

การประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารในทางโค้งด้วยวิธีการ
พลศาสตร์ของมัลติบอดี

Evaluation of Permissible Speed of Passenger Train in Curved Track
using Multi-Body Dynamics Approach



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารในทางโค้งด้วยวิธีการ
พลศาสตร์ของมัลติบอดี

Evaluation of Permissible Speed of Passenger Train in Curved Track
using Multi-Body Dynamics Approach



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of Permissible Speed of Passenger Train in Curved Track
using Multi-Body Dynamics Approach



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

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2562

หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารในทางโค้งด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอดี
Evaluation of Permissible Speed of Passenger Train in Curved Track using Multi-Body
Dynamics Approach

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกมลนันทน์ ทองกุล รหัสประจำตัว 59010013
2. นายจรรุวิทย์ ผึ้งชลจิตต์ รหัสประจำตัว 59010193
3. นายสาริษฐ์ อรุณ รหัสประจำตัว 59011391



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารในทางโค้งด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมวลติบอร์ดี

นางสาว กมลนัธ ทองกุล 59010013
นาย จารุวิทย์ ผึ้งชลจิตต์ 59010193
นาย สาริษฐ์ อรุณ 59011391
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ (Permissible Speed) ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมวลติบอร์ดี (multi body dynamics approach) โดยวิธีการพลศาสตร์ของมวลติบอร์ดีใช้หลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ (joint) และชิ้นส่วนทางกล เช่น สปริงและตัวหน่วงเป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาระบบมวลติบอร์ดีของรถไฟโดยสารขึ้นมาเพื่อใช้ในการประเมินค่าความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟที่เคลื่อนที่บนทางโค้งโดยไม่ทำให้รถไฟมีการพลิกคว่ำ (over-turning) หรือเกิดการตกรางเนื่องจากล้อปีนราง (wheel climb derailment) หลังจากนั้นนำค่าความเร็วที่ประเมินได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการอย่างง่ายที่ประเมินความเร็วสูงสุดในการพลิกคว่ำของรถไฟบนทางโค้งจากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์กับพิกัดความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทยได้กำหนดไว้บนเส้นทาง ผลจากการศึกษาค่าความเร็วที่ยอมรับด้วยวิธีการพลศาสตร์มวลติบอร์ดีมีค่าที่ต่ำกว่าวิธีการทฤษฎีความสูงสุดในทางโค้งด้วยเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาในการคำนวณที่มากกว่าแต่ทำให้ผลที่ได้มีค่าที่สมจริงกว่า

แต่อย่างไรก็ตามพิกัดความเร็วที่การรถไฟแห่งประเทศไทยได้กำหนดก็มีค่าที่ต่ำกว่าผลจากการศึกษาดูด้วยเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาถึงการใช้งานจริงด้วย โดยผลจากการศึกษาที่ได้จะถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาถึงแนวทางในการปรับปรุงพิกัดความเร็วสูงสุดของรถไฟโดยสารบนทางโค้งให้ให้มีประสิทธิผลมากขึ้น ภายใต้ความปลอดภัยต่อไป

Evaluation of Permissible Speed of Passenger Train in Curved Track using Multi-Body Dynamics Approach

Kamolnat	Tongkul	59010013
Jaruvit	Fangcholjit	59010193
Sarich	Arun	59011931
Assoc.Prof. Dr. Monsak Pimsarn	Advisor	
		Year 2562

ABSTRACT

The objective of this project is to evaluate the permissible speed of a passenger train by using the multibody dynamics approach, based on motion analysis of rigid bodies which are linked by joints and mechanical parts, such as, springs and dampers etc. In this project, the multibody system of a passenger train has been developed to evaluate permissible speed of passenger trains on curves without causing the train to derail by over-turning or wheel climb. After the permissible speeds had been estimated, the results were compared with the analytical results, based on a simple equation that evaluates the maximum speed of the overturning of train on the curve, and the maximum speeds which are specified by the State Railway of Thailand. The comparison study has showed that the evaluated permissible speeds by using multibody dynamics method are lower than the analytical results. This is due to more factors needed to be considered in the calculation.

However, the specified maximum speeds by the State Railway of Thailand are significantly lower because the track conditions are necessary to be concerned. The results of this study will be used for study a way to improve the maximum speed of the passenger trains on curves under safety requirement.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา และ นาย สิริพงษ์ ดาวเจริญพร ที่ช่วยให้คำแนะนำโปรแกรม SIGMA SAMS อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง ดร.บำรุง พ่วงเกิด ที่คอยให้คำแนะนำในเรื่องต่าง ๆ ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางรางที่ให้ความรู้ในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณศูนย์วิศวกรรม การรถไฟแห่งประเทศไทย ดร.อรรถพล เก่าประเสริฐ ในการสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาว กมลนัฏ์ ทองกุล

นาย จารุวิทย์ ฝั่งชลจิตต์

นาย สาริษฐ์ อรุณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตารางเนื่องจากบังใบล้อป็นราง.....	3
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมัลติบอร์ดี้.....	4
2.3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3.1. ทฤษฎีพื้นฐานของรถไฟ.....	6
2.3.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง.....	12
2.3.3. ทฤษฎีการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์มัลติบอร์ดี้.....	16
วิธีการดำเนินงาน.....	49
3.1 บทนำ.....	49
3.2 แบบจำลองรถโดยสาร	50
3.2.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองรถโดยสาร.....	50
3.2.2 การสร้างแบบจำลองสามมิติหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของตัวรถ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี	54
3.3.1 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SIGMA SAMS	54
3.3.2 การกำหนดค่าความเร็วของแบบจำลองรถโดยสาร	62
3.3.3 การประมวลผลการจำลอง	62
3.3.4 การแสดงผลการจำลอง	63
3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้	63
3.4.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	63
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	65
4.1 บทนำ	65
4.2 ความเร็วสูงสุดของรถโดยสารในทางโค้ง	65
4.3 แรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อและรางของรถโดยสารในทางโค้ง	67
4.4 ตำแหน่งสัมผัสระหว่างล้อและรางของรถโดยสารในทางโค้ง	70
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	73
5.3 ปัญหาจากการศึกษา และ ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 แสดงโครงสร้างและหมายเลขภายในรถโดยสาร	52
3-2 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของระบบกันสะเทือน	53
3-3 แสดงค่าสมบัติทางกลมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้าง.....	56
3-4 แสดงค่าพิกัดตำแหน่งของโครงสร้างโดยยึดตามตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล	56
3-5 แสดงค่าความเร็วของชิ้นส่วนโครงสร้างเมื่อกำหนดให้แบบจำลองมีความเร็ว 10 m/s.....	59
3-6 แสดงแรงค้ำที่กระทำกับโครงสร้าง.....	60
3-7 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างที่ถูกเชื่อมโดยข้อต่อหมุนและทิศทางของแกนข้อต่อ	60
3-8 แสดงโครงสร้างที่ถูกรองรับ, ค่าความเป็นสปริง, และความหน่วงของระบบกันสะเทือน	61
3-9 โครงสร้างที่ถูกรองรับโดยแปรง ค่าความเป็นสปริงและความหน่วงของแปรง.....	62
4.1 แสดงทางโค้งที่ใช้ในการทดลองซึ่งประกอบไปด้วย รัศมีโค้ง ค่ายกโค้งมุมยกโค้ง และ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสารจากวิธีการต่าง ๆ	64

สารบัญรูป

ตารางที่	หน้า
2.1 ภาพแสดงแบบจำลองการตรวจสอบของล้อเดี่ยวที่สัมผัสกับราง	4
2.2 ภาพแสดงการจำลองแรงสัมผัสของเฮิร์ตซ์กับระยะยุบตัวระหว่างล้อและราง	4
2.3 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทาง.....	6
2.4 ส่วนประกอบของโบกี้	7
2.5 ส่วนประกอบของราง	8
2.6 แสดงขนาดและมิติของราง UIC 60	8
2.7 ขนาดทางรถไฟ	9
2.8 องค์ประกอบของล้อ.....	10
2.9 การตรึงแบบบังใบล้อปืนราง.....	11
2.10 การตรึงแบบรางพลิก.....	11
2.11 การตรึงแบบรางถ่างออกจากกัน	11
2.12 การตรึงแบบการเคลื่อนตัวของตามแนวด้านข้าง.....	11
2.13 แสดงแนวแรงของรถไฟเมื่อวิ่งอยู่บนทางโค้ง	12
2.14 ภาพแสดงแนวแรงและแขนของโมเมนต์ ของตัวรถไฟเมื่อมีการยกโค้ง	13
2.15 รถรางเข้าด้านในโค้งเนื่องจากมีจุดศูนย์กลางสูงและทางยกระดับสูงมาก.....	16
2.16 เรขาคณิตแสดงแนวแรงและแขนของโมเมนต์ด้านบน ของตัวรถไฟเมื่ออยู่บนทางที่มีการยกโค้งสูง.....	16
2.17 แสดงยานพาหนะรถไฟ.....	18
2.18 ตัวอย่างของโบกี้	18
2.19 แสดงขบวนรถไฟที่วิ่งบนรางโค้งแบบไม่เชิงเส้น.....	20
2.20 การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างยานพาหนะกับราง (vehicle-track interaction).....	22
2.21 แรงสมดุลในกรณีล้อปืนราง (Force balance in the case of a wheel climb).....	22
2.22 พิกัดสัมผัส	24
2.23 พื้นี่เส้นโค้ง.....	26
2.24 เรขาคณิตของพื้นผิว	27
2.25 ส่วนของทาง.....	28
2.26 เรขาคณิตล้อ	29
2.27 สมการการสัมผัสระบบมัลติบอร์ดี	31
2.28 พิกัดวิถี (Trajectory coordinates	33
2.29 รัศมีการโค้งของล้อ.....	36

2.30 การเคลื่อนที่แบบส่ายของชุดล้อ (Wheelset hunting motion).....	37
2.31 การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของชุดล้อ (Wheelset lateral motion).....	39
2.32 ความเร็วสมมูล.....	41
2.33 ตัวอย่างของทางรถไฟซึ่งสามารถใช้ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเปียงและแกว่ง (Example of a track that can be used to test yaw and sway motion)	38
2.34 ตัวอย่างของทางรถไฟซึ่งสามารถใช้สำหรับการโค้งแบบพลศาสตร์ (example of a track that can be used for dynamics curving)	44
2.35 ประแจทางเหล็กราง (Rail turnout).....	45
2.36 แสดงทิศทางของเวกเตอร์ในข้อต่อหมุน	46
2.37 องค์ประกอบการเคลื่อนตำแหน่งของสปริง ตัวหน่วง และตัวขับเคลื่อน (Translational spring-damper actuator element)	47
2.38 ส่วนประกอบของสปริงและตัวหน่วง (Spring-damper element)	48
2.39 ส่วนประกอบของบุชชิ่ง (Bushing element)	49
3.1 แสดงแผนภูมิของปริภูมิกำหนด.....	50
3.2 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างรถโดยสารอย่างง่าย	52
3.3 ภาพแสดงแบบจำลองสามมิติจากโปรแกรม AutoCAD.....	53
3.4 ภาพแสดงการนำเข้าแบบจำลองสามมิติเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks.....	54
3.5 ภาพแสดงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยโดยจาก Mass Properties.....	54
3.6 ภาพแสดงไฟล์ *.sam ถูกเปิดด้วยโปรแกรม Notepad	55
3.7 ภาพแสดงการจำลองของโปรแกรม SIGMA SAMS.....	56
3.8 ภาพแสดงบัญชีข้อมูลโค้งและรายละเอียดของทางในทางโค้งของกองบำรุงทางเขตลำปาง.....	65
4.1 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	67
4.2 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	67
4.3 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	68
4.4 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	68
4.5 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	68

4.6 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	68
4.7 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	68
4.8 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	68
4.9 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)	70
4.10 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ล้อด้านใน (ขวา).....	70
4.11 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)	70
4.12 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ล้อโค้งใน (ขวา)	70
4.13 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)	71
4.14 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ล้อโค้งใน (ขวา)	71
4.15 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)	71
4.16 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ล้อโค้งใน (ขวา)	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเดินทางด้วยรถไฟนั้นมักจะเกิดความล่าช้าในเส้นทางที่มีโค้งจำนวนมาก เนื่องจากรถไฟไม่สามารถวิ่งเร็วกว่าพิกัดที่กำหนดไว้ เพราะอาจจะทำให้รถไฟเกิดการตกรางได้เนื่องจากบังล้อปีนราง (Wheel climbing derailment) ส่งผลให้รถไฟพลิกคว่ำ (Over-turning) ได้ ซึ่งจะเกิดความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินจำนวนมาก ดังนั้นในปฏิญญาพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา และประเมินความเร็วที่ยอมรับของรถไฟโดยสารด้วยการวิเคราะห์โดยใช้วิธีแบบดั้งเดิมนั้นใช้การคำนวณด้วยการใช้สมการพิกัดความปลอดภัยของนาดาล (Nadal's criteria) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางการวิเคราะห์เบื้องต้นได้เนื่องจากเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้สมการที่พิจารณาโดยอาศัยตัวแปรในภาพรวมเท่านั้น เช่น น้ำหนัก รัศมีของทางโค้ง ความสูงของรถไฟ มุมที่ใช้ในการยกโค้ง เป็นต้น แต่ยังคงขาดความแม่นยำในการนำไปใช้จริง และเพื่อให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในปฏิญญาพนธ์นี้จะนำเสนอถึง วิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอดี (Multi body dynamics method) ด้วยการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยสาร โดยใช้โปรแกรม SIGMA SAMS [1] ในการสร้างแบบจำลองซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์หิมผลลัพธ์ได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอดี

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอดีกับวิธีการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่บนทางโค้งและพิกัดความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทยได้กำหนดไว้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 สามารถประเมินค่าความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารบนทางโค้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอดีได้

1.3.2 ค่าความเร็วที่ประเมินได้จะสอดคล้องกับค่าที่ได้การทดลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอดี และมากกว่าพิกัดความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทยได้กำหนดไว้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 กำหนดสาเหตุของการตรวจอันเนื่องมาจากกรณีที่ยังใบล้อยี่นรางเพียงกรณีเดียวเท่านั้น

1.4.2 การศึกษาแบบจำลองการตรวจ ภายใต้ข้อสมมุติฐานว่าล้อและรางนั้นให้ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มี การสึกหรอหรือบิดตัวเนื่องมาจากการใช้งาน

1.4.3 กำหนดให้มีรัศมีความโค้ง ค่ายกโค้ง และมุมยกโค้งของแต่ละโค้งดังต่อไปนี้ 180 เมตร 75 มิลลิเมตร 4.29 องศา 400 เมตร 70 มิลลิเมตร 4.00 องศา, และ 500 เมตร 55 มิลลิเมตร 3.15 องศา

1.4.4 กำหนดใช้งานโปรแกรม SIGMA SAMS สำหรับการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ด้วยวิธีการ พลศาสตร์มัลติบอร์ดี

1.4.5 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในตำแหน่งต่าง ๆ จะพิจารณาในกรณีของ ทางโค้ง เท่านั้น

1.4.6 ใช้ข้อมูลที่ศึกษานำมาพิจารณาด้วย สมการการตรวจของนาตาล, ทฤษฎีการเคลื่อนที่ทาง พลศาสตร์มัลติบอร์ดี และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง เพื่อพิจารณาความเป็นไป ได้ของการที่ยังใบล้อยี่นรางอันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้รถไฟตรวจ

1.4.7 การวิเคราะห์ที่ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยด้าน อากาศพลศาสตร์มา หรือรูปทรงของตัวรถ โดยใช้โมเดล อย่างง่ายมาพิจารณาในวิธีการพลศาสตร์มัลติบอร์ดี

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมัลติบอร์ดี

1.5.2 ตั้งสมมุติฐานในการออกแบบแบบจำลองการเคลื่อนที่ด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี

1.5.3 ทำการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

1.5.4 สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยสารด้วยโปรแกรม SIGMA SAMS

1.5.5 ทดสอบและบันทึกข้อมูล

1.5.6 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

1.5.7 สรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

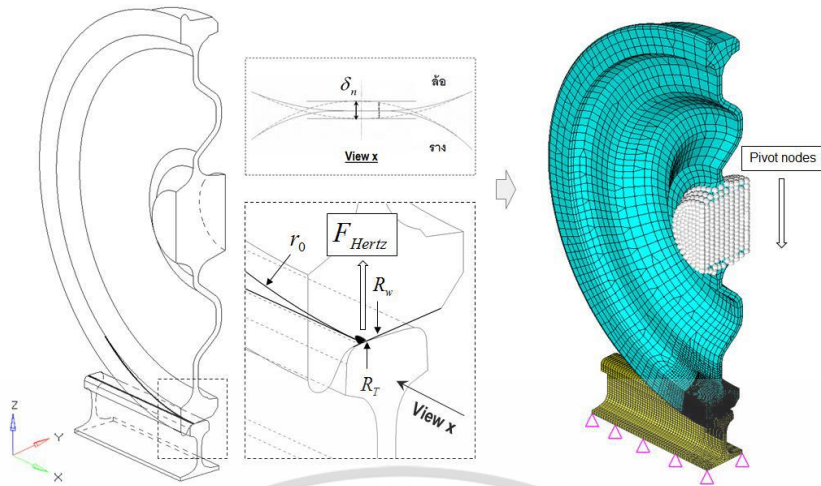
2.1 บทนำ

ในปฏิญญาพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ความรู้ และแนวคิดเกี่ยวกับ ทฤษฎีการตรวงแบบบังใบล้อปืนรางของ นาดาล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง และแนวคิดของมัลติบอร์ดีมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาความเร็ว ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

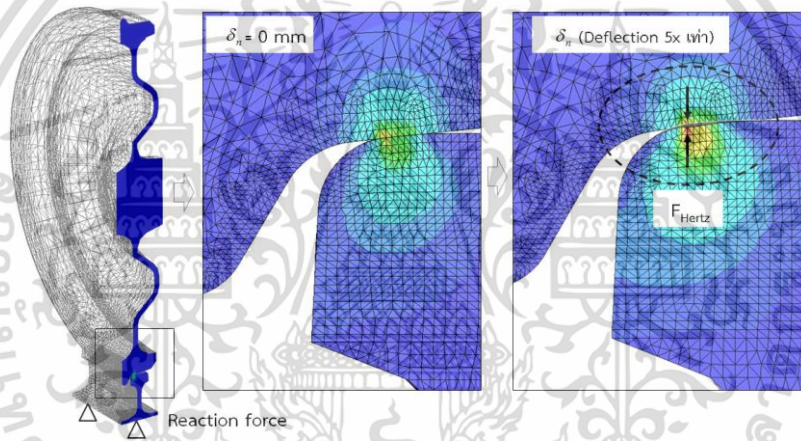
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวงเนื่องจากบังใบล้อปืนราง

ในปี 2015 นายสุรทัศน์ กองสุข [7] ได้มีการศึกษาปฏิสัมพันธ์โดยพื้นฐานทั่วไปตามพิกัดความปลอดภัยของนาดาล (Nadal's safety limit) นั้นจะมาจากหลักสมดุลง่ายในสองมิติที่มีความสัมพันธ์เฉพาะมุมบังใบล้อและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่านั้น แต่ไม่นำผลของมุมปะทะของชุดล้อมาพิจารณา โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง และการตรวงเนื่องจากบังใบล้อปืนราง (Wheel flange climb derailment) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม Altair HyperWorks 11.0 และ LS-Dyna 971 ถูกนำมาช่วยในการจำลองการปืนรางของชุดล้อภายใต้กระบวนการสถิตเสมือน (Quasi-static) ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ใช้การศึกษาการปืนรางประกอบด้วยมุมปะทะของล้อ มุมของบังใบล้อสัมผัส และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อและราง ค่ามุมปะทะของล้อที่ใช้ในการศึกษามีค่า 0° 0.25° 0.50° 0.75° 1.0° 1.25° และ 1.50° มุมบังใบล้อสัมผัสที่ใช้มีค่า 60° 65° และ 70° ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อและรางที่ใช้ในการศึกษามีค่า 0.15 0.25 และ 0.35 ตามลำดับ ผลของการจำลองจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าพิกัดความปลอดภัยของการตรวงมีมากกว่าพิกัดความปลอดภัยของนาดาลในกรณีมุมปะทะของล้อมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจะมีค่าสอดคล้องกันเมื่อมุมปะทะของล้อมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนมุมของบังใบล้อสัมผัสที่มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อและรางที่ลดลงจะช่วยลดความเสี่ยงการตรวงเนื่องจากล้อปืนราง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง ที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับการใช้สูตรของนาดาล



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงแบบจำลองการตรวจสอบของล้อเดี่ยวที่สัมผัสกับราง [8]



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการจำลองแรงสัมผัสของเฮิร์ตซ์กับระยะยุบตัวระหว่างล้อและราง [8]

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมัลติบอร์ดี

ในปี 2008 Ballew, Brent Steven [2] ได้ทำการศึกษา การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่พลศาสตร์ มัลติบอร์ดีชั้นสูงของระบบรถบรรทุกขนส่งสินค้า ซึ่งกล่าวถึงถึง ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีทางรางที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเวอร์จิเนียมีมุ่งเน้น ไปที่พลวัตของ ลิ่มแรงเสียดทาน (friction wedge) ซึ่งจำลองวัตถุ แข็งเกร็งแบบสามมิติ การศึกษาในปัจจุบันขยายไปถึงการทำงานกับรถบรรทุกแบบครึ่งคัน (A half-truck model) ที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่พลศาสตร์แบบมัลติบอร์ดีที่มีการสัมผัสเพียงฝั่งเดียวเพื่อสร้าง แบบจำลอง การกระทำระหว่างกันของลิ่มแรงเสียดทานกับหมอนรอง(bolster) และโครงด้านข้าง (side frame) โมเดลครึ่งรถบรรทุกที่สร้างขึ้นใน MATLAB เป็นรูปแบบสามมิติพลวัตซึ่งประกอบด้วยวัตถุแข็งเกร็ง 4 อัน คือ หมอนรอง, ลิ่มแรงเสียดทานสองอัน และโครงด้านข้าง แบบจำลองให้แต่ละลิ่ม (wedge) มี 4 ค่าองศา อิสระ คือ การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง การเคลื่อนที่ตามแนวยาว (ระหว่างหมอนรองรางและโครงสร้างด้านข้าง) พิตช์ (pitch, หมุนรอบแกนด้านข้าง) และการหมุนรอบแนวแกน (yaw, หมุนรอบแกนแนวตั้ง) หมอนรองราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 4
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และโครงสร้างด้านข้างจะมีค่างศาอิสระแค้ในแนวตั้งเท่านั้น เราคาดคิดของวัตถุเหล่านี้สามารถปรับเพื่อการจำลองสถานการณ์ต่างๆ หมอนรองรางสามารถเริ่มต้นการส่ายที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (แบบหมุนรอบแกนแนวตั้ง) และโครงด้านข้างอาจจะเริ่มต้นด้วยการกำหนดพิช้ไว้ล่วงหน้า (แบบหมุนรอบแกนด้านข้าง) ผลการจำลองโมเดลการเคลื่อนที่พลศาสตร์มัลติบอร์ดี้นั้นถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จาก NUCARSÂ® ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์การสร้างแบบจำลองรถไฟตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับค่าตัวแปรที่รับเข้ามาที่มีความคล้ายกัน โมเดลเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงแบบใหม่เพื่อตอบสนองต่อค่าตัวแปรที่รับเข้ามาหลังมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของตัวรถ ความสามารถในการระบุการเปลี่ยนแปลงของรถไฟจะดีขึ้น ทำให้สามารถป้องกันไม่ให้รถไฟโคลงไถล และตรวจจากรางการส่ายของลิ้มแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจริงบริเวณที่พื้นผิวที่โค้งเล็กน้อย ในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ พยายามเข้าใจกับเรขาคณิตของลิ้มแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจริง แบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับงานพื้นฐานของโมเดลพื้นฐานการสีกหรือของลิ้มจากการสัมผัสอย่างอิสระโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และไตรโบโลยี (Tribology)

ในปี 2010 Beom-Gyu Eom & Hi Sung Lee [3] ได้ทำการศึกษาการประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของไฟโดยใช้พลศาสตร์มัลติบอร์ดี์ ซึ่งกล่าวถึง แบบจำลองการวิเคราะห์สำหรับระบบมัลติบอร์ดี์ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟซาเมาเอล (Saemaoul) ที่วิ่งผ่านโค้ง การวิเคราะห์ความไว (sensitivity) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจได้ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองนี้ และชุดซอฟต์แวร์รถไฟหรือ ADAMS การวิเคราะห์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การตรวจ และอัตราการรับน้ำหนักของล้อขวานั้นสูงกว่าของล้อซ้ายที่ความเร็วต่ำ แต่ต่ำกว่าด้วยความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์การตรวจและอัตราการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีโค้งลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การตรวจเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วนการรับน้ำหนักเนื่องจากความยาวของช่วงโค้งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การตรวจและอัตราการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนตามการเพิ่มขึ้นของค่างโค้งทาง

2.3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

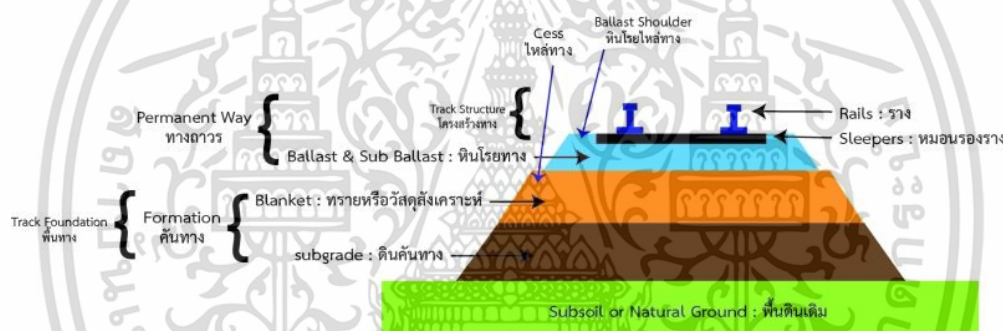
2.3.1. ทฤษฎีพื้นฐานของรถไฟ

2.3.1.1 ส่วนประกอบของรถไฟ

1 ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับล้อและราง

การศึกษาในด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อกับรางนั้น เป็นส่วนหนึ่งของการปรับปรุงสมรรถนะของตู้รถไฟ เพื่อให้สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัยจากการตกรางของรถไฟ หัวข้อนี้จะแยกเป็นสองส่วนหลัก คือ ส่วนรางซึ่งเป็นส่วนประกอบทางรถไฟ และส่วนของล้อซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวรถไฟ

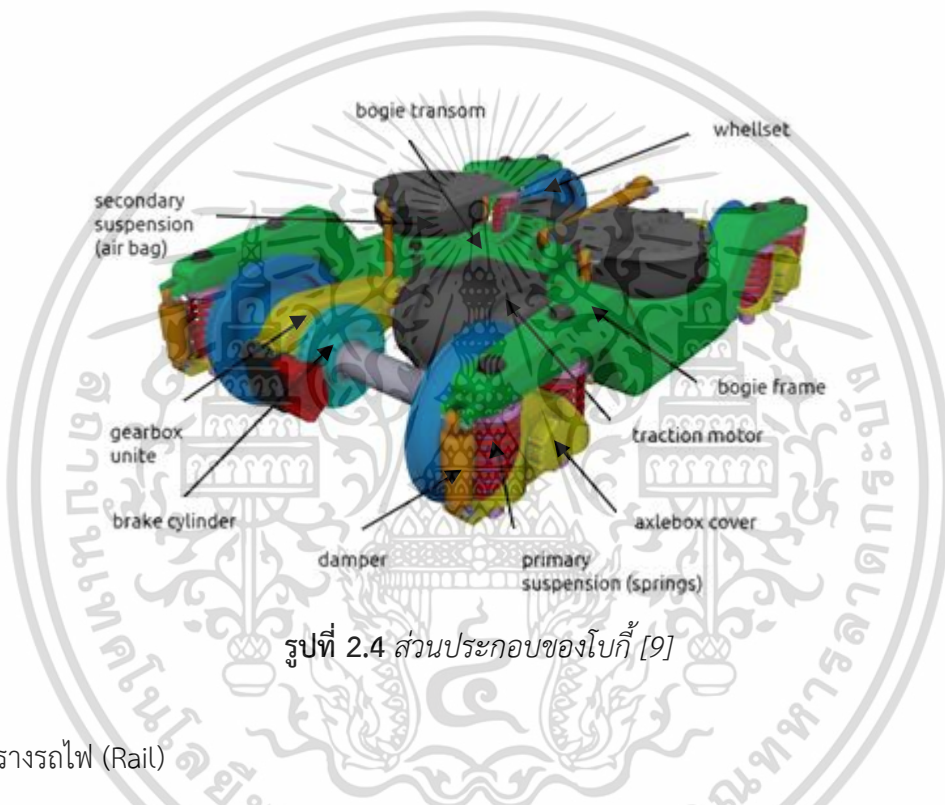
โดยส่วนแรกคือทางรถไฟประกอบด้วย รางรถไฟ (Rail) ที่วางบนหมอนรองราง (Sleepers) โดยมีตัวยึดเหนี่ยวราง (Fasteners) ที่ทำหน้าที่ยึดรางเหล็กเข้ากับหมอนรองรางซึ่งวางอยู่บนหินโรยทาง (Ballast Track) ทำหน้าที่ยึดหมอนรองไว้กับที่ และถ่ายโอนน้ำหนักของรถไฟลงบนคันทาง (Formation) ที่อยู่ด้านล่างสุดก่อนถึงพื้นดิน (Subsoil) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทาง [11]

ส่วนที่สอง คือส่วนของตัวรถไฟ ประกอบด้วยตัวรถ (Car body) ที่วางอยู่บนแคร่ หรือโบกี้ (Bogie) แคร่นั้นมีหลายแบบตั้งแต่แคร่แบบ 1 เพลา มี 2 ล้อ แคร่แบบ 2 เพลา มี 4 ล้อ และแคร่แบบ 3 เพลา มี 6 ล้อ ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า “แคร่ หรือ บ็อกี้” ซึ่งมีหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวรถไฟ ตู้รถไฟที่สร้างใช้งานในระยะแรกยังไม่มีแคร่ ตัวรถจะวางอยู่บนเพลลาที่ประกอบเข้ากับล้อ โดยมีสปริงแทนรับน้ำหนักวางคั่นอยู่ตรงกลางระหว่างเพลลากับตัวรถ ซึ่งทำให้รถไฟไม่สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็ว ทำให้มีการพัฒนาตู้รถไฟ 4 ล้อ ขึ้นในสมัยใหม่ที่สามารถวิ่งได้เร็วกว่าเดิมแต่ก็ไม่เป็นที่นิยมใช้มากนัก การมีแคร่จะทำให้ให้ตู้รถไฟมั่นคง และมีเสถียรภาพทั้งในทางตรงและทางโค้งโดยแคร่จะดูดซับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการวิ่งของรถไฟทำให้ผู้โดยสารรู้สึกสบาย ในการออกแบบโบกีน้นวิศวกรจะพยายามลดการสั่นสะเทือนจากล้อให้ขึ้นมาถึงตัวรถให้น้อยลง โดยจัดให้มีอุปกรณ์รองรับน้ำหนักชุดแรก (Primary suspension) อยู่ระหว่างเพลลาล้อกับแคร่และอุปกรณ์รองรับน้ำหนักของตัวรถไฟชุดที่สอง (Secondary suspension) อยู่ระหว่างแคร่กับตัวรถไฟ ดังรูปที่ 2.4

