

การทำนายการสึกหรอของแพนโทกราฟและแคทีนารี
ด้วยการใช้อัลกอริทึมของระบบมัลติบอดีแบบไม่เชิงเส้น

PREDICTION OF THE PANTOGRAPH/CATENARY WEAR USING
NONLINEAR MULTIBODY SYSTEM DYNAMIC ALGORITHMS

สิริพงษ์ ดาวเจริญพร

SIRIPONG DAOCHAROENPORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2024-EN-D- 058-274

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREDICTION OF THE PANTOGRAPH/CATENARY WEAR USING
NONLINEAR MULTIBODY SYSTEM DYNAMIC ALGORITHMS



SIRIPONG DAOCHAROENPORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-D- 058-274

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายการสีกหรือของแพนโทกราฟและแคทีนารี ด้วยการใช้อัลกอริทึมของระบบมัลติบอดีแบบไม่เชิงเส้น
นักศึกษา	นายสิริพงษ์ ดาวเจริญพร
รหัสประจำตัว	57601177
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้อัลกอริทึมของระบบมัลติบอดีถูกใช้ในการพัฒนารายละเอียดของแบบจำลองระบบขนส่งทางรางเพื่อการทำนายการสีกหรือที่มีผลมาจากปฏิสัมพันธ์ทางพลวัตระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารี การสีกหรือถูกทำนายภายใต้อัลกอริทึมของระบบมัลติบอดีสำหรับการเคลื่อนที่รูปแบบต่างๆที่ประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่ภายใต้ความเร็วคงที่บนทางโค้ง และการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงบนทางตรง โดยที่การสั่นที่เกิดขึ้นบนรถไฟจากรูปแบบการเคลื่อนที่ต่างๆข้างต้นส่งผลต่อแรงสัมผัสที่ใช้ในการศึกษาอัตราการสีกหรือบนลวดสัมผัส นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการสั่นอันเนื่องมาจากผลของลม ในกรณีที่มีรูปแบบของลมคงตัวทำให้จุดเด่นของการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ของแพนโทกราฟและแคทีนารียังคงแสดงผลอย่างต่อเนื่อง และในกรณีที่จุดเด่นของการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ของแพนโทกราฟและแคทีนารีหมดไปหลังจากการสิ้นสุดการรบกวนของลมแต่ยังมีการสั่นที่หลงเหลืออยู่ แบบจำลองการสีกหรือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วยผลจากทางกลและไฟฟ้า องค์กรประกอบไม่เชิงเส้น ANCF ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบแคทีนารีที่มีความยืดหยุ่นเพราะมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ร่วมกับอัลกอริทึมของระบบมัลติบอดี ด้วยเหตุผลนี้ทำให้สามารถตัดความไม่จำเป็นในการแก้ไขปัญหาค่าความซับซ้อนของการทำการคำนวณแบบจำลองร่วม เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลวดสัมผัสและลวดส่งกำลังในระบบแคทีนารีถูกจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยใช้อุปกรณ์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF แบบเคเบิล ในขณะที่สมการการสัมผัสกันแบบยืดหยุ่นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ยอมให้เกิดการแยกออกจากกันของแถบสัมผัสและลวดสัมผัส รวมไปถึงแรงเสียดทานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแถบสัมผัสบนลวดสัมผัส จากวิธีการข้างต้นทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานที่จุดสัมผัส การอาร์กไฟฟ้าเกิดจากการแยกออกจากกันระหว่างลวดสัมผัสและแถบสัมผัส การสีกหรือเชิงกลและไฟฟ้า โดยผลการคำนวณเชิงตัวเลขนำเสนอและวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบค่าอัตราการสีกหรือสำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่แบบต่างๆ และการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการรบกวนของลม

Thesis	Prediction of the Pantograph/Catenary Wear using Nonlinear Multibody System Dynamic Algorithms
Student	Mr.Siripong Daocharoenporn
Student ID.	57601177
Degree	Doctor of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Jittraporn Wongsan-gam
Thesis Co-Advisor	Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongroj

ABSTRACT

In this investigation, computational multibody systems (MBS) algorithms are used to develop detailed railroad vehicle models for the prediction of the wear resulting from the pantograph/catenary dynamic interaction. The wear is predicted using MBS algorithms for different motion scenarios that include constant-speed curve negotiation, and acceleration and deceleration on a tangent (straight) track. The effect of the vehicle vibration in these different motion scenarios on the contact force is further used to study the wear rates of the contact wire. Furthermore, this investigation considers the vibration caused by a crosswind scenario. In the case of a steady crosswind scenario, which contains the advantage of the pantograph–catenary aerodynamic design, and the vibration of the catenary system remains significantly after the crosswind load disturbances. The wear model used in this investigation accounts for the electrical and the mechanical effects. The nonlinear finite element (FE) absolute nodal coordinate formulation (ANCF), which is suitable for implementation in MBS algorithms, is used to model the flexible catenary system, thereby eliminating the need for using incremental rotation procedures and co-simulation techniques. In order to obtain efficient solutions, the overhead contact line and the messenger wire, both are modeled using the gradient deficient ANCF cable element. The pantograph/catenary elastic contact formulation employed in this study allows for separation between the pantograph pan-head and the contact wire, and accounts for the effect of friction due to the sliding between the pantograph pan-head and the catenary cable. The approach proposed in this investigation

can be used to evaluate the electrical contact resistance, contribution of the arcing resulting from the pan-head/catenary separation, mechanical and electrical wear contributions. Numerical results are presented and analyzed to examine the wear rates for different motion scenarios and the vibration caused by a crosswind scenario.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ประกาศโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ Prof. Ahmed A. Shabana และ Shubhankar Kulkarni ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย รวมไปถึงการใช้ห้องทดลองที่ University of Illinois at Chicago (UIC)

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.จิตรารัตน์ วงศ์งาม และพี่ๆจากฝ่ายบัณฑิตที่คอยให้คำปรึกษามาโดยตลอด และที่ขาดไม่ได้ ขอขอบคุณสำหรับความห่วงใยและกำลังใจจากครอบครัวซึ่งเป็นที่รักและเคารพ ยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สิริพงษ์ ดาวเจริญพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 การศึกษา	5
2.1 การศึกษาของระบบส่งกำลังเหนือหัว	5
2.2 แบบจำลองการศึกษาคircuit	6
บทที่ 3 สมการแรงสัมพันธ์ระหว่างแผนโทกราฟและแคทีนารี	9
3.1 จุดสัมผัสและแนวแกน	9
3.2 แรงสัมพันธ์	11
3.3 สมการแรงตามหลักการของอากาศพลศาสตร์บนแผนโทกราฟและแคทีนารี	12
บทที่ 4 แบบจำลองของแคทีนารีและสมการจำลององค์ประกอบ ANCF	13
บทที่ 5 ระบบมัลติบอดีและสมการการเคลื่อนที่	18
5.1 แบบจำลองมัลติบอดีของระบบขนส่งทางรางและระบบแผนโทกราฟ	18
5.2 การสัมพันธ์กันของล้อและราง	21
5.3 แบบจำลองของรางรถไฟ	23
5.4 สมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองระบบมัลติบอดี	23
บทที่ 6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข	25
6.1 การเคลื่อนที่บนทางโค้งและการวิเคราะห์	25
6.2 การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงและการวิเคราะห์การศึกษา	32
6.3 การเคลื่อนที่ของรถไฟภายใต้การก่อกวนของลมและการวิเคราะห์การศึกษา	43
6.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	50



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการการสึกหรอ	8
ตารางที่ 2 ค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบแคทีนารี	15
ตารางที่ 3 ข้อมูลของแบบจำลองระบบขนส่งทางราง	20
ตารางที่ 4 ข้อมูลการเชื่อมต่อแบบจำลองแพนโทกราฟ	21
ตารางที่ 5 ข้อมูลของแบบจำลองแพนโทกราฟ	22
ตารางที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจุดและแรงยกที่ได้จากการทดลอง	22
ตารางที่ 7 ค่าของตัวแปรที่กำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของรางโค้ง	24
ตารางที่ 8 ค่ามาตรฐานสำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารี	28
ตารางที่ 9 ผลการคำนวณในแต่ละช่วงบนการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	31
ตารางที่ 10 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่เคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วง	34
ตารางที่ 11 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่เคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงที่มีร้อยละการเกิดการสูญเสียการสัมผัส	37
ตารางที่ 12 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่เคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงต่างกัน	39
ตารางที่ 13 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่มีความเร็วลมคงตัวและขนาดของความเร็วลมที่ต่างกันภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตัน	50
ตารางที่ 14 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่มีความเร็วลมคงตัวและขนาดของความเร็วลมที่ต่างกันภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1815.69 นิวตัน	50
ตารางที่ 15 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่มีการรบกวนจากลมและขนาดของความเร็วลมที่ต่างกันภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตัน	52

