรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ต่อชุดเพลาล้อรถไฟได้มีการนำเสนอวิธีการวัดโดยทั่วไปจึงจะไม่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

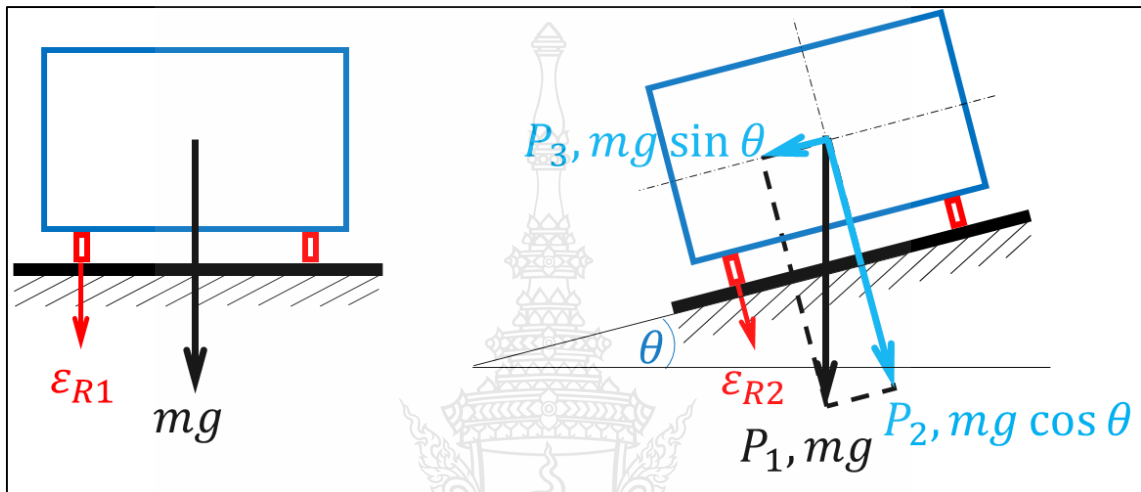


รูปที่ 2.11 แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) และแรงกระทำด้านข้าง (Y) ในขณะที่รถไฟเข้าโค้ง

2.10 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการหาค่าแรงกระทำด้านข้างและการคำนวณ [15]

2.10.1 การหาแรงกระทำด้านข้างโดยอาศัยทฤษฎีการแตกแรง

เมื่อเกิดเหตุที่ทำให้รถไฟหยุดนิ่งในระหว่างทางที่มีการยกโค้งของทางรถไฟ ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างที่ชุดเพลาล้อรถไฟ ดังในรูปที่ 2.12 และสามารถหาแรงกระทำด้านข้างได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางจากน้ำหนักรถไฟ

จากรูปที่ 2.12 จะได้

$$P_1^2 = P_2^2 + P_3^2 \quad (2.14)$$

$$P_3^2 = P_1^2 - P_2^2 \quad (2.15)$$

โดยที่

$$P_1 = mg \quad (2.16)$$

$$P_2 = mg \cos \theta \quad (2.17)$$

$$P_3 = mg \sin \theta \quad (2.18)$$

จะได้

$$(mg \sin \theta)^2 = (mg)^2 - (mg \cos \theta)^2 \quad (2.19)$$

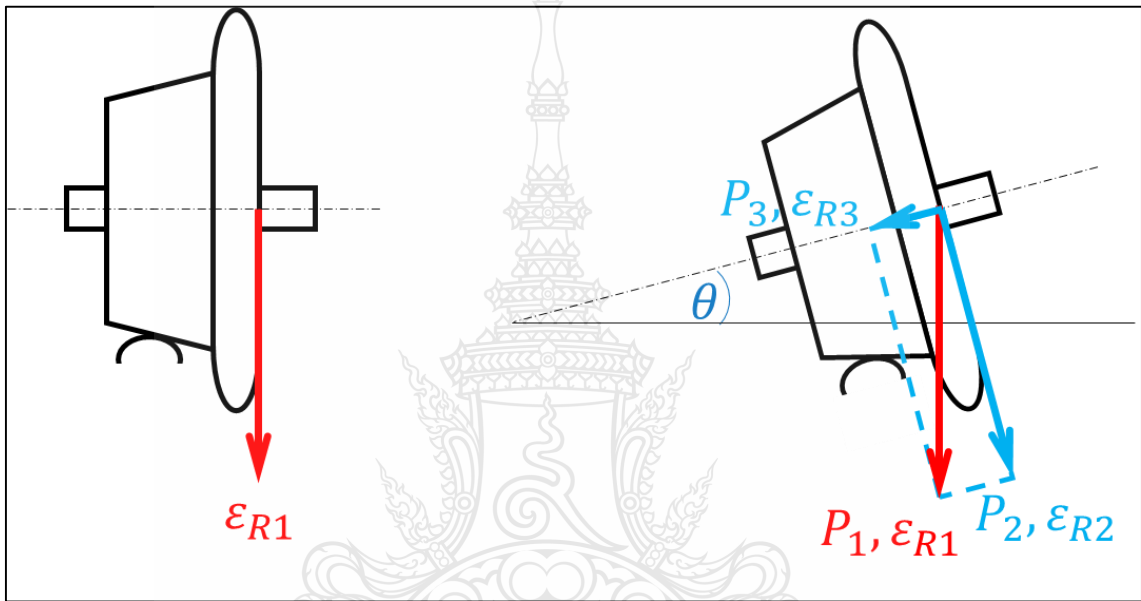
$$mg \sin \theta = \sqrt{(mg)^2 - (mg \cos \theta)^2} \quad (2.20)$$

โดยที่ $mg \sin \theta$ คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น

2.10.2 การแปลงค่าความเครียดเป็นแรงกระทำ

เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ วัสดุจะเกิดความเครียดภายในตัวเองทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามทิศทางของแรง โดยนิยามได้คือ

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.13 ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างสื่และราง

จากรูปที่ 2.13 สามารถหาแรงกระทำด้านข้างจากความเครียดได้จากน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากตัวรถไฟทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างสื่และรางของรถไฟ โดยที่แรงกระทำเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความเครียด

$$\frac{P}{\varepsilon} = \frac{P_1}{\varepsilon_1} = \frac{P_2}{\varepsilon_2} = \frac{P_3}{\varepsilon_3} \quad (2.22)$$

เมื่อพิจารณาบริเวณสื่และราง สามารถหาความเครียดของแรงกระทำด้านข้างได้ ดังในรูปที่ 2.13 ดังนี้

$$\varepsilon_{R1}^2 = \varepsilon_{R2}^2 + \varepsilon_{R3}^2 \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{R3} = \sqrt{\varepsilon_{R1}^2 - \varepsilon_{R2}^2} \quad (2.24)$$

แทนสมการที่ 2.24 ลงในสมการที่ 2.22 $\left(\frac{P_2}{\epsilon_2} = \frac{P_3}{\epsilon_3}\right)$ จะได้

$$\frac{P_2}{\epsilon_{R2}} = \frac{P_3}{\sqrt{\epsilon_{R1}^2 - \epsilon_{R2}^2}} \quad (2.25)$$

$$P_3 = \frac{P_2 \times \sqrt{\epsilon_{R1}^2 - \epsilon_{R2}^2}}{\epsilon_{R2}} \quad (2.26)$$

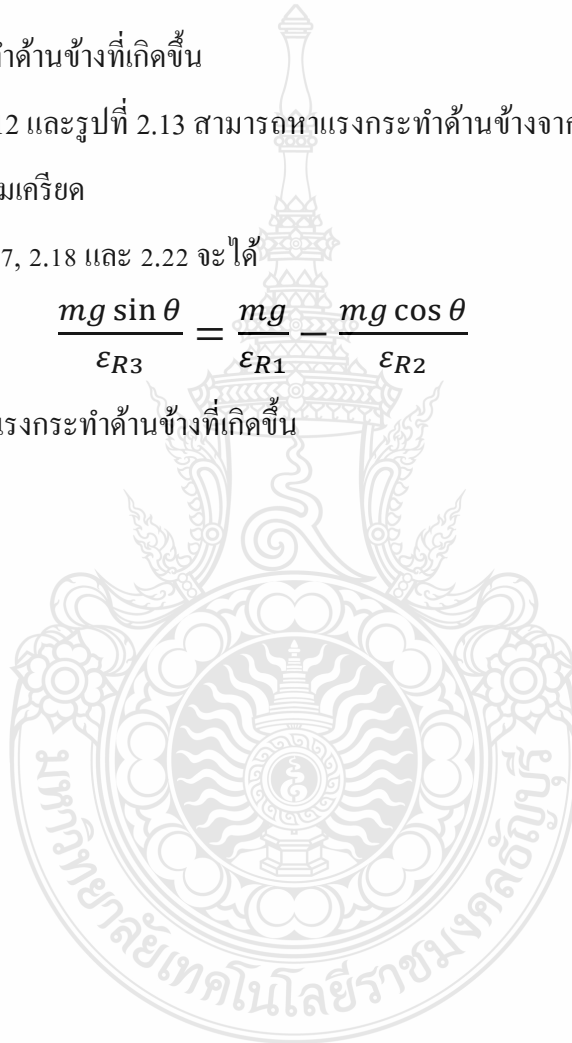
โดยที่ P_3 คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 สามารถหาแรงกระทำด้านข้างจากความเครียดได้จากสัดส่วนของแรงกระทำต่อความเครียด

จากสมการที่ 2.16, 2.17, 2.18 และ 2.22 จะได้

$$\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R3}} = \frac{mg}{\epsilon_{R1}} = \frac{mg \cos \theta}{\epsilon_{R2}} \quad (2.27)$$

โดยที่ $\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R3}}$ คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น



2.11 ทบทวนวรรณกรรม

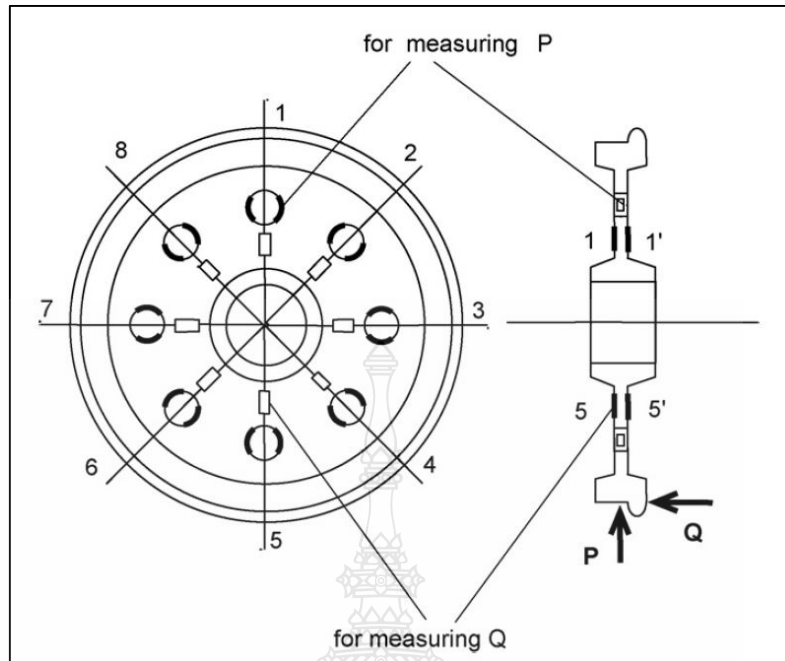
ในการประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ การวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่จุดเพลาล้อรถไฟถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการวัดและวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้าง โดยปกติการประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ จะเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยระหว่างและแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อ แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าว (Y/Q) ของการวิ่งของรถไฟในทางตรงต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 โดยมีวรรณกรรมในส่วนที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังนี้

2.11.1 Akira Matsumoto และคณะ (2008) [16]: A new measuring method of wheel–rail contact forces and related considerations (วิธีการวัดใหม่ของแรงที่สัมผัสกับล้อ/ราง และข้อควรพิจารณาที่เกี่ยวข้อง)

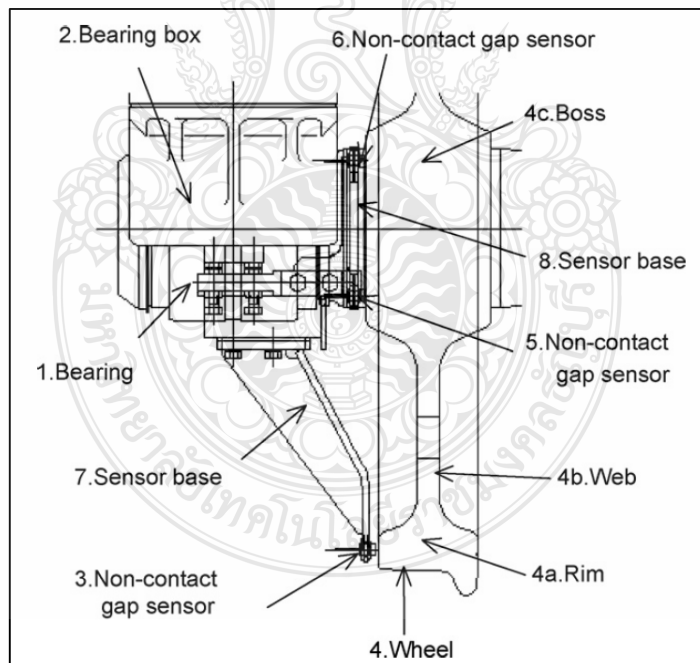
อุบัติเหตุการตกรางของรถไฟและความผิดปกติของชิ้นส่วนในรถไฟมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง ซึ่งจะมีแรงกระทำที่เกิดขึ้น แบ่งเป็นแรงในแนวตั้ง แรงตามแนวรางและแรงกระทำด้านข้าง โดยเกณฑ์ความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟนั้นจะใช้สัดส่วนของแรงกระทำด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวตั้ง

จากความสำคัญของสัดส่วนความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟทำให้มีการศึกษาวิธีการวัดแรงกระทำใหม่ที่เกิดขึ้น โดยวิธีการใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส วัดระยะการโก่งตัวของล้อรถไฟและหาแรงกลับมาเทียบกับวิธีการวัดแรงกระทำแบบความเครียด โดยการวัดแรงกระทำแบบความเครียด จะเป็นวิธีการวัดแรงกระทำโดยใช้สเตรนเกจวัดความเครียดที่รูล้อรถไฟเพื่อหาแรงกระทำในแนวตั้ง และใช้สเตรนเกจติดที่บริเวณจานของล้อรถไฟทั้งสองฝั่งเพื่อวัดความเครียดที่ต่างกันของล้อรถไฟที่มีการโก่งตัวเพื่อหาแรงกระทำด้านข้าง

จากการโก่งตัวของรถไฟจึงมีแนวคิดการใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส วัดการโก่งตัวที่บริเวณขอบล้อรถไฟ ข้อดีจากวิธีการวัดใหม่นี้ จะไม่มีการเจาะรูที่ล้อรถไฟและยังสามารถติดตั้งกับรถไฟที่ใช้โดยทั่วไปได้ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คืออุปกรณ์ไม่สามารถติดตั้งในระยะยาวได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอุปกรณ์เป็นเซนเซอร์ที่มีความเปราะบาง ไม่สามารถทนต่อความชื้นและสิ่งสกปรกได้มากนัก



รูปที่ 2.14 วิธีการหาแรงกระทำแบบความเค้น โดยการใช้ติดตั้งสเตรนเกจ



รูปที่ 2.15 วิธีการหาแรงกระทำแบบการโก่งตัวของล้อรถไฟ โดยการติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส

2.11.2 Akira Matsumoto และคณะ (2006) [17]: A New Monitoring Method of Train Derailment Coefficient (วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การตกรางรถไฟใหม่)

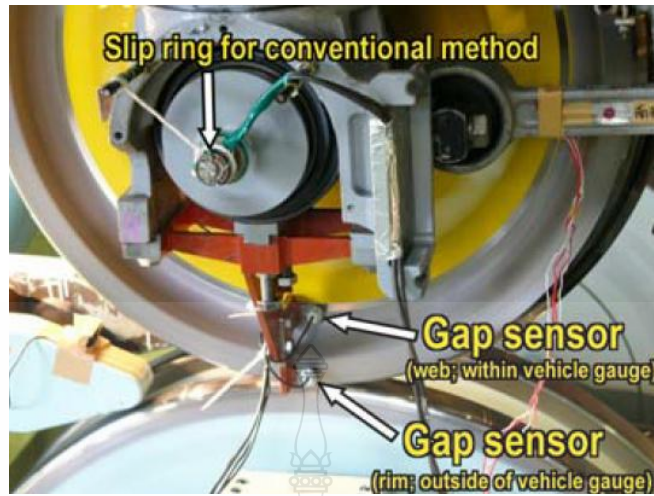
การวัดแรงกระทำระหว่างล้อและรางมีผลต่อการตกรางของรถไฟ สัมประสิทธิ์การตกรางของรถไฟและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อและรางเป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณา สองวิธีการวัดแรงกระทำใหม่นี้ คือ

1) การวัดแรงกระทำที่ชุดเพลาล้อรถไฟโดยใช้วิธีการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส วัดการโก่งตัวของล้อรถไฟและเทียบกลับมาเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการวัดแรงกระทำแบบความเครียด วิธีการวัดแรงกระทำที่ชุดเพลาล้อรถไฟนี้ มีความต่อเนื่องในการวัดมีประสิทธิภาพในการติดตามการซ่อมบำรุงที่ทันเหตุการณ์ และยังทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การตกรางของรถไฟและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางอีกด้วย

2) การวัดแรงกระทำที่รางรถไฟ เป็นการวัดแรงกระทำในแนวดิ่งและแรงกระทำด้านข้าง โดยการติดตั้งสเตรนเกจ เพื่อวัดความเครียดจากรางรถไฟและแปลงกลับมาเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้น วิธีการวัดแรงกระทำที่รางรถไฟนี้ จะเป็นการวัดที่จุดนั้นๆ ค่าที่ได้จากการวัดมีความแม่นยำมากแต่เนื่องจากลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายงูเลื้อยของรถไฟจึงต้องทำการวัดหลายจุดเพื่อความต่อเนื่องในการวัดแรงกระทำ



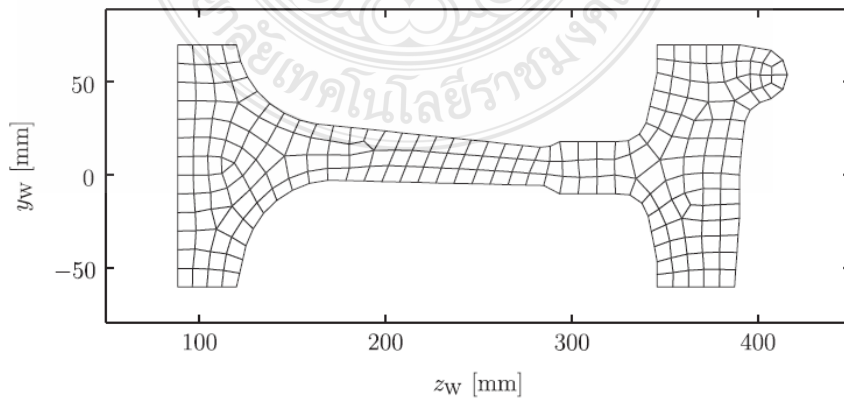
รูปที่ 2.16 ชุดทดสอบการหาแรงกระทำแบบความเครียด



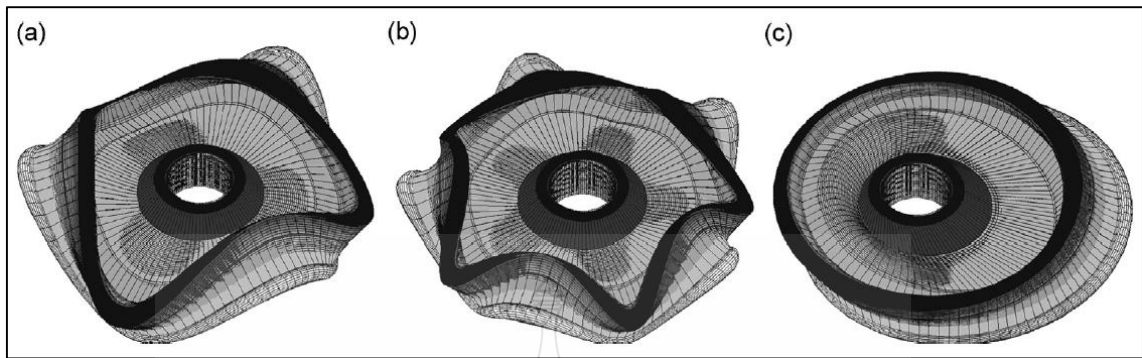
รูปที่ 2.17 ชุดทดสอบการหาแรงกระทำแบบเซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัส

2.11.3 A.Pieringer (2014) [18]: A numerical investigation of curve squeal in the case of constant wheel/rail friction (การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการเข้าโค้งรถไฟในกรณีของแรงเสียดทานระหว่างล้อและรางมีค่าคงที่)

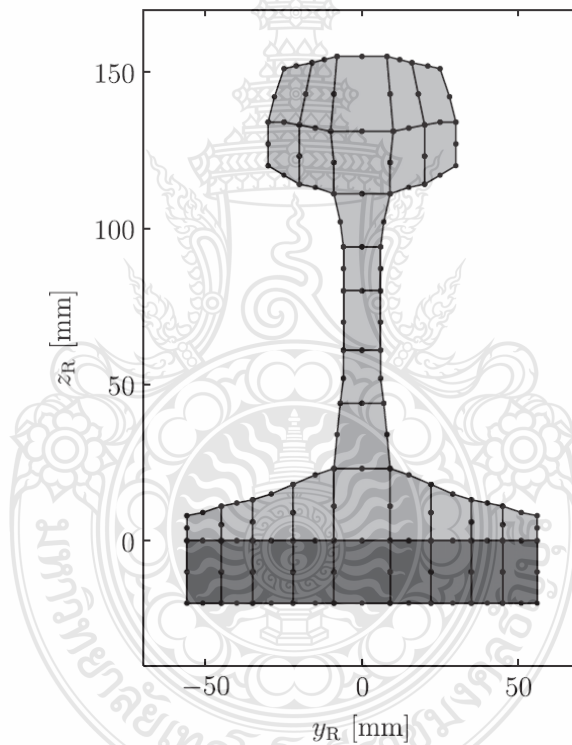
การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของล้อและรางในขณะที่รถไฟมีการเคลื่อนที่นั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งที่จะช่วยป้องกันอันตรายจากอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นกับรถไฟได้ โดยบทความนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างล้อและรางโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและมีการแบ่งหน่วยย่อยของชิ้นงาน (Finite element method) เพื่อช่วยทำการศึกษา ซึ่งมีหลายตัวแปรในการจำลองการศึกษาเช่น การเคลื่อนที่ระหว่างล้อและราง ความถี่ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง ลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น



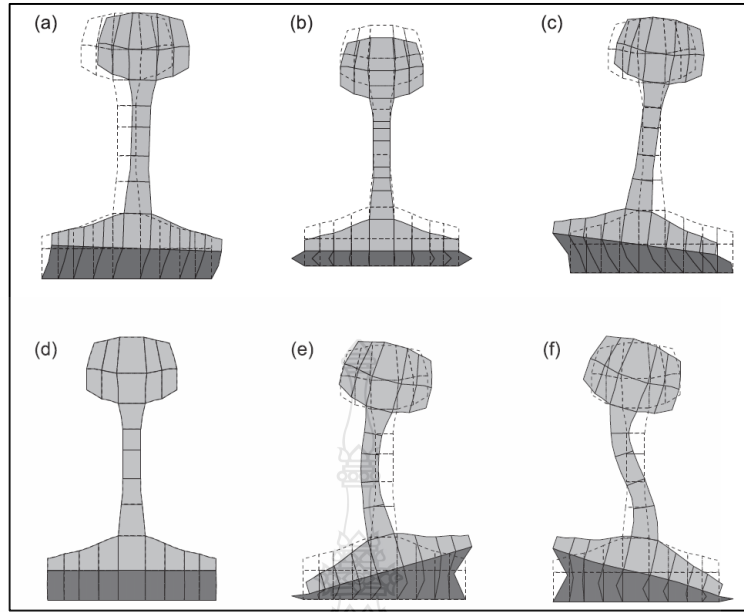
รูปที่ 2.18 หน้าตัดลักษณะและการแบ่งหน่วยย่อยของล้อรถไฟ



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของต้อรูปไฟ



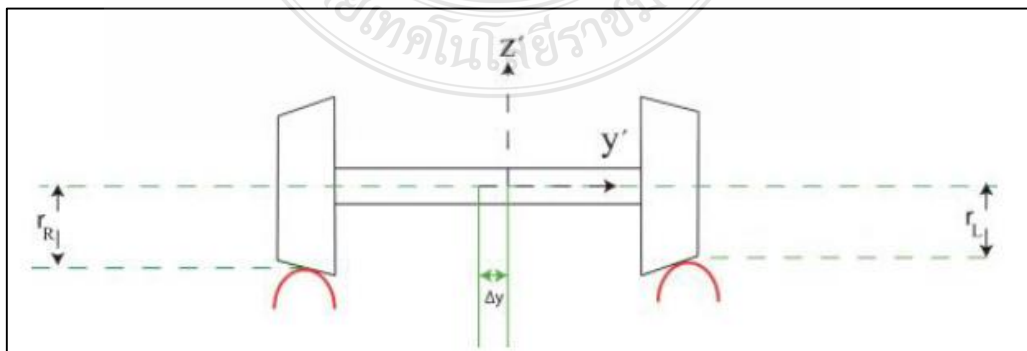
รูปที่ 2.20 หน้าตัดลักษณะและการแบ่งหน่วยย่อยของรางรถไฟ



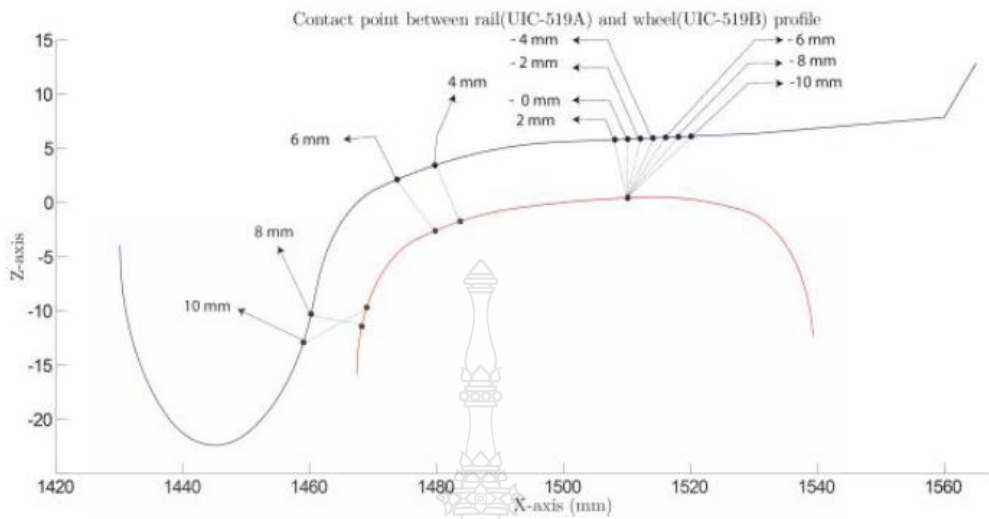
รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรางรถไฟ

2.11.4 Bikiron Hazarika และ Monsak Pimsarn (2016) [19]: A simple contact point finding algorithm for determination of contact parameters (วิธีหาจุดสัมผัสแบบง่ายสำหรับการหาค่าตัวแปรสัมผัส)

การศึกษาการสัมผัสของล้อและรางมีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟ ตำแหน่งการสัมผัสและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง มีผลต่อความสมดุลของการวิ่งของรถไฟ การหาจุดสัมผัสจะเป็นแบบ 2 มิติ โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาคือ ความต่างของรัศมีล้อรถไฟ องศาของชุดเพลาล้อรถไฟ ที่กระทำกับรางรถไฟ ลักษณะรูปร่างของล้อและรางชนิดต่างๆ ระยะห่างของรูปร่างระหว่างล้อและรางในแนวตั้ง เป็นต้น



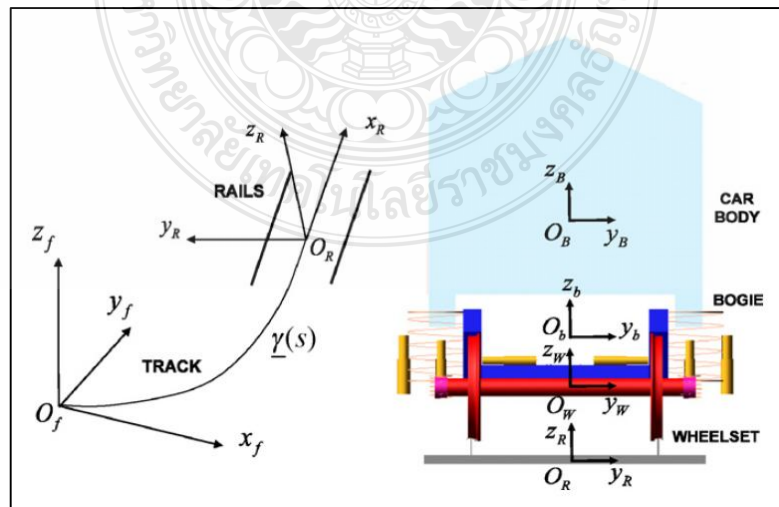
รูปที่ 2.22 ระยะห่างในแนวตั้งของชุดเพลาล้อและแนวราง



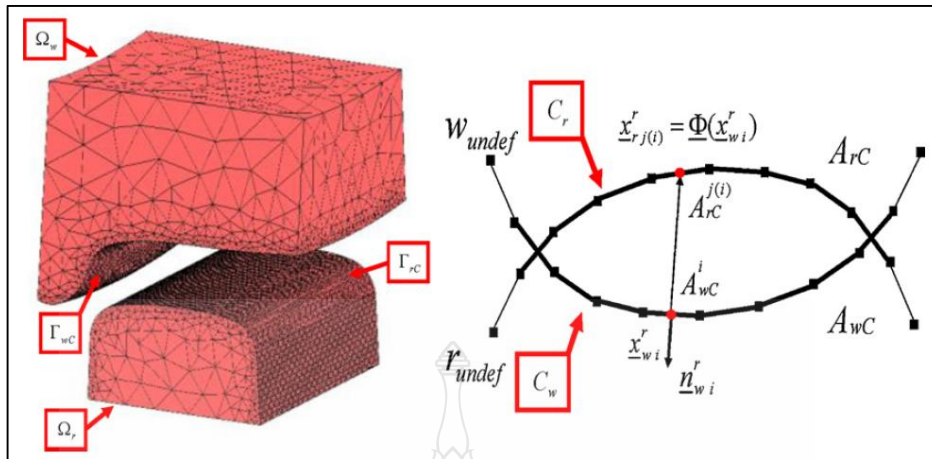
รูปที่ 2.23 ตำแหน่งการสัมผัสระหว่างล้อและราง

2.11.5 Silvia Magheri และคณะ (2011) [20]: An innovative wheel–rail contact model for multibody applications (การปรับปรุงรูปแบบการสัมผัสระหว่างล้อและรางสำหรับการประยุกต์ใช้ได้หลากหลายตัวรถ)

ในการสัมผัสระหว่างล้อและราง มีการพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นแบบยืดหยุ่น โดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม Matlab/Simulink และใช้การแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของสมการความยืดหยุ่นของนาเวียร์ เพื่อสร้างแบบจำลองชุดลากเลื่อนที่สามารถเชื่อมต่อกับโบกี้ได้หลายประเภท



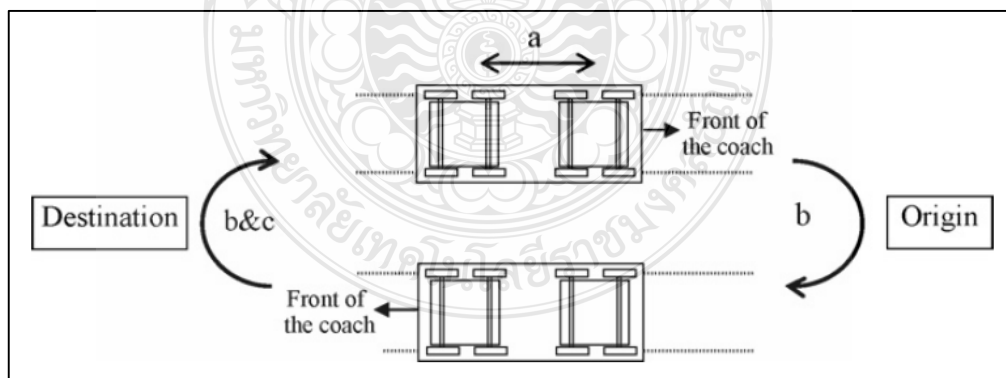
รูปที่ 2.24 ระบบอ้างอิงที่เกี่ยวข้องของตัวรถ



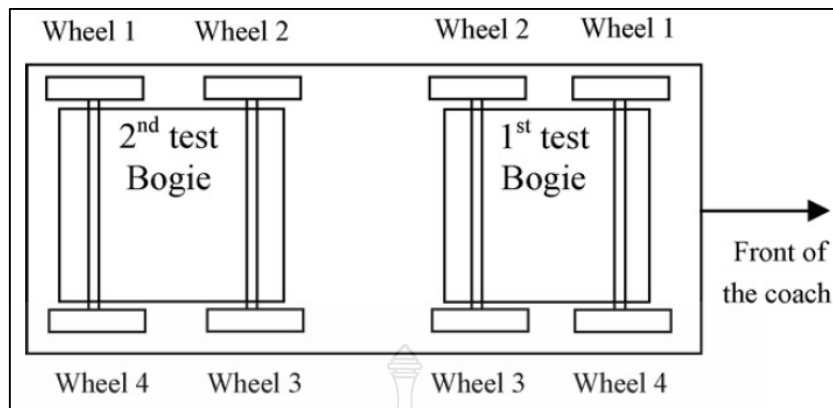
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างล้อและรางโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.11.6 Ali Asadi Lari และ Ajay Kapoor (2008) [21]: An investigation to the influence of bogie direction reversal on equalizing rail vehicle wheel wear (การตรวจสอบการกลับทิศทางของโบกี้ในล้อของรถไฟ)

