

ผลของการยกโค้งต่อการตกรางของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

INFLUENCE OF CANT ON DERAILMENT FOR MASS RAPID TRANSIT

กิตตินันท์ ชูเกียรติศิริ

นิชากร จองดี

พงศกร ชื่นอารมณ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ผลของการยกโค้งต่อการตกรางของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

INFLUENCE OF CANT ON DERAILMENT FOR MASS RAPID TRANSIT

กิตตินันท์ ชูเกียรติศิริ

นิชากร จองดีะ

พงศกร ชื่นอารมณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

INFLUENCE OF CANT ON DERAILMENT FOR MASS RAPID TRANSIT

KITTINAN CHUKIETISIRI
NICHAKORN JONGTA
PONGSAKORN CHUEN-AROM

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

2017

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

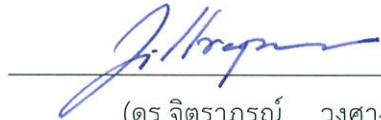
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของการยกโค้งต่อการดกรางของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

INFLUENCE OF CANT ON DERAILMENT FOR MASS RAPID TRANSIT

ผู้จัดทำ

1. นาย กิตตินันท์ ชูเกียรติศิริ รหัสประจำตัว 57010086
2. นางสาว ณิชากร จองดี๊ะ รหัสประจำตัว 57010475
3. นาย พงศกร ชื่นอารมณั รหัสประจำตัว 57010799



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.จิตรามรณ์ วงศาางาม)

ผลของการยกโค้งต่อการตรวงของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

กิตตินันท์ ชูเกียรติศิริ	57010086
ณิชากร จองดี	57010475
พงศกร ชื่นอารมณ์	57010799
ดร.จิตรราภรณ์ วงศางาม	อาจารย์ที่ปรึกษา
นายธนัท เกียรติวาทิรัตน์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2560	

บทคัดย่อ

การตรวงเป็นอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงกระทำด้านข้างที่ส่งผลให้บังโบล้อป็นราง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงดังกล่าวมากที่สุดคือ การยกโค้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาผลของการยกโค้งต่อการตรวง โดยทำการออกแบบเส้นทางรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยการจำลองการเดินรถ เพื่อให้ได้ความเร็วในทางโค้ง รัศมีโค้ง และการยกโค้ง จากนั้นนำค่าของตัวแปรดังกล่าวมาทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อบนรางในช่วงทางโค้งที่มีค่าการยกโค้งทั้งหมด 6 กรณี ได้แก่ 125 มิลลิเมตร, 115 มิลลิเมตร, 105 มิลลิเมตร, 75 มิลลิเมตร, 35 มิลลิเมตรและ 0 มิลลิเมตรหรือไม่มีการยกโค้งและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้ได้ผลของแรงกระทำด้านข้างที่กระทำต่อรถไฟในแต่ละกรณี โดยพิจารณาแนวโน้มในการเกิดการตรวงโดยใช้สูตรของนาตาลและข้อจำกัดของนาตาล ซึ่งแนวโน้มของโอกาสในการเกิดการตรวงจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการยกโค้งลดลง

คำสำคัญ: การตรวง, การยกโค้ง, การจำลองการเดินรถ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

INFLUENCE OF CANT ON DERAILMENT FOR MASS RAPID TRANSIT

Kittinan Chukietisiri	57010086
Nichakorn Jongta	57010475
Pongsakorn Chuen-Arom	57010799
Dr.Jittraporn Wongsa-Ngam	Adviser
Tanat Kiatwateeratana	Co-adviser
Year 2017	

ABSTRACT

Derailment is one of the accident caused by lateral force that leads to flange climbing, the most effective factor is cant. This research studies and analyzes influence of cant on derailment by design Mass Rapid Transit route with train simulation to obtain train operation speed on curved track and applied cant. The variables from train simulation will be used to make computer simulation, a wheelset on curved track with 6 cases of applied cant including 125mm., 115mm., 105mm., 75mm., 35mm., 0mm. (no cant) and analyzes with Finite Element Method (FEM) to obtain the results of lateral force that effect to train in each case of applied cant by consider tendency of derailment with Nadal's formula and Nadal's limit. The result shows increasing tendency when cant is decreased.

Keywords: Derailment, Cant, Train Simulation, Finite Element Analysis,
Finite Element Method

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากคำปรึกษา การชี้แนะ และความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการวิจัยจากดร.จิตราภรณ์ วงศ์งาม อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ธันท์ เกียรติวาทิรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม โดยได้ให้ความรู้เชิงวิชาการ คอยชี้จุดบกพร่องในงานพร้อมทั้งชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมถึงการปลูกฝังให้มีความมานะพยายาม และติดตามการดำเนินงานอย่างสม่ำเสมอ จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณดร.สุธี โอฬารฤทธินันท์, นายวิศวานถ ไชยชมภู (พี่นัท) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการฝึกอบรมและให้คำแนะนำด้านการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขอขอบพระคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) เจ้าของเอกสารโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายที่ทางผู้จัดทำได้นำมาเป็นข้อมูลสำหรับการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณนายสุเทพ แร่อ่อน (พี่เปียร์) ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์เบื้องต้น ขอขอบพระคุณนายพนัสฐิติระพงษ์ไพบูล (พี่ไนท์) ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับความรู้ด้านรถไฟฟ้ายานเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา คอยถามไถ่สารทุกข์สุกดิบและให้การสนับสนุนมาโดยตลอด ขอขอบคุณสังคมออนไลน์และสื่อบันเทิงต่างๆ ที่ได้มอบความผ่อนคลายระหว่างพักผ่อนจากทำงาน และขอขอบคุณบุคคลที่ไม่สามารถเอ่ยนาม ณ ที่นี้ได้แต่เป็นส่วนหนึ่งของพลังกำลังในการทำงานวิจัยและเป็นแรงบันดาลใจสำหรับการทำงานและการใช้ชีวิต

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาผู้เป็นที่รักและเคารพเป็นอย่างยิ่ง ที่ได้เลี้ยงดูด้วยความรักและเอาใจใส่ ให้โอกาสในการศึกษาตั้งแต่เยาว์วัยจนถึงปัจจุบัน รวมถึงเป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆ ด้านเท่าที่จะสามารถมอบให้ได้ พวกเราจะพึงระลึกพระคุณของท่านทั้งสองเสมอไป

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณตัวเองที่พยายามอย่างเต็มที่และสุดความสามารถตั้งแต่เริ่มต้นทำงานวิจัยจนถึงเวลานี้ ถึงแม้ว่าระหว่างทางจะพบเจออุปสรรคมากมายเพียงใดหรือมีสิ่งบั่นทอนมากแค่ไหนก็สามารถลุกขึ้นมาจัดการกับสิ่งเหล่านั้นได้และสามารถนำพางานวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ขอขอบคุณและขอให้เติบโตด้วยก้าวอย่างที่มีมั่นคงต่อไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

นายกิตตินันท์ ชูเกียรติศิริ

นางสาวณิชกร จองตะ

นายพงศกร ชื่นอารมณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ (ต่อ)	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
สารบัญรูป (ต่อ)	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 ข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการจำลองการเดินทาง (Train Simulation)	3
2.1.1.1 เรขาคณิตในทางรถไฟ (Railway Track Geometry)	3
1 การวางแผนทางราบ (Horizontal Alignment)	3
2.1.1.2 การยกโค้ง (Cant)	5
1 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่บนทางโค้งของรถไฟ	7
2 การคำนวณหาความสูงการยกโค้ง	7
2.1.1.3 การวิเคราะห์พลศาสตร์การเคลื่อนที่ของรถไฟ	8
2.1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)	9
2.1.2.1 การสัมผัสของล้อและราง (Wheel-Rail Interface)	9
1 ตำแหน่งของการสัมผัสกันของล้อและราง	10
2.1.2.2 การตกราง (Derailment)	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1 สูตรของนาดาล (Nadal's Formula)	13
2.1.2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	15
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 กรณีศึกษา	20
3.1.1 โครงการรถไฟฟาสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง-บางแค	20
3.2 การจำลองการเดินรถ (Train Simulation)	23
3.2.1 การค้นคว้ารวบรวมข้อมูลสำหรับการจำลองการเดินรถ	23
3.2.2 การคำนวณการจำลองการเดินรถ	25
3.3 การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)	27
3.3.1 การขึ้นรูปร่างและชุดเพลาล้อโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	27
3.3.1.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปร่าง UIC60	29
3.3.1.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชุดเพลาล้อ	32
3.3.2 การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)	37
3.3.2.1 การนำล้อและรางสามมิติที่ถูกขึ้นรูปเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์	37
3.3.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองและกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุ (Material Properties)	39
3.3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ให้แบบจำลอง	40
3.3.2.4 การกำหนดการทำงานของแบบจำลองและการนำแบบจำลองออก (Export) ไปยัง Solver	41
3.3.2.5 การประมวลผลแบบจำลองของโปรแกรม RADIOSS	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ผลการคำนวณการจำลองการเดินรถ (Train Simulation)	48
4.1.1 การเลือกช่วงทางโค้งสำหรับนำไปวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	51
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 กรณียกโค้ง 125 มิลลิเมตร	52
4.2.2 กรณียกโค้ง 115 มิลลิเมตร	53
4.2.3 กรณียกโค้ง 105 มิลลิเมตร	54
4.2.4 กรณียกโค้ง 75 มิลลิเมตร	55
4.2.5 กรณียกโค้ง 35 มิลลิเมตร	55
4.2.6 กรณียกโค้ง 0 มิลลิเมตร หรือไม่มีการยกโค้ง	56
4.3 การวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดการตกรางด้วยสูตรของนาดาล (Nadal's Formula)	58
4.3.1 ตัวอย่างการคำนวณการตกรางด้วยสูตรของนาดาลและลิมิตของนาดาล ในกรณีการยกโค้ง 75 มิลลิเมตร	59
4.3.2 ผลลัพธ์การคำนวณการตกรางด้วยสูตรนาดาลและแนวโน้มการตกราง	60
4.4 การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณจากทฤษฎีและผลจากการวิเคราะห์แบบจำลอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	63
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลสำหรับใช้คำนวณแบบจำลองการเดินรถ	24
3.2 ค่าคุณสมบัติทางวัสดุของล้อและราง	39
3.3 คุณสมบัติของพื้นที่ผิวสัมผัส Type24	46
3.4 รายละเอียดของ /SECT	46
4.1 ผลการคำนวณการจำลองการเดินรถ	49
4.2 ผลการคำนวณการจำลองการเดินรถระหว่างสถานีท่าพระกับสถานีอิสรภาพ	51
4.3 ผลลัพธ์ของอัตราส่วน L-V ที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรของนาตาลจากการยกโค้งทุกกรณี	60
4.4 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการจำลองการเดินรถและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทางโค้งและตำแหน่งต่างๆ ในทางโค้ง	4
2.2 แรงที่กระทำต่อตัวรถบนทางโค้ง	5
2.3 ระยะยกโค้งต่างๆ	7
2.4 ตำแหน่งของแรงที่กระทำต่อราง	10
2.5 บริเวณสี่กหรือของล้อ	10
2.6 จุดสัมผัสระหว่างล้อกับราง 1 จุด	11
2.7 จุดสัมผัสระหว่างล้อกับราง 2 จุดและแรงที่กระทำต่อรางในกรณีที่ล้อไถลบนทางโค้ง	11
2.8 จุดสัมผัสระหว่างบังใบล้อกับหัวราง	12
2.9 ขั้นตอนของล้อป็นรางในการตกราง	13
2.10 จุดสัมผัสระหว่างบังใบล้อกับราง	13
2.11 แรงที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับรางและมุมแหลมของแรงที่กระทำ	15
2.12 ตัวอย่างการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	19
3.2 เส้นทางโครงการรถไฟสายสีน้ำเงิน	21
3.3 ภาพรวมเส้นทางโครงการรถไฟสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย	21
3.4 เส้นทางรถไฟสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง-บางแค	22
3.5 ราง UIC60	28
3.6 ขนาดล้อรถไฟมาตรฐานของโครงการรถไฟในประเทศไทย	28
3.7 การวาดเส้นหน้าตัดราง UIC60 โดยใช้คำสั่ง Sketch	29
3.8 การปรับรางเอียง 1:40	29
3.9 ความกว้างทางรถไฟ (Track Gauge) 1435 มิลลิเมตร	30
3.10 การยกรางขึ้นสูง 125 มิลลิเมตร	30
3.11 การสร้างระนาบใหม่	31
3.12 ช่วงทางโค้งรถไฟ	31
3.13 การกำหนดระนาบและการสร้างจุดเริ่มต้นในการวาดชิ้นงาน	32
3.14 การวาดเส้นหน้าตัดล้อโดยใช้คำสั่ง Sketch	33
3.15 การให้ขนาด (Dimension) บริเวณบังใบล้อ (Wheel Flange)	33
3.16 การให้ขนาด (Dimension) บริเวณแกนกลาง	33
3.17 การวาดเส้นล้อใน 2 มิติที่จะนำไปใช้จริง	34
3.18 การใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base สร้างภาพล้อ 3 มิติ	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 ล้อรถไฟ 1 ล้อ ที่ถูกขึ้นรูป	35
3.20 ชุดเพลาล้อและการวัดขนาดทางตรงของ European Standard	35
3.21 ล้อรถไฟทั้ง 2 ข้าง	36
3.22 ชุดเพลาล้อ	36
3.23 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	37
3.24 การนำล้อเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และ Meshing	38
3.25 การนำเพลาล้อเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และ Meshing	38
3.26 การนำรางเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และ Meshing	39
3.27 การใส่คุณสมบัติทางวัสดุของชุดเพลาล้อ	40
3.28 การกำหนด Properties ให้แก่รางและชุดเพลาล้อ	40
3.29 การใส่ Boundary Conditions ในการทิศของแรงโน้มถ่วงและทิศของความเร็ว	41
3.30 การใส่ Boundary Conditions ในการกำหนดการเคลื่อนที่ของรางและชุดเพลาล้อ	41
3.31 การสร้าง Cross Section ในการกำหนดทิศทางของแรงระหว่างล้อกับราง	42
3.32 การสร้าง Contact Surface ในการกำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อและราง	42
3.33 การใส่ EngineCard สำหรับใช้ขับเคลื่อนแบบจำลอง	43
3.34 การ Export แบบจำลองที่ถูกตั้งค่าไปยังโปรแกรม RADIOSS	43
3.35 รูปทรง 8 Node Brick Element	44
3.36 รูปทรง 8 Node Brick Element ของล้อรถไฟ (1)	45
3.37 รูปทรง 8 Node Brick Element ของล้อรถไฟ (2)	45
3.38 แรงและโมเมนต์ที่โหนด	47
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและความเร็วของการจำลองการเดินรถ	50
4.2 แบบจำลองชุดเพลาล้อที่เคลื่อนที่บนทางโค้ง	52
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 125 มิลลิเมตร	52
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่เกิดจากล้อสัมผัสกับราง ด้านนอกที่มีการยกโค้ง 125 มิลลิเมตร	53
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ใน การเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 115 มิลลิเมตร	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 105 มิลลิเมตร	54
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 75 มิลลิเมตร	55
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 35 มิลลิเมตร	56
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่ไม่มีการยกโค้ง	56
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาของทุกกรณีการยกโค้ง	57
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างสูงสุดและเวลาของทุกกรณีการยกโค้ง	58
4.12 การวัดมุมสัมผัสระหว่างบังใบล้อและหัวราง	59
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน L-V และการยกโค้งทุกกรณี	61
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการจำลองการเดินรถและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	62

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

TS	Point of change from tangent to spiral
SC	Point of change from spiral to circular curve
CS	Point of change from circular curve to spiral
ST	Point of change from spiral to tangent
F_d	แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) (นิวตัน)
F_p	แรงหนีศูนย์กลาง (Centripetal Force) (นิวตัน)
F_c	แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force) (นิวตัน)
a_d	ความเร่งกระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration) (เมตรต่อวินาที ²)
a_c	ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Acceleration) (เมตรต่อวินาที ²)
m	มวลของรถไฟ (กิโลกรัม)
g	ความเร่งโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration) (9.81 เมตรต่อวินาที ²)
S	ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางรางถึงอีกจุดกึ่งกลางราง (Track Centres) (มิลลิเมตร)
R	รัศมีทางโค้ง (เมตร)
v_m	ความเร็วสูงสุดเข้าโค้ง (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
v_e	ความเร็วสมดุลเข้าโค้ง (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
h_e	ความสูงโค้งสมดุล (Equilibrium Cant) (มิลลิเมตร)
h_a	ระยะยกโค้งที่ใช้งานจริง (Applied Cant) (มิลลิเมตร)
h_d	ระยะขาดเขยยกโค้ง (Cant Deficiency) (มิลลิเมตร)
$h_{d,max}$	ระยะขาดเขยยกโค้งสูงสุด (Maximum Allowable Deficiency of Cant) (มิลลิเมตร)
v	ความเร็วปลาย (เมตรต่อวินาที)
u	ความเร็วเริ่มต้น (เมตรต่อวินาที)
a	อัตราเร่ง (เมตรต่อวินาที ²)
s	ระยะทาง (เมตร)
t	เวลา (วินาที)
L	แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) (นิวตัน)
V	แรงกระทำแนวตั้ง (Vertical Force) (นิวตัน)
α	มุมสัมผัส (Contact Angle) (องศา)
μ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการดันล้อ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit) ทางรางถือเป็นการคมนาคมขนส่งที่ผู้คนนิยมใช้ในกรุงเทพมหานคร เนื่องจากมีความสามารถในการขนส่งผู้โดยสารได้ในปริมาณมากภายในเวลาจำกัด มีความสะดวกสบายและรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับการคมนาคมในรูปแบบอื่น ซึ่งถือเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดสำหรับการให้บริการแก่ผู้โดยสาร ถึงแม้ว่าการให้บริการของระบบขนส่งมวลชนทางรางจะมีความปลอดภัยสูง แต่โอกาสในการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการโดยสารรถไฟฟ้าก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน สำหรับอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นกับรถไฟมากที่สุด คือ การตกราง [1] โดยเฉพาะในช่วงทางโค้งจะมีความเสี่ยงในการตกรางมากกว่าในช่วงทางตรง และเพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าวจึงต้องมีการออกแบบและสร้างเส้นทางให้เหมาะสม ซึ่งการออกแบบในปัจจุบันนี้จะใช้การคำนวณให้ได้ผลตามข้อกำหนดเพียงเท่านั้น แต่ยังไม่เคยมีการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อทดสอบความถูกต้องของการออกแบบและศึกษาพฤติกรรมของรถไฟที่เกิดขึ้นในเส้นทาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองการเดินรถ (Train Simulation) [2] ของเส้นทางรถไฟฟ้าและสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์อย่างง่ายของชุดเพลาล้อกับรางในช่วงทางโค้งเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของการยกโค้งที่มีต่อการตกรางรวมถึงพฤติกรรมของรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) [3] เพื่อให้สามารถศึกษาแนวโน้มของการตกรางและตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการตกราง อันเป็นส่วนช่วยในการออกแบบและก่อสร้างเส้นทางให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

การตกราง (Derailment) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ที่เกินค่าความปลอดภัยที่ถูกกำหนด โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงทั้งสองแรง ได้แก่ รัศมีทางโค้ง (Curve Radius) การยกโค้ง (Cant) และความเร็วในทางโค้ง (Curving Speed) [4] ซึ่งรัศมีทางโค้งได้กำหนดไว้ในแบบเส้นทางของโครงการ (Alignment Design) [5] ที่ถูกออกแบบ นอกจากนี้ค่าการยกโค้งและความเร็วในทางโค้งสามารถพิจารณาได้จากการจำลองการเดินรถ ซึ่งค่าของตัวแปรที่ได้จากการจำลองการเดินรถต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบแนวเส้นทางรถไฟ (Design Criteria) [6] เพื่อป้องกันปัญหาการตกราง

ในการศึกษาและวิเคราะห์แนวโน้มของโอกาสที่จะเกิดการตกรางบนทางโค้งจะทำการจำลองการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อกับรางที่มีการยกโค้งจากตัวแปรที่ได้จากการจำลองการเดินรถ อันได้แก่ รัศมีโค้ง, ความสูงของการยกโค้ง และความเร็วในการเดินรถ แล้ววิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้แสดงแรงกระทำด้านข้างที่กระทำต่อรถไฟและพิจารณาแนวโน้มในการเกิดการตกราง โดยใช้สูตรการคำนวณและข้อจำกัดของนาดาล (Nadal's Formula) [7]

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของการยกโค้งที่มีต่อการทรง โดยการคำนวณจากทฤษฎีและการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างระหว่างล้อและรางขณะเข้าโค้ง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบถึงแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางวิ่ง

1.3.2 ทราบถึงผลของการยกโค้งที่มีต่อการทรง โดยการคำนวณจากทฤษฎีและการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3.3 สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์กับการคำนวณเพื่อออกแบบเส้นทางรถไฟได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 พิจารณาเฉพาะตัวแปรการยกโค้งต่อการทรง

1.4.2 พิจารณาเส้นทางเดินรถบริเวณทางโค้งเท่านั้น

1.4.3 ในการวิเคราะห์แรงโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพิจารณาแรงที่กระทำต่อหนึ่งเพลาล้อในบริเวณทางโค้งของเส้นทางวิ่ง

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาแนวเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าระบบขนส่งมวลชนรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานคร

1.5.2 ศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์แรงที่กระทำระหว่างล้อและรางวิ่ง

1.5.3 ดำเนินการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการเดินรถ

1.5.4 ดำเนินการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์

1.5.5 ดำเนินการวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.6 ดำเนินการวิเคราะห์แนวโน้มการทรงโดยใช้สูตรและข้อจำกัดของนาตาล

1.5.7 ดำเนินการอภิปราย สรุปผลและเรียบเรียงข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากการศึกษาวิจัยให้ได้บทความวิจัยที่มีคุณภาพและทำรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลของการยกโค้งต่อการทรงตัวของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ต้องมีการศึกษาค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับระบบขนส่งมวลชนทางราง อาทิ โครงสร้างทางรถไฟ การยกโค้ง การทรงวางระเบียบข้อตกลงในการออกแบบเส้นทางรถไฟ เป็นต้น ซึ่งเนื้อหาในบทนี้ได้ถูกเรียบเรียงจากการค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้

2.1 เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการเดินทาง (Train Simulation)

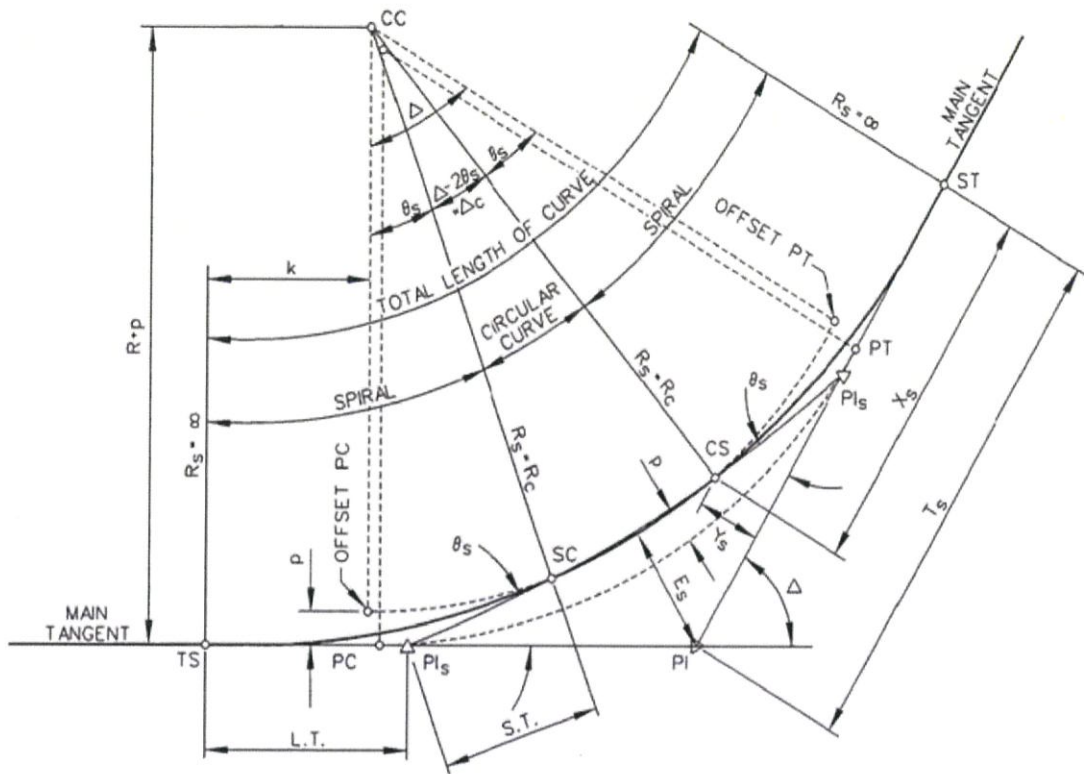
การจำลองการเดินทาง (Train Simulation) เป็นการคำนวณเพื่อหาความเร็วและการยกโค้งที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางทั้งหมดของโครงการที่ได้นำมาศึกษา โดยการคำนวณจะอยู่ภายใต้ขอบเขตของมาตรฐานการออกแบบของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) [6] ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก

2.1.1.1 เรขาคณิตในทางรถไฟ (Railway Track Geometry)

ในการออกแบบแนวเส้นทางรถไฟเพื่อการก่อสร้างรถไฟส่วนใหญ่จะมีการออกแบบให้แนวเส้นทางรถไฟมีความเป็นเส้นตรงให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ทว่าพื้นที่โดยรอบบริเวณแนวเส้นทางนั้นมีสิ่งกีดขวางหรือมีข้อจำกัดในการออกแบบที่ไม่สามารถออกแบบให้เป็นเส้นทางตรงได้ จึงทำให้แนวเส้นทางรถไฟส่วนใหญ่มีความเป็นเส้นตรงน้อยมาก ซึ่งความไม่เป็นเส้นตรงของแนวเส้นทางรถไฟเหล่านี้ทำให้ทางรถไฟเกิดลักษณะเฉพาะทางเรขาคณิตในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกันไปและมีชื่อเรียกเฉพาะของลักษณะนั้นๆ โดยจะนำมาจำแนกในหัวข้อนี้

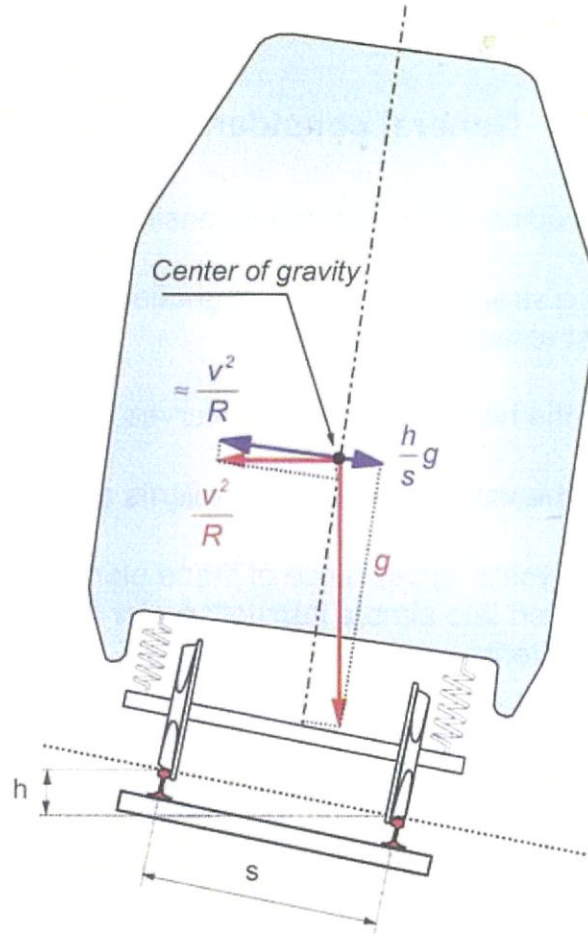
การวางแนวทางราบ (Horizontal Alignment)