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	5
รูปที่ 2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคทีนารี	14
รูปที่ 3 แผนผังอย่างง่ายของการออกแบบระบบแคทีนารี	15
รูปที่ 4 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแนวแกนตามขวางบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง (..... ลวด สัมผัส — จุดกึ่งกลางของแถบสัมผัส - - - ระยะไกลสุดบนแถบสัมผัสทั้งสองด้าน)	16
รูปที่ 5 แบบจำลองระบบขนส่งทางราง	19
รูปที่ 6 แผนภาพของระบบมัลติบอดีของระบบแพนโทกราฟ	21
รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ด้วยสมการการเคลื่อนที่	26
รูปที่ 8 แรงสัมผัสที่เปลี่ยนไปตามเวลาบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	28
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบของระยะตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัส (— การคำนวณ - - - การออกแบบ)	29
รูปที่ 10 แสดงระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวดที่ถูกสัมผัสตามแนวแกนตามขวางเมื่อมีการ พิจารณาผลของแรงเสียดทานและไม่มีผลของแรงเสียดทาน	30
รูปที่ 11 แสดงแรงสัมผัสระหว่างแพนเฮดกับลวดที่ถูกสัมผัสเมื่อพิจารณาและพิจารณาผลของการ เคลื่อนที่แบบหมุนของแพนโทกราฟบนทางโค้ง	31
รูปที่ 12 ความต้านทานที่จุดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	32
รูปที่ 13 การสึกหรอทางกลตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	33
รูปที่ 14 การสึกหรอทางไฟฟ้าตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	33
รูปที่ 15 การสึกหรอรวมตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง	34
รูปที่ 16 การเปรียบเทียบแรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความเร็วคงที่ (- - - กรณี 1, — กรณีที่ 5)	36
รูปที่ 17 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (- - - กรณีที่ 3, กรณีที่ 4, — กรณีที่ 5)	36
รูปที่ 18 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีที่ 6 กรณีที่ 8)	37
รูปที่ 19 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีที่ 1, กรณีที่ 3)	40
รูปที่ 20 ความต้านทานที่จุดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีที่ 1, กรณีที่ 3)	40

รูปที่ 21 การสีกหรือทางไฟฟ้าบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (——— กรณีที่ 1, กรณีที่ 3)	40
รูปที่ 22 การสีกหรือทางกลบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (——— กรณีที่ 1, กรณีที่ 3)	41
รูปที่ 23 การสีกหรือรวมบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (——— กรณีที่ 2, กรณีที่ 3)	41
รูปที่ 24 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (——— กรณีที่ 4, กรณีที่ 6)	42
รูปที่ 25 ความต้านทานที่จุดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง(——— กรณีที่ 4 กรณีที่ 6)	43
รูปที่ 26 การสีกหรือทางไฟฟ้าบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (——— กรณีที่ 4 กรณีที่ 6)	43
รูปที่ 27 การสีกหรือทางกลบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (——— กรณีที่ 4 กรณีที่ 6)	44
รูปที่ 28 การสีกหรือรวมบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (——— กรณีที่ 5 กรณีที่ 6)	44
รูปที่ 29 แสดงแรงสัมผัสในกรณีที่มีลมและไม่มีลมพัดผ่านระบบ	45
รูปที่ 30 แสดงระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแพนเฮดตามแกนตามขวางในกรณีที่มีลมและไม่มีลมพัดผ่านระบบ	46
รูปที่ 31 แสดงแรงสัมผัสเมื่อลมที่ผ่านระบบมีทิศทางลมแตกต่างกัน	47
รูปที่ 32 แสดงระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแพนเฮดตามแกนตามขวางเมื่อลมที่ผ่านระบบมีทิศทางลมแตกต่างกัน	47
รูปที่ 33 แรงสัมผัสบนการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตัน	49
รูปที่ 34 ค่าแรงสัมผัสที่เวลาต่างๆเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ภายใต้แรงลมคงที่ที่มีขนาดความเร็วต่างกัน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 30 m/s	49
รูปที่ 35 ค่าแรงสัมผัสที่เวลาต่างๆเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ภายใต้แรงลมรบกวนที่มีขนาดความเร็วต่างกัน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 30 m/s	51
รูปที่ 36 การเปรียบเทียบการสูญเสียของพื้นที่ของลวดสัมผัส (—✕— จากเอกสารอ้างอิง[7] ● วิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้)	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบมัลติบอดี(Multibody system, MBS)สำหรับการนำไปใช้ในการทำนายการสีกหรือของระบบส่งกำลังเหนือหัว(pantograph/catenary system) ร่วมกับแบบจำลองระบบการขนส่งทางราง โดยวิธีการทำทนายการสีกหรือร่วมกับระบบมัลติบอดีสามารถใช้ในการทำนายการสีกหรือของระบบส่งกำลังเหนือหัวภายใต้รูปแบบการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งทางรางที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำนายการสีกหรือร่วมกับระบบมัลติบอดีสำหรับการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ซึ่งไปประกอบด้วย รถไฟที่มีอัตราเร็วคงที่ขณะเข้าโค้ง รถไฟที่มีความเร่งคงที่และความหน่วงคงที่บนการเคลื่อนที่บนทางตรง และทำนายการสีกหรือร่วมกับระบบมัลติบอดีสำหรับการรบกวนของลม สำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันทั้งหมดและการรบกวนของลมทำให้พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบขนส่งทางรางส่งผลต่อแรงสัมผัสระหว่างแป้นโทกราฟและแคทีนารี(pantograph/catenary contact force) และอัตราการสีกหรือของลวดแคทีนารี

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาระบบขนส่งทางรางจนกลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในหลากหลายประเทศทั่วโลก โดยพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบส่งกำลังเหนือหัวได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อคุณภาพของการส่งถ่ายกำลัง ดังนั้นการสร้างแบบจำลองการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำเพื่อใช้ในการประเมินแรงสัมผัสระหว่างแป้นโทกราฟและแคทีนารีได้ถูกพัฒนาอย่างแพร่หลาย [1-12] ภายใต้สภาพการทำงานจริงของระบบขนส่งทางรางและระบบส่งไฟฟ้าเหนือหัวพบว่าสภาพอากาศเป็นอีกหนึ่งเงื่อนไขที่มีผลต่อการสภาพการทำงานโดยสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปัญหาร้ายแรงต่อการปฏิบัติงานของแหล่งจ่ายไฟ เช่น การอาร์ก อัตราการสีกหรือสูง และการสูญเสียการสัมผัสของแถบสัมผัสบนแป้นเฮด(panhead)และลวดสัมผัส(contact wire) เป็นต้น การอาร์กเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอัตราการสีกหรืออย่างมีนัยสำคัญของวัสดุบนแถบสัมผัส และอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบฮาร์ดแวร์ด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานและความน่าเชื่อถือของระบบขนส่งทางรางรวมไปถึงค่าซ่อมแซมที่มีราคาสูงด้วย จากปัญหาที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ร่วมกับการทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาพอากาศที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการศึกษาพฤติกรรมของอากาศพลศาสตร์ของระบบส่งกำลังเหนือหัว[13-17] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการพิจารณาถึงค่าของแรงสัมผัสระหว่างแป้นโทกราฟและแคทีนารีและการสูญเสียการแตะสัมผัสกันที่เกิดขึ้น

การออกแบบระบบส่งกำลังเหนือหัวมีผลอย่างมากต่ออัตราการสีกหรือของวัสดุบนแถบสัมผัสบนแป้นโทกราฟและลวดสัมผัสในแคทีนารีส่งผลให้การออกแบบพารามิเตอร์มีความสำคัญอย่างเป็นนัยยะต่ออายุการใช้งานตลอดจนค่าบำรุงรักษาของระบบส่งกำลังเหนือหัว จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราการสีกหรือของ

ลวดสัมผัสบนแคทีนารีมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยลวดทรอปเปอร์ที่ใช้ยึดระหว่างลวดส่งกำลังกับลวดสัมผัสในแคทีนารีเพื่อปรับโปรไฟล์ของลวดสัมผัส แรงดึงในเส้นลวดของระบบแคทีนารี แรงยกบนแพนโทกราฟ การเลือกใช้วัสดุบนหัวรับกำลังไฟฟ้า รวมไปถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งรฟไฟฟ้า[7,8] ในการทำนายการสึกหรอแบบจำลองการสึกหรอที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำหรับลวดสัมผัสทองแดงถูกนำเสนอและพัฒนาโดย Bucca และ Collina[8] โดยแบบจำลองการสึกหรออธิบายถึงการสึกหรอที่เกิดจากผลกระทบของจุลของกระแสไฟฟ้า แรงเสียดทานจากการสัมผัสทางกล และอาร์กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันพฤติกรรมทางพลวัตของระบบขนส่งทางรางบนทางโค้งเป็นประเด็นของการศึกษาอย่างแพร่หลาย[18-22] แต่การศึกษาการสึกหรอวัสดุบนหัวรับกำลังไฟฟ้าบนระบบส่งกำลังเหนือหัวภายใต้รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางโค้งรวมไปถึงการเคลื่อนที่ภายใต้สภาวะที่มีความเร่งและความหน่วงคงที่ยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน หรืออีกนัยหนึ่งการศึกษาค่าการสึกหรอร่วมกับการคำนวณพฤติกรรมทางพลวัตของแบบจำลองรถไฟยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลวัตภายใต้ระบบมีลติบอดีถูกใช้พัฒนาแบบจำลองของระบบขนส่งทางรางร่วมกับระบบส่งกำลังเหนือหัวเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอร่วมกับการคำนวณพฤติกรรมทางพลวัตของแบบจำลองรถไฟข้างต้นได้ ทฤษฎีองค์ประกอบANCF(Absolute Nodal Coordinate Formulation) ถูกพัฒนาและการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านอื่นๆ อาทิเช่น โครงสร้างของของไหล ยางรถยนต์ และระบบขนส่งทางราง[23] เป็นต้น โดยองค์ประกอบANCFถูกใช้ในงานทางวิศวกรรมสำหรับองค์ประกอบยึดหยุ่นขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก ดังนั้นองค์ประกอบANCFแบบเคเบิลถูกนำมาประยุกต์ใช้กับพฤติกรรมทางพลวัตของระบบมีลติบอดีด้วยการใช้สมการการสัมผัสกันเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลวัตของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารี[11,16,24,25] ซึ่งมีหลากหลายแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยก่อนหน้านี้[34-38] เพื่อใช้ในการหาพฤติกรรมทางพลวัตจากการรบกวนของสภาพอากาศและลมที่เกิดขึ้นบนระบบแพนโทกราฟและแคทีนารี โดยที่การสั่นหรือเงื่อนไขที่ทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาต่อสภาวะการทำงานจริงของระบบส่งกำลังเหนือหัว [25-27] พฤติกรรมทางพลวัตของการสัมผัสกันของระบบส่งกำลังเหนือหัวถูกคำนวณโดยใช้สมการการเคลื่อนที่ระหว่างแบบจำลองของแพนโทกราฟและแคทีนารีด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของลวดสัมผัส เช่นความบิดเบี้ยวของรูปทรงทางเรขาคณิต ความไม่ต่อเนื่องของข้อออสายไฟ และการเกิดคลื่นสั้น[28] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมทางพลวัตของระบบขนส่งทางรางรวมไปถึงผลของการเคลื่อนที่และการหมุนของโปกี้และการสัมผัสของล้อและรางส่งผลต่อระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีและอาจลดความน่าเชื่อถือของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีภายใต้สภาวะที่รุนแรงของความผิดปกติของรางมาก [29] และอัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นบนระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีมีความเป็นไปได้อย่างมากในการสร้างความเสียหายต่อระบบฮาร์ดแวร์ซึ่งนำไปสู่ความไม่ปลอดภัยในสภาวะการทำงานจริงและทำให้เกิดค่าบำรุงรักษาที่แพงขึ้น[30-33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการพัฒนาการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของระบบมัลติบอดีเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการศึกษาหรือของระบบส่งกำลังเหนื่อหัวที่มีการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ วัตถุประสงค์ประกอบไปด้วย

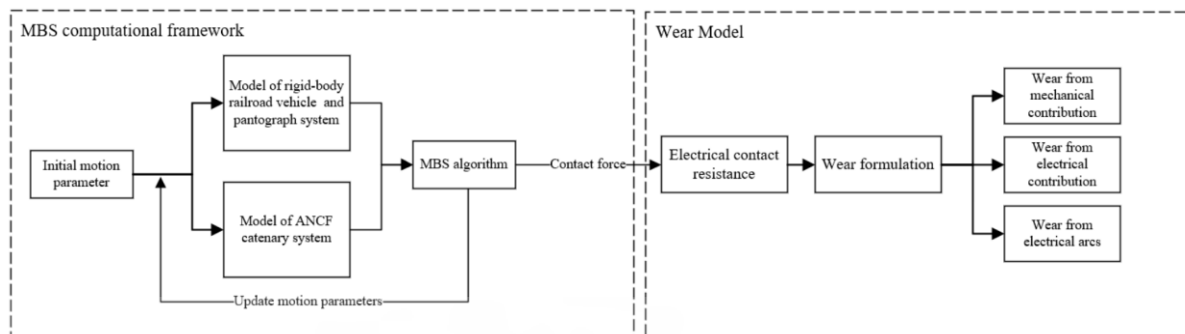
- 1 การพัฒนาการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของระบบมัลติบอดี
- 2 วิเคราะห์พฤติกรรมการศึกษาหรือของระบบส่งกำลังเหนื่อหัว
- 3 สร้างแบบจำลองสามมิติของระบบขนส่งทางรางในระบบมัลติบอดี
- 4 สร้างแบบจำลองสามมิติของระบบส่งกำลังเหนื่อหัวในระบบมัลติบอดี
- 5 สร้างแบบจำลองของระบบแคทีนารีเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF แบบเคเบิล
- 6 การรวมสมการการศึกษาหรือกับอัลกอริทึมของระบบมัลติบอดี
- 7 การคำนวณเชิงตัวเลขของสมการเชิงตัวเลขของระบบวิศวกรรมที่ซับซ้อนภายใต้อัลกอริทึมของระบบมัลติบอดี
- 8 การวิเคราะห์การศึกษาหรือที่เกิดขึ้นเนื่องจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบต่างๆ

จากวัตถุประสงค์ข้างต้นสามารถอธิบายถึงที่มาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ การพัฒนาการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของระบบมัลติบอดีเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการศึกษาหรือของระบบส่งกำลังเหนื่อหัวที่มีการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ และการรวบรวมจากลมภายใต้แบบจำลองการศึกษาหรือของ Bucca และ Collina[8] แบบจำลองการศึกษาหรือของ Bucca และ Collina ถูกสร้างและพัฒนาโดยใช้หลักการทางไดรโพลีภายใต้สภาวะการทำงานจริงของระบบส่งกำลังเหนื่อหัว ผลของการศึกษาพบว่าอัตราการศึกษาหรือมีความซับซ้อนโดยมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องเนื่องกันระหว่างการศึกษาหรือที่มีผลกระทบมาจากทางกลและไฟฟ้า โดยกลไกการศึกษาหรือหลักประกอบด้วยสามปัจจัย ปัจจัยที่หนึ่งอัตราการศึกษาหรือที่มีผลกระทบมาจากทางกล หรือ อัตราการศึกษาหรือเชิงกลซึ่งเกิดมาจากการเสียดสีแบบเลื่อนระหว่างวัสดุบนแถบสัมผัสและลวดสัมผัส ปัจจัยที่สองอัตราการศึกษาหรือที่มีผลกระทบมาจากทางไฟฟ้า หรือ อัตราการศึกษาหรือเชิงไฟฟ้าเกิดมาจากผลกระทบของจุลที่มีความเข้มข้นของการส่งกระแสไฟฟ้าจากลวดสัมผัสไปยังแถบสัมผัส และปัจจัยที่สามคืออัตราการศึกษาหรือที่มีผลกระทบมาจากการอาร์คไฟฟ้าเกิดมาจากการแยกออกจากกันระหว่างลวดสัมผัสและแถบสัมผัส เนื่องจากอัตราการศึกษาหรือที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปัจจัยข้างต้นไม่ได้เป็นอิสระต่อกันหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืออัตราการศึกษาหรือมีความซับซ้อนและมีความเกี่ยวข้องกับแบบไม่เป็นเชิงเส้น การสร้างแบบจำลองการศึกษาหรือถูกทำให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นด้วยการทดลองผ่านชุดทดลองและสภาพการทำงานจริง ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบบจำลองสามมิติของระบบขนส่งทางรางและระบบส่งกำลังเหนื่อหัวถูกสร้างขึ้นในระบบมัลติบอดี โดยส่วนประกอบของระบบขนส่งทางรางและแพนโทกราฟถูกจำลองเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และระบบแคทีนารีถูกจำลองเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF แบบเคเบิล การเลือกใช้แบบจำลองเป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANCF สามารถนำไปคำนวณร่วมกับขั้นตอนวิธีในระบบมัลติบอดีได้โดยตรงและสามารถแก้ไขปัญหาคำนวณซับซ้อนในการทำการคำนวณแบบจำลองร่วม ผลจากการคำนวณแรงสัมผัสระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารี ถูกจำลองด้วยสมการจำลองการสัมผัสกับแบบยืดหยุ่นเพื่อใช้ในการอธิบายถึงการแยกออกจากกันระหว่างลวดสัมผัสและหัวรับกำลังไฟฟ้า การสัมผัสกันแบบเลื่อนไถลทั้งตามแนวการเคลื่อนที่บนหัวรับกำลังไฟฟ้าและตามแนวลวดสัมผัสแบบจำลองมีความสามารถในการแยกออกของระบบส่งกำลังเหนือหัวส่งผลให้แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดจากการสูญเสียการแตะสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้ รูปแบบการเคลื่อนที่แบบแรก เป็นการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางโค้งและพิจารณาผลของแรงสัมผัสและลวดสัมผัสต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองการสึกหรอของ Bucca และ Collina [8] ภายใต้อัตราเร็ววงที่ สำหรับการเคลื่อนที่บนทางโค้งได้ทำการออกแบบลักษณะทางเรขาคณิตของระบบลวดส่งกำลัง(Catenary system)ให้เป็นองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCFแบบเคเบิล โดยการหาตำแหน่งของเสารองรับระบบลวดแคทีนารีด้วยข้อจำกัดของลวดแคทีนารีไม่สามารถดัดให้มีความโค้งรองรับการเคลื่อนที่บนทางโค้งได้การระบุตำแหน่งของเสารองรับระบบลวดแคทีนารี(Support Pole)ต้องคำนึงถึงระยะตามแนวทางของจุดสัมผัสต้องมีค่าไม่เกินความยาวด้านข้างของแถบสัมผัสรูปแบบการเคลื่อนที่แบบที่สองและแบบที่สามได้ทำการพิจารณารถไฟฟ้าเคลื่อนที่ภายใต้ค่าความเร่งและความหน่วงที่แตกต่างกัน รวมไปถึงค่าของแรงยกที่แตกต่างกันด้วยและทำการคำนวณอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากแรงสัมผัสที่แตกต่างกันจากรูปแบบการเคลื่อนที่ต่างๆ และนอกจากนี้ยังพิจารณาผลของการสั่นเนื่องจากการรบกวนของลมคงตัวโดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นกรณีการสั่นที่เกิดขึ้นภายใต้ข้อดีจากการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีและการสั่นที่ยังคงหลงเหลืออยู่เมื่อปราศจากลมหรือหมายถึงการสั่นที่ไม่มีข้อดีจากการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีหลงเหลืออยู่ภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่