นอกจากนี้ยังมีการออกแบบระบบรองรับน้ำหนักของรถไฟเป็นสองชั้นแล้วยังต้องติดตั้งอุปกรณ์รองรับการสั่นสะเทือน (Damper) เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติให้ส่งผลกระทบต่อตัวรถให้น้อยที่สุด ส่วนการออกแบบโบกี้สำหรับรถไฟที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำก็อาจจะใช้ระบบรองรับการสั่นสะเทือนแบบง่ายๆ เช่น รถสินค้า 4 ล้อ หรือรถแคร่โดยสารในสมัยเริ่มต้นซึ่งใช้สปริงแบบเหล็กแผ่น (Leaf Spring) ซึ่งไม่ติดตั้งอุปกรณ์รองรับการสั่นสะเทือนโดยอาศัยการเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กสปริงเมื่อเกิดการสั่นในแนวตั้งเพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนไปพร้อมกับการทำหน้าที่เป็นระบบรองรับน้ำหนักในชั้นแรก รถเหล่านี้สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็ว 50-70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเท่านั้นเพราะแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กมีค่าไม่แน่นอนจึงไม่สามารถควบคุมการสั่นได้ตามความต้องการ



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของโบกี้ [9]

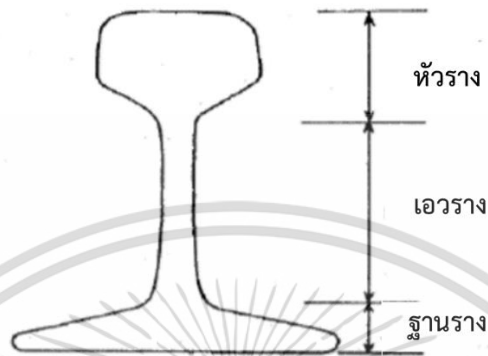
2 รางรถไฟ (Rail)

รางรถไฟในปัจจุบันทำจากเหล็กที่ร้อนประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ หัวราง เอวราง และฐานราง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในอดีตจะมีการยึดรางเข้ากับไม้หมอนแล้วใช้ตะปูรางตอกยึดฐานรางเข้าด้วยกันกับไม้หมอน ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีการยึดรางอย่างหลากหลาย และพบว่ามีการใช้หมอนคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากหมอนไม้ต้องใช้ไม้เนื้อแข็งซึ่งหายากและมีราคาแพง ในขณะที่หมอนคอนกรีตอัดแรงจะมีอายุการใช้งานนานถึง 60 ปี แต่ข้อเสียคือเมื่อเกิดอุบัติเหตุรถไฟตกราง ทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตจะนำมาเปลี่ยนได้ยากกว่าหมอนไม้ ขนาดของรางจะมีผลกับความเร็วของขบวนรถและน้ำหนักกดเพลลา เนื่องจากรางรถไฟจะรับแรงกดที่ส่งผ่านจากเพลลาล้อลงไปที่โครงสร้างทางรถไฟ

การกำหนดขนาดของรางจึงเป็นสิ่งสำคัญซึ่งปัจจุบันการรถไฟแห่งประเทศไทยกำหนดมาตรฐานรางสำหรับทางสร้างใหม่เท่ากับ 100 ปอนด์ต่อหลา ตามมาตรฐานอังกฤษ หรือประมาณ 50 กิโลกรัมต่อเมตรในมาตรฐาน UIC (International Union of Railways)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขนาดของรางรถไฟกำหนดเป็นน้ำหนักต่อหน่วยความยาวระบบเมตริก เช่น ในมาตรฐาน UIC กำหนดเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ระบบมาตรฐานอังกฤษ กำหนดเป็นปอนด์ต่อหลา ปัจจุบันรถไฟฟ้าของประเทศ ไทยนิยมใช้รางตามมาตรฐาน UIC 60 ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของราง [7]

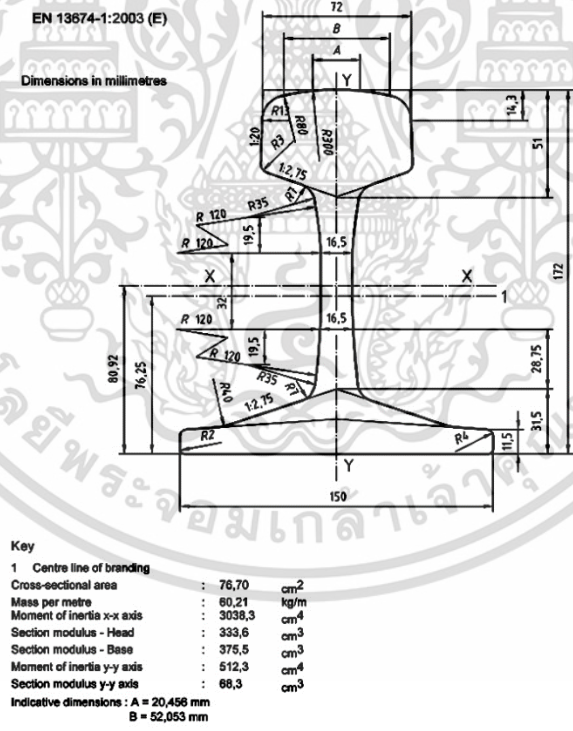


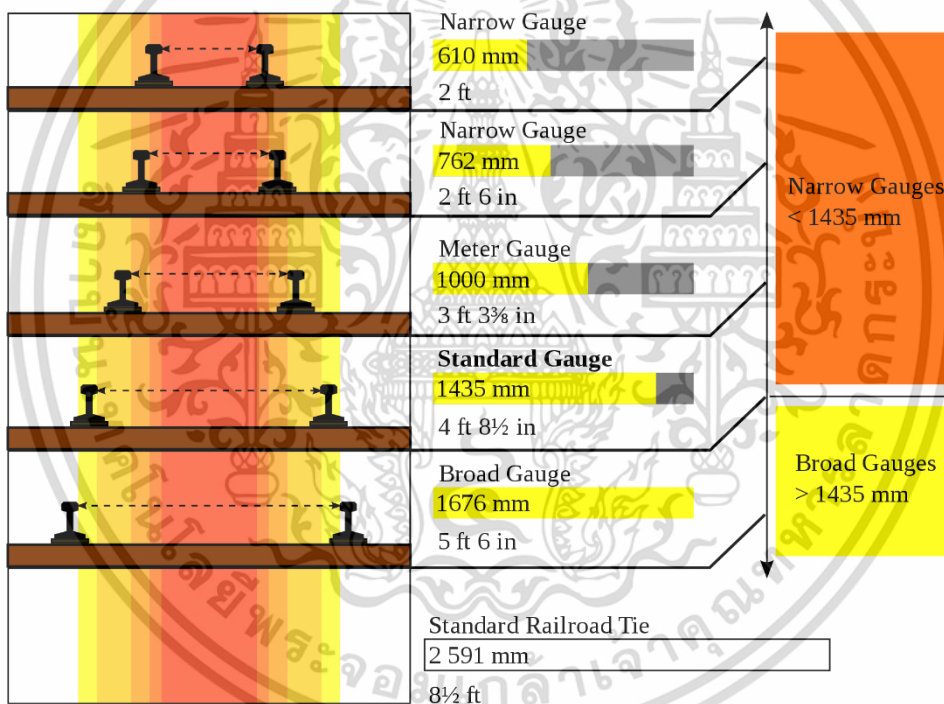
Figure A.21 — Rail profile 60 E 1

รูปที่ 2.6 แสดงขนาดและมิติของราง UIC 60 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
8
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รางรถไฟมีหน้าที่หลักสำคัญอยู่ 2 ประการ คือรับน้ำหนักขบวนรถไฟ และประคองให้รถไฟวิ่งไปตามทางที่กำหนด โดยหน้าที่ในการรับน้ำหนักขบวนรถไฟนั้นจะเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของการรองรับน้ำหนักของทางรถไฟให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดซึ่งก็คือน้ำหนักกดเพลา (Axle load) และการกระจายของน้ำหนักบนทาง (Load concentration) โดยมีตัวเลขเป็นข้อกำหนดสำคัญในการออกแบบทางรถไฟและขบวนรถไฟ

ขนาดของทางรถไฟ (Track Gauge) คือ ระยะห่างระหว่างสันหัวรางด้านในทั้งสองด้าน มีหลากหลายแบบขึ้นอยู่กับขนาดที่ไปใช้งานดังรูปที่ 2.7 เช่น ขนาดความกว้าง 1,676 มิลลิเมตร เรียกว่า บอร์ดเกจ (Broad Gauge) ขนาดความกว้าง 1,435 มิลลิเมตร เรียกว่า สแตนดาร์ดเกจ (Standard Gauge) ขนาดความกว้าง 1,000 มิลลิเมตร เรียกว่า มิเตอร์เกจ (Meter Gauge) ขนาดความกว้าง 762 มิลลิเมตร เรียกว่า แนโรเกจ (Narrow Gauge)

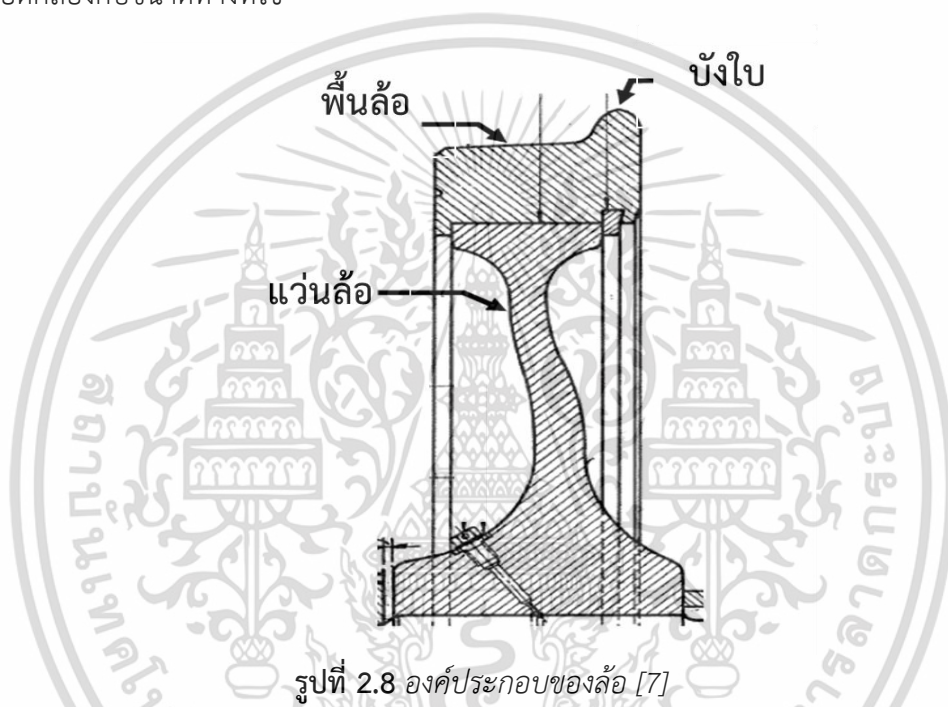


รูปที่ 2.7 ขนาดทางรถไฟ [10]

3 ล้อรถไฟ (Wheel)

การเคลื่อนที่ของรถไฟเกิดขึ้นจากการที่ล้อของรถไฟนั้นวิ่งไปตามราง ลักษณะของล้อรถไฟ และการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง รวมไปถึงพฤติกรรมของเพลาล้อรถไฟขณะวิ่งในทางตรงและทางโค้งของรถไฟ

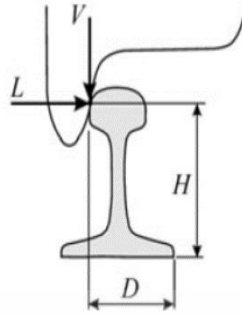
องค์ประกอบของล้อเป็นไปตามรูปที่ 2.8 โดยพื้นล้อ (Wheel tread) ทำหน้าที่รับน้ำหนักของรถไฟและกลิ้งไปตามราง บังใบล้อ (Wheel flange) ซึ่งอยู่ด้านในของล้อทำหน้าที่บังคับให้ล้อรถไฟวิ่งไปตามราง และแฉกล้อ (Wheel disk) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของล้อเพื่อส่งผ่านแรงระหว่างรางและเพลาล้อ (Axle) โดยล้อและเพลาล้อจะถูกประกอบกันขึ้นเป็นชุดเพลาล้อ (Wheel-axle assembly หรือ wheelset) ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับขนาดทางที่ใช้



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของล้อ [7]

2.3.1.2 การตกราง (Derailment)

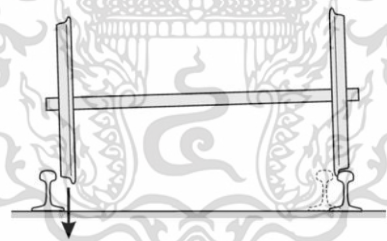
การเดินทางด้วยรถไฟนั้นต้องอาศัยความปลอดภัยมาเป็นอันดับแรก ซึ่งก็คือรถไฟนั้นจะต้องไม่มีการตกรางระหว่างการเดินทาง ซึ่งรูปแบบของการตกรางสามารถแบ่งเป็น การตกรางเนื่องจากบังใบล้อปีนราง (wheel flange climb) ดังรูปที่ 2.9 การตกรางเนื่องมาจากรางถ่างออก (gauge widening) ดังรูปที่ 2.10 การตกรางเนื่องมาจากรางเกิดการพลิกคว่ำ (rail rollover) ดังรูปที่ 2.11 และการตกรางเนื่องจากการเลื่อนของแผงรองราง (track panel shift) ดังรูปที่ 2.12



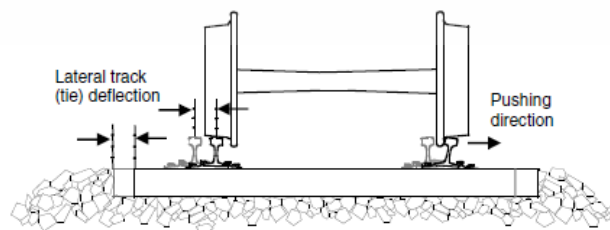
รูปที่ 2.9 การตรึงแบบบังใบล้อปีนราง [6]



รูปที่ 2.10 การตรึงแบบรางพลิก [6]



รูปที่ 2.11 การตรึงแบบรางถ่างออกจากกัน [6]

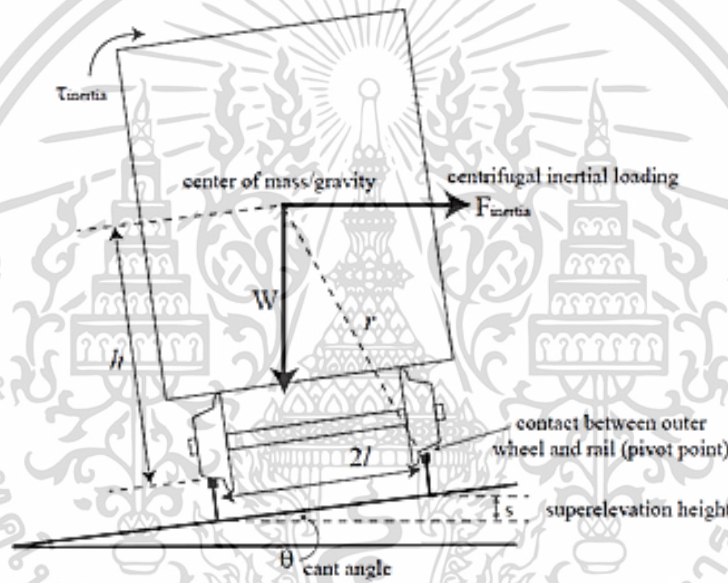


รูปที่ 2.12 การตรึงแบบการเคลื่อนตัวของตามแนวด้านข้าง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 11
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

ในปัจจุบันเส้นทางรถไฟจำนวนมากได้รับการออกแบบเพื่อให้ทางโค้งนั้นไม่อยู่ในแนวราบเรียบ แต่เส้นโค้งจะถูกปรับระดับตามแนวขวางเพื่อให้รางด้านนอกที่อยู่บนเส้นทางโค้งนั้นสูงกว่ารางด้านใน ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความสูงของส้นรางขึ้น แต่ก็ยังสามารถวัดได้ในแง่ของมุมที่ยกระดับ ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและความแตกต่างของความสูงนั้นกำหนดโดยมาตรฐานทางรถไฟตามรูปทรงเรขาคณิตสามเหลี่ยมมุมฉากที่เรียบง่าย รางด้านนอกจะช่วยยกรถไฟให้หมุนไปทางด้านในของเส้นโค้งและช่วยต้านแรงการหมุนไปที่ทำให้พลิกคว่ำไปทางด้านนอกของเส้นโค้ง จากแรงเหวี่ยงในการเข้าโค้ง ดังรูปที่ 2.13 เนื่องจากแรงบิดเฉื่อยซึ่งถูกถ่วงด้วยน้ำหนักรถไฟ ทำให้สามารถเคลื่อนที่บนโค้งด้วยความเร็วสูง ก่อนที่จะเกิดการพลิกคว่ำ นอกจากนี้ทำให้รถไฟเคลื่อนที่บนทางโค้งด้วยความเร็วสูงสุดแล้วการยกระดับสูงยังช่วยให้บังใบล้อไม่ไปกดรางทำให้ลดแรงเสียดทานและการสึกหรอระหว่างล้อกับราง

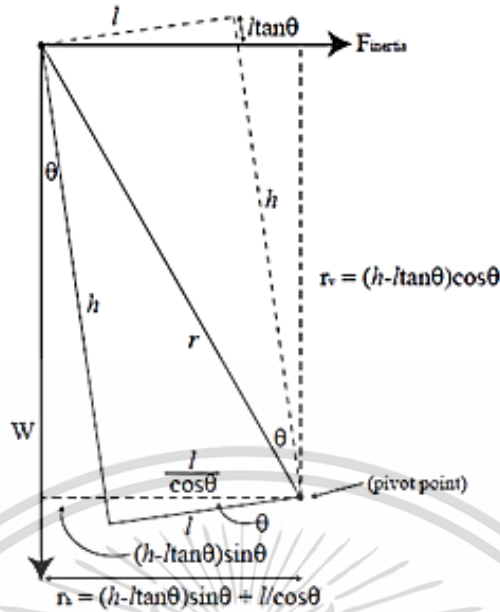


รูปที่ 2.13 แสดงแนวแรงของรถไฟเมื่อวิ่งอยู่บนทางโค้ง [4]

จากเส้นทางที่มีการยกโค้งขึ้น ทำให้เกิดแรงบิดจากแรงเฉื่อยรอบจุดสัมผัสระหว่างล้อด้านนอกและราง อย่างไรก็ตามมุมระหว่างแรงเฉื่อยกับเวกเตอร์ ได้มีประสิทธิภาพลดลง โดยมุมยกระดับหรือมุมเอียง เมื่อรถไฟเอียงไปตามจุดศูนย์กลางของทางโค้ง

กำหนดรูปทรงเรขาคณิตระหว่างแรงและแนวแรงบิดจากจุดกึ่งกลางมวลของตัวรถไฟไปยังจุดสัมผัสของล้อด้านนอกดังรูปที่ 2.14 เราสามารถพบว่าระยะทางแนวในตั้งระหว่างจุดหมุนและแรงต้านแรงเฉื่อยคือ

$$r_v = (h - l \tan \theta) \cos \theta$$



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงแนวแรงและแขนของโมเมนต์ ของตัวรถไฟเมื่อมีการยกโค้ง [4]

ดังนั้นแรงบิดจากแรงเฉื่อย คือ $\vec{\tau}_{inertia} = \vec{F}_{inertia} \times r_v$ ได้จากนิพจน์:

$$\vec{\tau}_{inertia} = \vec{F}_{inertia} \times r_v \quad (2.1)$$

$$= \vec{F}_{inertia} [(h - l \tan \theta) \cos \theta] \quad (2.2)$$

$$= \vec{F}_{inertia} [h \cos \theta - l \sin \theta]$$

$$= \left(\frac{W}{g} \right) \left(V^2 \frac{1}{R} \right) [h \cos \theta - l \sin \theta]$$

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาระยะทางในแนวนอนระหว่างจุดหมุนและเวกเตอร์แรงน้ำหนักในรูปของ l h และ โดยที่ $r_h = (h - l \tan \theta) \sin \theta + l \cos \theta$ ด้วยเหตุนี้เราจึงพบว่าแรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักบนเส้นทางโค้ง คือ $\vec{\tau}_{weight} = \vec{W} \times r_h$ นั้นได้มาจาก:

$$\vec{\tau}_{weight} = \vec{W} \left[h - l \tan \theta \sin \theta + \frac{l}{\cos \theta} \right] \quad (2.3)$$

$$= \vec{W} \left[h \sin \theta - l \left(\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) + \frac{l}{\cos \theta} \right] \quad (2.4)$$

$$= \vec{W} \left[h \sin \theta - \frac{l}{\cos \theta} (\sin^2 \theta - 1) \right]$$

$$= \vec{W} \left[h \sin \theta - \frac{l}{\cos \theta} (-\cos^2 \theta) \right]$$

$$= \vec{W} [h \sin \theta + l \cos \theta]$$

เช่นเดียวกับในสถานการณ์โค้งแบนราบ ความเร็วสูงสุดหรือความเร็ววิกฤตคือแรงบิดที่มีทิศไปทางด้านในของเส้นโค้งจากน้ำหนักที่ต้านแรงบิดไปทางด้านนอกของเส้นโค้งจากแรงเฉื่อย ดังนั้นเพื่อหานิพจน์สำหรับความเร็วสูงสุดจึงกำหนดค่า $\tau_{inertia}$ จากสมการที่ (2.2) เท่ากับ τ_{weight} จากสมการที่ (2.4)

$$\left(\frac{W}{g}\right)\left(V^2 \frac{1}{R}\right)[h \cos \theta - l \sin \theta] = W[h \sin \theta + l \cos \theta]$$

$$\left(V \frac{1}{Rg}\right) = \frac{[h \sin \theta + l \cos \theta]}{[h \cos \theta - l \sin \theta]}$$

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{Rg[h \sin \theta + l \cos \theta]}{h \cos \theta - l \sin \theta}} \quad (2.5)$$

ดังนั้นเราได้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถเพิ่มพิกัดความเร็วสูงสุดตั้งสมการที่ (2.5) สำหรับรถไฟบนโค้ง โดยการเพิ่มระดับการยกโค้ง อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัด ว่าสามารถทำการโค้งได้เท่าใด เนื่องจากมีข้อจำกัดจากความเร็วต่ำสุด ในความเป็นจริงเส้นทางที่ถูกยกโค้ง เป็นตัวอย่างหนึ่งของการที่รถไฟสามารถทรงตัวได้โดยการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่ำเกินไปในบางส่วนของทาง ตัวอย่างเช่นถ้าแรงจากน้ำหนักรถไฟหนักเกินไปส่งผลให้ล้อด้านนอกยกสูงพอ ทำให้เกิดแรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวรถที่เริ่มขึ้นตรงปลายรางส่งไปยังด้านในของทางโค้งเมื่อวิ่งด้วยความเร็วต่ำแม้กระทั่งศูนย์ไมล์ต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 2.15

เมื่อน้ำหนักขยายไปทั่ววงล้อด้านในจุดหมุนจากแรงบิดจะเปลี่ยนจากล้อที่อย่าวงนอกไปเป็นวงล้อด้านในโค้ง ในสถานการณ์นี้บทบาทของทั้งสองแรงและแรงบิดที่เกี่ยวข้องนั้นกลับทิศทาง น้ำหนักจะกลายเป็นแรงที่ไม่มั่นคงทำให้เกิดแรงที่พยายามหมุนรถบนรางในขณะที่แรงเฉื่อยของแรงเหวี่ยงทำให้เกิดแรงบิดไปทางด้านนอกของเส้นโค้ง จากการที่เราได้แสดงให้เห็นถึงแรงต้านแรงเฉื่อยเป็นสัดส่วนกับ V^2 หากความเร็วของรถไฟต่ำเกินไปแรงบิดจากน้ำหนักจะเอาชนะแรงบิดจากแรงต้านแรงเฉื่อยที่มีค่าน้อยและรถไฟจะพลิกเข้าด้านในจากการใช้แรงในทิศทางใหม่และรูปทรงเรขาคณิตของทาง ในรูปที่ 2.16 เพื่อหาพจน์ใหม่สำหรับแรงบิดจากแรงเฉื่อย แรงจากน้ำหนัก $\tau_{inertia}$ และ แรงบิดเนื่องจากน้ำหนักของรถบนราง τ_{weight} โดยเราสามารถแก้ปัญหาความเร็วต่ำสุดบนโค้งที่ยกสูงขึ้น

โดยนิพจน์สำหรับขนาดของแรงบิดจากแรงต้านแรงเฉื่อย $\vec{\tau}_{inertia} = \vec{F}_{inertia} \times \vec{r}$ ไปทางด้านนอกของเส้นโค้งที่กำหนดโดย ตั้งสมการที่ (2.6)

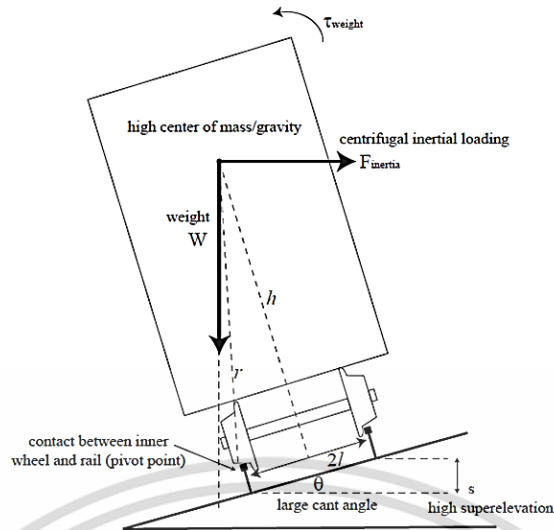
$$\begin{aligned}
\vec{\tau}_{inertia} &= \vec{F}_{inertia} r_v \\
&= F_{inertia} [(h - l \tan \theta) \cos \theta + 2l \sin \theta] \\
&= F_{inertia} [h \cos \theta - l \sin \theta + 2l \sin \theta] \\
&= F_{inertia} [h \cos \theta + l \sin \theta] \tag{2.6} \\
&= \left(\frac{w}{g}\right) \left(V^2 \frac{1}{R}\right) [h \cos \theta + l \sin \theta]
\end{aligned}$$

และในทำนองเดียวกันเราสามารถหามoment สำหรับขนาดของแรงบิดจากน้ำหนัก $\vec{\tau}_{weight} = \vec{W} \times \vec{r}$ ที่ไปทางด้านในของวงกลม ดังสมการที่ (2.7)

$$\begin{aligned}
\vec{\tau}_{weight} &= W r_h \\
&= W [(l \sin \theta) \tan \theta] \\
&= W \left[l \left(\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) \right] \tag{2.7}
\end{aligned}$$

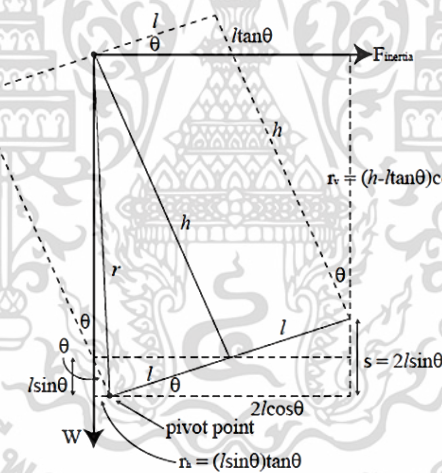
สุดท้าย ด้วยการกำหนดค่าแรงบิดสองค่านี้คือ $\tau_{inertia}$ และ τ_{weight} เท่ากันเราสามารถหาค่าวิกฤตหรือความเร็วต่ำสุดดังสมการที่ (2.8) ที่รถไฟจะต้องใช้วิ่งเพื่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อต้านแรงที่เกิดจากน้ำหนักของรถไฟเวลาที่วิ่งผ่านทางที่มีการยกโค้ง

$$\begin{aligned}
\left(V^2 \frac{1}{gR}\right) &= \frac{l \sin^2 \theta}{\cos \theta [h \cos \theta + l \sin \theta]} \\
\left(\frac{W}{g}\right) \left(V^2 \frac{1}{R}\right) [h \cos \theta + l \sin \theta] &= W \left[l \left(\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \right) \right] \\
V_{min} &= \sqrt{\frac{gRl \sin^2 \theta}{\cos \theta [h \cos \theta + l \sin \theta]}} \tag{2.8}
\end{aligned}$$



รูปที่ 2.15 รถรางเข้าด้านในโค้งเนื่องจากมีจุดศูนย์ถ่วงสูงและทางยกระดับสูงมาก

ตัวรถเอียงเข้าด้านในโค้ง เนื่องจากมีจุดศูนย์ถ่วงที่สูง และ มีการยกโค้งที่สูง [4]



รูปที่ 2.16 ภาพเรขาคณิตแสดงแนวแรงและแขนของโมเมนต์จากด้านบน ของตัวรถไฟเมื่ออยู่บนทางที่มีการยกโค้งสูง [4]

2.3.3. ทฤษฎีการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์มัลติบอร์ดี

การใช้อัลกอริทึมระบบมัลติบอร์ดีทั่วไปในการวิเคราะห์ยานพาหนะทางรถไฟและอธิบายวิธีการวิเคราะห์ที่จะใช้ในการพัฒนาสมการพลวัตของการเคลื่อนที่สำหรับยานพาหนะทางรถไฟ แนะนำให้ใช้วิธีการคำนวณแบบพลศาสตร์เพื่อกำหนดการพัฒนาแบบจำลองที่มีรายละเอียดและแม่นยำสำหรับระบบยานพาหนะทางรถไฟ ปัญหาสองประการทำให้ระบบรถไฟยานพาหนะแตกต่างจากระบบอื่น ๆ คือ ปัญหารูปทรงและการสัมผัส รูปทรงพื้นผิวของล้อและรางรวมถึงรูปทรงเรขาคณิตของรางรถไฟเข้าสู่การกำหนดสมการการเคลื่อนที่

และในการกำหนดของหน้าสัมผัสระหว่างล้อกับราง ปัญหาทางเรขาคณิตและการสัมผัสที่สำคัญทั้งสองนี้ถูกกล่าวถึงในส่วนที่ 2.3.2.4 และ 2.3.2.5 ในส่วนที่ 2.3.2.6 จะมีการพูดถึงการใช้งานส่วนที่สัมผัสกันระหว่างล้อกับราง ในอัลกอริทึมระบบมัลติบอดีทั่วไป ชุดพิกัดหลายชุดสามารถใช้ในการพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของระบบยานพาหนะทางรถไฟ

2.3.2.1 ยานพาหนะทางรถไฟและระบบการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์มัลติบอดี (Railroad vehicles and multi body system dynamics)

ระบบการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์มัลติบอดีเป็นส่วนหนึ่งของสาขาทั่วไปของพลศาสตร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การคำนวณการพัฒนาและการแก้สมการไม่เชิงเส้นที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบทางกายภาพที่ซับซ้อน ส่วนประกอบของระบบมัลติบอดีสามารถพบกับการหมุนและการเปลี่ยนตำแหน่งขนาดใหญ่ได้ ส่วนประกอบของระบบมัลติบอดีสามารถพบกับการหมุนและการเปลี่ยนตำแหน่งขนาดใหญ่ได้ อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบเหล่านี้ที่อยู่ภายใต้การจำกัดทางจลนศาสตร์ซึ่งเป็นผลมาจากข้อต่อทางกลและวิธีการเคลื่อนที่ที่เจาะจง เทคนิคระบบมัลติบอดีเป็นเรื่องพื้นฐานและถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบและประเมินผลการใช้งานต่าง ๆ รวมถึงยานพาหนะ เครื่องจักร โครงสร้างอวกาศ ชีวกลศาสตร์ หุ่นยนต์ และกลไก รวมถึงการประยุกต์อื่น ๆ อีกมากมาย สมการการเคลื่อนที่ได้รับการพัฒนาในรูปแบบพื้นฐานที่สุดโดยใช้หลักการของพลศาสตร์ สมการเหล่านี้ถูกนำไปใช้กับคอมพิวเตอร์ดิจิทัลเพื่อพัฒนาโปรแกรมที่สามารถสร้างและแก้สมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยอัตโนมัติและเป็นระบบและประกอบด้วยจำนวนของตุ้รถไฟและข้อต่อ