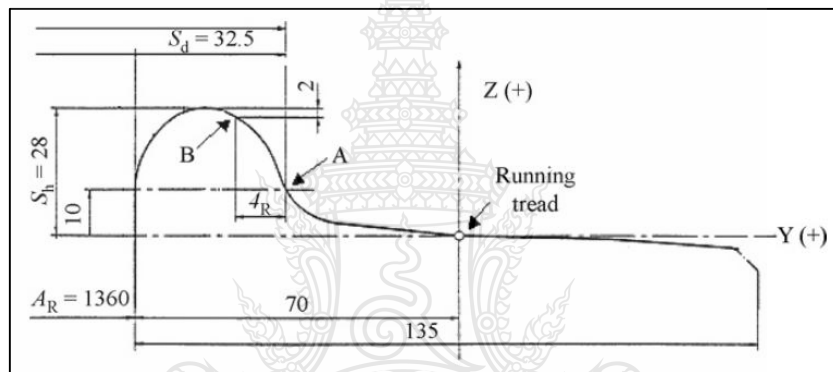
ทิศทางการใช้งานของโบกี้รถไฟจะเป็นแบบสองทิศทางการใช้งานที่เท่าๆกัน แต่ในบทความนี้จะพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นหากมีการใช้โบกี้ในทิศทางการใช้งานเดียว โดยการกลับทิศทางของโบกี้ ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นคือ ความลาดเอียงและความหนาของขอบล้อรถไฟจะลดลงหลังผ่านการใช้งาน



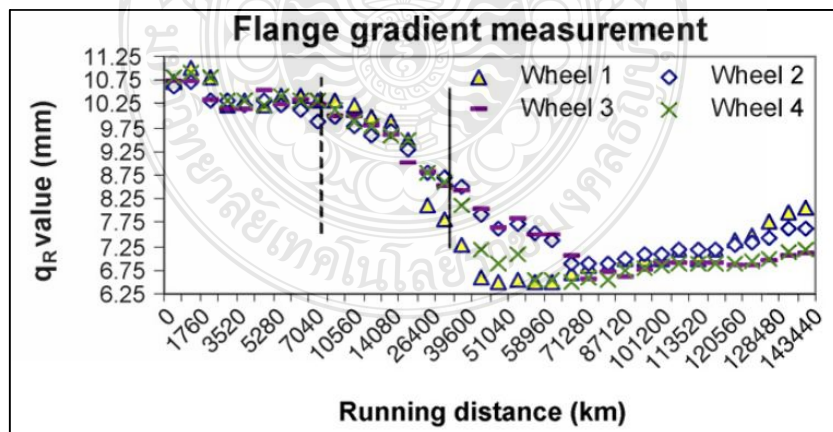
รูปที่ 2.26 การกลับทิศทางการใช้งานของโบกี้รถไฟ



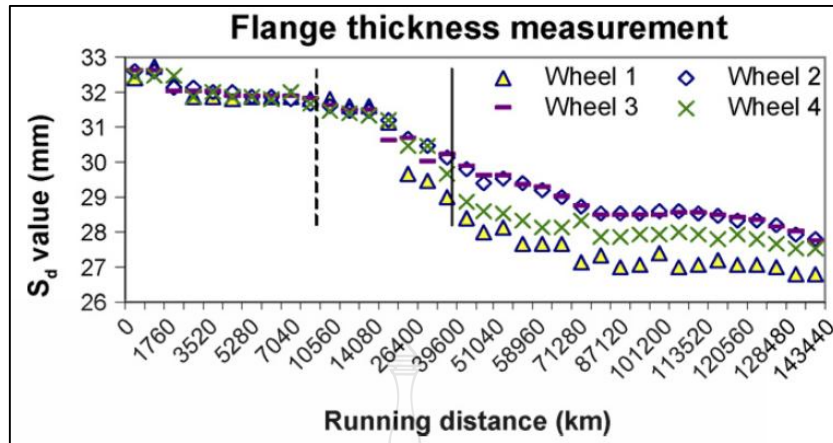
รูปที่ 2.27 หมายเลขของล้อรถไฟสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 2.28 รูปร่างและตัวแปรที่เกี่ยวข้องของล้อรถไฟ



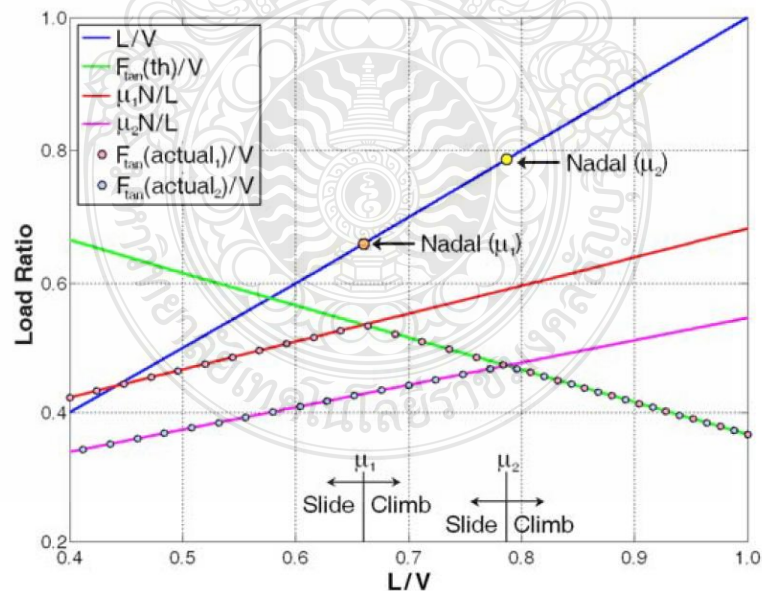
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความลาดเอียงล้อรถไฟกับระยะทางที่ใช้งาน



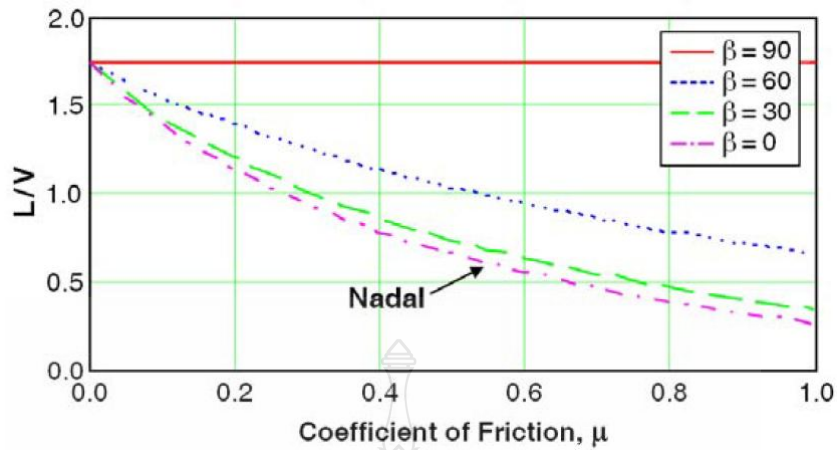
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของความหนาขอบล้อรถไฟกับระยะทางที่ใช้งาน

2.11.7 Brian Marquis และ Robert Greif (2011) [22]: Application of nadal limit in the prediction of wheel climb derailment (การใช้สมการของนาดาลในการทำนายการปีนรางของล้อรถไฟ)

สมการของนาดาลในการหาแรงกระทำการปีนรางของล้อกับรางรถไฟ นอกจากแรงกระทำในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้างแล้ว ยังมีแรงปฏิกิริยา แรงเสียดทาน มุมที่ล้อกับรางสัมผัสกัน คุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุ ในการทดสอบได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้น



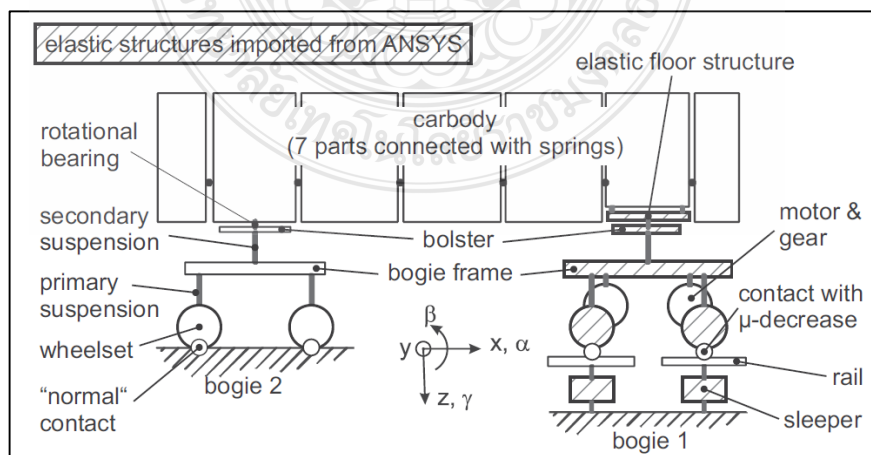
รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับสมการของนาดาล ($\mu_1=0.5, \mu_2=0.4, \delta=60, V=12,500$ pounds)



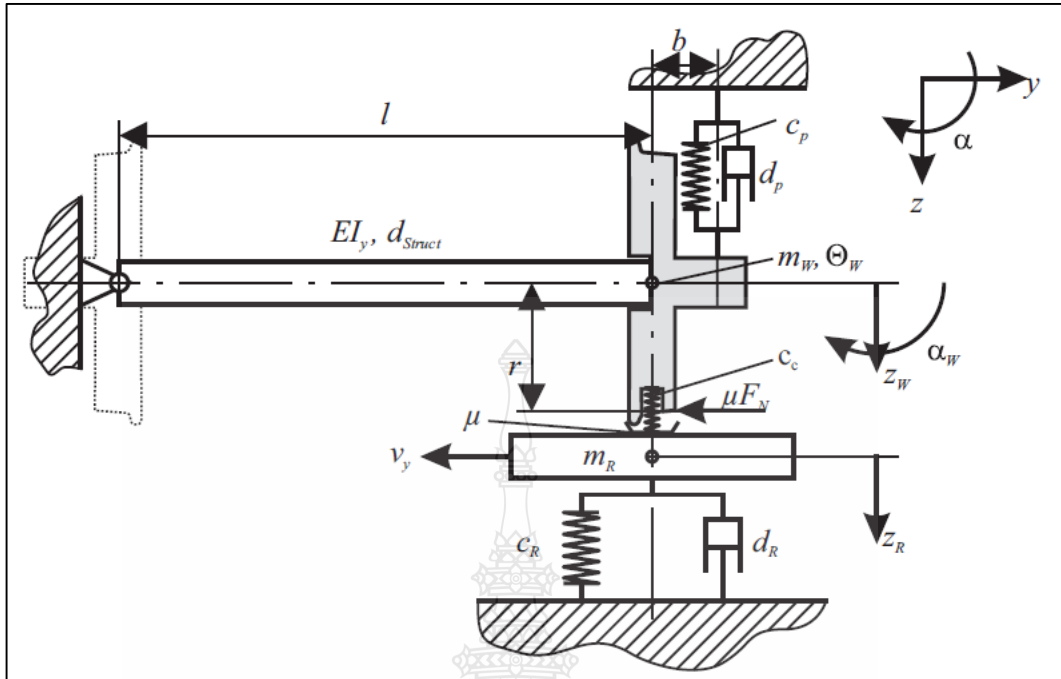
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับสมการของนาดาล ($\beta = 90, 60, 30, 0$ degrees)

2.11.8 B. Kurzeck (2011) [23]: Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation (แรงเสียดทานรวมทั้งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดเพลาล้อและทางโค้งของรถไฟและผลกระทบจากรางเป็นคลื่น)

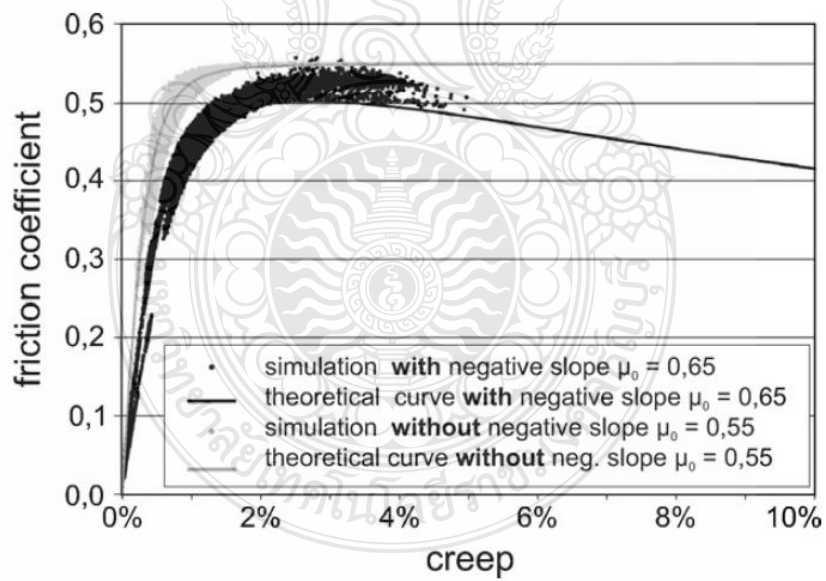
การสั่นสะเทือนที่มากมีผลต่อการวิ่งของรถไฟ โดยเฉพาะในทางโค้ง รางรถไฟจะเป็นลูกคลื่นอยู่มาก (เป็นผลมาจากพฤติกรรมการเข้าโค้งของรถไฟ) การสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่างๆมีผลต่อผู้โดยสาร ลักษณะของตัวรถหรือแม่กระถัง โบกี้ของรถไฟ ในบทความนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Multi-Body-Simulation (BMS) SIMPACK ในการจำลองการสั่นสะเทือนและดูพฤติกรรมของชุดเพลาล้อรถไฟ



รูปที่ 2.33 โครงสร้างของรูปแบบ Multi-Body-Simulation (BMS)



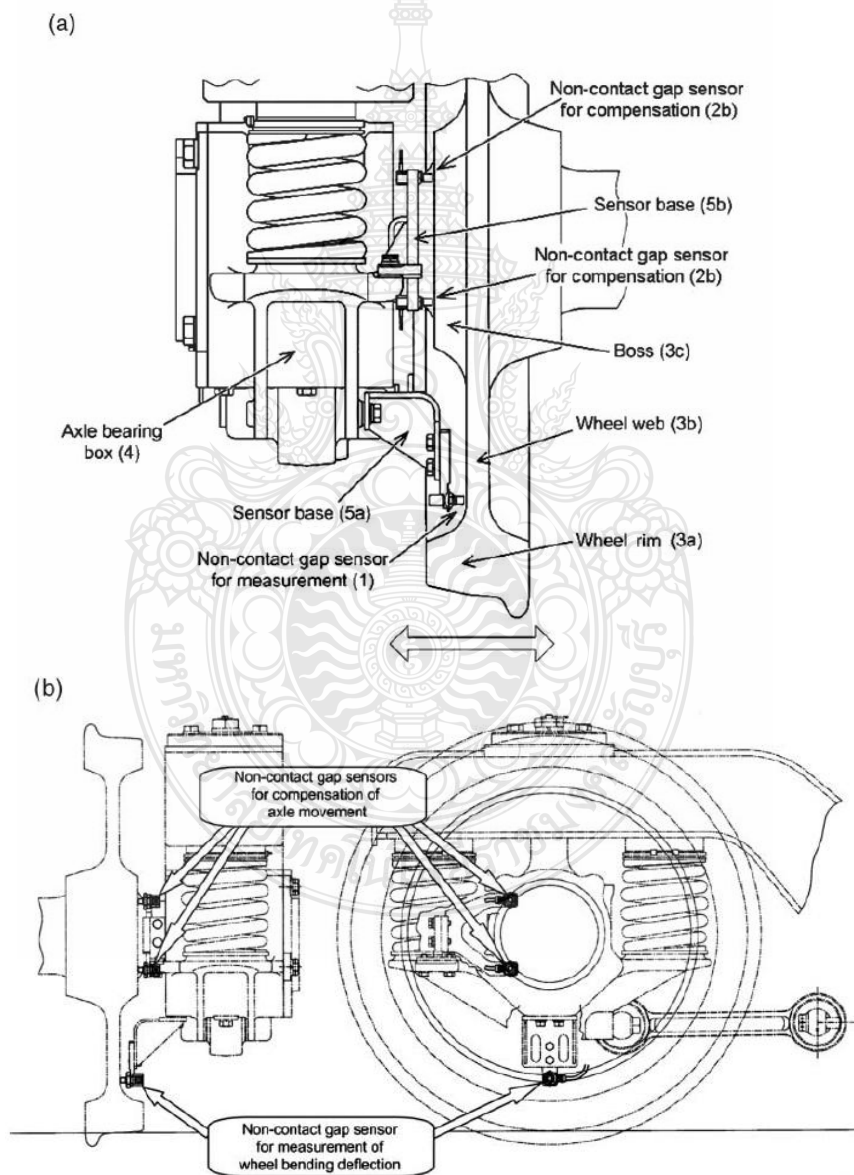
รูปที่ 2.34 ตัวอย่างโครงสร้างแบบ 3 องศาอิสระ



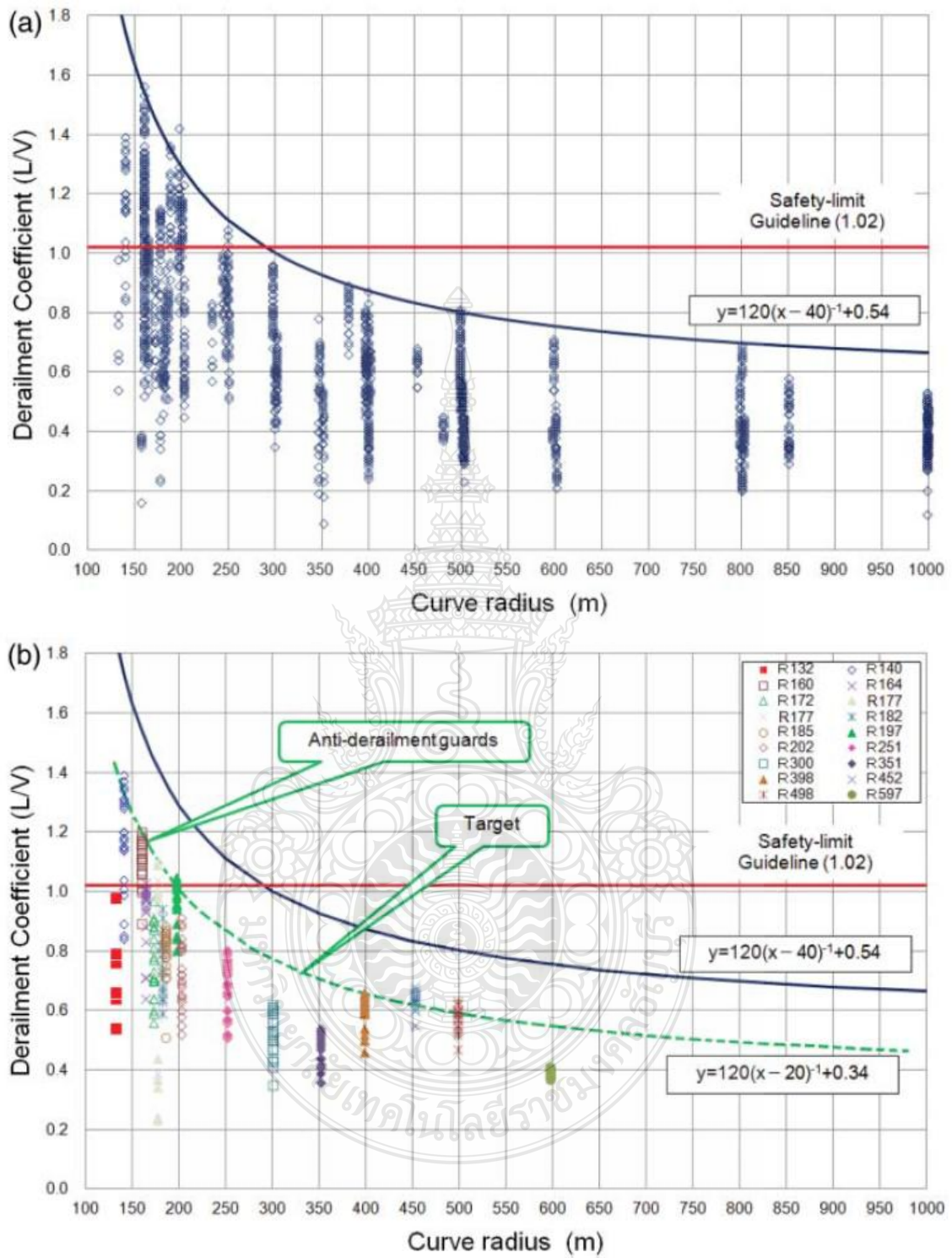
รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความคืบ

2.11.9 Akira Matsumoto และคณะ (2012) [24]: Continuous observation of wheel/rail contact forces in curved track and theoretical considerations (การสังเกตอย่างต่อเนื่องของแรงกระทำระหว่างล้อและรางในทางโค้งและการพิจารณาทางทฤษฎี)

การตรวจของรถไฟส่งผลกระทบต่อภัยร้ายแรงมาก โดยสัมประสิทธิ์การตรวจของรถไฟก็คืออัตราส่วนของแรงกระทำด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวตั้ง ในบทความนี้จะนำวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างจากวิธีการหาการโก่งตัวของล้อรถไฟโดยการติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดระยะแบบไม่สัมผัสและนำค่าแรงกระทำในแนวตั้งมาคำนวณเป็นอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การตรวจและเทียบกับทฤษฎี



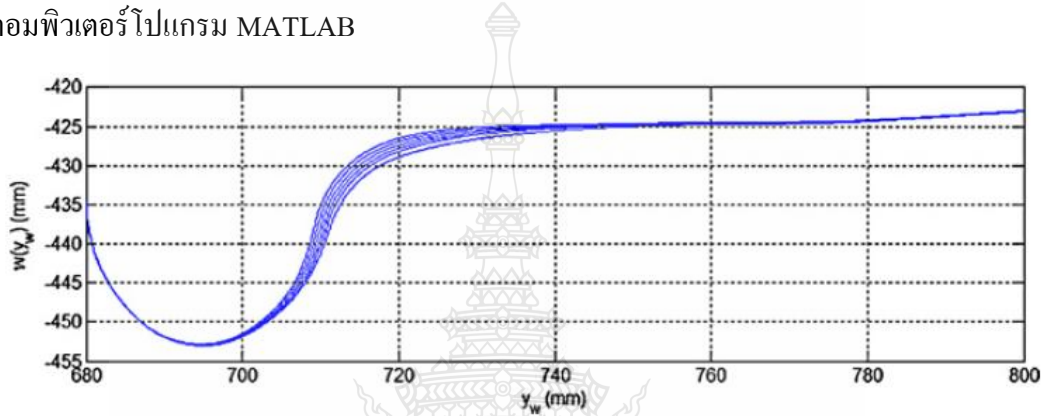
รูปที่ 2.36 การติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการโก่งตัวของล้อรถไฟ



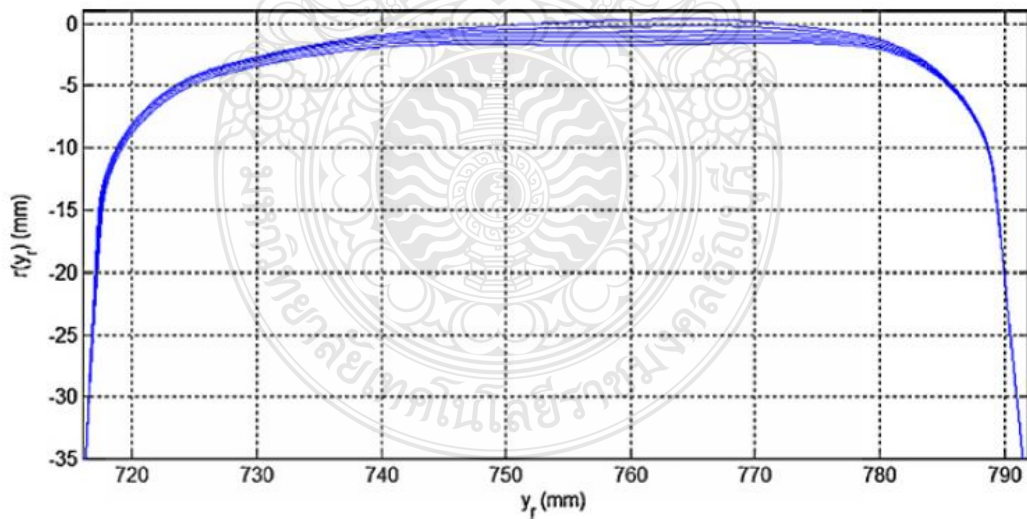
รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การตกรางกับความรัศมีความโค้ง

2.11.10 M. Ignesti และคณะ (2012) [25]: Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems (การพัฒนาแบบจำลองล้อรถไฟเพื่อทำนายลักษณะล้อและรางในระบบรางรถไฟ)

ลักษณะรูปร่างของล้อและรางจะเปลี่ยนแปลงไปหลังจากมีการใช้งานระยะหนึ่ง ทำให้มีผลต่อเสถียรภาพในการวิ่งของรถไฟ ในบทความนี้จะเป็นการทำนายลักษณะรูปร่างของล้อและราง โดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 2.38 ตัวอย่างการประเมินรูปร่างของล้อรถไฟหลังการใช้งาน



รูปที่ 2.39 ตัวอย่างการประเมินรูปร่างของรางรถไฟหลังการใช้งาน

2.11.11 Per Gullers และคณะ (2008) [26]: High-frequency vertical wheel–rail contact forces-Field measurements and influence of track irregularities (แรงกระทำในแนวตั้งระหว่างล้อและรางในความถี่สูง – การวัดภาคสนามและอิทธิพลของทางรถไฟที่ผิดปกติ)

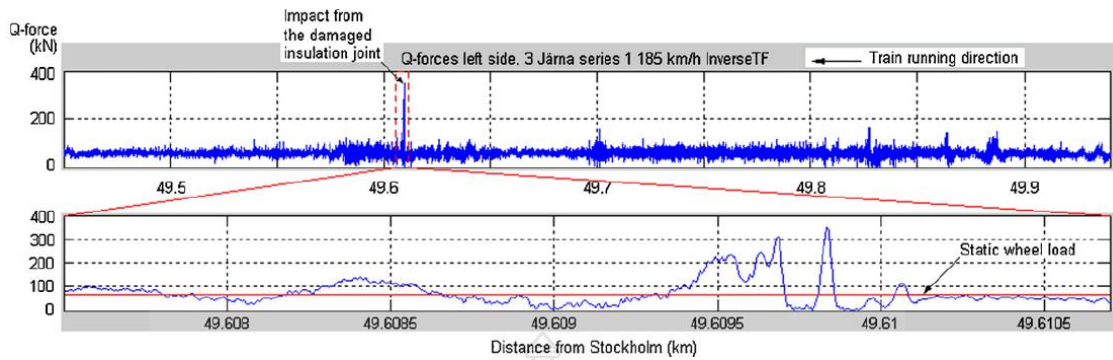
การวัดภาคสนามของแรงกระทำในแนวตั้งระหว่างล้อและรางรถไฟในช่วงความถี่ 0-2000 Hz เพื่อสังเกตระบบรองรับการสั่นสะเทือนของความถี่ธรรมชาติและผลที่เกิดขึ้นของล้อรถไฟ แรงที่เกิดขึ้นมีผลต่อแรงดัดของล้อรถไฟ ในบทความนี้จะทดสอบหาแรงกระทำในแนวตั้งจากความถี่ที่เกิดขึ้นเพื่อหาความผิดปกติของล้อและราง



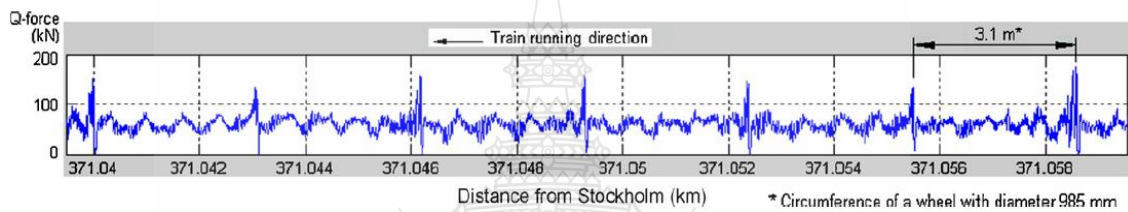
รูปที่ 2.40 ล้อที่เสียหายจากการใช้งาน



รูปที่ 2.41 ความผิดปกติของรางระหว่างรอยต่อ



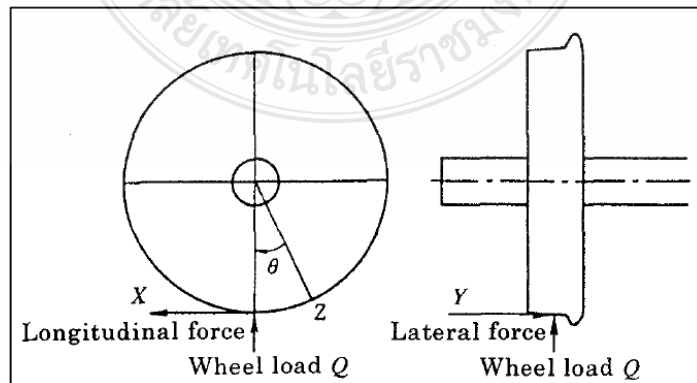
รูปที่ 2.42 แรงกระทำที่ผิดปกติที่เกิดจากรางรถไฟ



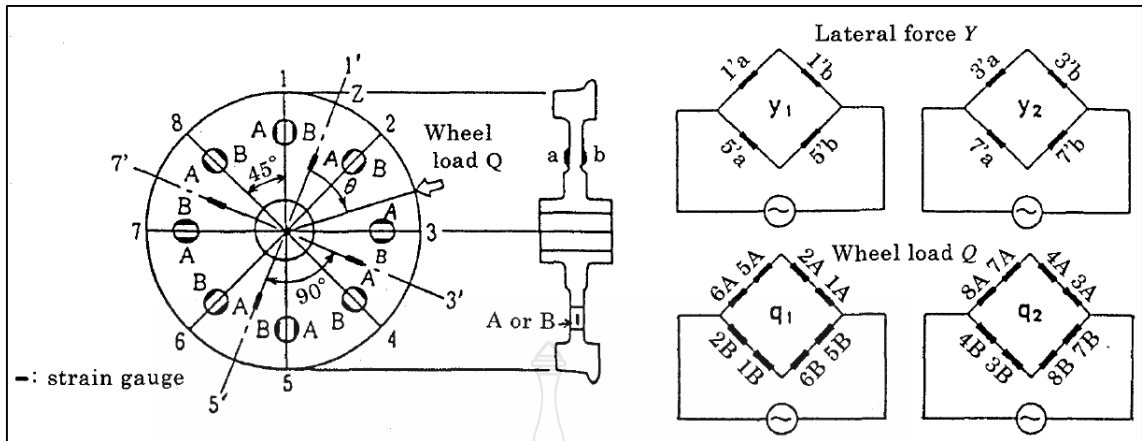
รูปที่ 2.43 แรงกระทำที่ผิดปกติที่เกิดจากล้อรถไฟ

2.11.12 Hiroaki Ishida และคณะ (1997) [27]: Method of measuring wheel and rail contact force and derailment quotients continuously (วิธีการวัดแรงกระทำระหว่างล้อและราง และอัตราส่วนการตกรางอย่างต่อเนื่อง)

วิธีการวัดแรงกระทำระหว่างล้อและรางนี้เป็นการวัดโดยใช้การติดสเตรนเกจที่ผิวของล้อรถไฟ การวัดแรงกระทำในแนวตั้งจะติด Strain gauge ในรูเจาะที่งานล้อรถไฟ และการวัดแรงกระทำด้านข้างจะติดสเตรนเกจที่งานล้อรถไฟ



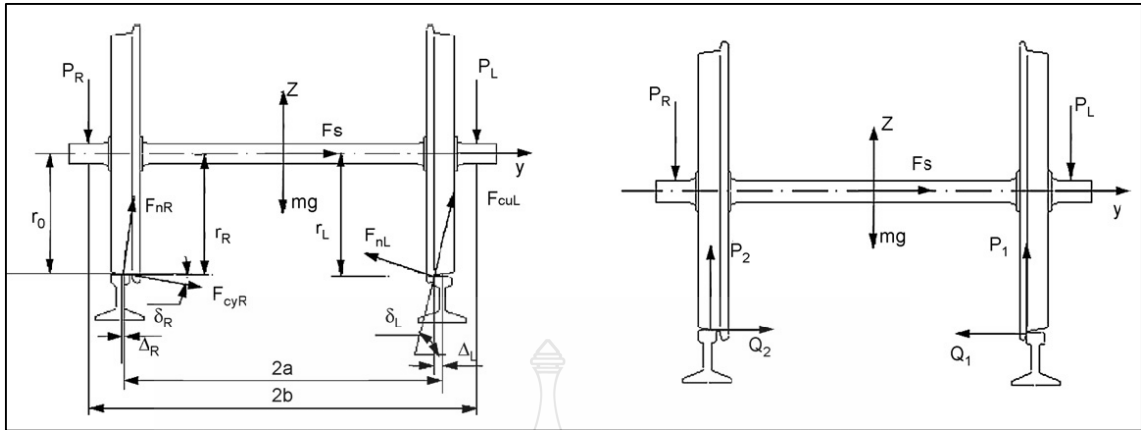
รูปที่ 2.44 แรงกระทำที่ล้อรถไฟ



รูปที่ 2.45 ตำแหน่งการติดสเตรนเกจ และการต่อวงจรสเตรน

2.11.13 Jing Zeng, PingboWu (2008) [12]: Study on the wheel/rail interaction and derailment safety (การศึกษาการทำงานร่วมกันของล้อเลื่อน/ราง และความปลอดภัยในการตกราง)