จุดประสงค์ของกรอบการทำงานทางคอมพิวเตอร์เพื่อทำการรวมรูปแบบการสึกหรอและสมการการสึกหรอกับอัลกอริทึมของระบบมัลติบอดีที่ถูกออกแบบสำหรับโครงสร้างและการคำนวณเชิงตัวเลขของสมการเชิงตัวเลขของระบบวิศวกรรมที่ซับซ้อน รูปแบบการคำนวณที่ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานทางไฟฟ้าของจุดสัมผัส การเกิดการอาร์กไฟฟ้าที่มีสาเหตุมาจากการสูญเสียการแตะสัมผัสของระบบส่งกำลังเหนือหัว การสึกหรอทางกลและทางไฟฟ้าและผลของแรงยกบนระบบแพนโทกราฟที่เปลี่ยนไปต่ออัตราการสึกหรอ และมีแผนผังการทำงานของการทำงานของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของ การคำนวณทางคอมพิวเตอร์

1.3 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจัดรูปแบบการนำเสนอ ดังนี้ ในบทที่ 2 การศึกษาหรือเป็นการบรรยายแบบจำลองการสึกหรอที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งประกอบด้วยผลของการสึกหรอเชิงกลและไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์ต่อปฏิกิริยาของการสัมผัสระหว่างแป้นโทกราฟและแคทีนารี บทที่ 3 สมการแรงสัมผัสระหว่างแป้นโทกราฟและแคทีนารีได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับสมการแรงสัมผัสระหว่างแป้นโทกราฟและแคทีนารีที่ถูกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ร่วมกับลวดแคทีนารีที่มีความยืดหยุ่น ส่วนที่ 4 แบบจำลองของแคทีนารีและสมการจำลององค์ประกอบ ANCF เกี่ยวกับการออกแบบระบบลวดแคทีนารีที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางโค้งและสมการแบบจำลองขององค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF ส่วนที่ 5 ระบบมัลติบอดีและสมการการเคลื่อนที่ได้บรรยายละเอียดของแบบจำลองของระบบมัลติบอดีของรถไฟ แป้นโทกราฟ รางรถไฟ และ สมการการสัมผัสของล้อและราง ส่วนที่ 6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขได้นำเสนอและพิจารณาผลเชิงตัวเลขที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้ ส่วนที่ 7 ได้นำเสนอสรุปผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2

การสีกหรอ

การสีกหรอของระบบส่งกำลังเหนื่อหัวได้ถูกค้นคว้าและวิจัยอย่างกว้างขวาง ซึ่งการสีกหรอที่เกิดขึ้นบนแพนเฮดและลวดสัผัสมีผลต่อค่าบำรุงซ่อมแซมอย่างมีนัยสำคัญและยังคงส่งผลต่อความสม้าเสมอของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านระบบส่งกำลังเหนื่อหัว [7,8,39-44]

2.1 การสีกหรอของระบบส่งกำลังเหนื่อหัว

พฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าถูกนำมาใช้อธิบายธรรมชาติการสัมผัสกันระหว่าง วัสดุบนหัวรับกำลังไฟฟ้า และ ลวดส่งกำลัง ในเบื้องต้นได้มีการทดลอง [40] แถบสัมผัสบนแพนเฮดโดยการเปลี่ยนชนิดของวัสดุเพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าสูงสุดเมื่อเป็นการสัมผัสระหว่างเนื้อวัสดุที่ทำมาจากทองแดงกับทองแดงภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีสารหล่อลื่น และมีการหาค่าที่เหมาะสมของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.24 สำหรับผิวสัมผัสที่ทำมาจากวัสดุคาร์บอนกับทองแดง และได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่าการเสีรูแบบถาวรของวัสดุแบบไม่แน่นอนเป็นปัจจัยที่สำคัญในการสีกหรอของลวดสัผัสภายใต้การสัมผัสแบบเลื่อนไถลระหว่างโลหะกับโลหะ Kubo และ Kato [42,43] ได้ทำการศึกษาผลของการปลดปล่อยประจุหรือการอาร์กไฟฟ้าต่ออัตราการสีกหรอของทองแดงบนแถบสัมผัสรวมไปถึงอัตราการสีกหรอที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานการถ่ายโอนประจุไฟฟ้า นอกจากนี้พลังงานจากการอาร์กไฟฟ้าทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดผลของความร้อน เช่น การหลอมเหลว การระเหยของเนื้อวัสดุ การหลุดออกของอนุภาค และการออกซิเดชันของคาร์บอนอุณหภูมิภายใต้สภาวะการทำงานนั้นมีค่าสูงถึง 200-550 องศาเซลเซียสส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของจารบีมีค่าลดลง กระบวนการอาร์กไฟฟ้าได้ถูกศึกษาเพิ่มเติมโดย Chen [45] และถูกสรุปว่าการอาร์กไฟฟ้ามีผลอย่างรุนแรงต่ออุปกรณ์บนระบบรับส่งกำลังไฟฟ้า และพบว่าอัตราการสีกหรอบนแถบส่งกำลังถูกประมาณให้มีอัตราส่วนโดยตรงกับพลังงานการถ่ายโอนประจุตามความสัมพันธ์แบบลอการิทึมและได้มีการสรุปในลักษณะเดียวกันจากการทดลองของ Kubota [46] สำหรับแถบสัมผัสโลหะผสมทองแดงชุบคาร์บอน นอกจากนี้ Ding [39] ได้ทำการทดลองระหว่างแถบสัมผัสที่ทำมาจากคาร์บอนบริสุทธิ์และลวดสัผัสที่ทำมาจากทองแดง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าบนลวดส่งกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าและแรงยึดติดกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าผลของความเร็วยแบบเลื่อนไถล แทบจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาและพัฒนาความเข้าใจของพฤติกรรมการสีกหรอของระบบส่งกำลังบนรางและทำการหาการออกแบบที่เหมาะสมโดยรับอิทธิพลมาจากหลากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 แบบจำลองการสึกหรอ