การเปลี่ยนแปลงของระบบยานพาหนะทางรถไฟดังที่จะปรากฏในหนังสือเล่มนี้สามารถอธิบายได้อย่างเป็นระบบโดยใช้อัลกอริทึมระบบมัลติบอดีคอมพิวเตอร์ (computational multibody system algorithms) ซึ่งมีข้อดีหลายประการสำหรับการนำวิธีการของระบบมัลติบอดีมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ในระบบยานพาหนะทางรถไฟ ในบรรดาข้อดีเหล่านี้ซึ่งมีการกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือความสามารถในการแก้ไข ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างเป็นระบบ

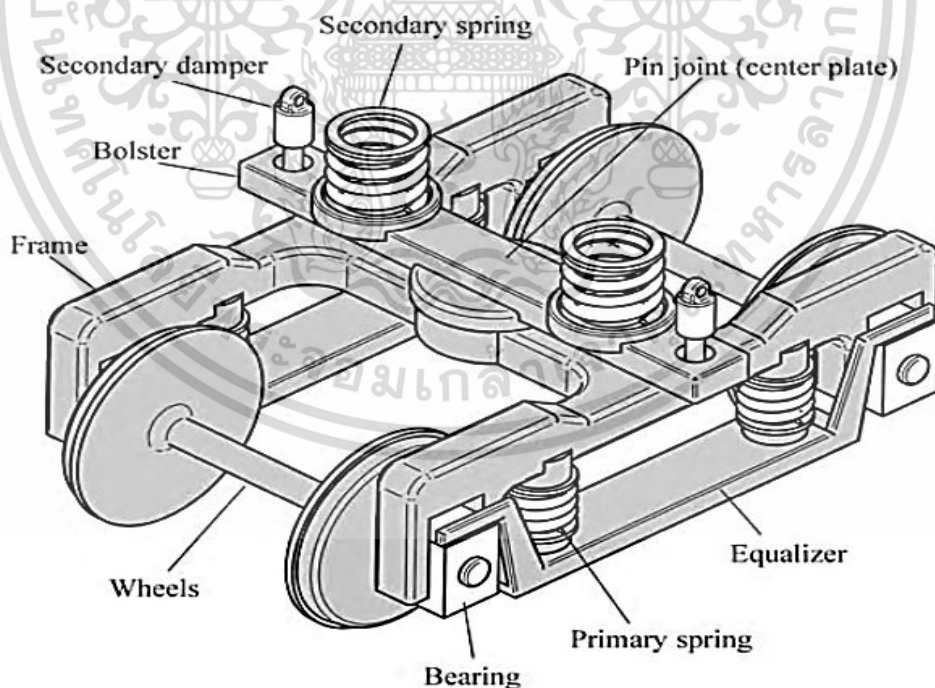
1 พื้นฐาน (Generality)

ระบบมัลติบอดีถูกออกแบบให้เป็นแบบพื้นฐานเพื่ออำนวยความสะดวกในการพัฒนาโมเดลยานพาหนะที่มีรายละเอียดเจาะจง สมการเชิงอนุพันธ์และการเคลื่อนที่อย่างจำกัดสามารถนำไปใช้อย่างเป็นระบบในสมการพลวัตของยานพาหนะ การพัฒนารูปแบบพลศาสตร์ที่แม่นยำและสมจริงของระบบยานพาหนะทางรถไฟเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงยานพาหนะรถไฟ [1]

ต้องมีการรวมรายละเอียดที่ที่ต้องใช้ ตัวอย่างเช่น รถไฟอาจประกอบด้วยตัวรถจำนวนมากที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อพ่วง (coupling) รถแต่ละคันบางครั้งเรียกว่ายานพาหนะ รวมถึง ตัวรถ (car body) โบกี้ (bogies) ส่วนรองรับแรงกระแทก (suspension elements) ส่วนป้องกันการเคลื่อนที่ของเพลลา (bushings) แบริ่ง (bearings) หรือชิ้นส่วนอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างของโบกี้ [1]

แล้วยังแสดงถึงระบบที่ซับซ้อนซึ่งรวมถึงเฟรมและชุดล้อที่สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ ชุดล้อซึ่งสามารถหมุนได้อย่างอิสระรอบแกนของมันเองซึ่งเชื่อมต่อกับเฟรมโดยใช้ ส่วนรองรับแรงกระแทกชั้นแรก (primary suspensions) เบื้องต้นในขณะที่เฟรมเชื่อมต่อกับหมอนข้างโดยใช้ข้อต่อและสลักเกลียวที่เชื่อมต่อกับตัวถังรถยนต์โดยใช้ส่วนรองรับแรงกระแทกชั้นสอง (secondary suspensions) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของรถไฟเกิดจากความเสียดทานระหว่างล้อกับราง แรงของการเคลื่อนที่สัมผัสกัน ระหว่างล้อกับรางมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงและความเสถียรของรถไฟ เห็นได้ชัดว่าระบบยานพาหนะทางรถไฟประกอบด้วยส่วนประกอบที่ต่อเชื่อมกันจำนวนมากซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่สัมผัสอิสระ ส่วนประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อกันด้วยองค์ประกอบแรงเช่น สปริง ตัวหน่วง และบุชชิ่ง รวมถึงข้อต่อที่กำหนดขอบเขตในการเคลื่อนที่ของระบบ การเปลี่ยนแปลงของระบบที่ซับซ้อนสามารถอธิบายได้โดยใช้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์และพีชคณิต (DAE) ควบคู่กันไป เรื่องของระบบมัลติบอร์ดีซึ่งเป็นสาขาหนึ่งของสาขาวิชาพลศาสตร์คอมพิวเตอร์นั้นได้นำสูตรและวิธีแก้ปัญหาลักษณะเฉพาะของสมการเชิงอนุพันธ์และเชิงพีชคณิตของระบบที่ประกอบด้วยส่วนที่เชื่อมโยงถึงกัน โดยการใช้เทคนิคระบบมัลติบอร์ดี สมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองระบบรางที่มีรายละเอียดที่น่าสนใจสามารถพัฒนาได้อย่างเป็นระบบ และแก้ไขปัญหาลักษณะเฉพาะ

หนึ่งในข้อได้เปรียบหลักของการใช้อัลกอริทึมระบบมัลติบอร์ดีนอกเหนือจากการรวบรวมรายละเอียดที่สำคัญและขอบเขตทั่วไปอย่างเป็นระบบความสามารถในการสร้างแบบจำลองวัตถุที่ยืดหยุ่นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ ในกรณีของรถไฟความเร็วสูงผลกระทบที่มีต่อระบบพลวัตของยานพาหนะเนื่องจากการเสียดรูปของตัวถัง ราง ชุดล้อ และระบบแพนโทกราฟ ที่มีความสำคัญ โดยการใช้วิธีการคำนวณของระบบมัลติบอร์ดีทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากสูตรของระบบมัลติบอร์ดีในการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของระบบยานพาหนะทางรถไฟ

2 ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity)

อัลกอริทึมในระบบมัลติบอร์ดีขึ้นอยู่กับสมการไม่เชิงเส้นที่สามารถใช้ในการจำลองพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อนของระบบยานพาหนะทางรถไฟได้อย่างแม่นยำ โดยการใช้สมการไม่เชิงเส้นทั่วไปเหล่านี้ไม่จำเป็นต้องหันไปใช้เทคนิคการทำให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (linearization techniques) เพื่อให้ได้คำตอบสำหรับระบบสมการพลศาสตร์ของยานพาหนะ การใช้ทฤษฎีเชิงเส้นสามารถนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดในสถานการณ์จำลองและยังสามารถนำไปสู่การทำนายความเร็ววิกฤต (critical speed) ของยานพาหนะที่ไม่ถูกต้อง ระบบขับเคลื่อนยานพาหนะทางรถไฟใช้เทคนิคการทำให้เป็นเส้นตรงในการกำหนดสมการการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ ในทางตรงกันข้ามการพัฒนาสมการไม่เชิงเส้นและอธิบายถึงอัลกอริทึมเชิงตัวเลขที่ใช้ในการหาผลลัพธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์และพีชคณิตของการเคลื่อนที่ดังนั้นก็จะมีผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่และการมีเสถียรภาพที่แม่นยำ

ความไม่เป็นเชิงเส้นในระบบรถไฟสามารถอยู่ในรูปแบบเรขาคณิตหรือวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น ความเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น เกิดจากการหมุนของชิ้นส่วนของระบบยานพาหนะหรือเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนที่ยืดหยุ่นและองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น แต่ละชุดล้อสามารถมีการหมุนอย่างอิสระในแกนของตัวเอง การหมุนนี้แสดงความไม่เป็นเชิงเส้นในสมการจลนศาสตร์และการเคลื่อนที่ ในทางกลับกันหากมีการเปลี่ยนรูปของ ชิ้นส่วนรองรับ (suspension element) ที่มาก

การใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือการเคลื่อนที่ ความสัมพันธ์นี้ไม่ได้นำไปสู่รูปแบบที่ถูกต้อง ในกรณีการเสียดรูปขนาดใหญ่โดยมีแรงที่ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้น ที่มาของความไม่เป็นเชิงเส้นเชิงเรขาคณิตก็คือเรขาคณิตของทาง (track geometry) รูปที่ 2.19 แสดงขบวนรถไฟที่วิ่งบนรางโค้ง ทางเรขาคณิตที่เป็นส่วนโค้งเป็นที่มาของความไม่เป็นเชิงเส้น ยิ่งไปกว่านั้นสมการการสัมผัสระหว่างล้อกับรางต้องคำนึงถึงรูปทรงเรขาคณิตของล้อและพื้นผิวราง การกำหนดขอบเขตการสัมผัส จำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์จลนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นที่แสดงในรูปของพารามิเตอร์พื้นผิวทางเรขาคณิตของล้อและราง



รูปที่ 2.19 แสดงขบวนรถไฟที่วิ่งบนรางโค้งแบบไม่เชิงเส้น [1]

วัสดุไม่เชิงเส้นเกิดขึ้นเมื่อสมการแรงหรือการเคลื่อนที่เป็นสมการไม่เชิงเส้น นี่อาจเป็นกรณีที่ชิ้นส่วนสัมผัสกับพลาสติกหรือวัสดุเหนียว ตัวอย่างเช่น ความสัมพันธ์แบบพลศาสตร์ระหว่างล้อกับรางนั้นต้องใช้การคำนวณแรงคืบ โดยทั่วไปของความสัมพันธ์ของแรงคืบ กับการกระจัดจะแสดงในแง่ของความแข็งแบบไม่เชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (viscoelastic coefficients) การคำนวณของแรงคืบที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์พลวัตของระบบยานพาหนะทางรถไฟและกฎที่ใช้ในการกำหนดแรงเหล่านี้เป็นตัวอย่างของวัตถุที่ไม่เป็นเชิงเส้น ตัวอย่างอื่น ๆ ของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบไม่เชิงเส้น

พลาสติกหรือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในสมการของส่วนรองรับ แบริง รวมถึงแรงกระแทก (bushing forces) ทั้งทางเรขาคณิตและวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถรวมกันเป็นระบบในสมการในระบบมัลติบอดี

3 การดำเนินการขององค์ประกอบย่อยของยานพาหนะทางราง (Implementation of railroad vehicle element)

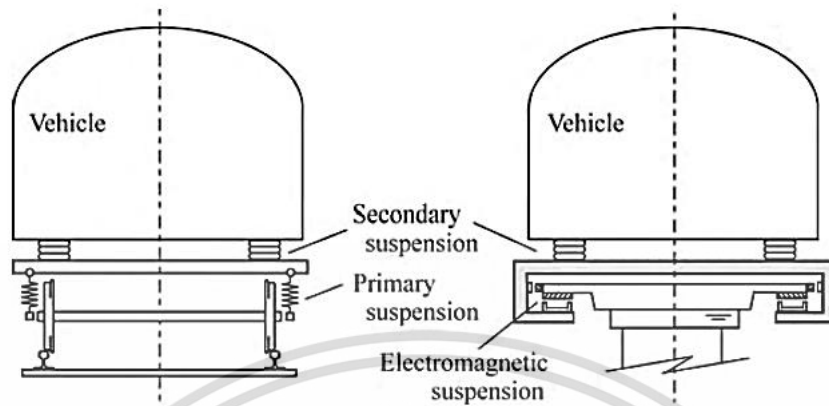
องค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่แยกความแตกต่างของยานพาหนะทางรถไฟจากการใช้งานระบบมัลติบอดีอื่น ๆ คือ การเชื่อมโยงกันระหว่างรถไฟกับราง มีองค์ประกอบสองประเภทที่ใช้ในระบบทางรถไฟในปัจจุบัน อย่างแรกคือหน้าสัมผัสของล้อและราง อย่างที่สองคือแม่เหล็กลอย (Maglev) องค์ประกอบล้อรางและระบบแม่เหล็กลอยนั้นแสดงไว้ในรูป 2.20 การสร้างขบวนรถไฟโดยใช้ล้อที่กลิ้งและเลื่อนบนรางยังคงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ความสัมพันธ์ระหว่างล้อกับรางถูกอธิบายในแง่ของแรงคืบเช่นเดียวกับแรงอื่น ๆ และตัวแปรจลนศาสตร์และนำไปสู่ ปรากฏการณ์การส่าย (hunting phenomenon) ซึ่งเป็นที่มาของการแกว่งด้านข้าง (significant lateral) และการส่ายแบบแกว่ง (yaw oscillations) ซึ่งเป็นสาเหตุของความไม่มั่นคงของรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเร็วขณะกำลังเคลื่อนที่

อัลกอริทึมระบบมัลติบอดีนอกจากสามารถใช้ในการศึกษาสถานการณ์อุบัติเหตุรถไฟตกรางและพัฒนาเกณฑ์อุบัติเหตุรถไฟตกราง เกณฑ์ตกรางหนึ่งที่ใช้ในงานคือการวัดอัตราส่วนระหว่างแรงด้านข้าง L และแรงแนวตั้ง V ที่ทำบนล้อดังแสดงในรูปที่ 2.21 เมื่อแรงด้านข้างเกินขีดจำกัด แรงผลักดันที่เกิดจากแรงนี้อาจทำให้เกิดการตกราง อัตราส่วน L/V สามารถคาดการณ์โดยใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นตามขั้นตอนวิธีระบบมัลติบอดี อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติวิธีการที่ง่ายขึ้น เช่น สูตรของนาตาล (นาตาล 1908) มักถูกใช้เพื่อกำหนดขอบเขตของอัตราส่วน L/V สูตรของนาตาลนั้นมีพื้นฐานมาจากสมดุลแรงแบบง่าย ๆ ที่สามารถใช้เพื่อกำหนดอัตราส่วน L/V ก่อนที่จะเกิดการตกราง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.21 แรงด้านข้างและแรงแนวตั้งของ L และ V ที่ใช้กับรางอยู่ในสมดุลกับแรงปฏิกิริยา N และ F ที่ใช้กับล้อ ดังนั้นถ้าล้อหมุนสัมผัสกับรางในการสัมผัสกันดังที่แสดงในรูปที่ 2.21 และถ้าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางคือ μ และมุมของหน้าแปลนล้อ (wheel flange angle) เป็น α ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ดังนั้น L/V อัตราส่วนถูกกำหนดโดยสูตรอย่างง่ายต่อไปนี้

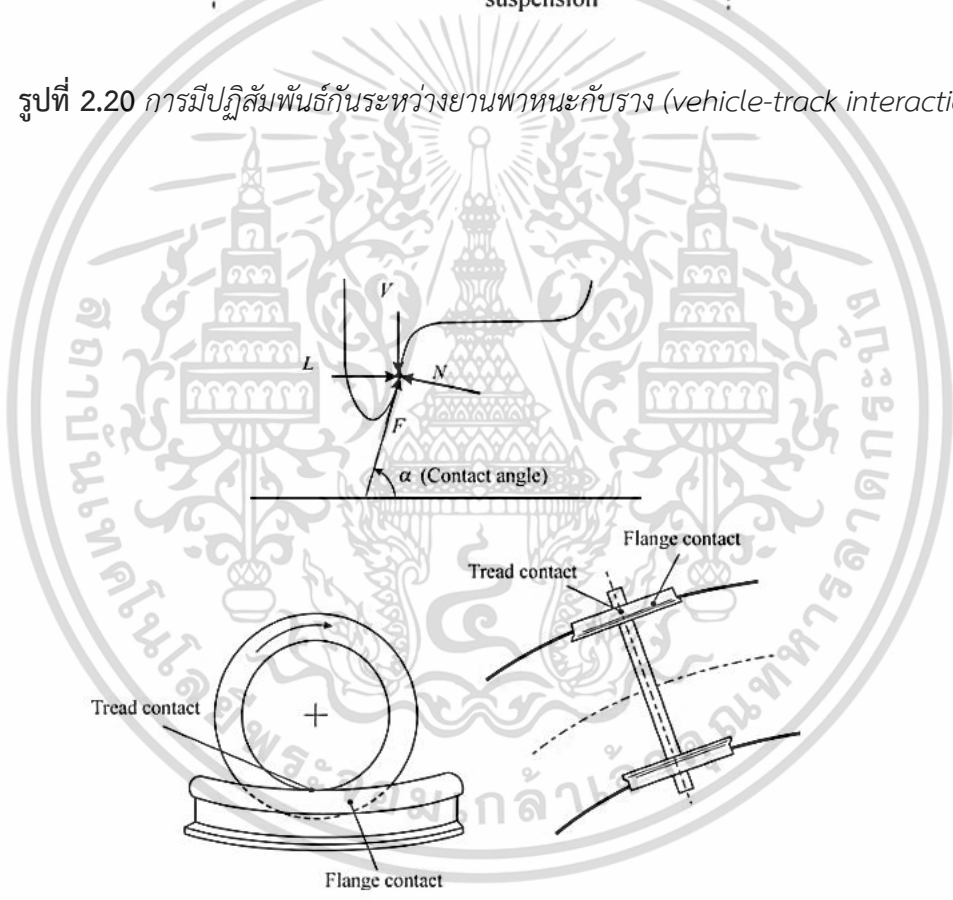
$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (2.9)$$

เนื่องจากการสัมผัสของการหมุนวงล้อที่แสดงในรูปที่ 2.21 ล้อจึงมีมุมปะทะบวก (positive angle of attack, AOA) ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นมุมระหว่างทิศทางของความเร็วไปข้างหน้าของล้อและการสัมผัสแนวยาวกับรางรถไฟที่จุดสัมผัส หากอัตราส่วน L/V เกินฝั่งขวามือของสมการ (2.9) ปีนราง (wheel climb) จะเกิดขึ้น สิ่งสำคัญคือต้องชี้ให้เห็นว่าสูตรของนาตาลตามที่นิยามไว้โดยสมการ (2.9) นั้นขึ้นอยู่กับมุมสัมผัสสูงสุด

ของหน้าแปลนล้อเท่านั้นและจะมีผลเฉพาะในกรณีที่มีมุมปะทะบวก ดังนั้นโดยทั่วไปควรใช้วิธีการที่แม่นยำกว่า ซึ่งสามารถทำนายการตรึงของยานพาหนะได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.20 การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างยานพาหนะกับราง (vehicle-track interaction) [1]



รูปที่ 2.21 สมดุลแรงในกรณีล้อปีนราง (Force balance in the case of a wheel climb) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 22
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

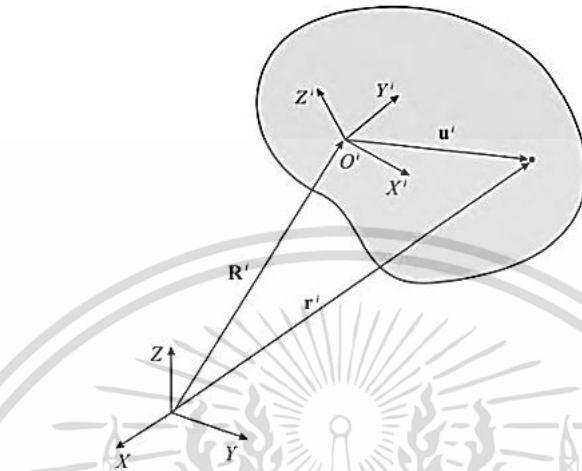
2.3.2.2 การเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์แบบมีเงื่อนไข (Constrained dynamics)

สมการการสมการเคลื่อนที่ของระบบเชิงกล สามารถกำหนดได้โดยใช้วิธีนิวตันเนียน (Newtonian) หรือ ลากรางจ์ (Lagrange) วิธีของของนิวตันเนียนใช้เวกเตอร์เพื่อกำหนดแรง หากระบบของตัวรถประกอบด้วยสิ่งที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อเชิงกล (mechanical joints) แผนภาพอิสระของวัตถุจะถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงแรง แรงที่กระทำกับข้อต่อเช่นเดียวกับแรงเฉื่อยและแรงที่ถูกใช้ วิธีการของนิวตันเนียนซึ่งศึกษาสมมูลของตัวรถไฟแต่ละคัน สามารถนำมาใช้กับระบบที่ไม่มีการวิเคราะห์ระบบที่ซับซ้อน เช่นยานพาหนะทางรถไฟ ในขณะที่ในวิธีลากรางจ์ซึ่งอยู่บนหลักการดาล็องแบร์ (D'Alembert) ปริมาณสเกลาร์ เช่น งานเสมือน (virtual work) พลังงานจลน์และพลังงานศักย์สามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของตัวรถ ในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องศึกษาสมมูลของรถแบบแยกส่วนกัน วิธีลากรางจ์ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนความรู้สมการหลักการลากรางจ์-ดาล็องแบร์ (Lagrange-D'Alembert) สามารถใช้เพื่อกำจัดแรงปฏิกิริยาหรือรักษาแรงเหล่านี้ในรูปแบบสุดท้ายของสมการการเคลื่อนที่ที่อธิบายไว้ด้านล่างก่อนที่จะใช้ระบบมัลติบอดี ในการกำหนดสมการไม่เชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของระบบยานพาหนะทางรถไฟชุดของพิกัดที่เรียกว่าพิกัดทั่วไป (generalized coordinates) ที่กำหนดค่าองค์ประกอบของระบบจะต้องได้รับการแนะนำก่อน ชุดพิกัดประเภทต่าง ๆ สามารถใช้พิกัดทั่วไปในสูตรพลศาสตร์ ในสูตรทั่วไปของการเคลื่อนที่ทางรถไฟ โดยรถสองชุดที่แตกต่างพิกัดกัน มักจะใช้คือพิกัดค่าวัดสมบูรณ์ (absolute coordinates) และพิกัดวิถี (trajectory coordinates) พิกัดวิถีซึ่งมักใช้ในการพัฒนาสูตรที่เหมาะสมกับระบบยานพาหนะทางรถไฟ และพิกัดวิถี พิกัดวิถีมักใช้ในการพัฒนาสูตรที่เหมาะสมกับระบบยานพาหนะทางรถไฟ ในสูตรพิกัดแบบสมบูรณ์การกำหนดค่าของวัตถุแข็งเกร็ง

ในระบบยานพาหนะทางรถไฟแบบมัลติบอดีที่ถูกกำหนดโดยใช้พิกัดสองชุด ชุดแรกประกอบด้วยพิกัดคาร์ทีเซียนสมบูรณ์ (Cartesian coordinates) กำหนดเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของระบบพิกัดตัวรถที่เลือกตั้งแสดงในรูปที่ 2.22 ในขณะที่ชุดที่สองประกอบด้วยพารามิเตอร์การหมุนอย่างอิสระ (independent rotation parameters) ที่กำหนดทิศทางของระบบพิกัดตัวรถ ด้วยการพิจารณากรอบการอ้างอิงในโลก ในบรรดาชุดของพารามิเตอร์การหมุนที่ใช้ในการอธิบายถึงการวางแนวของตัวรถในการย้ายระบบพิกัดของตัวรถเป็นโคไซน์แสดงทิศทาง (direction cosines) มุมออยเลอร์ (Euler angles) และพารามิเตอร์ออยเลอร์ (Euler parameters) เวกเตอร์ตำแหน่งสมบูรณ์ของจุดใดก็ได้บนตัวรถสามารถแสดงในรูปของพิกัดคาร์ทีเซียนสมบูรณ์ และพิกัดการหมุน (rotation coordinates) การใช้เวกเตอร์ตำแหน่งสมบูรณ์ ความเร็วและความเร่งสมบูรณ์ของจุดใดก็ได้บนตัวรถสามารถกำหนดและใช้กับสมการนิวตัน - ออยเลอร์ (Newton-Euler equations) เพื่อให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของตัวรถ

การเคลื่อนที่ของส่วนประกอบของยานพาหนะทางรถไฟนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่เกิดจากข้อต่อเชิงกลและวิถีการเคลื่อนที่ที่ระบุ ดังนั้นการกำหนดสมการพีชคณิตเชิงเส้นแบบไม่เชิงเส้นที่อธิบายถึงเงื่อนไขของจลนศาสตร์การเคลื่อนที่จึงจำเป็นในสูตรลากรางจ์ สมการเงื่อนไขเหล่านี้เข้าสู่การกำหนดสมการพลศาสตร์ของ

การเคลื่อนที่ของระบบยานพาหนะแบบหลายมิติที่มีข้อจำกัดเมื่อสมการพีชคณิตมีข้อจำกัดด้วยสมการเชิงอนุพันธ์พลศาสตร์เรามีระบบผสมของสมการอนุพันธ์และพีชคณิต (DAE) ที่ต้องหาผลลัพธ์ไปพร้อมกัน



รูปที่ 2.22 พิกัดสัมบูรณ์ [1]

มีสองวิธีที่มักใช้ในการแก้ปัญหาของระบบที่เกิดจากความแตกต่างและสมการพีชคณิต คือ สูตรการเติม (augmented formulation) และเทคนิคการตรึง (embedding technique) ในสูตรวิธีตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange multipliers) ถูกใช้เพื่อรวมสมการแบบมีเงื่อนไข (constraint equations) ร่วมกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ซึ่งนำไปสู่ระบบสมการขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเมทริกซ์แบบกระจายตัว ในทางตรงกันข้ามเทคนิคการตรึงนั้นใช้สมการจำกัดจลนศาสตร์ (kinematic constraint equations) เพื่อจำกัดพิกัดบางส่วนอย่างเป็นระบบนำไปสู่ระบบสมการขนาดเล็กที่มีโครงสร้างเมทริกซ์ที่หนาแน่น

ระบบยานพาหนะทางรถไฟประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวนมากซึ่งรวมถึง ชุดล้อ โครงงโปกี้ ตัวตู้รถไฟ ชิ้นส่วนรองรับ และ ส่วนประกอบอื่น ๆ วัตถุเหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อเชิงกลและอยู่ภายใต้แรงชนิดต่าง ๆ และภายใต้เงื่อนไขการโหลด พิกัดที่นำมาใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนไหวของตัวรถในระบบและกำหนดสมการการเคลื่อนไหวทางพลศาสตร์ พิกัดทั่วไปหากมีหกพิกัด (สามทิศทางและสามพิกัดการหมุน) ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่แบบไม่มีเงื่อนไขของวัตถุแข็งเกร็งในระบบจำนวนของพิกัดที่ระบบทั่วไปจะเท่ากับ 6 คูณด้วยจำนวนของตัวตู้รถไฟ อย่างไรก็ตามพิกัดทั่วไปเหล่านี้ไม่เป็นอิสระเนื่องจากเกี่ยวข้องกับสมการพีชคณิตที่เป็นตัวแทนของข้อต่อเชิงกล และการเคลื่อนไหวที่ระบุแนวคิดของจำนวนค่าอิสระ (degrees of freedom) เป็นพื้นฐานของการศึกษาการเคลื่อนที่ของระบบพลศาสตร์ที่มีเงื่อนไข

จำนวนค่าอิสระหมายถึงพิกัดอิสระที่จำเป็นในการอธิบายการกำหนดค่าของระบบ ดังนั้นจำนวนจำนวนค่าอิสระขึ้นอยู่กับจำนวน และชนิดของข้อต่อเชิงกลวิธีการเคลื่อนที่ที่ระบุและจำนวนพิกัดที่ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ที่ไม่มีเงื่อนไขของตัวตุ้รถไฟ สมการพีชคณิตแบบมีเงื่อนไข แต่ละข้อสามารถนำมาใช้เพื่อจำกัดพิกัดหนึ่งโดยการเขียนพิกัดนี้ในรูปแบบอื่น ๆ สำหรับระบบที่ประกอบด้วยวัตถุแข็งเกร็ง n_b ภายใต้สมการพีชคณิต n_c จำนวนค่าอิสระ n_d สำหรับปัญหาเชิงพื้นที่ซึ่งการเคลื่อนที่แบบไม่มีเงื่อนไขของวัตถุแข็งเกร็งอธิบายโดยใช้พิกัดหกพิกัดโดยใช้สมการ (2.10) นี้

$$n_d = 6 \times n_b - n_c \quad (2.10)$$

สมการนี้เรียกว่าเกณฑ์กัทซ์บาช (Kutzbach criterion) ในสมการนี้ $6 \times n_b$ คือจำนวนพิกัดทั้งหมดที่จำเป็นในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบไม่มีเงื่อนไขของระบบในขณะที่จำนวนของสมการเงื่อนไข n_c กำหนดจำนวนของพิกัดอิสระซึ่งจะต้องเท่ากับสมการเชิงเส้นอิสระภายใต้เงื่อนไข ระบบนี้สามารถหาผลลัพธ์ได้สำหรับความเร่งของตุ้รถไฟรวมถึงแรงจำกัด นั่นคือจำนวนของแรงจำกัดอย่างอิสระเท่ากับจำนวนของสมการเงื่อนไขซึ่งเท่ากับจำนวนพิกัดอิสระ

2.3.2.3 ปัญหาทางเรขาคณิต (Geometry problem)

การศึกษารูปทรงเรขาคณิตมีความจำเป็นในการวิเคราะห์การสัมผัสของล้อและรางในระบบยานพาหนะทางรถไฟ ในความเป็นจริงการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในระบบยานพาหนะทางรถไฟโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือขั้นตอนการประมวลผลล่วงหน้าที่กำหนดรูปทรงเรขาคณิตของทาง, โพรไฟล์ล้อ, และโพรไฟล์ผิวราง ในขั้นตอนที่สองสมการการเคลื่อนที่ของระบบยานพาหนะแบบหลายหน่วยจะถูกแก้ไขเป็นตัวเลข ในขั้นตอนที่สองนี้พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่กำหนดพื้นผิวล้อและรางและเรขาคณิตของรางรถไฟเข้าสู่การกำหนดเงื่อนไขการติดต่อและสมการการเคลื่อนที่ของระบบ เพื่อพัฒนาพื้นฐานและรายละเอียดของระบบยานพาหนะทางรถไฟอัลกอริทึมระบบมัลติบอร์ดี ที่ใช้ในขั้นตอนที่สองบางครั้งเรียกว่าขั้นตอนการประมวลผลหลัก (main processing stage) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของล้อและรางที่สัมผัสกัน มีการใช้สามขั้นตอนในการคำนวณอัลกอริทึมที่ใช้ในขั้นตอนการประมวลผลหลัก ขั้นแรกให้ใช้รูปทรงเรขาคณิตของผิวหน้าสัมผัสของล้อและรางเพื่อระบุตำแหน่งของจุดสัมผัสระหว่างล้อกับราง ขั้นตอนที่สองตัวแปรจลศาสตร์ (kinematic variables) ถูกกำหนดในรูปของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของพื้นผิวล้อและราง ตัวแปรเหล่านี้รวมถึงปริมาณจลศาสตร์แบบปกติที่เรียกว่าการคืบ (Creepages) ที่วัดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างล้อกับรางที่จุดสัมผัส ในขั้นตอนที่สามแรงทางพลศาสตร์หรือการเคลื่อนไหวที่ทำบนล้อและรางจากผลของการสัมผัส