ล้อป็นขึ้นลงและมีการตกรางคือข้อควรระมัดระวัง ประการแรกสันนิษฐานว่ากระบวนการป็นหน้าของล้อเป็นแบบกึ่งสถิติจากนั้นจะมีการพิจารณาเกณฑ์การเบี่ยงเบน จากการวิเคราะห์แรงที่กระทำบนล้อ หนึ่งในเกณฑ์คือสูตรพื้นฐานการตกรางที่สมมติว่าแรงเสียดทานเลื่อนระหว่างล้อและรางเกิดขึ้น อีกอย่างหนึ่งคือสิ่งที่เรียกว่าสูตรการวิเคราะห์โดยประมาณซึ่งจะพิจารณาถึงผลกระทบของแรงคืบของล้อ / ทางรถไฟ การคำนวณของตัวอย่างระบุว่าผลของวิธีกลาสสิกมีความระมัดระวังมากขึ้นเมื่อเทียบกับผลของวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวินิจฉัยการตกรางของล้อ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการตกรางด้วยการทดสอบล้อด้วยชุดทดสอบชุดเดียวเพื่อยืนยันการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ประการที่สองมีการตรวจสอบการตกรางของล้อซึ่งเป็นชนิดของการตกรางแบบไดนามิกส์ มีการวิเคราะห์หาผลลัพธ์สำหรับจุดสัมผัสของล้อ / รางและความสูงในการกระโดดของล้อ เกณฑ์การให้ตกรางโดยใช้ความสูงของการกระโดดของล้อและแรงกระแทกด้านข้างกับอัตราส่วนแรงดึงแนวตั้งของล้อ การวิเคราะห์อิทธิพลของความเร็วในการกระแทกล้อ มุมของจุดสัมผัส ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดสีล้อ/รางรถไฟ แรงตามแนวตั้งและช่วงเวลาการตกรางของล้อเป็นการวิเคราะห์



รูปที่ 2.46 ตัวแปรการสัมผัสระหว่างล้อและราง และแรงกระทำที่เกิดขึ้น

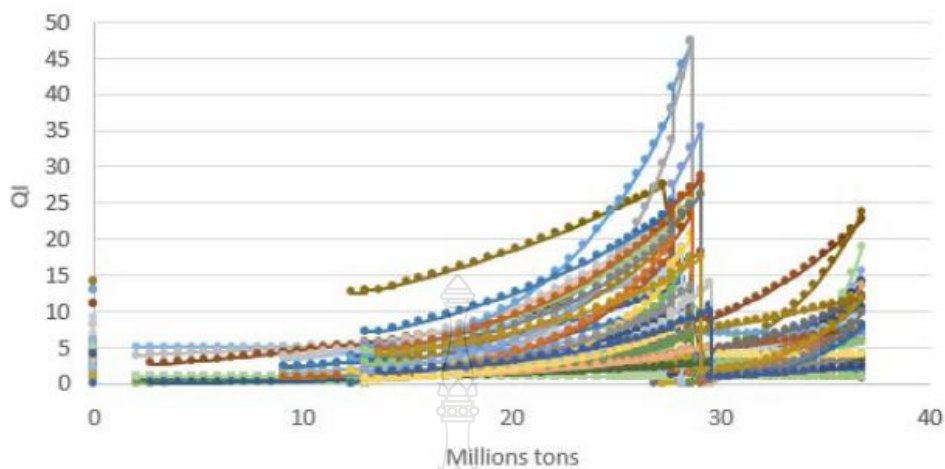


รูปที่ 2.47 ชุดทดสอบการคกรางของชุดเพลาล้อรถไฟ

2.11.14 กัณฑ์วงศ์ ไม้สุขจิตร และคณะ (2016) [28]: การศึกษาอัตราการสึกหรอของทางรถไฟ จากอิทธิพลตัวแปรน้ำหนักบรรทุกและพื้นทาง

การที่ทางรถไฟมีการใช้งานมากขึ้นทำให้รางต้องรับภาระสูงขึ้นส่งผลต่อการสึกหรอของทาง ตัวแปรน้ำหนักบรรทุกสะสมมีอิทธิพลต่อการสึกหรอ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอีก เช่น โครงสร้างรองรับหินโรยทาง ทางตรง/ทางโค้ง ตัวแปรรัศมีความโค้งของราง ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมและฟื้นฟูสภาพทางที่ไม่เท่ากันในแต่ละช่วง

ความสัมพันธ์การสึกหรอของทางกับน้ำหนักบรรทุก

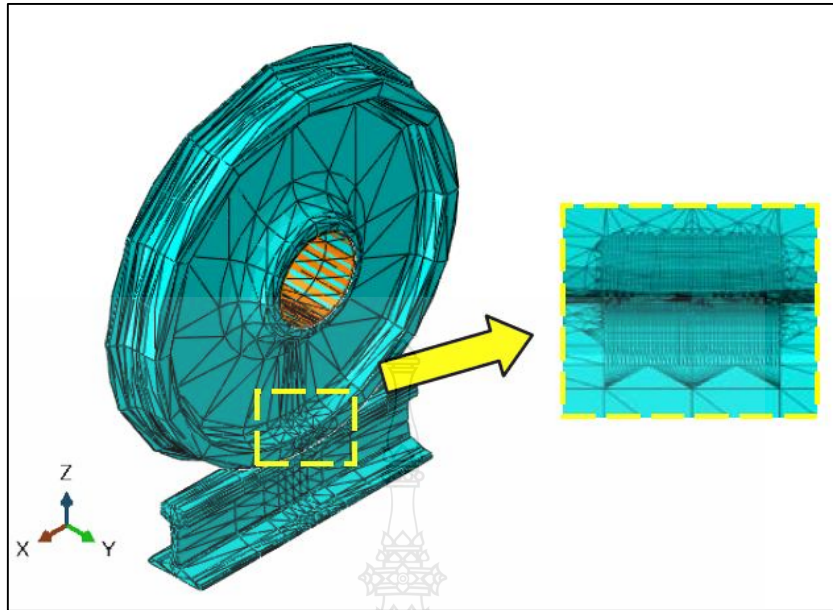


รูปที่ 2.48 ความสัมพันธ์ของการสึกหรอของทางกับน้ำหนักบรรทุก

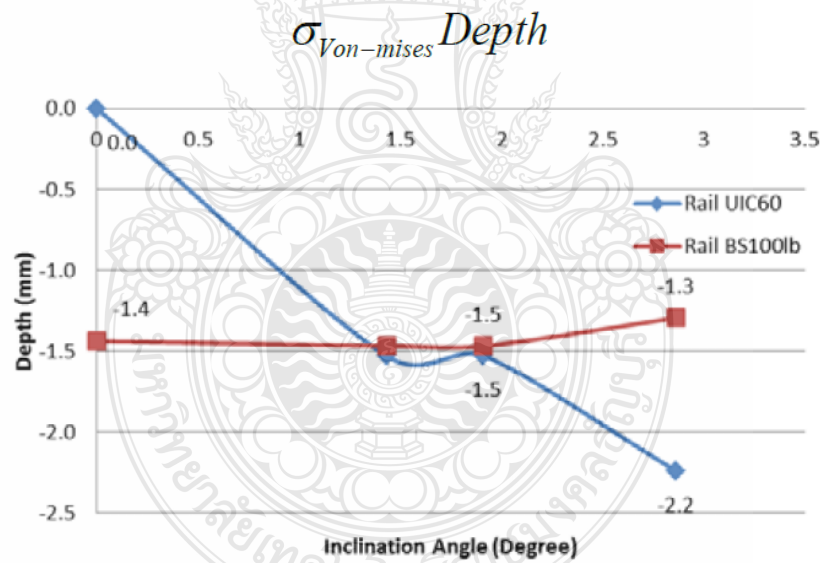
2.11.15 สุเทพ แร่อ่อน และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร (2016) [29]: ผลของมุมเอียงรางต่อความเค้นสัมผัส กลิ้งระหว่างล้อและราง

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อและรางส่วนใหญ่ คือ การแตกร้าว ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ระหว่างล้อและราง ซึ่งความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ เช่น รูปทรงเรขาคณิตของล้อและราง น้ำหนักกดเพลา ความกว้างของราง ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของราง และมุมเอียงราง เป็นต้น บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การกระจายความเค้นบริเวณที่มีการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM)

ในกรณีที่รางไม่มีมุมเอียงราง จะส่งผลให้เกิดความเค้น (Von-mises) และความเค้นเฉือน (Tresca) ที่เกิดขึ้นในรางมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่รางมีมุมเอียงรางอื่นๆ ดังนั้นจึงอาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า มุมเอียงรางเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเค้นและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในราง ทั้งนี้ความเค้น (Von-mises) และความเค้นเฉือน (Tresca) ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในบริเวณหัวราง (Rail Head) ที่ระยะความลึกจากผิวราง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งในบริเวณดังกล่าวจะเป็นจุดเริ่มต้นของความล้าของวัสดุทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับรางและจะนำไปสู่การแตกร้าวและจะมีการขยายตัวมาถึงผิวของราง

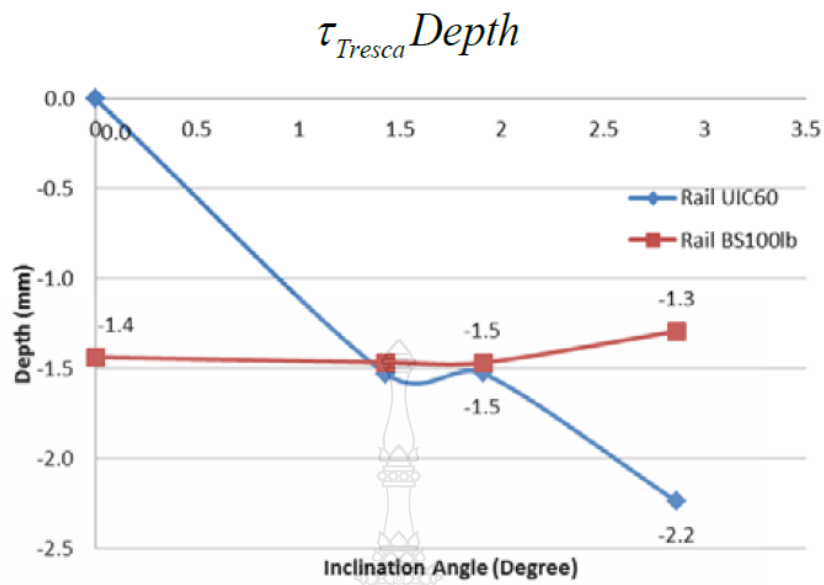


รูปที่ 2.49 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อและราง



รูปที่ 2.50 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดความเค้น (Von-mises) จากผิวของหัวราง กับมุมเอียง

ราง



รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดความเค้นเฉือน (Tresca) จากผิวของหัวราง กับมุมเอียงราง



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการหาค่าแรงกระทำด้านข้าง และการคำนวณ แผนผังการคำนวณและการหาแรงกระทำด้านข้าง วิธีการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง วิธีการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่แบบความเร่ง ซึ่งในการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองแบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกจะทำการวัด ขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่งเท่านั้น

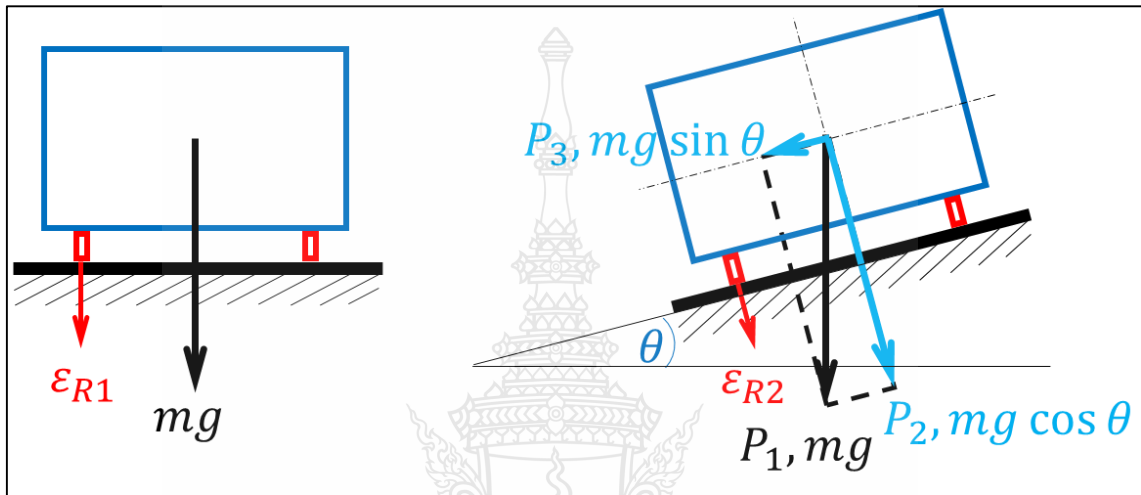
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) สืบค้นวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดแรงกระทำต่อชุดเพลาล้อรถไฟ
- 2) ประมวลข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม
- 3) ศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ
- 4) ทำการทดสอบและเปรียบเทียบวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ
- 5) สรุปผลการทดสอบและทำเอกสาร
- 6) เผยแพร่วิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ

3.2 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการหาค่าแรงกระทำด้านข้างและการคำนวณ

3.2.1 การหาแรงกระทำด้านข้างโดยอาศัยทฤษฎีการแตกแรง

เมื่อเกิดเหตุที่ทำให้รถไฟหยุดนิ่งในระหว่างทางที่มีการยกโค้งของทางรถไฟ ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างที่ชุดเพลาสี้อรถไฟ ดังในรูปที่ 3.1 และสามารถหาแรงกระทำด้านข้างได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางจากน้ำหนักรถไฟ

จากรูปที่ 3.1 จะได้

$$P_1^2 = P_2^2 + P_3^2 \quad (3.1)$$

$$P_3^2 = P_1^2 - P_2^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ $P_1 = mg \quad (3.3)$

$$P_2 = mg \cos \theta \quad (3.4)$$

$$P_3 = mg \sin \theta \quad (3.5)$$

จะได้ $(mg \sin \theta)^2 = (mg)^2 - (mg \cos \theta)^2 \quad (3.6)$

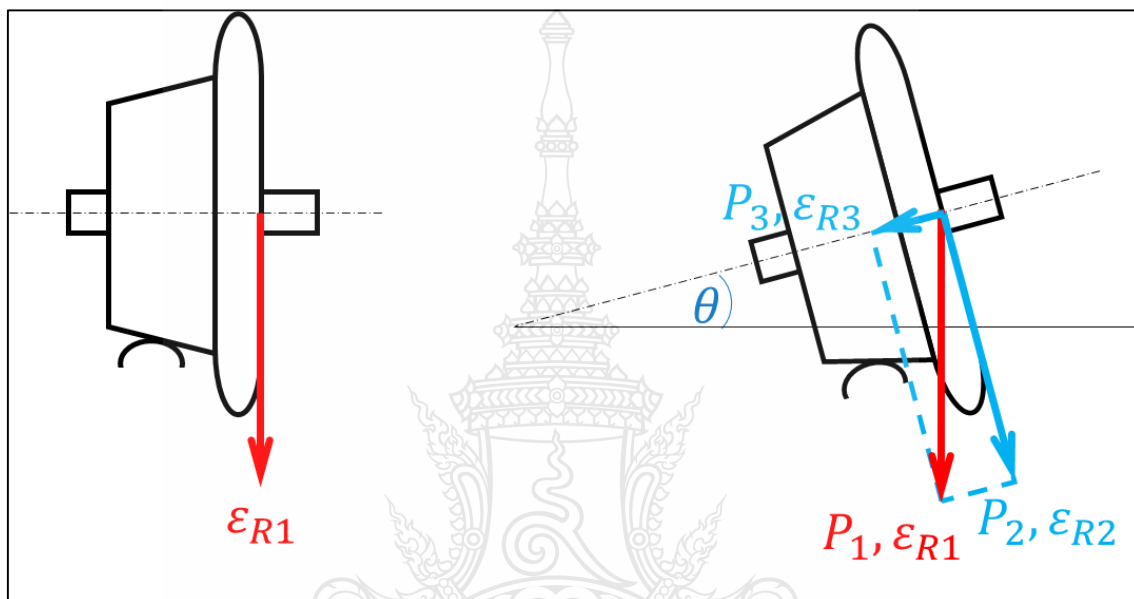
$$mg \sin \theta = \sqrt{(mg)^2 - (mg \cos \theta)^2} \quad (3.7)$$

โดยที่ $mg \sin \theta$ คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น

3.2.2 การแปลงค่าความเครียดเป็นแรงกระทำ

เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ วัสดุจะเกิดความเครียดภายในตัวเองทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามทิศทางของแรง โดยนิยามได้คือ

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.2 ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและราง

จากรูปที่ 3.2 สามารถหาแรงกระทำด้านข้างจากความเครียดได้จากน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากรถไฟทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างล้อและรางของรถไฟ โดยที่แรงกระทำเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความเครียด

$$\frac{P}{\varepsilon} = \frac{P_1}{\varepsilon_1} = \frac{P_2}{\varepsilon_2} = \frac{P_3}{\varepsilon_3} \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาบริเวณล้อและราง สามารถหาความเครียดของแรงกระทำด้านข้างได้ ดังในรูปที่ 3.2 ดังนี้

$$\varepsilon_{R1}^2 = \varepsilon_{R2}^2 + \varepsilon_{R3}^2 \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{R3} = \sqrt{\varepsilon_{R1}^2 - \varepsilon_{R2}^2} \quad (3.11)$$

แทนสมการที่ 3.11 ลงในสมการที่ 3.9 $\left(\frac{P_2}{\epsilon_{R2}} = \frac{P_3}{\epsilon_3}\right)$ จะได้

$$\frac{P_2}{\epsilon_{R2}} = \frac{P_3}{\sqrt{\epsilon_{R1}^2 - \epsilon_{R2}^2}} \quad (3.12)$$

$$P_3 = \frac{P_2 \times \sqrt{\epsilon_{R1}^2 - \epsilon_{R2}^2}}{\epsilon_{R2}} \quad (3.13)$$

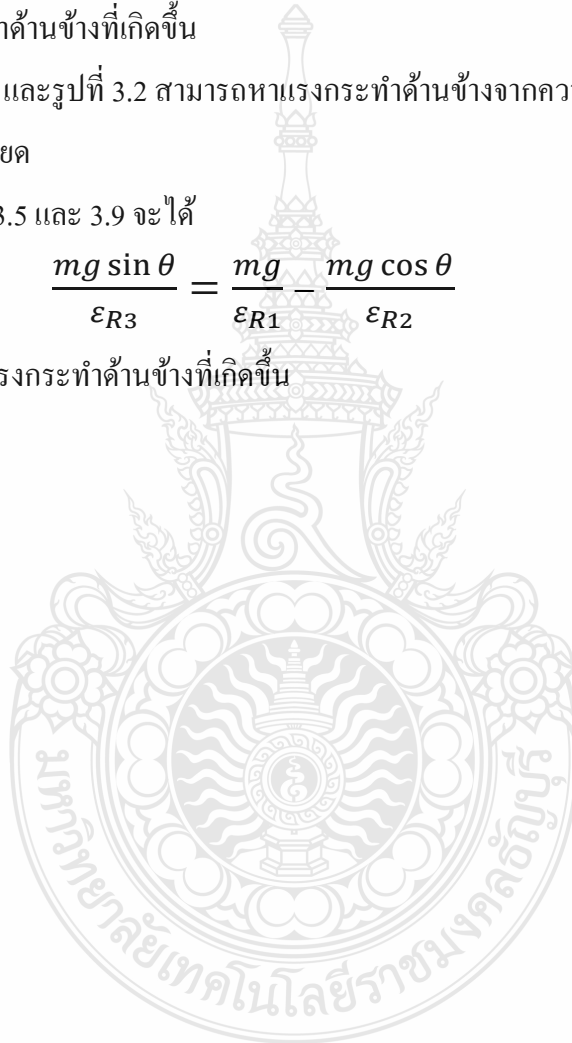
โดยที่ P_3 คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 สามารถหาแรงกระทำด้านข้างจากความเครียดได้จากสัดส่วนของแรงกระทำต่อความเครียด

จากสมการที่ 3.3, 3.4, 3.5 และ 3.9 จะได้

$$\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R3}} = \frac{mg}{\epsilon_{R1}} - \frac{mg \cos \theta}{\epsilon_{R2}} \quad (3.14)$$

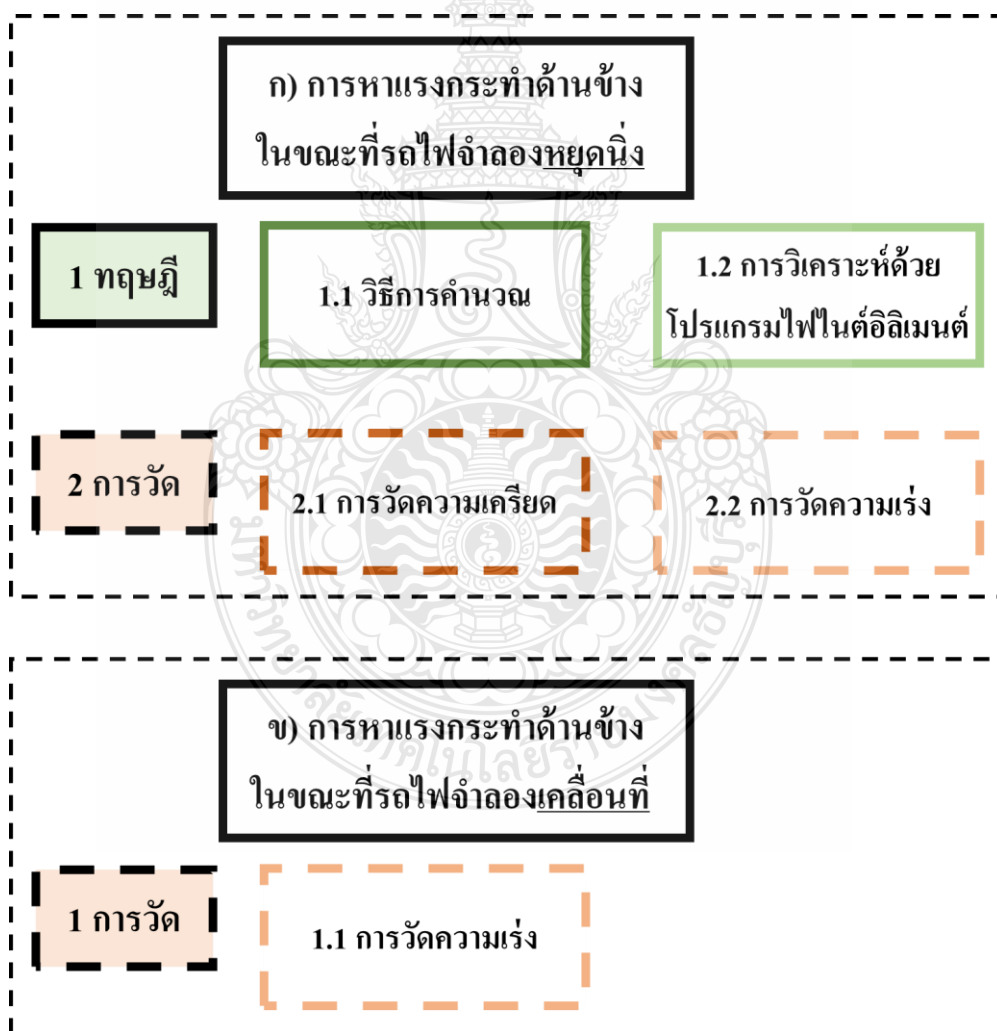
โดยที่ $\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R3}}$ คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น



3.3 แผนผังการคำนวณและการหาแรงกระทำด้านข้าง

การรถไฟแห่งประเทศไทยได้ระบุนุการยกโค้งของทางรถไฟสูงจากข้างหนึ่งได้ไม่เกิน 90 มิลลิเมตรในทางกว้าง 1 เมตร และในทางลาดชันทางรถไฟสามารถเอียงได้ไม่เกิน 35 เมตรในระยะทางยาว 1 กิโลเมตร ผู้วิจัยจึงแบ่งการยกโค้งเป็น 0, 30, 60, 90 มิลลิเมตร (0° , 1.7° , 3.4° , 5.1°) และแบ่งระดับความลาดเอียงเป็น 0, 20, 35 เมตร (0%, 2%, 3.5%)

การวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ แบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกจะทำการวัด ขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแบบความเร่งเท่านั้น ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่งและเคลื่อนที่

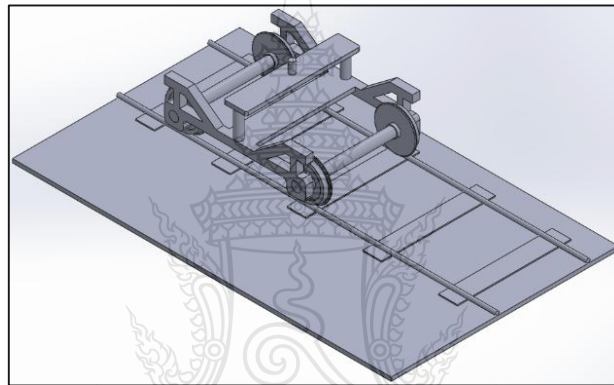
3.4 วิธีการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

3.4.1 การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์

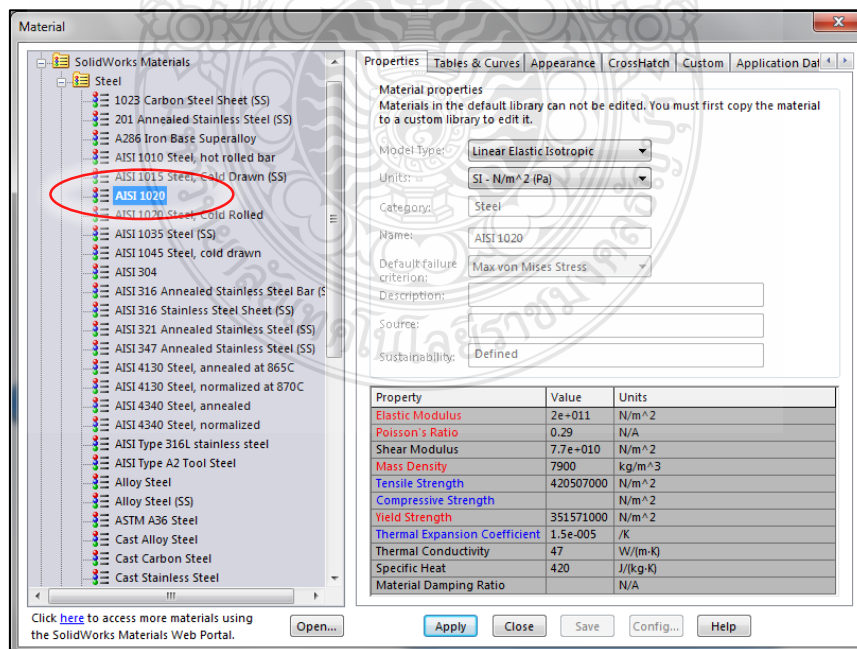
เป็นวิธีการใช้ระเบียบไฟไนต์อีลิเมนต์ชนิดหนึ่งในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเป็นการเทียบสีของชิ้นงานกับแถบสีของโปรแกรม เพื่อหาแรงกระทำที่เกิดขึ้น

1) สร้างชิ้นงานให้เหมือนกับ โบกี้รถไฟจำลองที่ต้องการศึกษา (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก) ดังรูปที่ 3.4

2) ใส่ชนิดของชิ้นงานที่ต้องการศึกษา โดยเลือกเป็นเหล็ก AISI 1020 เพราะคุณสมบัติของวัสดุใกล้เคียงกับชุดเพลาล้อรถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3.5

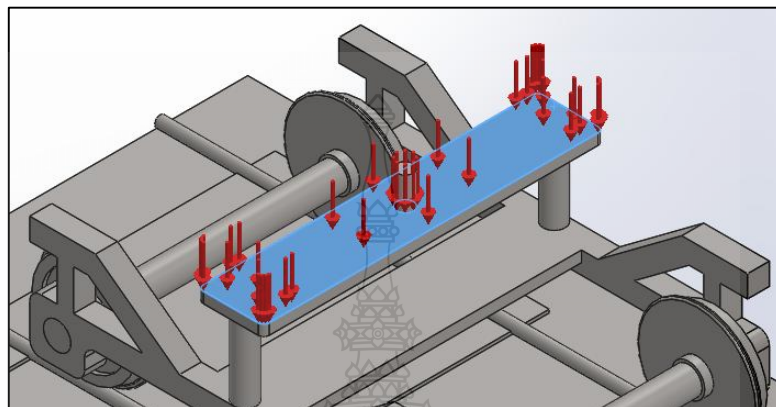


รูปที่ 3.4 การสร้างชิ้นงาน

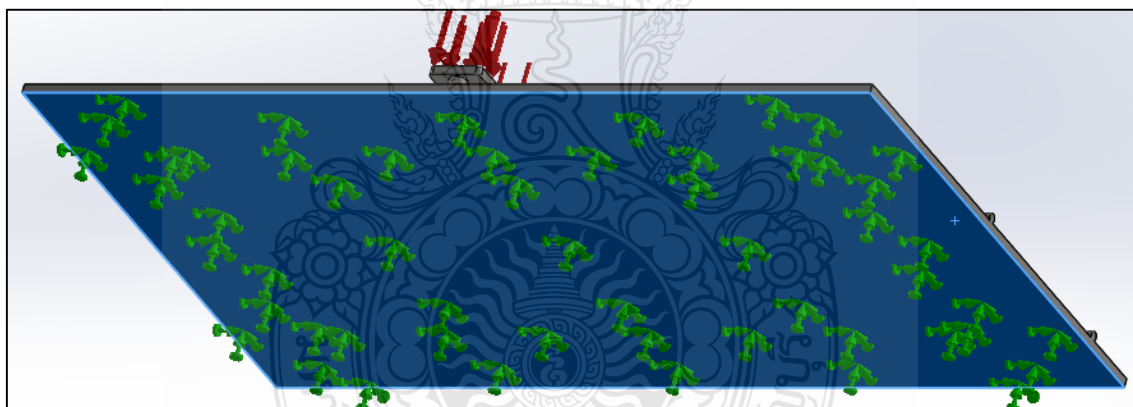


รูปที่ 3.5 การใส่ชนิดของชิ้นงาน

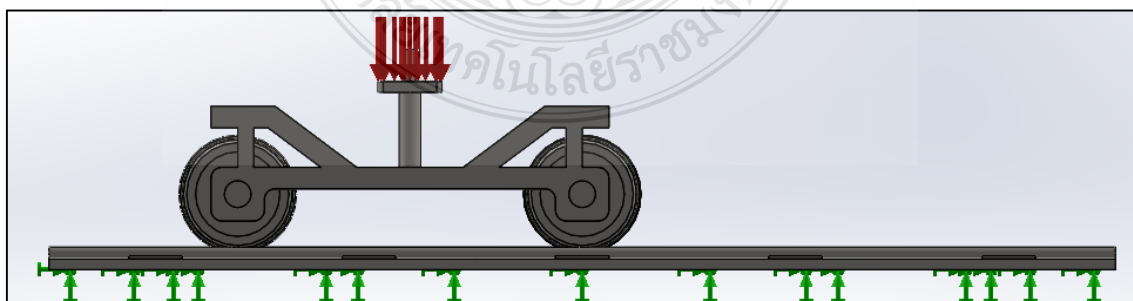
3) ใส่ขอบเขตของการศึกษา เช่น ใส่ขนาดของแรงกระทำ 294 นิวตัน ที่บริเวณฐานรับน้ำหนักจากตัวรถไฟจำลองสู่โบลิ่งรถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3.6 (ก) และใส่จุดยึดติดด้านใต้พื้นทางรถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3.6 (ข) โดยรูปที่ 3.6 (ค) แสดงภาพรวมของลักษณะและตำแหน่งของแรงกระทำและบริเวณจับยึด



(ก) เส้นแรงกระทำสี่แฉก ฐานรับน้ำหนักสี่ฟุต



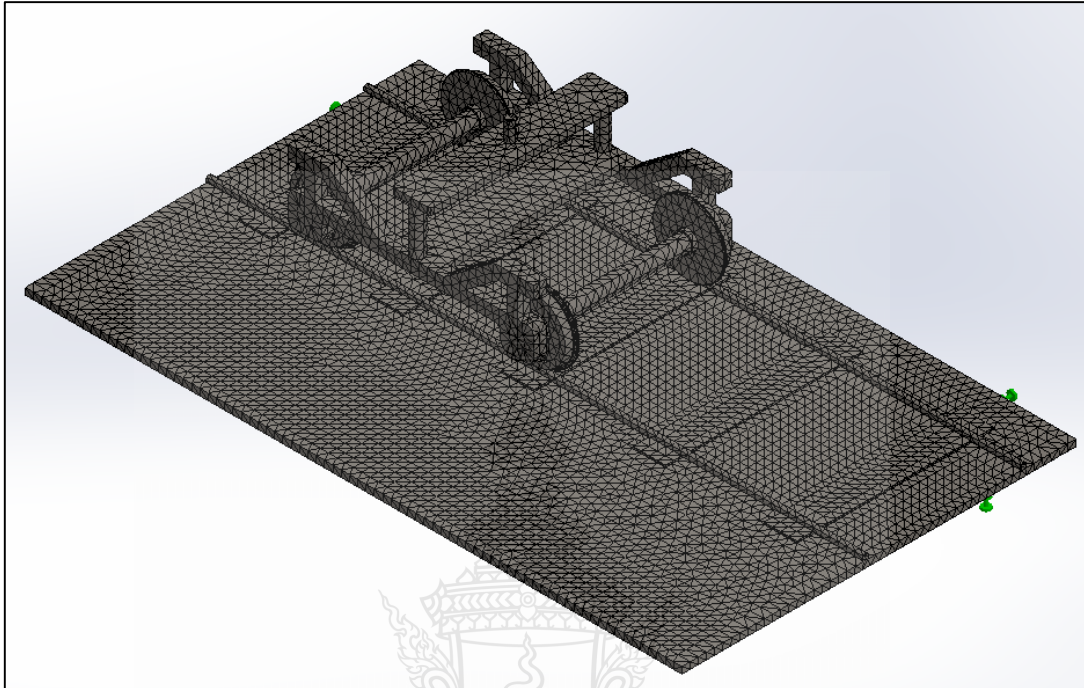
(ข) จุดยึดติดสี่เหลี่ยม บริเวณพื้นที่ยึดติดสี่ฟุต