แนวเส้นทางในแนวระนาบ ประกอบไปด้วยเส้นตรง (Tangent) เชื่อมต่อกับเส้นโค้ง (Circular Curve) โดยช่วงระหว่างเส้นตรงเปลี่ยนเป็นเส้นโค้งและเส้นโค้งเปลี่ยนเป็นเส้นตรงถูกเรียกว่า Spiral Transition Curve ซึ่งเป็นเส้นโค้งที่มีรัศมีไม่คงที่แต่มีความยาวเท่ากันทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ทางโค้งและตำแหน่งต่างๆ ในทางโค้ง [8]

สำหรับทางโค้งโดยเฉพาะในแนวเส้นทางรถไฟนั้น เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในโค้งรัศมี R และมีกัยยกโค้ง h จะเกิดแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) แรงหนีศูนย์กลาง (Centripetal Force) และแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ที่กระทำต่อตัวรถ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแรงทั้งหมดที่ได้กล่าวมาหากมีค่าไม่เหมาะสมก็สามารถส่งผลกระทบต่อ เช่น แรงเข้าสู่ศูนย์กลางทำให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สะดวกสบาย, ทำให้ขบวนรถเสี่ยงต่อการพลิกคว่ำ (Overturning) แรงกระทำด้านข้างที่มีค่ามากเกินไปทำให้บังใบล้อป็นและตกรางได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แรงที่กระทำต่อตัวรถบนทางโค้ง [4]

2.1.1.2 การยกโค้ง (Cant)

การออกแบบทางโค้งให้เหมาะสมเพื่อความปลอดภัยและความสะดวกสบายของผู้โดยสารอาจต้องมีการยกโค้ง โดยเฉพาะทางโค้งที่มีรัศมีน้อย เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Acceleration) ซึ่งสามารถพิจารณาความเร่งที่กระทำต่อรถไฟได้จากรูปที่ 2.2 และทำการเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ ดังนี้

$$\sum F = ma \quad (2.1)$$

$$F_d + F_p = F_c \quad (2.2)$$

$$ma_d + \frac{mgh}{s} = ma_c \quad (2.3)$$

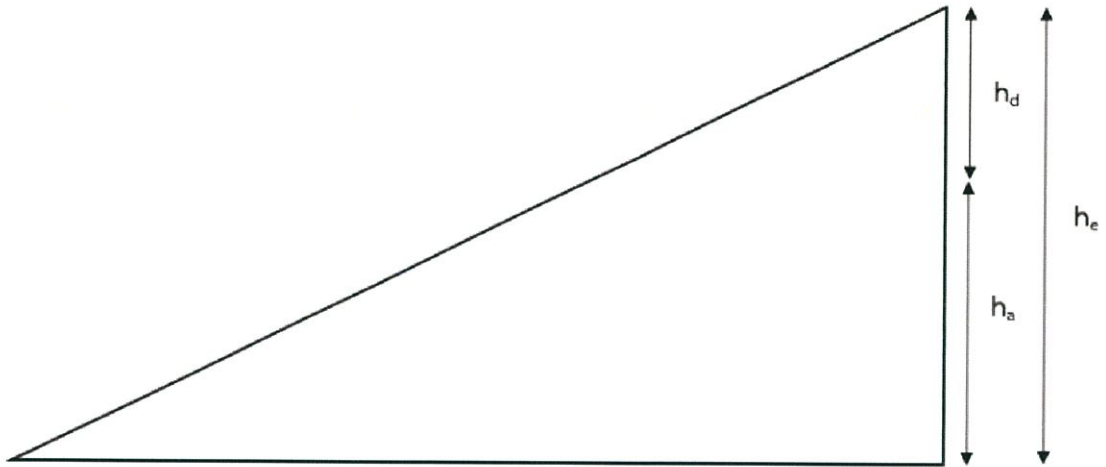
$$a_d + \frac{gh}{s} = a_c \quad (2.4)$$

$$a_d = a_c - \frac{gh}{s} = \frac{v^2}{R} - \frac{gh}{s} \quad (2.5)$$

- เมื่อ F_d คือ แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force), นิวตัน
 F_p คือ แรงหนีศูนย์กลาง (Centripetal Force), นิวตัน
 F_c คือ แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force), นิวตัน
 a_d คือ ความเร่งกระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration), เมตรต่อวินาที²
 a_c คือ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Acceleration), เมตรต่อวินาที²
 m คือ มวลของรถไฟฟ้า, กิโลกรัม
 g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration), (9.81 เมตรต่อวินาที²)
 h คือ ระยะยกโค้งที่ใช้งานจริง (Applied Cant), มิลลิเมตร
 s คือ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางรางถึงอีกจุดกึ่งกลางราง (Track Centres), มิลลิเมตร
 v คือ ความเร็วเข้าสู่โค้ง, เมตรต่อวินาที
 R คือ รัศมีทางโค้ง, เมตร

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่บนทางโค้งพบว่า ความเร่งกระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration) มีค่าลดลงตามระยะยกโค้งดังแสดงในสมการ 2.5

การยกโค้ง (Cant) เป็นผลต่างระหว่างความสูงของรางด้านนอก (Outer Rail) กับรางด้านใน (Inner Rail) ในบนทางโค้ง โดยจะทำการยกรางด้านนอกให้สูงขึ้นจากระดับปกติ ส่วนรางด้านในจะอยู่ในระดับปกติเดิม เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านโค้งที่มีรัศมี R ความเร็ว v และมีการยกโค้งขึ้นจะทำให้เกิดแรงที่กระทำต่อรถไฟ คือ แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ซึ่งถ้าค่าของแรงนี้เกิดขึ้นมากเกินไปค่าที่กำหนดอาจส่งผลให้เกิดการตกรางได้ จึงมีการออกแบบค่าสมดุลการยกโค้งที่ไม่ทำให้เกิดผลของแรงกระทำด้านข้างนี้ คือ ค่าสมดุลการยกโค้ง (Equilibrium Cant, h_e) แต่เมื่อพิจารณาถึงผู้โดยสารที่อยู่ในรถแล้วพบว่ารถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านโค้งที่มีการยกโค้งเท่ากับความสูงโค้งสมดุลนั้นทำให้เกิดความไม่สบายต่อผู้โดยสาร ดังนั้นจึงมีการออกแบบโดยลดความสูงจากความสูงโค้งสมดุลลงมาถึงส่วนที่ยกโค้งเพื่อความเหมาะสมต่อผู้โดยสารเรียกว่า ระยะยกโค้งที่ใช้งานจริง (Applied Cant, h_a) และระยะที่ลดลงมานั้น เรียกว่า ระยะขาดเขยยกโค้ง (Cant Deficiency, h_d) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระยะการยกโค้งต่างๆ

1. การวิเคราะห์การเคลื่อนที่บนทางโค้งของรถไฟ [6]

จากรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงผู้โดยสารในตู้รถพบว่า แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) มีผลต่อความสะดวกสบายของผู้โดยสาร ซึ่งค่าความเร่งด้านข้าง (Lateral Acceleration) สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$a_d = \frac{g \cdot h_d}{s} \quad (2.6)$$

เมื่อ a_d คือ อัตราเร่งด้านข้าง (Lateral Acceleration), เมตรต่อวินาที²
 g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration), (9.81 เมตรต่อวินาที²)
 s คือ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางรางถึงอีกจุดกึ่งกลางราง (Track Centres), (1,500 มิลลิเมตร)

h_d คือ ระยะขาดเขยการยกโค้ง (Cant Deficiency), มิลลิเมตร

2. การคำนวณหาความสูงการยกโค้ง [6]

ความสูงโค้งสมดุล (Equilibrium Cant)

$$h_e = \frac{sv_e^2}{gR} \quad (2.7)$$

เมื่อ v_e คือ ความเร็วสมดุลเข้าโค้ง, กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 R คือ รัศมีทางโค้ง, เมตร
 s คือ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางรางถึงอีกจุดกึ่งกลางราง (Track Centres), (1,500

มิลลิเมตร)

g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration), (9.81 เมตรต่อวินาที²)

ความสัมพันธ์ทั่วไปของโค้งสมดุลง

$$h_a + h_d = 11.82 \times \frac{v_e^2}{R} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$h_e = h_a + h_d \quad (2.9)$$

ความเร็วสูงสุดเข้าโค้ง (Maximum Permissible Speed)

$$v_m = 0.29 \sqrt{R(h_a + h_{d,max})} \quad (2.10)$$

เมื่อ v_m คือ ความเร็วสูงสุดเข้าโค้ง, กิโลเมตรต่อชั่วโมง

h_a คือ ระยะเวลายกโค้งที่ใช้งานจริง (Applied Cant), มิลลิเมตร

$h_{d,max}$ คือ ระยะเวลาชดเชยกโค้งสูงสุด (Maximum Allowable Deficiency of Cant),

มิลลิเมตร

2.1.1.3 การวิเคราะห์พลศาสตร์การเคลื่อนที่ของรถไฟ [9]

ในการจำลองการเดินทางนอกจากจะมีการคำนวณค่าต่างๆ ในทางโค้งแล้ว ยังมีการหาความเร็วในการเดินทางที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลในทางตรงมาพิจารณาร่วมด้วยโดยใช้สมการการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ดังนี้

จากกฎการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ได้ระยะทาง s เมตร ใช้เวลา t วินาที ความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่สามารถอธิบายด้วยสมการ

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (2.11)$$

อัตราเร่งเฉลี่ยที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่สามารถอธิบายได้จากสมการ

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.11) เมื่อแทนค่า dt ในสมการ (2.14) สามารถเขียนสมการในรูปของความเร็ว, อัตราเร่งและระยะทางได้ดังสมการ

$$vdv = ads \quad (2.13)$$

เมื่อนำสมการการเคลื่อนที่ทั้ง 3 สมการ (2.11, 2.12 และ 2.13) มาหาความสัมพันธ์ โดยให้อัตราเร่งคงที่ สามารถอธิบายในรูปสมการได้ดังนี้

$$v = u + at \quad (2.14)$$

$$v^2 = u^2 + 2as \quad (2.15)$$

$$s = \left(\frac{u+v}{2}\right)t \quad (2.16)$$

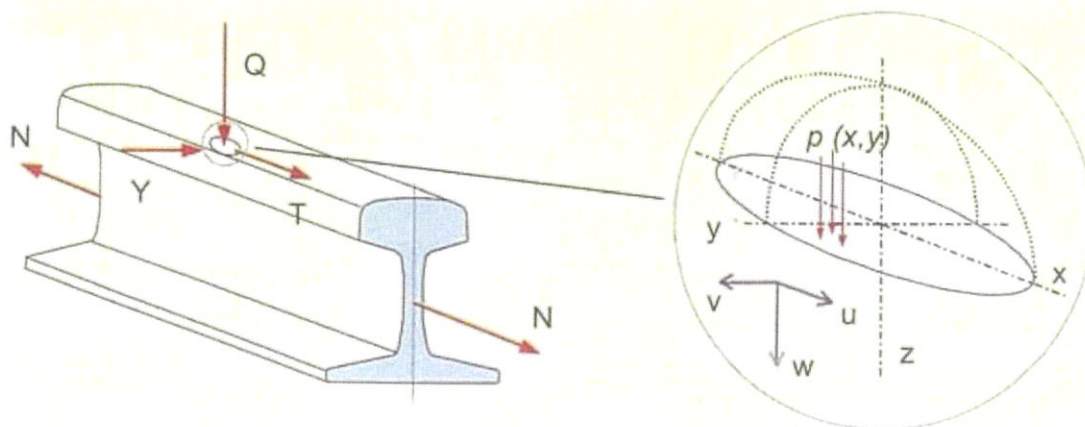
เมื่อ v คือ ความเร็วปลาย, เมตรต่อวินาที
 u คือ ความเร็วเริ่มต้น, เมตรต่อวินาที
 a คือ อัตราเร่ง, เมตรต่อวินาที²
 s คือ ระยะทาง, เมตร
 t คือ เวลา, วินาที

2.1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

2.1.2.1 การสัมผัสของล้อและราง (Wheel-Rail Interface)

สำหรับทางรถไฟ แรงที่เกิดขึ้นจากการที่ล้อสัมผัสโดยตรงกับรางมักเกิดขึ้นจาก Q แรงแนวตั้ง (Vertical Force) ในทิศทางแกน z , แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ในทิศทางแกน y , T แรงในทิศตามยาว (Longitudinal Force) ในทิศทางแกน x และ N ที่เป็นแรงภายนอก (External Force) และแรงภายในตามยาวเนื่องจากอุณหภูมิ (Internal Longitudinal Temperature Force) ตามรูปที่

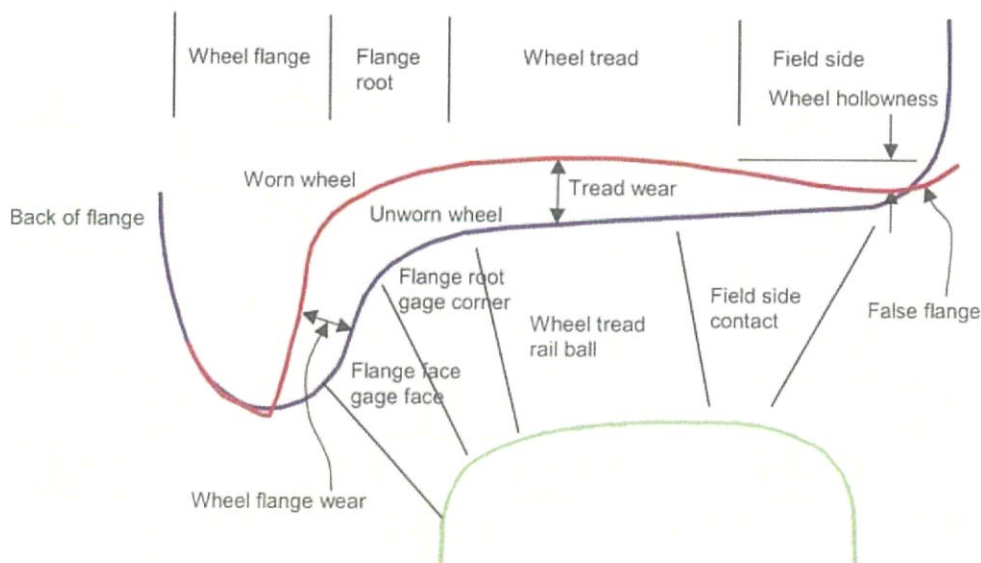
2.4



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของแรงที่กระทำต่อราง [4]

1. ตำแหน่งของการสัมผัสกันของล้อและราง

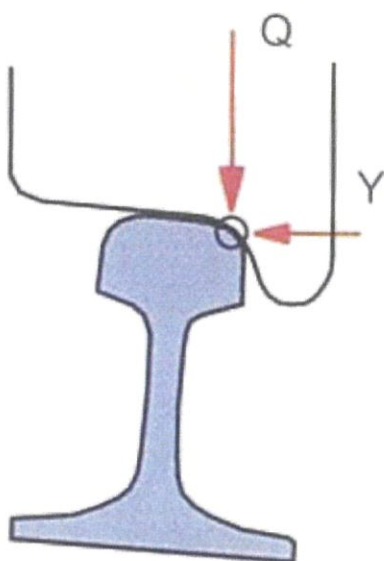
เนื่องจากรูปร่างของล้อกับรางมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปตามขนาดมาตรฐานขึ้นกับการนำไปใช้งาน ทำให้ในขณะที่รถไฟกำลังขับเคลื่อนการสัมผัสกันของล้อกับรางที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นการสัมผัสกันในทุกๆ ตำแหน่ง แต่จะมีเพียงบางตำแหน่งที่สัมผัสกันเท่านั้น โดยปกติถ้าเป็นทางตรง ตำแหน่งของล้อที่สัมผัสกับมุมหัวรางจะเกิดขึ้นบริเวณกลางล้อ (Tread) ส่วนทางโค้งจะเกิดบริเวณด้านในของบังใบล้อ (Wheel Flange) ซึ่งบริเวณที่เกิดการสัมผัสมักจะเป็นบริเวณที่เกิดการสึกหรอ (Wear) เป็นประจำ ดังรูปที่ 2.5 และจำเป็นต้องได้รับการซ่อมบำรุงอยู่เสมอ



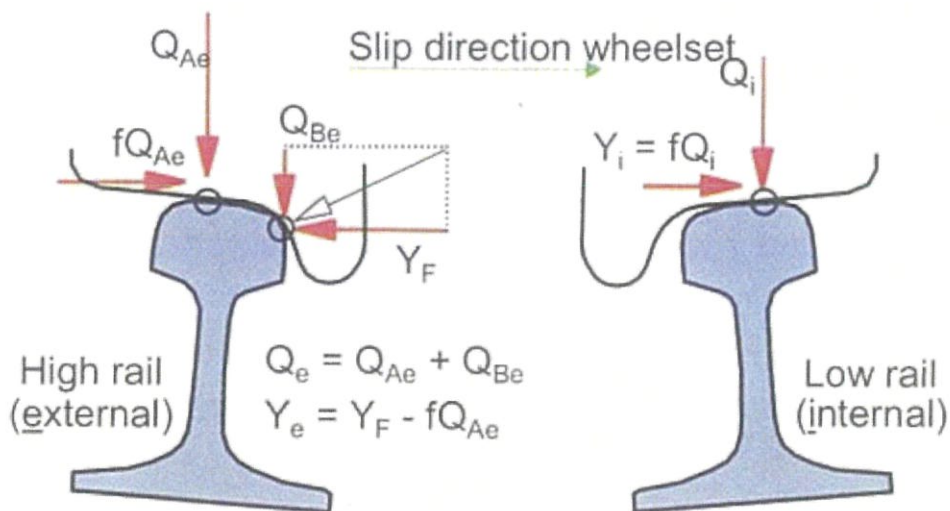
รูปที่ 2.5 บริเวณสึกหรอของล้อ [4]

การสัมผัสกันของล้อและรางนั้นมีจุดที่จะสัมผัสกันอยู่ 2 แบบ คือ จุดสัมผัส 1 จุด (Single-Point Contact) และจุดสัมผัส 2 จุด (Two-Point Contact) สำหรับกรณีแรกที่ล้อและรางที่สัมผัสกัน 1 จุด นั้นแรงกดเนื่องจากน้ำหนักจากล้อ (Wheel Load) และแรงด้านข้าง (Lateral Force) จะเกิดที่จุด

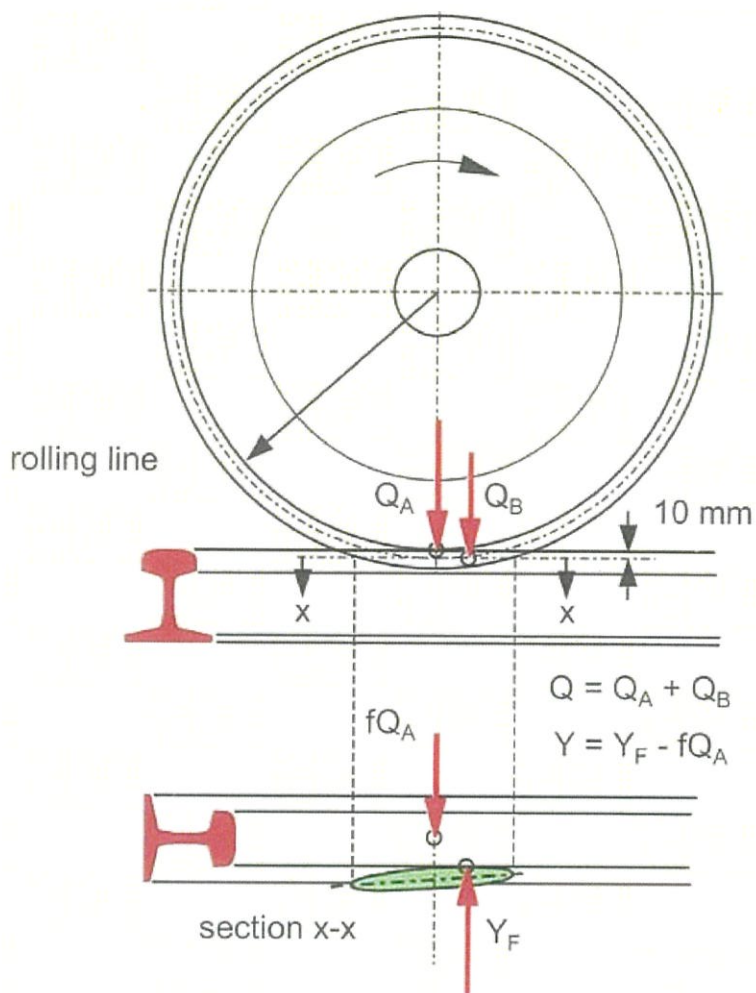
ดังกล่าวเพียงจุดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และอีกกรณีที่ล้อและรางสัมผัสกัน 2 จุด จะเกิดขึ้นในกรณีที่รถไฟวิ่งบนทางโค้ง (Curved Track) เมื่อตำแหน่งของชุดล้อผิดไปจากเดิมจากที่ควรเป็น กล่าวคือ ในขณะที่ชุดล้อชุดแรกเคลื่อนเข้าสู่ทางโค้ง จะเกิดมุมปะทะหนึ่งขึ้นทำให้เกิดแรงที่บังใบล้อ รางด้านที่สูงกว่า ซึ่งแรงบังใบนั้นเองทำให้ล้อเกิดการไถล (Slip) ในช่วงทางโค้งก่อให้เกิดแรงเสียดทานบนราง ดังรูปที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.6 จุดสัมผัสระหว่างล้อกับราง 1 จุด [4]



รูปที่ 2.7 จุดสัมผัสระหว่างล้อกับราง 2 จุดและแรงที่กระทำต่อรางในกรณีที่ล้อไถลบนทางโค้ง [4]



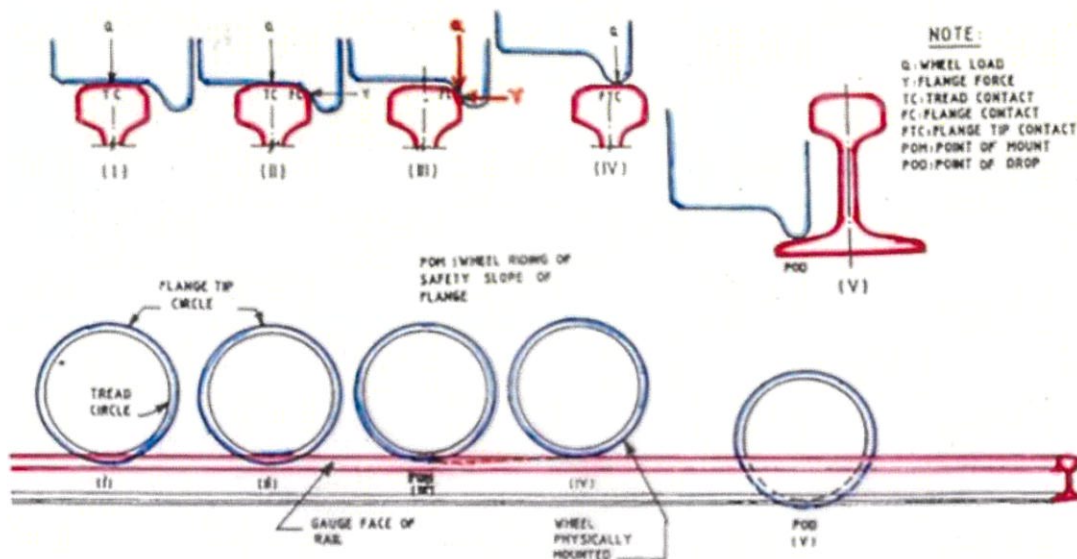
รูปที่ 2.8 จุดสัมผัสระหว่างบังใบล้อกับหัวราง [4]

2.1.2.2 การตกราง (Derailment)

อุบัติเหตุทางรถไฟที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายรูปแบบ แต่โดยส่วนใหญ่อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นมักเกิดจากการตกราง ในกรณีของการตกรางรถไฟจะหลุดออกจากทางรถไฟ ซึ่งเป็นผลจากปัจจัยต่างๆ ที่ก้าวข้ามขีดจำกัดความปลอดภัย การตกรางโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

1. การตกรางฉับพลัน เนื่องจากล้อหลุดออกจากราง โดยมักเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น การใช้ความเร็วมากเกินไป โดยเฉพาะในช่วงทางโค้งหรือประแจ (Turnout), การเปลี่ยนน้ำหนักฉับพลัน, น้ำหนักของขบวนรถไม่เหมาะสม, การเดินรถที่ไม่เหมาะสม, ล้อและเพลาชำรุด, ส่วนประกอบในทางรถไฟชำรุด เป็นต้น

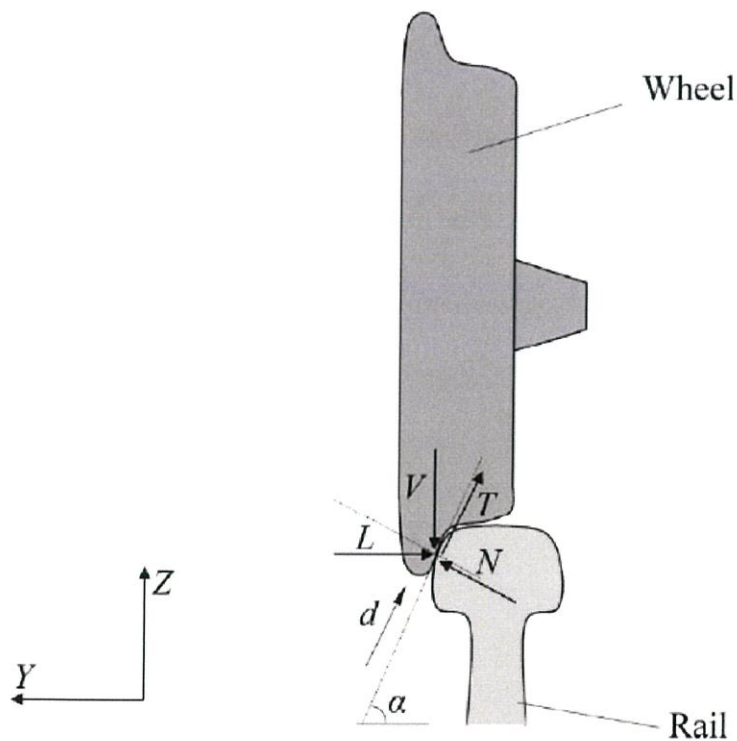
2. การตกรางที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากบังใบล้อป็นราง ซึ่งเป็นผลจากการที่ขบวนรถสูญเสียสมดุลในขณะที่ขับเคลื่อน รวมถึงเกิดจากความบกพร่องของสภาพทาง โดยกระบวนการของบังใบล้อป็นรางแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนของล้อป็นรางในการตรวง [10]

สูตรของนาดาล (Nadal's Formula) [7]

ในขณะที่เกิดการตรวงนั้น เมื่อบังใบล้ออยู่ในขั้นตอนของการป็นรางจะเกิดแรงกระทำโดยตรงบนจุดสัมผัสระหว่างล้อกับราง ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 จุดสัมผัสระหว่างบังใบล้อกับราง [7]