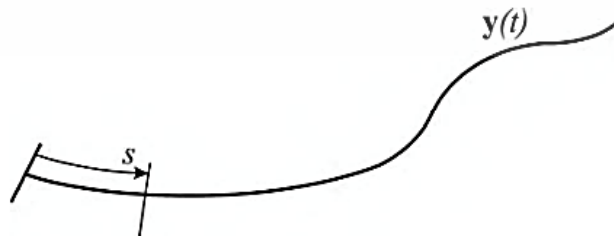
ความแม่นยำของการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของการสัมผัสนั้นขึ้นอยู่กับ การคาดคะเนตำแหน่งของจุดสัมผัสอย่างแม่นยำ วิธีแก้ปัญหาสำหรับตำแหน่งสัมผัสนั้นต้องแสดงรูปร่างของล้อและพื้นผิววางอย่างแม่นยำ การแสดงรูปร่างนี้สามารถกำหนดได้โดยใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของพื้นผิวในพื้นที่เช่น รัศมีของความโค้ง, เส้นสัมผัสและเวกเตอร์ปกติที่กระทำกับพื้นผิว คุณสมบัติทางเรขาคณิตเหล่านี้ไม่เพียงแต่มีความสำคัญสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่สัมผัสเท่านั้น แต่ยังมีผลสำคัญในการกำหนดแรงที่แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันระหว่างล้อกับราง ดังนั้นความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์จึงจำเป็นต้องเข้าใจการสัมผัสล้อกับราง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทฤษฎีของเส้นโค้งและพื้นผิวเป็นพื้นฐานในการศึกษาความสัมพันธ์แบบพลศาสตร์ระหว่างล้อกับราง

1 เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential geometry)

ทฤษฎีของเส้นโค้งและพื้นผิวถูกครอบคลุมในข้อความเกี่ยวกับเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ เส้นโค้งถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันเวกเตอร์จริงที่แสดงออกมาในรูปของพารามิเตอร์หนึ่งตัว คือ t กล่าวคือส่วนประกอบของฟังก์ชันเวกเตอร์สามารถกำหนดได้เมื่อระบุพารามิเตอร์นี้แล้ว การใช้คำจำกัดความนี้เส้นโค้งในช่วงเวลาที่ a "t" b สามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการ (2.11) นี้

$$y(t) = [y_1(t) \quad y_2(t) \quad y_3(t)]^T \quad (2.11)$$

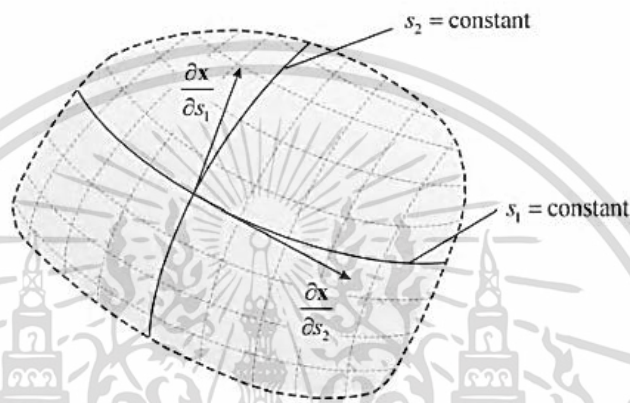
สมการนี้ซึ่งเป็นการแทนค่าพารามิเตอร์ของเส้นโค้งสามารถใช้เพื่อกำหนดตำแหน่งของจุดบนเส้นโค้งสำหรับค่าอิสระของพารามิเตอร์ t เส้นโค้งเหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.23 สามารถกำหนดพารามิเตอร์โดยใช้ความยาวส่วนโค้ง s ความเปลี่ยนแปลงนำไปสู่คำจำกัดความของคุณสมบัติทางเรขาคณิตเฉพาะที่ไม่เปลี่ยนแปลงของเส้นโค้ง เช่น ความโค้งและแรงบิด



รูปที่ 2.23 พื้นที่เส้นโค้ง [1]

ในขณะที่เส้นโค้งสามารถอธิบายได้โดยใช้พารามิเตอร์เดียว การอธิบายรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิว ต้องใช้พารามิเตอร์อิสระสองตัวดังแสดงในรูปที่ 2 การใช้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนแต่ละจุดบนพื้นผิวจะถือว่ามีความสัมพันธ์เฉพาะ x ที่สามารถกำหนดได้ในพื้นที่สามมิติในรูปแบบของพารามิเตอร์อิสระทั้งสอง ดังสมการ (2.12) นี้

$$x(s_1, s_2) = [x_1(s_1, s_2) \quad x_2(s_1, s_2) \quad x_3(s_1, s_2)]^T \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.24 เรขาคณิตของพื้นผิว [1]

โดยที่ S_1 และ S_2 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายเรขาคณิตพื้นผิวหรือเรียกว่าพารามิเตอร์พื้นผิว เพื่อที่จะใช้แคลคูลัสเชิงอนุพันธ์สมการ (2.12) ในกรณีของเส้นโค้งพื้นผิวมีคุณสมบัติคงที่ ที่สามารถใช้เพื่อกำหนดรูปทรงเรขาคณิตพื้นผิวโดยเฉพาะ ในบรรดาคุณสมบัติเหล่านี้เป็นรูปแบบพื้นฐานที่หนึ่งและสองของพื้นผิวและความโค้งแบบเกาส์เซียน (Gaussian curvature) เมื่อทราบถึงรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวเราสามารถกำหนดระนาบสัมผัสและระนาบปกติได้ ที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับรางเราจะต้องสามารถกำหนดระนาบสัมผัสและระนาบปกติเพื่อกำหนดแรงค้ำสัมผัสและแรงปกติที่เข้าสู่สมการพลศาสตร์ของสมการการเคลื่อนที่ ยิ่งไปกว่านั้นคุณสมบัติทางเรขาคณิตของพื้นผิว เช่น ความโค้งหลักใช้เพื่อกำหนดรูปทรงเรขาคณิตและขนาดของพื้นที่สัมผัส

2 เรขาคณิตของรางและล้อ (Rail and wheel geometry)

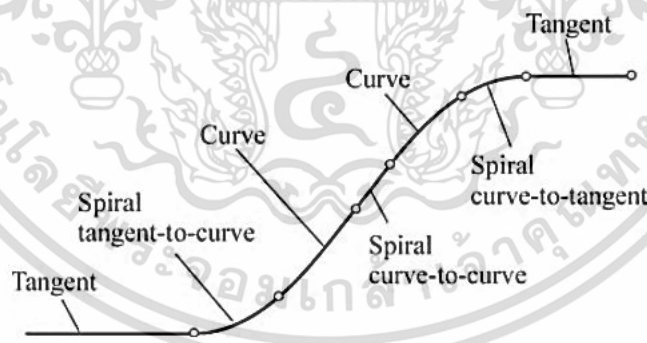
พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของยานพาหนะทางรถไฟขึ้นอยู่กับรูปทรงล้อและราง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องอธิบายรูปทรงของล้อและทางรถไฟอย่างแม่นยำเพื่อกำหนดการตอบสนองของยานพาหนะได้อย่างถูกต้อง วิธีที่ใช้ในการอธิบายพื้นผิวของล้อและรางควรเป็นพื้นฐานเพื่ออนุญาตให้แสดงรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวอย่างอิสระ นอกจากนี้ยังเป็นสิ่งสำคัญที่จะสามารถอธิบายในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของโพรไฟล์ล้อและรางในรูปแบบทั่วไป ตัวอย่างเช่นในกรณีของส่วนที่เป็นเส้นตรงของทางวิ่งรถไฟพื้นผิวของรางสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของความโค้งของโพรไฟล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 พื้นผิวนี้สามารถกำหนดได้โดยสมการเอกสสารนี้เป็นเอกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พื้นผิวนี้สามารถกำหนดได้พื้นผิวนี้สามารถกำหนดได้โดยสมการอิงพารามิเตอร์ (Parametric equations t_f) ดังสมการ (2.13) นี้

$$\vec{u} = [s_1^r \quad s_2^r \quad f(s_2^r)]^T \quad (2.13)$$

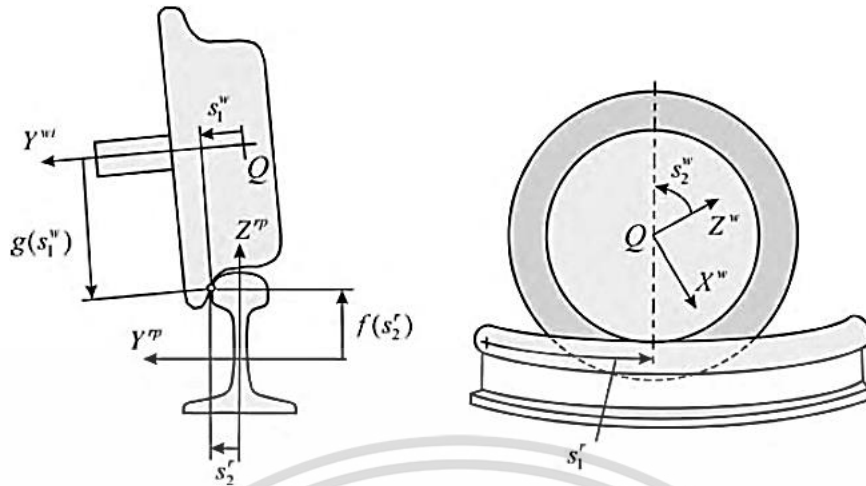
โดยที่ s_1^r คือระยะทางตามราง (ความยาวส่วนโค้ง) และถูกกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์พื้นผิวรางยา s_2^r คือ พารามิเตอร์พื้นผิวด้านข้างราง

ใช้ตัวแปรอิสระเพื่ออธิบายรายละเอียดโปรไฟล์ราง คำอธิบายที่สมบูรณ์ของรูปทรงเรขาคณิตของทางรถไฟจำเป็นต้องใช้คำจำกัดความหลายประการ ตัวอย่างเช่น เกจ (gauge) และค่าความลาดเอียงของทาง (super-elevation) ซึ่งแสดงในรูป 2.26 เกจ G ถูกกำหนดให้เป็นระยะทางด้านข้างระหว่างจุดสองจุดบนส่วนด้านในของรางด้านขวาและด้านซ้ายในขณะที่กำหนดความสูงระดับ h ดังแสดงในรูปที่ 2.26 เป็นระยะในแนวตั้งระหว่างรางด้านขวาและด้านซ้าย นอกจากนี้ยังจะแสดงให้เห็นว่าเรขาคณิตของทางรถไฟสามารถกำหนดได้อย่างสมบูรณ์โดยใช้สามอินพุต ความโค้งแนวนอน (horizontal curvature) ซึ่งกำหนดได้โดยการฉายระยะเส้นโค้งของรางบนระนาบแนวนอน คำอธิบายเกี่ยวกับประสิทธิภาพและระบบของเรขาคณิตทางรถไฟนั้นได้มาจากการใช้ชนิดส่วนของทางรถไฟมาตรฐานหลายประเภท รวมถึงเส้นสัมผัส (tangent) เส้นโค้ง (curved) สัมผัสโค้งเข้าสู่เกลียว (tangent-to-curve entry spiral) และโค้งสัมผัสออกจากเกลียว (curve-to-tangent exit spiral) รวมถึงส่วนอื่น ๆ เรขาคณิตอย่างง่ายถูกใช้เพื่ออธิบายรูปร่างของส่วนเหล่านี้ เพื่ออำนวยความสะดวกในการพัฒนาสูตรทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อกำหนดทางรถไฟด้วยรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.25 ส่วนของทาง [1]

โดยทั่วไปแล้วอย่างที่กล่าวก่อนหน้านี้ การจำลองคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นของระบบยานพาหนะทางรถไฟประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก ในขั้นตอนแรกมีการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของทางรถไฟและโปรไฟล์ล้อและราง ขณะที่ในขั้นตอนที่สองสมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะรถไฟจะถูกกำหนดและหาผลลัพธ์โดยใช้อินพุตเรขาคณิตที่รับได้ในระยะแรก สำหรับขั้นตอนแรกมักจะมีค่าเป็นหนึ่ง



รูปที่ 2.26 เรขาคณิตล้อ [1]

การพัฒนารหัสคอมพิวเตอร์ตัวประมวลผลที่สามารถใช้เพื่อกำหนดทางรถไฟด้วยเรขาคณิตอิสระ ตัวประมวลผลทางรถไฟมีอินพุตที่ยึดตามคำจำกัดความและคำศัพท์ที่ใช้โดยอุตสาหกรรมทางรถไฟ ผลลัพธ์ของตัวประมวลผลทางรถไฟคือไฟล์ข้อมูลที่ใช้เป็นอินพุตไปยังคอมพิวเตอร์ของตัวประมวลผลหลักที่ใช้ในการแก้สมการแบบพลศาสตร์ของระบบยานพาหนะรถไฟหลายระบบ

เรขาคณิตล้อยังมีผลกระทบสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงและความมั่นคงของยานพาหนะทางรถไฟ ความเร็ววิกฤตของยานพาหนะขึ้นอยู่กับรูปร่างของโปรไฟล์ของล้อและราง พื้นผิวของล้อเป็นพื้นผิวของการหมุนรอบที่ได้จากการหมุนที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งที่กำหนดโปรไฟล์ล้อเชื่อมโยงกับแกนดังแสดงในรูปที่ 2.26 ดังนั้นพื้นผิวของวงล้อสามารถกำหนดทางคณิตศาสตร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่เลือกโดยสมการ (2.14) นี้

$$\vec{u}^w(s_1^w, s_2^w) = \begin{bmatrix} x_0 + g(s_1^w) \sin s_2^w \\ y_0 + s_1^w \\ Z_0 - g(s_1^w) \cos s_2^w \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

มีแนวโน้มที่จะอยู่กึ่งกลางมันเองเมื่อเปรียบเทียบกับล้อทรงกระบอก โดยที่ s_1^w คือพารามิเตอร์พื้นผิวด้านข้างที่แสดงถึงตัวแปรอิสระสำหรับโปรไฟล์ล้อ s_1^w และ s_2^w เป็นพารามิเตอร์พื้นผิวเชิงมุมที่แสดงถึงการหมุนของโปรไฟล์ล้อรอบแกนของมัน ตัวแปร x_0 , y_0 และ z_0 เป็นค่าคงที่ ล้อแบบเรียว (Tapered wheels) มีแนวโน้มที่จะอยู่กึ่งกลางมันเองเมื่อเปรียบเทียบกับล้อทรงกระบอกแปลนล้อและพื้นผิวด้านในของราง หากใช้ล้อทรงกระบอกหน้าจะสึกหรออย่างรวดเร็วเนื่องจากการสัมผัสกับสันด้านในของราง การใช้แบบจำลองที่เรียบง่ายสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าทรงเรียวนั้นอยู่ในอีกด้านหนึ่ง ชุดล้อจะไม่เสถียร (Karnopp, 2004; Popp and Schiehlen, 1993)

2.3.2.4 ทฤษฎีการสัมผัส (Contact theories)

การสัมผัสระหว่างล้อกับรางเป็นอีกปัญหาสำคัญที่ต้องกล่าวถึงในการวิเคราะห์ระบบยานพาหนะทางรถไฟ วิเคราะห์การสัมผัสขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวล้อและรางและด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องเข้าใจรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวก่อนตามที่กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้า ในการเปลี่ยนแปลงทางรถไฟนั้นจะมีการปฏิบัติตามขั้นตอนมาตรฐานเพื่อกำหนดแรงสัมผัสสำหรับล้อและราง ขั้นแรกให้กำหนดแรงสัมผัสปกติ (normal contact force) ซึ่งแรงปกติของระนาบเส้นสัมผัสต่อล้อและพื้นผิวรางที่จุดสัมผัส ประการที่สองใช้แรงปกติ คุณสมบัติของวัสดุ รูปทรงเรขาคณิตของล้อและราง ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างล้อกับราง แรงคืบสัมผัส (tangential creep force) และโมเมนต์การหมุน (spin moment) สามารถกำหนดได้

แบบจำลองการสัมผัสหลากหลายแบบถูกนำมาใช้ในสมการคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกันเพื่ออธิบายการทำงานของล้อ/รางโดยทั่วไปแล้วการสัมผัสระหว่างวัตถุแข็งเกร็งทั้งสองสามารถอยู่ที่จุดเดียวหรือพื้นที่ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุทั้งสอง การสัมผัสทั้งสองประเภทนี้รู้จักกันในชื่อการสัมผัสที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบ (no conformal contact) กับการสัมผัสแบบที่เป็นไปตามรูปแบบ (conformal contact) ตามลำดับ (Johnson, 1985) หากรูปร่างของวัตถุทั้งสองเป็นเช่นนั้นวัตถุทั้งสองในพื้นที่ของการสัมผัสกันพอดีหรือแม้กระทั่งแนบสนิทไปด้วยกัน การสัมผัสถูกเรียกว่าเป็นการสัมผัสที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบ วัตถุทั้งสองจะเสีรูปร่างที่จุดสัมผัสเพื่อสร้างพื้นที่ของการสัมผัส พื้นที่สัมผัสนี้เป็นกรณีแบบการสัมผัสที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบ หากมีการใช้แรงภายนอกกับวัตถุแต่ละตัว วัตถุทั้งสองจะเสีรูปร่างที่จุดติดต่อกันเพื่อสร้างพื้นที่สัมผัส พื้นที่สัมผัสในกรณีของการสัมผัสที่ไม่เป็นไปตามหลักจะถือว่ามีความเล็กเมื่อเทียบกับการลดขนาดของวัตถุทั้งสอง เฮิร์ตซ์ (Hertz, 1882) ได้ทำการศึกษาปัญหาการสัมผัสไม่เป็นไปตามรูปแบบระหว่างสองพื้นผิว เฮิร์ตซ์สันนิษฐานว่าพื้นที่สัมผัสเป็นรูปไข่ ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์แบบพลศาสตร์ของล้อกับราง สมมติฐานของการสัมผัสแบบไม่เป็นไปตามรูปแบบ เหตุผลนั้นเป็นเพราะรูปร่างของพื้นผิวของล้อและราง บริเวณที่สัมผัสนั้นสมมติเป็นรูปไข่และสามารถกำหนดมิติของมันได้ โดยใช้รูปทรงเรขาคณิตของทั้งสองพื้นผิว ด้วยเหตุนี้เราต้องกำหนดความโค้งหลักของพื้นผิวทั้งสอง รวมถึงทิศทางหลัก การกำหนดค่าของล้อและรางสามารถใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อกำหนดแรงสัมผัสปกติ วิธีการกำหนดแรงสัมผัสปกติสามารถตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าล้อและพื้นผิวรางเป็นของแข็งหรือบนสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวทั้งสองสามารถทำให้เสีรูปร่างในพื้นที่ขนาดเล็กของการสัมผัส

2.3.2.5 สมการยานพาหนะรถไฟมัลติบอดีพื้นฐาน (General multibody railroad vehicle)

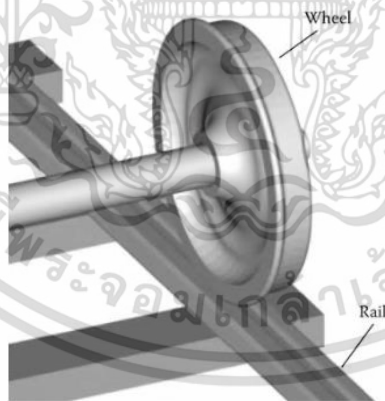
โดยการสร้างขั้นตอนการพิจารณาแรงคืบปกติและแรงคืบสัมผัสรวมถึงโมเมนต์หมุนคืบกระบวนการดังกล่าวสามารถนำไปใช้อย่างเป็นระบบในอัลกอริทึมระบบมัลติบอดีทั่วไปที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางรถไฟของยานพาหนะทางรถไฟ ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้การวิเคราะห์การทำงานของล้อและรางจำเป็นต้องมีการทำนายที่แม่นยำของแรงสัมผัสปกติ แรงสัมผัสปกติกับคุณสมบัติทางเรขาคณิต วัสดุของล้อกับ

ร่างจำเป็นสำหรับการประเมินแรงคืบสัมผัส และโมเมนต์การหมุน มีวิธีการคำนวณหลักสองวิธีที่สามารถใช้ในระบบสมการมัลติบอร์ดีในการทำนายตำแหน่งของจุดสัมผัส และกำหนดแรงสัมผัสปกติเมื่อพิจารณาการปฏิสัมพันธ์ของล้อกับราง ในวิธีแรกการสัมผัสระหว่างล้อกับราง ถูกอธิบายโดยการใช้อนุกรมการจลนศาสตร์แบบมีเงื่อนไขซึ่งกำหนดในตำแหน่งความเร็วและระดับความเร่ง ในกรณีนี้สันนิษฐานว่าพื้นผิวของล้อและรางจะแทรกซ้อนกัน แรงสัมผัสปกติสามารถกำหนดเป็นปฏิกริยา

แรงเนื่องจากการกำหนดสมการเงื่อนไขของการสัมผัส เมื่อมีการใช้เงื่อนไขให้มีความเท่ากันจะถือว่าไม่มีการแยกหรือแทรกกันระหว่างล้อกับราง ในวิธีที่สองซึ่งมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองแรงยืดหยุ่น (elastic force model) พื้นผิวของล้อและรางจะสามารถมีการเปลี่ยนรูปได้เล็กน้อยในพื้นที่สัมผัส แรงสัมผัสปกติที่เกิดจากการมีปฏิสัมพันธ์ของล้อกับรางนั้นถูกทำนายโดยใช้แบบจำลองแรงที่สอดคล้องกับการสมมติค่าความแข็งและสัมประสิทธิ์ความหน่วง (damping coefficients) ในวิธีการนี้ล้อจะมีอิสระได้ 6 ค่าอิสระ เมื่อเทียบกับรางรถไฟอีกทั้งยังสามารถทำการแยกและแทรกล้อและรางได้

1 สมการการสัมผัสแบบมีเงื่อนไข (Constraint contact formulation)

รูปที่ 2.27 แสดงล้อและรางที่สัมผัสกัน หากไม่ให้มีการแทรกหรือการแยกกันในกรณีที่มีการสัมผัสที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ล้อสามารถมี 5 ค่าอิสระ เมื่อเทียบกับรางค่าอิสระเหล่านี้มีสองทิศทางในระนาบสัมผัสที่จุดสัมผัสและการหมุนสัมพัทธ์ ในกรณีนี้สันนิษฐานว่าไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามระนาบปกติไปจนถึงระนาบสัมผัสที่จุดสัมผัส



รูปที่ 2.27 สมการการสัมผัสระบบมัลติบอร์ดี [1]

เงื่อนไขการสัมผัสในการกำจัด 1 ค่าอิสระ คืออิสระของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามปกติกับระนาบสัมผัสที่จุดสัมผัส โดยทั่วไปรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวสัมผัสต้องมีการนำพารามิเตอร์พื้นผิวสองแบบสำหรับแต่ละตัว นั่นคือสำหรับแต่ละการเชื่อมต่อกันระหว่างล้อกับรางหนึ่งจะต้องกำหนดรูปทรงเรขาคณิตโดยใช้พารามิเตอร์พื้นผิว เนื่องจากการนำพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตสี่แบบและกำจัด 1 ค่าอิสระ การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขโดยทั่วไปจะใช้สมการจลนศาสตร์ห้าแบบที่สามารถใช้เพื่อกำจัดสี่

พารามิเตอร์ทางเรขาคณิต 1 ค่าอิสระ สำหรับแต่ละการสัมผัส เมื่อสมการการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดในรูปแบบของพารามิเตอร์พื้นผิวจะไม่มีแรงเฉื่อยหรือแรงที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตเหล่านี้

สมการเงื่อนไขสองสมการที่เทียบเท่ากันสามารถพัฒนาซึ่งใช้การแก้ปัญหาที่แตกต่างกันสองแบบ วิธีแรกนำไปสู่ระบบที่ใหญ่กว่าของสมการโดยการเพิ่มสมการแบบพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่กับเงื่อนไขการสัมผัสทั้งหมด ในสมการเพิ่มเติมนี้ สามารถเลือกเป็นค่าอิสระในวิธีที่สองกระบวนการตั้งถูกใช้เพื่อให้ปรับปรุงระบบสมการของพารามิเตอร์ความเร่งพื้นผิวถูกกำจัดอย่างเป็นระบบ ในวิธีที่สองนี้พารามิเตอร์พื้นผิวไม่สามารถเลือกเป็นค่าอิสระได้

2 สมการการสัมผัสแบบยืดหยุ่น (Elastic contact formulation)

ในสมการการยืดหยุ่นล้อย่อมมีค่าองศาอิสระเทียบกับราง โดยแรงสัมผัสปกติถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของการแทรกผ่านโดยใช้ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิร์ตซ์หรือใช้ความแข็งและสัมประสิทธิ์ความหน่วง สมการการสัมผัสแบบยืดหยุ่นนั้นไม่เหมือนกับสมการการสัมผัสแบบมีสมการการสัมผัสแบบยืดหยุ่นนั้นไม่เหมือนกับสมการการสัมผัสแบบมีเงื่อนไขสำหรับการแยกกับรางและการเคลื่อนที่ผ่านกันได้ จากการหาผลลัพธ์ของสมการการเคลื่อนที่ตำแหน่งของล้อที่เกี่ยวข้องกับรางรถไฟสามารถถูกกำหนดและใช้เพื่อตรวจสอบว่าพื้นผิวของล้อและรางถูกแทรกผ่านหรือไม่ หากการแทรกเกิดขึ้นสามารถใช้การแทรกทะลุ และอัตราเวลาเพื่อกำหนดแรงปกติ เห็นได้ชัดว่าการทำนายตำแหน่งของจุดสัมผัสที่แม่นยำนั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานที่ยืดหยุ่นของสมการการสัมผัสแบบยืดหยุ่น หนึ่งในวิธีการแบบยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับการค้นหาจุดสัมผัสโดยใช้จุดศูนย์กลางที่ไม่ต่อเนื่องที่ใช้เพื่ออธิบายโปรไฟล์ล้อและพื้นผิวราง ในวิธีการที่สองจุดสัมผัสถูกกำหนดโดยการแก้ชุดสมการพีชคณิตเชิงเส้น

2.3.2.6 ยานพาหนะสมการเฉพาะของทางรถไฟ (Specialized railroad vehicle formulations)

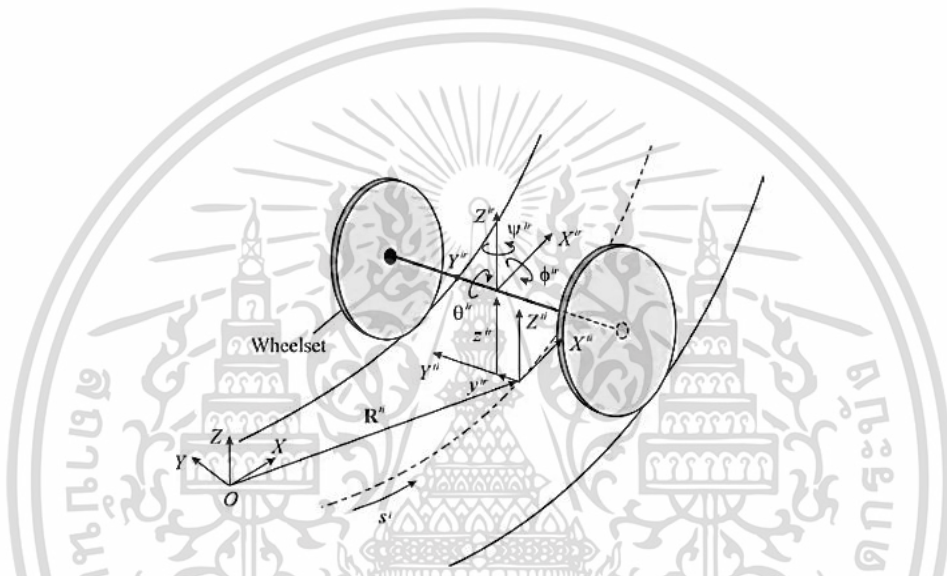
มักใช้วิธีที่แตกต่างกันสองแบบในการพัฒนาการคำนวณสำหรับการใช้งานด้านวิศวกรรมโดยเฉพาะวิธีแรกขึ้นอยู่กับการพัฒนาวิธีคิดที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะนั้น ในกรณีนี้เราสามารถใช้อุปกรณ์จากคุณสมบัติเฉพาะของการประยุกต์เพื่อปรับอัลกอริทึมการคำนวณให้เหมาะสม ข้อเสียของการใช้วิธีนี้คือความยากลำบากที่จะต้องเจอ

เมื่อพิจารณาถึงสถานการณ์ทั่วไปหรือปรากฏการณ์ทางกายภาพ วิธีที่สองนั้นขึ้นอยู่กับปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมระบบมัลติบอร์ดีที่มีอยู่ วิธีที่สองนี้ให้ความยืดหยุ่นในการจัดการกับสถานการณ์ทั่วไปและยังช่วยให้สามารถใช้ประโยชน์จากความสามารถของมัลติบอร์ดีขั้นสูงที่เป็นส่วนหนึ่งของอัลกอริทึมการคำนวณ

พิกัดคาร์ทีเซียนที่แน่นอนถูกนำมาใช้ในการพัฒนาสูตรคอมพิวเตอร์ทั่วไปสำหรับระบบยานพาหนะทางรถไฟแบบไม่เชิงเส้น ค่าอธิบายการเคลื่อนที่เหล่านี้นำไปสู่การใช้สูตรการสัมผัสอย่างเป็นระบบและตรงไปตรงมาในอัลกอริทึมระบบคอมพิวเตอร์แบบหลายจุดประสงค์ทั่วไปที่มีอยู่ ค่าอธิบายนี้ยังรักษาโครงสร้าง

เมทริกซ์ที่กระจายกระจายของสูตรแบบพลศาสตร์และอนุญาตให้ใช้ประโยชน์จากความสามารถด้านพลศาสตร์ของระบบมัลติบอดีขั้นสูงและการพัฒนาที่ดีเช่นความยืดหยุ่นของร่างกาย อย่างไรก็ตามคำอธิบายพิกัดคาร์ทีเซียนสมบูรณ์ไม่ได้เป็นวิธีการเดียวที่ใช้ในคำอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบยานพาหนะทางรถไฟเนื่องจากการประมวลผลจำนวนมากแล้วนำชุดพิกัดอื่นมาใช้

ชุดพิกัดที่มักจะใช้ในเฉพาะสมการรถไฟก็คือพิกัดวิถี เมื่อมีการใช้พิกัดเหล่านี้การเคลื่อนไหวของตู้รถไฟโดยอิสระในระบบยานพาหนะทางรถไฟ โดยใช้พิกัดที่ขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของทางรถไฟ ระบบพิกัดของทางรถไฟ X^{ir} Y^{ir} Z^{ir} เรียกว่าระบบพิกัดวิถีของตู้รถไฟ ซึ่งต่อไปนี้การเคลื่อนไหวของตู้รถไฟถูกแสดงแบบในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 พิกัดวิถี (Trajectory coordinates) [1]