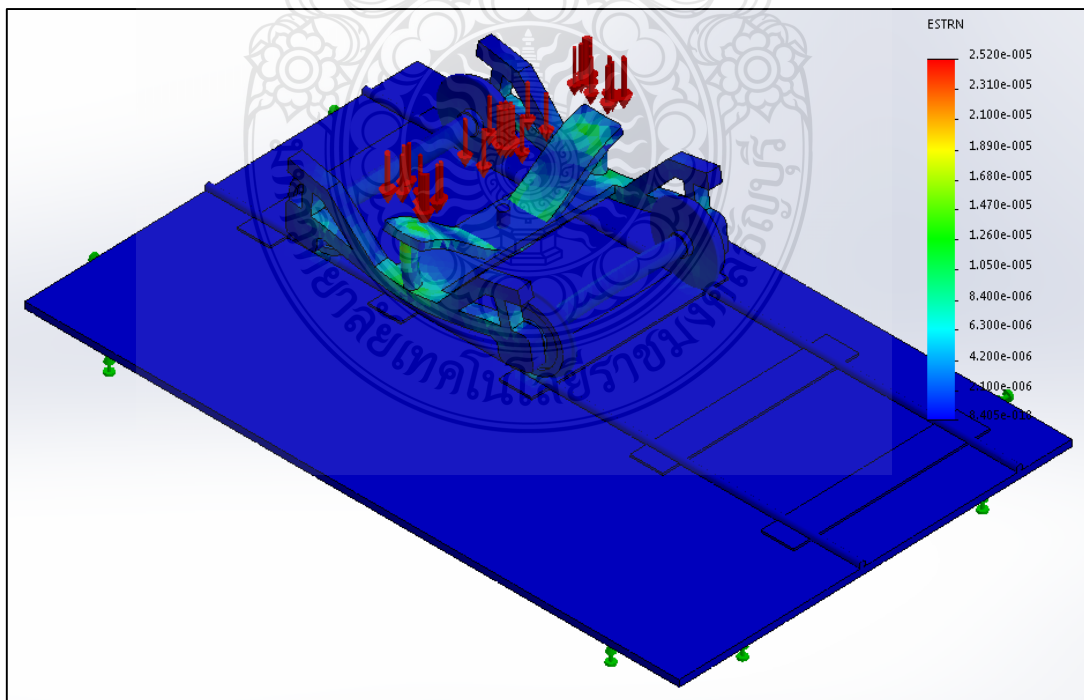
(ค) จุดยึดติดสี่เหลี่ยม บริเวณพื้นที่ยึดติดสี่ฟุต

รูปที่ 3.6 ลักษณะและตำแหน่งของแรงกระทำและบริเวณจับยึด

4) แบ่งหน่วยย่อยของชิ้นงานในโปรแกรมเป็นชิ้นเล็กๆลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ขนาดกว้างประมาณ 12.7 มิลลิเมตร และทำการคำนวณ ดังรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การแบ่งหน่วยย่อยของชิ้นงาน

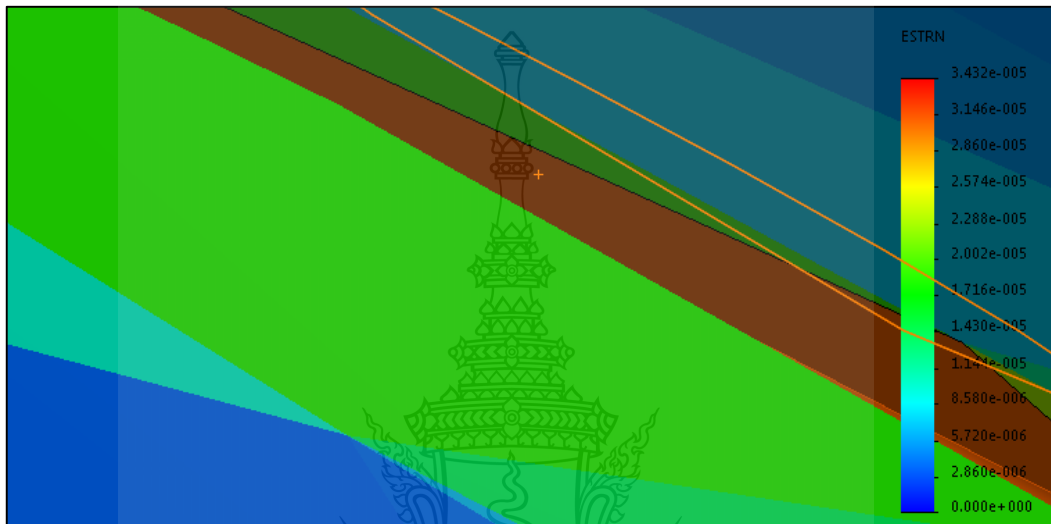


รูปที่ 3.8 การคำนวณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงและแรงกระทำที่เกิดขึ้น

5) วิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบสปีบริเวณที่ต้องการศึกษาของชิ้นงานกับแถบสีของโปรแกรม (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก จ.1) ดังรูปที่ 3.9

6) บันทึกผล

7) ทำการยกโค้งทางรถไฟประมาณ 1.7° , 3.4° , 5.1° ตามลำดับ และบันทึกผล



รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบสี

3.4.2 การหาแรงกระทำด้านข้างด้วยการวัดความเครียด (Strain measurement method)

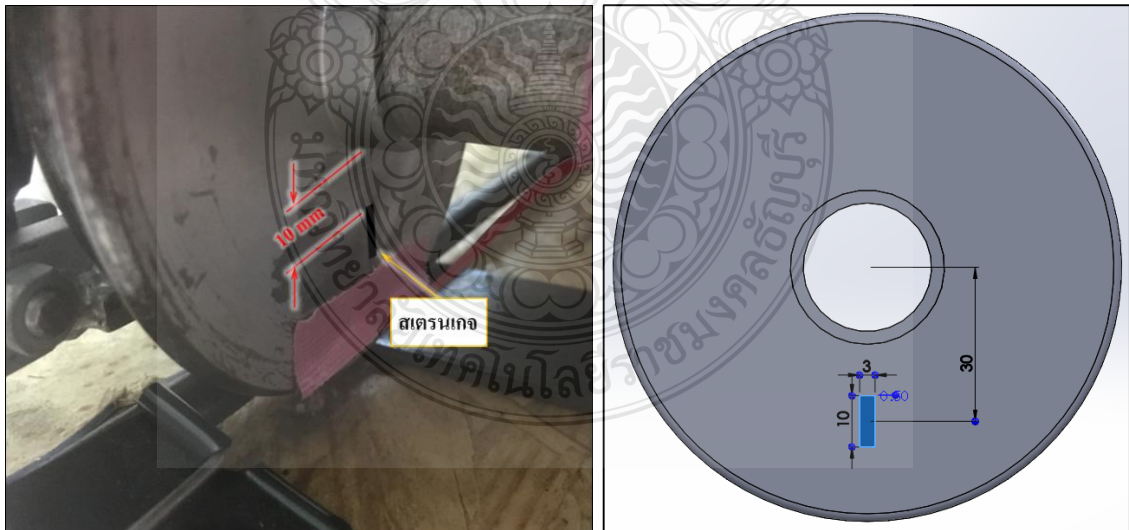
เป็นวิธีการใช้สเตรนเกจเพื่อหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ต้องการศึกษา และนำค่าความเครียดกลับมาคำนวณเป็นแรงกระทำ โดยมีการทดลองการหาค่าแรงกระทำ ดังในรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.16

1) เตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลอง (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข) โดยรถไฟจำลองนี้จะมี 2 โบกี้ รวมเป็น 4 ชุดเพลาดัด น้ำหนักรวม 60 กิโลกรัม ส่วนทางรถไฟจำลองเป็นทางตรง 1 เมตร และอุปกรณ์เพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลองที่ 1.7°

2) ทำการติดสเตรนเกจที่ล้อของรถไฟจำลอง (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.1) ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การติดสเตรนเกจไว้ที่ล้อของรถไฟจำลอง (ระยะห่างระหว่างหัวสเตรนเกจถึงขอบล้อด้านในประมาณ 10 มิลลิเมตร หรือระยะห่างระหว่างกึ่งกลางสเตรนเกจถึงกึ่งกลางเพลาล้อรถไฟจำลองประมาณ 30 มิลลิเมตร)

3) เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การเชื่อมต่อสายสัญญาณ

4) เปิดการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การเปิดการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ

5) เปิดการทำงานและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การทำงานและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

6) บันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โดยประมาณ

7) ทำการยกโค้งทางรถไฟจำลองประมาณ 1.7° , 3.4° , 5.1° ตามลำดับ และบันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.16 แสดงทางวิ่งยกโค้งทางรถไฟจำลอง



รูปที่ 3.16 การยกโค้งทางรถไฟจำลอง

3.4.3 การวัดแรงกระทำด้านข้างแบบความเร่ง

1) เตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลอง (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข) โดยรถไฟจำลองนี้จะมี 2 โบกี้ รวมเป็น 4 ชุดเพลาล้อ น้ำหนักรวม 60 กิโลกรัม ส่วนทางรถไฟจำลองเป็นทางตรง 1 เมตร และอุปกรณ์เพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลองที่ 1.7°

2) ทำการติดหัววัดความเร่งไว้ที่แกนตลับลูกปืนที่เพลาล้อหน้าของรถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3.18 (โดยมีระยะห่างจากกึ่งกลางเพลาล้อรถไฟจำลองตามแนวราบ 50 มิลลิเมตรและระยะในแนวตั้งห่างไป 15 มิลลิเมตร รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.2)

3) เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าด้วยกัน

4) เปิดการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ

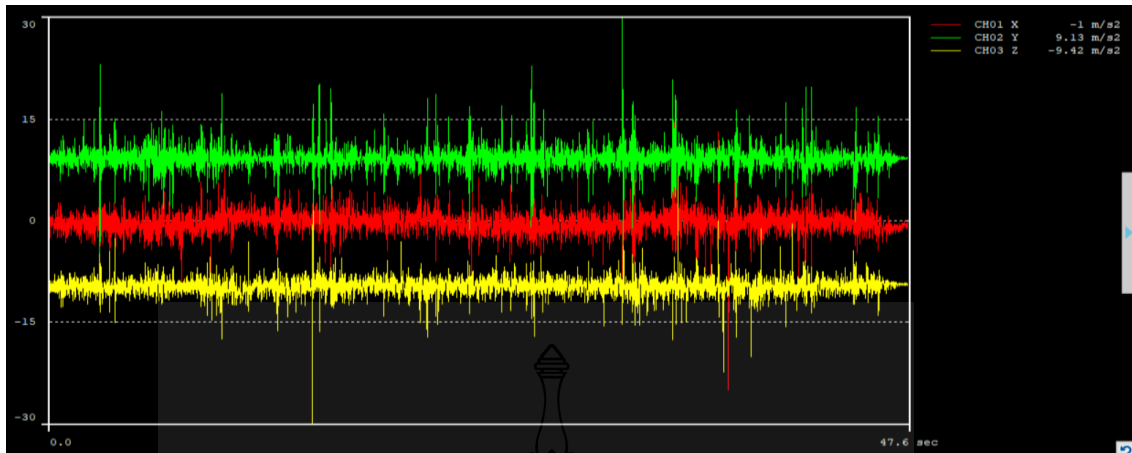
5) เปิดการทำงานและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

6) บันทึกค่าความเร่งที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.19 และดังรูปที่ 3.20 แสดงค่าที่อ่านและบันทึกได้จากเครื่องมือวัด

7) ทำการยกโค้งทางรถไฟจำลองประมาณ 1.7° , 3.4° , 5.1° ตามลำดับ และบันทึกค่าความเร่งที่เกิดขึ้น โดยค่าความเร่งที่บันทึกมีความละเอียดอยู่ที่ 1 วินาที บันทึกได้ 10 ค่า



รูปที่ 3.18 การติดหัววัดความเร่งกับชุดเพลาล้อรถไฟจำลอง



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างค่าความเร่งที่เกิดขึ้นเชิงกราฟ (สีแดง แกน X คือ แรงกระทำตามแนวราบ, สีเขียว แกน Y คือ แรงกระทำในแนวตั้ง, สีเหลือง แกน Z คือ แรงกระทำด้านข้าง)

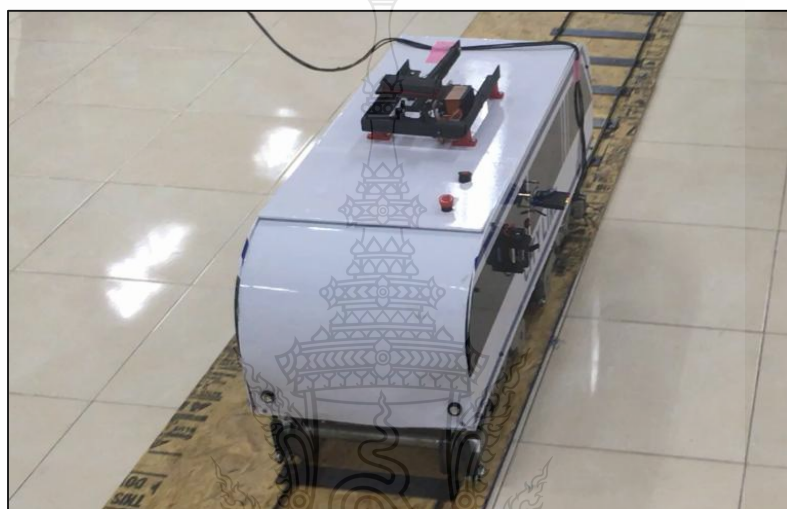
	A	B	C	D
1	ID No.	EDX-200A		
2	Title			
3	Test Date	26/4/2018	10:54:45	
4	MEAS CHs	3		
5	Digital Input	OFF		
6	Sampling Rate(Hz)	100		
7	Data Nos/CH	4755		
8	MEAS Time(sec)	47.55		
9	CH Name	X	Y	Z
10	CH No.	CH1	CH2	CH3
11	Range	2000	2000	2000
12	Calibration Coefficient	0.2254	0.2231	0.2148
13	Offset	0	0	0
14	Unit	m/s ²	m/s ²	m/s ²
15	0	-0.002586377	9.591774902	-10.75012119
16	0.01	-2.536740527	8.629111475	-9.278772656
17	0.02	0.442710693	8.903138843	-10.35224824
18	0.03	-0.655564014	9.320688794	-10.6451335
19	0.04	-0.4030896	9.323684521	-8.983422656
20	0.05	-0.763531494	9.054341382	-9.52912793
21	0.06	0.677355615	8.993283008	-10.44716719
22	0.07	0.228481641	8.546647266	-10.27185557
23	0.08	0.525859961	10.04576379	-10.54245322
24	0.09	0.446837891	9.039199341	-9.367608398
25	0.1	-0.805408789	8.317555811	-9.660913184

รูปที่ 3.20 ตัวอย่างค่าความเร่งที่เกิดขึ้นเชิงตัวเลข (ค่า X คือ แรงกระทำตามแนวราบ, ค่า Y คือ แรงกระทำในแนวตั้ง, ค่า Z คือ แรงกระทำด้านข้าง)

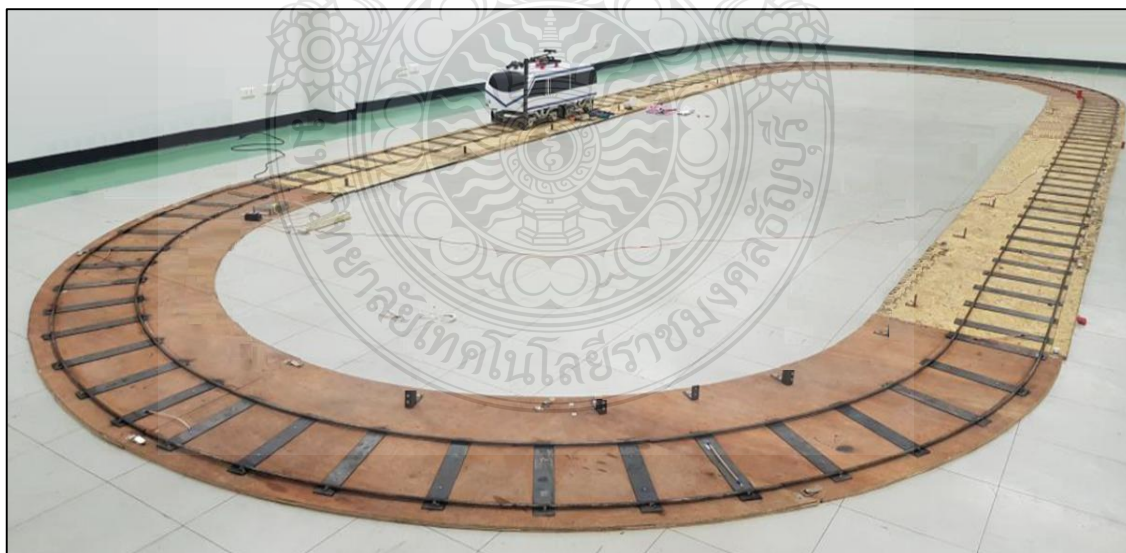
3.5 วิธีการหาแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่แบบความเร่ง

การทดลองการหาค่าแรงกระทำด้านข้างขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ จะอาศัยวิธีการใช้ความเร่งที่เปลี่ยนไปในทิศทางที่ต้องการ เพื่อนำกลับมาหาแรงกระทำ โดยมีการทดลองดังนี้

1) เตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลอง (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข) โดยรถไฟจำลองนี้จะมี 2 โบกี้ รวมเป็น 4 ชุดเพลาล้อ โดยขับเคลื่อนที่โบกี้หลัง เพลาล้อ น้ำหนักรวม 60 กิโลกรัม ส่วนทางรถไฟจำลองเป็นทางวิ่งวงมีทางตรง 6 เมตร และทางโค้งรัศมี 2 เมตร ดังรูปที่ 3.21



(ก) การเตรียมรถไฟจำลอง



(ข) การเตรียมทางรถไฟจำลอง

รูปที่ 3.21 การเตรียมรถไฟจำลองและทางรถไฟจำลอง

2) ทำการติดหัววัดความแรงไว้ที่แกนลัดปลึกปืนที่เพลาล้อหน้าของรถไฟจำลอง (โดยมีระยะห่างจากกึ่งกลางเพลาล้อรถไฟจำลองตามแนวราบ 50 มิลลิเมตรและระยะในแนวตั้งห่างไป 15 มิลลิเมตร รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก.2)

3) เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าด้วยกัน

4) เปิดการทำงานของเครื่องรับสัญญาณ

5) เปิดการทำงานและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

6) ควบคุมรถไฟจำลองให้เคลื่อนที่โดยมี 4 ระดับความเร็ว

7) บันทึกค่าความแรงที่เกิดขึ้นทั้งในทางตรงและทางโค้ง

8) ทำการรยกโค้งทางรถไฟจำลองประมาณ 1.7° , 3.4° , 5.1° ทางลาดชัน 2%, 3.5% ตามลำดับ และบันทึกค่าความแรงที่เกิดขึ้น โดยค่าความแรงที่บันทึกมีความละเอียดอยู่ที่ 1 วินาที บันทึกได้ 10 ค่า



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

เมื่อทำการทดลองการวัดแรงกระทำด้านข้างประกอบด้วยการวิ่งทางตรง ทางโค้ง การยก โค้ง และความลาดชัน ทั้งในขณะรถไฟจำลองหยุดนิ่งและเคลื่อนที่ โดยทำการเก็บค่าและบันทึกผลการทดลอง สำหรับการหาค่าแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองแบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรก จะทำการวัด ขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์ อิลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่งเท่านั้น สำหรับพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาจะแบ่งเป็นการยกโค้ง และความลาดเอียง โดยมีการเปรียบเทียบทางทฤษฎีระหว่างวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ ได้แบ่งการยกโค้งทางรถไฟเสมือนจริงเป็น 0, 30, 60, 90 มิลลิเมตร (0°, 1.7°, 3.4°, 5.1°) และแบ่งระดับความลาดเอียงทางรถไฟเสมือนจริงเป็น 0, 20, 35 เมตร (0%, 2%, 3.5%) นอกจากนี้ยังมีการประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยระหว่างและแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อ แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าว (Y/Q) ในทางตรงต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 ส่วนความเร็วสูงสุดที่ยอมให้รถไฟประเทศไทยผ่านโค้งได้เป็นไปตามสมการ $v_{max} = [(h + 50)R/8.338]^{1/2}$

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การหาค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

1) การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างทางทฤษฎีด้วยการคำนวณและโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ (FEM)

การเพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 1.7°, 3.4° และ 5.1° ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากสมการในบทที่ 2 สมการที่ 2.18 แรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากการคำนวณคือ 4.36 N, 8.72 N และ 13.1 N ตามลำดับ แรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ (FEM) คือ 4.27 N, 5.22 N และ 24.7 N ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะทีรถไฟจำลองหยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์

ความเอียงของการยกโค้ง ในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)	
	การคำนวณ ($mg \sin \theta$)	การวิเคราะห์ด้วย FEM ($\frac{mg}{\epsilon_{R1}} - \frac{mg \cos \theta}{\epsilon_{R2}}$)
0°	0	-
1.7°	4.36	4.27
3.4°	8.72	5.22
5.1°	13.1	24.7

2) การวัดแรงกระทำด้านข้างแบบความเครียด

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะทีรถไฟจำลองหยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวัดความเครียด

ความเอียงของการยกโค้ง ในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)	
	การคำนวณ ($mg \sin \theta$)	การวัดความเครียด ($\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R3}}$)
0°	0	-
1.7°	4.36	3.05
3.4°	8.72	10.5
5.1°	13.1	22.2

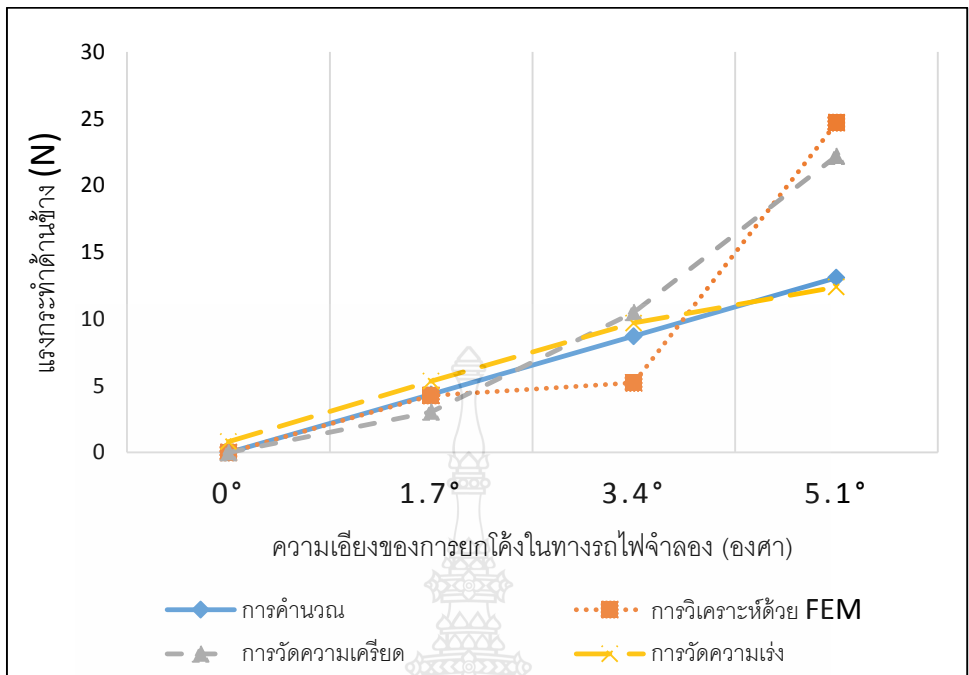
3) การวัดแรงกระทำด้านข้างแบบความเร่ง

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวัดความเร่ง

ความเอียงของการยกโค้ง ในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)	
	การคำนวณ ($mg \sin \theta$)	การวัดความเร่ง (ma)
0°	0	0.82
1.7°	4.36	5.35
3.4°	8.72	9.70
5.1°	13.1	12.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างแบบต่างๆ ในทางยกโค้งขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

ความเอียงของการยก โค้งในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)			
	การคำนวณ	การวิเคราะห์ ด้วย FEM	การวัด ความเครียด	การวัด ความเร่ง
0°	0	-	-	0.82
1.7°	4.36	4.27	3.05	5.35
3.4°	8.72	5.22	10.5	9.70
5.1°	13.1	24.7	22.2	12.4



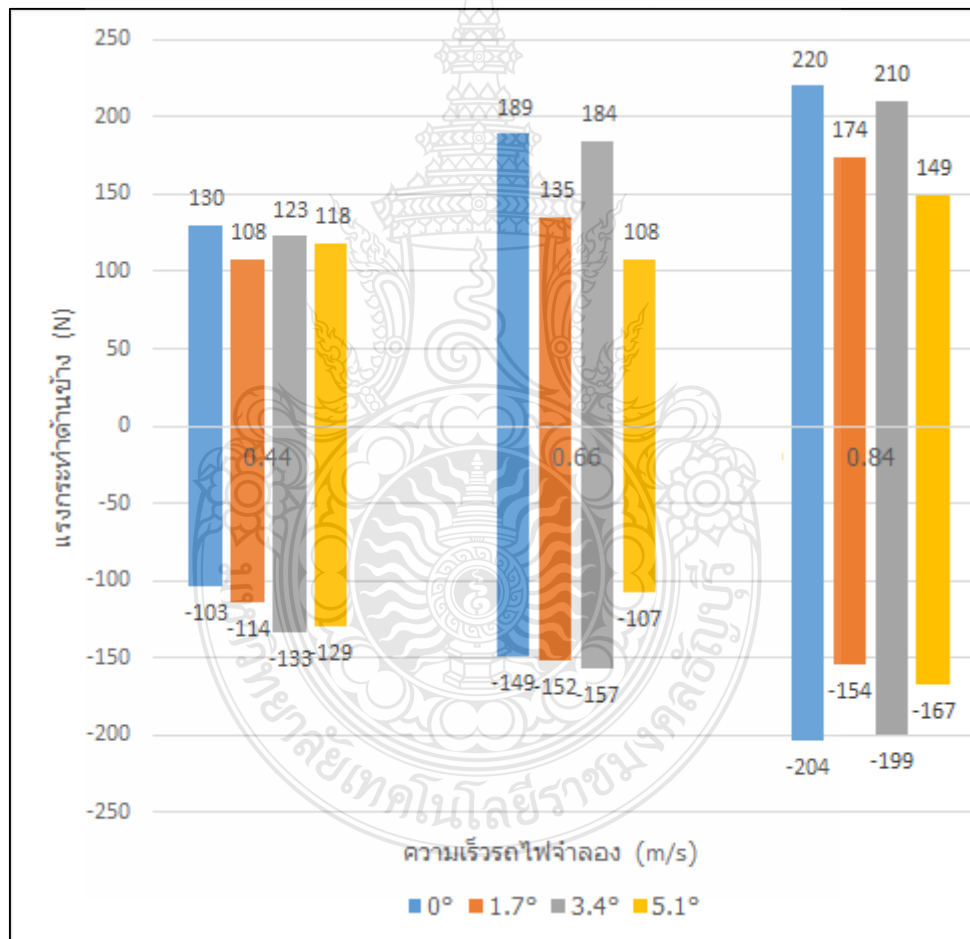
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างแบบต่างๆ ในทางยกโค้งขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

4.1.2 การหาค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

การเพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 0°, 1.7°, 3.4° และ 5.1° และความเร็วในการเข้าโค้งของรถไฟจำลอง ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ความเร็ว 0.84 m/s คือ -204 - 220 N, -154 - 174 N, -199 - 210 N และ -167 - 149 N ตามลำดับ ซึ่งแรงกระทำด้านข้างของโค้งด้านในจะมีค่าเป็นลบและแรงกระทำด้านข้างของโค้งด้านนอกจะมีค่าเป็นบวก ตัวแปรต้นในการทดลองคือความเร็วในการเข้าโค้งของรถไฟจำลอง ตัวแปรตามคือค่าช่วงของแรงกระทำด้านข้างในที่สุด และพารามิเตอร์คือความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง โดยช่วงของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 0° ที่ความเร็วรถไฟจำลอง 0.84 m/s คือ -204 - 220 N ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีการวัดความเร่งในทางโค้งมีการยกโค้ง ขณะทีรถไฟจำลองเคลื่อนที่

ความเอียงของการยก	ช่วงของแรงกระทำด้านข้างที่ความเร็ว (N)		
	0.44 (m/s)	0.66 (m/s)	0.84 (m/s)
โค้งในทางรถไฟจำลอง			
0°	-103 ถึง 130	-149 ถึง 189	-204 ถึง 220
1.7°	-114 ถึง 108	-152 ถึง 135	-154 ถึง 174
3.4°	-133 ถึง 123	-157 ถึง 184	-199 ถึง 210
5.1°	-129 ถึง 118	-107 ถึง 108	-167 ถึง 149



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีการวัดความเร่งในทางโค้งมีการยกโค้ง ขณะทีรถไฟจำลองเคลื่อนที่

4.1.3 การประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟจำลองเคลื่อนที่ในทางโค้งมีการยกโค้ง

การประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ จะเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยระหว่าง และแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อ แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าว (Y/Q) ของการวิ่งของรถไฟในทางตรงต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 ส่วนความเร็วสูงสุดที่ยอมให้รถไฟประเทศไทยผ่านโค้งได้เป็นไปตามสมการที่ 2.10 $v_{max} = [(h + 50)R/8.338]^{1/2}$

การเพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 0° , 1.7° , 3.4° และ 5.1° และความเร็วในการเข้าโค้งของรถไฟจำลอง ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากสมการที่ 2.10 สามารถคำนวณความเร็วต่ำสุดและสูงสุดที่ยอมให้รถไฟจำลองผ่านโค้งได้คือ 0.96 m/s และ 1.16 m/s ตามลำดับ แต่ความเร็วสูงสุดที่รถไฟจำลองผ่านโค้งคือ 0.84 m/s ซึ่งไม่ทำให้รถไฟจำลองตกวางทั้งในการทดลองและทางทฤษฎี และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N เช่น ที่ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 5.1° จะได้ $h = 22.22 \text{ mm}$, $R = 2 \text{ m}$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.10 $v_{max} = [(h + 50)R/8.338]^{1/2}$ จะได้ความเร็วสูงสุดที่ยอมให้รถไฟจำลองผ่านโค้งได้คือ 1.16 m/s

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของรถไฟจำลองในความเร็วที่ยอมให้ผ่านโค้งในทางโค้งมีการยกโค้ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

ความเอียงของการยก โค้งในทางรถไฟจำลอง	ความเร็วที่ยอมให้ผ่านโค้ง (m/s)		ผลการทดลอง
	การคำนวณ	การทดลอง	
0°	0.96	0.84	ไม่ตกวาง
1.7°	1.03	0.84	ไม่ตกวาง
3.4°	1.10	0.84	ไม่ตกวาง
5.1°	1.16	0.84	ไม่ตกวาง

ตารางที่ 4.7 การประเมินค่าความปลอดภัยของรถไฟจำลองเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.84 m/s ในทางโค้งที่มีการยกโค้ง

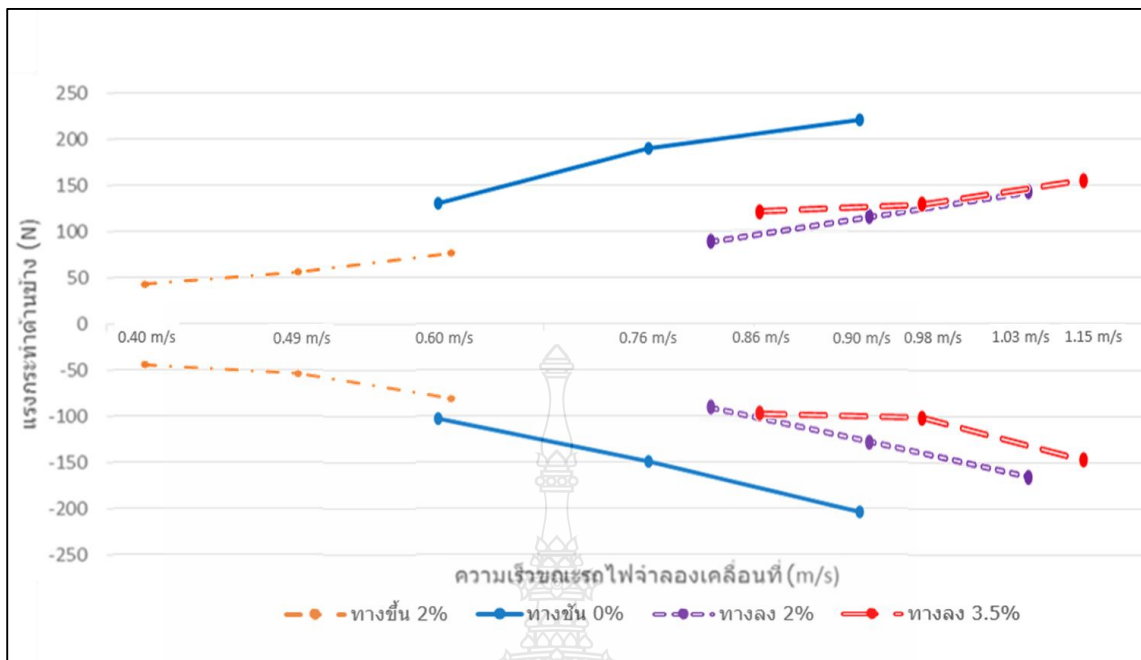
ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (Y)	อัตราส่วนความปลอดภัย (Y/Q)	การประเมินค่าความปลอดภัย
0°	220	1.50	เกินเกณฑ์
1.7°	174	1.18	อยู่ในเกณฑ์
3.4°	210	1.43	เกินเกณฑ์
5.1°	167	1.14	อยู่ในเกณฑ์