จากรูปที่ 2.10 L คือ แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) และ V คือ แรงกระทำแนวตั้ง (Vertical Force) โดยแรงทั้งสองจะมีความสัมพันธ์เป็นอัตราส่วน (Ratio) นั่นคือ $\frac{L}{V}$ โดยการตรรกะจะเกิดขึ้นหากอัตราส่วนนั้นมีค่าเกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งอัตราส่วน $\frac{L}{V}$ สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของขนาดล ซึ่งทำการเขียนสมการสมดุลแรงได้สมการ ดังนี้

$$N = V \cos \alpha + L \sin \alpha = V \left(\cos \alpha + \frac{L}{V} \sin \alpha \right) \quad (2.17)$$

$$N = V \sin \alpha - L \cos \alpha = V \left(\sin \alpha - \frac{L}{V} \cos \alpha \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$(V \sin \alpha - L \cos \alpha) < \mu \times N \quad (2.19)$$

$$T = \mu \times N \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$(V \sin \alpha - L \cos \alpha) \geq \mu \times N \quad (2.21)$$

จัดรูปสมการใหม่และสมมติว่าการป็นรางเกิดขึ้นเมื่อ

$$T = \mu \times N$$

หรือแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการดันให้ล้อเริ่มขยับขึ้นไปให้ห้วงรางมีค่าสูงสุด ดังนั้นจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของขนาดล เป็นดังนี้

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (2.22)$$

เมื่อ

L คือ แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force), นิวตัน (N)

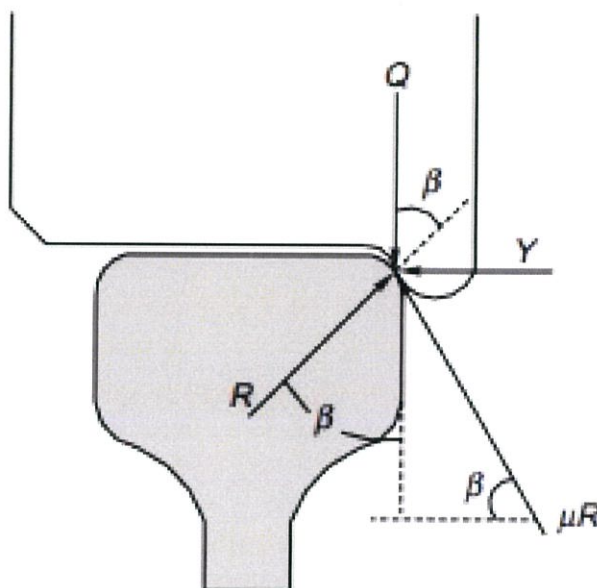
V คือ แรงกระทำแนวตั้ง (Vertical Force), นิวตัน (N)

α คือ มุมสัมผัส (Contact Angle), องศา ($^{\circ}$)

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการดันล้อ, $T = \mu \times N$

จากความสัมพันธ์ของสูตรของขนาดล (Nadal's Formula) พบว่าเมื่อค่าของแรงกระทำด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงกระทำแนวตั้งมีค่าคงที่ อาจส่งผลให้เกิดการตรรกะได้

สำหรับความสัมพันธ์ของขนาดลในงานวิจัยบางแห่งอาจมีการใช้ตัวแปรที่แทนค่าของแรงกระทำ ทั้งสองด้านต่างไปจากนี้ โดยส่วนใหญ่จะแทนเป็น Y คือ แรงกระทำด้านข้างและ Q คือ แรงกระทำแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แรงที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับรางและมุมแหลมของแรงที่กระทำ [1]

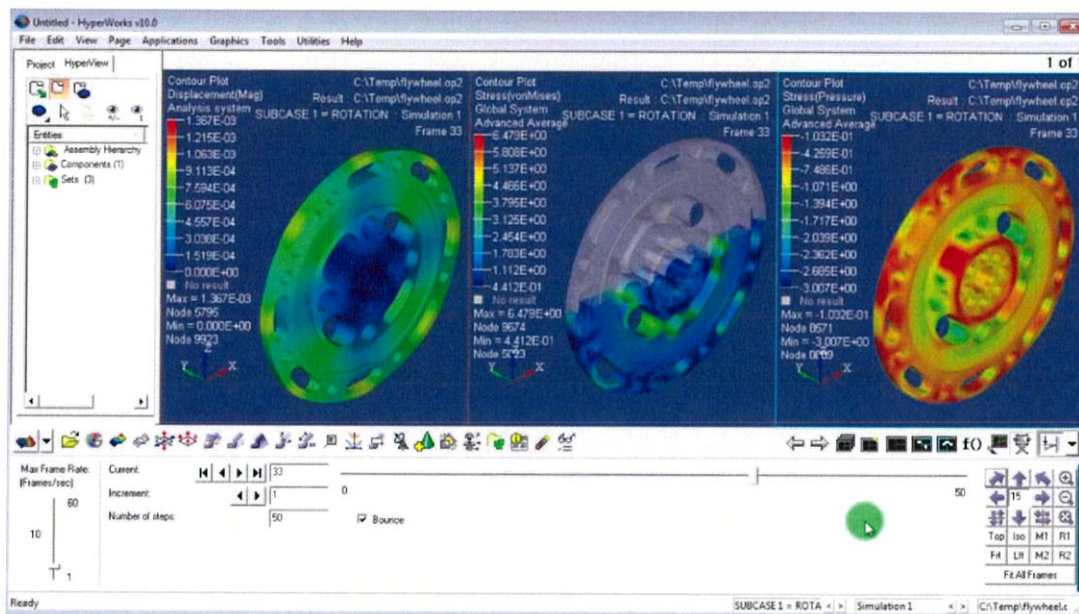
2.1.2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) [3]

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis หรือ FEA) เป็นวิธีการเฉพาะในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในงานด้านวิศวกรรม ซึ่งจะใช้กระบวนการเชิงตัวเลขเรียกว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่ถูกกำหนดมา โดยทั่วไประเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกนำมาใช้แก้ไขปัญหาสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations หรือ PDE) จึงจำเป็นต้องนำความรู้ทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์เพื่อให้เกิดความเข้าใจและหาคำตอบของปรากฏการณ์ทางกายภาพนั้นได้

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนหลักทั้งหมด 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การประมวลผลล่วงหน้าหรือการสร้างแบบจำลอง (Pre-Processing or Modeling)
 - ขั้นตอนการสร้างไฟล์ข้อมูลที่ออกแบบโดยวิศวกรสำหรับการวิเคราะห์
2. การประมวลผลหรือการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Processing or Solving or Finite Element Analysis)
 - ขั้นตอนนี้จะทำการสร้างไฟล์ภาพขึ้นมาเพื่อส่งออกไปยังขั้นตอนต่อไป

3. การประมวลผลภายหลังหรือการสร้างรายงาน ภาพ ภาพเคลื่อนไหว หรืออื่นๆ จากไฟล์ที่ถูกนำออกมา (Post-Processing or Generating Report, Image, Animation, etc. from the output) โดยลักษณะการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ [3]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Brian Maquis และ Robert Grief [11]

ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ค่าลิมิตของขนาด (Nadal limit) ในการคาดคะเนการตกราง เงื่อนไชต่างๆที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มุมปะทะของเพลลา มุมสัมผัส แรงเสียดทาน แรงกระทำจากด้านข้าง และแรงกระทำในแนวตั้งรวมอยู่ด้วย โดยค่าลิมิตขนาดจะแม่นยำก็ต่อเมื่อใช้กับกรณีที่มีมุมปะทะมาก เนื่องจากกำหนดให้เพลลาเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เป็นการเคลื่อนที่แบบคงที่ (Steady Motion) และเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) การศึกษาในงานวิจัยนี้เริ่มจากการหาความสัมพันธ์ของแรงที่สัมผัสกับบั้งไบล้อเนื่องจากความล้า (F_{tan}) และแรงปกติ (N) โดยทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันของแรงกระทำจากด้านข้าง ทั้งนี้การป็นรางจะไม่เกิดขึ้นเมื่อขนาดของแรงกระทำจากด้านข้างมากขึ้น เพราะ F_{tan} มีขนาดคงที่และจุดที่บั้งไบล้อสัมผัสกับรางนั้นสไลด์ลงมาด้านล่างของราง แต่ในความเป็นจริงสำหรับค่าลิมิตขนาดนั้นค่า F_{tan} จะน้อยกว่า ทำให้เกิดการป็นรางได้ จึงมีคำอธิบายอื่นๆเพิ่มเติมโดยขึ้นอยู่กับเปรียบเทียบแรงล้าในรางกับพิกัดของจุดสัมผัส นอกจากนี้ยังศึกษาความล้าตามยาวและมุมปะทะด้วย สำหรับมุมปะทะน้อยๆ จะสมมติให้ $F_{tan} = \mu N$

หลังจากที่ได้เปลี่ยนแปลงค่า F_{tan} และค่า N พบว่าแรงทางด้านข้างที่ F_{tan} ใดๆ จะมีขนาดต่ำกว่าค่าอิ่มตัว (Saturated Value) ซึ่งเป็นจุดที่บั้งไบล้อเปลี่ยนจากการสไลด์ลงมาเป็นป็นรางเมื่อชุดเพลลา

วิ่งไปข้างหน้านี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของค่าลิมิตนาตาล ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นยังอธิบายถึงว่าการตรวง การป็นราง หรือการสไลด์ของบั้งไบนั้นขึ้นอยู่กับค่า L โดยที่ F_{tan} มีขนาดเท่าเดิม

งานวิจัยของ Roberto Spinola Baebosa [12]

ได้ทำการจำลองการตรวงเมื่อเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างต่อชุดเพลลา โดยมีแรงจูงใจจากการเปรียบเทียบระหว่างการตรวงอย่างอิสระกับค่าลิมิตความปลอดภัย ด้วยเหตุนี้ทางผู้จัดทำจึงใช้การจำลองเชิงตัวเลขเมื่อเพิ่มขนาดแรงกระทำทางด้านข้างของเพลลาและเปรียบเทียบกับค่าลิมิตความปลอดภัย ใช้มาตรฐานที่ต่างออกไป โมเดลชุดเพลลาอย่างง่ายได้ถูกใช้ในการจำลองการตรวงในรูปแบบเงื่อนไขต่างๆ ส่วนประกอบแรงสัมผัส รวมทั้งแรงตามยาวและผลของการหมุน (Spin Effect) จะถูกกำหนดว่าอยู่ในเงื่อนไขสถานะคงตัว (Steady-State) ในช่วงเริ่มต้นการตรวง อัตราส่วนของแรงสัมผัสจะถูกใช้ในการวิเคราะห์สูตรแบบ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาลิมิตความปลอดภัย ผลลัพธ์ของการจำลองได้มาจาก 2 วิธีที่เทียบกับผลลัพธ์ที่ถูกตีพิมพ์และค่าลิมิตความปลอดภัยถูกกำหนดโดย 2 มาตรฐาน ผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันแนวคิดของนาตาลและแสดงให้เห็นว่าสูตรการวิเคราะห์ความปลอดภัยแบบ 3 มิติ มีลิมิตความปลอดภัยสูงกว่าเล็กน้อยสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยและลิมิตความปลอดภัยน้อยสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูง ในการเปรียบเทียบผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Fastsim

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลลัพธ์ที่มาจากการคำนวณที่ตีพิมพ์โดย ปาสคาล (Pascal) แต่จะมีขนาดมากกว่าสมการความสัมพันธ์ของนาตาล ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่แสดงจากการจำลอง 3 มิติ เพื่อหาลิมิตความปลอดภัยนั้น มีความคลาดเคลื่อนอยู่ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม Fastsim

งานวิจัยของ Fred Mau, Russel Bowey และ Bruce Sismey [13]

ได้กล่าวถึงการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรางที่ส่งผลต่อระดับของระยะขาดเขยการยกโค้งที่ยอมรับได้ (Allowable Cant Deficiency Levels) ถูกดำเนินการในปี 2005 และ 2006 เพื่อเพิ่มขนาดระยะขาดเขยการยกโค้ง (Cant Deficiency) ของรถไฟสายเชื่อมระหว่างรัฐของประเทศออสเตรเลียในการรองรับความเร็วในโค้งที่มากขึ้นของรถขนส่งสินค้า จากการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มความเร็วจนมา 10% สามารถทำได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ต้องปรับปรุงส่วนประกอบของรางที่สำคัญ งานวิจัยนี้ถูกควบคุมโดย Monash University's Institute of Railway Technology (IRT) ร่วมกับ The Cooperative Research Centre for Railway Engineering and Technologies' (Rail CRC) และยังได้รับการสนับสนุนจากหลายหน่วยงาน เช่น Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในการหาบุคคลากรทางด้าน Track Engineer, Pacific National Limited (PNL) ในการสนับสนุนทางด้าน Vehicle engineering การดำเนินงานตลอดระยะเวลา 2 ปีในการวิจัยภาระที่รถไฟกระทำต่อรางในโค้ง โดยมี 4 ขั้นตอน คือ 1.การค้นคว้าจากห้องสมุด 2.การวัดค่าการตอบสนองของพลศาสตร์ยานพาหนะ (Vehicle Dynamic Response Measurement)

3.การวัดภาระในราง 4.การวิเคราะห์ข้อมูล โดยคณะกรรมการจาก Rail CRC จะมีส่วนร่วมในการให้คำแนะนำและติชม งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีในการออกแบบรางและการก่อสร้างตามมาตรฐานปัจจุบัน สามารถที่จะรองรับความเร็วในโค้งได้มากขึ้นสำหรับรถไฟที่ใช้อยู่ ซึ่งจะถูควบคุมอย่างระมัดระวัง และยังคงในเรื่องของเรขาคณิตของทางรถไฟ (Track Geometry) เพื่อลดการกระตุ้นของพลศาสตร์ยานพาหนะ (Excitation of Vehicle Dynamics) และเพื่อจำกัดอัตราการเสื่อมสภาพจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของขีดจำกัดของระยะขาดเซกการยกโค้งที่ยอมรับได้ (Allowable Cant Deficiency Limit) นั้นส่งผลให้แรงระหว่างล้อกับรางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่แรงดังกล่าวยังอยู่ในระดับที่ยังยอมรับได้

งานวิจัยของ Hiroyuki Sugiyama et al. [14]

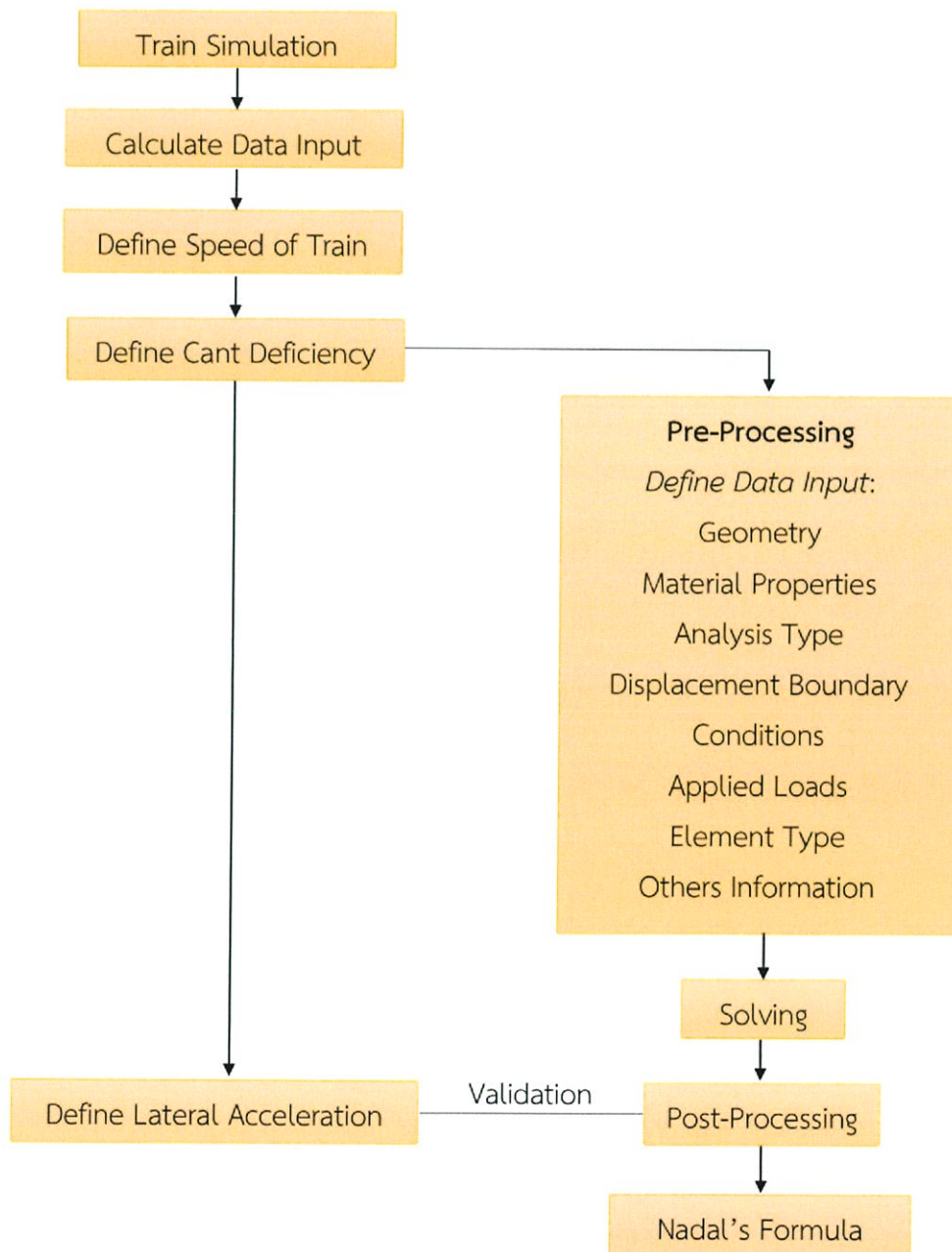
ได้ใช้วิธีการเชิงตัวเลขสำหรับวิเคราะห์จุดสัมผัสระหว่างล้อและรางทั้งที่เป็นจุดสัมผัสหนึ่งจุดและจุดสัมผัสสองจุด เพื่อการคาดการณ์ตำแหน่งจุดสัมผัสในช่วงโค้งต่อบนทางโค้งที่มีรัศมีน้อย โดยวิธีการที่ถูกรวบรวมในงานวิจัยเป็นการใช้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามยาวของจุดสัมผัสที่เกิดตลอดช่วงทางโค้งรวมไปถึงเส้นรอบวงของจุดสัมผัสบนบังใบล้อและนำผลลัพธ์จากการจำลองจุดสัมผัสหนึ่งจุดและสองจุดที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่ใช้รถไฟวิ่งในทางโค้งที่มีรัศมี 48 เมตรและมีการวัดค่าของการเคลื่อนตำแหน่งตามแนวยาว (Lateral Displacement) ในทางโค้งดังกล่าว

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์สำหรับจุดสัมผัสหนึ่งจุดและจุดสัมผัสสองจุดเมื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการทำการทดลองโดยการทดสอบบนรางจริงที่ทางโค้งรัศมี 48 เมตรนั้น พบว่าผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นไปในทางที่ดี โดยมาจากการคำนวณเชิงตัวเลขที่แม่นยำ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ได้มีการแบ่งการดำเนินงานไว้ทั้งหมด 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 การจำลองการเดินรถ (Train Simulation) โดยการคำนวณจากทฤษฎี ส่วนที่ 2 การสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดของงานวิจัยได้ทำการสรุปออกมาเป็นลำดับดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 กรณีศึกษา

ระบบขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานครนั้น ได้มีการยกโครงการรถไฟฟ้าที่อยู่ในขั้นตอนการเตรียมการสำหรับให้บริการในอนาคตที่มีความน่าสนใจและสามารถเข้าถึงข้อมูลได้มาเป็นกรณีศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ คือ โครงการรถไฟฟ้าสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง-บางแค

3.1.1 โครงการรถไฟฟ้าสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง-บางแค

รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล (พุทธมณฑลสาย 4-หลักสอง-หัวลำโพง-บางซื่อ-เตาปูน-ท่าพระ) (Metropolitan Rapid Transit Chaloem Ratchamongkhon Line, MRT Blue Line) หรือรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน ซึ่งเรียกตามสีที่กำหนดในแผนแม่บทโครงการระบบขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ปัจจุบันมีระยะทางรวมประมาณ 21.2 กิโลเมตร เส้นทางเริ่มต้นจากสถานีหัวลำโพงถึงสถานีเตาปูน มีสถานีทั้งหมด 19 สถานี

เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินมีโครงการก่อสร้างส่วนต่อขยาย เป็นโครงสร้างรถไฟฟ้าแบบยกระดับ ระยะทาง 21.5 กิโลเมตร สถานียกระดับ 15 สถานี และโครงสร้างรถไฟฟ้าแบบใต้ดินระยะทาง 5.4 กิโลเมตร สถานีใต้ดิน 4 สถานี แบ่งออกเป็น 2 เส้นทาง ได้แก่ ช่วงบางซื่อ – ท่าพระ เป็นเส้นทางจากปลายทางด้านทิศเหนือ จากสถานีเตาปูนไปยังถนนจรัญสนิทวงศ์และแยกท่าพระ และช่วงหัวลำโพง – บางแค เป็นเส้นทางจากปลายทางด้านทิศใต้ จากสถานีหัวลำโพงไปยังท่าพระและบางแค ซึ่งทั้ง 2 เส้นทางจะเชื่อมต่อกันที่สถานีท่าพระ ก่อให้เกิดเป็นเส้นทางรถไฟฟ้าวงแหวน [15] ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

สำหรับการเลือกเส้นทางของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (Blue Line Extension) ที่ถูกแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงบางซื่อ – ท่าพระ และ ช่วงหัวลำโพง – บางแค มาทำการจำลองการเดินรถ (Train Simulation) โดยจะพิจารณาจากจำนวนของทางโค้งในช่วงเส้นทางที่มีมากกว่า เนื่องจากการเดินรถในเส้นทางที่มีทางโค้งเป็นจำนวนมาก จะมีโอกาสเกิดการตกรางได้สูงกว่าเส้นทางที่มีทางโค้งน้อย ดังนั้นจึงได้ยกเส้นทางช่วงหัวลำโพง – บางแคที่มีจำนวนโค้งมากกว่ามา เป็นสำคัญ

เส้นทางของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (Blue Line Extension) ช่วงหัวลำโพง-บางแค ในทิศตะวันออก (Eastbound) มีระยะทางรวมประมาณ 15.9 กิโลเมตร เป็นโครงสร้างทางวิ่งใต้ดินสำหรับช่วงหัวลำโพง-ท่าพระ ระยะทางประมาณ 5.4 กิโลเมตร มีสถานีใต้ดิน 4 สถานี คือ สถานีวัดมังกรกมลาวาส สถานีวังบูรพา สถานีสนามไชย สถานีอิสรภาพ และโครงสร้างทางวิ่งยกระดับในช่วงท่าพระบางแค ระยะทางประมาณ 10.5 กิโลเมตร มีสถานีจำนวน 7 สถานี คือ สถานีท่าพระ สถานีบางไผ่ สถานีบางหว้า สถานีเพชรเกษม 48 สถานีภาษีเจริญ สถานีบางแค และสถานีหลักสอง [16] ดังรูปที่ 3.4

แผนเปิดให้บริการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงบางซื่อ-ท่าพระ และหัวลำโพง-บางแค



รูปที่ 3.4 เส้นทางรถไฟฟ้าสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง-บางแค [19]

3.2 การจำลองการเดินรถ (Train Simulation)

การจำลองการเดินรถด้วยการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีเพื่อหาค่าของตัวแปรนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จึงถือเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ต่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) และเพื่อให้การจำลองการเดินรถมีความแม่นยำและสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การจัดการข้อมูลและการออกแบบขั้นตอนต่างๆ จึงเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการอย่างรอบคอบ โดยขั้นตอนในการจำลองการเดินรถได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การค้นคว้ารวบรวมข้อมูลสำหรับการจำลองการเดินรถและการคำนวณการจำลองการเดินรถ

3.2.1 การค้นคว้ารวบรวมข้อมูลสำหรับการจำลองการเดินรถ

การคำนวณแบบจำลองการเดินรถนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลการออกแบบเส้นทางของโครงการเพื่อศึกษารายละเอียดของเส้นทาง ได้แก่ ระยะทางในช่วงทางตรง ระยะทางในช่วงทางโค้ง รัศมีโค้ง ข้อมูลการเดินรถ และข้อมูลโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาที่ถูกออกแบบ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถศึกษาได้จากเอกสารของโครงการ เรียกว่า Track Alignment Drawings [3] และ System Performance Analysis [4]

ในขั้นแรกของการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณแบบจำลองการเดินรถนั้นจะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของพิกัด (Chainage) ของจุดต่างๆ ในเส้นทางจาก Track Alignment Plan and Profile

เมื่อทำการตรวจสอบพิกัดให้แต่ละจุดตลอดเส้นทางแล้ว ต่อมาจึงทำการนำค่าพิกัดของตำแหน่งที่ถูกต้องทั้งหมดจัดทำขึ้นเป็นตารางและนำมาคำนวณเป็นระยะทาง แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงทางตรง (Tangent) และช่วงทางโค้ง (Circular) โดยตารางที่จัดทำขึ้นมานั้นเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าที่ต้องทำการกำหนดลงในตาราง ได้แก่ ค่าการยกโค้ง (Cant), ความเร็วในการเดินรถ (Speed), ความเร่ง (Acceleration) และค่าที่ต้องคำนวณให้ได้ผลลัพธ์มาใส่ลงในตาราง ได้แก่ ความเร่งกระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration), สถานะการเดินรถ (Status), ระยะทางจริงในช่วงความเร็วที่ได้ (Actual Travelling Distance), เวลาในการเดินรถ (Time)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสำหรับใช้คำนวณแบบจำลองการเดินทาง

Station	POINT	STATUS	Travelling Distance, m		Speed, km/h		SP-IN (m)	RADIUS (m)	SP-OUT (m)	Acceleration, m/s ²		Cant, mm			Time (sec)
			Total	Actual	u	v				ax	ay	he	hd	ha	
LAK SONG	BS20	Stop	0												
	Tangent		555.694												
	Circular		58.029				20.00	12000.00	20.00						
	Tangent		788.293												
BANH KHAE	BS19	Stop	0												
	Tangent		1300.440												
PHASI CHAROEN	BS18	Stop	0												
	Tangent		350.758												
	Circular		162.937				55.00	450.00	55.00						
	Tangent		732.349												
PHET KASEM 48	BS17	Stop	0												
	Tangent		746.747												
	Circular		137.576				55.00	450.00	55.00						
	Tangent		472.692												
BANG WA	BS16	Stop	0												
	Tangent		1005.479												
BANG PHAI	BS15	Stop	0												

หมายเหตุ: SP-IN คือ Spiral In

SP-OUT คือ Spiral Out

ตัวอย่างการคำนวณการจำลองการเดินทาง (Train Simulation)

สถานีอิสรภาพ (It Saprapphap Station) – สถานีสนามไชย (Sanam Chai Station)

ระยะทาง 1469.489 เมตร

ช่วงที่ 2 Circular Curve – Tangent – Circular Curve

Tangent

ระยะทาง 118.751 เมตร

ช่วง Deacceleration;