นั่นคือแต่ละตู้รถไฟแต่ละตู้มีระบบพิกัดวิถี ตำแหน่งจุดกำเนิดและการวางแนวของระบบพิกัดวิถีตู้รถไฟนั้นสามารถกำหนดได้แบบไม่ซ้ำกันโดยพิกัดความยาวส่วนโค้งซึ่งแสดงระยะทางที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งของพื้นที่โค้งทางรถไฟ ระบบพิกัดวิถีนี้ใช้เพื่อกำหนดโครงสร้างของตู้รถไฟในระบบพิกัดระดับโลก ด้วยเหตุนี้อีกระบบพิกัดเรียกว่าระบบพิกัดตู้รถไฟ (body coordinate system) X^{ir} Y^{ir} Z^{ir} เป็นที่รู้จักสำหรับแต่ละตู้รถไฟดังแสดงในรูปที่ 2.28 ที่มาของระบบพิกัดของตู้รถไฟจะถูกอิงกับศูนย์กลางของมวลและระบบพิกัดของตู้รถไฟจะถูกเลือกเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางตามยาวของการเคลื่อนที่ตามระบบพิกัดวิถี เนื่องจากเรขาคณิตของทางรถไฟถูกสมมุติว่านิยามที่สมบูรณ์ของระบบพิกัดวิถีซึ่งรวมถึงการแปลงและการกำหนดทิศทางต้องใช้พิกัดที่ขึ้นกับเวลาเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ในทางกลับกันคำอธิบายของการเคลื่อนที่ของตู้รถไฟด้วยการพิจารณาในระบบพิกัดวิถีนั้นต้องใช้พิกัดขึ้นกับเวลาโดยมี 2 พิกัดจากการเปลี่ยนแปลงของทิศทางและ 3 มุมที่กำหนดไว้ด้วยการพิจารณาที่ระบบพิกัดวิถีของร่างกายโดยอิสระของ i ในระบบ ดังสมการ (2.15) นี้

$$P^i = [s^i \quad y^{ir} \quad z^{ir} \quad \psi^{ir} \quad \phi^{ir} \quad \theta^{ir}]^T \quad (2.15)$$

ที่ s^i คือพิกัดความยาวส่วนโค้งตามแนวโค้งของพื้นที่ของ Y^{ir} และ Z^{ir} ตามลำดับพิกัดตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลในทิศทางด้านข้างและในทิศทางปกติกับระนาบที่ประกอบด้วย เส้นโค้งของทางรถไฟตามที่แสดงในรูปที่ 2.28 พิกัดทั้งสองนี้ถูกกำหนดด้วยการพิจารณาระบบพิกัดวิถีที่มีตำแหน่งและการวางแนวจะถูกกำหนดโดยความยาวส่วนโค้งของ i มุม ψ^{ir} , ϕ^{ir} และ θ^{ir} ตามลำดับ มุมการหมุนรอบแกน X (yaw), มุมการหมุนรอบแกน Y (roll) มุมการหมุนรอบแกน Z (pitch) ที่ที่กำหนดทิศทางของร่างกายด้วยความเคารพต่อระบบพิกัดวิถีการใช้พิกัดวิถีเปรียบเทียบกับพิกัดสัมบูรณ์มีข้อได้เปรียบของการทำให้เงื่อนไขของยานพาหนะทางรถไฟ และฟังก์ชันบังคับบางอย่างง่ายขึ้น

ด้วยการใช้พิกัดวิถีแบบทั่วไปทำให้เราสามารถพัฒนาแบบจำลองยานพาหนะลดค่าสั่งสำหรับการวิเคราะห์ประเภทต่าง ๆ ได้อย่างง่ายดาย โมเดลยานพาหนะที่มีค่าอิสระสามารถพัฒนาได้โดยใช้พิกัดความยาวส่วนโค้ง มักใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์แรงตามแนวยาวของรถไฟ (Meng et al., 2005) การวิเคราะห์ดังกล่าวมีความสำคัญต่อการหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุและปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงานสำหรับรถไฟโดยเฉพาะ แรงในข้อต่อเชื่อม (couplers) ที่เป็นข้อต่อเชื่อมยานพาหนะสามารถตรวจสอบเพื่อตรวจสอบว่าแรงเหล่านี้ถึงค่าวิกฤตที่ก่อให้เกิดความเสียหายในการเชื่อมต่อ

นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาแบบจำลองสองค่าอิสระได้โดยใช้พิกัดวิถีเพื่อศึกษาเสถียรภาพด้านข้างของระบบยานพาหนะรถไฟ ความไม่เสถียรด้านข้างที่เกิดจากปรากฏการณ์การส่ายเป็นผลมาจากการมีระหว่งการแทนที่ด้านข้าง แนวเฉียง และแรงคืบ ด้วยเหตุนี้จึงใช้โมเดลสองค่าอิสระที่มีการกระจัดด้านข้างและมุมเอียงเป็นพิกัดอิสระสามารถใช้ในการตรวจสอบความไม่เสถียรของ the hunting instability ในกรณีหนึ่งชุดมีพิกัดวิถีสำหรับตู้รถไฟโดยอิสระ i ดังสมการ (2.16) นี้

$$P^i = [y^{ir} \quad \psi^{ir}]^T \quad (2.16)$$

แบบจำลองสองค่าอิสระสามารถพัฒนาได้โดยกำหนดเงื่อนไขในพิกัดวิถีอีกสี่แบบ เนื่องจากพิกัดวิถีถูกใช้เป็นพิกัดทั่วไปสมการเงื่อนไข ดังกล่าวกลายเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นในพิกัดวิถี วิธีทั่วไปดังนั้นก็นำไปสู่ขั้นตอนง่าย ๆ สำหรับกำจัดสี่พิกัดอิสระและแรงที่เกี่ยวข้องจากสมการการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ เป็นผลให้หนึ่งได้รับชุดค่าต่ำสุดของสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่แสดงในลักษณะของพิกัดวิถีด้านข้างและด้านเอียง

2.3.2.7 แบบจำลองยานพาหนะรถไฟแบบเชิงเส้น (Linearized railroad vehicle)

สมการระบบยานพาหนะรถไฟใช้สมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นและสมการเชิงเส้น เป็นที่ทราบกันดีว่า โมเดลของยานพาหนะทางรถไฟนั้นมีความอ่อนไหวต่อความเป็นเส้นตรง และสมการที่ใช้การเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงสามารถทำนายได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วสูง การตอบสนองแบบพลศาสตร์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากสมการจลศาสตร์และไม่เชิงเส้นอย่างเต็มรูปแบบ (Shabana et al., 2006) ผลกระทบของการประมาณที่ใช้ในโมเดลยานพาหนะรถไฟเชิงเส้นจะต้องได้รับสมการจลศาสตร์ และไม่เชิงเส้นแบบเต็มก่อน สมการจลศาสตร์เชิงเส้น และพลศาสตร์ที่ใช้ในยานพาหนะรถไฟบางรุ่นนั้นสามารถหาได้จากแบบจำลองไม่เชิงเส้นรูปแบบเต็มเพื่อแสดงบนสมมติฐานและการประมาณที่ใช้ในโมเดลเชิงเส้น การสมมุติมุมนเล็ก ๆ ขึ้นมา มักจะทำการพัฒนาแบบจำลองยานพาหนะทางรถไฟและผลกระทบต่อความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และแรงเฉื่อยสามารถตรวจสอบได้

ในบรรดาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการประเมินแรงของการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อกับรางคือข้อมูลทางเรขาคณิตของล้อและราง โปรไฟล์วัสดุของล้อและราง และการคืบ ที่ขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างล้อและทางรถไฟ เพื่อกำหนดแรงคืบตามยาว และเส้นสัมผัส เช่นเดียวกับโมเมนต์การหมุน การคืบจะถูกคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ผิวการคืบที่สูงมาก การประมาณที่ใช้ในการกำหนดค่าของการคืบสามารถนำไปสู่ผลลัพธ์ทางพลศาสตร์ และความเสถียรที่แตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้โดยใช้แบบไม่เชิงเส้นโดยเฉพาะที่ความเร็วสูง การศึกษาที่เปรียบเทียบรหัสคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกันซึ่งมีพื้นฐานมาจากสมการที่ต่างกันซึ่งบางส่วนใช้ผิวการคืบแบบเส้นตรงการแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของความเร็ววิกฤตที่คาดการณ์ระหว่างโมเดลยานพาหนะเชิงเส้นกับโมเดลยานพาหนะไม่เชิงเส้นจะมีความสำคัญมาก โดยเพิ่มความเร็วได้มากถึง 21 เมตรต่อวินาที สำหรับบางรุ่น (Iwnicki, 1999) การค้นพบนี้มีความสำคัญเนื่องจากการทำนายความเร็ววิกฤตเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์หลักของการใช้รูปแบบคอมพิวเตอร์ การคาดการณ์ที่ไม่ถูกต้องของความเร็ววิกฤตอาจมีผลกระทบร้ายแรง อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการทำนายสถานการณ์การตรกรางอุบัติเหตุ และการประเมินเกณฑ์ความปลอดภัยความปลอดภัยผิวการคืบ

สมมติฐานพื้นฐานที่ใช้ในการหาผิวการคืบเชิงเส้นจะถูกสรุป ซึ่งให้เห็นว่าสมมติฐานโดยอัตโนมัติถ้าเป็นมุมกลิ้งจะสมมุติค่าเท่ากับศูนย์ ผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่แสดงให้เห็นว่าการใช้สมมติฐานดังกล่าวสามารถมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ (Shabana et al., 2006) สิ่งนี้จะอธิบายความแตกต่างที่สำคัญระหว่างผลลัพธ์ของยานพาหนะทางรถไฟที่คาดการณ์ไว้โดยใช้รหัสคอมพิวเตอร์ที่ยึดตามสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ และรหัสที่ใช้การเคลื่อนที่เชิงเส้นทางจลน์ของผิวการคืบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำให้เป็นเส้นตรงแบบจลศาสตร์สามารถนำไปสู่ข้อผิดพลาดที่สำคัญ โดยค่าที่คาดการณ์สำหรับแรงคืบตามแนวยาว และด้านข้าง ผลลัพธ์เหล่านี้ยังแสดงข้อผิดพลาดในแรงด้านข้าง และแนวตั้งที่เข้าสู่การคำนวณอัตราส่วน L/V ที่ใช้ในเกณฑ์การตรกรางบางอย่าง

2.3.2.8 ความเสถียรของการเคลื่อนที่ (Motion stability)

หนึ่งในลักษณะสำคัญของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะทางรถไฟคือ ปรากฏการณ์การส่าย การส่าย หมายถึงการเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดล้อด้วยการพิจารณาตำแหน่งเริ่มต้น (สมดุล) ชุดล้อประกอบด้วยสองล้อ (ขวาและซ้าย) ที่เชื่อมต่อกันด้วยเพลลา โดยทั่วไปแล้วรูปร่างของล้อเป็นรูปทรงกรวยโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุดใกล้กับฝั่งด้านในของรางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 2.29 ด้วยรูปร่างนี้ ชุดล้อจะมีแนวโน้มที่จะตั้งศูนย์อัตโนมัติได้ด้วยตัวเองในระหว่างการเคลื่อนที่ เป็นผลให้มีการสัมผัสกับหน้าแปลนน้อยลง (Karnopp, 2004) การวิเคราะห์ห้อย่างง่ายสามารถใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมนี้ ด้วยเหตุนี้สมมติว่าชุดล้อที่แสดงในรูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่ผ่านทางรถไฟ สิ่งต่าง ๆ เป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของการไถลหรือการรบกวน ชุดล้อจะเคลื่อนที่ไปทางด้านข้าง สมมติว่าในการกำหนดค่าเริ่มต้น (สมดุล) ชุดล้อมีตำแหน่งด้านข้าง เป็นศูนย์ ล้อด้านขวาและซ้ายมีรัศมีการหมุนเริ่มต้น R_r และ R_l ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.29 หากทั้งสองล้อเหมือนกันและตั้งอยู่สมมาตรพิจารณาเพลลาทั้งสองรัศมี R_r และ R_l ในการกำหนดรูปร่างสมมาตรเริ่มต้นถูกใช้แสดงแทน R_0 ความเป็นกรวยของล้อ (wheel conicity, γ) นั้นถูกกำหนดโดยความชันของโปรไฟล์ล้อดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 รัศมีการกลิ้งชุดล้อ [1]

ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดล้อมีการเปลี่ยนแปลงโดย ΔR ในรัศมีการกลิ้งทั้งสองสามารถกำหนดได้โดยใช้สมการ (2.17) นี้

$$\Delta R = y\gamma \quad (2.17)$$

รัศมีการกลิ้งของชุดล้อด้านซ้าย และขวาหาได้จากในช่วงเวลาใดก็ได้ดังที่สมการ (2.18) นี้

$$\left. \begin{aligned} R_r &= R_0 - y\gamma \\ R_l &= R_0 + y\gamma \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

ถ้าการหมุนของล้อมีความเร็วเชิงมุมคงที่ (constant angular velocity, ω) หาได้โดยใช้ความเร็วของล้อซ้าย และล้อขวาได้ตามลำดับโดย

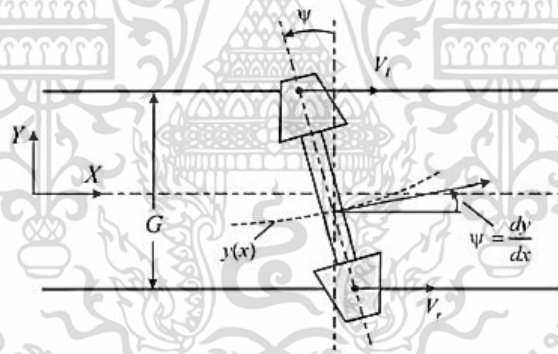
$$\left. \begin{aligned} V_r &= R_r \omega \\ V_l &= R_l \omega \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

ซึ่ง R_r และ R_l ถูกหาในสมการที่ (2.20) ความเร็วของศูนย์กลางของชุดล้อคือ V หาได้โดย

$$V = (V_r + V_l) / 2 = R_0 \omega \quad (2.20)$$

ถ้ามุมสายเอียง ψ ที่แสดงในรูป 2.30 สมมุติค่าให้น้อยที่สุด ($\tan \psi = \psi$) , อัตราการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างหาได้จากสมการ (2.21) นี้

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = \psi V = \psi R_0 \omega \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.30 การเคลื่อนที่แบบสายเอียงของชุดล้อ (Wheelset hunting motion) [1]

ในการวิเคราะห์อย่างง่ายอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมสายเอียง (yaw angle , ψ) สามารถเขียนเป็น

$$\dot{\psi} = (V_r - V_l) / G = -2y\omega\gamma / G \quad (2.22)$$

โดยที่ G ดังแสดงในรูปที่ 2-30 สมการความแตกต่าง สมการ (2.23) เทียบกับเวลา การแทนค่าจากสมการ (2.24) ในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
37
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ddot{y} + \left(\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} \right) y = 0 \quad (2.23)$$

สมการนี้ซึ่งสามารถใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดล้อ มีความคล้ายคลึงกับสมการที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบสปริงแบบง่าย หากสัมประสิทธิ์ของ y ในสมการก่อนหน้าเป็นบวกคำตอบของสมการนี้สามารถเขียนได้ในรูปแบบต่อไปนี้

$$y = A \sin(\omega_n t + C) \quad (2.24)$$

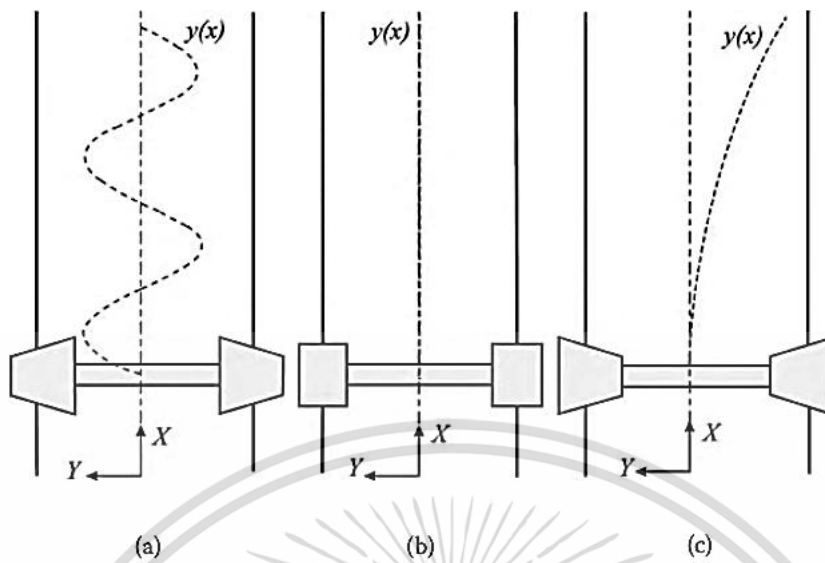
โดยที่ A และ C เป็นค่าคงที่ที่สามารถกำหนดได้โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นและ ω_n คือความถี่ธรรมชาติซึ่งหาได้จากสมการ (2.25)

$$\omega_n = V \sqrt{\frac{2\gamma}{R_0 G}} \quad (2.25)$$

วิธีแก้ปัญหของสมการ (2.24) ซึ่งได้มาจากการสันนิษฐานว่า ω_n^2 เป็นค่าบวกแสดงถึงความผันผวนด้วยแอมพลิจูดคงที่ ในกรณีนี้ชุดล้อสั่นสะเทือนเกี่ยวกับตำแหน่งสมดุลดังแสดงในรูปที่ 2.31a เห็นได้ชัดว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ y ในสมการ (2.23) นั้นเป็นค่าบวกหากค่าความเป็นกรวยเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 2.30 ระยะเวลาของการแกว่งคือ

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{V} \sqrt{\frac{R_0 G}{2\gamma}} \quad (2.26)$$

สมการ (2.25) และ (2.26) เป็นที่รู้จักกันในชื่อสมการของ คลิงเกิล (Klingel, 1883) ในกรณีของล้อทรงกระบอก มีค่าความเป็นกรวยเท่ากับศูนย์ ($\gamma = 0$) และค่าสัมประสิทธิ์ของ y ในสมการ (2.23) เท่ากับศูนย์ การหาผลลัพธ์ของสมการ (2.23) ในกรณีนี้เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.31b และการเคลื่อนที่ของชุดล้อเนื่องจากการถูกรบกวนจากด้านข้างไม่มีการแกว่ง ในกรณีที่มีค่าลบค่าสัมประสิทธิ์ของ y ในสมการ (2.23) เป็นค่าลบและการหาผลลัพธ์ ใช้ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นของเวลาแบบทวีคูณดังแสดงในรูปที่ 2.31c ดังนั้นบนพื้นฐานของจลนศาสตร์แบบง่ายที่แสดงในส่วนนี้ล้อจะต้องมีค่าความเป็นกรวยในเชิงบวกเพื่อให้มีการสั่นที่เสถียร



รูปที่ 2.31 การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของชุดล้อ (Wheelset lateral motion) [1]

สิ่งสำคัญคือต้องชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์อย่างง่ายที่นำเสนอในส่วนนี้ขึ้นอยู่กับพิจารณาจลนศาสตร์อย่างแท้จริง และไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของแรงใด ๆ ในความเป็นจริงชุดล้อนั้นขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานเนื่องจากความแตกต่างของความเร็วของล้อและรางที่จุดสัมผัส ความแตกต่างของความเร็วนี้ใช้เพื่อกำหนดความเร็วสัมพัทธ์ปกติ (creepages) ที่เข้าสู่การคำนวณแรงของคิบบ์ที่กระทำกับล้อ เนื่องจากแรงคิบบ์เหล่านี้การเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดล้อ สามารถแกว่งไปมาในตำแหน่งสมดุลที่มีแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาแม้ในกรณีที่ค่าความเป็นกรวยเป็นบวก นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสนใจที่จะต้องทราบโดยการตรวจสอบสมการ (2.21) และ (2.22) ว่าในกรณีของการแกว่งการเคลื่อนที่ที่ $\nu = 0$ สอดคล้องกับ $y = 0$ นั่นคือมุมสายเอียงเป็นสูงสุดหรือต่ำสุดเมื่อการกระจัดด้านข้างเป็นศูนย์และในทางกลับกัน นี่ก็หมายความว่ามุมสายเอียงระหว่างการกระจัดด้านข้างและมุมสายเอียง

2.3.2.9 จำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ (Motion scenarios)

ส่วนนี้จะเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะทางรถไฟ สถานการณ์จำลองเหล่านี้มีความสำคัญในกระบวนการออกแบบของรถราง ในสหรัฐอเมริกากำหนดว่าต้องมีการทดสอบยานพาหนะที่ออกแบบใหม่สำหรับการเคลื่อนที่ก่อนที่จะนำรถเข้ารับบริการ ในระหว่างการดำเนินงานของยานพาหนะรถไฟจะพบสถานการณ์การเคลื่อนที่ที่หลากหลายแบบ โดยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ถูกต้องในบางสถานการณ์จำเป็นต้องใช้สมการพลศาสตร์ที่ไม่เชิงเส้นอย่างเต็มที่ และการใช้ทฤษฎีการสัมผัสแบบสามมิติเพื่ออธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อกับรางแบบพลศาสตร์

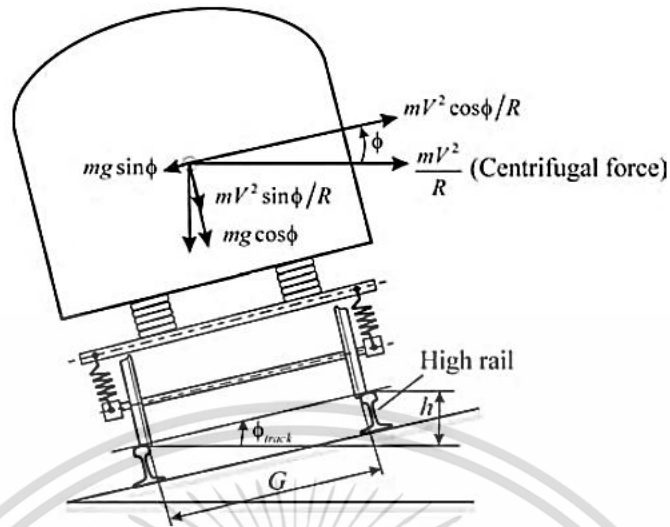
1 การล่า (Hunting)

ปรากฏการณ์การล่าอย่างที่ได้อธิบายมาแล้ว ชุดล้อสายเนื่องจากรูปร่างของมันและผลที่ได้คือความไม่คงที่ทางด้านข้างควบคู่ไปกับการหมุนสาย การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เพื่อให้ได้ความสะดวกสบายและความปลอดภัยที่เฉพาะเจาะจง เนื้อหาความเร็วในการทำงานบางอย่างที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบยานพาหนะทางรถไฟยานพาหนะอาจพบกับการล่าที่รุนแรงซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความรู้สึกไม่สบายหรือแม้แต่สาเหตุของการตกค้าง ความเร็วที่รถทางรถไฟจะไม่เสถียรเรียกว่าความเร็ววิกฤต ถ้ามากกว่าความเร็ววิกฤต ยานพาหนะนั้นต้องรับแรงที่สูงอย่างมากเนื่องจากปรากฏการณ์การล่า กับผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าแปลนล้อและรางรถไฟ ผลกระทบระหว่างหน้าแปลนล้อและรางเรียกว่าเป็นจุดสัมผัสที่สองโดยสมมติว่ามีจุดสัมผัสแรกระหว่างล้อและพื้นผิวราง ถ้าต่ำกว่าความเร็ววิกฤตจุดสัมผัสที่สองสามารถเชื่อในเสถียรภาพของยานพาหนะและป้องกันการตกค้าง อย่างไรก็ตามหากอัตราส่วน L/V เพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัดเนื่องจากการล่าที่รุนแรงการตกค้างอาจเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพูดถึงว่าโปรไฟล์ล้อยางชนิดได้รับการออกแบบมาโดยไม่มีจุดสัมผัสที่สองเกิดขึ้นและล้อจะมีจุดสัมผัสหนึ่งจุดกับรางเสมอ ในกรณีนี้แรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่จุดเดียว โดยไม่คำนึงถึงจำนวนของจุดสัมผัสของล้อมันเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องรู้ความเร็วที่สำคัญของราง ความเร็วนี้สามารถกำหนดได้โดยใช้ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์หรือโดยการทดสอบทดลองภาคสนาม

โดยทั่วไปแล้วอย่างแรก เราคาดว่าจะพบสองช่วงที่ไม่มีเสถียรภาพสำหรับยานพาหนะ ช่วงแรกเกิดขึ้นในช่วงความเร็วต่ำและมีความสัมพันธ์กับความไม่เสถียรของตัวรถ ในขณะที่ช่วงที่สองเกิดขึ้นที่ความเร็วสูงขึ้นและสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่การล่าของโบกี้ มัตสึโตะระบุช่วงที่ไม่มีเสถียรภาพทั้งสองนี้ซึ่งกำหนดเขตทั้งสองนี้เป็นการล่าช่วงปฐมภูมิและทุติยภูมิ (มัตสึโตะ, 1960) มันเป็นสิ่งสำคัญที่จะชี้ให้เห็นว่าความไม่เสถียรช่วงปฐมภูมิสามารถควบคุมได้ง่ายโดยการใส่แผ่นกันด้านข้างในช่วงทุติยภูมิเพื่อลดความกว้างของการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวรถ ประเภทที่สองของความไม่เสถียรซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วสูงขึ้นเป็นคุณลักษณะของระบบโบกี้ ความไม่เสถียรประเภทนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบโบกี้และช่วงล่างของล้อ (Valtorta et al., 2001)

2 เส้นโค้งคงที่ (Steady curving)

เมื่อยานพาหนะเดินทางผ่านเส้นโค้งคงที่ จะต้องทำการศึกษาระงสำคัญสองจุด แรงแรกคือแรงด้านข้างซึ่งต้องสมดุลกับแรงเหวี่ยงเนื่องจากความโค้งของทางรถไฟ แรงเหวี่ยงมีแนวโน้มที่จะผลักรถออกนอกโค้งไปสู่สิ่งที่เรียกว่า รางสูง (high rail) ดังนั้นหากเส้นโค้งมีความโค้ง และความสูงมากมีความเร็วสมดุลที่ส่วนประกอบของแรงเหวี่ยงจะเท่ากับองค์ประกอบด้านข้างของแรงโน้มถ่วง ดังแสดงในรูปที่ 2-26 ตัวอย่างเช่นหากยานพาหนะเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับ V เนื้อหาทางรถไฟที่มีรัศมีความโค้ง R จากนั้นที่ความเร็วสมดุลต้องมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.27) นี้



รูปที่ 2.32 ความเร็วสมดุล [1]

$$\frac{mV^2}{R} \cos \phi = mg \sin \phi \quad (2.27)$$

โดยที่ g คือค่าคงที่แรงโน้มถ่วง m คือมวลของยานพาหนะ โดยทั่วไป ϕ ในสมการก่อนหน้านี้นี้จะเท่ากับมุมทางรถไฟ (track angle, ϕ_{track}) บวกมุมหมุน (roll angle) ของรถซึ่งเป็นผลมาจากความยืดหยุ่นของส่วนรองรับ สมมติว่ามีค่าบวก สำหรับทางรถไฟทั่วไปเราสามารถทำการประมาณมุมเล็ก ๆ ตามสมการ (2.28) นี้

$$\cos \phi \approx 1, \quad \sin \phi = \frac{h}{G} \quad (2.28)$$

โดยที่ h คือความสูงยกระดับทางรถไฟ G คือความกว้างราง ดังนั้นความเร็วสมดุลเป็นไปตามสมการ (2.29) นี้

$$V = \sqrt{\frac{gRh}{G}} \quad (2.29)$$

หากยานพาหนะเดินทางด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วสมดุลยานพาหนะดังกล่าวจะส่วนเกินของการยกโค้ง (Cant excess) ซึ่งถูกกำหนดเป็นปริมาณของระดับความสูงที่จำเป็นต้องลดลงเพื่อให้ความเร็วของยานพาหนะในปัจจุบันจะเท่ากับความเร็วสมดุล ในทางตรงกันข้ามถ้ารถจะเดินทางด้วยความเร็วที่อยู่เหนือความเร็วสมดุลรถจะกล่าวว่ามีส่วนขาดของการยกโค้ง (Cant deficiency) มีการกำหนดไว้

เนื่องจากการยกระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ความเร็วของยานพาหนะในปัจจุบันจะเท่ากับความเร็วความสมดุล ในกรณีส่วนใหญ่ยานพาหนะจะต้องทดสอบในทั้งสองกรณี คือส่วนขาดของการยกโค้ง และส่วนเกินของการยกโค้ง ในกรณีของส่วนขาดของการยกโค้งยานพาหนะมีแรงด้านข้างสูงที่สามารถทำให้เกิด

การเคลื่อนไหวที่ไม่พึงประสงค์บนรางที่สูงขึ้น แรงด้านข้างเหล่านี้ถ้าสูงพอจะทำให้เกิดป็นรางขึ้นซึ่งสามารถนำไปสู่การตกรางของยานพาหนะ

แรงประเภทอื่นที่ยานพาหนะได้รับคือแรงตามยาว เมื่อชุดล้อเคลื่อนที่ไปตามทางรถไฟด้านนอกจะมีรัศมีความโค้งที่ใหญ่กว่าทางรถไฟด้านใน ดังนั้นวงล้อด้านนอกในการเคลื่อนที่ไกลกว่าล้อด้านใน ในกรณีนี้เมื่อชุดล้อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ล้อใดล้อหนึ่ง (ด้านนอกหรือด้านใน) หรือล้อทั้งสองจะลื่น การลื่นไกลสามารถลดลงได้หากรัศมีการหมุนของสองล้อได้รับการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเคลื่อนที่ของล้อ การเปลี่ยนแปลงในรัศมีการหมุนนี้สามารถทำได้โดยใช้โปรไฟล์ล้อรูปกรวย ในกรณีของล้อรูปกรวยขณะที่ชุดล้อเคลื่อนที่ในทางโค้ง ชุดล้อจะเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างในทิศทางของรางด้านนอก ดังนั้นล้อด้านนอกจะมีรัศมีการหมุนที่กว้างขึ้นจะทำให้ความเร็วที่สูงขึ้นในทิศทางตามยาวเมื่อเทียบกับล้อด้านใน สิ่งนี้จะช่วยลดการลื่นและการสึกหรอจะนำไปสู่การเข้าโค้งที่ดีขึ้น ดังนั้นการโค้งที่ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเป็นกรวยของล้อ ซึ่งบางการออกแบบโปรไฟล์ล้อไม่ได้เป็นรูปกรวย โดยได้รับการออกแบบให้มีส่วนโค้งที่พัฒนาขึ้นจากล้อที่สึกกร่อน โปรไฟล์เหล่านี้มีรูปร่างที่ปรับปรุงเสถียรภาพ และลดการสึกหรอ โดยทั่วไปในระหว่างการเคลื่อนที่ในทางโค้ง ชุดล้อมีแนวโน้มที่จะควบคุมตัวมันเองให้อยู่ในเส้นทางเนื่องจากผลของแรงบิดที่เกิดจากแรงกำล้งตามยาวที่ทำหน้าที่อยู่บนล้อด้านขวา และซ้าย หากโมเมนต์เฉือนมีขนาดไม่มากพอหรือหากการเชื่อมต่อส่วนรองรับ สร้างโมเมนต์ตรงกันข้ามที่สูงกว่าโมเมนต์ที่เกิดจากแรงตามยาวรถจะไม่เคลื่อนที่ผ่านโค้ง สถานการณ์นี้อาจเกิดขึ้นได้หากยานพาหนะมีส่วนรองรับที่แข็งมาก