สมการการสึกหรอถูกพัฒนาโดย Bucca และ Collina [8] ได้ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะการสึกหรอของลวดสัมผัสทองแดงในรูปแบบการเคลื่อนที่ต่างๆ เงื่อนไขทางไตรโบโลยีได้ถูกกำหนดขึ้นสำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารีโดยผลของการสึกหรอภายใต้เงื่อนไขทางไตรโบโลยีมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและเป็นอิสระต่อกันระหว่างผลจากทางกลและไฟฟ้า กลไกการสึกหรอถูกรวมด้วยสามปัจจัยหลัก ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยแรกคือการสึกหรอที่มีผลจากทางกล ซึ่งเกิดขึ้นโดยแรงเสียดทานจากการไถลระหว่างส่วนที่สัมผัสกัน ปัจจัยที่สองได้พิจารณาการสึกหรอภายใต้ผลของจุลจากการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงที่ไหลผ่านแคทีนารีและปัจจัยที่สามคืออาร์กไฟฟ้าซึ่งมีผลมาจากการแยกออกจากกันของแพนเฮดและแคทีนารี เนื่องจากปัจจัยทั้งสามข้างต้นไม่ได้มีผลต่อการสึกหรออย่างอิสระต่อกัน ซึ่งวิธีที่น่าเชื่อถือที่จะทำการพัฒนาแบบจำลองการสึกหรอคือการทำการทดลองผ่านการจำลองสถานการณ์ที่เสมือนจริงรวมไปถึงสภาวะการทำงานจริง การพัฒนาแบบจำลองการสึกหรอมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาผลของการสึกหรออันเนื่องมาจากการแยกออกจากกันระหว่างแพนเฮดและแคทีนารีซึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่เหลืออย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอได้รวมผลของความเร็วแบบเลื่อนไถล แรงสัมผัสในแนวฉาก แรงเสียดทาน ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า และสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแถบสัมผัสและลวดสัมผัส การทดสอบของ Bucca และ Collina มีความสามารถในการศึกษาปัจจัยข้างต้นที่มีผลต่อการสึกหรอได้ และ นำข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการสึกหรอทั่วไปมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการสึกหรอ ด้วยเหตุนี้จึงมีการรวบรวมข้อมูลที่เกิดขึ้นจากค่าของตัวแปรในสภาพการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าและค่าของแรงตามแนวตั้งที่เลียนแบบมาจากแรงสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัส อัตราการสึกหรอ(NWR)ถูกนิยามให้เป็นปริมาตรของเนื้อวัสดุที่สึกหรอไปในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อหน่วยความยาวในหน่วยกิโลเมตร และทำการคำนวณอัตราการสึกหรอภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆสำหรับลวดสัมผัสทองแดงและแถบสัมผัสของ Kasperovski แถบสัมผัสของ Kasperovski ถูกออกแบบให้ทำมาจากวัสดุคาร์บอนในแถบตรงกลางและครอบด้วยวัสดุทองแดงทั้งสามด้าน ซึ่งอัตราการสึกหรอของลวดของสัมผัสทองแดงถูกเขียนโดยฟังก์ชัน จากตัวแปรที่มาจากสภาวะการทำงาน และ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ต่างๆสามารถหาได้จากผลจากชุดทดลอง [8] และเป็นไปตามสมการที่ 1

$$NWR = k_1 \left(\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{I_c}{I_0} \right) \right)^{-\alpha} \cdot \left(\frac{F_m}{F_0} \right)^\beta \cdot \frac{F_m}{H} + k_2 \frac{R_c(F_m) \cdot I_c^2}{H \cdot V} (1-u) + k_3 \cdot u \frac{V_a \cdot I_c}{V \cdot H_m \cdot \rho} \quad 1$$

ตัวแปรทั้งหมดในสมการที่ 1 ถูกนิยามตามตารางที่ 1 ผลของตัวแปรทั้งหมดในอัตราการสึกหรอเป็นอิสระต่อกันทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกของพฤติกรรมการสึกหรอได้ อัตราการสึกหรอที่มีผลจากการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า มีสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัส (R_c) ซึ่งค่าของความต้านทานนี้สัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (F_m) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความ

ด้านทานกับค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสได้เป็นตามสมการที่ 2 โดยความสัมพันธ์ที่ได้ถูกพิจารณาจากการทดลองอย่างแพร่หลาย

$$R_c(F_m) = 0.013 + 0.09.e^{-(F_m-14)/11} \quad 2$$

อัตราการสึกหรอของลวดสัมผัสมีค่าลดลงเมื่อมีประมาณของกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นเนื่องจากค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสที่มากขึ้น และจะเกิดผลในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 90 นิวตัน สำหรับกรณีที่มีค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 300 แอมแปร์เพิ่มขึ้น เหตุผลหลักที่ทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่ลดลงถูกเรียกว่ากลไกการทำงานของกระแสไฟฟ้าหล่อลื่น [7] ในทางตรงกันข้ามค่าของความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่ลดลง ทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสที่มากขึ้น การสึกหรอในรูปแบบนี้เป็นรูปแบบเฉพาะของกลไกการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) และการเสียดทานชนิดแห้ง ในขณะที่อุณหภูมิในบริเวณที่มีการสัมผัสกันมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการหลอมเหลวของเนื้อวัสดุที่สัมผัสกัน ด้วยปัจจัยทางอุณหภูมิ พบว่าบริเวณที่ติดสัมผัสมีการสัมผัสกันทำให้เกิดความต้านทานที่มีค่าไม่สูงมาก และส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าที่ไม่ดีแล้วยังส่งผลให้เกิดความร้อนในปริมาณที่มากจนทำให้อุณหภูมิบริเวณนั้นมีค่ามากเกิดจุดหลอมเหลวของเนื้อวัสดุ ส่งผลโดยตรงต่อการสึกหรอที่มากขึ้น การอาร์กไฟฟ้ามีส่วนโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยขึ้นกับค่าความต่างศักย์ ความของรถไฟและระยะห่างในการแยกออกจากกันระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัส จากผลข้างต้นพบว่า กลไกการสึกหรอที่ซับซ้อนของลวดสัมผัสในระบบลวดส่งกำลังมีสาเหตุมาจากการพึ่งพากันของปัจจัยทางกลและไฟฟ้า แบบจำลองการสึกหรอที่ถูกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้คำนวณหาอัตราการสึกหรอของลวดสัมผัสด้วยผลลัพธ์ของแรงสัมผัสที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการการเคลื่อนที่ภายใต้การจำลองระบบขนส่งทางร่วมกับระบบส่งกำลังเหนือหัวที่สภาวะการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งแบบจำลองของระบบลวดส่งกำลังถูกอธิบายโดยระเบียบวิธี ANCF เอลิเมนต์

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการการสึกหรอ

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่
F_m	ค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสในหน่วยนิวตัน (Mean value of the contact force)	-
k_1	ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการสึกหรอทางกล (Weight of the mechanical contribution to the NWR value)	22.4
k_2	ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการสึกหรอทางไฟฟ้า (Weight of the electrical contribution to the NWR value)	10.3
k_3	ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการสึกหรอทางการอาร์กไฟฟ้า (Weight of the contribution due to electrical arcs to the NWR value)	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α	ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวเนื่องของการสึกหรอทางกลต่อกระแสไฟฟ้า (Coefficient of dependence of the mechanical contribution on the electrical current)	4.5
β	ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวเนื่องแบบไม่เชิงเส้นของการสึกหรอทางกลต่อค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (Coefficient of nonlinear dependence of the mechanical contribution on the mean value of the contact force)	1.8
I_0	ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงหน่วยแอมแปร์ (Reference value of electrical current)	500
I_c	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองในหน่วยแอมแปร์ (Nominal electrical current during tests)	-
F_0	ค่าแรงสัมผัสอ้างอิงในหน่วยแอมแปร์ (Reference value of contact force)	90
H	ค่าความแข็งของวัสดุในหน่วย N/mm^2 (Hardness of material)	700
R_c	ความต้านทานทางไฟฟ้าระหว่างแถบสัมผัสและลวดในหน่วย Ω (Electrical contact resistance between strip and wire)	-
v	ความเร็วการเลื่อนในการทดสอบในหน่วยเมตรต่อวินาที (Sliding speed in the tests)	-
u	ค่าอัตราส่วนในรูปทศนิยมของร้อยละการสูญเสียการสัมผัส (Decimal fraction value of the percentage of the contact loss)	-
V_a	ค่าความต่างศักย์สำหรับการอาร์กไฟฟ้าในหน่วยโวลต์ (Electrical arc voltage)	50
H_m	ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของทองแดงในหน่วย kJ/kg (Latent heat of fusion for copper)	205
ρ	ความหนาแน่นของทองแดงในหน่วย kg/m^3 (Density of copper)	8940

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สมการแรงสัมผัสระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารี

ในหัวข้อนี้นำเสนอและพัฒนาสมการการสัมผัสกันแบบยืดหยุ่น (Elastic contact formulation) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อทำการทำนายแรงระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารี ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการคำนวณหาอัตราการสึกหรอ โดยทั่วไปสมการการสัมผัสกันสำหรับแบบจำลอง ANCF ของแคทีนารี มี 2 ประเภท ได้แก่ สมการข้อจำกัด (Constraints equation) ของการสัมผัสแบบไกล และสมการการสัมผัสกับแบบยืดหยุ่น[2,11,16] การจำลองการสัมผัสกันระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารีโดยใช้สมการข้อจำกัดของการสัมผัสแบบไกลไม่สามารถทำให้เกิดการแยกออกจากกันของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสโดยสมการข้อจำกัด ได้กำจัดตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องกับการเลื่อนสัมผัสในแนวขวางและตั้งฉากกับระนาบการเคลื่อนที่ของจุดสัมผัสบนลวดสัมผัส จากสมการข้อจำกัดแสดงให้เห็นว่าจุดสัมผัสจะเคลื่อนที่ตามแนวความยาวของลวดสัมผัสเพียงแกนเดียว และยอมให้เกิดการสั่นบนแนวตั้งฉากกับระนาบการเคลื่อนที่ของจุดสัมผัสบนลวด ดังนั้นการพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จึงไม่เหมาะสมและเกิดความไม่สมจริงกับการใช้แบบจำลองการสัมผัสแบบสมการข้อจำกัดเพราะไม่สามารถพิจารณาการเลื่อนตำแหน่งของจุดสัมผัสตามแนวขวางและไม่สามารถพิจารณาการสั่นที่เกิดขึ้นตามแนวขวางได้ จากข้อจำกัดข้างต้นได้มีการใช้สมการสัมผัสกันสำหรับแบบจำลอง ANCF ของแคทีนารีแบบยืดหยุ่นโดยสมการสัมผัสกันแบบยืดหยุ่นไม่มีการกำจัดตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องกับการเลื่อนสัมผัสทำให้สามารถพิจารณาผลของการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสและผลของการแยกออกจากกันของแถบสัมผัสและลวดสัมผัส