4.1.4 การหาค่าแรงกระทำด้านข้างในการวิ่งทางตรงด้วยวิธีการวัดแบบความเร่ง

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบช่วงของค่าแรงกระทำด้านข้างในการวิ่งทางตรงด้วยวิธีการวัดแบบความเร่ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ที่ความชันต่างๆ

รถไฟจำลองเคลื่อนที่ในทางตรงที่ทางชัน	ความเร็วขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่ (m/s)	ช่วงของค่าแรงกระทำด้านข้าง (N)
0%	0.60 m/s	-103 - 130
	0.76 m/s	-149 - 189
	0.89 m/s	-204 - 220
ขึ้น 2%	0.40 m/s	-44 - 42
	0.49 m/s	-53 - 55
	0.69 m/s	-80 - 75
ขึ้น 3.5%	N/A	N/A
ลง 2%	0.80 m/s	-87 - 88
	0.90 m/s	-124 - 114
	1.03 m/s	-161 - 140
ลง 3.5%	0.86 m/s	-96 - 118
	0.98 m/s	-110 - 126
	1.15 m/s	-146 - 151

N/A หมายถึง ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบช่วงของค่าแรงกระทำด้านข้างในการวิ่งทางตรงด้วยวิธีการวัดแบบความเร่งขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ที่ความชันต่างๆ

เมื่อรถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้นในทางตรงมีความชันพบว่า การเพิ่มความชันในทางรถไฟจำลอง ทำให้ความเร็วรถไฟจำลองลดลง ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองลดลงตามไปด้วย เช่น ในความเร็วรถไฟจำลองระดับที่ 2 ความชัน 0% ความเร็วรถไฟจำลองคือ 0.76 m/s ที่ความชัน 2% ความเร็วรถไฟจำลองลดลงคือ 0.49 m/s เนื่องจากกระแสไฟที่จ่ายไปขับเคลื่อนรถไฟจำลองมีภาระโหลดเพิ่มมากขึ้นในทางขึ้นชัน และในทางขึ้นความชัน 3.5 % ล้อรถไฟจำลองจะหมุนฟรีเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างล้อและรางรถไฟจำลองไม่เพียงพอที่จะทำให้รถไฟจำลองเคลื่อนที่ได้ และเมื่อรถไฟจำลองเคลื่อนที่ลงในทางตรงมีความชันพบว่า การลดความชันในทางรถไฟจำลอง ทำให้ความเร็วรถไฟจำลองเพิ่มขึ้น ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่น ในความเร็วรถไฟจำลองระดับที่ 2 ความชัน 0% ความเร็วรถไฟจำลองคือ 0.76 m/s ที่ความชัน 3.5% ความเร็วรถไฟจำลองเพิ่มขึ้นเป็น 0.98 m/s เนื่องจากกระแสไฟที่จ่ายไปขับเคลื่อนรถไฟจำลองมีภาระโหลดลดลงในทางลงชันและยังมีแรงจากน้ำหนักรถไฟจำลองที่เคลื่อนที่ลง แต่ช่วงของค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุด -204 - 220 N จะอยู่ที่ความชัน 0% ความเร็วรถไฟจำลองระดับที่ 3 ที่ความเร็ว 0.89 m/s

4.2 การวิเคราะห์ผล

จากการทดลองขณะรถไฟจำลองหยุดนิ่งพบว่า การเพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 1.7° , 3.4° และ 5.1° ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากการวัดความเครียดและการวัดความเร่งมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่ในทางโค้งมีการยกโค้งพบว่า การเพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 0° , 1.7° , 3.4° และ 5.1° และความเร็วในการเข้าโค้งของรถไฟจำลองทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ความเร็วต่ำสุดและสูงสุดที่ยอมให้รถไฟจำลองผ่านโค้งได้คือ 0.96 m/s และ 1.16 m/s ตามลำดับ แต่ความเร็วสูงสุดที่รถไฟจำลองผ่านโค้งคือ 0.84 m/s ซึ่งไม่ทำให้รถไฟจำลองตกรางทั้งในการทดลองและทางทฤษฎี และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N เมื่อรถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้นในทางตรงมีความชันพบว่า การเพิ่มความชันในทางรถไฟจำลองที่ 0% และ 2% ทำให้ความเร็วรถไฟจำลองลดลง ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟลดลงตามไปด้วย ในทางตรงมีความชัน 0% ที่รถไฟจำลองมีความเร็ว 0.89 m/s และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N และเมื่อรถไฟจำลองเคลื่อนที่ลงในทางตรงมีความชันพบว่า การลดความชันในทางรถไฟจำลองที่ 0% , 2% และ 3.5% ทำให้ความเร็วรถไฟจำลองเพิ่มขึ้น ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางตรงมีความชัน 0% ที่รถไฟจำลองมีความเร็วสูงสุดที่ 0.89 m/s และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N จากการทดลองขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่จะเห็นว่าอัตราความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟจำลองคือ 1.5 ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการตกรางสูงมาก โดยตัวแปรหลักที่มีผลต่อการตกรางของรถไฟคืออัตราส่วนความปลอดภัย (Y/Q)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ แบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกจะทำการวัด ขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง จะมีวิธีการวัด 2 แบบคือวิธีการวัดความเครียดและการวัดความเร่ง โดยมีการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีทั้งวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนกรณีที่สองจะทำการวัดขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่จะอาศัยวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟแบบความเร่งเท่านั้น

จากผลการทดลองในขณะรถไฟจำลองหยุดนิ่งพบว่า แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองสูงสุดจากการวัดความเครียดและการวัดความเร่งคือ 22.2 N และ 12.4 N ตามลำดับ แรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดจากการคำนวณและจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คือ 13.1 N และ 24.7 N ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี

การทดลองขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่ในทางโค้งมีการยกโค้งพบว่า การเพิ่มความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลองที่ 0° , 1.7° , 3.4° และ 5.1° และความเร็วในการเข้าโค้งของรถไฟจำลองทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ความเร็วต่ำสุดและสูงสุดที่ยอมให้รถไฟจำลองผ่านโค้งได้คือ 0.96 m/s และ 1.16 m/s ตามลำดับ แต่ความเร็วสูงสุดที่รถไฟจำลองผ่านโค้งคือ 0.84 m/s ซึ่งไม่ทำให้รถไฟจำลองตกแรงทั้งในการทดลองและทางทฤษฎี และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N

เมื่อรถไฟจำลองเคลื่อนที่ขึ้นในทางตรงมีความชันพบว่า การเพิ่มความชันในทางรถไฟจำลองที่ 0% และ 2% ทำให้ความเร็วรถไฟจำลองลดลง ทำให้แรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟลดลงตามไปด้วย ในทางตรงมีความชัน 0% ที่รถไฟจำลองมีความเร็วสูงสุดที่ 0.89 m/s และมีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N

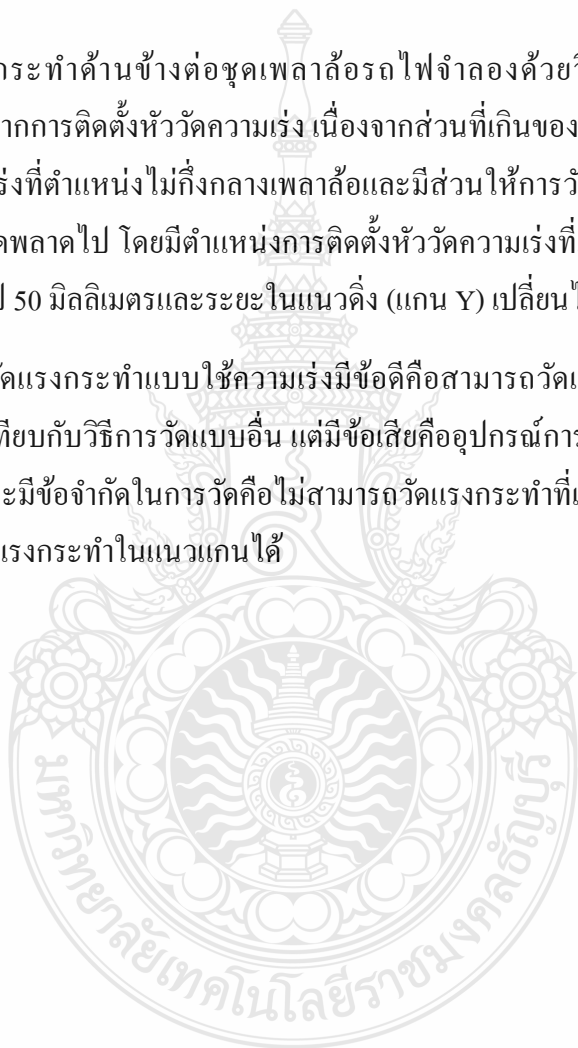
และเมื่อรถไฟจำลองเคลื่อนที่ลงในทางตรงมีความชันพบว่า การลดความชันในทางรถไฟจำลองที่ 0%, 2% และ 3.5% ทำให้ความเร็วรถไฟจำลองเพิ่มขึ้น และแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยความเร็วรถไฟจำลองสูงสุดคือ 1.15 m/s แต่ในทางตรงมีความชัน 0% ที่รถไฟจำลองมีความเร็ว 0.89 m/s มีแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคือ 220 N

จากการทดลองขณะรถไฟจำลองเคลื่อนที่จะเห็นได้ว่า แรงกระทำด้านข้างอยู่ที่ 220 N เมื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนความปลอดภัยของการวิ่งของแบบจำลองจะได้ค่าประมาณ 1.5 ซึ่งสูงกว่าค่ากำหนดตามมาตรฐาน 1.2 ทั้งที่แบบจำลองสามารถวิ่งผ่านทางโค้งได้โดยไม่ตกรางซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการวัดค่าแรงกระทำด้านข้างที่ได้คาดเคลื่อนสูงกว่าความเป็นจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาสีออร์รถไฟจำลองด้วยวิธีการวัดความเร่ง อาจมีข้อผิดพลาดในการวัดจากการติดตั้งหัววัดความเร่ง เนื่องจากส่วนที่เกินของเพลาสีออร์ไฟจำลอง ทำให้ต้องติดตั้งหัววัดความเร่งที่ตำแหน่งไม่กึ่งกลางเพลาสีออร์และมีส่วนให้การวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาสีออร์ไฟจำลองผิดพลาดไป โดยมีตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เปลี่ยนไปคือระยะตามแนวราบ (แกน X) เปลี่ยนไป 50 มิลลิเมตรและระยะในแนวตั้ง (แกน Y) เปลี่ยนไป 15 มิลลิเมตร

และวิธีการวัดแรงกระทำแบบใช้ความเร่งมีข้อดีคือสามารถวัดแรงกระทำได้อย่างต่อเนื่องและความแม่นยำ เมื่อเทียบกับวิธีการวัดแบบอื่น แต่มีข้อเสียคืออุปกรณ์การวัดไม่เหมาะกับการใช้งานในที่ที่มีความชื้นสูง และมีข้อจำกัดในการวัดคือไม่สามารถวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้แม่นยำหากลูกปืนเพลาสีออร์ไฟมีการรับแรงกระทำในแนวแกนได้



บรรณานุกรม

- [1] Italian-Thai Development Public co.ltd, (2012-2016) MRT Purple Line Project Bang Yai to Rat Burana Bang Yai to Bang Sue Section, Contact 4, Annex 5, Part 2, Section 1-Part A, “Detailed Particular Specifications: Section 1 Rolling Stock” pp. 4-5.
- [2] นคร จันทรร (2554). Cant and Gauge widening, ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ, กรุงเทพฯ: โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- [3] มานะชัย วัฒนหัตถกรรม (2556). ระบบควบคุมรถไฟและการอาณัติสัญญาณเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : บริษัท จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด, 2556.
- [4] บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท จำกัด (2558). ประวัติรถไฟฟ้า ARL, สืบค้นจาก <http://www.srtet.co.th/th/index.html>
- [5] Thairath News. รถไฟตกราง, สืบค้นจาก <https://www.thairath.co.th>
- [6] Roland Muller, Eckhard Scheunemann (2015). Rolling Stock Engineering 1, Intensive course in rolling stock engineering 1, July 2015.
- [7] Myung Su Kim, Geo Young Kim, Hyun Tae Kim and Jeong Seo Koo (2018). Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects, Journal of Mechanical Science and Technology, April 2016, pp. 3487~3498.
- [8] อรรถพล เก่าประเสริฐ (2559). โครงสร้างและส่วนประกอบทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง, งานโยธาและทางรถไฟ (Civil and Track Works), โครงการพัฒนานุเคราะห์เพื่อรองรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมระบบขนส่งทางราง 4 ภูมิภาค.
- [9] Joseph Kalousek (2005). Wheel/rail damage and its relationship to track curvature, Journal of science direct, November 2004, Wear 258, pp. 1330-1335.
- [10] Wichai Siwakosit. Curving Behavior of a Simple Wheelset, Rolling Stock Technology: Introduction to Vehicle Dynamics 1

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Akira Matsumoto, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Makoto Shimizu, Jun Kurihara, Takuya Saitou, Yohei Michitsuji, Ryo Matsui, Masuhisa Tanimoto, Masa-aki Mizuno (2014). Actual states of wheel/rail contact forces and friction on sharp curves - Continuous monitoring from in-service trains and numerical simulations, Journal of science direct, December 2013, Wear 314, pp. 189-197.
- [12] Jing Zeng, Pingbo Wu (2008). Study on the wheel/rail interaction and derailment Safety, Journal of science direct, June 2008, Wear 265, pp. 1452-2459.
- [13] J. Snatamaria, E.G. Vadillo, J. Gomez (2009), Influence of creep forces on the risk of derailment of railway vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol. 47, June 2009, pp. 721-752.
- [14] UIC 518 (2005). Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior-Safety-Track fatigue-Ride quality, 3st edition, International union of railway.
- [15] รศ.ดร. ชาวสวน กาญจโนมัย. อุปกรณ์วัดความเครียด (strain gage), ME 301 Mechanical Engineering Laboratory I.
- [16] Akira Matsumoto, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Masao Tomeoka, Kosuke Matsumoto, Jun Kurihara, Tomohisa Ogino, Masuhisa Tanimoto, Yasushi Kishimoto, Yoshi Sato, Takuji Nakaid (2008). A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations, Journal of science direct, June 2008, Wear 265, pp. 1518-1525.
- [17] Akira Matsumoto, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Masao Tomeoka, Kosuke Matsumoto, Jun Kurihara, Tomohisa Ogino, Masuhisa Tanimot, Yasushi Kishimoto, Yoshi Sato\$, Takuji Nakai (2006). A New Monitoring Method of Train Derailment Coefficient, IEEE Xplore, December 2006.
- [18] A.Pieringer (2014). A numerical investigation of curve squeal in the case of constant wheel/rail friction, Journal of science direct, May 2014, Sound and Vibration 333, pp. 4295-4313.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] Bikiron Hazarika and Monsak Pimsarn (2016). A simple contact point finding algorithm for determination of contact parameters, The 3rd Thailand Rail Academic Symposium, September 2016.
- [20] Silvia Magheri, Monica Malvezzi, Enrico Meli, Andrea Rindi (2011). An innovative wheel–rail contact model for multibody applications, Journal of science direct, October 2010, Wear 271, pp. 462-471.
- [21] Ali Asadi Lari, Ajay Kapoor (2008). An investigation to the influence of bogie direction reversal on equalizing rail vehicle wheel wear, Journal of science direct, October 2007, Wear 265, pp. 65-71.
- [22] Brian Marquis, Robert Greif (2011). APPLICATION OF NADAL LIMIT IN THE PREDICTION OF WHEEL CLIMB DERAILMENT, IEEE Xplore, March 2011.
- [23] B. Kurzeck (2011). Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation, Journal of science direct, October 2010, Wear 271, pp. 299-310.
- [24] Akira Matsumoto , Yasuhiro Sato , Hiroyuki Ohno , Makoto Shimizu , Jun Kurihara , Masao Tomeoka, Takuya Saitou , Yohei Michitsuji , Masuhisa, Tanimoto , Yoshi Sato & Masaaki Mizuno (2018). Continuous observation of wheel/rail contact forces in curved track and theoretical considerations. Vehicle System Dynamics, Vol. 50, Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, July 2012, pp. 349-364.
- [25] M. Ignesti, M. Malvezzi, L. Marini, E. Melia, A. Rindi: (2012). Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems, Journal of science direct, January 2012, Wear 284-285, pp. 1-17.
- [26] Per Gullers, Lars Andersson, Roger Lunden: (2008). High-frequency vertical wheel–rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities, Journal of science direct, May 2008, Wear 265, pp. 1472-1478.

บรรณานุกรม (ต่อ)

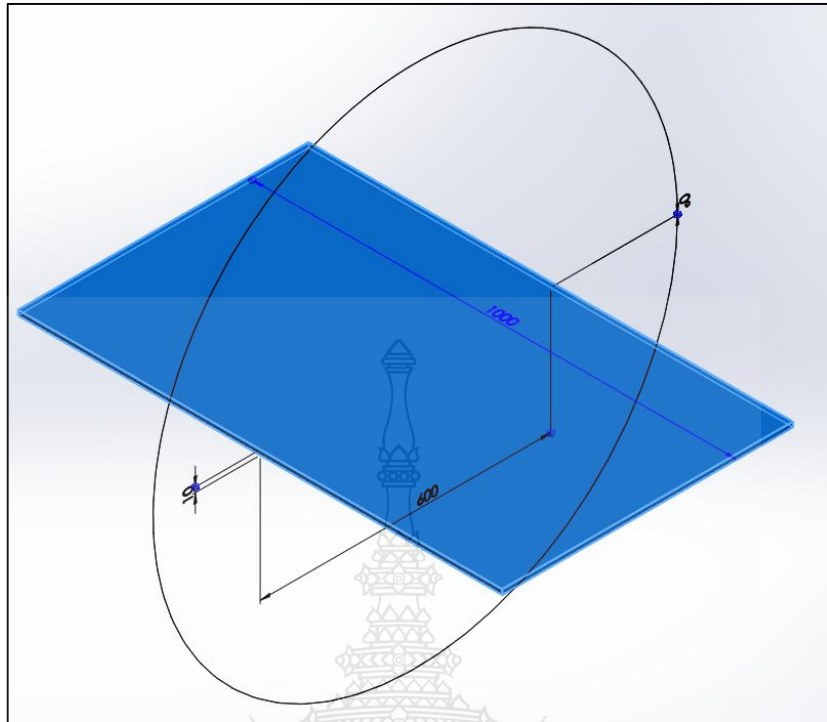
- [27] Hiroaki Ishida, Masaki Mutsuo, Kazuhiko Tezuka, Kenji Ueki: (1997). Method of measuring wheel and rail contact force and derailment quotients continuously
- [28] กัณฑ์พงษ์ ไม้สุขจิตร, พิชชา วชิโรปถัมภ์, บุญชัย แสงเพชรงาม (2016). การศึกษาอัตราการใช้หรือของทางรถไฟจากอิทธิพลตัวแปรน้ำหนักบรรทุกและพื้นทาง, The 3rd Thailand Rail Academic Symposium, September 2016.
- [29] สุเทพ แร่อ่อน, มนต์ศักดิ์ พิมสาร (2016). ผลของมุมเอียงรางต่อความเค้นสัมผัสกึ่งระหว่างล้อและราง, The 3rd Thailand Rail Academic Symposium, September 2016
- [30] Thana Phuphuakrat, Kitiphath Chaksoong, Kummun Choopraserd, Wichai Siwakosit (2016). Effects of Wheel-Rail Interactions of the Unworn and Worn SRT Vidura Wheel Profiles and a BS 100 A Rail Profile to the Tangent Track Wheelset Lateral Dynamic and Wear Indexes, The 3rd Thailand Rail Academic Symposium, September 2016.
- [31] Daniel Baldovin, Simona Baldovin (2012). HUNTING MOTION OF THE HIGH SPEED RAILWAY BOGIES WITH INTERCONNECTION AXLES.
- [32] Hiromichi Kanehara, Takehiko Fujioka: (2002). Measuring rail/wheel contact points of running railway vehicles, Journal of science direct, 2002, Wear 253, pp. 275-283.
- [33] Jay P. Monaco (2014). Performance Characteristics for Freight Car Bogies, Heavy Haul Seminar, May 2014.
- [34] T. Michalek, J. Zelenka: (2011). Reduction of lateral forces between the railway vehicle and the track in small-radius curves by means of active elements, Applied and Computational Mechanics 5, December 2011, pp. 187-196.
- [35] Stuart L. Grassie, John A. Elkins: (2005). Tractive effort, curving and surface damage of rails Part 1. Forces exerted on the rails, Journal of science direct, November 2004, Wear 258, pp. 1235-1244.



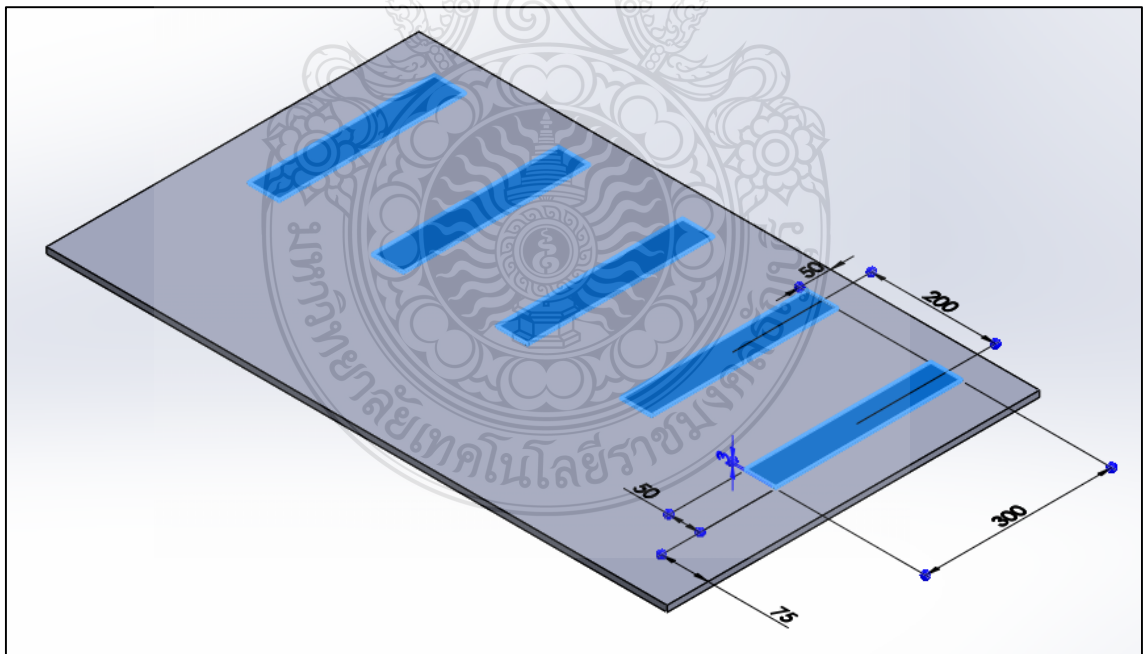
ภาคผนวก ก

การสร้างชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้าง
ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์

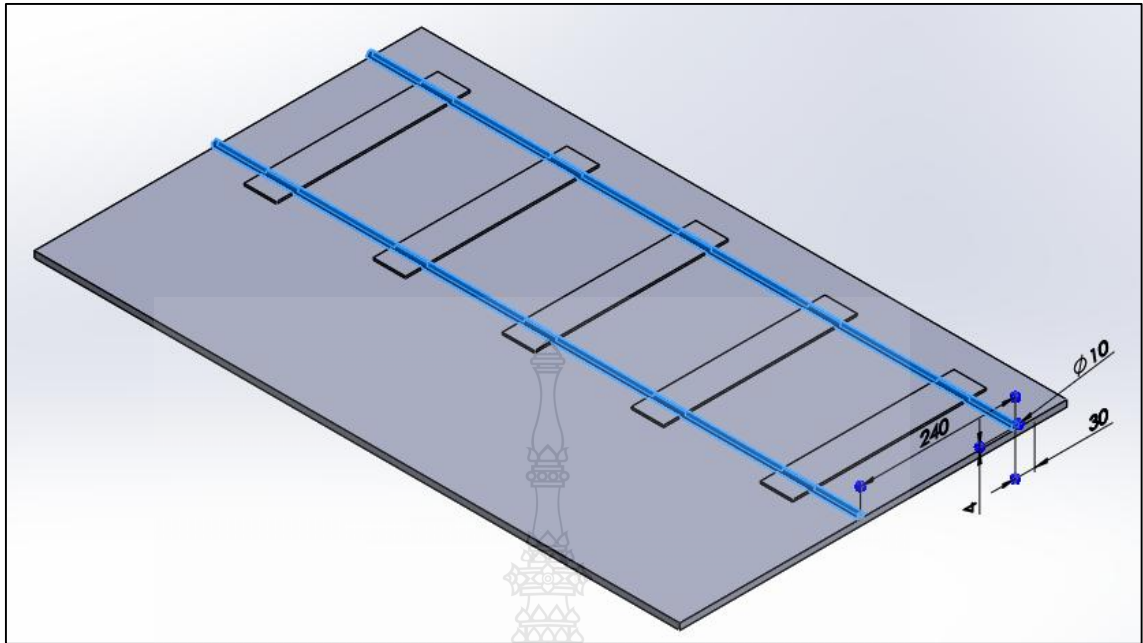




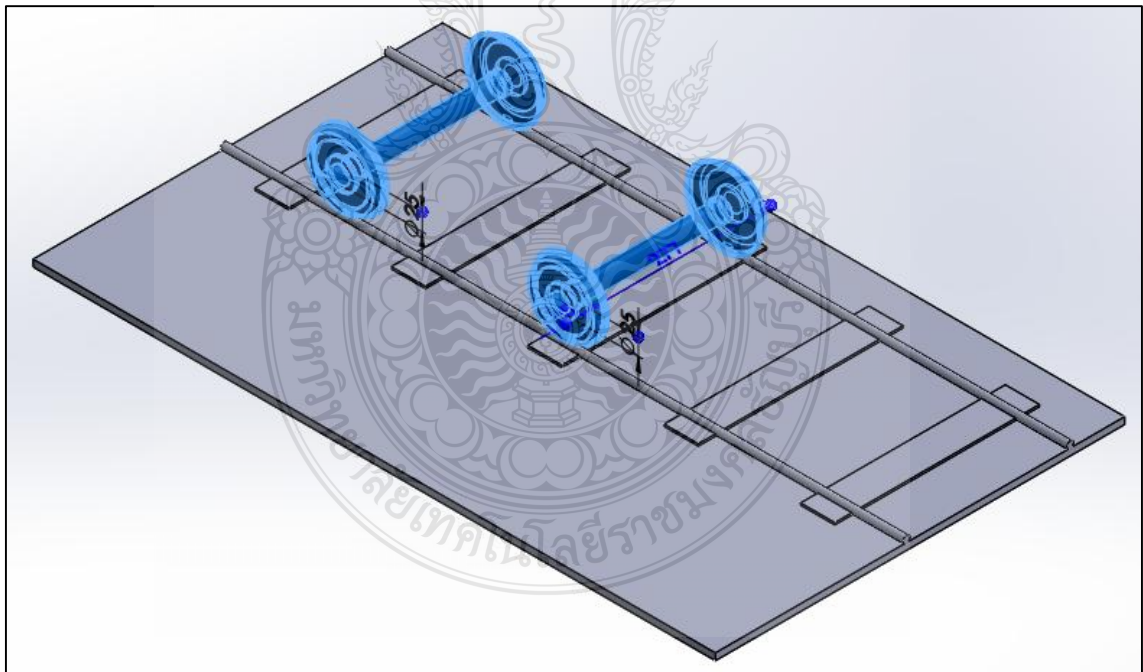
รูปที่ ก.1 พื้นทางรถไฟจำลองไม่มีมุมเอียง