3 การเคลื่อนที่ในรูปแบบเกลียว (Spiral negotiation)

คล้ายกับกรณีของเส้นโค้งคงที่รถสามารถให้แรงที่คล้ายกันในระหว่างการเคลื่อนที่ในทางที่เป็นเกลียว อย่างไรก็ตามเกลียวซึ่งแตกต่างจากโค้งคงที่ไม่มีมุมโค้งคงที่หรือระดับความสูงเป็นพิเศษ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความโค้ง และความสูงมากเกลียวนั้นเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางที่มีการตกรางจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วยานพาหนะจะเดินทางด้วยความเร็วคงที่ตลอดบริเวณเกลียว ความเร็วนี้สำหรับเกลียวบางส่วนอาจสูงกว่าความเร็วสมดุลทำให้เกิดแรงกระแทกอย่างฉับพลันที่ส่วนหนึ่งของเกลียวระหว่างหน้าผิวล้อและรางรถไฟที่สูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อรถเปลี่ยนทิศทางไปยังบริเวณเกลียวทำให้เกิดการบิดตัวในตู้รถไฟ

4 การบิดและหมุน (Twist and roll)

การเคลื่อนที่แบบบิดและหมุนเป็นผลมาจากการตอบสนองของยานพาหนะต่อการเปลี่ยนแปลงทางรถไฟแบบตัดผ่าน โดยอาจเกิดจากรางหรือยานพาหนะเนื่องจากการยกล้อ โดยทั่วไปสิ่งสำคัญคือการตรวจสอบสถานการณ์การบิดและหมุนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของตู้บรรทุก สติติแสดงร้อยละที่ดีของการตกรางรถบรรทุกเป็นผลมาจากการ การเปลี่ยนแปลงตัดผ่านทางรถไฟโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของตู้รถไฟที่มีจุดศูนย์ถ่วงสูง การหมุนตัวของรถไฟสามารถไปถึงระดับอันตรายได้ และความมั่นคงของหมุนที่ใช้ระหว่างตู้รถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของรถไฟที่มีจุดศูนย์ถ่วงสูง การหมุนตัวของรถไฟสามารถเข้าสู่ระดับอันตรายได้หากตัวต้านทานการหมุนตัวของตัวรถที่ใช้ระหว่างตู้รถไฟ จานกลาง (Center plate) และแถบด้านข้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(sidebars) อยู่ในระดับต่ำ ผลลัพธ์ในกรณีนี้คือการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดการหมุนถ้าความเร็วของยานพาหนะ และความยาวคลื่น ทางรถไฟสร้างการกระตุ้นความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของการหมุนตัวรถไฟ การกำหนดเงื่อนไขของค่าสูงสุดของแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ที่ที่ยานพาหนะสามารถมีความสำคัญ และสามารถกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวได้โดยการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่แบบบิดและหมุน

5 การหมุนรอบแกนและการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Pitch and bounce)

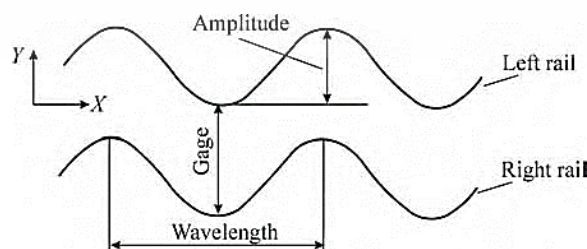
หากทางรถไฟถูกรบกวนในแนวตั้งเนื่องจากการเบี่ยงเบนโปรไฟล์โปรไฟล์ระยะห่างขนาดใหญ่ และการแกว่งกลับของยานพาหนะสามารถสร้างขึ้นได้ การเคลื่อนที่แบบพิทช์ (pitch motion) ถูกกำหนดให้เป็น การหมุนรอบแกนรอบทางรถไฟ ในขณะที่การสะท้อนการตีกลับ (bounce motion) ถูกกำหนดเป็นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของยานพาหนะ หากมีการหน่วงของส่วนรองรับการเคลื่อนที่จะอยู่ในระดับต่ำ ความไม่เสถียรที่ยังคงมีอยู่เป็นเวลานานเกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเบี่ยงเบนของโปรไฟล์ทางรถไฟ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องเลือกพารามิเตอร์ส่วนรองรับเพื่อลดแอมพลิจูดของรูปแบบการสั่นสะเทือนเหล่านี้

6 การส่ายและแกว่ง (Yaw and sway)

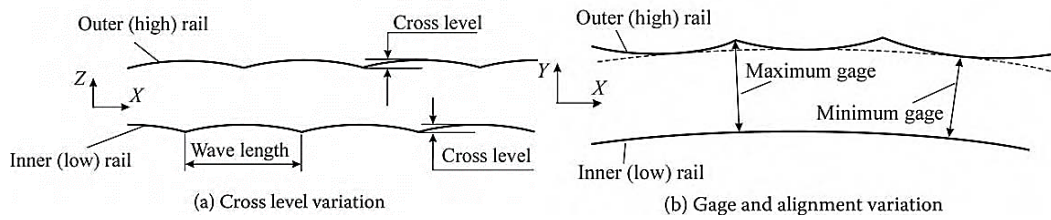
การส่ายและแกว่งไปมาคือการตอบสนองของตัวรถไฟในทิศทางด้านข้าง และแนวตั้งเนื่องจากการรบกวนทางรถไฟ ตัวอย่างเช่นการส่ายไปมาอาจทำให้เกิดสถานการณ์เคลื่อนไหว การเคลื่อนที่ประเภทนี้นำไปสู่การแกว่งสูงหรือแรงกระแทกสูงเมื่อหน้าแปลนล้อสัมผัสกับทางรถไฟ ในกรณีส่วนใหญ่ผลกระทบของสถานการณ์การเคลื่อนไหวนี้สามารถทดสอบได้โดยใช้ทางรถไฟที่คล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 2.33 มันเป็นสิ่งสำคัญที่จะตรวจสอบพฤติกรรมแบบพลศาสตร์นี้เพราะมันเป็นหนึ่งในสิ่งที่พบมากที่สุดของการตกราง

7 การโค้งแบบพลศาสตร์ (Dynamics curving)

ในกรณีนี้การเบี่ยงเบนของโปรไฟล์ และการจัดตำแหน่งสามารถซ้อนทับบนโค้งคงที่เพื่อให้ได้ค่าทางรถไฟที่ต้องการ ค่าที่ยอมรับได้ควรนำไปสู่แรงซึ่งเมื่อต่ำกว่าช่วงที่รับได้ซึ่งเป็นสาเหตุให้ล้อป็นรางไป การจำลองแบบพลศาสตร์จะต้องดำเนินการในช่วงกว้างของความเร็วของยานพาหนะเพื่อทดสอบความเสถียรและตรวจสอบส่วนขาของการยกโค้ง และส่วนเกินของการยกโค้ง รูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นตัวอย่างของทางรถไฟที่สามารถใช้ในการทดสอบสถานการณ์จำลองโค้งได้



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างของทางรถไฟซึ่งสามารถใช้ทดสอบการเคลื่อนที่แบบเบี่ยงและแกว่ง(Example of a track that can be used to test yaw and sway motion) [1]

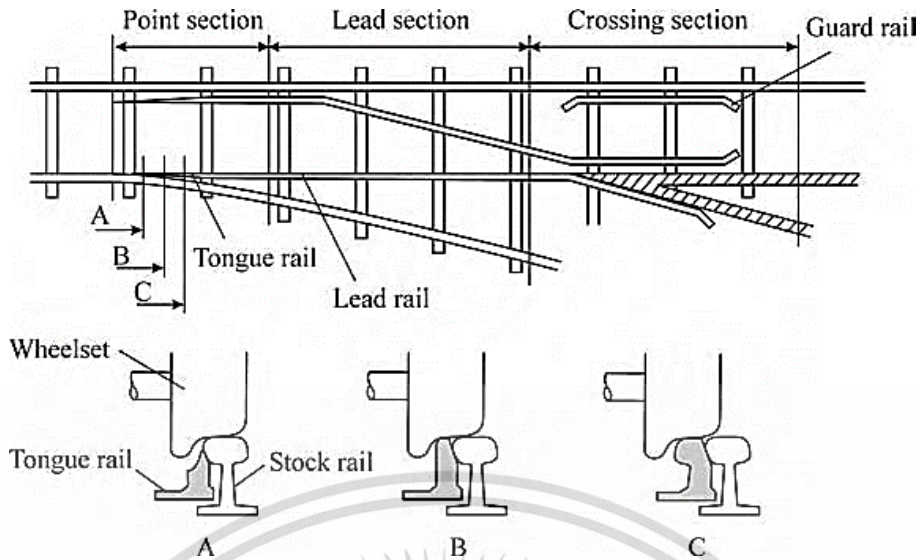


รูปที่ 2.34 ตัวอย่างของทางรถไฟซึ่งสามารถใช้สำหรับการโค้งแบบพลศาสตร์ (example of a track that can be used for dynamics curving) [1]

8 การตอบสนองต่อความไม่ต่อเนื่อง (Response to discontinuities)

ความไม่ต่อเนื่องของทางรถไฟถูกกำหนดให้เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในตำแหน่งรถไฟ ความไม่ต่อเนื่องเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันในความแข็งแรงของทางรถไฟ, แนวที่ไม่ตรงกัน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ตัวค้ำสะพาน และทางแยกของถนนสามารถนำไปสู่ความไม่ต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวหากพวกเขาอยู่ในทิศทางแนวตั้งอาจทำให้เกิดการหมุนรอบแกน และการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของยานพาหนะ หากความไม่ต่อเนื่องอยู่ในทิศทางด้านข้างสามารถสร้างการส่ายและแกว่งไปมา โดยทั่วไปแล้วความไม่ต่อเนื่องนำไปสู่การเกิดแรงดึงดูดของวงสัมผัสและแรงกระตุ้นที่ปกติอาจทำให้เกิดการตกราง

ประแจทางหลัก (turnouts) ใช้เพื่อเปลี่ยนทิศทางการเดินทางของรถไฟซึ่งเป็นหนึ่งในหลาย ๆ ปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ (Kassa et al., 2006; Schupp et al., 2004) โดยทั่วไปประแจทางหลักจะถูกสร้างโดยใช้แผงสวิตช์ (switch panel), แผงควบคุมทางผ่าน (crossing panel) และแผงปิด (Closure panel) ที่เชื่อมต่อแผงสวิตช์กับแผงควบคุมทางผ่านดังแสดงในรูปที่ 2.35 สำหรับรถไฟความเร็วสูงจะมีส่วนหัวที่สามารถส่ายได้ (movable swing nose) (Kono et al., 2005) เนื่องจาก สวิตช์สัมผัสล้อจากรางรถไฟไปยังรางลื่นในแผงสวิตช์และแผงควบคุมทางผ่าน ใช้การสัมผัสล้อรางได้หลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.35 การสัมผัสเหล่านี้ทำให้เกิดแรงกระแทกอย่างรุนแรง นอกจากนี้เมื่อรางลื่นเปลี่ยนรูปร่างไปตามรางล้อก็จะเคลื่อนจากรางลื่นไปยังรางลื่น การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดการรบกวนอย่างมากในการเคลื่อนที่ของล้อกับรางหากลื่นรางไม่ได้อยู่ใกล้กับทางรถไฟมากพออาจเกิดการตกรางได้ การจำลองประแจทางข้ามมักใช้ในการสืบสวนอุบัติเหตุ ในกรณีนี้ต้องใช้วิธีการที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของรางรถไฟว่าเป็นฟังก์ชันของระยะทางตามแนวยาวของราง

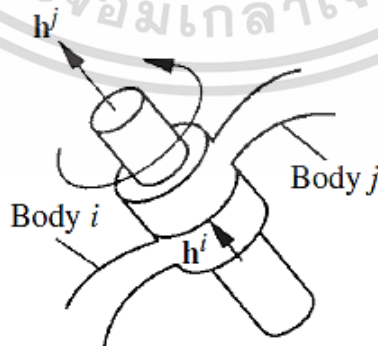


รูปที่ 2.35 ประแจทางหลีกราง (Rail turnout) [1]

2.3.2.10 ข้อต่อหมุน (Revolute joint)

ข้อต่อหมุน เป็นข้อต่อที่มีค่า 1 ค่าองศาอิสระใช้ควบคุมกับการเคลื่อนที่ทางจลศาสตร์ที่ใช้กับกลไก ข้อต่อหมุน ให้ฟังก์ชันการหมุนแกนเดียว (single-axis rotation function) ที่ใช้กับบริเวณส่วนต่าง ๆ อย่างในกรณีนี้เราใช้กับการเชื่อมชิ้นส่วนต่าง ๆ ของรถไฟเข้าด้วยกัน โดยสมการข้อต่อหมุนมี \vec{h}^i คือ เวกเตอร์ที่เขียนบนชิ้นส่วน i ตามแนวแกน \vec{h}^j คือ เวกเตอร์ที่เขียนบนชิ้นส่วน j ตามแนวแกน \vec{s}^{ij} คือ เวกเตอร์จุดที่เชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วน i และ j ส่วน c คือค่าคงที่ และมีทิศทางการหมุนดังรูปที่ 2.36 ให้ใช้สมการ 2.30

$$\begin{aligned} \vec{h}^i \times \vec{h}^j &= 0 \\ \vec{h}^i \times \vec{s}^{ij} &= 0 \\ \vec{s}^{ij} \cdot \vec{s}^{ij} &= c \end{aligned} \quad (2.30)$$



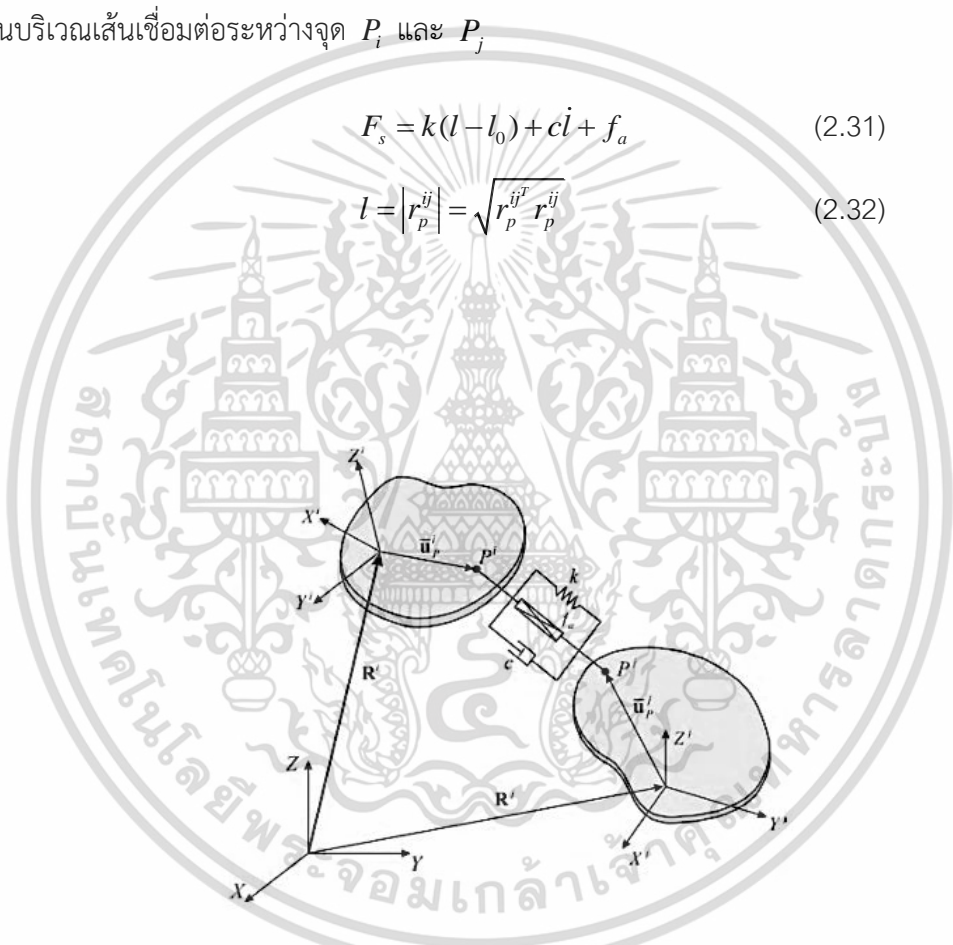
รูปที่ 2.36 แสดงทิศทางของเวกเตอร์ในข้อต่อหมุน [1]

2.3.2.11 องค์ประกอบการเลื่อนตำแหน่งของสปริง ตัวหน่วง และ ตัวขับเคลื่อน (Translational spring-damper-actuator element)

องค์ประกอบนี้ประกอบด้วยสปริง แดมเปอร์ และตัวขับเคลื่อน ดังรูปที่ 2.37 สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดองค์ประกอบนี้เพื่อกำหนดแรงสามารถเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นของการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับความเร็วของวัตถุทั้งสองที่เชื่อมต่อกันด้วยองค์ประกอบนี้ โดยสมการที่ (2.31) และ (2.32) มีตัวแปรดังนี้ F_s คือ แรงในสปริง k คือ ค่าคงที่สปริง c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง l_0 คือ ความยาวสปริงก่อนการเสียรูป l คือ ความยาวของสปริงหลังการเสียรูป r_p^{ij} คือ i คือ อนุพันธ์ของเวลา และ f_a คือ แรงของตัวขับเคลื่อนในบริเวณเส้นเชื่อมต่อบริเวณจุด P_i และ P_j

$$F_s = k(l - l_0) + cl + f_a \quad (2.31)$$

$$l = |r_p^{ij}| = \sqrt{r_p^{i'j'} r_p^{i'j'}} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.37 องค์ประกอบการเลื่อนตำแหน่งของสปริง ตัวหน่วง และตัวขับเคลื่อน(Translational spring-damper-actuator element) [1]

2.3.2.12 ส่วนประกอบของสปริงและตัวหน่วง (Spring-damping element)

ส่วนประกอบสปริงและตัวหน่วงนั้นใช้กันอย่างแพร่หลายในการใช้งานกับระบบยานพาหนะทางรถไฟ ในส่วนนี้สปริงและตัวหน่วงเชื่อมต่อเป็นอนุกรม เนื่องจากตำแหน่งและความเร็วของจุดสิ้นสุดขององค์ประกอบสปริงและตัวหน่วงเป็นฟังก์ชันของพิกัดทั่วไปและความเร็วของวัตถุทั้งสองที่เชื่อมต่อกันด้วยองค์ประกอบนี้

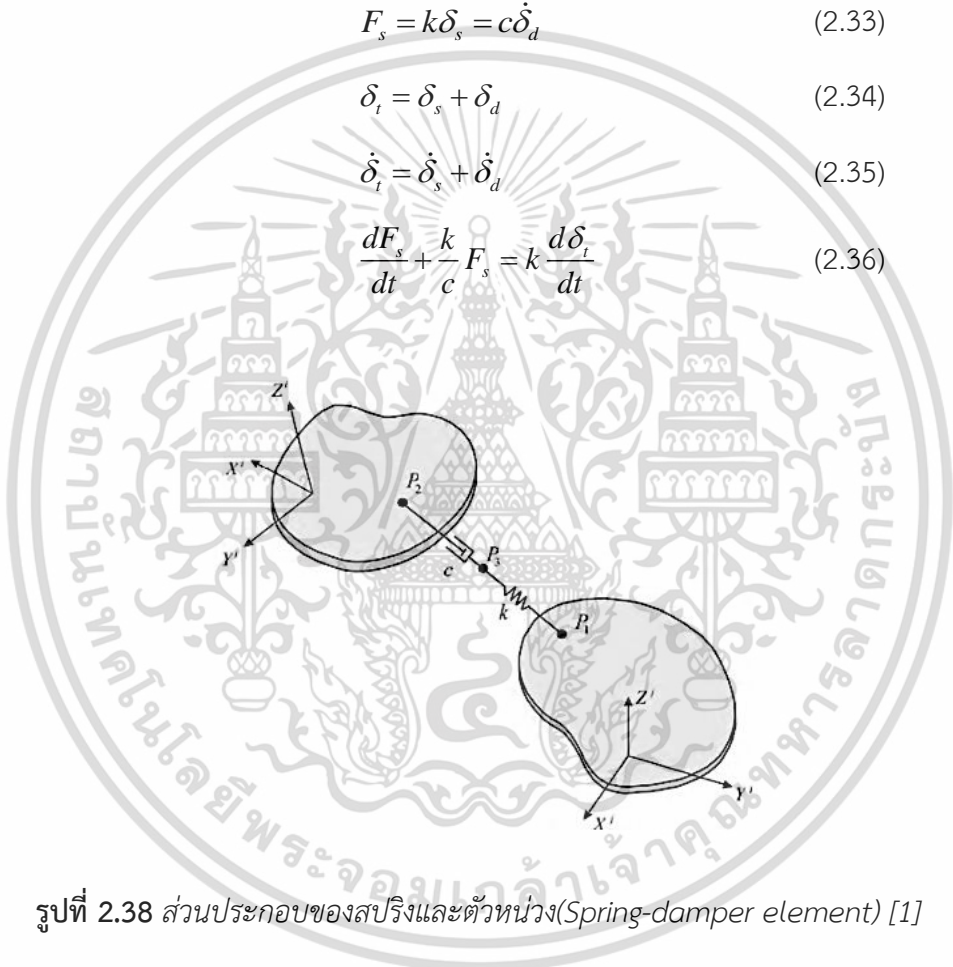
สามารถรับได้ในการเชื่อมต่อเพื่อตรวจสอบแรงสปริง หลังจากทำตามขั้นตอนที่คล้ายกับที่ใช้สำหรับชิ้นส่วนสปริง – ตัวหน่วง – ตัวขับเคลื่อน กับแรงทั่วไปที่เกิดขึ้นเนื่องจากสปริงและตัวหน่วง ดังรูปที่ 2.38 จะสามารถกำหนดได้ โดยสมการที่ (2.33) (2.34) (2.35) และ (2.36) มีตัวแปรดังนี้ δ_t คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์โดยรวมระหว่างจุดปลายทั้งสองจุด P_1 และ P_2 ขององค์ประกอบสปริงและตัวหน่วง δ_s คือ การเสียรูปในสปริง δ_d คือ การเสียรูปในตัวหน่วง $\dot{\delta}_t$ คือ ความเร็วการเคลื่อนที่สัมพัทธ์โดยรวมระหว่างจุดปลายทั้งสองจุด P_1 และ P_2 ขององค์ประกอบสปริงและตัวหน่วง $\dot{\delta}_s$ คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างจุดสองจุดของสปริง ที่จุด P_1 และ $\dot{\delta}_d$ คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างจุดสองจุดของตัวหน่วง ที่จุด P_1 และ P_2

$$F_s = k\delta_s = c\dot{\delta}_d \quad (2.33)$$

$$\delta_t = \delta_s + \delta_d \quad (2.34)$$

$$\dot{\delta}_t = \dot{\delta}_s + \dot{\delta}_d \quad (2.35)$$

$$\frac{dF_s}{dt} + \frac{k}{c}F_s = k\frac{d\delta_t}{dt} \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.38 ส่วนประกอบของสปริงและตัวหน่วง(Spring-damper element) [1]

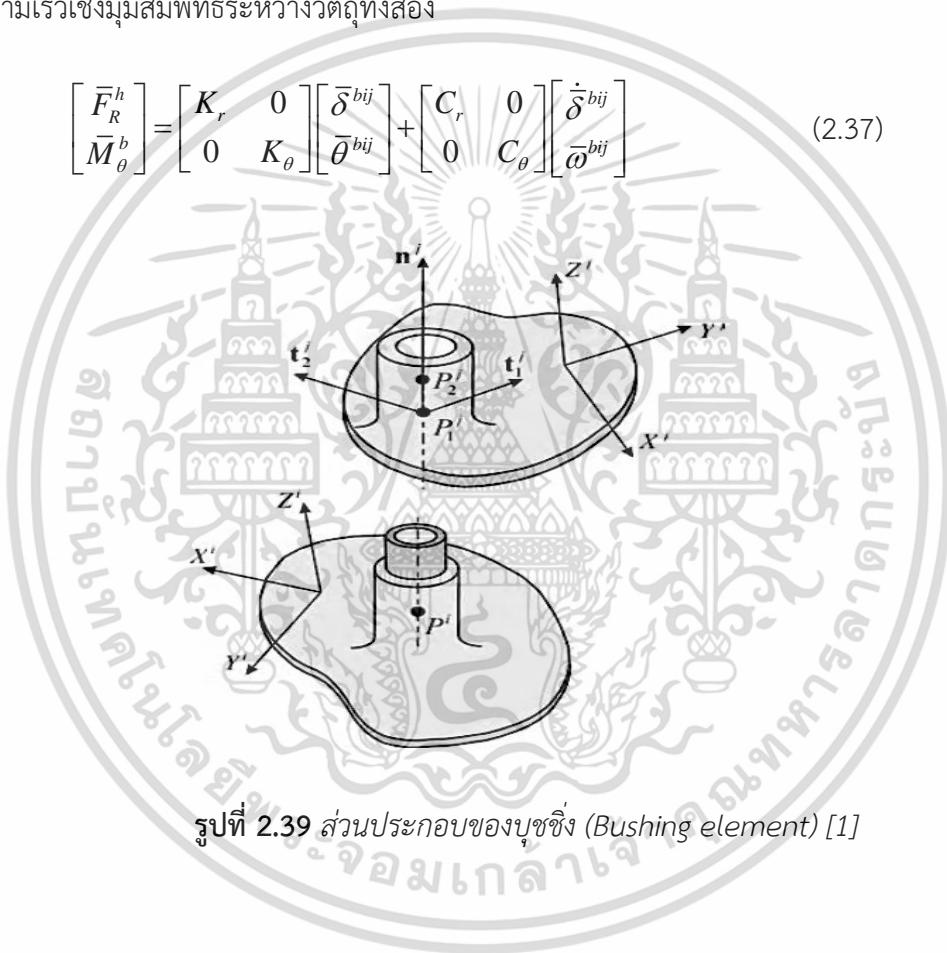
2.3.2.13 ส่วนประกอบของบุชชิ่ง (Bushing element)

โดยทั่วไปจะใช้องค์ประกอบของบุชชิ่ง ในการใช้งานกับยานพาหนะรวมถึงยานพาหนะรถไฟ ในการใช้งานส่วนใหญ่องค์ประกอบของบุชชิ่งทำจากยาง ซึ่งสร้างความแข็ง และแรงหน่วงในทิศทางต่าง ๆ ในสูตรที่นำเสนอในส่วนนี้สันนิษฐานว่าองค์ประกอบบุชชิ่ง สามารถมีค่าที่แตกต่างกันของความแข็งเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงในทิศทางที่แตกต่างกัน ในโมเดลที่พัฒนาขึ้นในส่วนนี้จะมีการแนะนำระบบพิกัดบุชชิ่งที่สมมุติยึดติดอย่างแน่นหนากับหนึ่งในหน่วยของงานที่เชื่อมต่อกันด้วยองค์ประกอบบุชชิ่งดังรูปที่ 2.39 ระบบ

พิกัดนี้สามารถกำหนดได้ในการกำหนดค่าเริ่มต้น ตำแหน่งของสองจุดบนชิ้นส่วน ความแข็งของบุช และค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง มักถูกกำหนดโดยใช้การทดสอบด้วยประสบการณ์และค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ถูกกำหนดโดยทั่วไประบบในพิกัดของบุช ในสูตรมัลติบอร์ดี สัมประสิทธิ์การบุชจะถูกกำหนดโดยใช้เมทริกซ์ความแข็งและการหน่วง

โดยสมการที่ (2.37) มีตัวแปรดังนี้ \bar{F}_R^b คือ \bar{M}_θ^b คือ K_r คือ ค่าคงที่ความแข็งเกร็ง K_θ คือ เมตริกซ์ตัวหน่วง C_r คือ ค่าคงที่ความหน่วง C_θ คือ เมตริกซ์ความหน่วง $\bar{\delta}^{bij}$ คือการเสีรูปของบุชซึ่ง $\dot{\delta}^{bij}$ คือเวกเตอร์อัตราการเสีรูปแบบบุชซึ่ง $\bar{\theta}^{bij}$ คือ เวกเตอร์การหมุนสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุทั้งสอง และ $\bar{\omega}^{bij}$ คือเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุทั้งสอง

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_R^b \\ \bar{M}_\theta^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_r & 0 \\ 0 & K_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}^{bij} \\ \bar{\theta}^{bij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_r & 0 \\ 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta}^{bij} \\ \dot{\omega}^{bij} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$



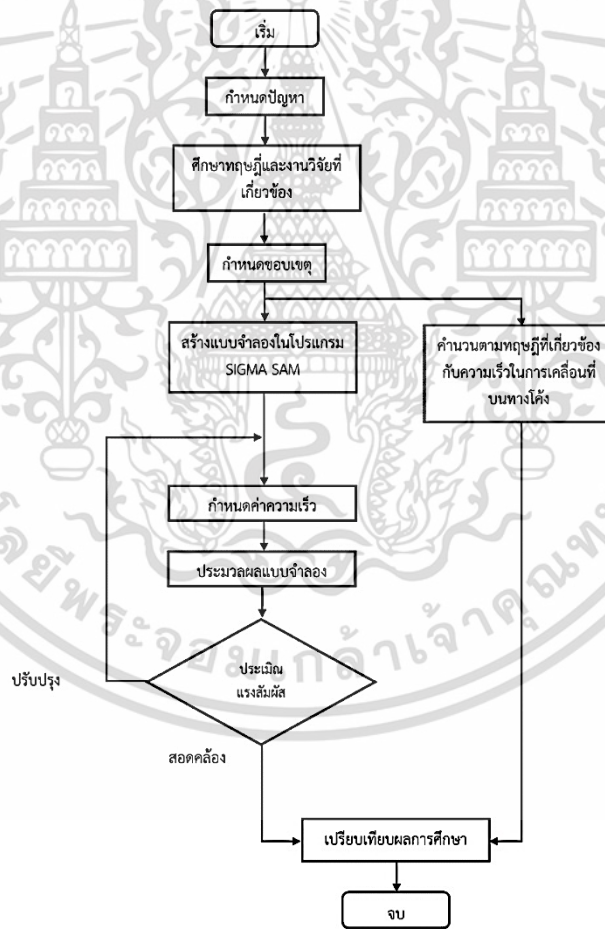
รูปที่ 2.39 ส่วนประกอบของบุชซึ่ง (Bushing element) [1]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีในการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสารหลังจากที่ได้กำหนดขอบเขตในการศึกษาแล้ว เริ่มจากการสร้างแบบจำลองรถโดยสารในโปรแกรม SIGMA SAMS และป้อนข้อมูลค่าสมบัติทางกลในส่วน of โครงสร้างและระบบกันสะเทือนให้กับแบบจำลองรถโดยสารเป็นข้อมูลเริ่มต้นการจำลอง หลังจากทำการประมวลผลการจำลองตามค่าความเร็ว และขอบเขตการศึกษาที่ได้กำหนดจนได้ผลลัพธ์เป็นค่าแรงสัมผัสซึ่งจะถูกนำไปประเมินหรือปรับปรุงค่าความเร็วของแบบจำลองรถโดยสารจนได้ค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสาร



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิของวิธีการดำเนินงาน

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์หาค่าความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งออกมา จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งเช่นเดียวกันเพื่อประเมินถึงความแม่นยำ ดังรูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิของปริญญาานิพนธ์

3.2 แบบจำลองรถโดยสาร

โดยข้อมูลทางกลของส่วนประกอบอยู่ภายในรถโดยสารทั้งโครงสร้างและระบบกันสะเทือนจะถูกอ้างอิงมาจากรถโดยสาร CNR (China CNR Corporation Limited) ที่ถูกใช้งานโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยจากศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มวลของรถโดยสารมีผลต่อการเคลื่อนที่และการหาความเร็ว จึงเลือกตัวรถไฟฟ้าม้าราง CCK311 ซึ่งเป็นหนึ่งในรถโดยสารที่หนักที่สุดในการศึกษาครั้งนี้

3.2.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองรถโดยสาร

รถโดยสารที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยโครงสร้างได้แก่ ตัวรถ โบกี้ และชุดล้อโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนจะถูกรองรับด้วยระบบกันสะเทือนที่ถูกเชื่อมเข้าด้วยกัน โดยชิ้นส่วนของโครงสร้างและระบบกันสะเทือนจะมีค่าคุณสมบัติเชิงกลถูกใช้เป็นข้อมูลในการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสาร

3.2.1.1 ตัวรถของแบบจำลองรถโดยสาร

ตัวรถ เป็นโครงสร้างส่วนบนที่ทำหน้าที่รองรับผู้โดยสาร พนักงาน สินค้า และอุปกรณ์ในขณะที่มีการให้บริการในเส้นทางรถไฟ

3.2.1.2 โบกี้ของแบบจำลองรถโดยสาร

โบกี้ เป็นโครงสร้างที่รองรับและถ่ายเทน้ำหนักจากตัวรถลงสู่ชุดล้อ และทำหน้าที่เป็นสนับสนุนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟให้มีความเสถียรและปลอดภัย

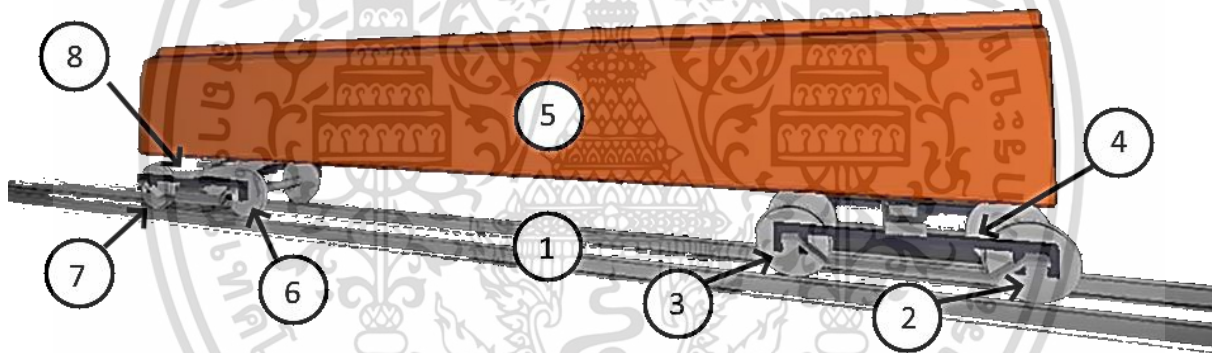
3.2.1.3 ชุดล้อของแบบจำลองรถโดยสาร

ชุดล้อ เป็นโครงสร้างเพลาล้อที่สัมผัสและหมุนเคลื่อนที่บนรางรถไฟ รองรับและถ่ายเทน้ำหนักจตัวรถลงไปที่แคร่แล้วไปสู่ราง

โดยชิ้นส่วนโครงสร้างตามที่กล่าวมาของรถโดยสารสามารถแจกแจง และแสดงออกมาได้ดังตารางที่ 3.1 และดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3-1 แสดงโครงสร้างและหมายเลขภายในรถโดยสาร

หมายเลขโครงสร้าง	รายการโครงสร้าง
1	ราง
2	ชุดล้อที่ 1
3	ชุดล้อที่ 2
4	โบกี้ที่ 1
5	ตัวรถ
6	ชุดล้อที่ 3
7	ชุดล้อที่ 4
8	โบกี้ที่ 2



รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างรถโดยสารอย่างง่าย

4. ระบบกันสะเทือนของแบบจำลองรถโดยสาร

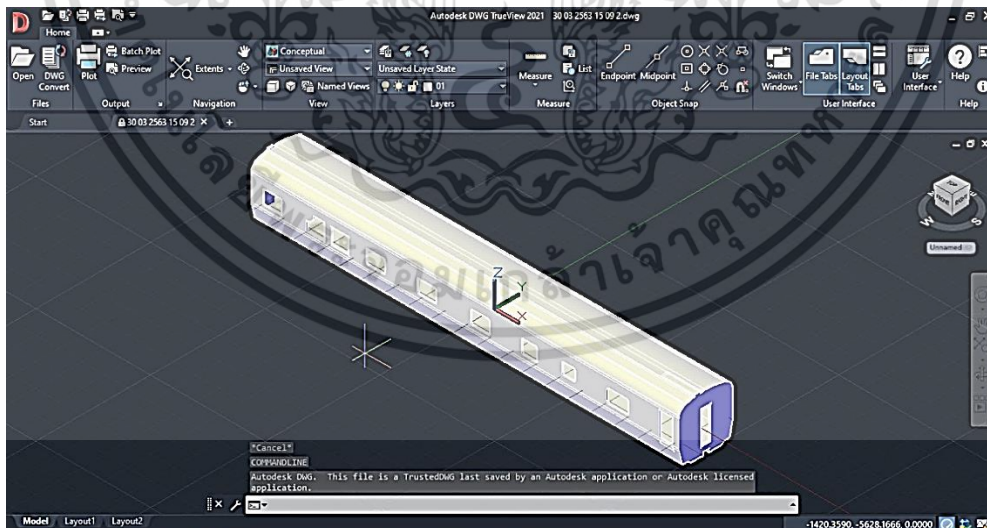
ระบบกันสะเทือน เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อรองรับโครงสร้างระหว่างตัวรถ โบกี้ และชุดล้อรองรับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ ภายในระบบกันสะเทือนของแบบจำลองรถโดยสารแต่ละชิ้นจะมีความเป็นสปริงหรือมีความหน่วงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของระบบกันสะเทือน

รายการระบบกันสะเทือน	ความเป็นสปริง	ความหน่วง
Primary steel / rubber spring	✓	
Primary vertical damper		✓
Secondary air spring	✓	✓
Secondary lateral damper		✓
Axle box arm	✓	
Traction rod	✓	
Anti-Roll bar	✓	
Secondary yaw damper		✓

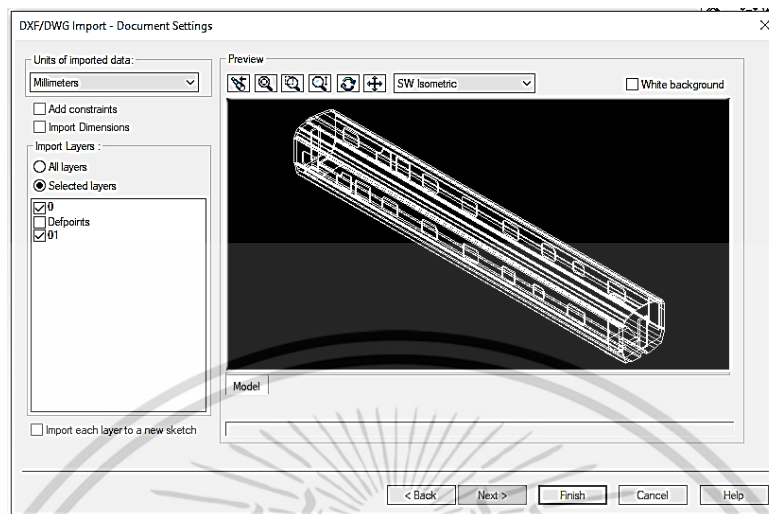
3.2.2 การสร้างแบบจำลองสามมิติหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของตัวรถ

ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวรถเริ่มจากการสร้างแบบจำลองสามมิติขึ้นมาด้วยโปรแกรม AutoCAD เป็นแบบจำลองรถโดยสารในส่วนของโครงสร้างขึ้นมา ดังรูปที่ 3.3 โดยกำหนดให้ แกน x เป็นแนวตามยาว แกน y เป็นแนวด้านข้าง และแกน z เป็นแนวความสูงของของตัวรถตามลำดับ สอดคล้องกับข้อมูลที่เกี่ยวข้องภายในโครงสร้างและระบบกันสะเทือนอื่น ๆ ของรถโดยสาร เช่นความยาว และโมเมนต์ความเฉื่อย เป็นต้น



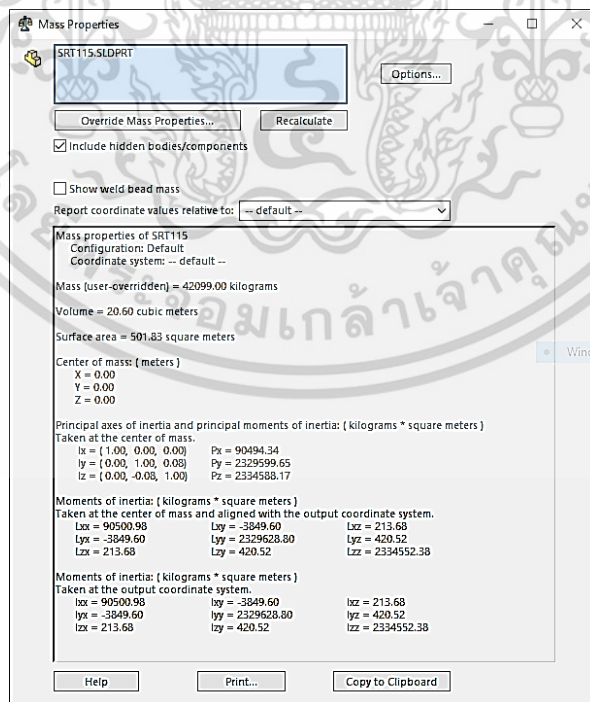
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงแบบจำลองสามมิติจากโปรแกรม AutoCAD

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองสามมิติจากโปรแกรม AutoCAD เสร็จสิ้นแล้ว จึงนำแบบจำลองดังกล่าว
 นำเข้าสู่โปรแกรม Solid Work ดังรูปที่ 3.4 เพื่อนำแบบจำลองสามมิติดังกล่าวไปหาโมเมนต์ความเฉื่อยต่อไป



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการนำเข้าแบบจำลองสามมิติเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks

หลังจากนำแบบจำลองสามมิติในส่วนของผู้เข้าสู่โปรแกรม SolidWorks แล้ว โปรแกรมมี
 ความสามารถในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยโดยมีจุดอ้างอิงอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลโดยใช้ความสามารถของสมบัติ
 เชิงมวลดังรูปที่ 3.5 หลังจากที่กำหนดมวลของตัวรถ แล้วโปรแกรมก็จะทำการวิเคราะห์และแสดงค่าโมเมนต์
 ความเฉื่อยออกมา



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงค่าโมเมนต์ความเฉื่อยโดยได้จากสมบัติเชิงมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 53
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ การประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสารด้วยวิธีพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีได้ถูกดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SIGMA SAMS โดยการสร้างแบบจำลองและป้อนข้อมูลของรถโดยสารเข้าสู่โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์แรงสัมผัสเพื่อหาหาค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสาร

3.3.1 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SIGMA SAMS

ในโปรแกรม SIGMA SAMS เพื่อในการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสาร จำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองรถโดยสารเพื่อป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม ทุกชิ้นส่วนที่อยู่ในแบบจำลองรถโดยสารทั้งโครงสร้าง และระบบกันสะเทือนจะต้องกำหนดค่าสมบัติทางกลเพื่อเป็นข้อมูลให้กับแบบจำลองของรถโดยสาร โดยข้อมูลที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ในแต่ละชิ้นส่วนสามารถถูกแบ่งออกได้เป็นแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

- มวลและโมเมนต์ความเฉื่อย (Masses and mass moments of inertia of the bodies)
- พิกัดเริ่มต้น (Initial coordinates)
- ความเร็วเริ่มต้น (Initial velocities)
- แรงคงที่ที่กระทำกับชิ้นส่วน (Constant forces acting on the bodies)
- แกนข้อต่อแบบหมุน (Revolute Pin Joint)
- ส่วนประกอบของบุชชิ่ง (Bushing Elements)
- ส่วนประกอบของแบริ่ง (Bearing Elements)

3.3.1.1. มวลและโมเมนต์ความเฉื่อย

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยค่ามวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้างภายในแบบจำลองรถโดยสารดังตารางที่ 3-3 ในส่วนของโมเมนต์ความเฉื่อยสามารถจำแนกได้เป็น I_{XX} , I_{YY} , และ I_{ZZ} ตามทิศทางของการหมุนตัวของวัตถุรอบแกน X, Y, และ Z ตามลำดับ

ตารางที่ 3-3 แสดงค่าสมบัติทางกลมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้าง

หมายเลข โครงสร้าง	รายการโครงสร้าง	มวล kg	โมเมนต์ความเฉื่อย		
			I_{xx} (kg-m ²)	I_{yy} (kg-m ²)	I_{zz} (kg-m ²)
1	ราง	-	-	-	-
2	ชุดล้อที่ 1	1200	294	88	294
3	ชุดล้อที่ 2	1200	294	88	294
4	โบกี้ที่ 1	1666	719	919	1555
5	ตัวรถ	42099	90500*	2334552*	2329629*
6	ชุดล้อที่ 3	1200	294	88	294
7	ชุดล้อที่ 4	1200	294	88	294
8	โบกี้ที่ 2	1666	719	919	1555

* โมเมนต์ความเฉื่อยของตัวรถได้มาจากการสร้างแบบจำลองสามมิติในหัวข้อ 3.2.2

3.3.1.2 พิกัดเริ่มต้น

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยพิกัดตำแหน่งของโครงสร้างภายในแบบจำลองรถโดยสารดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 แสดงค่าพิกัดตำแหน่งของโครงสร้างโดยยึดตามตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล

หมายเลขโครงสร้าง	รายการโครงสร้าง	พิกัดตำแหน่ง (mm)		
		X	Y	Z
1	ราง	-	-	-
2	ชุดล้อที่ 1	0	0	423.9
3	ชุดล้อที่ 2	2300	0	423.9
4	โบกี้ที่ 1	1150	0	581
5	ตัวรถ	9350	0	1712
6	ชุดล้อที่ 3	16400	0	423.9
7	ชุดล้อที่ 4	18700	0	423.9
8	โบกี้ที่ 2	17550	0	581

3.3.1.3 ความเร็วเริ่มต้น

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยความเร็วของชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเคลื่อนที่เป็นความเร็วเป็นเชิงเส้น และ โครงสร้างล้อที่หมุนตัวเคลื่อนที่มีความเร็วเป็นเชิงมุมภายในแบบจำลองรถโดยสาร ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถโดยสารจะต้องกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นให้กับแบบจำลองก่อนที่จะนำแรงสัมผัสซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการจำลองประเมินความเร็วดังตัวอย่างตารางที่ 3-5 ที่กำหนดให้ความเร็วของแบบจำลองรถโดยสารอยู่ที่ 10 m/s ซึ่งชิ้นส่วนของรถโดยจะมีความเร็วเชิงเส้นอยู่ที่ 10 m/s เช่นเดียวกันและล้อที่มีการหมุนตัวเคลื่อนที่จะมีความเร็วเชิงมุม 23.59 rad/s สัมพันธ์กับขนาดของล้อที่เคลื่อนที่อยู่บนราง

ตารางที่ 3-5 แสดงค่าความเร็วของชิ้นส่วนโครงสร้างเมื่อกำหนดให้แบบจำลองมีความเร็ว 10 m/s

หมายเลขโครงสร้าง	รายการโครงสร้าง	ความเร็ว	
		V_x (m/s)	ω_x (rad/s)
1	ราง	0	0
2	ชุดล้อที่ 1	10	23.59
3	ชุดล้อที่ 2	10	23.59
4	โบกี้ที่ 1	10	0
5	ตัวรถ	10	0
6	ชุดล้อที่ 3	10	23.59
7	ชุดล้อที่ 4	10	23.59
8	โบกี้ที่ 2	10	0

3.3.1.4 แรงคงที่ที่กระทำกับชิ้นส่วน

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยแรงคงที่ที่กระทำกับโครงสร้างภายในแบบจำลองรถโดยสารโดยกำหนดให้โครงสร้างทุกชิ้นมีแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับวัตถุทำให้เกิดแรงน้ำหนักในตัวของมันเองดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 แสดงแรงคงที่ที่กระทำกับโครงสร้าง

หมายเลขโครงสร้าง	รายการโครงสร้าง	แรงคงที่
		F_z (N)
1	ราง	0
2	ชุดล้อที่ 1	-11772
3	ชุดล้อที่ 2	-11772
4	โบกี้ที่ 1	-16343
5	ตัวรถ	-412108
6	ชุดล้อที่ 3	-11772
7	ชุดล้อที่ 4	-11772
8	โบกี้ที่ 2	-16343

3.3.1.5 แขนข้อต่อแบบหมุน

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่ถูกเชื่อมโดยข้อต่อหมุนและทิศทางของแกนข้อต่อภายในแบบจำลองรถโดยสารดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างที่ถูกเชื่อมโดยข้อต่อหมุนและทิศทางของแกนข้อต่อ

หมายเลข	ชิ้นส่วนโครงสร้างที่เชื่อมต่อ		ทิศทางของแกนข้อต่อ
	i	j	
1	4	5	Z
2	8	5	Z

3.3.1.6 ส่วนประกอบของบushing

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่ถูกรองรับโดยระบบกันสะเทือน ค่าความเป็นสปริง และค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนภายในแบบจำลองรถโดยสารดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 แสดงโครงสร้างที่ถูกรองรับ, ค่าความเป็นสปริง, และค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือน

หมายเลข	ระบบกันสะเทือน	การเชื่อมต่อ	ค่าความเป็นสปริง	ค่าความหน่วง
1	Primary Spring	Body i = 2 Body j = 4	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
2	Primary Spring	Body i = 3 Body j = 4	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
3	Primary Spring	Body i = 2 Body j = 4	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
4	Primary Spring	Body i = 3 Body j = 4	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
5	Primary Damper	Body i = 2 Body j = 4		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
6	Primary Damper	Body i = 3 Body j = 4		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
7	Primary Damper	Body i = 2 Body j = 4		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
8	Primary Damper	Body i = 3 Body j = 4		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
9	Air Spring	Body i = 4 Body j = 5	$K_y = 205,000 \text{ N/m}$ $K_z = 489,000 \text{ N/m}$	$C_z = 60,000 \text{ N-s/m}$
10	Air Spring	Body i = 4 Body j = 5	$K_y = 205,000 \text{ N/m}$ $K_z = 489,000 \text{ N/m}$	$C_z = 60,000 \text{ N-s/m}$
11	Lateral Damper	Body i = 4 Body j = 5		$C_z = 25,000 \text{ N-s/m}$
12	Lateral Damper	Body i = 4 Body j = 5		$C_z = 25,000 \text{ N-s/m}$

หมายเลข	ระบบกันสะเทือน	การเชื่อมต่อ	ค่าความเป็นสปริง	ค่าความหน่วง
13	Anti-roll Bar	Body i = 4 Body j = 5	$K_{yy} = 1,500,000 \text{ N-m/rad}$	
14	Anti-roll Bar	Body i = 4 Body j = 5	$K_{yy} = 1,500,000 \text{ N-m/rad}$	
15	Axis Box	Body i = 2 Body j = 4	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
16	Axis Box	Body i = 3 Body j = 4	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
17	Axis Box	Body i = 2 Body j = 4	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
18	Axis Box	Body i = 3 Body j = 4	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
19	Traction Rod	Body i = 4 Body j = 5	$K_x = 11,500,000 \text{ N/m}$ $K_{yy} = 3,570 \text{ N-m/rad}$	
20	Yaw Damper	Body i = 4 Body j = 5		$C_z = 250,000 \text{ N-s/m}$
21	Primary Damper	Body i = 4 Body j = 5		$C_z = 250,000 \text{ N-s/m}$
22	Primary Spring	Body i = 6 Body j = 8	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
23	Primary Spring	Body i = 7 Body j = 8	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
24	Primary Spring	Body i = 6 Body j = 8	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	
25	Primary Spring	Body i = 7 Body j = 8	$K_y = 528,166 \text{ N/m}$ $K_z = 921,455 \text{ N/m}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 59
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข	ระบบกันสะเทือน	การเชื่อมต่อ	ค่าความเป็นสปริง	ค่าความหน่วง
26	Primary Damper	Body i = 6 Body j = 8		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
27	Primary Damper	Body i = 7 Body j = 8		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
28	Primary Damper	Body i = 6 Body j = 8		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
29	Primary Damper	Body i = 7 Body j = 8		$C_z = 15,000 \text{ N-s/m}$
30	Air Spring	Body i = 8 Body j = 5	$K_y = 205,000 \text{ N/m}$ $K_z = 489,000 \text{ N/m}$	$C_z = 60,000 \text{ N-s/m}$
31	Air Spring	Body i = 8 Body j = 5	$K_y = 205,000 \text{ N/m}$ $K_z = 489,000 \text{ N/m}$	$C_z = 60,000 \text{ N-s/m}$
32	Lateral Damper	Body i = 8 Body j = 5		$C_z = 25,000 \text{ N-s/m}$
33	Lateral Damper	Body i = 8 Body j = 5		$C_z = 25,000 \text{ N-s/m}$
34	Anti-roll Bar	Body i = 8 Body j = 5	$K_{yy} = 1,500,000 \text{ N-m/rad}$	
35	Anti-roll Bar	Body i = 8 Body j = 5	$K_{yy} = 1,500,000 \text{ N-m/rad}$	
36	Axis Box	Body i = 6 Body j = 8	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
37	Axis Box	Body i = 7 Body j = 8	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
38	Axis Box	Body i = 6 Body j = 8	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข	ระบบกันสะเทือน	การเชื่อมต่อ	ค่าความเป็นสปริง	ค่าความหน่วง
39	Axis Box	Body i = 7 Body j = 8	$K_x = 10,000,000 \text{ N/m}$ $K_y = 5,000,000 \text{ N/m}$ $K_z = 10,000,000 \text{ N/m}$	
40	Traction Rod	Body i = 8 Body j = 5	$K_x = 11,500,000 \text{ N/m}$ $K_{yy} = 3,570 \text{ N-m/rad}$	
41	Yaw Damper	Body i = 8 Body j = 5		$C_z = 250,000 \text{ N-s/m}$
42	Primary Damper	Body i = 8 Body j = 5		$C_z = 250,000 \text{ N-s/m}$

3.3.1.7 ส่วนประกอบของแบริ่ง

เป็นส่วนที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่ถูกรองรับโดยแบริ่ง ค่าความเป็นสปริงและความหน่วงของแบริ่งภายในแบบจำลองรถโดยสารดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 โครงสร้างที่ถูกรองรับโดยแบริ่ง ค่าความเป็นสปริงและความหน่วงของแบริ่ง

ค่าความเป็นสปริง	17,500,000 N/m	
ค่าความหน่วง	175,000 N-s/m	
หมายเลข	ชิ้นส่วนโครงสร้างที่เชื่อมต่อ	
	i	j
1	2	4
2	3	2
3	6	8
4	7	8

ข้อมูลตามที่กล่าวมาแต่ละส่วนจะถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรม SIGMA SAMS ด้วยนามสกุลไฟล์ *.sam ตามรูปแบบที่กำหนดของโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปดังรูปที่ 3.6 เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินการจะป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม Excel ก่อนโดยจัดรูปแบบให้ตรงกับรูปแบบไฟล์ข้อมูลของโปรแกรม SIGMA SAMS ก่อนจะป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมด้วยนามสกุลไฟล์ *.sam ตามลำดับ

```

File4_SRT115_05_04_63 - Notepad
File Edit Format View Help
-----
19      2
Revolute-(Pin)-Joints
Frame 1 BodyCar
1      4
0      0      5      0      0
0      0      0      0      0
0      0      0.2      0      0      -0.2
Revolute-(Pin)-Joints
Bolster 1
2      8      5      0      0
0      0      0      0      0
0      0      0.2      0      0      -0.2
-----
42      42
Bushling-Elements
Primary spring Bogie 1 1
1      2      4
0      0.7875      0.15      -1.15      0.7875      0.2645      0      0      0      0      0      0
0      528166      921455      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
Primary spring Bogie 1 2
2      4      0
0      0.7875      0.15      -1.15      0.7875      0.2645      0      0      0      0      0      0
0      528166      921455      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
Primary spring Bogie 1 3
3      4      0
0      -0.7875      0.15      -1.15      -0.7875      0.2645      0      0      0      0      0      0
0      528166      921455      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
Primary spring Bogie 1 4
4

```

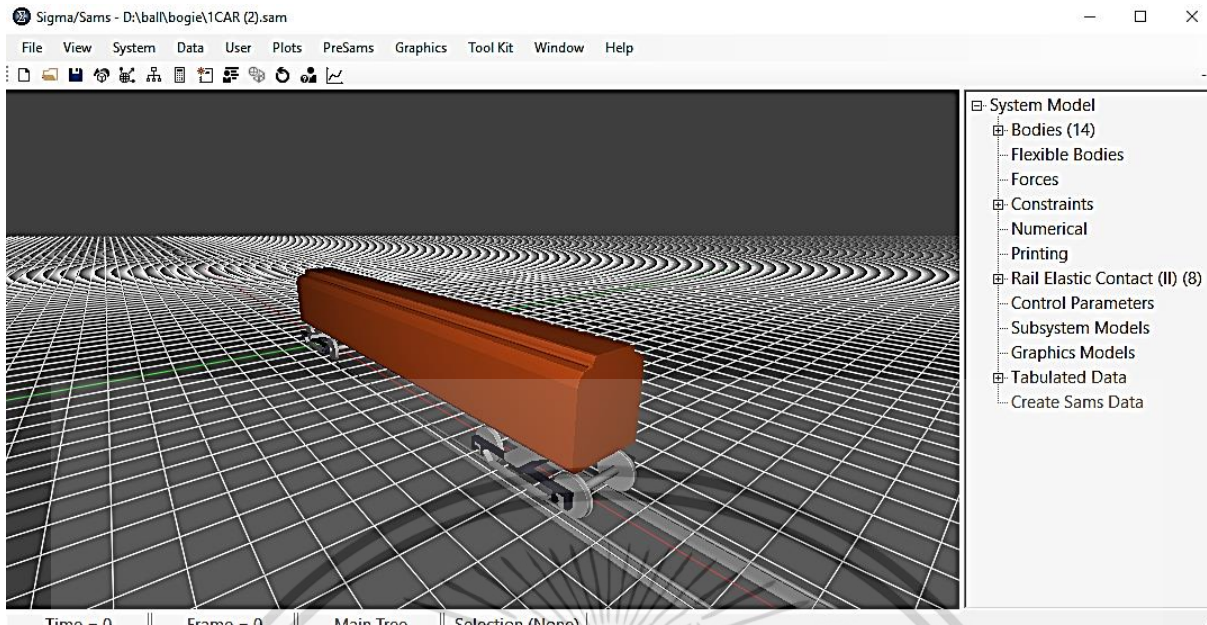
รูปที่ 3.6 ภาพแสดงไฟล์ *.sam ถูกเปิดด้วยโปรแกรม Notepad

3.3.2 การกำหนดค่าความเร็วของแบบจำลองรถโดยสาร

เพื่อประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสาร จึงมีการกำหนดความเร็วของแบบจำลองรถโดยสารในส่วนของค่าความเร็วเริ่มต้นที่จะกำหนดความเร็วเชิงเส้นของโครงสร้างและความเร็วเชิงมุมของล้อในหัวข้อที่ 3.3.1 โดยความเร็วของโครงสร้างและล้อนั้นจะต้องมีความสัมพันธ์กัน โดยค่าความเร็วของแบบจำลองรถโดยสารจะถูกปรับปรุงตามค่าแรงสัมผัสที่ได้จากการจำลองและประเมินจนได้ค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสาร

3.3.3 การประมวลผลการจำลอง

หลังจากข้อมูลพร้อมที่จะถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรม SIGMA SAMS แล้ว กระบวนการประมวลผลจะเริ่มต้นขึ้นโดยการเรียกไฟล์ของแบบจำลองรถโดยสาร *.sam และดำเนินการประมวลผลดังรูปที่ 3.7 โดยกระบวนการประมวลผลจะใช้เวลาประมวลประมาณ 6 ชั่วโมงต่อหนึ่งขอบเขตและค่าความเร็วที่ถูกกำหนดตามความซับซ้อนของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ได้กำหนด



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการจำลองของโปรแกรม SIGMA SAMS

3.3.4 การแสดงผลการจำลอง

ผลที่ได้จากการจำลองภายหลังการประมวลผลของโปรแกรม SIGMA SAMS ที่เสร็จสิ้นลง ผลลัพธ์ที่ได้จะปรากฏอยู่ที่หน้าโปรแกรมเป็นค่าแรงสัมผัสที่ได้จากการกำหนดขอบเขตและค่าความเร็วที่ถูกกำหนดตั้งรูปที่ 3.7 ในการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสารจะพิจารณาจากค่าแรงสัมผัสที่ได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของแบบจำลองของรถโดยสารและเริ่มต้นทำการจำลองใหม่อีกครั้งจนได้ค่าแรงสัมผัสที่แสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสาร

3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

3.4.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

เพื่อพิสูจน์ถึงความถูกต้องของการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมวลติบอร์ดีด้วยโปรแกรม SIGMA SAMS โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งโดยอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งหาค่าความเร็วสูงสุดจากหัวข้อที่ 2.3.2 เช่นเดียวกันและใช้โปรแกรม Microsoft Excel ช่วยในการวิเคราะห์

3.4.1.1 ข้อมูลโค้งและรายละเอียดของทางในทางโค้ง

โดยข้อมูลของทางโค้งจะถูกอ้างอิงมาจากบัญชีข้อมูลโค้งและรายละเอียดของทางในทางโค้งของกองบำรุงทางเขตลำปางดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางรถไฟสายเหนือของการรถไฟแห่งประเทศไทย ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยรัศมีความโค้งและค่ายกโค้งที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ และค่าความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทยได้กำหนดเอาไว้

บัญชีข้อมูลโค้ง (DATA CURVE) และรายละเอียดของทางในทางโค้ง									
กองบำรุงทางเขตลำปาง				ศูนย์บำรุงทางภาคเหนือ					
ลำดับ	หมายเลขที่โค้ง	กม.ต้นโค้ง กม. + ม.	กม.ปลายโค้ง กม. + ม.	รัศมีโค้ง เหลี่ยม/วง	ความยาว ตลอดโค้ง (ม.)	ค่ามาตรฐาน ในโค้งกลม	ความเร็วสูงสุด กม. / ชม.		
				ขว. (ม.)	(ม.)	บข.1 บข.2			
6	1	10070.	419+450	419+825	950L	375	0-65-13	80	100
7	2	10071	432+314	432+644	2500L	330	0-25-5	80	100
8	3	10072	437+185	437+415	400R	230	8-90-31	75	75
10	4	10073	437+655	437+985	400R	330	8-90-30	80	100
11	5	10074	444+116	444+626	1000L	510	3-60-12	80	100
13	6	11000	458+513	459+193	600R	680	0-30-20	50	50
14	7	11001	459+596	460+611	600L	1,015	0-30-20	50	50
15	8	11002	460+808	461+398	600R	590	0-30-20	50	50
16	9	11003	462+013	462+713	1000R	700	0-20-13	50	50
17	10	11004	463+664	464+319	1000L	655	0-20-13	50	50
18	11	11005	463+150	465+515	1000R	365	0-20-13	50	50
19	12	11006	474+420	474+585	1000R	165	0-20-11	50	50