3.1 จุดสัมผัสและแนวแกน

การคำนวณตำแหน่งของจุดสัมผัสที่ถูกต้องมีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางโค้ง ระบบแคทีนารีแบบซิกแซ็ก และการสั่นของระบบแคทีนารี เพราะการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดระยะตามแนวขวางบนแถบสัมผัส การพัฒนาสมการการสัมผัสกันแบบยืดหยุ่นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ตำแหน่งของจุดสัมผัสถูกคำนวณโดยสมการเชิงตัวเลขแบบไม่เชิงเส้นตลอดการเคลื่อนที่ที่กำหนดตัวแปร S_1 เป็นตัวแปรความยาวของเคเบิลเพื่อเป็นตัวแปรที่ใช้ในสมการเชิงตัวเลขแบบไม่เชิงเส้นและใช้ผลลัพธ์ของตัวแปร S_1 ในการคำนวณตำแหน่งของจุดสัมผัสบนแบบจำลองยืดหยุ่นของแคทีนารี และกำหนดให้เวกเตอร์ที่ระบุตำแหน่งของแถบสัมผัสเป็นฟังก์ชันของเวลา $\mathbf{q}^c = \mathbf{q}^c(t)$ รวมไปถึงเวกเตอร์ของตัวแปรอิสระขององค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF ในแบบจำลองของแคทีนารีก็เป็นฟังก์ชันของเวลาแทนด้วย $\mathbf{e}^c = \mathbf{e}^c(t)$ กำหนด $\mathbf{r}_x^c = \left[\left(\mathbf{r}_x^c \right)_1 \quad \left(\mathbf{r}_x^c \right)_2 \quad \left(\mathbf{r}_x^c \right)_3 \right]^T$ แทนด้วยเวกเตอร์เกรเดียนต์ของตำแหน่งซึ่งสัมผัสกับเส้นแนวศูนย์กลางของลวดแคทีนารี ในทิศทางตามแกนตามยาวที่จุดสัมผัส และเวกเตอร์ตำแหน่งสัมผัสของจุดสัมผัสบนแคทีนารีเป็นไปตามสมการที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{r}^c = \mathbf{S}^c(x, y, z)\mathbf{e}^c(t) \quad 3$$

โดยที่ \mathbf{S}^c คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันรูปร่างขององค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANFC แบบเคเบิล
 x, y, z แทนตำแหน่งพิกัดบนองค์ประกอบสำหรับองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANFC แบบเคเบิล
กำหนดให้เมทริกซ์ของฟังก์ชัน ตามสมการ $\mathbf{S} = \mathbf{S}(x)$ และตำแหน่งพิกัด $x = x(s_1)$ เป็นฟังก์ชันของความยาวของเคเบิลทำให้เวลาในการคำนวณสามารถคำนวณตัวแปรตัวแปรสำหรับองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANFC ของแคทีนารีร่วมกับตัวแปรของแถบสัมผัสไปพร้อมๆกันได้ การกำหนดตำแหน่งของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสที่เป็นวัตถุแข็งเกร็งสามารถระบุตำแหน่งด้วยเวกเตอร์ตำแหน่งสัมผัสของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัส \mathbf{r}^p ตามสมการที่ 4

$$\mathbf{r}^p = \mathbf{R}^p + \mathbf{A}^p \bar{\mathbf{u}}^p \quad 4$$

โดยที่ \mathbf{R}^p คือเวกเตอร์ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางบนแถบสัมผัส
 \mathbf{A} คือเมทริกซ์การแปลงเพื่อแปลงพิกัดแกนเสมือน
 $\bar{\mathbf{u}}^p = [0 \quad s_2 \quad 0]^T$ แทนเวกเตอร์ตำแหน่งบนแกนเสมือน
 s_2 แทนระยะตามแกนขวางบนแถบสัมผัส
กำหนดให้ \mathbf{r}^{cp} เป็นเวกเตอร์ที่ใช้ในกำหนด จุดสัมผัสที่สัมพันธ์กันบนลวดสัมผัสและแถบสัมผัส และมีความสัมพันธ์ตามสมการ $\mathbf{r}^{cp} = \mathbf{r}^c - \mathbf{r}^p$ และใช้สมการที่ 5 เป็นสมการเชิงตัวเลขที่พิจารณาค่าตำแหน่งของจุดสัมผัส จากเงื่อนไขการระบุตำแหน่งบนแถบสัมผัสและลวดสัมผัสต้องเป็นจุดเดียวกันตามแนวแกนตามยาวและตามขวางของลวดสัมผัส

$$\mathbf{C}^s = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{cpT} \mathbf{r}_x^c \\ \mathbf{r}^{cpT} \mathbf{n}_1^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{e1}^s \\ C_{e2}^s \end{bmatrix} = 0 \quad 5$$

ในสมการที่ 5 กำหนดให้ด้วย c และ p บ่งบอกถึงแคทีนารีแบบยืดหยุ่นและแถบสัมผัสแข็งเกร็งตามลำดับโดยในสมการที่ 5 เป็นสมการไม่เชิงเส้นที่สามารถแก้สมการเพื่อหาความยาวของลวดสัมผัสที่จุดสัมผัสได้ด้วยวิธี นิวตัน - ราฟสัน การคำนวณด้วยวิธี นิวตัน - ราฟสันเพื่อหาคำตอบของสมการต้องคำนวณหาค่าผลต่างของนิวตัน $\Delta \mathbf{s}$ เป็นไปตามสมการที่ 6

$$\Delta \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \mathbf{C}_e^s \quad 6$$

โดยที่ $\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2]^T$ เป็นเมทริกซ์ที่ใช้เก็บความยาวของเคเบิลและระยะตามแกนขวางบนแถบสัมผัส เพื่อใช้ระบุตำแหน่งของจุดสัมผัสที่ถูกต้อง และสามารถคำนวณหาเมทริกซ์จาโคเบียน \mathbf{J} ด้วยสมการที่ 7

$$\mathbf{J} = (\mathbf{C}_e^s)_s = [\partial C_{e1}^s / \partial \mathbf{s} \quad \partial C_{e2}^s / \partial \mathbf{s}]^T = \left. \begin{aligned} & \left[\begin{array}{ccc} \mathbf{r}^{cpT} \mathbf{r}_{xx}^c + \mathbf{r}_x^{cT} \mathbf{r}_x^c & -\mathbf{a}_2^{pT} \mathbf{r}_x^c \\ \mathbf{r}^{cpT} \mathbf{H}_1 \mathbf{r}_{xx}^c + \mathbf{r}_x^c \mathbf{n}_1^c & -\mathbf{a}_2^{pT} \mathbf{n}_1^c \end{array} \right] \\ & \mathbf{H}_1 = \frac{\partial \mathbf{n}_1^c}{\partial \mathbf{r}_{s1}^c} = \left[\begin{array}{ccc} -(\mathbf{r}_x^c)_2 & -(\mathbf{r}_x^c)_1 & 0 \\ 2(\mathbf{r}_x^c)_1 & 0 & 2(\mathbf{r}_x^c)_3 \\ 0 & -(\mathbf{r}_x^c)_3 & -(\mathbf{r}_x^c)_2 \end{array} \right] \end{aligned} \right\} 7$$

โดยสมมติให้พจน์ $(C_e^s)_s$ ไม่เป็นศูนย์และสามารถใช้งานแก้สมการที่ 5 ให้ได้ผลลัพธ์และลวดสัมพันธ์ หรือไม่ได้ทำการกำจัดตัวแปรอิสระต่อการเคลื่อนระหว่างแถบสัมพันธ์และลวดสัมพันธ์และไม่มีแรงมาคอยจำกัดการเคลื่อนที่ในสมการการเคลื่อนที่

การกำหนดทิศทางของแรงตามแนวสัมพันธ์และตามแนวฉากกับระนาบสัมพันธ์ได้ระบุแกนขึ้นมาใหม่โดยกำหนดเมทริกซ์ดัดแปลง $\mathbf{A}^c = [\mathbf{a}_1^c \quad \mathbf{a}_2^c \quad \mathbf{a}_3^c]$ และสมมติให้แกนตามยาวตรงกับแนวสัมพันธ์ของลวดสัมพันธ์ที่จุดสัมพันธ์และจะได้แกนที่ตั้งฉากในระนาบสามมิติขึ้นมาอีกสองแกนทำให้ได้เวกเตอร์สำหรับการย้ายแกนในเมทริกซ์ดัดแปลงเป็นไปตามสมการที่ 8

$$\mathbf{a}_1^c = \mathbf{r}_x^c / \|\mathbf{r}_x^c\| \quad \mathbf{a}_2^c = \mathbf{n}_1^c / \|\mathbf{n}_1^c\| \quad \mathbf{a}_3^c = \mathbf{n}_2^c / \|\mathbf{n}_2^c\| \quad 8$$