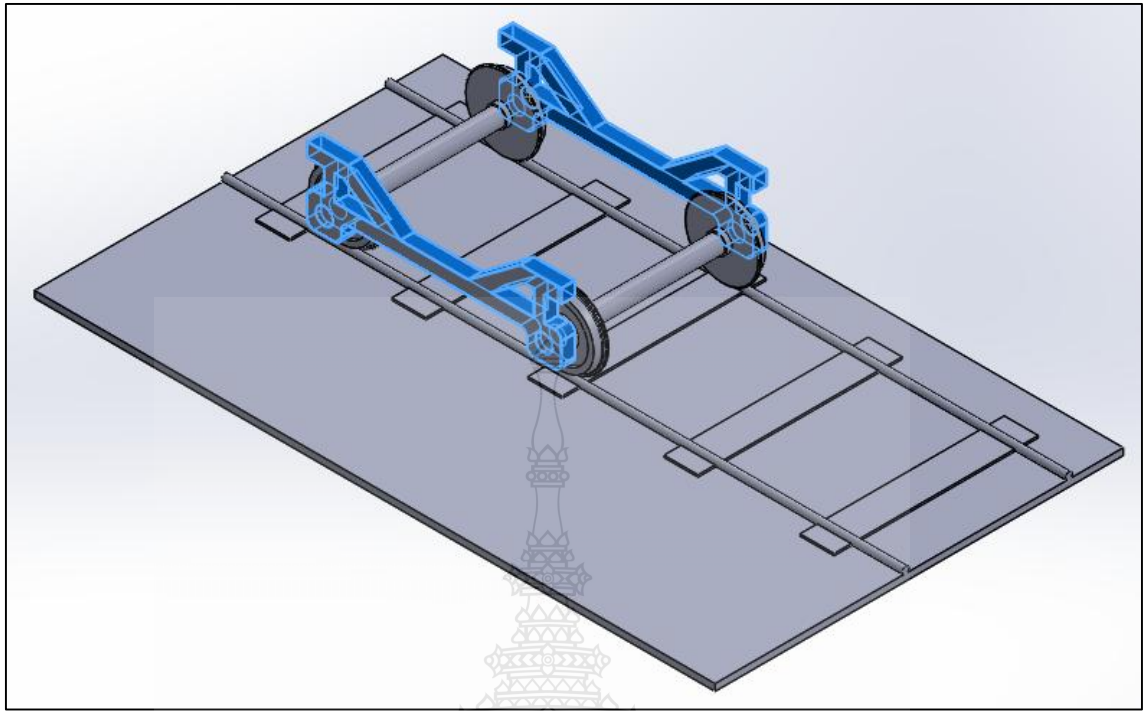
รูปที่ ก.2 หมอนรองรางรถไฟจำลอง



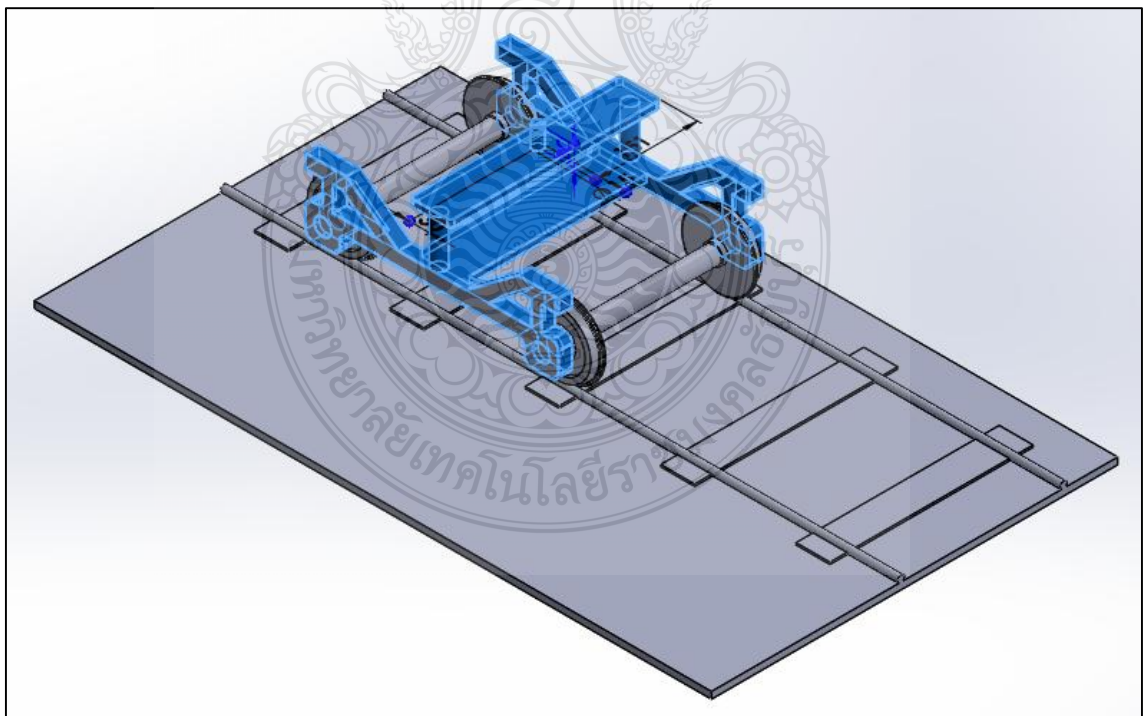
รูปที่ ก.3 รางรถไฟจำลอง



รูปที่ ก.4 ล้อและเพลาโบกี้รถไฟจำลอง

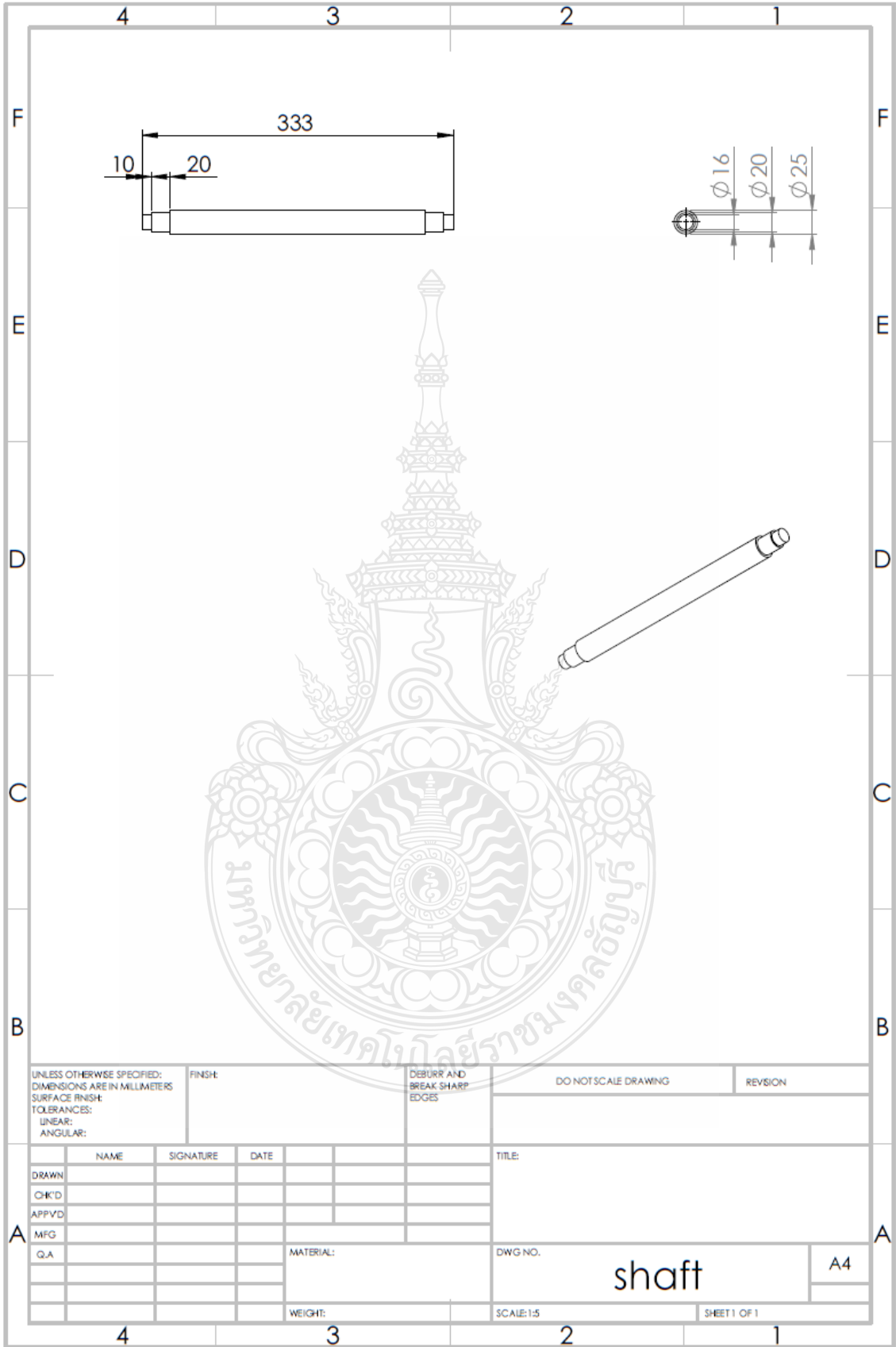


รูปที่ ก.5 โครงจับล้อของโบกี้รถไฟจำลอง



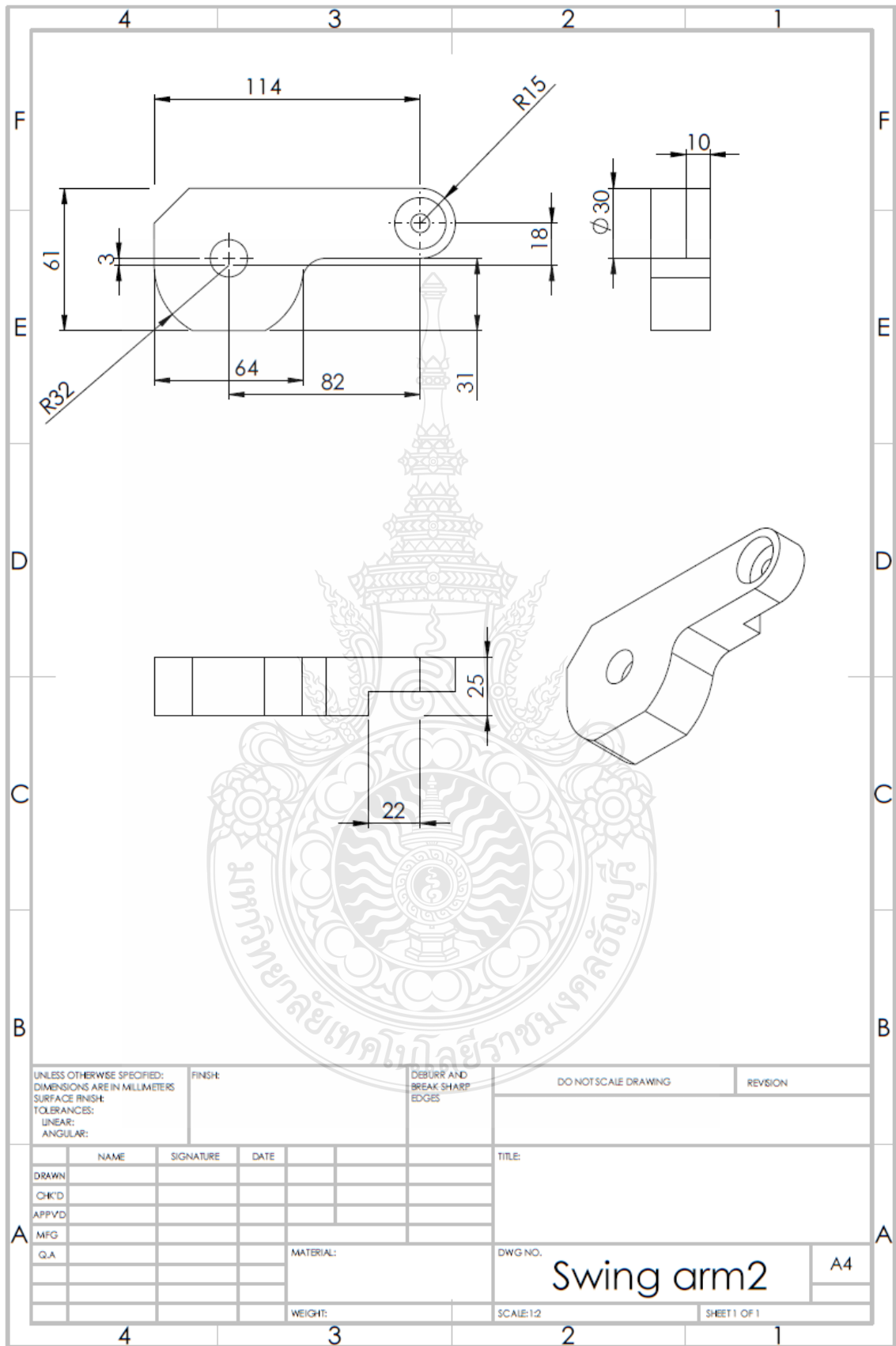
รูปที่ ก.6 โครงประธานของโบกี้รถไฟจำลอง





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		SIGNATURE	DATE	TITLE:	
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A		MATERIAL:		DWG NO.	A4
		WEIGHT:		SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1

shaft



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

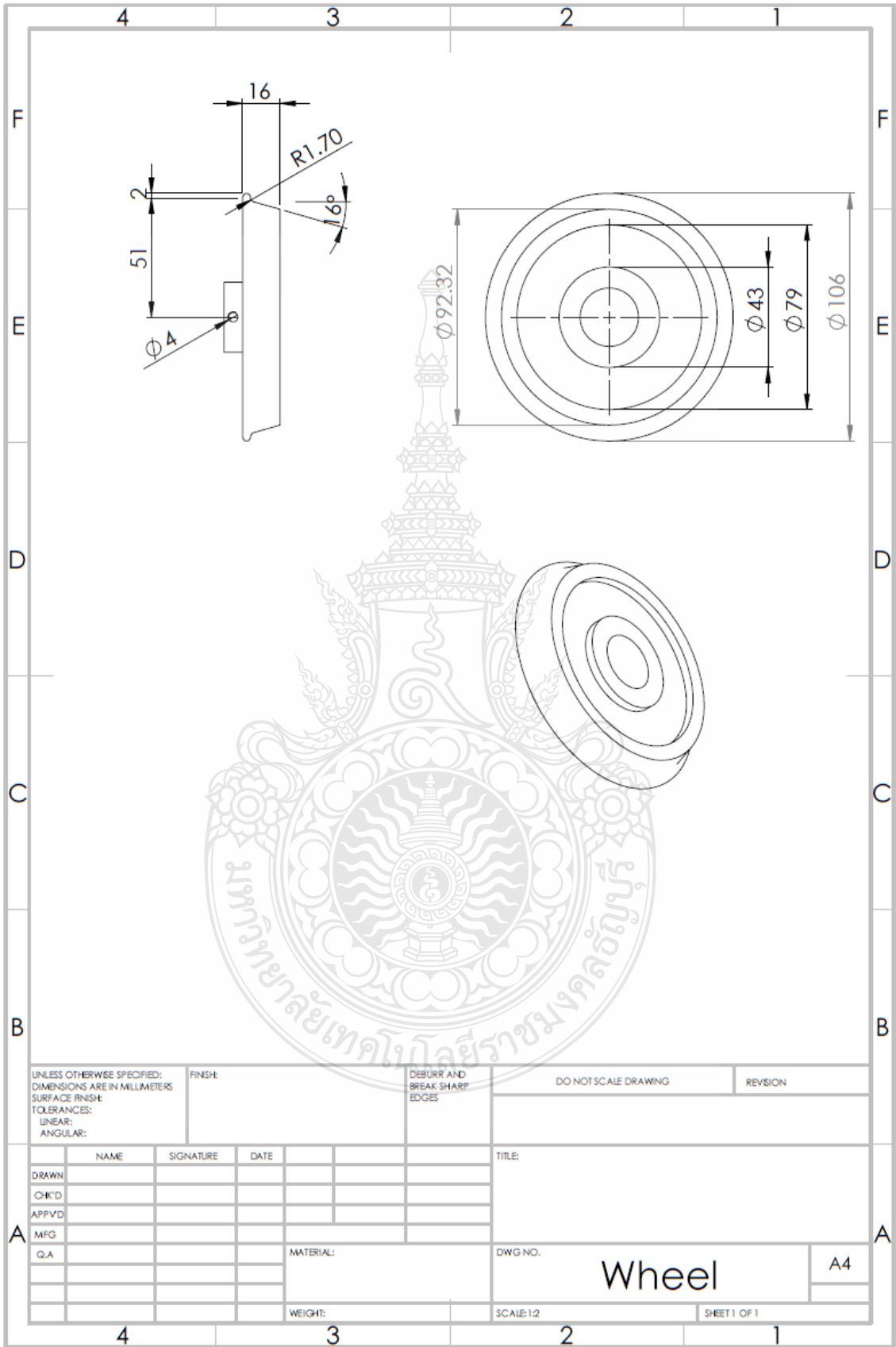
	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A					

TITLE:	
DWG NO.	Swing arm2
SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

MATERIAL:

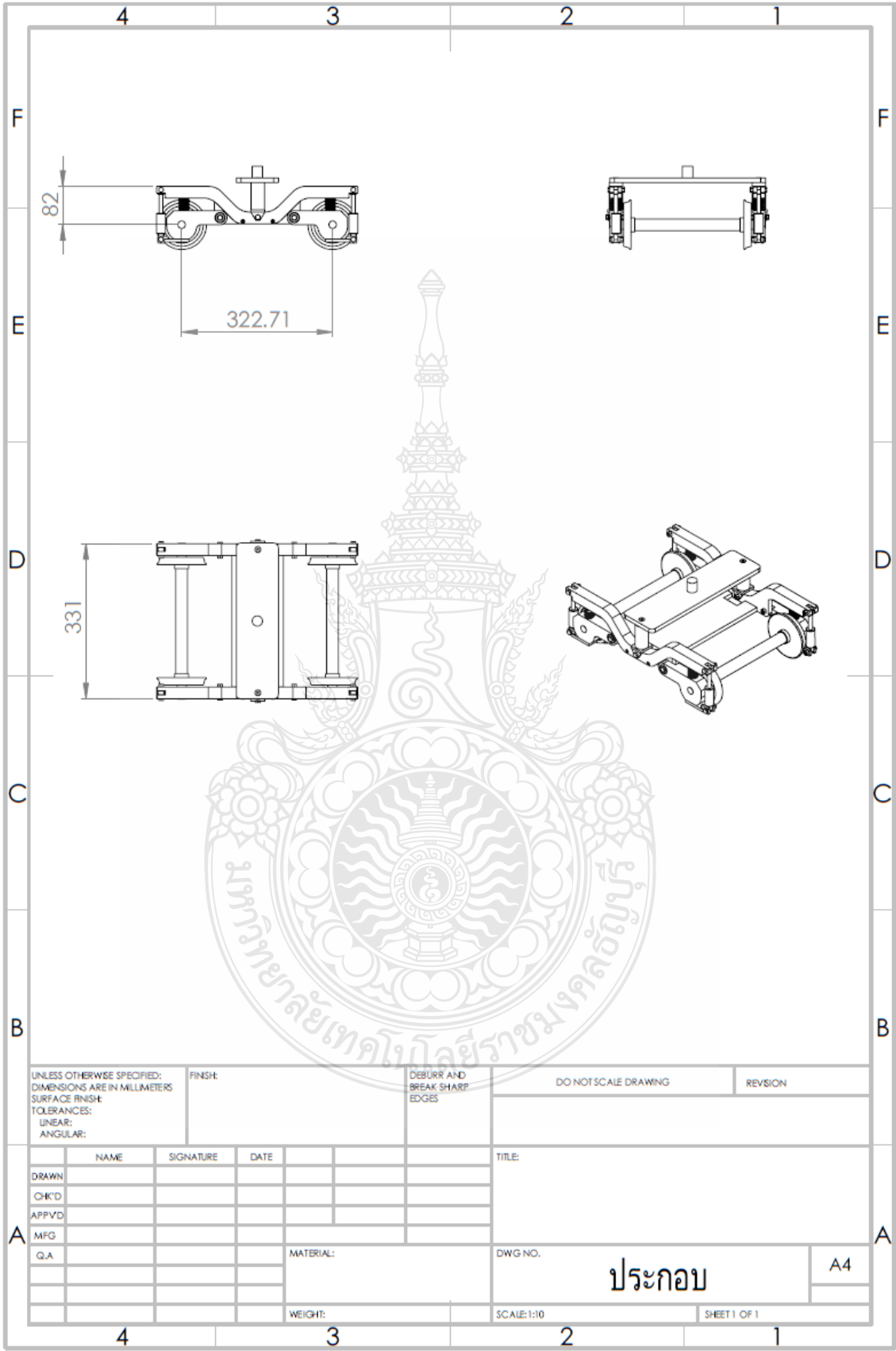
WEIGHT:

A4



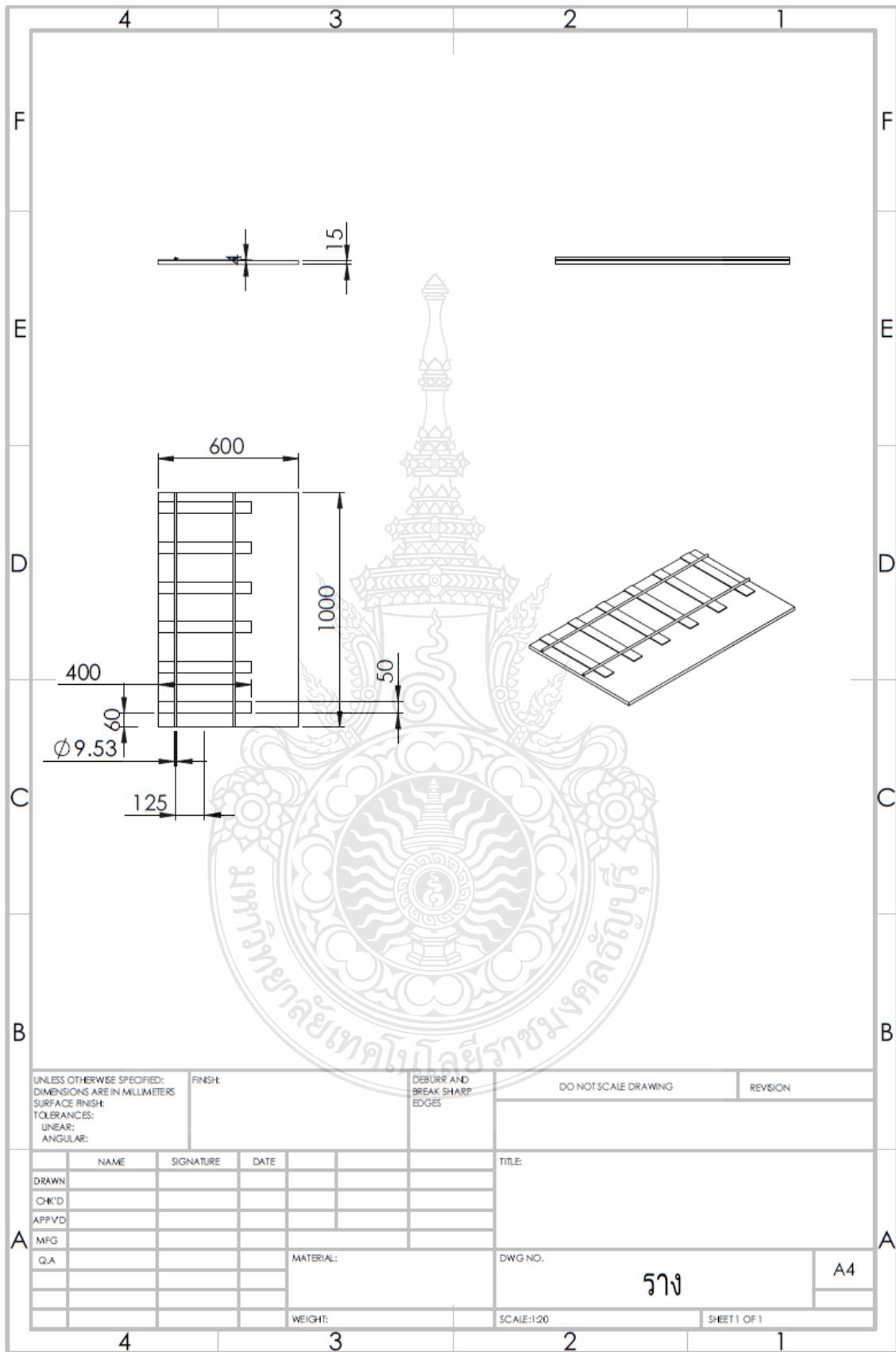
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		SIGNATURE	DATE	TITLE:	
CHK'D					
APP'VD					
MFG					
Q.A		MATERIAL:		DWG NO.	A4
		WEIGHT:		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

Wheel

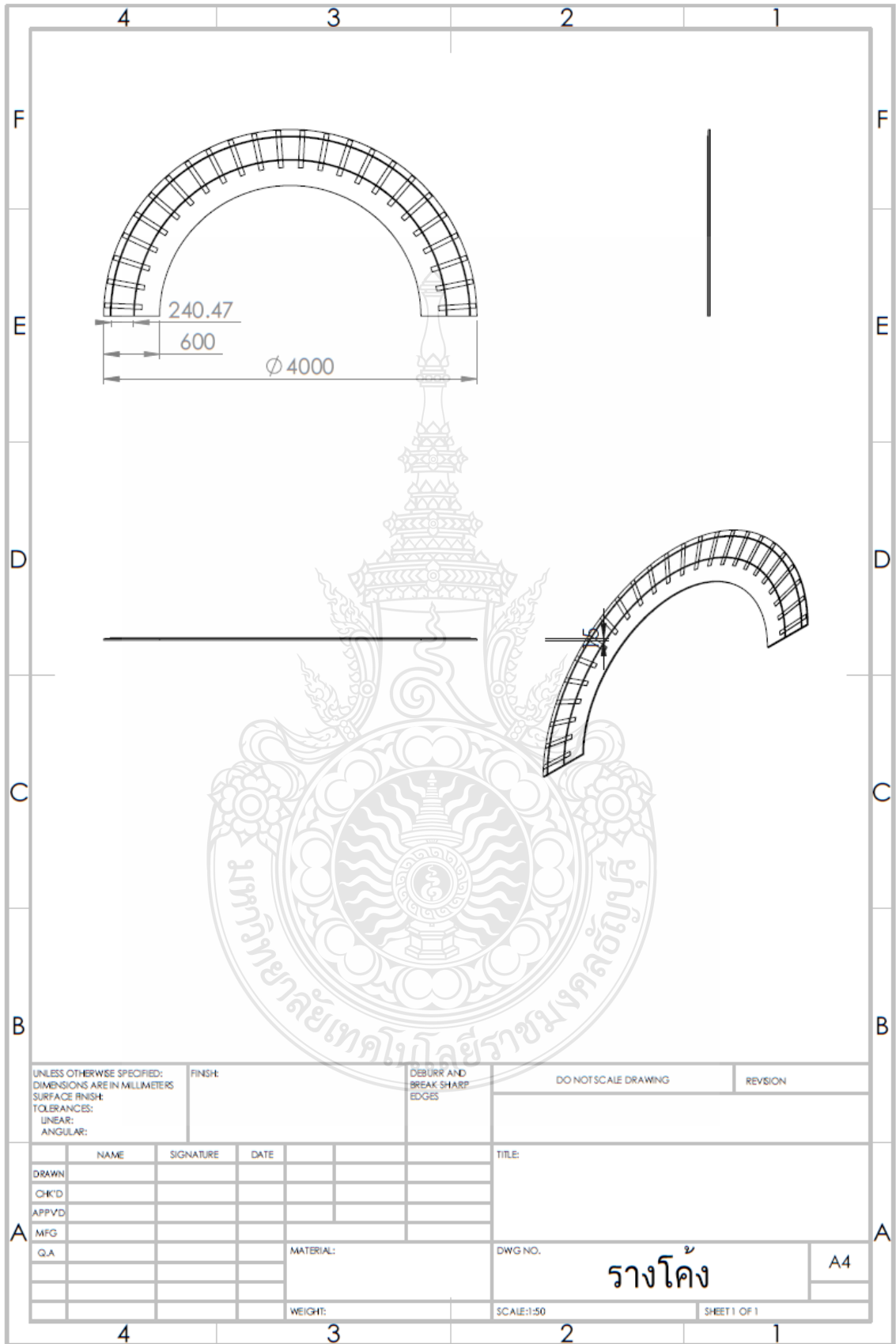


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		SIGNATURE	DATE	TITLE:		
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A		MATERIAL:		DWG NO.	A4	
		WEIGHT:		SCALE: 1:10	SHEET 1 OF 1	

ประกอบ




UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		TOLERANCES:		LINEAR:		ANGULAR:			
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						577			
				WEIGHT:		SCALE:1:20		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:	
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A		MATERIAL:			DWG NO.	A4
		WEIGHT:			SCALE:1:50	SHEET 1 OF 1

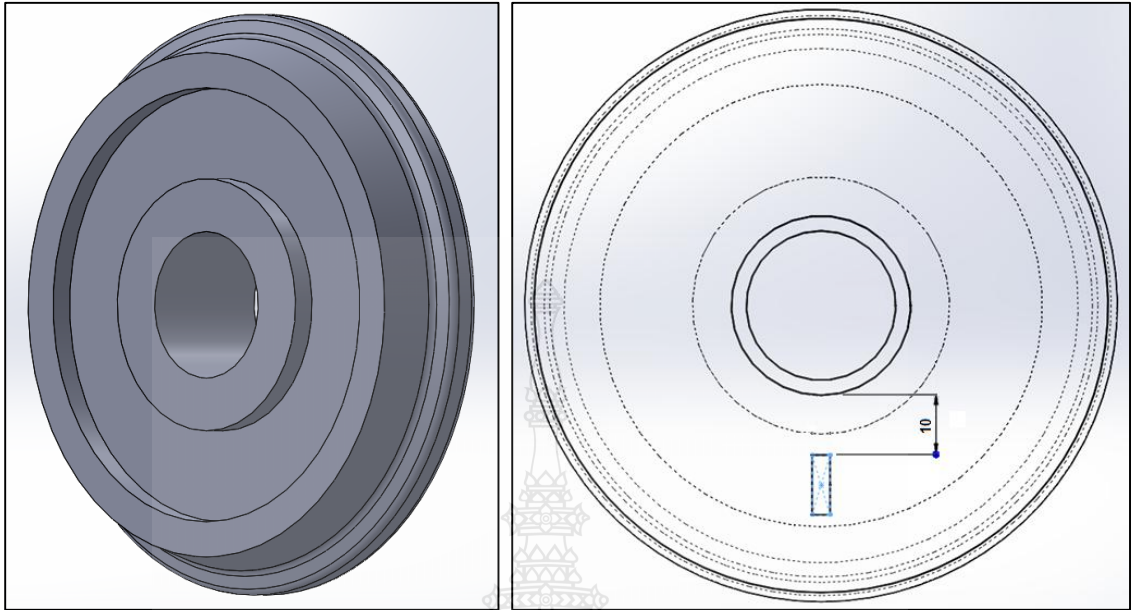
รางโค้ง



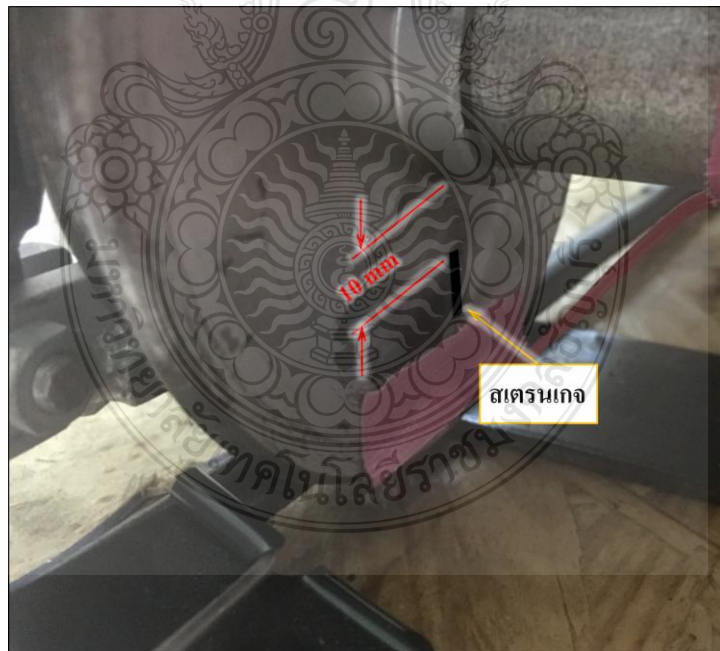
ภาคผนวก ก

การติดสเตรนเกจที่ล้อของรถไฟจำลอง
และการติดตั้งหัววัดความเร่งกับแกนตลับลูกปืนของล้อของรถไฟจำลอง

ค.1 การติดตั้งสเตรนเกจที่ล้อของรถไฟจำลอง



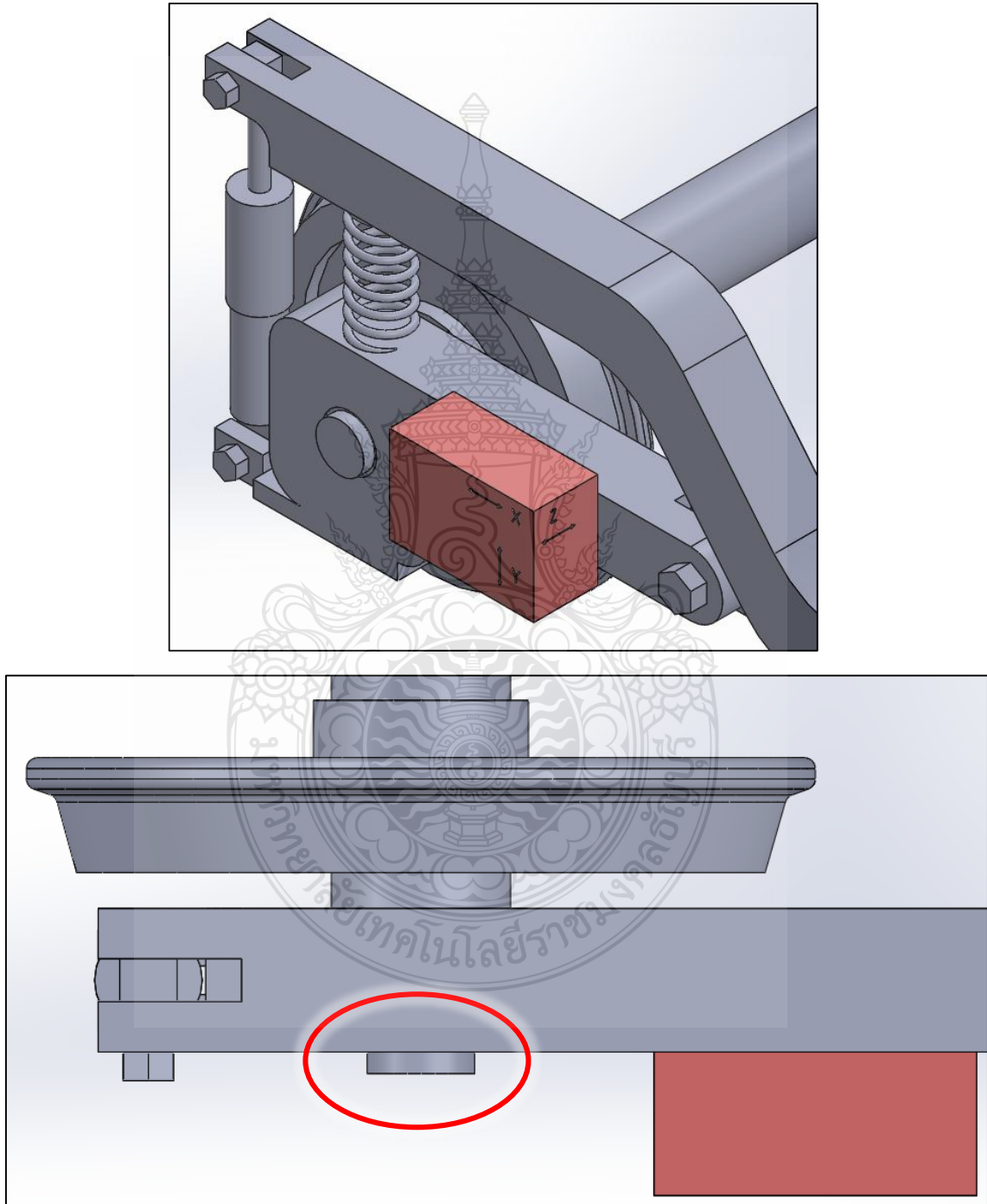
รูปที่ ค.1 ลักษณะล้อรถไฟจำลองและแผนการวางตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจ



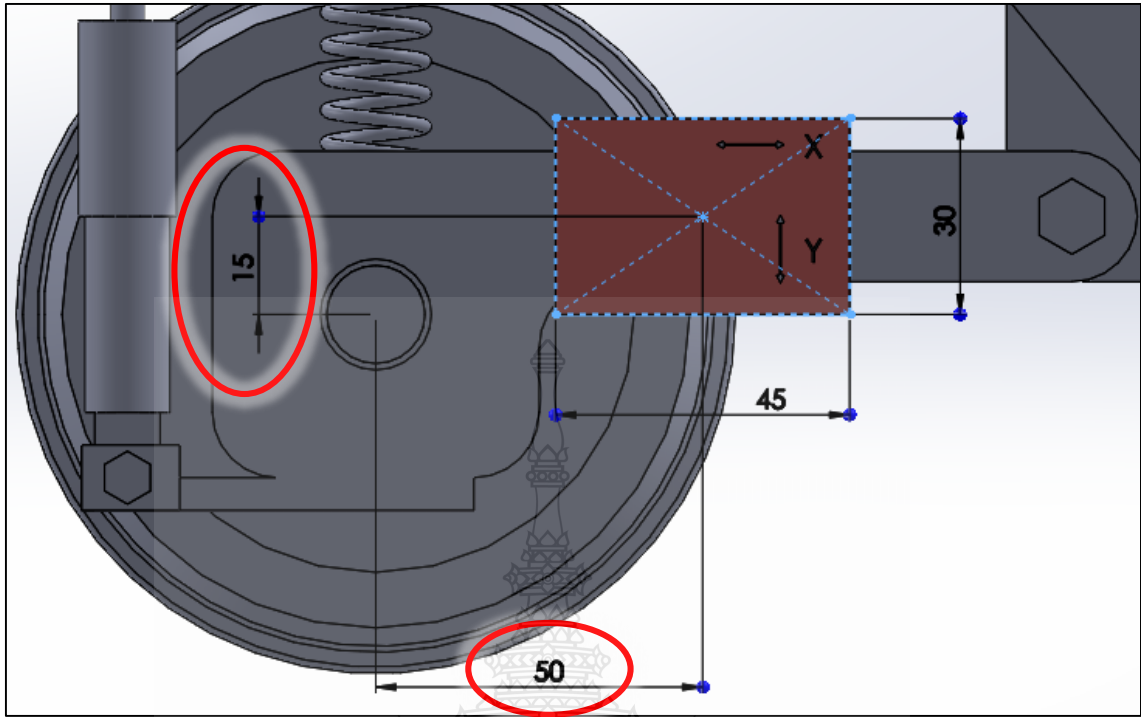
รูปที่ ค.2 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจที่ล้อรถไฟจำลอง