จาก $v^2 = u^2 + 2as$

เมื่อ $u = 72 \text{ km/h}$, $v = 70.64 \text{ km/h}$, $a = -0.9 \text{ m/s}^2$

$$[(70.64 \text{ km/h})(5/18)]^2 = [(72 \text{ km/h})(5/18)]^2 + 2(-0.9 \text{ m/s}^2) s$$

$$s = 8.316 \text{ m}$$

จาก $v = u + at$

เมื่อ $u = 72 \text{ km/h}$, $v = 70.64 \text{ km/h}$, $a = -0.9 \text{ m/s}^2$

$$[(70.64 \text{ km/h})(5/18)] = [(72 \text{ km/h})(5/18)] + (-0.9 \text{ m/s}^2) t$$

$$t = 0.42 \text{ sec}$$

ช่วง Cruise;

$$s = 118.751 - 8.316 = 110.435 \text{ m}$$

จาก $v = \frac{s}{t}$

เมื่อ $v = 72 \text{ km/h}$

$$[(72 \text{ km/h})(5/18)] = (110.435 \text{ m}) / t$$

$$t = 5.52 \text{ sec}$$

Circular Curve

ระยะทาง 508.468 เมตร

รัศมี 295.00 เมตร

จาก $h_e = 11.82 \times \frac{v_e^2}{R}$

เมื่อ $v_e = 70.64 \text{ km/h}$

$$h_e = 11.82 \times [(70.64 \text{ km/h})^2 / (295 \text{ m})] = 199.94 \text{ mm.}$$

กำหนดให้ Applied cant มีค่าเท่ากับ 125.00 mm.

$$h_d = 199.94 - 125.00 = 74.94 \text{ mm.}$$

จาก $a_d = \frac{gh_d}{s}$

เมื่อ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $s = 1500 \text{ mm}$, $h_d = 74.94 \text{ mm}$

$$a_d = (9.81\text{m/s}^2)(74.94\text{mm})/(1500\text{mm}) = 0.49 \text{ m/s}^2$$

จาก $v = \frac{s}{t}$

เมื่อ $v = 70.64 \text{ km/h}$

$$[(70.64\text{km/h})(5/18)] = (508.468\text{m})/ t$$

$$t = 25.91 \text{ sec}$$

ในการคำนวณการจำลองการเดินรถ ค่าความเร็วจะถูกกำหนดขึ้น โดยต้องไม่เกินความเร็วสูงสุดที่รถไฟสามารถทำได้ ต่อไปจึงทำการคำนวณค่าระยะทางที่ใช้ในช่วงนั้นๆ โดยระยะทางรวมต้องเท่ากันกับระยะทางที่กำหนดตาม Alignment Drawings

จากนั้นนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ในช่วงทางโค้งมาใช้คำนวณหาค่าสมดุลการยกโค้ง (Equilibrium Cant) เพื่อกำหนดค่าระยะยกโค้งที่ใช้งานจริง (Applied Cant) โดยค่าระยะการยกโค้งที่ใช้งานจริงที่กำหนดขึ้นมานั้น เมื่อนำไปหาค่าระยะชดเชยการยกโค้ง (Deficiency Cant) แล้วนำค่าระยะชดเชยการยกโค้งไปคำนวณหาค่าความเร่งกระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration) โดยความเร่งกระทำด้านข้างที่ได้จะต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบของการรถไฟฟ้ามหานครของประเทศไทย จึงจะสามารถใช้ค่าความเร็วและค่าระยะยกโค้งที่ใช้งานจริงได้

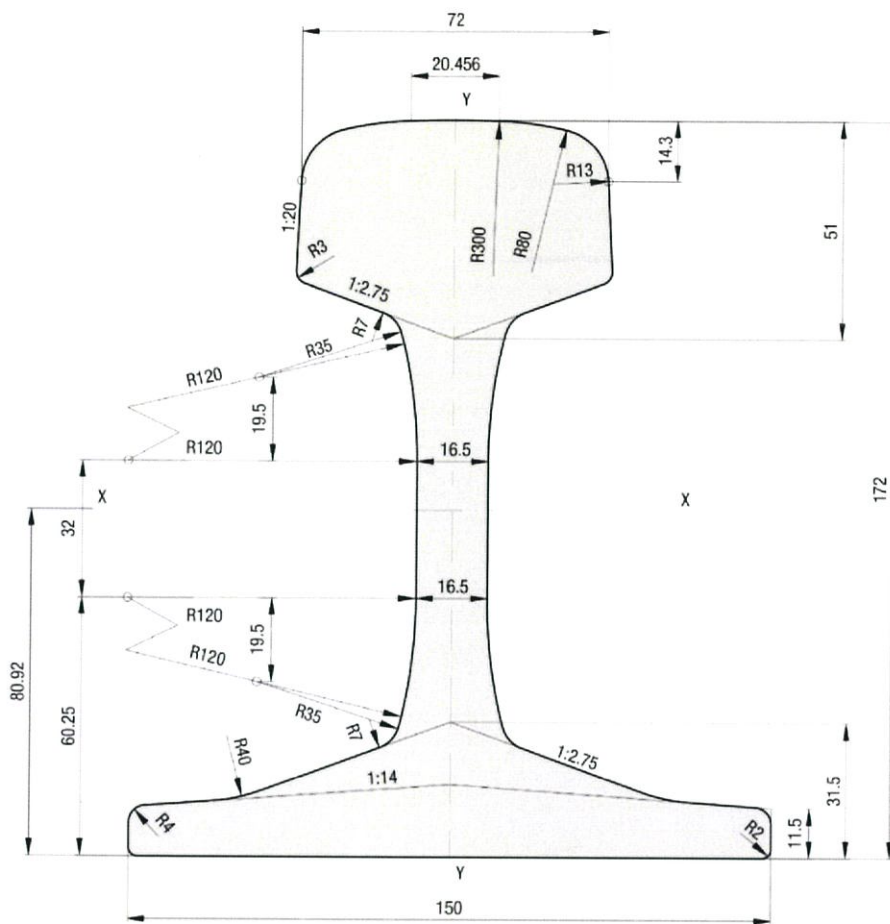
จากการคำนวณการจำลองการเดินรถทำให้ทราบค่าตัวแปรที่จะนำไปสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์และวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ รัศมีโค้ง (Curve Radius), ระยะยกโค้งที่ใช้งานจริง (Applied Cant), ความเร็วในทางโค้ง (Curve Speed)

3.3 การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

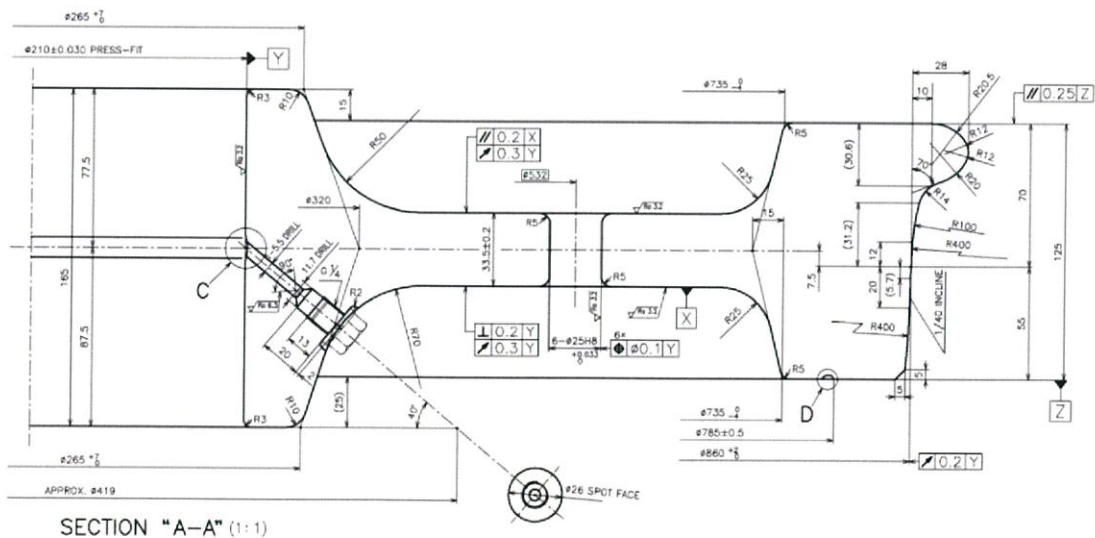
ในการสร้างแบบจำลองเพื่อนำมาวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ การขึ้นรูปวัตถุที่ต้องการวิเคราะห์และการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ที่เกิดขึ้นกับรถไฟ

3.3.1 การขึ้นรูปรางโค้งและชุดเพลาล้อโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เบื้องต้นต้องมีการขึ้นรูปชิ้นงานที่จะใช้ในการวิเคราะห์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ รางขนาดมาตรฐาน UIC60 ดังรูปที่ 3.5 และชุดเพลาล้อจำนวน 1 ชุด ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ราง UIC60 [20]



SECTION "A-A" (1:1)

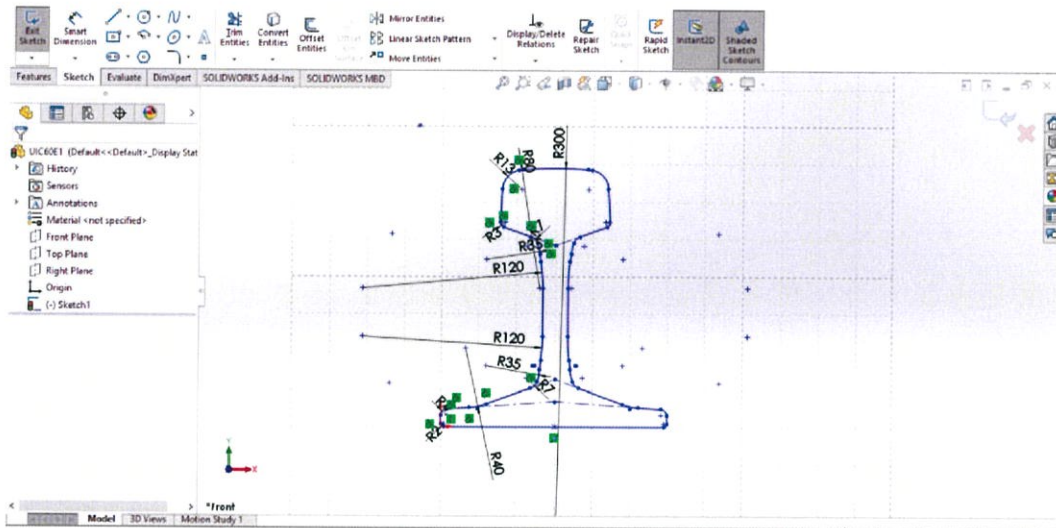
รูปที่ 3.6 ขนาดต่อรถไฟมาตรฐานของโครงการรถไฟฟ้าในประเทศไทย [21]

3.3.1.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปร่าง UIC60 E1

ราง 60E1 หรือ UIC60 ถูกผลิตขึ้นตามมาตรฐานยุโรป EN 13674-1 ใช้สำหรับการก่อสร้างทางรถไฟ เป็นรางหน้าตัดรูปตัว T มีมวล 60.21 กิโลกรัมต่อเมตร สำหรับทางรถไฟมาตรฐานจะใช้รางชนิดนี้สำหรับการขนส่งที่มีการจราจรหนาแน่นปานกลางถึงหนาแน่นมาก [22] โดยภาพหน้าตัดของรางแสดงดังรูปที่ 3.5

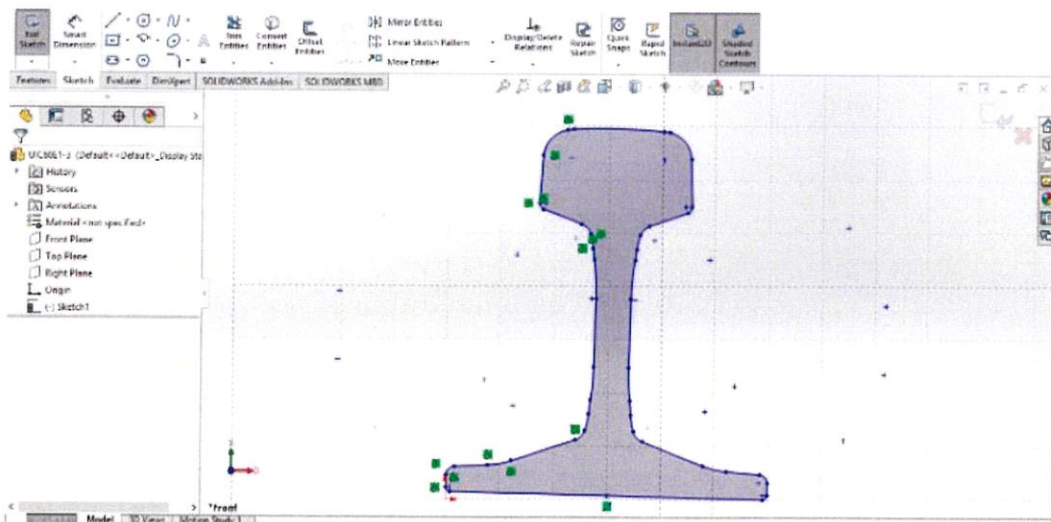
สำหรับการขึ้นรูปร่าง UIC60 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ในขั้นแรกทำการเลือกระนาบ Front Plane สำหรับวาดเส้น โดยระนาบนี้จะอยู่ในแกน X-Y ทำการวาดเส้นตามขนาดหน้าตัดรางตามรูปที่ 3.5 โดยใช้คำสั่ง Sketch ดังรูปที่ 3.7



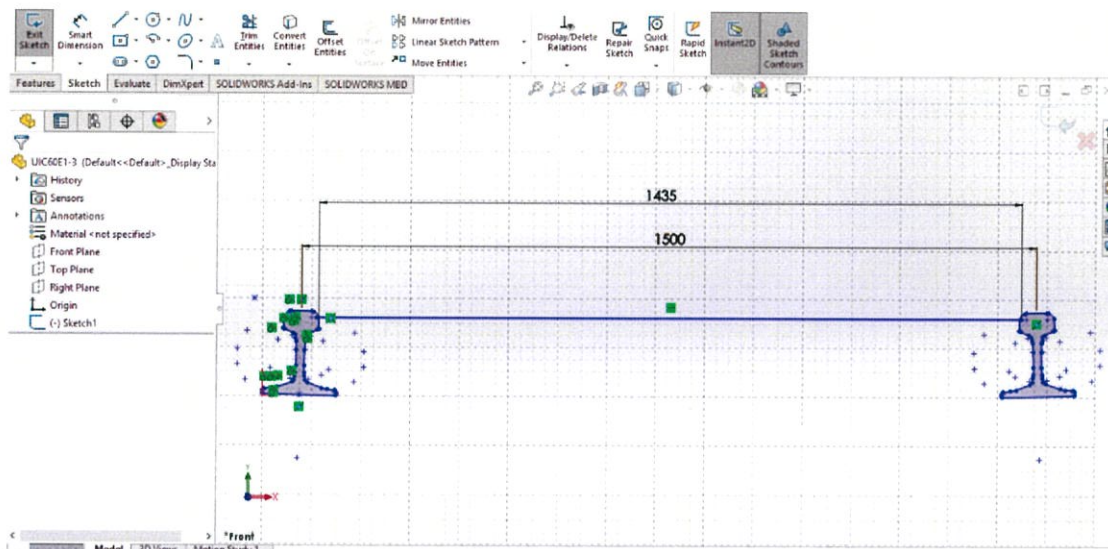
รูปที่ 3.7 การวาดเส้นหน้าตัดราง UIC60 โดยใช้คำสั่ง Sketch

2. ทำการปรับรางให้มีความเอียง 1:40 ตามเอกสารของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน [23] ดังรูปที่ 3.8



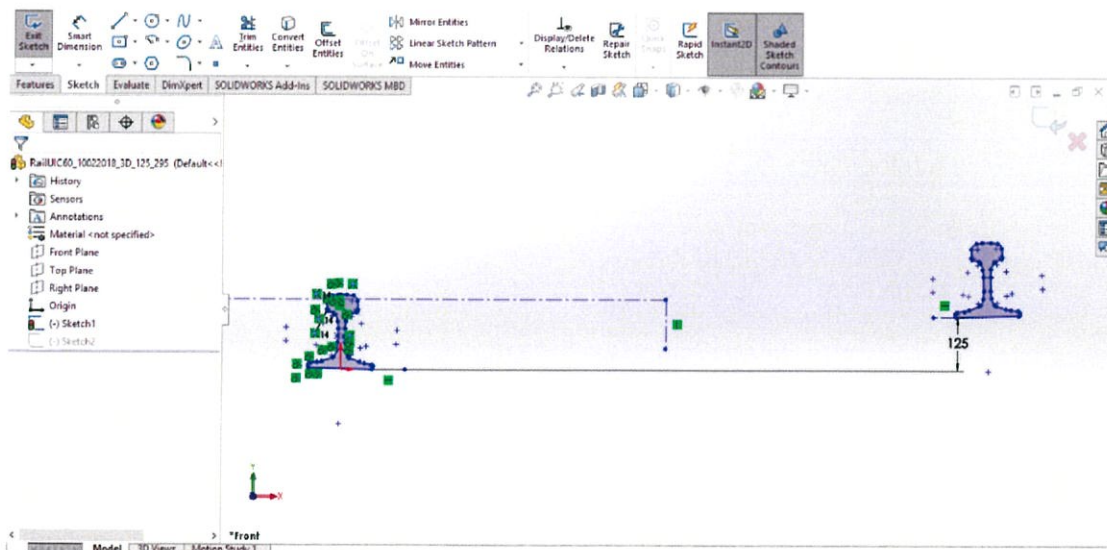
รูปที่ 3.8 การปรับรางเอียง 1:40

3. ใช้คำสั่ง Mirror ให้ได้รางอีก 1 ราง โดยให้ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของรางทั้งสองกว้าง 1,500 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะทำให้ได้ความกว้างของทางรถไฟ (Track Gauge) กว้าง 1,435 มิลลิเมตร [4] ตามเอกสารของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย [23] ได้กำหนดไว้



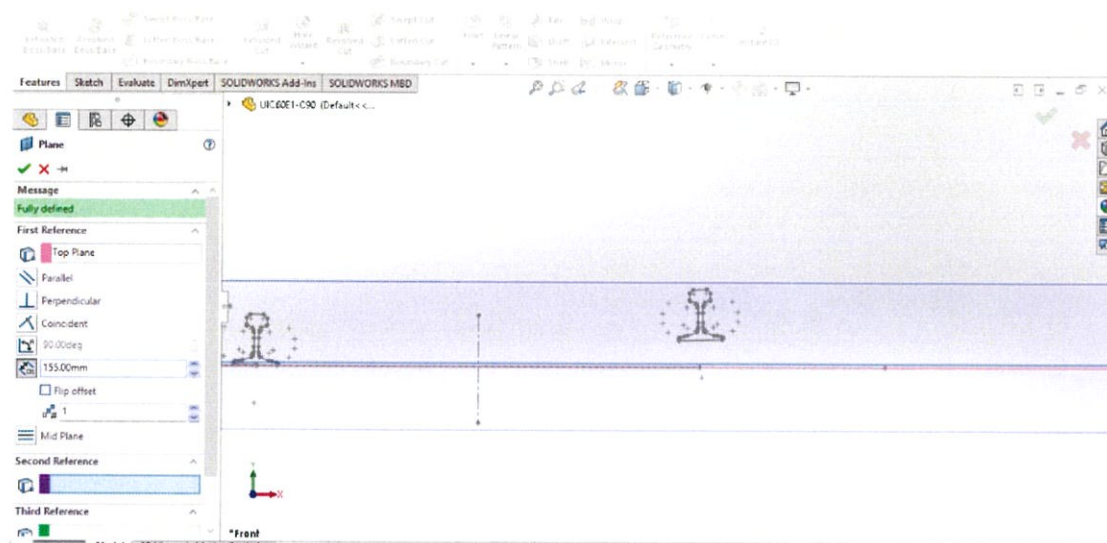
รูปที่ 3.9 ความกว้างทางรถไฟ (Track Gauge) 1,435 มิลลิเมตร

4. ปรับความสูงของรางด้านขวาให้สูงกว่ารางด้านซ้าย 125 มิลลิเมตรตามที่ได้คำนวณจากการจำลองการเดินรถ (Train Simulation) เพื่อให้ทางรถไฟเกิดการยกโค้ง (Cant) ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การยกรางขึ้นสูง 125 มิลลิเมตร

5. สร้างระนาบขึ้นใหม่ให้ขนานกับระนาบ Top Plane โดยใช้คำสั่ง Features > References Geometry > Plane แต่กำหนดความสูงระนาบให้ตัดผ่านรางทั้งสอง โดยความสูงที่ใช้คือ 155 มิลลิเมตร จาก Top Plane ดังรูปที่ 3.11 เพื่อนำไปสร้างทางโค้งให้ทางรถไฟ



รูปที่ 3.11 การสร้างระนาบใหม่

6. ทำการวาดเส้นโค้งรัศมี 295,000 มิลลิเมตรโดยใช้คำสั่ง Sketch อีกครั้ง จากนั้นใช้คำสั่ง Swept Boss/Base สร้างรางสามมิติ โดยจะได้ช่วงทางโค้งรถไฟดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะนำไปทำการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนต่อไป โดยค่ารัศมีและความยาวช่วงทางโค้งทั้งสองที่นำมาใช้ในคำสั่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณการจำลองการเดินรถ



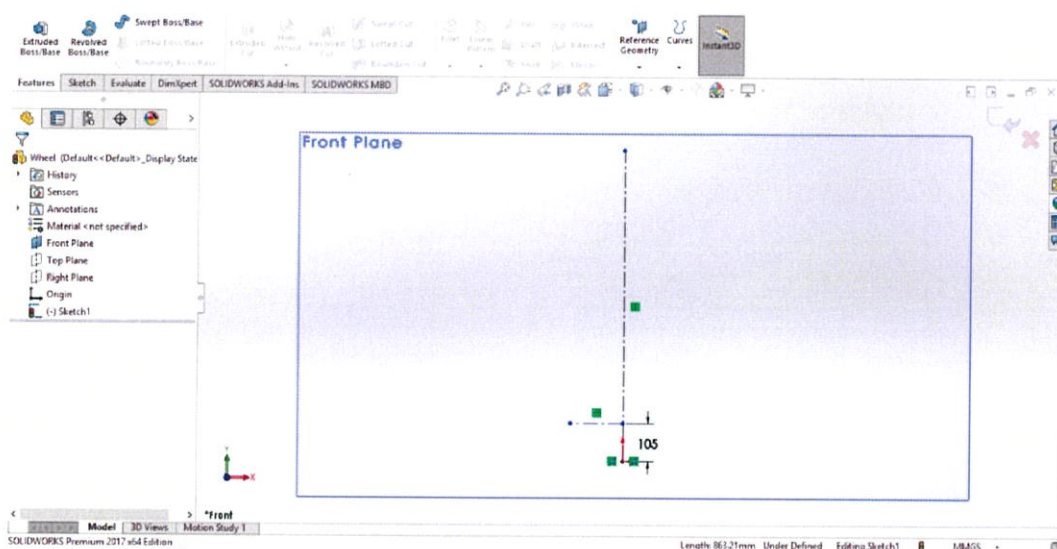
รูปที่ 3.12 ช่วงทางโค้งรถไฟ

3.3.1.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชุดเพลาล้อ

การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาแรงที่กระทำต่อหนึ่งเพลาล้อในบริเวณทางโค้งของเส้นทางวิ่งเท่านั้น ดังที่ได้ระบุไว้เบื้องต้นในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.4 ซึ่งล้อและเพลาล้อที่ใช้มีขนาดตามมาตรฐานสากลที่ใช้กันทั่วไปในระบบขนส่งมวลชนทั่วโลก รวมถึงระบบขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานครและโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายด้วยเช่นกัน โดยภาพหน้าตัดและขนาดของล้อจะเป็นไปตามรูปที่ 3.6

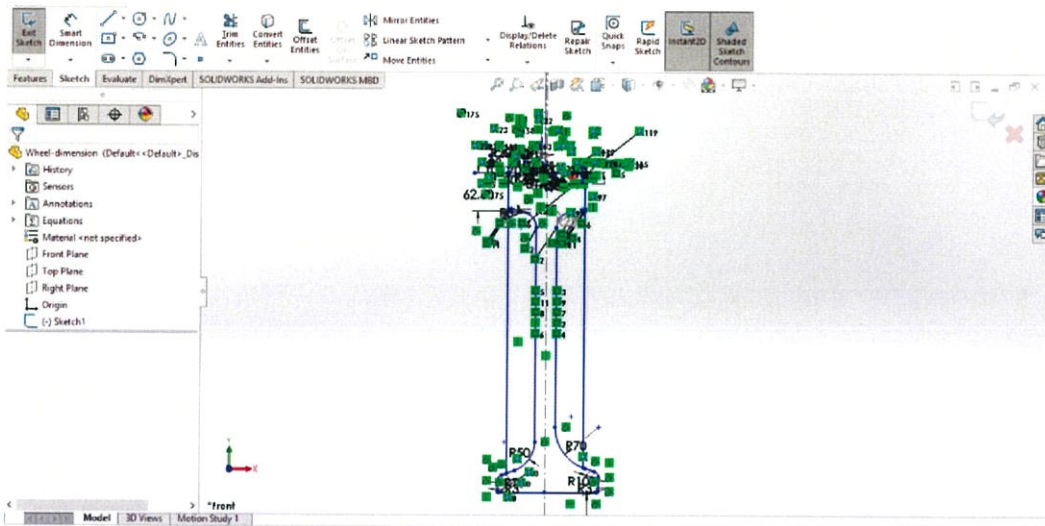
สำหรับการขึ้นรูปล้อและเพลาล้อโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ในขั้นแรกทำการเลือกระนาบ Front Plane สำหรับวาดเส้น โดยระนาบนี้จะอยู่ในแกน X-Y ทำการวัดระยะจากจุดเริ่มต้น (Origin) ขึ้นไปตามแกน Y ยาว 105 มิลลิเมตร และสร้างจุดเริ่มต้นอีกจุดขึ้นโดยใช้คำสั่ง Sketch > Centerline เพื่อวาดล้อ ดังรูปที่ 3.13