โดยเวกเตอร์ที่ตั้งฉากทั้งสองเวกเตอร์ \mathbf{n}_1^c และ \mathbf{n}_2^c ถูกกำหนดไว้ในสมการที่ 9

$$\mathbf{n}_1^c = \begin{bmatrix} -(\mathbf{r}_x^c)_1 (\mathbf{r}_x^c)_2 \\ ((\mathbf{r}_x^c)_1)^2 + ((\mathbf{r}_x^c)_3)^2 \\ -(\mathbf{r}_x^c)_2 (\mathbf{r}_x^c)_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n}_2^c = \begin{bmatrix} -(\mathbf{r}_x^c)_3 \\ 0 \\ (\mathbf{r}_x^c)_1 \end{bmatrix} \quad 9$$

เมทริกซ์ดัดแปลงที่กำหนดแกนทั้งสามบนจุดสัมพันธ์ถูกเขียนอยู่ในเวกเตอร์ \mathbf{r}_x^c เพียงเวกเตอร์เดียว ทำให้หลีกเลี่ยงการเกิดเมทริกซ์เอกฐานได้ โดยการวิเคราะห์เบื้องต้นถ้าสมมติให้เวกเตอร์ \mathbf{r}_x^c ขนานกับเวกเตอร์ $[0 \ 1 \ 0]^T$ จะพบว่าเวกเตอร์แกนทั้งสามของจุดสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 10 [47,48] เนื่องจากมีเพียงเวกเตอร์เดียวที่ใช้ในการสร้างเวกเตอร์แกนทั้งสามขึ้นดังนั้นสมการการสัมพันธ์กันสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรทางองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANFC ได้

$$\mathbf{r}_x^c = [0 \ (\mathbf{r}_x^c)_2 \ 0]^T, \quad \mathbf{n}_1^c = [-(\mathbf{r}_x^c)_2 \ 0 \ 0]^T, \quad \mathbf{n}_2^c = [0 \ 0 \ 1]^T \quad 10$$

3.2 แรงสัมพันธ์

ในสมการการสัมพันธ์กันแบบยืดหยุ่นที่ใช้วิธานิพจน์นี้ได้ทำการกำหนดแรงที่ยอมให้เกิดการแยกออกจากกันของแถบสัมพันธ์และลวดสัมพันธ์ โดยแนวคิดของแรงสัมพันธ์ได้ใช้เป็นการกำหนดแรงภายนอกบนแถบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสและลวดสัมผัสที่มีแบบจำลองเป็นแรงสปริงและแรงหน่วงโดยมีระยะห่างตามแนวระนาบสัมผัสเป็นไปตามสมการที่ 11

$$l_2 = (\mathbf{a}_2^c)^T (-\mathbf{r}^{cp}) \quad l_3 = (\mathbf{a}_3^c)^T (-\mathbf{r}^{cp}) \quad 11$$

ดังนั้นแบบจำลองแรงที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้เป็น $F_3^{cp}(l_3, i_3, k_3^{cp}, c_3^{cp})$ เมื่อกำหนดให้แกน \mathbf{a}_2^c และ \mathbf{a}_3^c เป็นแกนระนาบสัมผัสและค่า k_k^{cp} และ c_k^{cp} เป็นค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสปริงและแดมป์ตามลำดับแรงที่เกิดขึ้นบนแถบสัมผัสและลวดสัมผัสสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของงานเสมือนตามสมการที่ 12

$$\mathbf{Q}^p = -\sum_{k=1}^3 F_k^{cp}(l_k, i_k) \left(\frac{\partial l_k}{\partial \mathbf{q}^p} \right)^T, \quad \mathbf{Q}^c = -\sum_{k=1}^3 F_k^{cp}(l_k, i_k) \left(\frac{\partial l_k}{\partial \mathbf{q}^c} \right)^T \quad 12$$

ในการพิจารณาผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการไถลของแถบสัมผัสและลวดสัมผัส ผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตามแนวแกนการเคลื่อนที่แบบไถลเป็นฟังก์ชันของแรงในแนวฉากกับระนาบสัมผัสและสามารถเขียนเวกเตอร์ของแรงเสียดทานตามสมการที่ 13 โดยที่ μ คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$$\mathbf{F}_k^{cp}(l_k, i_k) = -\mu F_3^{cp} \left(\mathbf{a}_k^c / \|\mathbf{a}_1^c + \mathbf{a}_2^c\| \right), \quad k = 1, 2 \quad 13$$

3.3 สมการแรงตามหลักการของอากาศพลศาสตร์บนแพนโทกราฟและแคทีนารี

สมการแรงตามหลักของอากาศพลศาสตร์มีความเหมาะสมต่อแพนโทกราฟที่เป็นวัสดุแข็งเกร็งและแคทีนารีที่เป็นองค์ประกอบANCFเพื่อจำลองพฤติกรรมของแพนโทกราฟและแคทีนารีที่มีผลกระทบของแรงตามหลักของอากาศพลศาสตร์แรงตามหลักของอากาศพลศาสตร์ประกอบด้วยแรงต้านทานอากาศและแรงยกโดยสามารถเขียนเป็นสมการเวกเตอร์ตามสมการที่ 14

$$\mathbf{F}_D = \left(\frac{1}{2} \rho (C_D A) |\mathbf{v}_r|^2 \right) \hat{\mathbf{v}}_D, \quad \mathbf{F}_L = \left(\frac{1}{2} \rho (C_L A) |\mathbf{v}_r|^2 \right) \hat{\mathbf{v}}_L \quad 14$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศและสัมประสิทธิ์แรงยกถูกหาจากการทดลอง[34,35] แรงตามหลักของอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นบนแถบสัมผัสและลวดสัมผัสสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของงานเสมือนตามสมการที่ 15

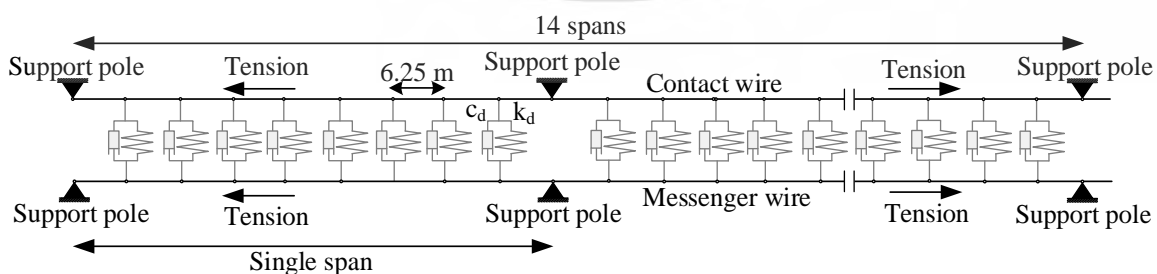
$$\mathbf{Q}_D = \sum_{i=1}^N \mathbf{J}^T \mathbf{F}_D^i \quad \mathbf{Q}_L = \sum_{i=1}^N \mathbf{J}^T \mathbf{F}_L^i \quad 15$$

โดยที่ N แทนจำนวนจุดของแบบจำลอง

บทที่ 4

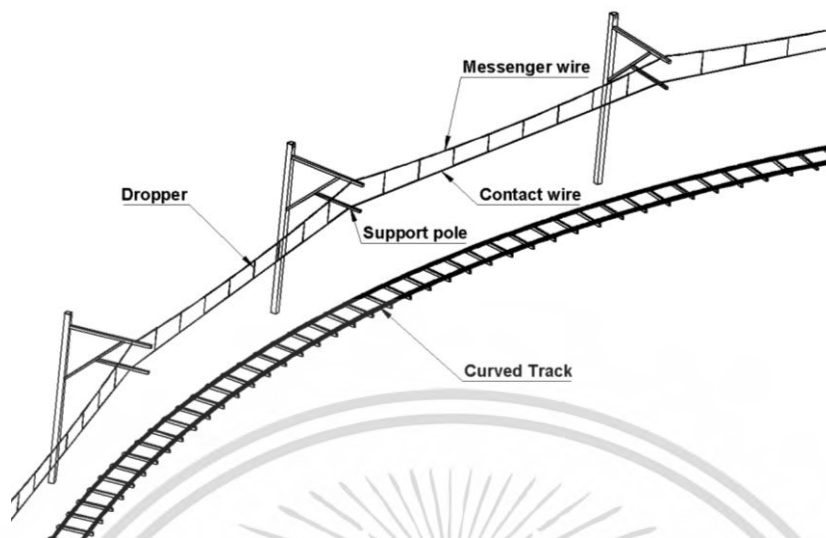
แบบจำลองของแคทีนารีและสมการจำลององค์ประกอบ ANCF