ค.2 การติดหัววัดความเร่งกับชุดเพลาล้อรถไฟจำลอง

จากส่วนที่เกินของเพลาล้อรถไฟจำลอง ดังรูปที่ ค.3 ทำให้ต้องติดตั้งหัววัดความเร่งที่ตำแหน่งไม่กึ่งกลางเพลาล้อ ดังรูปที่ ค.4 และมีส่วนให้การวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟจำลองผิดพลาดไป

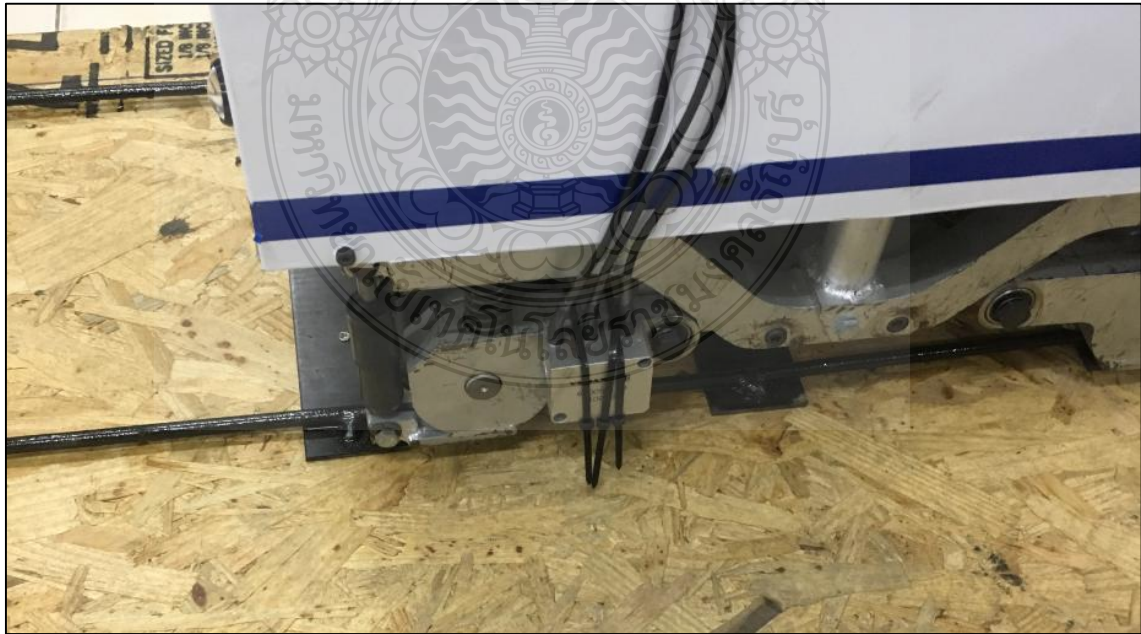


รูปที่ ค.3 ส่วนที่เกินของเพลาล้อรถไฟจำลอง



รูปที่ ค.4 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความแรงที่เปลี่ยนไป

โดยมีตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความแรงที่เปลี่ยนไปคือระยะตามแนวราบ (แกน X) เปลี่ยนไป 50 มิลลิเมตรและระยะในแนวตั้ง (แกน Y) เปลี่ยนไป 50 มิลลิเมตร



รูปที่ ค.5 การติดตั้งหัววัดความแรงกับชุดเพลาส์อรรถไฟจำลอง



ภาคผนวก ง

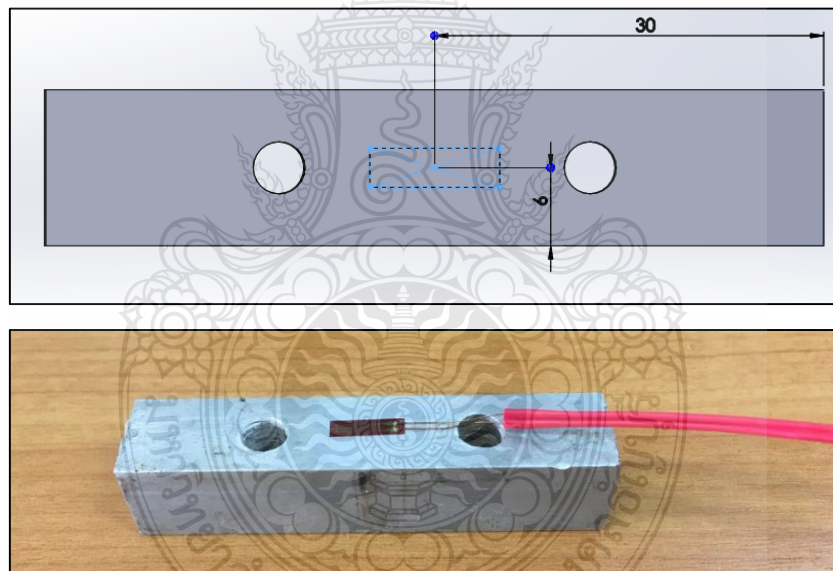
การหาแรงกระทำด้านข้างโดยใช้ความเครียด
เปรียบเทียบกับทฤษฎี

ง.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. แท่งวัสดุตรงยาว มีหน้าตัดคงที่
2. ถูงทราย 500 กรัม 4 ถูง
3. ชุดทดสอบความเครียด

ง.2 วิธีการทดสอบ

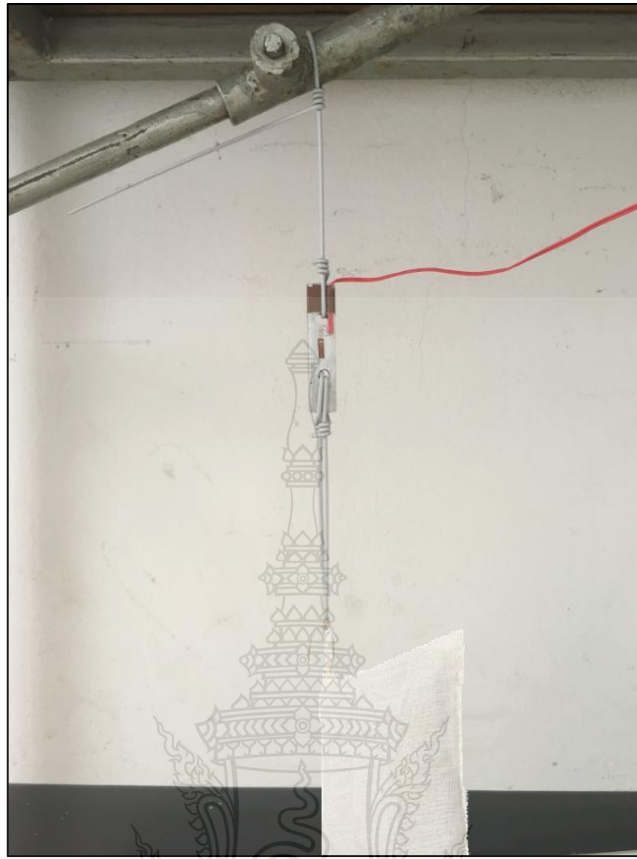
1. ติดตั้งสเตรนเกจกับแท่งวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ ง.1
2. ติดตั้งชุดทดสอบความเครียดกับสายเชื่อมต่อสเตรนเกจ
3. ใส่ถูงทราย 1 ถูง
4. บันทึกผลการทดสอบ เขียนกราฟ
5. เพิ่มถูงทรายเป็น 2, 3 และ 4 ถูง และทำการทดสอบอีกครั้ง



รูปที่ ง.1 การติดตั้งสเตรนเกจกับแท่งวัสดุทดสอบ

แรงกระทำที่เกิดจากความเครียดได้จากน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากถ่วงน้ำหนัก ทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวและเกิดความเครียด การติดสเตรนเกจเพื่อวัดความเครียดในแท่งวัสดุทำให้ทราบถึงสัดส่วนโดยตรงของแรงต่อความเครียดซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.6

$$\frac{P}{\varepsilon} = \frac{P_1}{\varepsilon_1} = \frac{P_2}{\varepsilon_2} = \frac{P_3}{\varepsilon_3}$$



รูปที่ ง.2 การทดสอบความเครีชด

ตารางที่ ง.1 การเปรียบเทียบการวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับแรงกระทำจากการคำนวณที่วัดได้จากความเครีชด

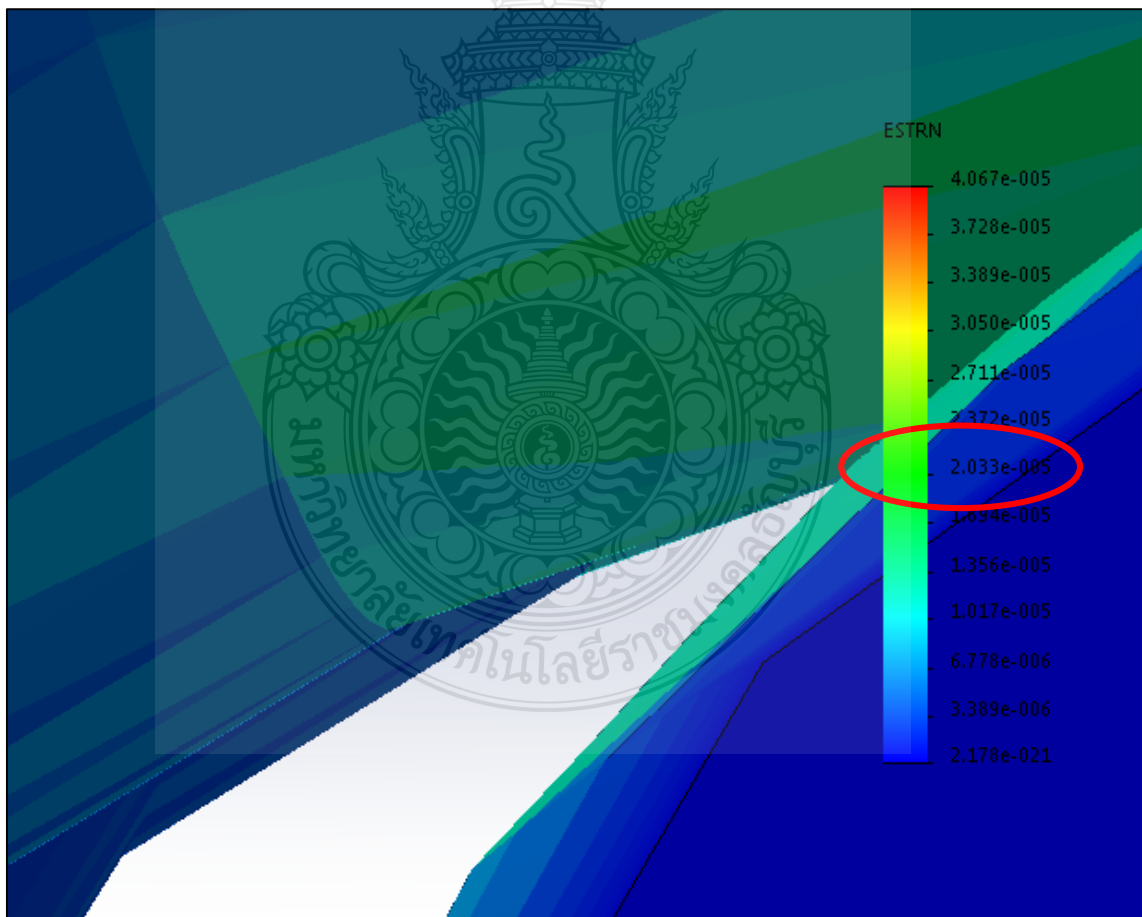
น้ำหนักถุงทราย (g)	แรงกระทำที่เกิดขึ้น (N)	ความเครีชดที่วัดได้ ($\mu\text{m/m}$)
0	0	0
500	4.95	2.35
1000	9.81	4.96
1500	14.7	7.62
2000	19.6	10.1



จ.1 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อของโบกี้รถไฟในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ความเอียงของการยกโค้ง ในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)	
	การคำนวณ ($mg \sin \theta$)	การวิเคราะห์ด้วย FEM ($\frac{mg}{\epsilon_{R1}} - \frac{mg \cos \theta}{\epsilon_{R2}}$)
0°	0	-
1.7°	4.36	4.27
3.4°	8.72	5.22
5.1°	13.1	24.7



รูปที่ จ.1 ตัวอย่างการเทียบสีความเครียดโดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จ.1.1 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อของ โบกี้รถไฟจากการเทียบสีความเครียด

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ 3.14 แรงกระทำด้านข้าง} &= \frac{mg}{\epsilon_{R1}} - \frac{mg \cos \theta}{\epsilon_{R2}} \\
 &= \frac{\frac{60}{4} \times 9.8}{2.033 \times 10^{-5}} - \frac{\frac{60}{4} \times 9.8 \cos 3.4^\circ}{1.179 \times 10^{-5}} \\
 &= 5.22 \text{ N}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างจากการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวัดความเครียด

ความเอียงของการยกโค้ง ในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)	
	การคำนวณ ($mg \sin \theta$)	การวัดความเครียด ($\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R3}}$)
0°	0	-
1.7°	4.36	3.05
3.4°	8.72	10.5
5.1°	13.1	22.2

จ.1.2 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อของ โบกี้รถไฟจากการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ 3.5 แรงกระทำด้านข้าง} &= mg \sin \theta \\
 &= \frac{60}{4} \times 9.8 \sin 3.4^\circ \\
 &= 8.72 \text{ N}
 \end{aligned}$$

โดยที่ m คือ มวลของรถไฟ (60 กิโลกรัม/4 ชุดเพลาล้อ)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 m/s^2)

θ คือ ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง (3.4°)

ϵ_{R1} คือ ค่าประมาณของความเครียดที่ได้จากการเทียบสีความเครียดที่ 0° (20.33×10^{-6})

ϵ_{R2} คือ ค่าประมาณของความเครียดที่ได้จากการเทียบสีความเครียดที่ 3.4° (11.79×10^{-6})

จ.1.3 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อของโบกี้รถไฟจากการวัดความเครียด

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ 3.11 ความเครียดด้านข้าง} &= \sqrt{\varepsilon_{R1}^2 - \varepsilon_{R2}^2} \\
 &= \sqrt{|2.37205^2 - 2.77193^2|} \\
 &= 1.159 \text{ N} \\
 \text{จากสมการที่ 3.14 แรงกระทำด้านข้าง} &= \left(\frac{mg}{\varepsilon_{R1}} - \frac{mg \cos \theta}{\varepsilon_{R2}} \right) / \varepsilon_{R3} \\
 &= \left(\frac{\frac{60}{4} \times 9.8}{2.37205} - \frac{\frac{60}{4} \times 9.8 \cos 3.4^\circ}{2.77193} \right) / 1.159 \\
 &= 10.5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

- โดยที่ m คือ มวลของรถไฟ (60 กิโลกรัม/4 ชุดเพลาล้อ)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 m/s^2)
 θ คือ ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง (3.4°)
 ε_{R1} คือ ค่าเฉลี่ยของความเครียดที่ได้จากการทดสอบความเครียดที่ 0° (2.37205)
 ε_{R2} คือ ค่าเฉลี่ยของความเครียดที่ได้จากการทดสอบความเครียดที่ 3.4° (2.77193)

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างการยกโค้งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง ระหว่างวิธีการคำนวณและการวัดความเร่ง

ความเอียงของการยกโค้ง ในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก (N)	
	การคำนวณ ($mg \sin \theta$)	การวัดความเร่ง (ma)
0°	0	0.82
1.7°	4.36	5.35
3.4°	8.72	9.70
5.1°	13.1	12.4

จ.1.4 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาสื่อของโบกี้รถไฟจากการวัดความเร่ง

$$\begin{aligned} \text{แรงกระทำด้านข้างจากการวัดความเร่ง} &= ma \\ &= \frac{60}{4} \times 0.6467 \\ &= 9.70 \text{ N} \end{aligned}$$

โดยที่ m คือ มวลของรถไฟ (60 กิโลกรัม/4 ชุดเพลาสื่อ)

a คือ ค่าเฉลี่ยของความเร่งที่ได้จากการทดสอบความเร่งที่ 3.4° (0.6467 m/s^2)

จ.2 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาสื่อของโบกี้รถไฟในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีการวัดความเร่งในทางโค้งมีการยกโค้ง ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

ความเอียงของการยก	ช่วงของแรงกระทำด้านข้างที่ความเร็ว (N)		
	0.44 (m/s)	0.66 (m/s)	0.84 (m/s)
โค้งในทางรถไฟจำลอง			
0°	-103 ถึง 130	-149 ถึง 189	-204 ถึง 220
1.7°	-114 ถึง 108	-152 ถึง 135	-154 ถึง 174
3.4°	-133 ถึง 123	-157 ถึง 184	-199 ถึง 210
5.1°	-129 ถึง 118	-107 ถึง 108	-167 ถึง 149

จ.2.1 การหาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาสื่อของโบกี้รถไฟจากการวัดความเร่ง

$$\begin{aligned} \text{ช่วงแรงกระทำด้านข้างจากการวัดความเร่ง} &= ma_1, ma_2 \\ &= \frac{60}{4} \times -10.45, \frac{60}{4} \times 12.28 \\ &= -157 \text{ N}, 184 \text{ N} \end{aligned}$$

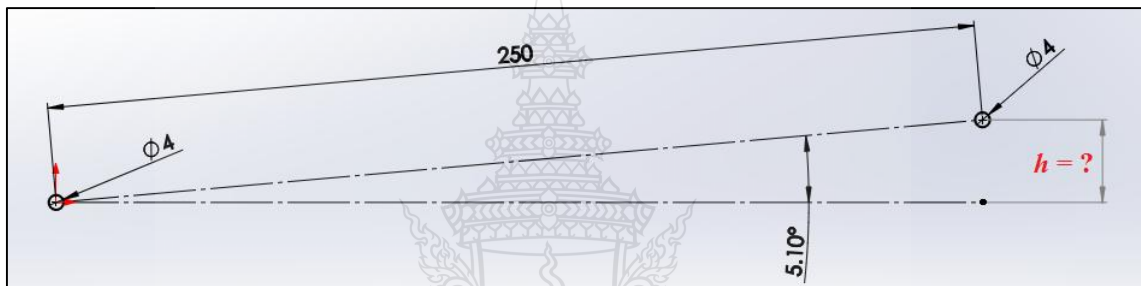
โดยที่ m คือ มวลของรถไฟ (60 กิโลกรัม/4 ชุดเพลาสื่อ)

a_1 คือ ค่าที่น้อยของความเร่งที่ได้จากการทดสอบความเร่งที่ 3.4° (-10.45 m/s^2)

a_2 คือ ค่าที่มากของความเร่งที่ได้จากการทดสอบความเร่งที่ 3.4° (12.28 m/s^2)

ตารางที่ 4.6 ผลการตกรางของรถไฟจำลองในความเร็วที่ยอมให้ผ่าน โคน้ในทาง โคน้มีการยก โคน้
ขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

ความเอียงของการยก โคน้ในทางรถไฟจำลอง	ความเร็วที่ยอมให้ผ่าน โคน้ (m/s)		ผลการตกราง
	การคำนวณ	การทดลอง	
0°	0.96	0.84	ไม่ตกราง
1.7°	1.03	0.84	ไม่ตกราง
3.4°	1.10	0.84	ไม่ตกราง
5.1°	1.16	0.84	ไม่ตกราง



รูปที่ จ.2 การคำนวณหาความสูงระหว่างรางรถไฟจำลอง

จ.2.2 การหาความเร็วสูงสุดที่ยอมให้รถไฟจำลองผ่าน โคน้

จากรูปที่ จ.2 จะคำนวณหาความสูงระหว่างรางรถไฟจำลอง (h) ได้คือ

$$\sin 5.1 = \frac{h}{250}$$

$$h = 250 \sin 5.1$$

$$h = 22.22 \text{ mm}$$

เมื่อ 250 mm คือ ระยะห่างระหว่างรางรถไฟจำลอง

5.1° คือ ความเอียงของการยกโคน้ในทางรถไฟจำลอง

รัศมีความโค้งทางรถไฟจำลอง (R) คือ

$$R = 2 \text{ m}$$

โดยที่ความเร็วสูงสุดที่ยอมให้รถไฟจำลองผ่าน โคน้ได้คือ

จากสมการที่ 2.10

$$v_{max} = [(h + 50)R/8.338]^{1/2}$$

$$v_{max} = [(22.22 + 50)2/8.338]^{1/2}$$

$$v_{max} = 4.16 \text{ km/hr} = 1.16 \text{ m/s}$$

การประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ จะเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยระหว่าง และแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อ แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าว (Y/Q) ของการวิ่งของรถไฟในในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2

ตารางที่ 4.7 การประเมินค่าความปลอดภัยของรถไฟจำลองเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.84 m/s ในทางโค้งที่มีการยกโค้ง

ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (Y)	อัตราส่วนความปลอดภัย (Y/Q)	การประเมินค่าความปลอดภัย
0°	220	1.50	เกินเกณฑ์
1.7°	174	1.18	อยู่ในเกณฑ์
3.4°	210	1.43	เกินเกณฑ์
5.1°	167	1.14	อยู่ในเกณฑ์

จ.2.3 การค่าความปลอดภัยของรถไฟจำลอง

ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ (Y/Q) คือ อัตราส่วนความปลอดภัยระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อ และแรงกระทำในแนวตั้ง (Q)

โดยที่ $Q = mg$

m คือ มวลของรถไฟ (60 กิโลกรัม/4 ชุดเพลาล้อ)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 m/s^2)

$$Q = \frac{60}{4} \times 9.8$$

$$Q = 147 \text{ N}$$

$$\text{ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ} = \frac{Y}{Q}$$

$$= \frac{167}{147}$$

$$= 1.14$$



E-NETT 14

14th Conference On Energy Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

Modern Energy for Smart City

พลังงานยุคใหม่สู่การพัฒนาเมืองอัจฉริยะ

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

สาขาบทความนำเสนอผลงานวิจัย

- พลังงานทดแทน (Renewable energy)
- การอนุรักษ์และการจัดการพลังงาน (Energy conservation and management system)
- นโยบายด้านพลังงาน (Energy policy)
- นวัตกรรมด้านพลังงาน (Energy innovation)
- เทคโนโลยีด้านการสะสมพลังงาน (Energy Storage Technology)
- ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อ... (Smart Energy for ...)
 - ชุมชน (Community)
 - ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle)
 - เมืองใหญ่ (City)

กำหนดการส่งบทความวิชาการ

ส่งบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์	17 เม.ย. 61
วันตอบรับบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์	30 เม.ย. 61
วันส่งบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข)	12 พ.ค. 61
วันชำระเงินค่าลงทะเบียน	12 พ.ค. 61

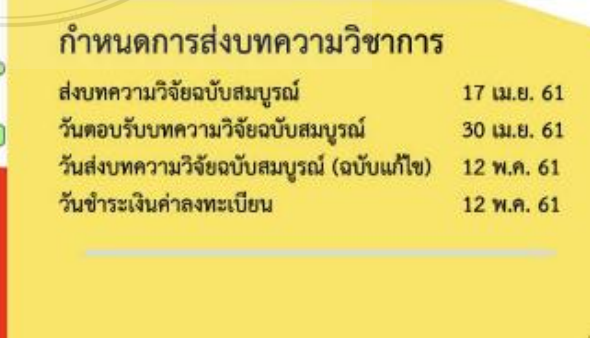
ติดต่อสอบถามได้ที่

ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี

02-5493497

enett14.2018@gmail.com

<http://www.e-nett.org>



ENERGY NETWORK OF THAILAND 14th



14th Conference on Energy Network of Thailand
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

Abstract



ผู้สนับสนุน
หน่วยงานในเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย



การศึกษาการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ
Study of Lateral Force Acting on Train Wheelset

มนตรี กุลประดิษฐ์¹ และ เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปรารก²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹E-mail: tongada147@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0 2549 4419

²E-mail: terdkiat.l@en.rmutt.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0 2549 3430-9, เบอร์โทรสาร 0 2549 3432

บทคัดย่อ

SEC-03-235

ปัจจุบันภายในเมืองใหญ่ มีความนิยมใช้รถไฟในการเดินทางเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีความสะดวกและความรวดเร็วในการเดินทาง ในการขับเคลื่อนรถไฟจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงาน การศึกษาเรื่องการวัดแรงกระทำต่อเพลาล้อรถไฟจึงมีผลทั้งต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานและที่สำคัญคือความปลอดภัยจากการศราง

แรงกระทำที่เกิดขึ้นที่ชุดเพลาล้อรถไฟที่มากขึ้นไปสามารถเป็นเหตุให้รถไฟเกิดการศรางได้ ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) แรงกระทำในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของรถไฟและน้ำหนักบรรทุก และ 2) แรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นทั้งในการวิ่งของรถไฟบนทางตรงและทางโค้ง การทราบค่าแรงกระทำดังกล่าวสามารถใช้ประเมินความเสี่ยงต่อการศรางของรถไฟได้แต่ก็ค่อนข้างมีเครื่องมือวัดที่มีราคาแพงและมีวิธีการวัดที่ซับซ้อน ไม่ว่าจะเป็นการวัดโดยใช้ strain gauge หรือการวัดโดยใช้ optical sensors นอกจากนี้ ตามมาตรฐาน UIC 518 ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟในทางตรง Y/Q ต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 โดยวิธีการในการวัดแรงกระทำด้านข้างที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดคือวิธีการวัดแรงกระทำแบบ Conventional method แต่ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ค่อนข้างซับซ้อนมากผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบใช้ความเร่ง Acceleration measurement method โดยเมื่อทำการสอบเทียบเบื้องต้นในขณะรถไฟหยุดนิ่ง ค่าของแรงกระทำที่ได้จากวิธีการแบบใช้ความเร่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำที่ได้จากการคำนวณและการวัดแบบ Conventional method

คำหลัก: แรงกระทำในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้าง, ความสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง, ชุดเพลาล้อรถไฟ, การศรางของรถไฟ, ความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ

การพัฒนาระบบการรู้จำแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์สำหรับการจัดการจราจรในเมืองอัจฉริยะ

Developing of License Plates Recognition System for Smart Traffic in Smart Cities

อนุรักษ์ พรหมโคตร¹ และ จักริ ศรีนนท์จักร¹

¹ห้องปฏิบัติการและวิจัยด้านการประมวลผลสัญญาณ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*ผู้ติดต่อ: E-mail: Jakkree.s@en.rmutt.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 089-7775038

บทคัดย่อ

SEC-03-250

การจัดการปัญหาด้านการจราจรและผู้กระทำผิดกฎจราจรเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ ซึ่งจะส่งผลต่อการลดค่าการใช้พลังงานน้ำมันและพลังงานไฟฟ้าได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาระบบการรู้จำแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์สำหรับการจัดการจราจรในเมืองอัจฉริยะ โดยมุ่งเน้นที่การแยกแยะและจดจำตัวอักษรบนแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์ในกรณีที่มีป้ายรถยนต์ที่มุมกล้องถ่ายภาพไม่เป็นตรง ในการทดลองครั้งนี้ใช้ภาพแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์จำนวน 150 ภาพเป็นภาพสัญญาณอินพุต จากนั้นเทคนิคการประมวลผลสัญญาณภาพจะถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาตำแหน่งของภาพและลักษณะของตัวอักษร ผลการทดลองพบว่าเทคนิคข้างต้นสามารถค้นหาตำแหน่งของป้ายทะเบียนได้ความถูกต้องร้อยละ 94.66 และสามารถจดจำตัวอักษรได้ความถูกต้องร้อยละ 92.66 ในมุมที่แผ่นป้ายทะเบียนทำมุมเอียงไม่เกิน 25%

คำหลัก: การค้นหาตำแหน่งแผ่นป้าย, รู้จำตัวอักษร.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย จิจิรวณิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสทรโยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตน์ไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ศิวะ อัจฉริยวิริยะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.พนมกร ขวาชอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อิสสรีย์ ทรราชจรรยาโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.กัณวีรัช พลุประชาญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์รัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.เวณิน ปิยะรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.นำคุณ ศรีสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.สาธิต พุทธชัยมงคล	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ปทุมทิพย์ ปราบพาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ป่านบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศ.ดร.ก้องกิติ พุสวัตต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.อัครรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ศิริ ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวัฒน์ชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.ธัญญา นิยมภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.กานต์ พนาศุภมัสสุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ปานมนัส สิริสมบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กนก เจริญพงศ์เวช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.นิง โลกกิจแสงทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ภพ จันทรเจริญสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศ.ดร.วรารุณี ครูส่ง	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.มานะ อมรกิจบำรุง	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.นริศ ประทีนทอง	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ธนิศ สวัสดิ์เสวี	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โกสินทร์ จ่านงไทย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วีโรจน์ บุญอำนวยการวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.พรเกษม จงประดิษฐ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ศิรินทร ทองแสง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ณฐา คุปต์เขียร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพิณธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.มานพ ดันตระบัณฑิตย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ธีระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.สุจิระ ขอจิตต์เมตต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญโรดม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมหมาย ดรัยไชยาพร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.อำนาจ เรืองวารี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ไพฑูรย์ กิตติสุนทร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมนึก สังข์หนู	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.สมประสงค์ ภาษาประเทศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สุนัน ปานสาคร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สุรินทร์ แห่งงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.อภิรักษ์ วัลภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ไพฑูริย์ รักเกลือ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ศุภวิทย์ ลวณะสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สุรัตน์ ดรัยวพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิเวสสถิตย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.มานิช รุจิภากร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ธัญญา รังษิสุริยะชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กุลยา สารชีวิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญชัย ผึ้งไม่งาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วีระพงษ์ ครูส่ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย	คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สนธยา ทองอรุณศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
ดร.นเรศ อินตะวงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
ผศ.ดร.เกียรติก้อง แก้วกุลชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ
ดร.ประธาน วงศ์ศรีเวช	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (สวทช)
รศ.จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ โนพระบรมราชูปถัมภ์
ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	คณะเกษตรศาสตร์	ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.นภทินท์ อนันตศิริชัย	นักวิชาการอิสระ	
รศ.ณรงค์ บวบทอง	นักวิชาการอิสระ	
รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม	นักวิชาการอิสระ	

194	คุณลักษณะมรดกของเครื่องชนิดซีลเชื้อเพลิงร่วมด้วยารติดแก๊สโซลล์ที่เทอร์...	87
199	การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของมูลโคร่วมกับน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลาและจากกระบวนการชำแหละเนื้อปลา	87
202	แนวทางการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับการอนุรักษ์พลังงานและสร้างอัตลักษณ์บริเวณแนวชายฝั่งทะเลตำบลปากน้ำ อำเภอละงู จังหวัดสตูล	88
206	การกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนจัดไฟได้ในระบบก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับ	88
207	การผลิตเอทานอลจากกากคั้นปาล์มสาขาคัพพอนต์สีแดงด้วยตะกอนหัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสีย	89
215	การปรับปรุงประสิทธิภาพของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้วิธีการกลั่นลำดับส่วน	89
221	การวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำที่คิด 50 kWp	89
237	การพัฒนาแผนที่ลมสากลปานกลางนอกชายฝั่งทะเลเอเซียตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทยด้วยวิธีการจำลองแบบบรรยากาศ	90
238	ไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าในฐานะเชื้อเพลิงเสริมสำหรับเครื่องชนิดซีล	90
239	การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไม่ร่วมกับใบอ้อย	91
243	การใช้โครงข่ายการประสาทเชื่อมเพื่อการคาดการณ์พลังงานระบบไฟฟ้าเพื่อประเมินออกแบบระบบไมโครกริดที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานหลัก	91
252	ปัจจัยการศึกษากระบวนการอัดโนมิบับบนพื้นฐานการใช้พลังงานทดแทนสำหรับสถานีชาร์จรถไฟฟ้า	92
SEC-01 ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อชุมชน		
066	การออกแบบและพัฒนาการไฟฟ้าโซลาร์รูฟท็อปในครัวเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์	94
079	การศึกษารูปแบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนที่สูงของเสียจากเตาเผาหินหัวเทอร์โมอิเล็กทริก	94
105	การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานของโซลาร์เซลล์และกังหันลมรวม 20 kW สำหรับชุมชนตลาดสด วงศกร พหลอำ...	95
191	การออกแบบและติดตั้งระบบไฟเริงแบบรีดิวโทมเพื่อการจัดการมหาวิทยาลัยในชุมชนอัจฉริยะ	95
SEC-02 ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อขยายนิคมไฟฟ้า		
241	การศึกษานโยบายระบุพื้นที่เร็วสำหรับนิคมไฟฟ้าทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย	98
242	ผลกระทบจากการอัดประจุไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าด้วยระบบจำหน่ายไฟฟ้า	98
SEC-03 ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อเมืองใหญ่		
121	การกำหนดทิศทางของกังหันลมด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อเพิ่มเวลาในการผลิตไฟฟ้า	100
122	สถานะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศทางลมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดใหญ่การผลิต 80 MW	100
123	เปรียบเทียบข้อดีของการเชื่อมต่อของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 8 MW	101
180	ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับสถานีชาร์จรถไฟฟ้าที่ใช้ระบบรถสัญญาตลอดเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม	101
181	การเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 8 เมกกะวัตต์ที่ติดตั้งแบบระบบคงที่ และระบบติดตามดวงอาทิตย์ในประเทศไทย	102
235	การศึกษากาววีแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาอัตราทด	103
250	การพัฒนากระบวนการรู้จำแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์สำหรับการจัดการจราจรในเมืองอัจฉริยะ	103
253	การพัฒนากระบวนการควบคุมแบบไร้สายด้วยสัญญาณไฟฟ้ากลมเนื้อสำหรับผู้พิการและสูงอายุในเมืองอัจฉริยะ	104

การศึกษาการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ Study of Lateral Force Acting on Train Wheelset

มนตรี กุลประดิษฐ์¹ และ เทอดเกียรติ ลิ้มบิทธิปรการ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลอง 6 อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ E-mail: tongada147@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0 2549 4419

² E-mail: terdkiat.i@en.rmutt.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0 2549 3430-9, เบอร์โทรสาร 0 2549 3432

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภายในเมืองใหญ่ มีความนิยมใช้รถไฟฟ้าในการเดินทางเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีความสะดวกและความรวดเร็วในการเดินทาง ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงาน การศึกษาเรื่องการวัดแรงกระทำต่อเพลาล้อรถไฟจึงมีผลต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานและที่สำคัญคือความปลอดภัยจากการตกราง

แรงกระทำที่เกิดขึ้นที่ชุดเพลาล้อรถไฟที่มากเกินไปสามารถเป็นเหตุให้รถไฟเกิดการตกรางได้ ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) แรงกระทำในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของรถไฟและน้ำหนักบรรทุก และ 2) แรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นทั้งในการวิ่งของรถไฟบนทางตรงและทางโค้ง การทราบค่าแรงกระทำดังกล่าวสามารถใช้ประเมินความเสี่ยงต่อการตกรางของรถไฟได้แต่ก็ต้องอาศัยเครื่องมือวัดที่มีราคาแพงและมีวิธีการวัดที่ซับซ้อน ไม่ว่าจะเป็นการวัดโดยใช้ strain gauge หรือการวัดโดยใช้ optical sensors นอกจากนี้ ตามมาตรฐาน UIC 518 ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟในทางตรง Y/Q ต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 โดยวิธีการในการวัดแรงกระทำด้านข้างที่ได้รับการยอมรับมากคือวิธีการวัดแรงกระทำแบบใช้ความเร่ง Acceleration measurement method โดยเมื่อทำการสอบเทียบเบื้องต้นในขณะที่รถไฟหยุดนิ่ง ค่าของแรงกระทำที่ได้จากวิธีการแบบใช้ความเร่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำที่ได้จากการคำนวณและการวัดแบบ Conventional method

คำหลัก: แรงกระทำในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้าง, ความสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง, ชุดเพลาล้อรถไฟ, การตกรางของรถไฟ, ความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ

Abstract

Currently, in larger cities, an electric train is being used for transportation due to the convenience and speed of travel. In order to propel a train, electrical energy is required, and the behavior of motion is the main factor affecting the energy consumption. The study of the force measurement on wheel axles has implications for the analysis of energy efficiency and, in particular, the safety of derailments.