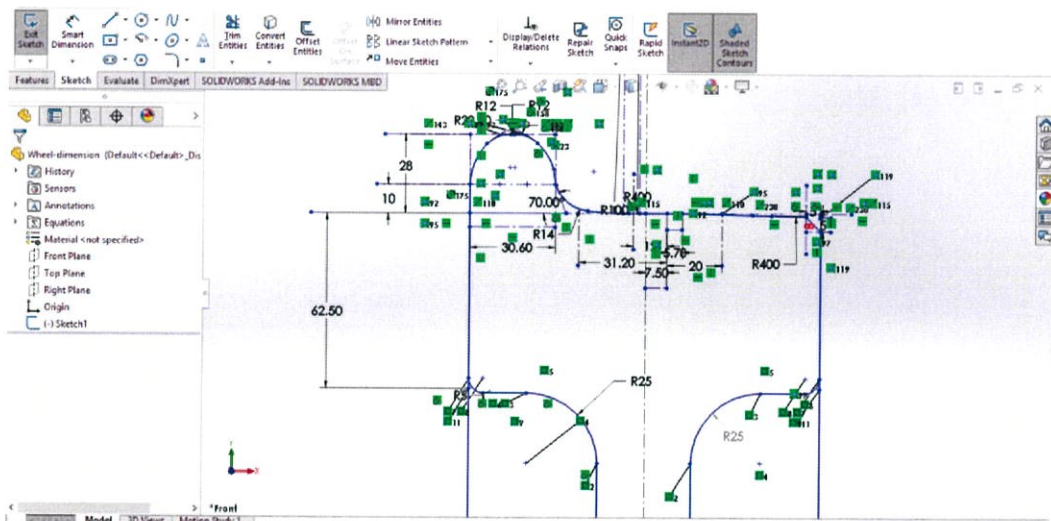


รูปที่ 3.13 การกำหนดระนาบและการสร้างจุดเริ่มต้นในการวาดชิ้นงาน

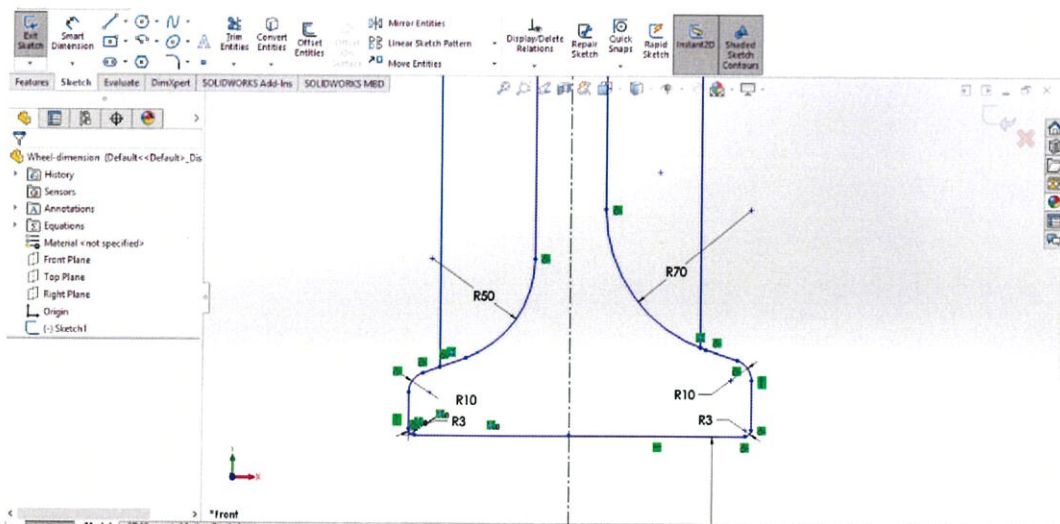
2. ทำการวาดเส้นตามหน้าตัดล้อตามรูปที่ 3.5 โดยใช้คำสั่ง Sketch ดังรูปที่ 3.14 โดยรายละเอียดของขนาด (Dimension) ในตำแหน่งต่างๆ ของล้อ จะแสดงในรูปที่ 3.15 และ รูปที่ 3.16



รูปที่ 3.14 การวาดเส้นหน้าตัดล้อโดยใช้คำสั่ง Sketch

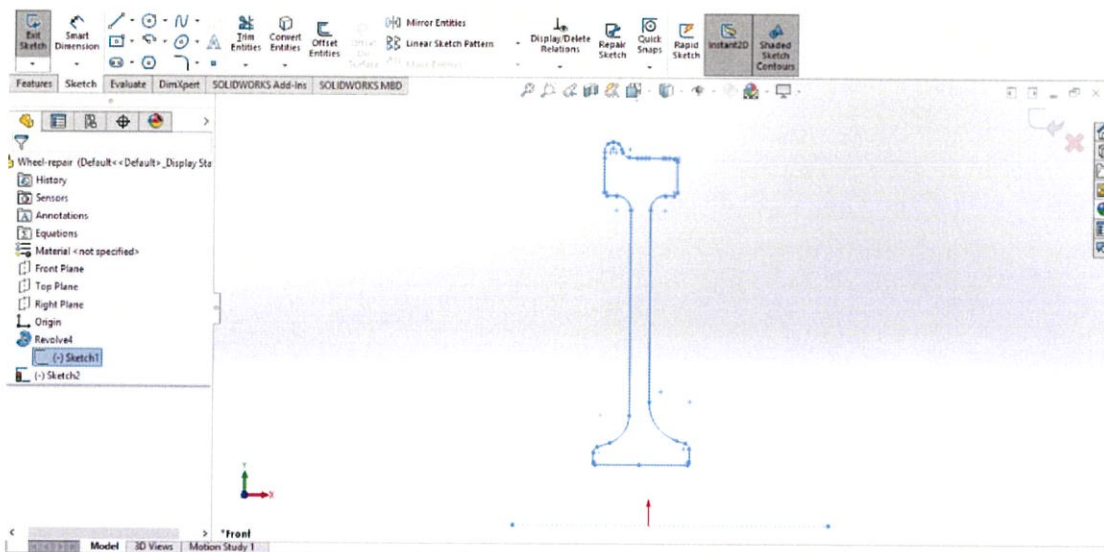


รูปที่ 3.15 การให้ขนาด (Dimension) บริเวณบังใบล้อ (Wheel Flange)



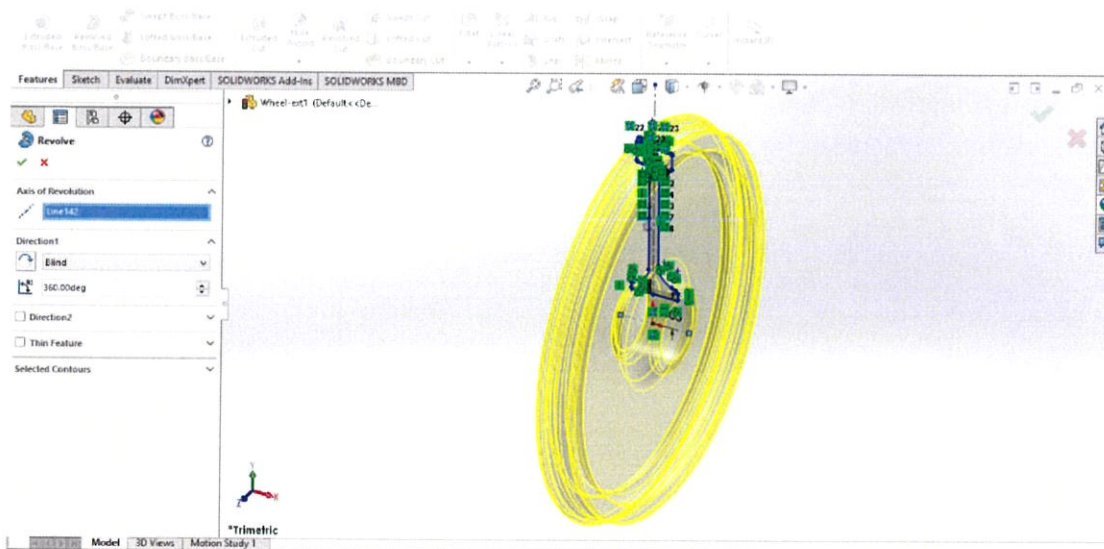
รูปที่ 3.16 การให้ขนาด (Dimension) บริเวณแกนกลางล้อ

3. ลบเส้นตรง 2 เส้นที่ขนานกับล้อที่วาด เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องกับล้อ จึงไม่จำเป็นต้องขึ้นรูปในส่วนนี้ เมื่อทำการลบเส้นทั้งสองออก จะได้รูปล้อ 2 มิติดังแสดงในรูปที่ 3.17

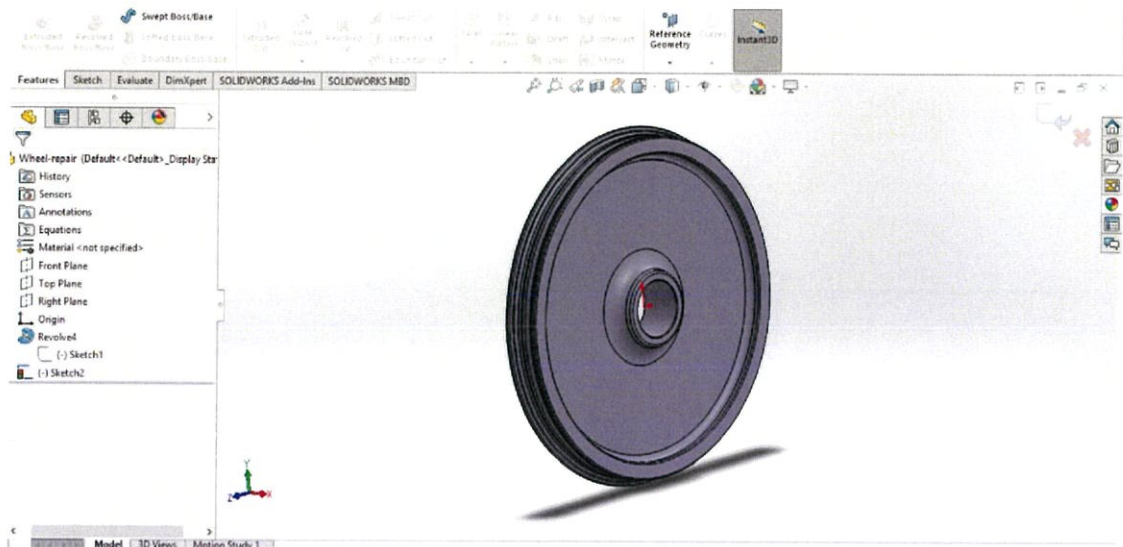


รูปที่ 3.17 การวาดเส้นล้อใน 2 มิติที่จะนำไปใช้จริง

4. ใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base ในการขึ้นรูปล้อเป็น 3 มิติ โดยเลือกเส้น Centerline ที่ถูกวาดขนานตามแกน X ผ่านจุดเริ่มต้นให้เป็นแกนหมุน ดังรูปที่ 3.18 เมื่อสิ้นสุดคำสั่งจะได้ล้อที่ถูกขึ้นรูปดังรูปที่ 3.19

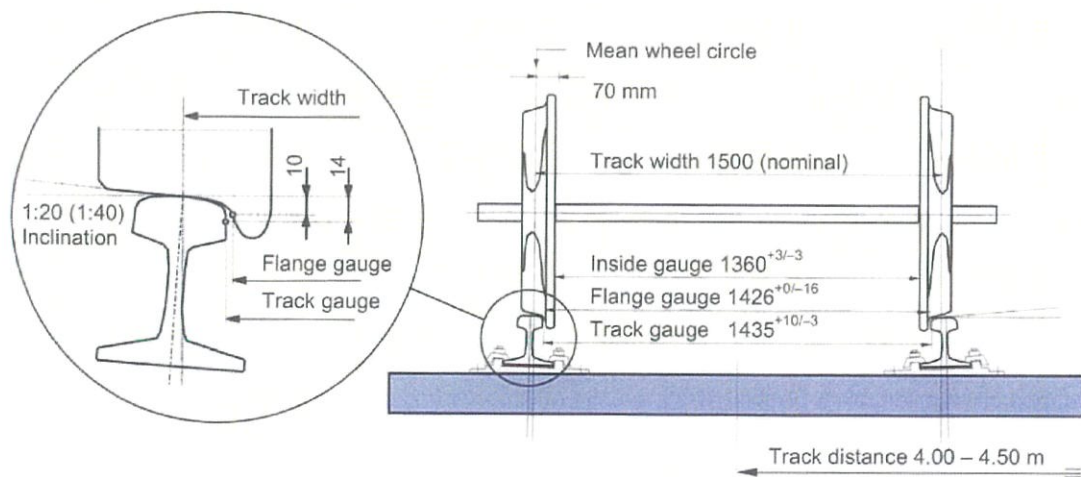


รูปที่ 3.18 การใช้คำสั่ง Revolved Boss/Base สร้างภาพล้อ 3 มิติ

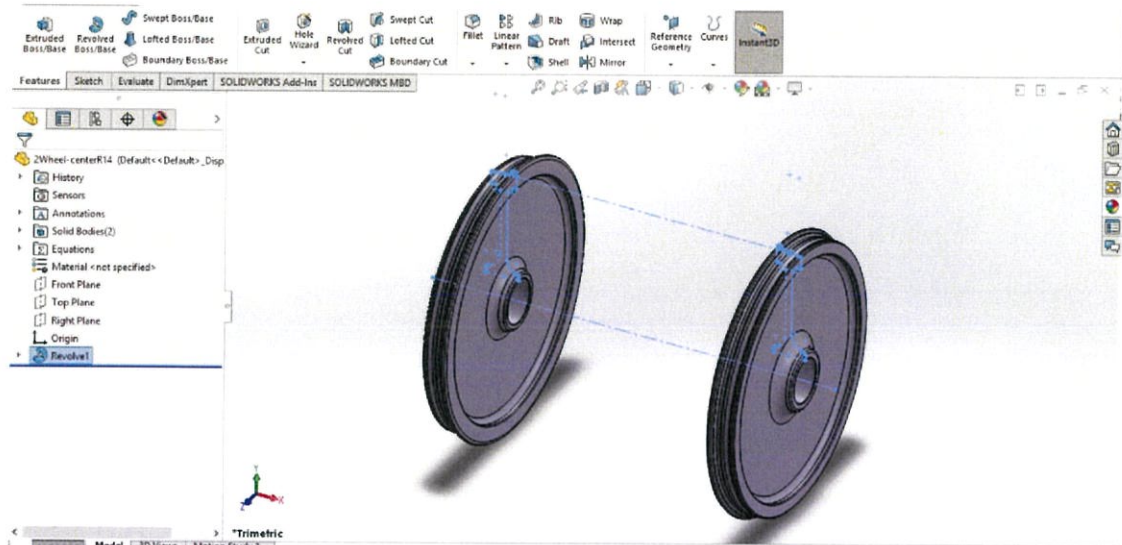


รูปที่ 3.19 ล้อรถไฟ 1 ล้อ ที่ถูกขึ้นรูป

5. เพื่อให้ได้ชุดเพลาล้อ จำเป็นต้องสร้างล้อขึ้นมาอีก 1 ล้อ ดังนั้นจึงใช้คำสั่ง Mirror โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างตำแหน่งล้อทั้งสองที่กำหนดไว้ตามดังรูปที่ 3.20 ให้ห่างกัน 1,435 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ล้อทั้งสองข้างสำหรับการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.21

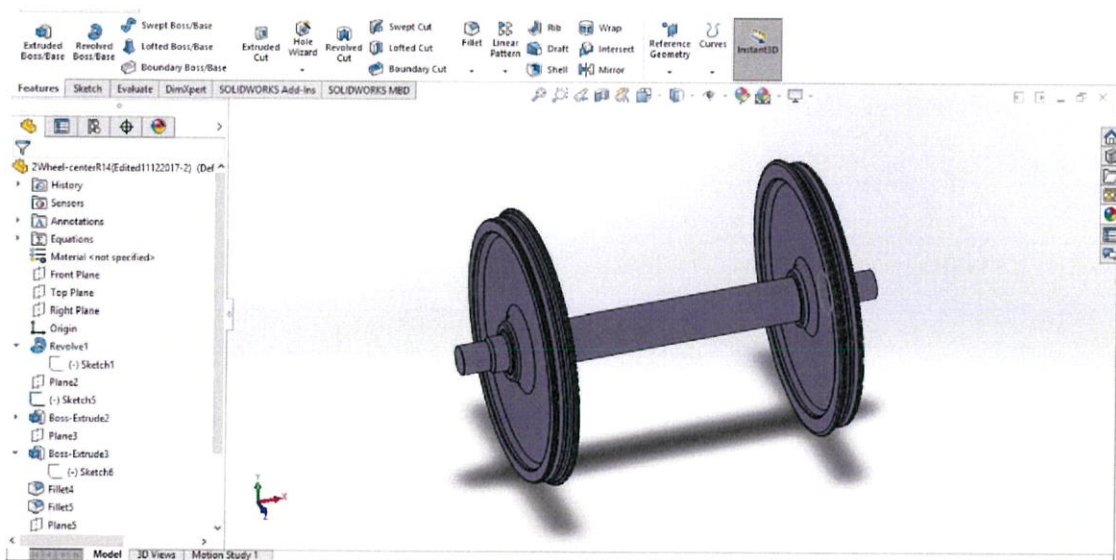


รูปที่ 3.20 ชุดเพลาล้อและการวัดขนาดทางตรงของ European Standard [4]



รูปที่ 3.21 ล้อรถไฟทั้ง 2 ข้าง

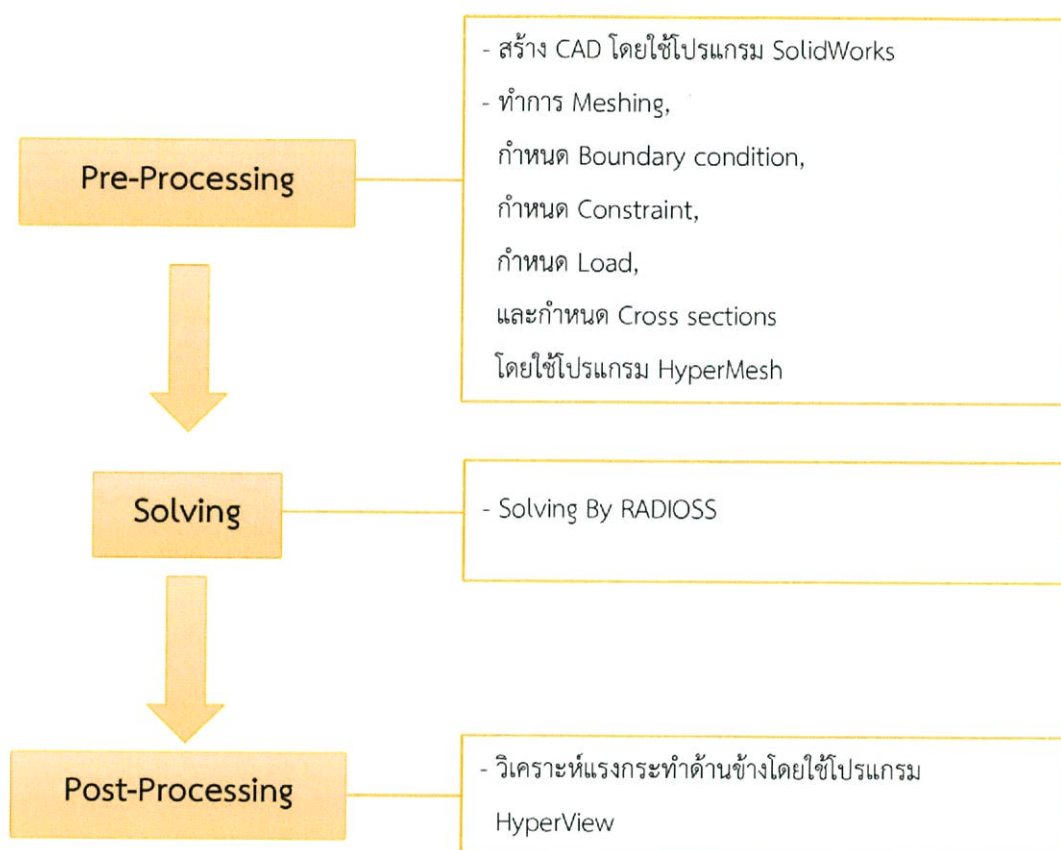
6. ทำการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาติดกับพื้นผิวล้อด้านขวา โดยอ้างอิงจาก Right Plane จากนั้นใช้คำสั่ง Sketch > Circle สร้างวงกลมขึ้นมา โดยให้รัศมีพอดีกับกับช่องว่างตรงกลางล้อ และใช้คำสั่ง Extruded Boss/Base สร้างภาพ 3 มิติของเพลาล้อขึ้นมาได้เป็นชุดเพลาล้อ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชุดเพลาล้อ

3.3.2 การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนหลักทั้งหมด 3 ขั้นตอน ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งได้แก่ การสร้างแบบจำลอง (Pre-Processing), การประมวลผล (Solving) และการประมวลผลภายหลัง (Post-Processing) ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

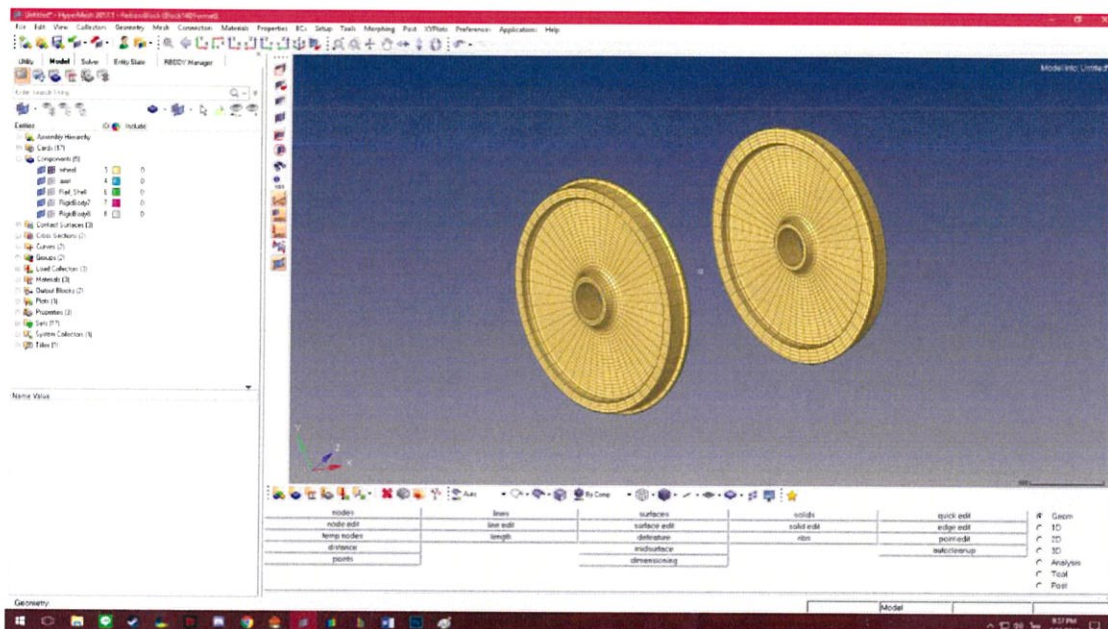
โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Pre-Processing) เป็นการตั้งค่าแบบจำลองตามคุณสมบัติที่ต้องการให้เกิดความเสมือนจริงตามข้อมูลที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายและได้จากการคำนวณแบบจำลองการเดินทาง โดยจะสามารถนำไปประมวลและได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ

3.3.2.1 การนำล้อและรางสามมิติที่ถูกขึ้นรูปเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์

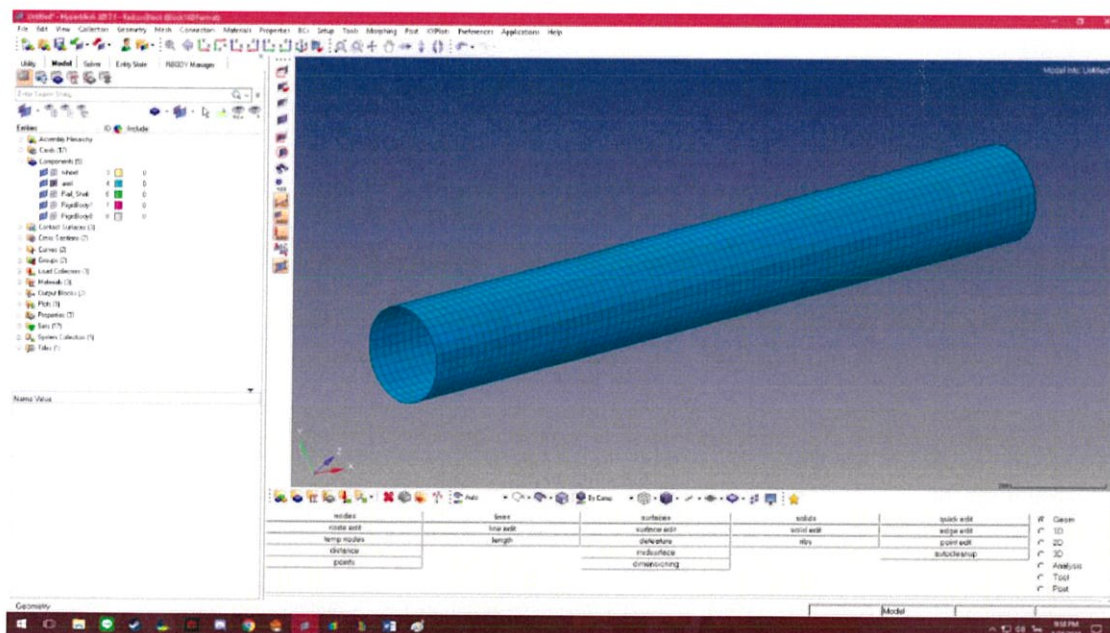
หลังจากที่ได้ทำการขึ้นรูปของล้อและรางเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะนำเข้ามาในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทางผู้จัดทำได้บันทึกเอกสาร (File) เป็นสกุล IGES (.IGS) เพื่อให้สะดวกต่อการทำงานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์หาแรงกระทำด้านข้างโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ซึ่งเบื้องต้นจะเป็นการกำหนดค่าต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางวัสดุ (Material Properties) ของแบบจำลอง, การประกอบ

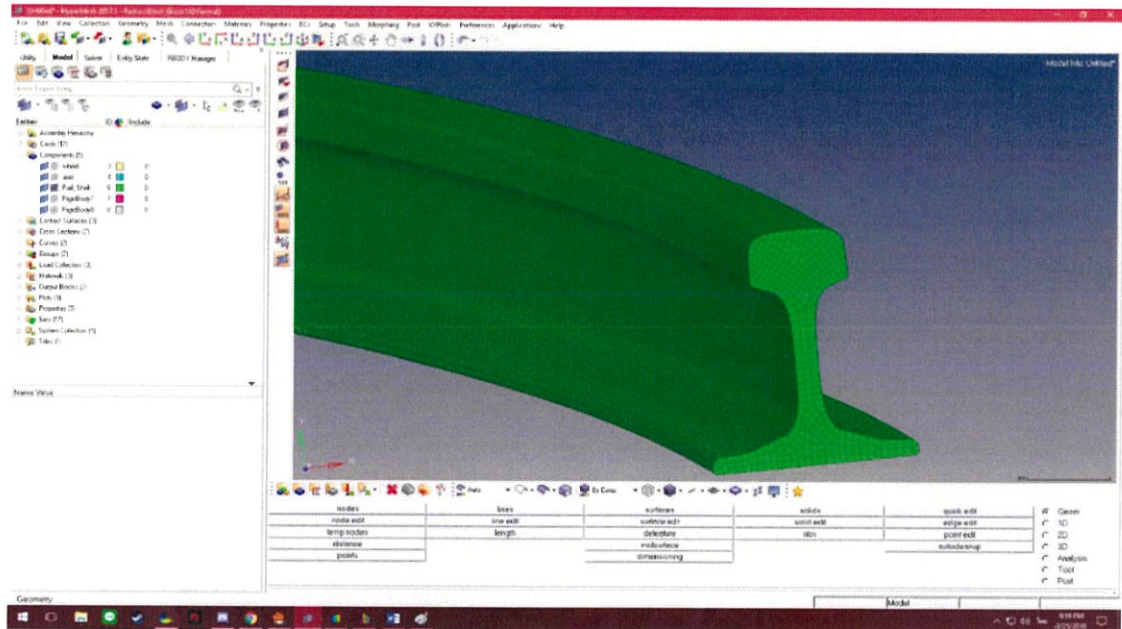
ชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (Assembly), การกำหนดภาระที่กระทำ (Load) ต่อแบบจำลอง, การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และกระบวนการแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นเล็กๆ (Meshing) ในการประมวลผล



รูปที่ 3.24 การนำล้อเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และ Meshing



รูปที่ 3.25 การนำเพลลาเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และ Meshing





รูปที่ 3.26 การนำร่างเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และ Meshing

3.3.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองและกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุ (Material Properties)

การกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการใส่ค่า Material ซึ่งได้แก่ Density, Young's Modulus, และ Poisson's Ratio ทั้งนี้ค่าสมบัติทางวัสดุนั้นมาจากมาตรฐานสากล คือ ล้อมีคุณสมบัติทางวัสดุจากมาตรฐาน EN 13262 Material ER 8 และสำหรับรางมีคุณสมบัติทางวัสดุจากมาตรฐาน EN 13674-1 Grade 260 รายละเอียดจะแสดงให้เห็นในตาราง 3.2 ในการใส่ค่าคุณสมบัติทางวัสดุจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28 อีกทั้งยังกำหนดให้รางมีคุณสมบัติเป็น Shell และชุดเพลาล้อมีคุณสมบัติเป็น Solid

ตารางที่ 3.2 ค่าคุณสมบัติทางวัสดุของล้อและราง

คุณสมบัติทางวัสดุ	ล้อรถไฟ	รางรถไฟ
Density	$7.83 \times 10^9 \text{ kg/mm}^3$	$7.83 \times 10^9 \text{ kg/mm}^3$
Young's Modulus	$210 \times 10^9 \text{ MPa}$	$210 \times 10^9 \text{ MPa}$
Poisson's Ratio	0.3	0.3

Name	Value	Name	Value
Solver Keyword	/MAT/ELAST/	Solver Keyword	/MAT/ELAST/
ID	2	ID	3
Name	Wheel	Name	Rail
Color		Color	
Include File	[Master Model]	Include File	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>	Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
User Comments	Do Not Export	User Comments	Do Not Export
Card Image	M1_ELAST	Card Image	M1_ELAST
Regular_OR_encrypted_flag	Regular	Regular_OR_encrypted_flag	Regular
RefRho_Option	<input type="checkbox"/>	RefRho_Option	<input type="checkbox"/>
Rho_Initial	7.83e-009	Rho_Initial	7.83e-009
E	210000.0	E	800000.0
nu	0.3	nu	0.3
ALE CFD Formulation	NONE	ALE CFD Formulation	NONE
HEAT_Input	<input type="checkbox"/>	HEAT_Input	<input type="checkbox"/>

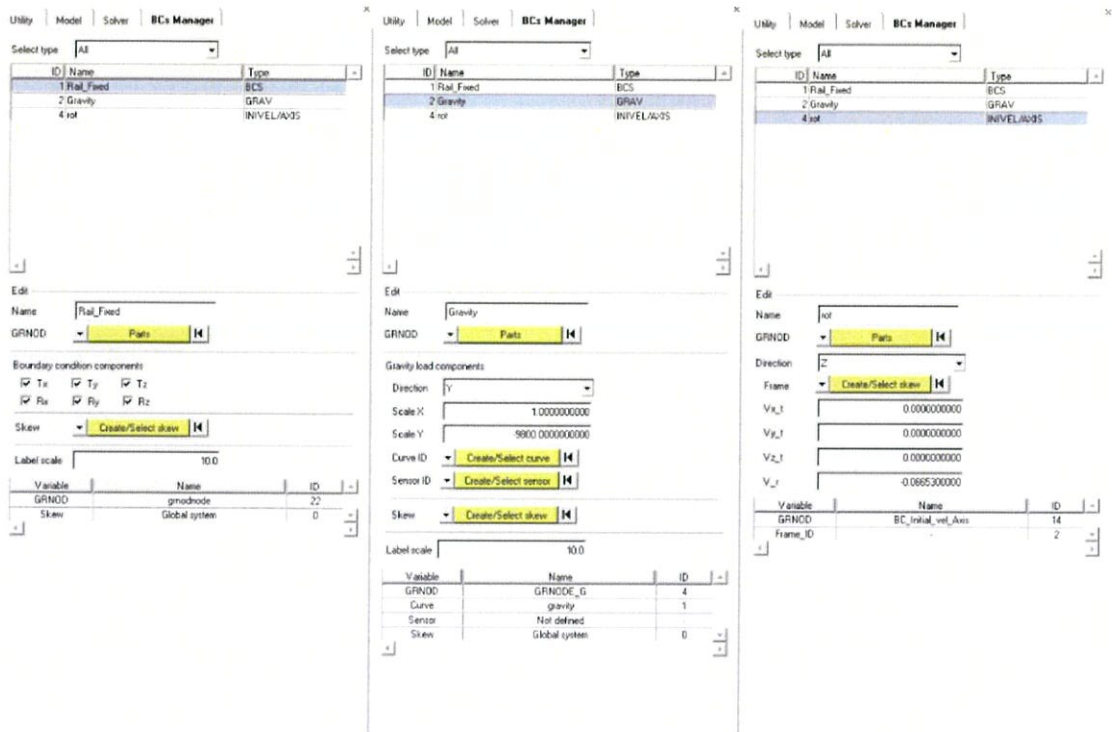
รูปที่ 3.27 การใส่คุณสมบัติทางวัสดุให้แก่รางและชุดเพลาล้อ

Name	Value	Name	Value
Solver Keyword	/PROP/SHELL/	ID	2
ID	3	Name	Railwheel
Name	Rail	Color	
Color		Include File	[Master Model]
Include File	[Master Model]	Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>	User Comments	Do Not Export
User Comments	Do Not Export	Card Image	P14_SOLID
Card Image	P1_SHELL	PropOptions	SOLID
Regular_OR_encrypted_flag	Regular	ISOLID	24. HEPH 8-node solid element. Co-rotationa..
Ishell		Ismstr	
Ismstr		Icpre	
Ish3		I_tetra	
Idrill		dn	0.0
Hm		Regular_OR_encrypted_flag	Regular
Hf		qa	
Hr		qb	
Dm		h	
Dn		Lambda	
..		..	

รูปที่ 3.28 การกำหนด Properties ให้แก่รางและชุดเพลาล้อ

3.3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ให้แบบจำลอง

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลอง กำหนดให้ล้อถูกรับน้ำหนักกดเพลาล้อขนาด 15,400 นิวตันหรือ 15.4 ตัน เป็นไปตามเอกสาร System Performance Analysis ของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ส่วนต่อขยาย [2] ที่ได้ระบุไว้ โดยให้ล้อมีการกึ่งบนรางรถไฟตามแนวรัศมี 295 เมตร ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.06653 เรเดียนต่อวินาที

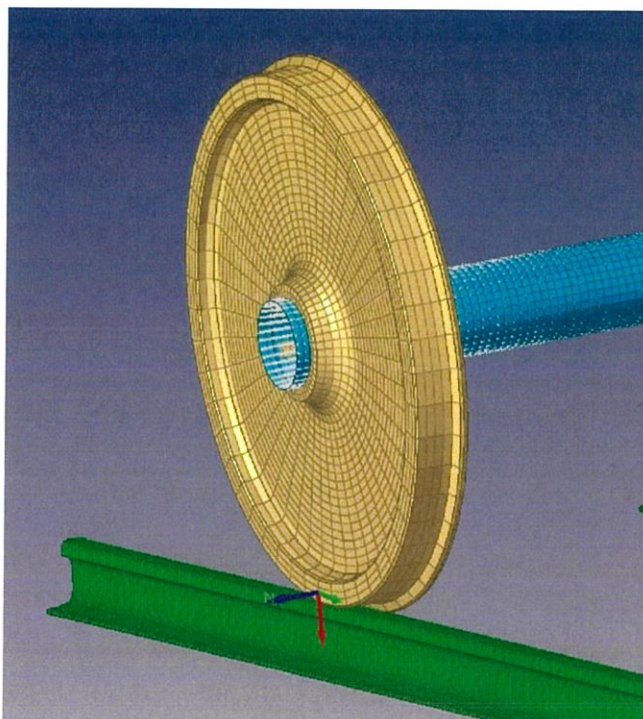


รูปที่ 3.29 การใส่ Boundary Conditions ในทิศของแรงโน้มถ่วงและทิศของความเร็ว

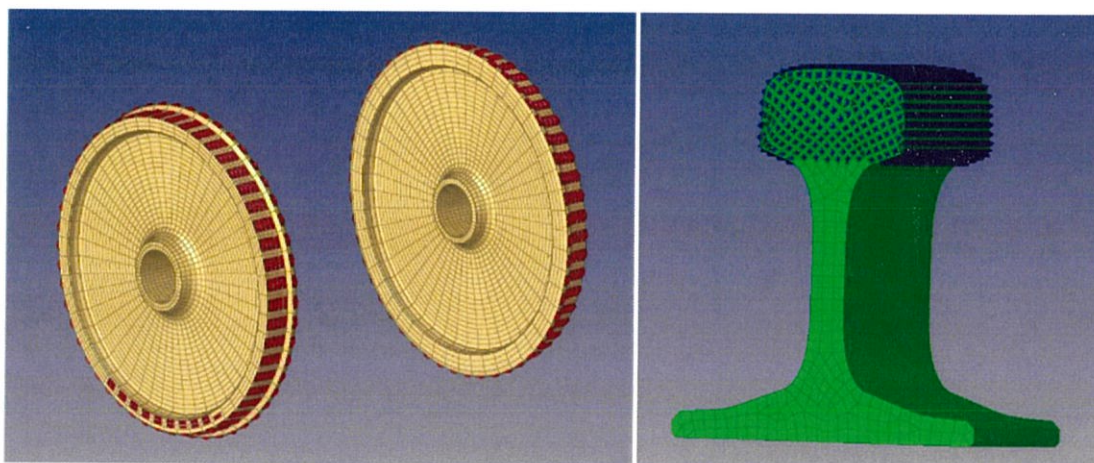
3.3.2.4 การกำหนดการทำงานของแบบจำลองและการนำแบบจำลองออก (Export)

ไปยัง Solver

การสร้างพื้นที่หน้าตัด Cross Section ให้กับแบบจำลอง เพื่อใช้สำหรับกำหนดทิศทางของแรงกระทำด้านข้างระหว่างล้อกับรางที่ต้องการพิจารณา โดยเลือกโหนด (Node) ทั้งหมด 3 โหนด ดังรูปที่ 3.31 และทำการกำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อและรางโดยการสร้าง Contact Surface บริเวณผิวล้อและหัวรางที่สัมผัสกัน ดังรูปที่ 3.32 จากนั้นทำการใส่ EngineCard ที่เป็นเครื่องมือช่วยในการขับเคลื่อนแบบจำลอง ดังรูปที่ 3.33 เมื่อทำการกำหนดค่าทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว จึงนำแบบจำลองออกไปยัง Solver ที่ชื่อว่า RADIOSS ดังรูปที่ 3.34 เพื่อให้ Solver ทำการประมวลผลของแบบจำลองและส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม HyperView ในการแสดงผลของแรงกระทำด้านข้างต่อไป



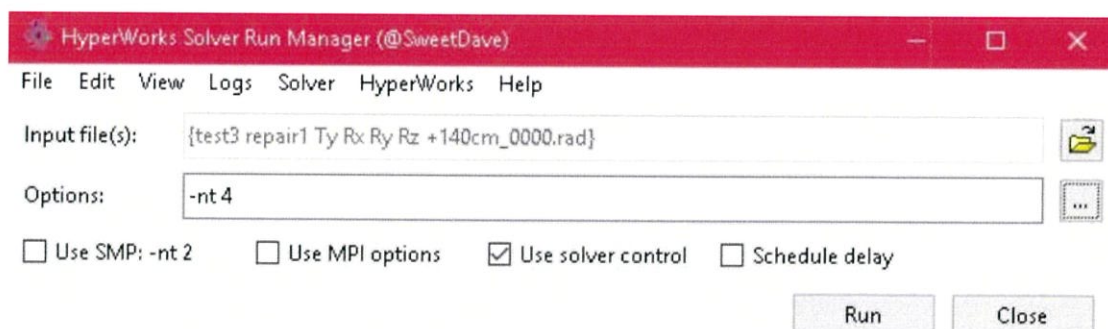
รูปที่ 3.31 การสร้าง Cross Section ในการกำหนดทิศทางของแรงระหว่างล้อกับราง



รูปที่ 3.32 การสร้าง Contact Surface ในการกำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อและราง

Entities		ID	Include
+	Assembly Hierarchy		
+	Cards (17)		
	HEADER_CARD	1	0
	ENG_FILEDATA	15	0
	ENG_RADIOSS_HEADER	23	0
	ENG_END_HEADER	24	0
	ENG_ANIM_DT	46	0
	ENG_ANIM_ELEM	50	0
	ENG_ANIM_NODA	62	0
	ENG_ANIM_SHELL_EPSP	64	0
	ENG_ANIM_SHELL_TENS_STRESS	70	0
	ENG_ANIM_VECT	72	0
	ENG_DT_NODA	104	0
	ENG_MON	177	0
	ENG_PRINT	182	0
	ENG_RUN	189	0
	ENG_STOP	206	0
	ENG_TFILE	207	0
	ENG_VERS	217	0
+	Components (5)		
+	Contact Surfaces (3)		
+	Cross Sections (2)		
+	Curves (2)		

รูปที่ 3.33 การใส่ EngineCard สำหรับใช้ขับเคลื่อนแบบจำลอง



รูปที่ 3.34 การ Export แบบจำลองที่ถูกตั้งค่าไปยังโปรแกรม RADIOSS

3.3.2.5 การประมวลผลแบบจำลองของโปรแกรม RADIOSS [24]

1. การกำหนดคุณสมบัติแบบจำลองตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS

ตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS สำหรับ Element ของลัทธิไฟที่เป็นของแข็ง (Solid) จะถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็น Solid Hexahedron Elements ที่มีคุณสมบัติเป็น HEPH: 8-Node Linear Element with Reduced Integration Point and Physical Stabilization of Hourglass Modes

2. การกำหนดรูปทรงของ Element สำหรับล้อรถไฟตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS โปรแกรมจะพิจารณาตำแหน่งของแต่ละ Node โดยฟังก์ชันรูปทรงของ 8 Node Brick Element เมื่อแกนของ Element คือ $r \equiv \xi, s \equiv \eta, t \equiv \zeta$ และถูกคำนวณด้วยสมการต่อไปนี้

$$\phi_1 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \quad (3.1)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \quad (3.2)$$

$$\phi_3 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \quad (3.3)$$

$$\phi_4 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \quad (3.4)$$

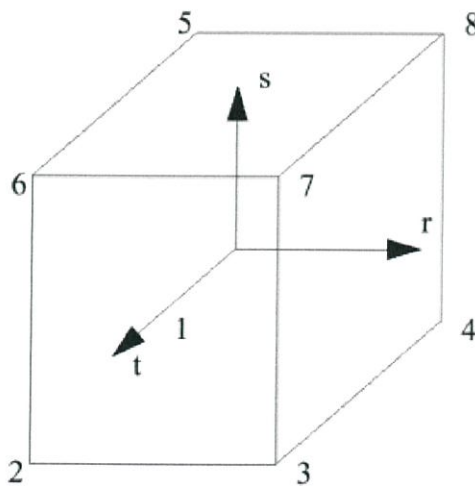
$$\phi_5 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) \quad (3.5)$$

$$\phi_6 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \quad (3.6)$$

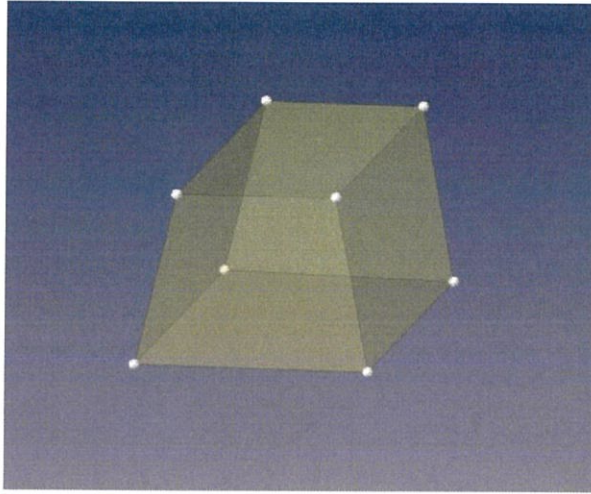
$$\phi_7 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \quad (3.7)$$

$$\phi_8 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) \quad (3.8)$$

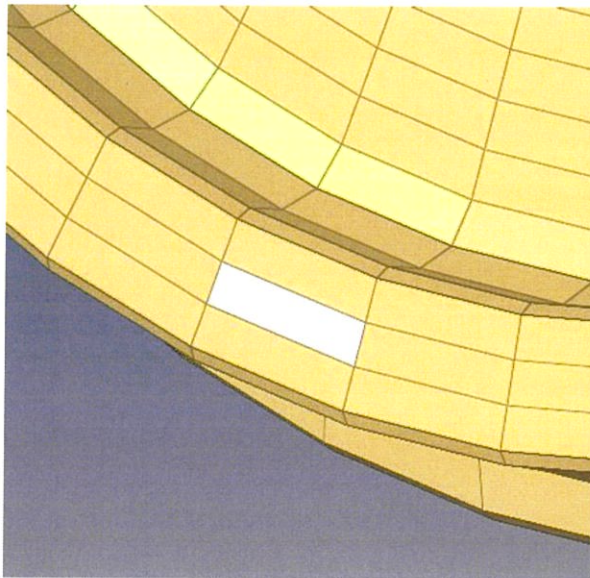
ผลจากการคำนวณตำแหน่งของแต่ละ Node จะถูกนำมาสร้างได้เป็นรูปทรง 8 Node Brick Element ดังรูปที่ 3.35 และรูปทรง 8 Node Brick Element ของล้อรถไฟ แสดงดังรูปที่ 3.36 และรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.35 รูปทรง 8 Node Brick Element



รูปที่ 3.36 รูปทรง 8 Node Brick Element ของล้อรถไฟ (1)



รูปที่ 3.37 รูปทรง 8 Node Brick Element ของล้อรถไฟ (2)

3. การกำหนดจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS

Lumped Mass Approach จะถูกใช้เป็นที่ถูกสมมติให้เป็นจุดแทนทุก Element ที่เป็น Isoparametric ซึ่งเป็นการทำเพื่อกำหนดให้เป็นจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของชุดเพลาล้อและกำหนดให้มีตำแหน่งอยู่ที่กึ่งกลางของเพลลา ไว้สำหรับกำหนด Maximum Axle Load และความเร็วตามแนวรัศมี

4. การกำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสของพื้นที่หน้าตัดตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS

พื้นที่ผิวสัมผัสของพื้นที่หน้าตัดสำหรับล้อและรางที่พิจารณากำหนดให้เป็น Type24 คือ เป็นกรณีการสัมผัสกันแบบทั่วไป กรณีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพื้นที่ผิวสัมผัสและกรณีโหนดกับพื้นที่ผิวสัมผัส แสดงดังตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของพื้นที่ผิวสัมผัส Type24 เพื่อให้ครอบคลุมทุกกรณีที่อาจเกิดขึ้นในแบบจำลอง

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของพื้นที่ผิวสัมผัส Type24 [27]

Type	Description	Application	Contact Treatment
24	General Contact Interface, Optional Single Surface or Surface to Surface or Nodes to Surface Contacts	This contact interface can replace interface type 3, 5, 7, or 20	Penalty stiffness is constant and therefore the time step is not affected.

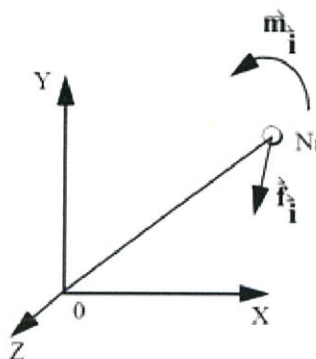
5. Output Database ตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS

Sections (/SECT) คือพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณา ซึ่งจะแสดงแรง โมเมนต์และพลังงานที่จะถูกคำนวณและเก็บผลลัพธ์ไว้ในไฟล์ Output ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของ /SECT

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของ /SECT

Database	ใช้สำหรับ	คำอธิบาย
/SECT	Brick, Shell, Truss, Spring, Triangle or Beam Group	Used to output force and moment for specific section.

6. การคำนวณแรงและโมเมนต์ตามหลักการของโปรแกรม RADIOSS แรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่โหนดจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 แรงและโมเมนต์ที่โหนด

ซึ่งการคำนวณแรงลัพธ์และโมเมนต์ลัพธ์ของแต่ละโหนดจะสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้
จาก

$$\vec{F} = \sum_i \vec{f}_i$$

$$\vec{M} = \sum_i \vec{m}_i + \sum_i \vec{N}_i \times \vec{f}_i$$

- เมื่อ \vec{f}_i คือ เวกเตอร์แรงของโหนด
 \vec{m}_i คือ เวกเตอร์โมเมนต์ของโหนด
 \vec{N}_i คือ เวกเตอร์ Normal Force ของโหนด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

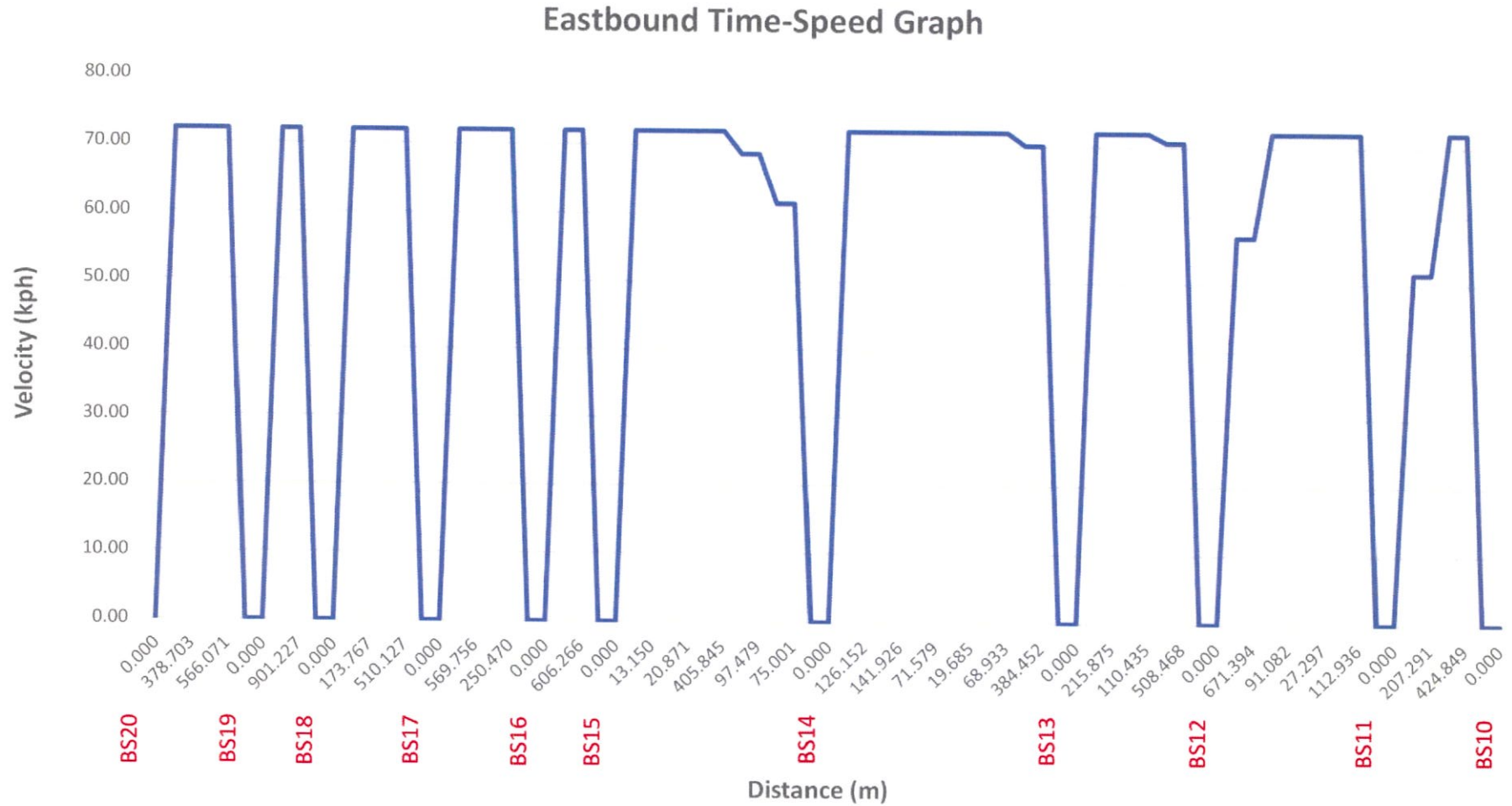
ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานทั้งหมด อันได้แก่ การจำลองการเดินรถ (Train Simulation) และการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) รวมถึงการวิเคราะห์และคัดเลือกผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการเดินรถ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างละเอียด

4.1 ผลการคำนวณการจำลองการเดินรถ (Train Simulation)

การจำลองการเดินรถโดยคำนวณหาความเร็วในการเดินรถ (Operation Speed) และค่าการยกโค้ง (Cant) ตลอดเส้นทางของโครงการรถไฟฟ้าสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง - บางแค ในทิศตะวันออก (Eastbound) ที่ได้ยกขึ้นมาเป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีระยะทางรวม 13.038 กิโลเมตร โดยผลการคำนวณความเร็วในการเดินรถในตารางที่ 4.1 สามารถแบ่งช่วงความเร็วออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเร่ง (Acceleration หรือ Acc.), ช่วงความเร็วคงที่ (Cruise) และช่วงการหน่วง (Deceleration หรือ Dac.) เพื่อให้ขบวนรถสามารถทำความเร็วได้อย่างเต็มประสิทธิภาพภายใต้ขอบเขตของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) [4] และเมื่อนำระยะทางและความเร็วที่คำนวณได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (แกน X) และความเร็ว (แกน Y) ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าขบวนรถสามารถทำความเร็วได้ถึง 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในทุกๆ ช่วงระหว่างสถานีตลอดเส้นทางซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดตามข้อกำหนดดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณการจำลองการเดินรถ

Station	Point	Speed (km/h)	Radius (m)	Lateral Acceleration	Applied Cant (mm)
LAK SONG	Circular	72.00	12000.00	0.03	0.00
PHASI CHAROEN	Circular	72.00	450.00	0.30	90.00
PHET KASEM 48	Circular	72.00	450.00	0.30	90.00
BANG PHAI	Circular 1	72.00	1250.00	0.06	40.00
	Circular 2	72.00	1250.00	0.06	40.00
	Circular 3	68.66	500.00	0.34	60.00
	Circular 4	61.52	300.00	0.58	60.00
THA PHRA	Circular 1	72.00	300.00	0.52	125.00
	Circular 2	72.00	3000.00	0.13	0.00
	Circular 3	72.00	2000.00	0.13	10.00
	Circular 4	72.00	2000.00	0.13	10.00
	Circular 5	70.14	310.00	0.41	125.00
IT SARAPHAP	Circular 1	72.00	993.70	0.14	40.00
	Circular 2	70.64	295.00	0.49	125.00
SANAM CHAI	Circular 1	56.85	190.00	0.50	125.00
	Circular 2	72.00	800.00	0.24	40.00
	Circular 3	72.00	800.00	0.24	40.00
WANG BURAPHA	Circular	51.55	300.00	0.33	55.00



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและความเร็วของการจำลองการเดินรถ

4.1.1 การเลือกช่วงทางโค้งสำหรับนำไปวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