รูปที่ 3.8 ภาพแสดงบัญชีข้อมูลโค้งและรายละเอียดของทางในทางโค้งของกองบำรุงทางเขตลำปาง [5]

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถโดยสารจากวิธีการพลศาสตร์มลติบอร์ดีซึ่งได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถโดยสารในทางโค้งด้วยโปรแกรม SIGMA SAMS ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองคือความเร็วสูงสุดของรถโดยสารที่เคลื่อนที่บนทางโค้ง และแรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อกับราง นอกจากนี้ผลลัพธ์ของความเร็วสูงสุดที่ได้จากวิธีการพลศาสตร์มลติบอร์ดีที่ได้ จะมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งและค่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย การวิเคราะห์แรงสัมผัสระหว่างล้อและรางจากการจำลองซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสาร

4.2 ความเร็วสูงสุดของรถโดยสารในทางโค้ง

จากการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งของรถโดยสาร ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นการเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดของรถโดยสารจากวิธีการพลศาสตร์มลติบอร์ดีจากการจำลองรถโดยสารด้วยโปรแกรม SIGMA SAMS การคำนวณด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง และค่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทยตามขอบเขตของทางโค้งที่กำหนดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงทางโค้งที่ใช้ในการทดลองซึ่งประกอบไปด้วย รัศมีโค้ง ค่ายกโค้งมุมยกโค้ง และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสารจากวิธีการต่าง ๆ

ทางโค้ง			ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ ความเร็วในการเคลื่อนที่บน ทางโค้ง	การจำลองด้วย โปรแกรม SIGMA SAMS	การรถไฟแห่งประเทศไทย
รัศมีโค้ง (m)	ค่ายกโค้ง (mm)	มุมยกโค้ง (องศา)	ความเร็วสูงสุด (km/hr)	ความเร็วสูงสุด (km/hr)	ความเร็วสูงสุด (km/hr)
180	75	4.29	97.53	87.27	45
400	70	4.00	144.36	127.60	65
500	55	3.15	157.95	134.11	65

โดยผลลัพธ์ของความเร็วสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งสามารถแสดงการคำนวณออกมาตามสมการที่ (2.5) ได้ดังต่อไปนี้

ความเร็วสูงสุดที่รัศมีโค้ง 180 เมตร มุมยกโค้ง 4.29 องศา

$$V_{max} = \sqrt{\frac{180 \times 9.81 \times [1.513 \times \sin(4.29^\circ) + (1.00) \times \cos(4.29^\circ)]}{1.513 \times \cos(4.29^\circ) - (1.00) \times \sin(4.29^\circ)}}$$

$$V_{max} = 27.09 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = 97.53 \text{ km/hr}$$

ความเร็วสูงสุดที่รัศมีโค้ง 400 เมตร มุมยกโค้ง 4.00 องศา

$$V_{max} = \sqrt{\frac{400 \times 9.81 \times [1.513 \times \sin(4.00^\circ) + (1.00) \times \cos(4.00^\circ)]}{1.513 \times \cos(4.00^\circ) - (1.00) \times \sin(4.00^\circ)}}$$

$$V_{max} = 40.10 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = 144.36 \text{ km/hr}$$

ความเร็วสูงสุดที่รัศมีโค้ง 500 เมตร มุมยกโค้ง 3.15 องศา

$$V_{max} = \sqrt{\frac{500 \times 9.81 \times [1.513 \times \sin(3.15^\circ) + (1.00) \times \cos(3.15^\circ)]}{1.513 \times \cos(3.15^\circ) - (1.00) \times \sin(3.15^\circ)}}$$

$$V_{max} = 43.88 \text{ m/s}$$

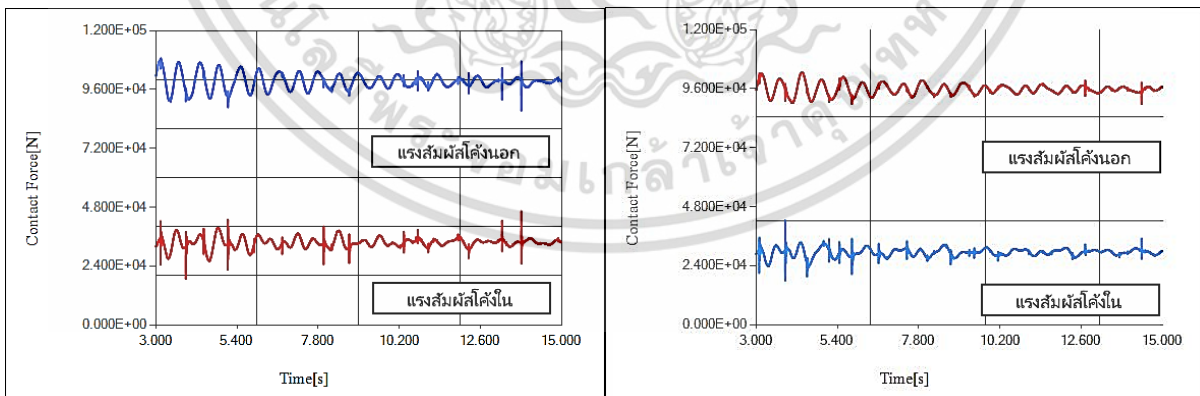
$$V_{max} = 157.95 \text{ km/hr}$$

ผลลัพธ์จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสารที่เพิ่มขึ้นมาตามรัศมีโค้งในทุกวิธีการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ในทางโค้งรวมถึงค่าความเร็วที่กำหนดโดยการรถไฟ จากการเปรียบเทียบวิธีการพลศาสตร์มลติบอร์ดีจะมีผลลัพธ์ของความเร็วสูงสุดที่ต่ำกว่าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งมีความแตกต่างกันของค่าความเร็วสูงที่มากขึ้นเมื่อรัศมีความโค้งมีค่ามากขึ้น และในส่วนของค่าความเร็วสูงสุดที่ถูกกำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทยที่ไม่ได้เพิ่มขึ้นที่รัศมีความโค้ง 500 เมตรเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง 400 เมตร

โดยปัจจัยที่ทำให้ค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสารบนทางโค้งจากการหาผลลัพธ์ของแต่ละวิธีการมีความแตกต่างกันมาจากองค์ประกอบที่ต้องพิจารณาของวิธีการพลศาสตร์มัลติบอดีที่มีมากกว่าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งเช่นมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของแต่ละชิ้นส่วน ระบบกันสะเทือน และความเป็นพลศาสตร์ในการจำลองการเคลื่อนที่ในแต่ละตำแหน่งและเวลา รวมทั้งปัจจัยที่ทำให้ค่าความเร็วสูงสุดของรถโดยสารบนทางโค้งจากการหาผลลัพธ์ของแต่ละวิธีการน้อยกว่าค่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทยที่มาจากองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในเนื้อหาจากขอบเขตในการศึกษาที่ไม่ได้นำมาพิจารณาเช่นสภาพแวดล้อม สภาพทาง เหตุผลเพื่อรักษาความเร็วของขบวนรถให้สม่ำเสมอ และความปลอดภัยที่ถูกกำหนดเพิ่มเติม เป็นต้น

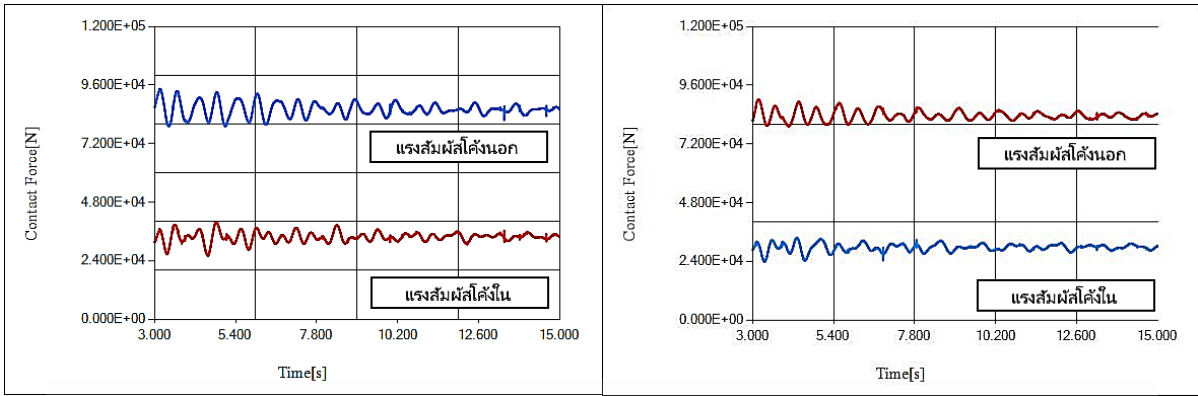
4.3 แรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อและรางของรถโดยสารในทางโค้ง

แรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อและรางของรถโดยสารในทางโค้งเป็นผลลัพธ์อีกอย่างหนึ่งที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการพลศาสตร์มัลติบอดีและโปรแกรม SIGMA SAMS โดยมีผลลัพธ์เป็นแรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อและรางในแต่ละล้อ ของชุดล้อตามหมายเลขชิ้นส่วนจากรูปที่ 3.2 จากการจำลองรถโดยสารที่รัศมีความโค้ง 500 เมตรที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงหรือร้อยละ 90 ของความเร็วสูงสุดดังรูปที่ 4.1, 4.3, 4.5, และ 4.7 ตามลำดับ มีเส้นสีน้ำเงินคือเป็นแรงสัมผัสที่ล้อสัมผัสกับรางที่โค้งนอกและเส้นสีแดงคือแรงสัมผัสที่ล้อสัมผัสกับรางที่โค้งใน และแรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อและรางจากการจำลองรถโดยสารที่รัศมีความโค้ง 500 เมตรที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่ได้จากการจำลองดังรูปที่ 4.2, 4.4, 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ มีเส้นสีแดงคือเป็นแรงสัมผัสที่ล้อสัมผัสกับรางที่โค้งนอกและเส้นสีน้ำเงินคือแรงสัมผัสที่ล้อสัมผัสกับรางที่โค้งในตามลำดับเพื่อทำการเปรียบเทียบโดยยกตัวอย่างให้โค้งที่แบบจำลองรถโดยสารกำลังเคลื่อนที่เป็นโค้งขวาซึ่งโค้งนอกล้อซ้ายจะสัมผัสกับรางและโค้งในล้อขวาจะสัมผัสกับราง



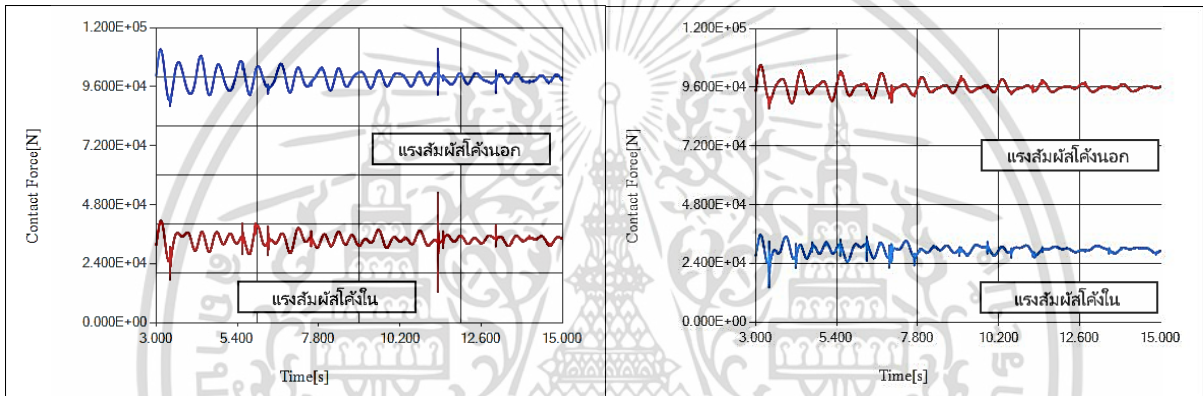
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



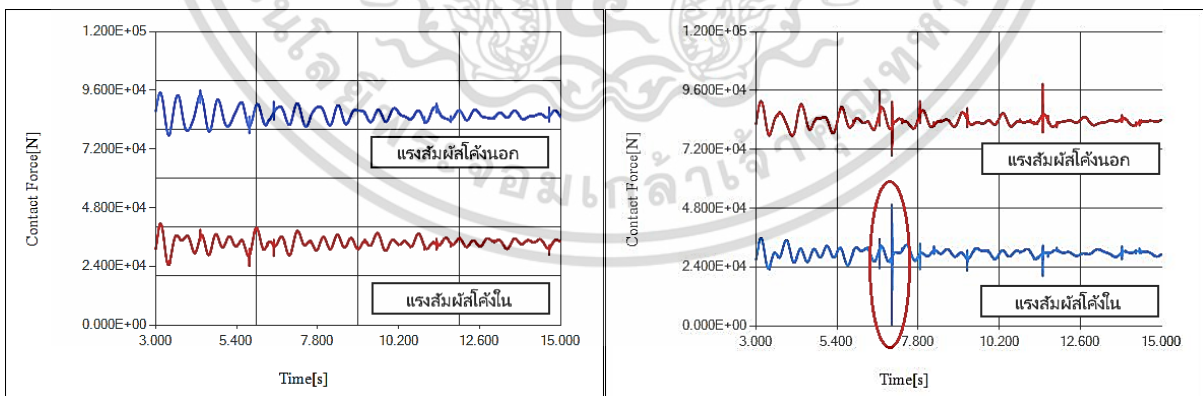
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ที่ความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงแรงสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ที่ความเร็ว 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

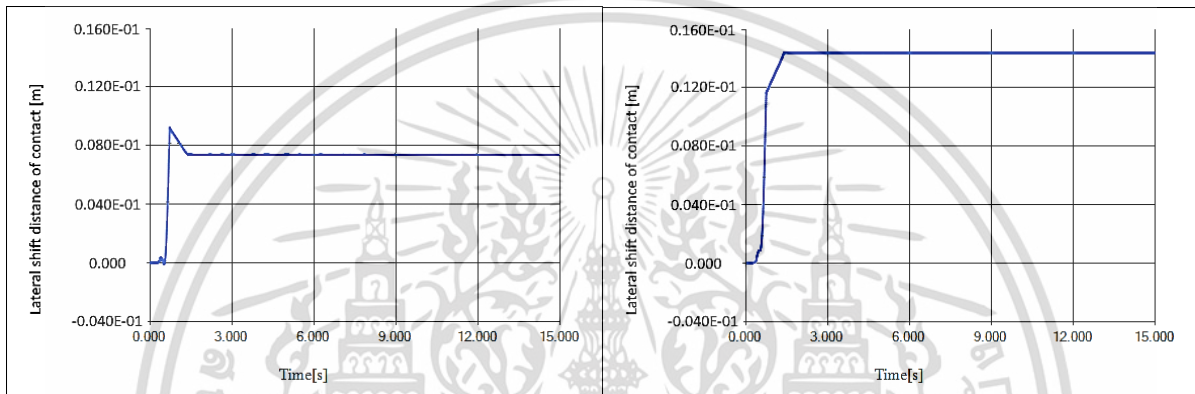
โดยผลลัพธ์ของแรงสัมผัสที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบเสถียรลู่เข้าหาจุดสมดุลของแรงสัมผัสที่คงที่เมื่อเวลาผ่านไปเทียบกับแรงสัมผัสที่เวลาเริ่มต้นของการจำลองวินาทีที่ 3 ซึ่งเป็นเวลาที่แบบจำลองรถโดยสารได้เคลื่อนที่เข้าสู่ทางโค้ง ทั้งสี่ชุดล้อของรถโดยสารแรงสัมผัสที่โค้งนอกจะมากกว่าแรงสัมผัสที่โค้งในตลอดการเคลื่อนที่ของแบบจำลองรถโดยสารบนทางโค้ง แสดงให้เห็นถึงแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับรถโดยสารเมื่อเคลื่อนที่อยู่บนทางโค้ง และแรงหนีศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้นเมื่อรถโดยสารเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงสัมผัสระหว่างล้อและรางของรถโดยสารลดลง ตามผลการทดลองที่แรงสัมผัสระหว่างล้อและรางที่โค้งในของแบบจำลองรถโดยสารที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง น้อยกว่าแรงสัมผัสที่โค้งในของแบบจำลองรถโดยสารที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 120.70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ที่ความเร็วสูงสุดของแบบจำลองรถโดยสาร 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่ง ณ ช่วงเวลาหนึ่งที่เกิดการสูญเสียแรงสัมผัสระหว่างล้อและรางดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่บนทางโค้งทำให้แรงสัมผัสระหว่างล้อและรางของรถโดยสารโดยเฉพาะแรงสัมผัสที่โค้งในมีค่าลดลงใกล้เคียงเท่ากับศูนย์ในช่วงหนึ่งซึ่งสามารถทำให้เกิดการพลิกคว่ำขึ้นได้ ทำให้เป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์หาค่าความเร็วสูงสุดที่รถโดยสารสามารถเคลื่อนที่หรือนำไปสู่การพลิกคว่ำได้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่นอกเหนือจากการตกราง ทั้งนี้ภายใต้ข้อจำกัดของการออกแบบระบบสั่นสะเทือนของรถไฟ เมื่อการสูญเสียแรงสัมผัสระหว่างล้อและรางที่เกิดจากการสั่นสะเทือนได้สิ้นสุดลงด้วยแรงน้ำหนักของรถโดยสารจะถ่วงรถโดยสารให้การสัมผัสระหว่างล้อและรางกลับมาที่จุดเดิมทำให้แรงสัมผัสระหว่างล้อและรางกลับมาอยู่ที่จุดสมดุลทำให้รถโดยสารยังคงสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วดังกล่าว ซึ่งโอกาสที่จะเกิดการสูญเสียแรงสัมผัสระหว่างล้อและรางนั้นมีมากขึ้นตามความเร็วของรถโดยสารที่เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือถารถโดยสารเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วสูงสุดที่จะรองรับได้รถโดยสารจะเกิดการสูญเสียแรงสัมผัสระหว่างล้อและรางซึ่งแรงหนีศูนย์กลางจะมากกว่าแรงสู่ศูนย์กลางที่กระทำกับรถโดยสารอันนำไปสู่การพลิกคว่ำและตกรางในที่สุด

การพลิกคว่ำของแบบจำลองรถโดยสารที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกันในการจำลองเนื่องจากความเร็วของแบบจำลองรถโดยสารมีค่าเกินความเร็วสูงสุด เมื่อล้อและรางไม่เกิดการสัมผัสกันซึ่งทำให้การจำลองด้วยโปรแกรม SIGMA SAMS เพื่อหาแรงสัมผัสที่กระทำระหว่างล้อและรางของรถโดยสารในทางโค้งที่ความเร็วมากกว่าความเร็วสูงสุดไม่สามารถทำได้

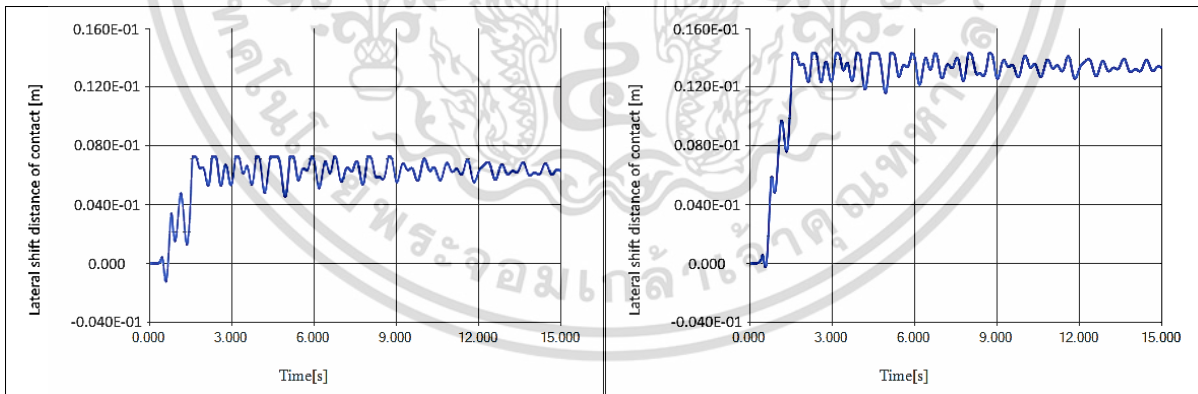
4.4 ตำแหน่งสัมผัสระหว่างล้อและรางของรถโดยสารในทางโค้ง

ตำแหน่งสัมผัสระหว่างล้อและรางของรถไฟเป็นผลลัพธ์อีกอย่างหนึ่งที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีการพลศาสตร์มัลติบอดี โดยมีผลลัพธ์เป็นระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างจากตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของการสัมผัสระหว่างล้อและรางในแต่ละล้อ ของชุดล้อตามหมายเลขชิ้นส่วนจากรูปที่ 3.2 จากการจำลองรถโดยสารที่รัศมีความโค้ง 500 เมตรที่ความเร็วสูงสุด 134.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมงดังรูปที่ 4.9 จนถึงรูปที่ 4.16 ตามลำดับ โดยยกตัวอย่างให้โค้งที่แบบจำลองรถโดยสารกำลังเคลื่อนที่เป็นโค้งขวาซึ่งโค้งนอกล้อซ้ายจะสัมผัสกับรางและโค้งในล้อขวาจะสัมผัสกับราง



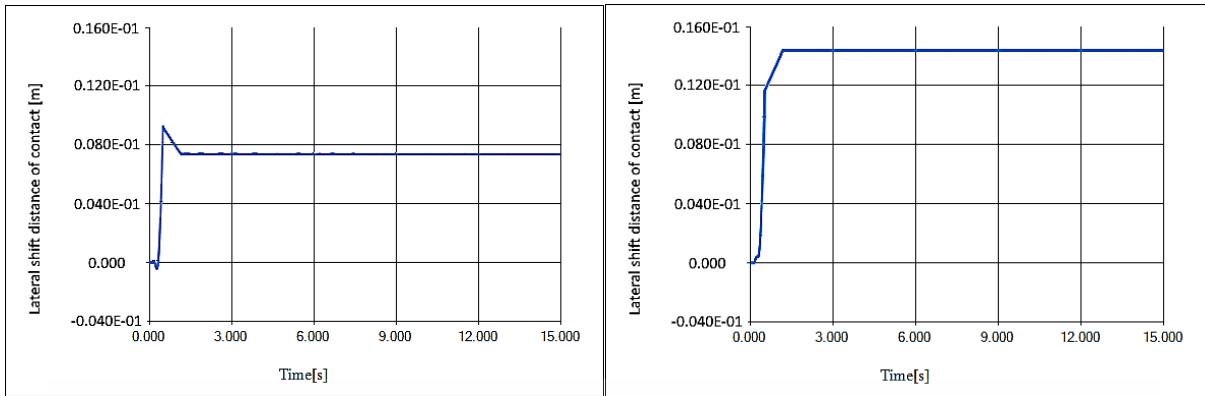
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 2 ชุดล้อที่ 1 ล้อด้านใน (ขวา)



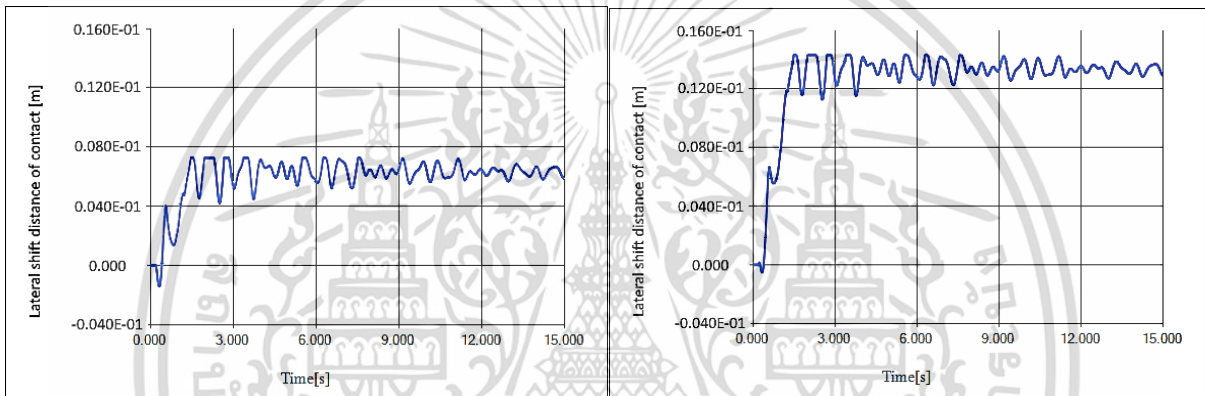
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 3 ชุดล้อที่ 2 ล้อโค้งใน (ขวา)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 6 ชุดล้อที่ 3 ล้อโค้งใน (ขวา)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ล้อโค้งนอก (ซ้าย)

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ 7 ชุดล้อที่ 4 ล้อโค้งใน (ขวา)

โดยผลลัพธ์ของระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างที่ได้จากการจำลองโดยอาศัยแบบจำลองรถโดยสาร เป็นจุดอ้างอิงแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งสัมผัสของล้อของแบบจำลองรถโดยสารซึ่งอยู่ที่จุดสมดุลในขณะที่เคลื่อนที่อยู่บนทางตรงในวินาทีที่ศูนย์ได้เคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลเมื่อเกิดการเคลื่อนที่อยู่บนทางโค้ง โดยตำแหน่งสัมผัสของล้อบนโค้งด้านนอกได้ขยับเข้าใกล้บังใบล้อในขณะที่ตำแหน่งสัมผัสของล้อบนโค้งด้านในได้ขยับออกจากบังใบล้อ ซึ่งระยะการเคลื่อนตัวออกจากจุดสมดุลของล้อที่สัมผัสรางโค้งนอกหรือล้อซ้ายมีค่าน้อยกว่าล้อที่สัมผัสรางโค้งในหรือล้อขวา แสดงให้เห็นถึงการสัมผัสของบังใบล้อที่สัมผัสกับรางโค้งด้านนอกหรือล้อด้านซ้ายเนื่องจากที่บังใบล้อมีความชันที่มากกว่าพื้นล้อทำให้ระยะการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างบริเวณบังใบล้อน้อยกว่าบริเวณพื้นล้อ

ผลลัพธ์ของระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างที่ได้จากการจำลองของชุดล้อยี่ 1 และ 3 เมื่อเทียบกับเวลามีลักษณะเป็นเส้นตรงในขณะที่ระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของชุดล้อยี่ 2 และ 4 มีลักษณะเป็นรูปคลื่น เกิดจากชุดล้อยี่ 1 และ 3 เป็นเพลลาซิปในขณะที่ชุดล้อยี่ 2 และ 4 เป็นเพลลาตามซิปทิศทางการเคลื่อนที่ของแบบจำลองรถโดยสาร และตำแหน่งของชุดล้อยี่ที่ถูกวางอยู่ที่ไต่โบกี้ซึ่งเพลลาซิปรับแรงสัมผัสระหว่างล้อและรางมากกว่าชาวเพลลาตามดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.8 โดยเฉพาะแรงสัมผัสในโค้งนอกที่เห็นได้ชัดเจน ด้วยแรงสัมผัสที่มากกว่าทำให้การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นน้อยกว่าในแต่ละโบกี้ เพลลาซิปจึงมี ระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างเป็นเส้นตรงในขณะที่เพลลาตามมีระยะที่เคลื่อนตัวในแนวด้านข้างเป็นรูปคลื่น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารในทางโค้งด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี โดยใช้โปรแกรม SIGMA SAMS พบว่า

1. สามารถศึกษาและประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีจนสามารถหาผลลัพธ์ได้อย่างสมบูรณ์

2. สามารถเปรียบเทียบค่าการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีกับวิธีการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนบนทางโค้งและพิกัดความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทย โดยพบว่าค่าที่ได้จาก วิธีการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนบนทางโค้งมีค่าสูงกว่า ค่าการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี และพิกัดความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทย ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนบนทางโค้งมีความสอดคล้องกับ ค่าการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาพบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนบนทางโค้งนั้นเป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาด้วยตัวแปร คือ รัศมีโค้ง ความยาวของเพลาล้อ มุมของการยกโค้ง ความสูงของจุดศูนย์กลางของมวล ซึ่งเป็นแค่ที่คงที่ โดยจะมีความแตกต่างกัน ในส่วนของ ประเภทของรถ และขนาดโค้ง ในขณะที่ค่าการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี นั้นเป็นค่าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีความสมจริงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนบนทางโค้ง เนื่องจากมีการพิจารณาเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ละเอียดกว่า พิกัดความเร็วสูงสุดที่การรถไฟแห่งประเทศไทยโดยเป็นค่าประเมินที่ได้จากการพิจารณาโครงสร้างทางเป็นหลัก ซึ่งจะกำหนดความเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามรัศมีโค้ง เพราะต้องการรักษาความเร็วให้สม่ำเสมอในเส้นทางเพื่อความสะดวกในการเดินทาง ประกอบกับปัจจัยสภาพทาง และเหตุผลทางด้านความปลอดภัยทำให้พิกัดความเร็วมีค่าต่ำกว่าค่าการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี

5.3 ปัญหาจากการศึกษา และ ข้อเสนอแนะ

1. ภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากร ทำให้สามารถทำการศึกษาได้เพียง 3 กรณี ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ครบถ้วน
2. สามารถปรับค่าตัวแปร เพื่อให้เหมาะสมกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ได้ เช่น ขนาดทาง ขนาดโค้ง น้ำหนักของตัวรถไฟ โมเมนต์ความเฉื่อย ระยะยกโค้ง เป็นต้น
3. สามารถเพิ่มจำนวน รถ รวมทั้งปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสมจริงลงในโปรแกรม SIGMA SAMS ได้ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับของจริงยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Ahmed A. Shabana (2008) *Railroad vehicle dynamics : a computational approach*, Florida: CRC Press
- [2] Ballew, Brent Steven (2008) *Advanced Multibody Dynamics Modeling of the Freight Train Truck System*, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [3] Beom-Gyu Eom & Hi Sung Lee (2010) *Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics*, Springer: .
- [4] Joanna Charlotte Moody (2014) *Critical Speed Analysis of Railcars and Wheelsets on Curved and Straight Track*, Maine, USA: Bates College.
- [5] การรถไฟแห่งประเทศไทย (2019) บัญชีข้อมูลโค้งและรายละเอียดของทางในทางโค้งของกองบำรุงทางเขตลำปาง, ลำปาง: กองบำรุงทางเขต.
- [6] มนต์ศักดิ์ พิมสาร (2557) *เอกสารประกอบการสอนวิชา 01156126 RAIL VEHICLE DYNAMICS*, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] วิชัย ศิวะโกศิษฐ์ (2562) *หลักการวิศวกรรมระบบราง*, กรุงเทพฯ : ศูนย์วิศวกรรมระบบราง
- [8] สุรทัตน์ กองสุข (2558) *การจำลองการตกรางเนื่องจากล้อปีนรางด้วยระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ = Simulation of derailment due to wheel climb using finite element method*, กรุงเทพฯ ฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] Railsystem (2015) Bogie, Available at: <http://www.railsystem.net/bogie/> (Accessed: 29/5/2020).
- [10] Shanmugaraj M (2014) Railway engineering, Available at: <https://www.slideshare.net/mshanmugaraj1/railway-engineering> (Accessed: 29/5/2020).
- [10] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2013) *คลังภาพรถไฟ*, Available at: <https://www.thairailtech.or.th/?cat=84> (Accessed: 29/5/2020).