The excessive forces acting on railway wheelset can cause the train to derail. These forces come from two parts: 1) the vertical force (Q) caused by train weight and payload weight and 2) the lateral force (Y) caused by the trajectory of the train both in straight and curve tracks. Understanding these forces help to identify the risk for derailment; however, this requires expensive instrument and complex measuring method, for example with strain gauge or optical sensors. Based on UIC 518 standard, the safety of running trains in the straight track Y/Q ratio must not exceed 0.8 and in the curved track must not exceed 1.2. The most commonly used method of measuring lateral force is Conventional Method, but requires very sophisticated equipment and tools. Therefore, an acceleration measurement method is used to measure the lateral force. A calibration is made while the train model is stationary. It was found that the value of the force using the acceleration method is close to that of the calculated force and the conventional method.

Keywords: Vertical and lateral forces, Wheel/rail interaction, Train wheelset, Derailment, Safety of running trains.

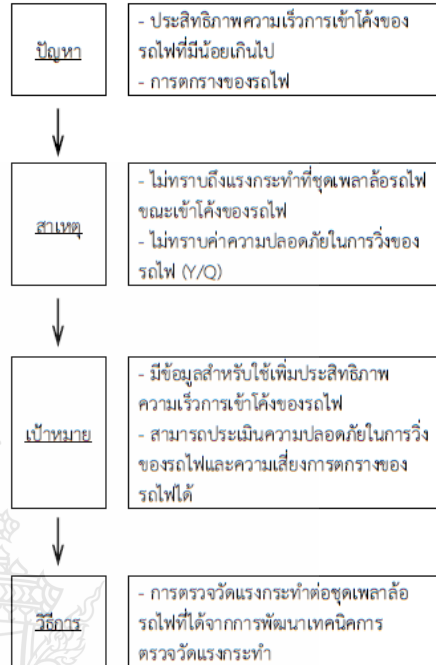
ENETT14-XXX-XX

1. บทนำ

การเพิ่มความเร็วในการท่าเวลาของขบวนรถไฟระหว่างเมือง อย่างหนึ่งก็คือการเปลี่ยนทางรถไฟจากทางเดียวให้เป็นทางคู่ แต่กระนั้นก็อาจยังไม่เพียงพอเนื่องจากความเร็วเฉลี่ยที่ใช้อยู่ในปัจจุบันค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากข้อจำกัดของทางรถไฟและการที่รถไฟจำเป็นต้องลดความเร็วขณะวิ่งผ่านทางโค้ง [1] ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วในการเข้าโค้งจึงถือเป็นอีกช่องทางที่ง่ายที่สุดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้า ในการเพิ่มความเร็วที่ทางโค้งนั้นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ความปลอดภัยในขณะเข้าโค้ง [2] คือ แรงกระทำที่เกิดขึ้นที่บริเวณชุดเพลาล้อรถไฟ [3] ทั้งในส่วนของหัวรถจักร ผู้โดยสาร หรือผู้สินค้า แต่การตรวจวัดแรงกระทำดังกล่าวมีความจำเป็นต้องการเข้าใจหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงพฤติกรรมการทำงานของชุดเพลาล้อที่ติดตั้งอยู่กับล้อของรถไฟ นอกจากนี้ยังต้องอาศัยวิธีการและอุปกรณ์ที่ค่อนข้างซับซ้อนในการวัด และยังไม่สามารถกระทำการวัดได้อย่างต่อเนื่องอีกด้วยเนื่องจากล้อรถไฟต้องมีการเจาะรู [4] เพื่อติดตั้งเซนเซอร์สำหรับการวัดจึงทำให้สามารถใช้ล้อรถไฟที่ติดตั้งอุปกรณ์ ได้เฉพาะช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น ดังนั้น ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะหาแนวทางและวิธีการวัดแรงกระทำของเพลาล้อของโบกี้รถไฟและออกแบบอุปกรณ์การตรวจวัดแรงกระทำของเพลาล้อของโบกี้รถไฟเพื่อใช้ประเมินความเสี่ยงต่อการดกราง โดยมีทฤษฎีที่นำมาพิจารณา คือ การเข้าโค้งของรถไฟที่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการค่าความเร็วในการเข้าโค้งของรถไฟ ลักษณะแรงกระทำต่อล้อและรางในทางตรงและทางโค้ง ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับใช้เพิ่มประสิทธิภาพความเร็วการเข้าโค้งของรถไฟและการประเมินความเสี่ยงต่อการดกรางของรถไฟ โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบนี้ต้องมีความง่ายต่อการติดตั้ง ราคาประหยัดและสามารถใช้ติดตั้งบนขบวนรถไฟได้ด้วยต้นทุนต่ำ โดยมีกรอบแนวคิดองค์ประกอบของปัญหา ดังรูปที่ 1

2. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาแนวทางและวิธีการวัดแรงกระทำของเพลาล้อของโบกี้รถไฟ
- 2) เพื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดแรงกระทำของเพลาล้อของโบกี้รถไฟ



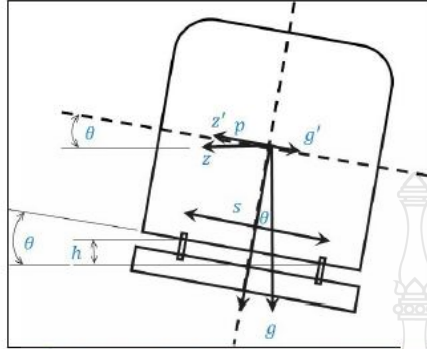
รูปที่ 1 กรอบแนวคิดองค์ประกอบของปัญหา

3. การดกรางของรถไฟ

โดยทั่วไปรถไฟจะต่อกันแบบขบวนและเคลื่อนที่ด้วยหัวรถจักรเป็นตัวลากจูง หรือการใช้เครื่องยนต์ภายในขบวนรถไฟเองเป็นตัวขับเคลื่อนอย่างไรก็ตามการดกรางของรถไฟก็เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้บริการและสร้างความเสียหายแก่รถไฟและโครงสร้างอื่นๆอีกด้วย อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การเสียเวลาการท่วขบวนดีดไป การเสียโอกาสด้านธุรกิจการขนส่งและบริการ การเสี่ยงงบประมาณจากการซ่อมบำรุงทั้งรถไฟและโครงสร้าง เป็นต้น โดยสาเหตุของการดกรางของรถไฟมีดังนี้ [5]

- 1) การใช้ความเร็วที่มากเกินไป ในบริเวณทางโค้ง หรือประแจสับราง ซึ่งทำให้เกิดแรงเหวี่ยง
- 2) การลดความเร็วกะทันหัน ซึ่งทำให้ขบวนรถไฟเสียสมดุลในการชะลอความเร็ว ทำให้ล้อป็นรางได้
- 3) อุปกรณ์เสียหาย/ชำรุด เช่น ปลอกล้อแตก บังใบล้อแตก การสับเปลี่ยนประแจขณะทำขบวนผ่าน ทางรถไฟมีการชำรุด อากาศที่ร้อนทำให้รางขยายตัว เป็นต้น
- 4) อุบัติเหตุจากการใช้ทางตัดผ่าน ทางร่วมของรถยนต์ หรือมีสัตว์เข้ามาในทางรถไฟ

4. การเข้าโค้งของรถไฟ



รูปที่ 2 ลักษณะการเข้าโค้งของรถไฟและตัวแปรสำหรับการคำนวณ [1, 6]

เมื่อ p คือ ความเร่งลัทธิในแนวขนานกับพื้นรถ, m/s^2
 z คือ ความเร่งหนีศูนย์กลาง หรือความเร่งด้านข้าง, m/s^2
 v คือ ความเร็วขบวนรถ, km/hr
 R คือ รัศมีโค้ง, m
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
 h คือ ค่ายกโค้ง, mm
 s คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของราง 2 เส้น
 s คือ 1,060 mm. (ราง 80 ปอนด์)

จากรูปที่ 2 จะได้ว่า

$$p = z' - g' \quad (1)$$

$$p = v^2 / R = z \cos \theta \approx z \quad (2)$$

$$g' = g \sin \theta = gh / s \quad (3)$$

ดังนั้น

$$p = v^2 / R - gh / s \quad (4)$$

การยกโค้งให้ได้ผลดีที่สุดคือ $p = 0$, จะได้

$$v^2 / R = gh / s \quad (5)$$

แทนค่า g, s และแปลงหน่วยจะได้

$$h = 8.338 v^2 / R \quad (6)$$

เพื่อความสบายสบายของผู้โดยสารการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ได้กำหนด $p = 0.46 m/s^2$ จะได้

$$h_{min} = (8.338 v^2 / R) - 50 \quad (7)$$

และ

$$h_{max} \leq 90 \quad (8)$$

แต่เงื่อนไขการยกโค้งจริงคือ

- 1) ความเร็วของรถไฟที่วิ่งผ่านโค้งแต่ละขบวนนั้นต่างกัน
- 2) รฟท. ใช้ค่า $2/3h$ และเมื่อความเร็วสูงสุดของรถไฟที่วิ่งผ่านอีก $5 km/hr$

ดังนั้นจะได้

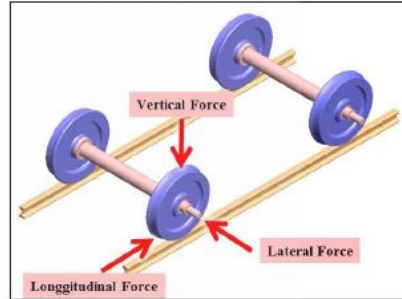
$$h = 5.5587(v_{max} + 5)^2 / R \quad (9)$$

และความเร็วความเร็วสูงสุดที่ยอมให้ผ่านโค้งคือ

$$v_{max} = [(h + 50)R / 8.338]^{1/2} \quad (10)$$

5. ลักษณะแรงกระทำต่อล้อและราง

5.1 ลักษณะภาวะไหลตที่กระทำต่อล้อ

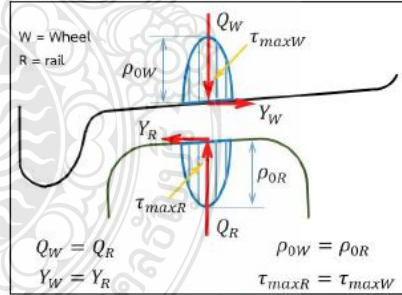


รูปที่ 3 ลักษณะภาวะไหลตที่กระทำต่อล้อ

โดยทั่วไปลักษณะภาวะไหลตที่กระทำต่อล้อรถไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังในรูปที่ 3

- 1) Vertical Force แรงกระทำด้านบนตั้งฉากกับทิศของการเคลื่อนที่ (Q)
- 2) Lateral Force แรงกระทำด้านข้างของล้อรถไฟ (Y)
- 3) Longitudinal Force แรงกระทำตามทิศการเคลื่อนที่ (T)

5.2 ลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับราง



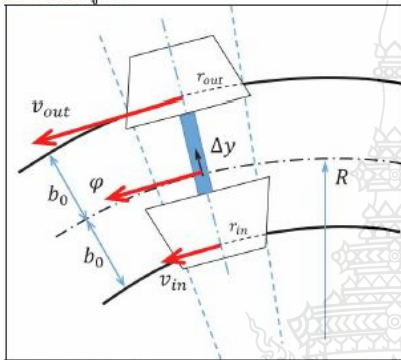
รูปที่ 4 ลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางในทางตรง [7]

โดยทั่วไปการวิ่งในทางตรงของรถไฟ การเคลื่อนที่ของล้อและเพลาจะมีลักษณะเหมือนการเลี้ยวของมุมเมื่อเทียบกับรางรถไฟ และลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางจะเป็นเหมือนภาพที่สะท้อนของกระจก ซึ่งจากรูปที่ 4 แรง Q คือแรงกระทำในแนวตั้งซึ่งเกิดจากน้ำหนักจากการบรรทุก/โดยสาร

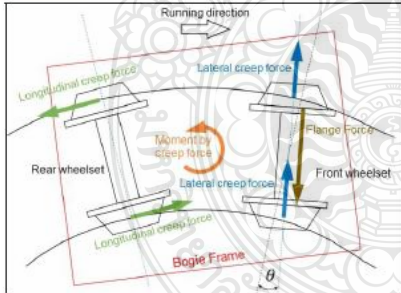
และน้ำหนักจากโบกัลดไฟ ที่ถูกถ่ายเทน้ำหนักจากล้อสู่รางรถไฟ และแรง Y คือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นจากทั้งในการวิ่งของรถไฟบนทางตรงและทางโค้ง

5.3 สมการการคำนวณแรงที่ล้อรถไฟ ของ Nadal [9,10]

การวิ่งของรถไฟในทางโค้ง ล้อและเพลาล้อมจะมีลักษณะเบี่ยงเบนไปโดยที่ล้อบริเวณขอบรัศมีเล็กจะสัมผัสกับรางในที่มีรัศมีแคบ และล้อบริเวณขอบรัศมีใหญ่จะสัมผัสกับรางนอกที่มีรัศมีกว้างดังในรูปที่ 5

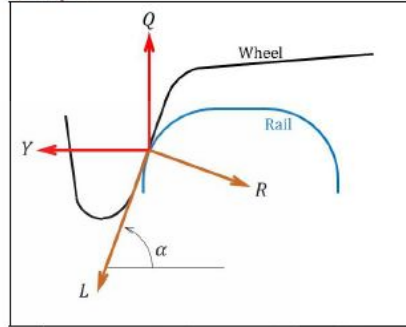


รูปที่ 5 ลักษณะเบี่ยงเบนของล้อและเพลาล้อมในทางโค้ง [9] และในขณะที่รถไฟเข้าโค้งชุดเพลาล้อมและโบกัลดไฟจะมีทิศทางโค้งไปตามราง แต่ตัวรถนั้นจะมีแนวการเปลี่ยนทิศทางที่ช้าไปกว่าโบกัลดไฟ จากลักษณะดังกล่าวจึงทำให้เกิดแรงกระทำและแรงดัดขึ้นดังในรูปที่ 6 ด้วยเหตุนี้การวัดแรงกระทำต่างๆจึงทำได้ยากขึ้น ทำให้ต้องใช้เครื่องมือวัดในการวัดแรงกระทำ



รูปที่ 6 ลักษณะแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการเข้าโค้งของรถไฟ แต่ในการวิ่งของรถไฟในทางโค้งที่มีการยกโค้ง ล้อและเพลาล้อมจะมีลักษณะเบี่ยงเบนที่ต่างออกไปซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น ความสูงของการยกโค้ง ความเร็วของรถไฟขณะเข้าโค้ง น้ำหนักของรถไฟ เป็นต้น ซึ่งจากการเข้าโค้งของรถไฟนี้ทำให้เกิดการป็นรางของล้อรถไฟ โดยมีลักษณะคือบังใบของล้อรถไฟสัมผัส

กับรางรถไฟ และมีการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นโดย "สูตรของนาคาล" ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 จุดสัมผัสของล้อรถไฟกับรางรถไฟในทางโค้ง [9,10]

สูตรของนาคาลเป็นสมการในการออกแบริดรถไฟ ที่เกี่ยวข้องกับแรง กระทำต่อ ล้อและโบกัลดไฟ เมื่อรถไฟมีแรงมากระทำกับตัวล้อและโบกัลดไฟ จะส่งผลให้ตัวรถเกิดการเอียง แรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น จะพิจารณาได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ แรงด้านบน แรงด้านข้าง และแรงตามแนวการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถพิจารณาจุดสัมผัสได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 7 ในสมการนี้ Y และ Q หมายถึง แรงด้านข้างและแรงด้านบนที่กระทำต่อล้อและราง alpha คือมุมที่ทำเมื่อหน้าแปลนล้อที่อยู่ติดกับบังใบล้อ และ mu คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ แรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางรถไฟ จะคำนวณได้จากสมการ

$$Y = L \cos \alpha - R \sin \alpha \quad (13)$$

และ

$$-Q = L \sin \alpha + R \cos \alpha \quad (14)$$

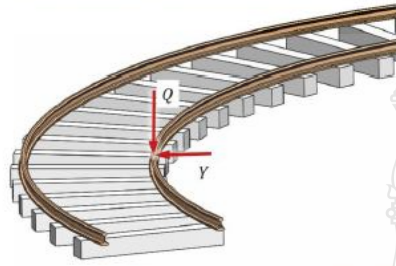
เนื่องจาก $L = \mu R$ จะได้ (13) ดังนี้

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (15)$$

6. การประเมินตัวแปรของความเสี่ยงต่อการดทรง [2,3]

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8 การประเมินความเสี่ยงต่อการดทรงของรถไฟเมื่อเข้าโค้งนั้นจะเห็นได้ว่า มีแรงกระทำหลักมาจาก 2 ส่วน คือ 1) แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของรถไฟและน้ำหนักบรรทุก และ 2) แรงกระทำด้านข้าง (Y) ที่เกิดขึ้นในการวิ่งของรถไฟในทางโค้ง ซึ่งตามมาตรฐาน UIC 518 ค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ [2] ในทางตรง Y/Q ต้องไม่เกิน 0.8 และในทางโค้งต้องไม่เกิน 1.2 ซึ่งในปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มาตรฐานการวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้ จึงเป็นข้อเสียเปรียบในการทำความเข้าใจในขณะเข้าโค้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความเร็กรวมเข้าโค้งของรถไฟอีกด้วย

โดยในบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงกระทำด้านข้าง (Y) ต่อชุดเพลาล้อรถไฟในขณะที่รถไฟเข้าโค้ง ส่วนแรงกระทำในแนวตั้ง (Q) ต่อชุดเพลาล้อรถไฟได้มีการนำเสนอวิธีการวัดโดยทั่วไปจึงจะไม่นำมาพิจารณาในบทความนี้

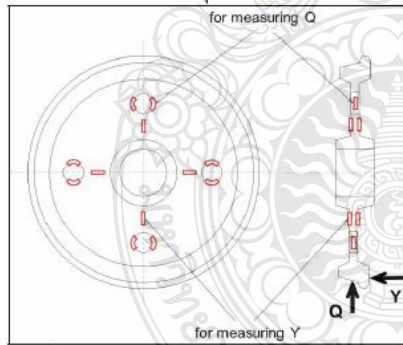


รูปที่ 8 แรงกระทำในแนวตั้ง (Q) และแรงกระทำด้านข้าง (Y) ในขณะที่รถไฟเข้าโค้ง

7. แนวทางการวัดแรงกระทำระหว่างล้อและราง

7.1 Conventional method [11]

เป็นการวัดแรงกระทำทั้งในแนวตั้งและด้านข้าง โดยการเจาะรูที่ล้อรถไฟและทำการติดตั้ง Strain gauge เพื่อทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าและนำกลับมาแปลงเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 9 โดยข้อดีของวิธีการนี้คือค่าของแรงกระทำที่ได้มีความแม่นยำสูง แต่ข้อเสียก็คือในการทดสอบการใช้งานจริง จะกระทำได้เพียงระยะทางสั้นๆ เนื่องจากเกิดข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ในการวัด

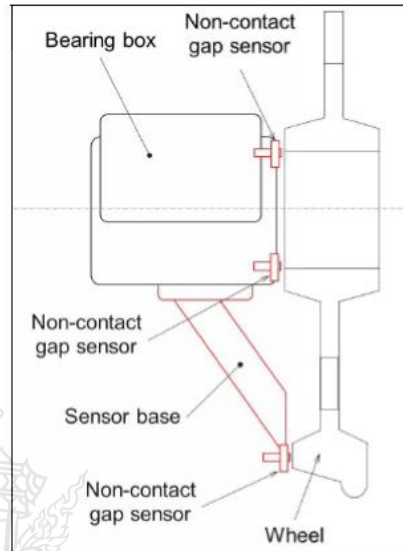


รูปที่ 9 Conventional method by stain gauge for vertical and lateral contact force

7.2 Inductive displacement sensor method [10]

เป็นการวัดแรงกระทำด้านข้าง โดยการติดตั้ง Non-contact gap sensor ที่บริเวณล้อทดสอบ เพื่อวัดระยะการโก่งตัวของล้อเทียบกับวิธีการ Conventional method ดังใน

รูปที่ 10 โดยข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถวัดค่าได้อย่างต่อเนื่องตลอดอายุการใช้งาน แต่ข้อเสียก็คือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงสูง



รูปที่ 10 Inductive displacement sensor method by Non-contact gap sensor for lateral contact force

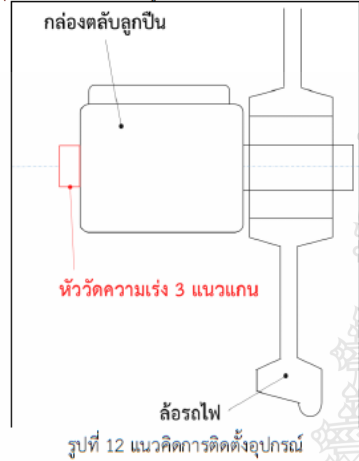
7.3 แนวคิดการวัดแรงกระทำแบบ Acceleration measurement method

เป็นการวัดแรงกระทำในแนวตั้ง ด้านข้างและตามแนวรางโดยการติดตั้งหัววัดความเร่ง 3 แนวแกนเพื่อวัดความเร่งที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัด หัววัดความเร่งจะส่งข้อมูลกลับมายังเครื่องรับสัญญาณ และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงผล ทำให้สามารถเก็บค่าความเร่งความเร่งได้ทุกช่วงเวลาวัดและนำกลับมาคำนวณเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 อุปกรณ์เครื่องมือวัดความเร่ง

โดยมีแนวคิดการติดตั้งหัววัดความเร่งเพื่อหาแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางรถไฟที่ตรงบริเวณกล่องตลับลูกปืนของชุดเพลาล้อรถไฟดังในรูปที่ 12



2) การวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Acceleration measurement method

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Acceleration measurement method ในทางยกโค้งของการคำนวณกับการวัดความเร่งในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก	
	การคำนวณ	การวัดความเร่ง
0°	0 N	0.82 N
1.7°	4.36 N	5.35 N
3.4°	8.72 N	9.70 N
5.1°	13.08 N	12.44 N

8.2 การวัดแรงกระทำด้านข้างในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

1) การวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Acceleration measurement method

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Acceleration measurement method ในทางโค้งและทางตรงที่มีการยกโค้ง ในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่

ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง	ช่วงของแรงกระทำด้านข้างที่ความเร็ว (N)			
	0.28 (m/s)	0.44 ถึง 0.60 (m/s)	0.66 ถึง 0.76 (m/s)	0.84 ถึง 0.89 (m/s)
0°	-26 ถึง 27	-103 ถึง 130	-149 ถึง 189	-204 ถึง 220
1.7°	-32 ถึง 27	-114 ถึง 108	-152 ถึง 135	-154 ถึง 174
3.4°	-29 ถึง 33	-133 ถึง 123	-157 ถึง 184	-199 ถึง 210
5.1°	-30 ถึง 28	-129 ถึง 118	-107 ถึง 108	-167 ถึง 149

8. ผลการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างในทางตรงและทางโค้ง ที่มีการยกโค้ง และที่มีความลาดชัน ที่ความเร็ว 4 ระดับ ในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่งและเคลื่อนที่ โดยทำการเก็บค่าและบันทึกผลการทดสอบ โดยได้ทำการทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างอยู่ 2 ลักษณะใหญ่ๆคือ 1.การทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง 2.การทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างในขณะที่รถไฟจำลองเคลื่อนที่ โดยได้แบ่งการยกโค้งทางรถไฟเป็น 0, 30, 60, 90 มิลลิเมตร (0°, 1.7°, 3.4°, 5.1°) จะสามารถแบ่งการทดลองได้ดังนี้

8.1 การวัดแรงกระทำด้านข้างในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

1) การวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Conventional method

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Conventional method ในทางยกโค้งของการคำนวณกับการวัดความเครียดในขณะที่รถไฟจำลองหยุดนิ่ง

ความเอียงของการยกโค้งในทางรถไฟจำลอง	แรงกระทำด้านข้างจาก	
	การคำนวณ	การวัดความเครียด
0°	0 N	-
1.7°	4.36 N	3.62 N
3.4°	8.72 N	9.03 N
5.1°	13.08 N	15.23 N

9. สรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาแนวทางการวัดแรงกระทำระหว่างล้อและราง มีวิธีการวัดคือ

1) การวัดแรงกระทำแบบ Conventional method เป็นการวัดในแนวตั้งและด้านข้าง โดยทำการติดตั้ง Strain gauge ในการวัดค่าความเครียด โดยค่าความเครียดที่วัดมีความละเอียดสูง และแปลงค่าความเครียดที่วัดได้กลับมาเป็น

แรงกระทำ ค่าของแรงกระทำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำจากการคำนวณ

2) การวัดแรงกระทำแบบ Inductive displacement sensor method เป็นการวัดแรงกระทำด้านข้าง โดยการติดตั้ง Non-contact gap sensor เพื่อวัดการโก่งตัวของล้อรถไฟและเทียบกลับมาเป็นการหาแรงกระทำกับวิธีการ Conventional method

3) แนวคิดการวัดแรงกระทำแบบ Acceleration measurement method เป็นการวัดในแนวตั้ง ด้านข้างและตามแนวราง โดยการติดตั้งหัววัดความเร่ง 3 แนวแกนเพื่อวัดความเร่ง โดยค่าความเร่งที่วัดมีความละเอียดสูง และแปลงค่าความเร่งที่วัดได้กลับมาเป็นแรงกระทำ ค่าของแรงกระทำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำจากการคำนวณกระทำ

และจากการทดสอบการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Conventional method และการวัดแรงกระทำด้านข้างแบบ Acceleration measurement method จากการวัดในขณะที่รถไฟหยุดนิ่ง ทั้ง 2 วิธีการวัดมีค่าของแรงกระทำใกล้เคียงกับค่าของแรงกระทำที่ได้จากการคำนวณ และวิธีการวัดแบบใช้ความเร่งยังสามารถหาค่าของแรงกระทำที่เกิดขึ้นต่อเพลาล้อรถไฟในขณะที่เคลื่อนที่ได้อีกด้วย

9.2 ข้อเสนอแนะ

วิธีการวัดแบบ Conventional method มีข้อดีคือสามารถวัดแรงกระทำได้อย่างแม่นยำสูง และมีข้อเสียคือในการทดสอบการใช้งานจริงจะทำการวัดได้เพียงระยะทางสั้นๆ วิธีการวัดแบบ Inductive displacement sensor method มีข้อดีคือสามารถวัดแรงกระทำได้อย่างต่อเนื่อง และมีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงสูง แนวคิดวิธีการวัดแบบ Acceleration measurement method มีข้อดีคือสามารถวัดแรงกระทำได้อย่างต่อเนื่องและความแม่นยำสูง และมีข้อเสียคืออุปกรณ์การวัดไม่เหมาะกับการใช้งานในที่ที่มีความชื้นสูงและมีข้อจำกัดในการวัดแรงกระทำด้านข้างคือไม่สามารถวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้แม่นยำหากลูกปืนเพลาล้อรถไฟมีการรับแรงกระทำในแนวแกนได้

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 (เพิ่มเติม) งานวิจัยนี้ได้รับการช่วยเหลือและดำเนินงานจากศูนย์นวัตกรรมระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

11. เอกสารอ้างอิง

[1] Myung Su Kim, Geo Young Kim, Hyun Tae Kim and Jeong Seo Koo (2018). Theoretical cross-wind speed

against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects. Journal of Mechanical Science and Technology, April 2016, pp. 3487~3498.

[2] UIC 518 (2005). Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior-Safety-Track fatigue-Ride quality, 3rd edition, International union of railway.

[3] Forces Acting on the Railway Track (2016), URL: <http://www.brainkart.com>, access on 20/01/2018.

[4] Akira Matsumoto, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Makoto Shimizu, Jun Kurihara, Masao Tomeoka, et al. (2012). Continuous observation of wheel/rail contact forces in curved track and theoretical considerations, Vehicle System Dynamics Vol. 50, International journal of vehicle mechanics and mobility, ISSN: 0042-3114, July 2012, pp. 349-364.

[5] Thairath News. รถไฟตกราง, แหล่งที่มา <https://www.thairath.co.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 20/01/2561.

[6] นคร จันทรร (2554). Cant and Gauge widening, ข้างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ, กรุงเทพฯ: โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

[7] Joseph Kalousek (2005). Wheel/rail damage and its relationship to track curvature, Journal of science direct, November 2004, Wear 258, pp. 1330-1335.

[8] Akira Matsumoto, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Makoto Shimizu, Jun Kurihara, Takuya Saitou, Yohei Michitsujii, Ryo Matsui, Masuhisa Tanimoto, Masa-aki Mizuno (2014). Actual states of wheel/rail contact forces and friction on sharp curves - Continuous monitoring from in-service trains and numerical simulations, Journal of science direct, December 2013, Wear 314, pp. 189-197.

[9] Jing Zeng, Pingbo Wu (2008). Study on the wheel/rail interaction and derailment Safety, Journal of science direct, June 2008, Wear 265, pp. 1452-2459.

[10] J. Spatamaria, E.G. Vaddillo, J. Gomez (2009). Influence of creep forces on the risk of derailment of railway vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol. 47, June 2009, pp. 721-752.

[11] Akira Matsumotoa, Yasuhiro Satoa, Hiroyuki Ohnoa, Masao Tomeokab, Kosuke Matsumotob, Jun Kuriharab, Tomohisa Oginob, Masuhisa Tanimotoc, Yasushi Kishimotoc, Yoshi Satod, Takuji Nakaid (2008). A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations, Journal of science direct, June 2008, Wear 265, pp. 1518-1525.



ENETT14-XXX-XX



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 14th Conference on Energy Network of Thailand

ขอขอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

มนตรี กุลประดิษฐ์ และ เทอดเกียรติ ลิ้มปีทีปรการ

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย “ภาคบรรยาย”

การศึกษากาวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาถลอรไฟ

ระหว่างวันที่ 13 - 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561

ณ โรงแรมโนโวเทล ริมเพ จังหวัดระยอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังทอง
คมบุติคนะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์
ประธานกรรมการฝ่ายวิชาการ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายมนตรี กุลประดิษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	12 มีนาคม 2531
ที่อยู่	38 หมู่ 6 ตำบลโพธิ์ไทรงาม อำเภอบึงนาราง จังหวัดพิจิตร 66130
การศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (พ.ศ. 2555)
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2552 - 2554	รับราชการทหาร ศูนย์อำนวยการสร้างอาวุธ ศูนย์การอุตสาหกรรม ป้องกันประเทศและ พลังงานทหาร, ลพบุรี
พ.ศ. 2555	ผู้ช่วยวิศวกร (สหกิจศึกษา) บริษัท เวลคิง อลรอยส์ (ประเทศไทย) จำกัด, สระบุรี
พ.ศ. 2556	วิศวกรฝ่ายขาย บริษัท ไทโค พูวา จำกัด, ปทุมธานี
พ.ศ. 2556 - 2559	วิศวกรออกแบบที่ 1 บริษัท โตชิบา แครเรียร์ (ประเทศไทย) จำกัด, ปทุมธานี
เบอร์โทรศัพท์	089 346 0192
E-mail	tong_montree.a@hotmail.com, tongada147@gmail.com