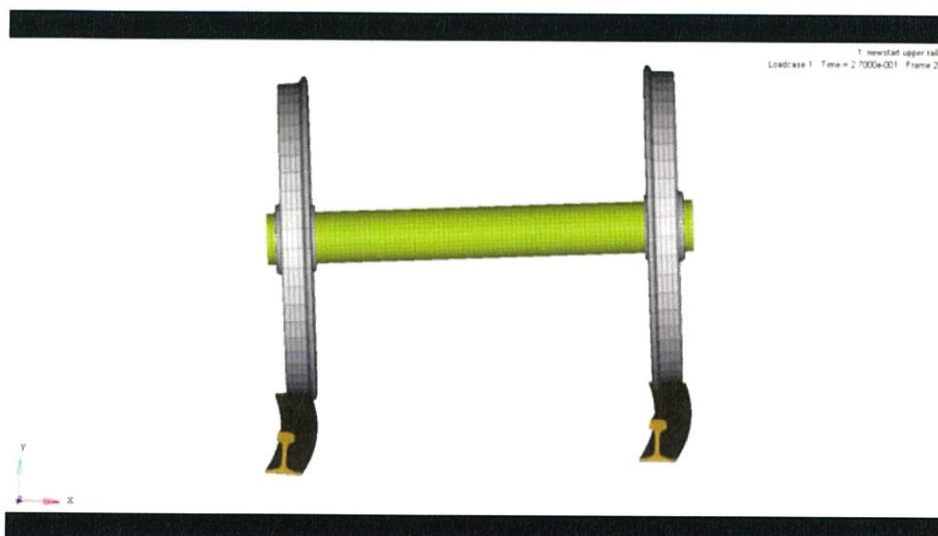
จากผลลัพธ์ของการคำนวณแบบจำลองการเดินรถตลอดเส้นทางดังตารางที่ 4.1 ทางผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาเลือกช่วงทางโค้งระหว่างสถานีอิสรภาพ (BS13 It Saraphap Station) ถึง สถานีสนามไชย (BS12 Sanam Chai Station) ที่มีรัศมีโค้ง (Circular Curve) 295 เมตร และมีค่าการยกโค้งสูง 125 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4.2 โดยช่วงทางโค้งนี้เป็นช่วงทางโค้งที่มีรัศมีน้อย เมื่อเทียบกับช่วงทางโค้งอื่นในเส้นทางที่สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด 70.64 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะเกิดความเร่งที่กระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration) ที่มีค่าสูงและถือว่ามีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดการตกราง (Derailment) มากที่สุดในเส้นทาง ทางผู้จัดทำจึงได้เลือกช่วงทางโค้งนี้มาทำการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณการจำลองการเดินรถระหว่างสถานีอิสรภาพกับสถานีสนามไชย

Station	Point	Speed (km/h)	Radius (m)	Lateral Acceleration	Applied Cant (mm)
IT SARAPHAP	Circular	70.64	295.00	0.49	125.00

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

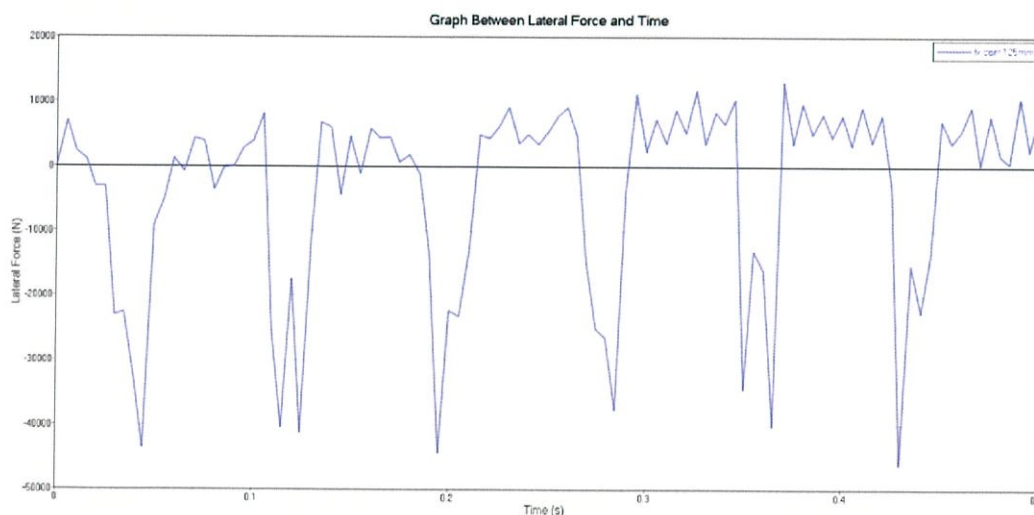
การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยชุดโปรแกรม Altair HyperWorks ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 กรณี ได้แก่ กรณียกโค้ง 125 มิลลิเมตรที่ได้จากการจำลองการเดินรถ, กรณียกโค้ง 115 มิลลิเมตร,กรณียกโค้ง 105 มิลลิเมตร,กรณียกโค้ง 75 มิลลิเมตร,กรณียกโค้ง 35 มิลลิเมตรและกรณียกโค้ง 0 มิลลิเมตรหรือไม่มีการยกโค้ง ตามลำดับ โดยเมื่อแบบจำลองเข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผลของแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางจากการเคลื่อนที่บนทางโค้งดังรูปที่ 4.2 โดยใช้โปรแกรม RADIOSS และแสดงผลของแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นในโปรแกรม HyperViews



รูปที่ 4.2 แบบจำลองชุดเพลาล้อที่เคลื่อนที่บนทางโค้ง

4.2.1 กรณียกโค้ง 125 มิลลิเมตร

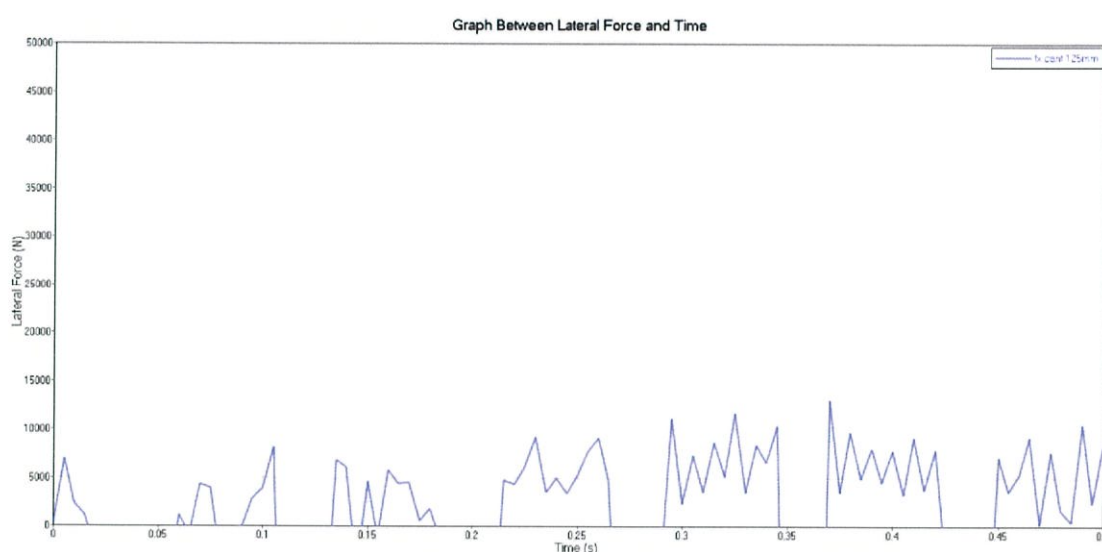
สำหรับกรณียกโค้ง 125 มิลลิเมตรเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วจะได้ผลลัพธ์แสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) และเวลา (Time) ดังรูปที่ 4.3 โดยแกน X เป็นแกนของเวลาในหน่วยวินาที ส่วนแกน Y เป็นแกนของแรงกระทำด้านข้างในหน่วยนิวตัน ซึ่งกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าปรากฏอยู่ทั้งในช่วงบวกและช่วงลบสลับกันไป เป็นผลมาจากพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบสายของรถไฟหรือ Hunting Motion ที่ทำให้ล้อแต่ละข้างสัมผัสรางไม่พร้อมกัน โดยแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าเป็นบวกคือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นที่ล้อด้านสัมผัสรางด้านนอกหรือรางข้างที่ถูกยกโค้ง และแรงที่มีค่าลบคือแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นที่ล้ออีกข้างที่สัมผัสกับรางด้านใน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 125 มิลลิเมตร

ในการพิจารณาแรงกระทำด้านข้างที่มีผลต่อการตกรางจะพิจารณาเพียงแรงกระทำด้านข้างส่วนที่มีค่าเป็นบวกดังรูปที่ 4.4 เท่านั้น และจะทำการนำแรงกระทำด้านข้างที่มีค่ามากที่สุดมาวิเคราะห์แนวโน้มในการเกิดการตกรางโดยใช้สูตรของนาตาล เนื่องจากเป็นแรงที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างบังใบล้อและรางที่รุนแรงที่สุดที่เกิดขึ้นในช่วงทางโค้งซึ่งอาจก่อให้เกิดการตกรางเนื่องจากบังใบล้อป็นรางได้

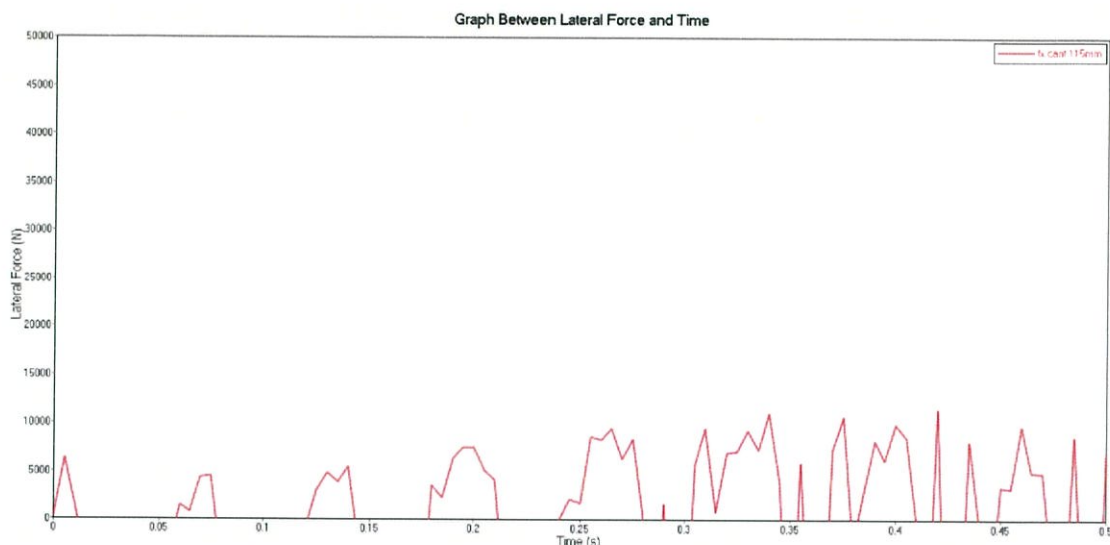
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับเวลาของช่วงทางโค้งที่มีค่าการยกโค้ง 125 มิลลิเมตรในรูปที่ 4.4 พบว่าระหว่างช่วงเวลา $t=0.28$ ถึง $t=0.4$ วินาที เกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นในกราฟ โดยเมื่อทำการวัดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้แรงขนาดประมาณ 13,052 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 0.37 วินาที



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและเวลา
ที่เกิดจากล้อสัมผัสกับรางด้านนอกที่มีการยกโค้ง 125 มิลลิเมตร

4.2.2 กรณียกโค้ง 115 มิลลิเมตร

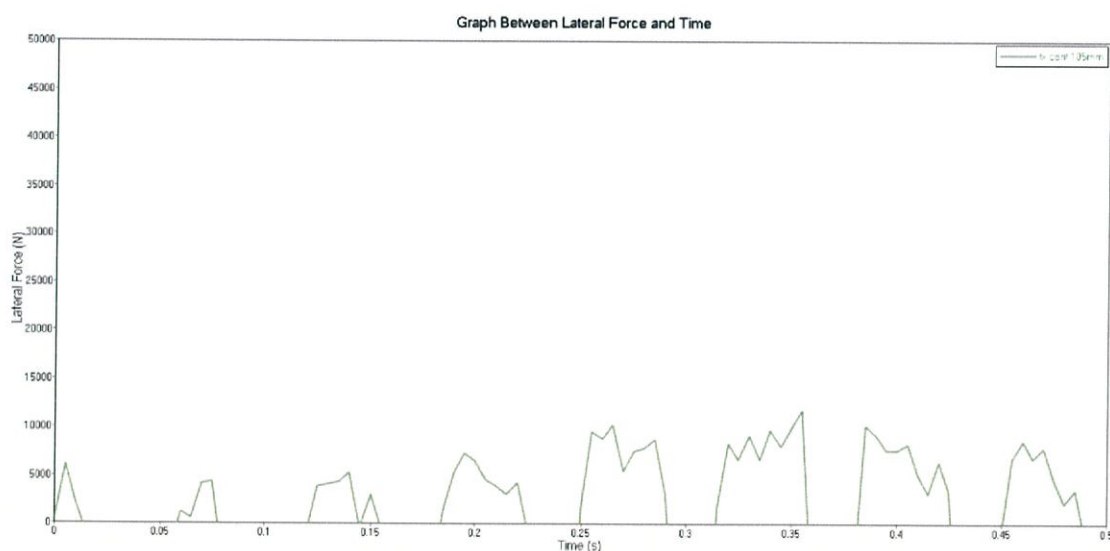
ทำการลดค่าการยกโค้งลงจาก 125 มิลลิเมตรลง 10 มิลลิเมตร จะได้ช่วงทางโค้งที่ถูยกโค้ง 115 มิลลิเมตร จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับเวลาในรูปที่ 4.5 พบว่าระหว่างช่วงเวลา $t=0.3$ ถึง $t=0.45$ วินาที เกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นในกราฟ โดยเมื่อทำการวัดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้แรงขนาด 11,463 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 0.43 วินาที



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 115 มิลลิเมตร

4.2.3 กรณียกโค้ง 105 มิลลิเมตร

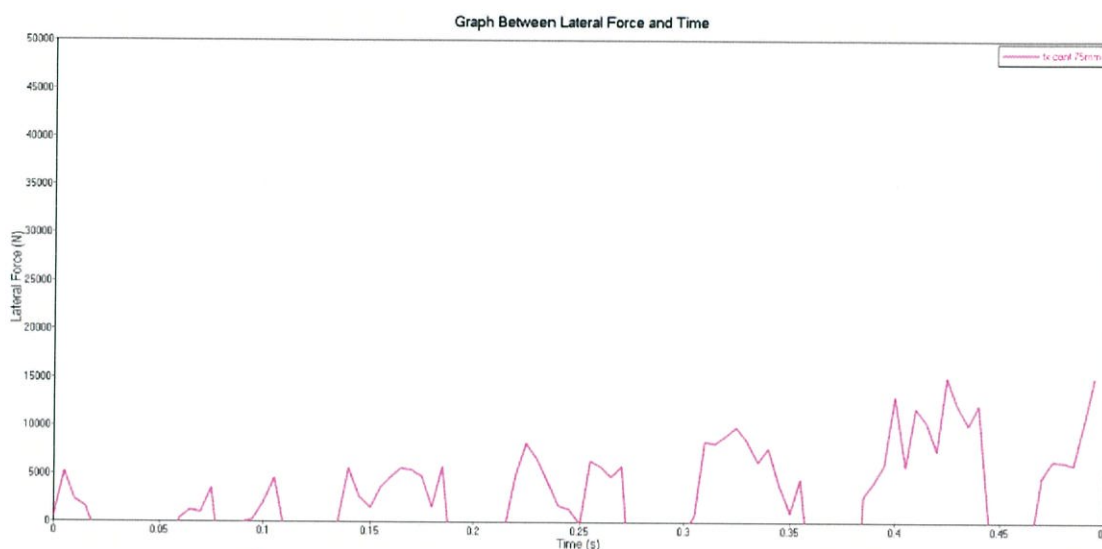
ทำการลดค่าการยกโค้งลงจาก 115 มิลลิเมตรลง 10 มิลลิเมตร จะได้ช่วงทางโค้งที่ถูกยกโค้ง 105 มิลลิเมตร จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับเวลาในรูปที่ 4.6 พบว่าระหว่างช่วงเวลา $t=0.3$ ถึง $t=0.4$ วินาที เกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นในกราฟ โดยเมื่อทำการวัดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้แรงขนาด 11,756 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 0.36 วินาที



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 105 มิลลิเมตร

4.2.4 กรณียกโค้ง 75 มิลลิเมตร

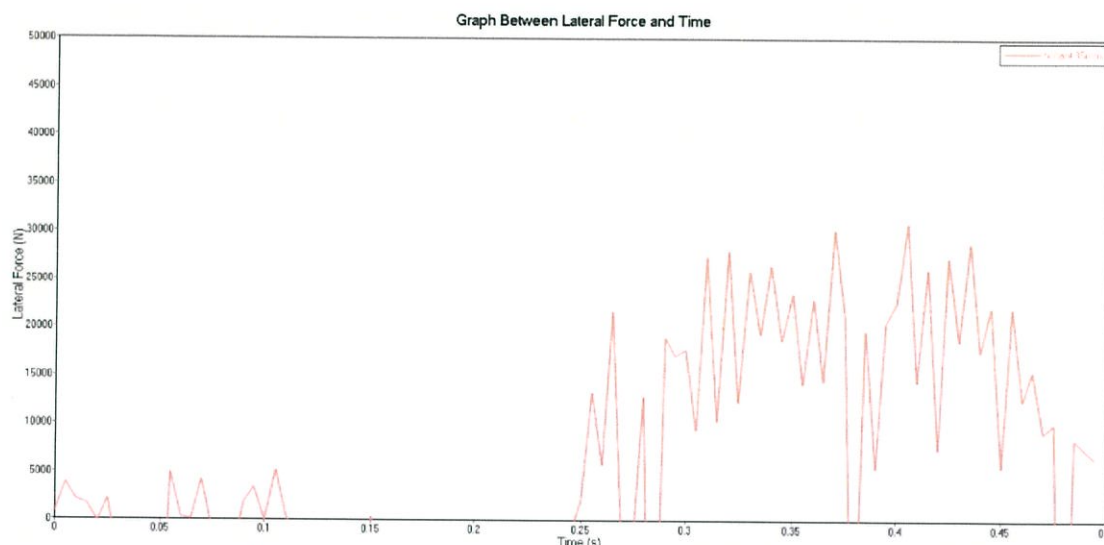
ทำการลดค่าการยกโค้งลงจาก 105 มิลลิเมตรลง 30 มิลลิเมตร จะได้ช่วงทางโค้งที่ถูกยกโค้ง 75 มิลลิเมตร จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับเวลาในรูปที่ 4.7 พบว่าระหว่างช่วงเวลา $t=0.4$ ถึง $t=0.5$ วินาที เกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นในกราฟ โดยเมื่อทำการวัดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้แรงขนาด 15,028 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 0.43 วินาที



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 75 มิลลิเมตร

4.2.5 กรณียกโค้ง 35 มิลลิเมตร

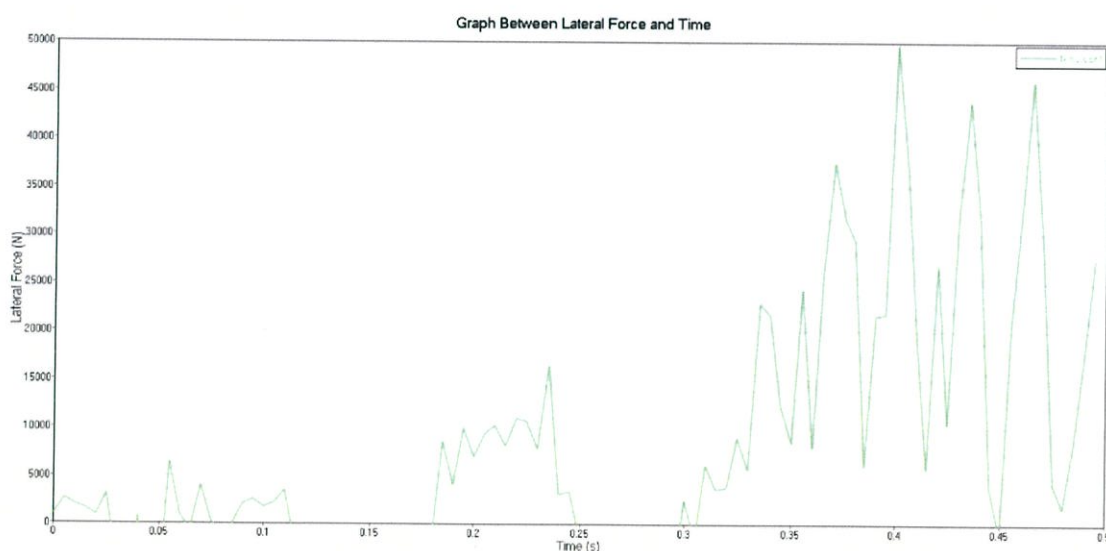
ทำการลดค่าการยกโค้งลงจาก 75 มิลลิเมตรลง 40 มิลลิเมตร จะได้ช่วงทางโค้งที่ถูกยกโค้ง 35 มิลลิเมตร จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับเวลาในรูปที่ 4.8 พบว่าระหว่างช่วงเวลา $t=0.35$ ถึง $t=0.45$ วินาที เกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นในกราฟ โดยเมื่อทำการวัดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้แรงขนาด 30,908 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 0.41 วินาที



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่มีการยกโค้ง 35 มิลลิเมตร

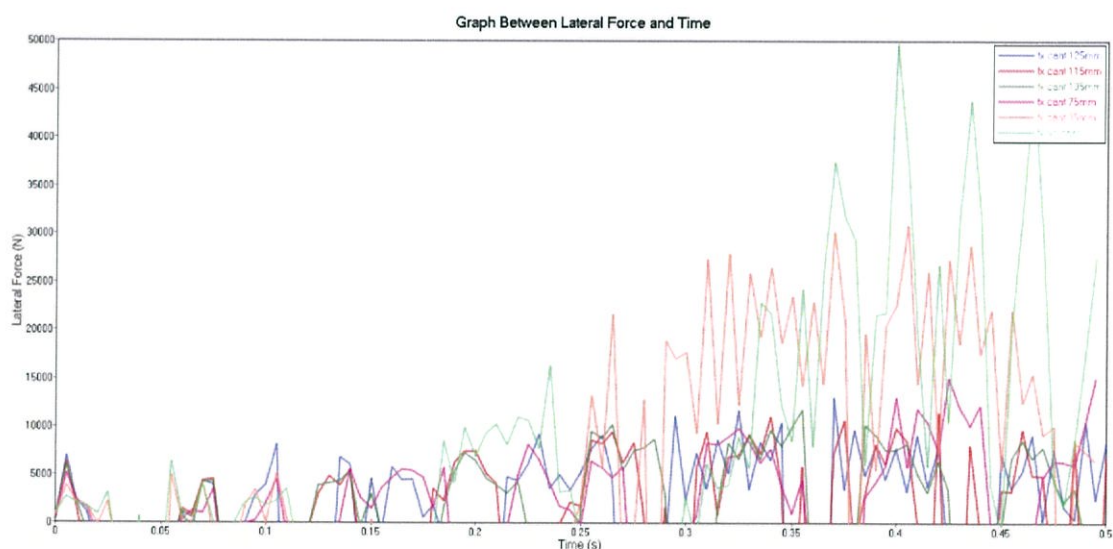
4.2.6 กรณียกโค้ง 0 มิลลิเมตร หรือไม่มีการยกโค้ง

กำหนดแบบจำลองให้อยู่ในระนาบปกติ คือ ไม่ให้ช่วงทางโค้งมีการยกโค้ง โดยจากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับเวลาในรูปที่ 4.9 พบว่าระหว่างช่วงเวลา $t=0.35$ ถึง $t=0.5$ วินาที เกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นในกราฟ โดยเมื่อทำการวัดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้แรงขนาด 49,683 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 0.4 วินาที

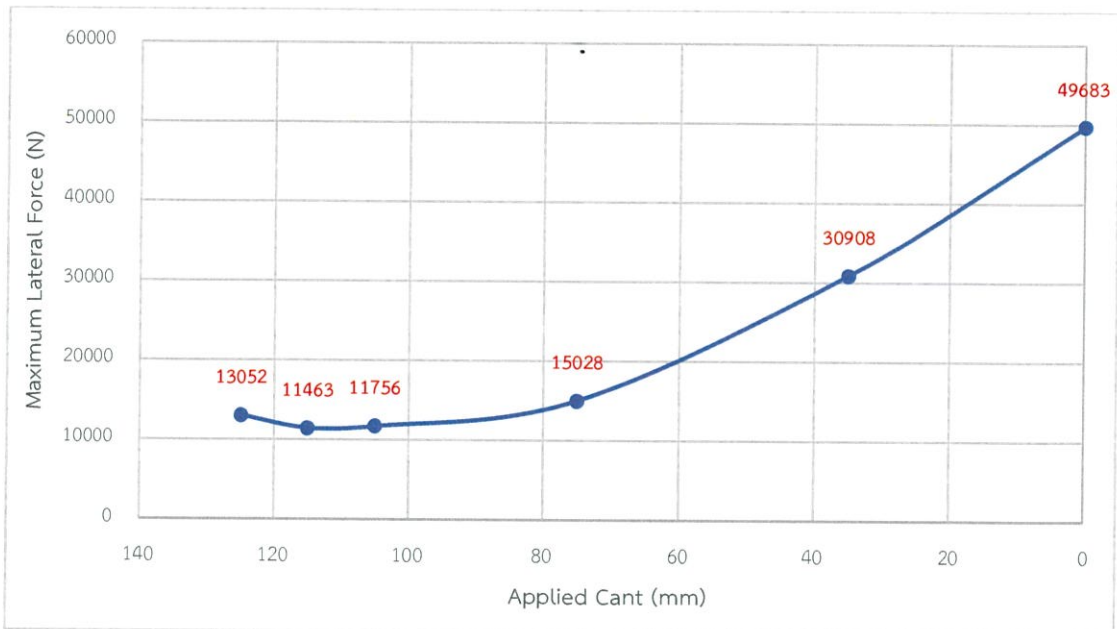


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และเวลาที่ชุดเพลาล้อใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งที่ไม่มีการยกโค้ง

เมื่อนำผลลัพธ์ของแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นจากการยกโคล้งทุกกรณีที่ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มารวมกันดังรูปที่ 4.10 จะสังเกตได้ว่าแรงกระทำด้านข้างมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 0.3 ถึง 0.5 วินาที และเมื่อนำค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของทุกกรณีมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการยกโคล้ง (Applied Cant) และแรงกระทำด้านข้างสูงสุด (Maximum Lateral Force) พบว่าการที่เราลดค่าการยกโคล้งของช่วงทางโค้งที่มีรัศมีเหมือนกันลง และใช้ความเร็วในการเดินทางเท่ากันในทุก ๆ การยกโคล้ง แนวโน้มของแรงกระทำด้านข้างจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 โดยใน 4 กรณีแรกที่ได้ทำการวิเคราะห์ อันได้แก่ การยกโคล้ง 125 มิลลิเมตร, 115 มิลลิเมตร, 105 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ค่าแรงกระทำด้านข้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทีละน้อยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าการยกโคล้ง 50 มิลลิเมตรเนื่องจากช่วงของกรณีที่ได้นำมาวิเคราะห์มีระยะห่างกว่า 4 กรณีแรกทำให้กราฟที่ได้มีความชันสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และเวลาของทุกกรณีการยกโคล้ง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างสูงสุด และเวลาของทุกกรณีการยกโค้ง

4.3 การวิเคราะห์แนวโน้มเกิดการตกรางด้วยสูตรของนาดาล (Nadal's Formula)

จากผลลัพธ์ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากกรณีการยกโค้งระดับต่าง ๆ ทั้งหมด 6 กรณี โดยนำผลลัพธ์ของแรงดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์แนวโน้มเกิดการตกรางโดยใช้สูตรของนาดาลและข้อจำกัดของนาดาล ดังนี้

จาก

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (4.1)$$

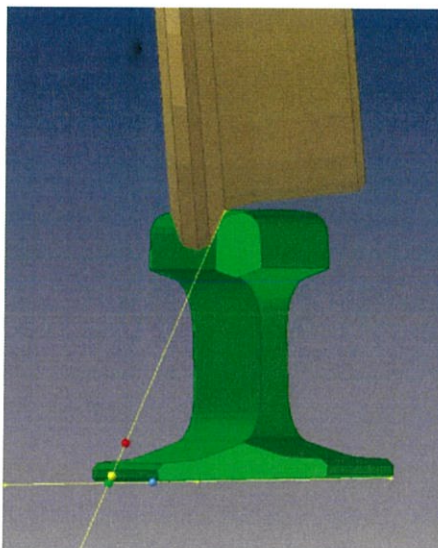
เมื่อ L คือ แรงกระทำด้านข้างในหน่วยนิวตัน

V คือ แรงกระทำแนวตั้งในหน่วยนิวตัน

โดยใช้น้ำหนักกดเพลลาสูงสุดจากข้อมูลขบวนรถที่ใช้เดินรถของโครงการ [25]

α คือ มุมสัมผัส มีค่าประมาณ 60 องศา (สามารถวัดได้จากแบบจำลองดังรูปที่ 4.12)

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการตันล้อ มีค่าเท่ากับ 0.3 [26]



รูปที่ 4.12 การวัดมุมสัมผัสระหว่างบังใบล้อและหัวราง

สำหรับข้อจำกัดของขนาดตาเป็นการเปรียบเทียบค่าของอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำด้านข้างต่อแรงกระทำแนวตั้ง (L-V Ratio) กับค่าคงที่ที่คำนวณได้ โดยหากอัตราส่วน L-V มีค่าไม่เกินค่าคงที่ จะแสดงให้เห็นว่า รถไฟไม่มีการตกรางเนื่องจากบังใบล้อป็นราง

$$\frac{L}{V} < \frac{\tan \alpha - \mu}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (4.2)$$

4.3.1 ตัวอย่างการคำนวณการตกรางด้วยสูตรของขนาดตาและข้อจำกัดของขนาดตาในกรณีการยกโค้ง 75 มิลลิเมตร

จาก

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 - \mu \tan \alpha}$$

เมื่อ L เท่ากับ 15,028 นิวตัน
 V เท่ากับ 151,074 นิวตัน
 α เท่ากับ 60 องศา
 μ เท่ากับ 0.3

จะได้

$$\frac{15,028 \text{ N}}{151,074 \text{ N}} = \frac{\tan 60 - 0.3}{1 - 0.3 \tan 60}$$

$$0.09 \neq 2.98$$

จากการคำนวณพบว่า ค่าของอัตราส่วน $\frac{L}{V}$ ไม่เกินค่าของ $\frac{\tan \alpha - \mu}{1 - \mu \tan \alpha}$ ที่เป็นค่าคงที่ในสูตรของขนาดลซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขข้อจำกัดการทรงตัวของขนาดลที่ว่า

$$\frac{L}{V} < \frac{\tan \alpha - \mu}{1 - \mu \tan \alpha}$$

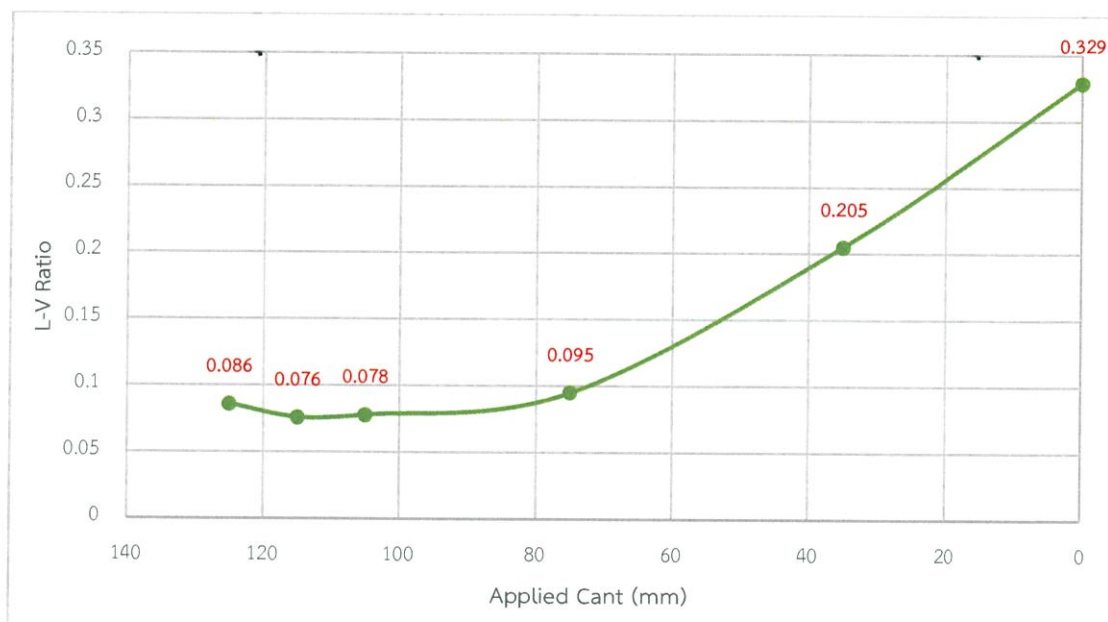
แสดงให้เห็นว่ารถไฟที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 70.64 กิโลเมตรต่อชั่วโมงผ่านช่วงทางโค้งรัศมี 295 เมตรและมีค่าการยกโค้ง 75 มิลลิเมตรนั้นมีแนวโน้มในการเกิดการทรงน้อย ซึ่งในขณะที่เคลื่อนไปในเส้นทางนั้นบังใบล้อไม่เกิดการป็นรางจึงไม่มีการทรง

4.3.2 ผลลัพธ์การคำนวณการทรงด้วยสูตรขนาดลและแนวโน้มการทรง

จากการนำค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดจากทุกกรณีมาทำการคำนวณด้วยสูตรของขนาดลและสรุปผลออกมาในรูปแบบของตารางและกราฟดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราส่วน L-V มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการยกโค้งลดลง แสดงให้เห็นว่าหากเราทำการลดค่าการยกโค้งมากเท่าไร แนวโน้มของโอกาสในการเกิดการทรงจะเพิ่มสูงขึ้นมากเท่านั้น

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์ของอัตราส่วน L-V ที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรของขนาดลจากการยกโค้งทุกกรณี

ค่าการยกโค้ง (มิลลิเมตร)	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (นิวตัน)	อัตราส่วน L-V
125	13,052	0.086
115	11,463	0.076
105	11,756	0.078
75	15,028	0.095
35	30,908	0.205
0 (ไม่มีการยกโค้ง)	49,683	0.329



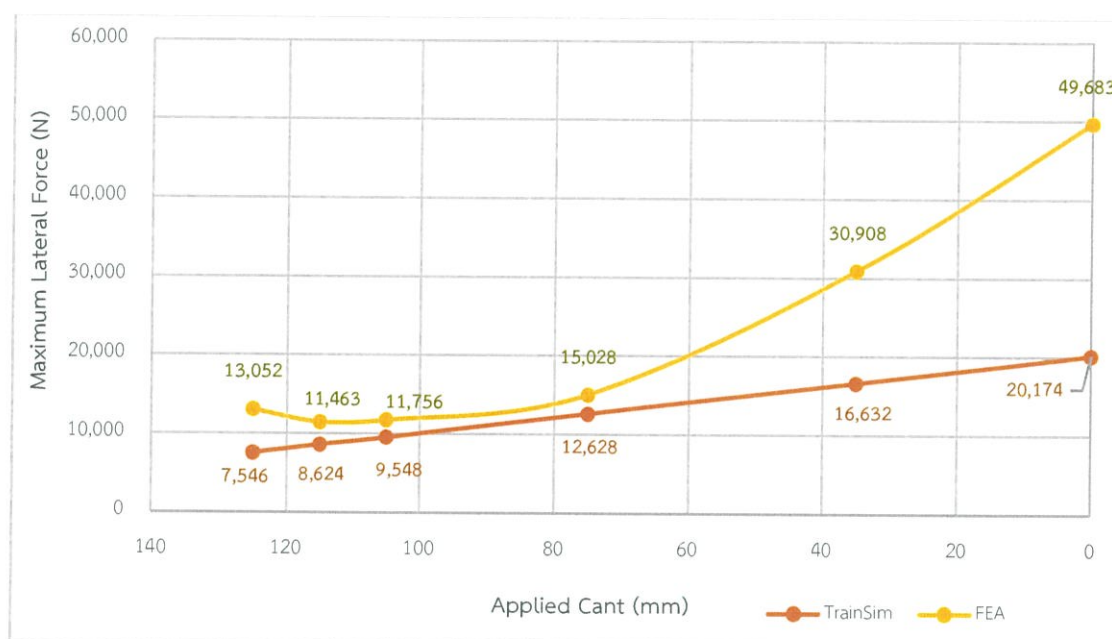
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน L-V และการยกโค้งทุกกรณี

4.4 การเปรียบเทียบผลจากการคำนวณจากทฤษฎีและผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการจำลองการเดินรถโดยการคำนวณด้วยทฤษฎีและการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถทำการเปรียบเทียบผลของแรงกระทำด้านข้างได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าค่าแรงกระทำด้านข้างที่ได้มีความสอดคล้องกันคือ เมื่อทำการลดค่าการยกโค้ง แรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นต่อรถไฟจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการจำลองการเดินรถมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการจำลองการเดินรถเป็นการคำนวณโดยใช้สูตรที่ถูกพิสูจน์จากพฤติกรรมของรถไฟในขณะหยุดนิ่งหรืออยู่ในสถานะที่เป็นสถิตยศาสตร์ (Statics) ในขณะที่การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการวิเคราะห์พลศาสตร์ของรถไฟ (Dynamics) ที่รถไฟเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้ง จึงทำให้แรงกระทำด้านข้างสูงสุดมีค่าแตกต่างกัน โดยเฉพาะในช่วงที่มีค่าการยกโค้งน้อยกว่า 75 มิลลิเมตร แรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการจำลองการเดินรถ เนื่องจากในขณะที่ขบวนรถเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งผลของการยกโค้งที่มีค่าน้อยมากจนใกล้เคียงสถานะที่ไม่มีการยกโค้งจะส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงกระทำต่อรถไฟจนเกิดแรงกระทำด้านข้างที่มีค่าสูงเพื่อชดเชยแรงเข้าสู่ศูนย์กลางที่หายไปเนื่องจากค่าการยกโค้งลดลง

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการจำลองการเดินรถและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ค่าการยกโค้ง (มิลลิเมตร)	แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (นิวตัน)	
	Train Simulation	Finite Element Analysis
125	7,546	13,052
115	8,624	11,463
105	9,548	11,756
75	12,628	15,028
35	16,632	30,908
0 (ไม่มีการยกโค้ง)	20,174	49,683



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการจำลองการเดินรถและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องผลของการยกโค้งต่อการทรงตัวของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ได้แบ่งผลการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของการจำลองการเดินรถ (Train Simulation) และส่วนของการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

การจำลองการเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ช่วงหัวลำโพง-บางแค โดยการคำนวณจากทฤษฎี เพื่อให้ได้ความเร็วในการเดินรถ (Train Operation Speed) และความเร่งกระทำด้านข้าง (Lateral Acceleration) และทำการเลือกช่วงทางโค้งที่มีแนวโน้มในการเกิดการตกรางมากที่สุดในเส้นทางโดยพิจารณาจากรัศมีโค้ง (Radius) ความเร็วในการเดินรถ และความเร่งกระทำด้านข้าง พบว่าช่วงทางโค้งหนึ่งระหว่างสถานีอิสรภาพและสถานีสนามไชยเป็นช่วงที่มีโอกาสในการเกิดการตกรางมากที่สุดในเส้นทาง เนื่องจากเป็นโค้งที่มีรัศมีน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีของโค้งอื่น และความเร็วของการเดินรถในช่วงทางโค้งนี้มีความเร็วใกล้เคียงความเร็วสูงสุดที่สามารถเดินรถได้ รวมถึงค่าความเร่งกระทำด้านข้างที่คำนวณได้มีค่าสูง และแนวโน้มของแรงกระทำด้านข้างที่คำนวณจากการยกโค้งในแต่ละกรณีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการยกโค้งลดลงและเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นและแนวโน้มของโอกาสในการเกิดการตกรางเบื้องต้นจากการยกโค้งที่ถูกออกแบบโดยการสร้างแบบจำลองสามมิติของชุดเพลาล้อและช่วงทางโค้งที่ได้จากการจำลองการเดินรถ จากผลการวิเคราะห์พบว่า พฤติกรรมของบงไบล้อสัมผัสกับรางเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าการยกโค้งลดลง ค่าของแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสระหว่างล้อกับรางด้านที่มีการยกโค้งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นโดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากการจำลองการเดินรถ ดังรูปที่ 4.13 ในบทที่ 4 จะเห็นว่า แนวโน้มของแรงกระทำด้านข้างที่เพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อนำแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของแต่ละกรณีทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาคำนวณเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของการตกรางโดยการประยุกต์ใช้สูตรของนาดาล (Nadal's Formula) พบว่าอัตราส่วนของแรงกระทำด้านข้างต่อแรงที่กระทำในแนวตั้ง (L-V Ratio) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการยกโค้งลดลงและเมื่อพิจารณาอัตราส่วน L-V ของแต่ละกรณีพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นไปตามข้อจำกัดการตกรางของนาดาล (Nadal's Limit) แสดงให้เห็นว่า ช่วงทางโค้งที่มีค่าการยกโค้ง (Cant) ในแต่ละกรณีมีความปลอดภัยและมีแนวโน้มของโอกาสในการเกิดการตกรางเนื่องจากบงไบล้อป็นรางน้อย

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

ถึงแม้ว่าค่าของแรงกระทำด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงกระทำด้านข้างที่ได้จากการจำลองการเดินรถมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันแต่ก็ยังมีค่าแตกต่างอยู่ โดยช่วงความแตกต่างของผลลัพธ์การคำนวณและการวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์เกิดจากการสร้างแบบจำลองที่เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ในช่วงทางโค้งได้ โดยถือว่าการสร้างแบบจำลองแบบพลวัต (Dynamics Simulation) ซึ่งแตกต่างจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีที่ผ่านการพิสูจน์มาในรูปแบบของสถิตยศาสตร์ (Statics)

การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการกำหนดกรณีศึกษาทั้งหมด 6 กรณีโดยเป็นการลดค่าการยกโค้งทั้งหมด ซึ่งแนวโน้มของแรงกระทำด้านข้างและอัตราส่วน L-V ที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ แนวโน้มของค่าทั้งสองเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการยกโค้งลดลง จึงทำให้เกิดการตั้งสมมติฐานสำหรับกรณีของการเพิ่มค่าการยกโค้งขึ้นที่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ยกขึ้นมาทำการพิจารณาว่า เป็นไปได้ที่แนวโน้มของแรงกระทำด้านข้างและอัตราส่วน L-V จะลดลง โดยพิจารณาจากแนวโน้มที่ได้ทำการวิเคราะห์ทั้ง 6 กรณี ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการเพิ่มกรณีของการเพิ่มค่าการยกโค้งขึ้นมาอีกกรณีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้โดยได้ทำการวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างของช่วงทางโค้งที่มีค่าการยกโค้ง 150 มิลลิเมตร ซึ่งจากกราฟผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 5.1 พบว่าแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นจากทั้ง 6 กรณีที่มีค่าการยกโค้งสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการตรวงเนื่องจากบังใบล้อปืนรางจะเห็นว่า เราไม่สามารถนำผลการทดลองนี้มาวิเคราะห์แนวโน้มการตรวงในกรณีนี้ได้ เนื่องจากการเพิ่มค่าการยกโค้งให้เกินกว่ามาตรฐานการออกแบบจะทำให้รถไฟเกิดการพลิกคว่ำ (Overturning) และตรวงได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการเพิ่มค่าการยกโค้งจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

5.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการพัฒนางานวิจัยนี้ควรเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์แรงจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยการสร้างเครื่องตรวจวัดแรงกระทำด้านข้างรถไฟและนำไปใช้ทดสอบกับเส้นทางจริงที่ได้ศึกษา นอกจากนั้นการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ควรเพิ่มตัวแปรที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางโค้ง เช่น คุณสมบัติของแคร่รถไฟ คุณสมบัติของทางรถไฟ คุณสมบัติของการดูดซับแรงของเครื่องยึดเหนี่ยวราง เป็นต้น โดยสามารถสร้างแบบจำลองในรูปแบบของ Multibody Simulation นอกจากนี้การวิเคราะห์แนวโน้มของการตรวงสามารถพิจารณาตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องนอกเหนือจากการยกโค้งได้ เช่น ความเร็วในการเดินรถ รัศมีโค้ง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.M. Agarwal, Satish Chandra. 2016. “**Derailment and its Causes.**” Accessed 20 October 2017. http://www.brainkart.com/article/Derailment-and-its-Causes_4316.
- [2] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. **The MRT Blue Line Extension Project System Performance Analysis.**
- [3] Altair HyperWorks. **Altair Products.** Accessed 10 March 2018. <https://altairhyperworks.com>.
- [4] Coenraad Esveld. 2001. **Modern Railway Track.** 2nd Edition. The Netherlands: MRT Productions.
- [5] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. **The MRT Blue Line Extension Project Contract 5: Trackwork Review Alignment: BS.** 2011.
- [6] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. **MRTA Design Standards Manual-Alignment & Trackwork.** Final (Rev.2). 2005.
- [7] Ahmed A. Shabana. **Nadal’s Formula and High Speed Rail Derailments.** Computational and Nonlinear Dynamics (2012) 7. doi: 10.1115/1.4006730.
- [8] Transportation Research Board. 2012. **Track Design Handbook for Light Rail Transit.** 2nd Edition. Washington, DC.
- [9] Tony DiMauro. “**Kinematics – One Dimensional Motion.**” Accessed 3 November 2017. <http://sdsu-physics.org/physics180/physics195/Topics/chapter2.html>.
- [10] Nilmani. “**Rail Wheel Interaction.**” Accessed 8 November 2017. <http://slideplayer.com/slide/4519286>.
- [11] G.Robert, M. Brian 2011. **Application of Nadal Limit in The Prediction of Wheel Climb Derailment.** The ASME/ASCE/IEEE 2011 Joint Rail Conference. Accessed 20 October 2017.
- [12] Roberto Spinola Barbosa. 2009. **Safety of A Railway Wheelset – Derailment Simulation With Increasing Lateral Force.** Vehicle System Dynamics (2009) 47: 1493–1510. Accessed 20 October 2017. doi: 10.1080/00423110802650024.
- [13] F.Mau, R.Bowey, B.Sismey. **More Cant Deficiency, More Speed – How Rail CRC Project 96 Showed Curve Speed Can Be Increased.** AusRAIL PLUS 2007. Sydney.

เอกสารอ้างอิง

- [14] Hiroyuki S. et al. 2010. **Wheel/Rail Contact Geometry on Tight Radius Curved Track: Simulation and Experimental Validation.** *Multibody System Dynamics* (2011)
- [15] วิกิพีเดีย. “**รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล.**” สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560 จาก https://th.wikipedia.org/wiki/รถไฟฟ้ามหานคร_สายเฉลิมรัชมงคล
- [16] การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย. “**โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน.**” สืบค้นเมื่อ 5 พฤศจิกายน 2560 จาก <http://www.mrta.co.th/th/projectelectrictrain/blueline>
- [17] <http://www.realist.co.th/blog/รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน-2>
- [18] <http://www.thansettakij.com/content/90114>
- [19] <https://www.renderthailand.com/blue-line-opening-plan>
- [20] Voestalpine. “**Profile Programme Section Programme.**” Accessed 8 November 2017. <http://www.voestalpine.com>.
- [21] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. **MRT Purple Line Project – Contract 4: Calculation Report – Axle and Wheels Strength.**
- [22] ArcelorMittal. “**60E1 (UIC60) Rail.**” Accessed 8 November 2017. <http://rails.arcelormittal.com/types-rails/uic60-60e1>
- [23] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. **Consulting Services for the Preparation of Implementation Criteria pursuant to Private-Sector Participation in State Undertakings Act B.E. 2535 Detailed and Definitive Designs and Tender Documentation for Blue Line Extension Project Hua Lamphong – Bang Khae and Bang Sue – Tha Phra Sections: Final Trackwork Design Report.** 2007.
- [24] Altair HyperWorks. **HyperWorks 2017 RADIOSS User Guide.** 2016.
- [25] SIEMENS. **Metro System – Bangkok MRTA, Thailand 19 Three-Cars Unit.** 2002.
- [26] X.Jun and Z.Qingyuan. 2005. **A Study on Mechanical Mechanism of Train Derailment and Preventive Measures for Derailment.** *Vehicle System Dynamics* (2005) 43: 121–147. Accessed 2 February 2018. doi: 10.1080/0042311041233132201.

ภาคผนวก

ตารางแสดงผลการจำลองการเดินรถ (ฉบับสมบูรณ์)

Station	POINT	STATUS	Travelling Distance, m		Speed, km/h		SP-IN (m)	RADIUS (m)	SP-OUT (m)	Acceleration		Cant, mm			time (sec)
			Total	Actual	u	v				ax	ay	he	hd	ha	
LAK SONG	BS20	Stop	0.000	0.000	0.00	0.00				0					240.00
		Acc.	176.991	176.991	0.00	72.00				1.13					17.70
		Cruise	378.703	555.694	72.00	72.00				0					18.94
		Circular	58.029	613.723	72.00	72.00	20.00	12000.00	20.00	0	0.03	5.11	5.11	0.00	2.90
		Tangent	566.071	1179.794	72.00	72.00				0					28.30
BANG KHAE	BS19	Stop	0.000	1402.016	0.00	0.00				0.9					22.22
		Acc.	176.991	1579.007	0.00	72.00				1.13					45.00
		Cruise	901.227	2480.234	72.00	72.00				0					17.70
		Deacc.	222.222	2702.456	72.00	0.00				0.9					45.06
															22.22
PHASI CHAROEN	BS18	Stop	0.000	2702.456	0.00	0.00				0					45.00
		Acc.	176.991	2879.447	0.00	72.00				1.13					17.70
		Cruise	173.767	3053.214	72.00	72.00				0					8.69
		Circular	162.937	3216.151	72.00	72.00	55.00	450.00	55.00	0	0.30	136.17	46.17	90.00	8.15
		Tangent	510.127	3726.278	72.00	72.00				0					25.51
PHET KASEM 48	BS17	Stop	0.000	3948.500	0.00	0.00				0.9					22.22
		Acc.	176.991	4125.491	0.00	72.00				1.13					45.00
		Cruise	569.756	4695.247	72.00	72.00				0					17.70
		Circular	137.576	4832.823	72.00	72.00	55.00	450.00	55.00	0	0.30	136.17	46.17	90.00	6.88
		Tangent	250.476	5083.293	72.00	72.00				0					12.52
BANG WA	BS16	Stop	0.000	5305.515	0.00	0.00				0.9					22.22
		Acc.	176.991	5482.506	0.00	72.00				1.13					45.00
		Cruise	606.266	6088.772	72.00	72.00				0					17.70
		Deacc.	222.222	6310.994	72.00	0.00				0.9					30.31
															22.22
BANG PHAI	BS15	Stop	0.000	6310.994	0.00	0.00				0					45.00
		Acc.	176.991	6487.985	0.00	72.00				1.13					17.70
		Cruise	13.150	6501.135	72.00	72.00				0					0.66
		Circular	53.827	6554.962	72.00	72.00	17.00	1250.00	17.00	0	0.06	49.02	9.02	40.00	2.69
		Tangent	20.871	6575.833	72.00	72.00				0					1.04
		Circular	53.828	6629.661	72.00	72.00	17.00	1250.00	17.00	0	0.06	49.02	9.02	40.00	2.69
		Tangent	405.845	7035.506	72.00	72.00				0					20.29
		Deacc.	20.139	7055.645	72.00	68.66				0.9					1.03
		Circular	97.479	7153.124	68.66	68.66	20.00	500.00	20.00	0	0.34	111.44	51.44	60.00	5.11
		Tangent	39.864	7192.988	68.66	61.52				0.9					2.20
		Circular	75.001	7267.989	61.52	61.52	25.00	300.00	25.00	0	0.58	149.12	89.12	60.00	4.39
		Tangent	162.249	7430.238	61.52	0.00				0.9					18.99
		THA PHRA	BS14	Stop	0.000	7430.238	0.00	0.00				0			
Acc.	176.991			7607.229	0.00	72.00				1.13					17.70
Cruise	126.152			7733.381	72.00	72.00				0					6.31
Circular	230.450			7963.831	72.00	72.00	75.00	300.00	75.00	0	0.52	204.25	79.25	125.00	11.52
Tangent	141.926			8105.757	72.00	72.00				0					7.10
Circular	54.002			8159.759	72.00	72.00	17.50	3000.00	17.50	0	0.13	20.43	20.43	0.00	2.70
Tangent	71.579			8231.338	72.00	72.00				0					3.58
Circular	92.868			8324.206	72.00	72.00	20.00	2000.00	20.00	0	0.13	30.64	20.64	10.00	4.64
Tangent	19.685			8343.891	72.00	72.00				0					0.98
Circular	92.869			8436.760	72.00	72.00	20.00	2000.00	20.00	0	0.13	30.64	20.64	10.00	4.64
Tangent	68.933			8505.693	72.00	72.00				0					3.45
Deacc.	11.333			8517.026	72.00	70.14				0.9					0.57
Circular	384.452			8901.478	70.14	70.14	75.00	310.00	75.00	0	0.41	187.58	62.58	125.00	19.73
Tangent	210.869	9112.347	70.14	0.00				0.9					21.65		
IT SARAPHAP	BS13	Stop	0.000	9112.347	0.00	0.00				0					45.00
		Acc.	176.991	9289.338	0.00	72.00				1.13					17.70
		Cruise	215.875	9505.213	72.00	72.00				0					10.79
		Circular	235.481	9740.694	72.00	72.00	20.00	993.70	20.00	0	0.14	61.66	21.66	40.00	11.77
		Tangent	110.435	9851.129	72.00	72.00				0					5.52
SANAM CHAI	BS12	Stop	0.000	10581.836	0.00	0.00				0.9					21.80
		Acc.	110.341	10692.177	0.00	56.85				1.13					45.00
		Circular	671.394	11363.571	56.85	56.85	17.00	190.00	17.00	0	0.50	201.06	76.06	125.00	42.52
		Tangent	66.647	11430.218	56.85	72.00				0					3.72
		Circular	91.082	11521.300	72.00	72.00				0					4.55
WANG BURAPHA	BS11	Stop	0.000	12007.309	0.00	0.00				0.9					22.22
		Acc.	90.729	12098.038	0.00	51.55				1.13					45.00
		Circular	207.291	12305.329	51.55	51.55	20.00	300.00	20.00	0	0.33	104.70	49.70	55.00	14.48
		Tangent	86.263	12391.592	51.55	72.00				1.13					5.03
		Deacc.	424.849	12816.441	72.00	72.00				0					21.24
WAT MANGKON	BS10	Stop	0.000	13038.663	0.00	0.00				0.9					22.22
									0					45.00	

Total Distance 13038.663 m

Avg. Speed 8.37728841 m/s
30.15823828 kph

Trip Time 1556.43 sec
or 25.94 min