การออกแบบระบบแคทีนารีมีบทบาทอย่างมากต่อการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบการเก็บกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้ ระบบแคทีนารีมีการแบ่งลวดออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ลวดสัมผัส(Contact wire)และลวดส่งกำลัง(Messenger wire)โดยลวดทั้งสองถูกเชื่อมต่อกันด้วยลวดดรอปเปอร์(Dropper)ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของลวดสัมผัสที่มีหน้าที่ส่งกำลังไฟฟ้าสู่รถไฟฟ้อย่างต่อเนื่องผ่านจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสแพนเฮดเสารองรับระบบลวดแคทีนารี(Support pole) ถูกวางให้มีระยะห่างประมาณ 50-65 เมตร และแขวนลวดทั้งสองชนิดผ่านแขนยึดบนเสารองรับโครงสร้างทั่วไปของระบบแคทีนารีในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงตามรูปที่ 2 ลวดดรอปเปอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างลวดส่งกำลังและลวดสัมผัสจะมีเฉพาะแรงดึงที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดเท่านั้นและแรงกดที่เกิดขึ้นบนลวดดรอปเปอร์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของลวดดรอปเปอร์ถูกนำเสนอในรูปของสปริงและแดมป์เปอร์แบบไม่เชิงเส้น ในลวดดรอปเปอร์แต่ละเส้นถูกตรวจสอบแรงดึงหรือแรงกดของเส้นลวดตลอดการคำนวณเชิงตัวเลข ในส่วนของระบบแคทีนารีถูกสร้างภายใต้แรงดึงสะสม(Pretension force) เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของคลื่นบนเส้นลวด ความเร็วของคลื่นที่เกิดขึ้นในระบบแคทีนารีมีบทบาทอย่างมากต่อการรักษาการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องบนแถบสัมผัสโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทีรถไฟฟ้ความเร็วสูง[49,50] แรงดึงสะสมในเส้นลวดขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟฟ้โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 14 - 40 กิโลนิวตันค่าของแรงดึงสะสมในระบบแคทีนารีถูกพิจารณาด้วยการใช้ค่าที่เหมาะสมบนองค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF ตามวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบไม่เชิงเส้น ANCF พบว่าค่าแรงดึงสะสมและความเค้นสะสมถูกนำเสนออยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงพิกัดตำแหน่งของแต่ละองค์ประกอบ การวิเคราะห์สมมูลสถิตของระบบแคทีนารีถูกนำมาใช้ก่อนที่จะทำการคำนวณจริงเพื่อให้ได้ค่าของแรงดึงสะสมที่มีความเสถียรแรงดึงสะสมที่ถูกใช้ในลวดสัมผัสและลวดส่งกำลังมีค่า 14 กิโลนิวตันและ 20 กิโลนิวตันตามลำดับ และตำแหน่งของลวดที่อยู่บนเสารองรับระบบแคทีนารีถูกระบุให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิมตลอดการคำนวณเชิงพลวัตของระบบขนส่งทางราง แผนผังอย่างง่ายของการออกแบบระบบแคทีนารีถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3 และค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบแคทีนารีถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบแคทีนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

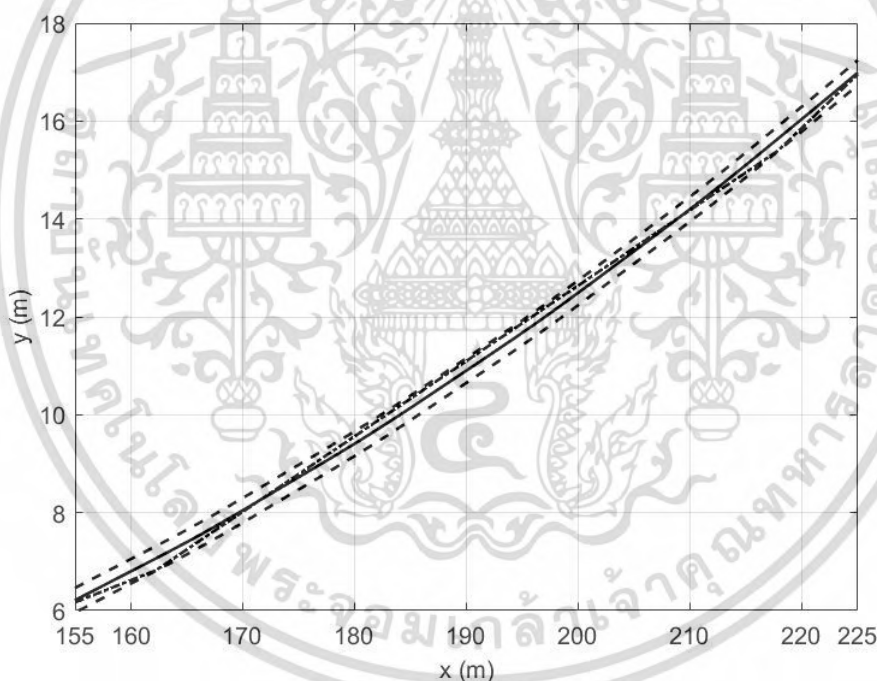


รูปที่ 3 แผนผังอย่างง่ายของการออกแบบระบบแคทีนารี
ตารางที่ 2 ค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบแคทีนารี

รูปทรงทางเรขาคณิตของลวดสัมผัสและลวดส่งกำลัง	
จำนวนเอลิเมนต์ต่อหนึ่งช่วงเสารองรับ (Elements per span)	9
ความยาวของเอลิเมนต์ในหน่วยเมตร (Element length)	6.25
พื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์ในหน่วยตารางมิลลิเมตร (Element cross-section area)	144
จำนวนช่วงเสารองรับ (Total number of spans)	14
ความหนาแน่นของลวดสัมผัสและลวดส่งกำลังในหน่วย kg/m^3 (Contact wire and Messenger wire density)	8960
ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของลวดสัมผัสในหน่วย GPa (Contact wire modulus of elasticity)	120
ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของลวดส่งกำลังในหน่วย GPa (Messenger wire modulus of elasticity)	120
แรงตึงเชือกในลวดสัมผัสในหน่วยนิวตัน (Tension in contact wire)	20000
แรงตึงเชือกในลวดส่งกำลังในหน่วยนิวตัน (Tension in messenger wire)	14000
ค่าความแข็งของสปริงบนลวดทรอปเปอร์ในหน่วย N/m (Dropper stiffness)	200000
ค่าแดมป์บนลวดทรอปเปอร์ในหน่วย N.s/m (Dropper damping)	10000
ความยาวของแถบสัมผัสในหน่วยมิลลิเมตร (Pan-head sweep)	< 250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง(Curved track) โปรไฟล์ทางเรขาคณิตของลวดสัมผัสต้องถูกออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้การไถลตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนมีค่าไม่เกินความยาวของแถบสัมผัส(Pan-head sweep) การเคลื่อนของจุดสัมผัสตามแนวขวางมีสาเหตุหลักมาจากลักษณะทางเรขาคณิตของลวดสัมผัสบนทางโค้งโดยก่อนที่จะออกแบบรูปทรงทางเรขาคณิตของลวดสัมผัสต้องคำนึงถึงรูปร่างของทางโค้งรวมถึงโครงสร้างของรถไฟและระบบแพนโทกราฟ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบรูปทรงทางเรขาคณิตของระบบแคทีนารีบนทางโค้งที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ 500 เมตร การเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางบนแถบสัมผัสทำให้ได้เส้นทางเคลื่อนที่ของระยะไถลสุดบนแถบสัมผัสทั้งสองด้านและในขั้นตอนต่อมาคือการทำหนดตำแหน่งของเสารองรับระบบแคทีนารีเพื่อให้ระยะไถลตามแนวขวางของจุดสัมผัสมีค่าไม่เกินความยาวของแถบสัมผัสจากเงื่อนไขในการส่งถ่ายกำลังอย่างต่อเนื่องข้างต้นทำให้การตั้งเสารองรับระบบแคทีนารีถูกวางให้อยู่ใกล้กันมากขึ้นบนทางโค้ง ในรูปที่ 4 ได้แสดงว่าส่วนของแคทีนารีบนทางโค้งอยู่ในเส้นทางการเคลื่อนที่ของระยะไถลสุดบนแถบสัมผัสทั้งสองด้าน โดยมีเสารองรับระบบแคทีนารีวางอยู่ด้านนอกของรางรถไฟ



รูปที่ 4 การเคลื่อนที่สัมผัสตามแนวแกนตามขวางบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง (..... ลวดสัมผัส
 — จุดกึ่งกลางของแถบสัมผัส - - - ระยะไถลสุดบนแถบสัมผัสทั้งสองด้าน)

องค์ประกอบไม่เชิงเส้นANCFถูกใช้งานในวิจัยนี้เพื่อสร้างแบบจำลองของลวดสัมผัสและลวดส่งกำลัง โดยองค์ประกอบไม่เชิงเส้นANCFที่ถูกเขียนในฟังก์ชันของเวกเตอร์เกรเดียนของตำแหน่งบนแกนตามยาวของจุดสัมผัสบนลวดสัมผัสเพียงตัวแปรเดียวส่งผลให้สามารถคำนวณสมการเชิงตัวเลขของแบบจำลอง ANCF ไปพร้อมกับสมการการเคลื่อนที่ของระบบมัลติบอดี้หรือสามารถเขียนสมการเชิงตัวเลขของแบบจำลอง ANCF ลงในสมการการเคลื่อนที่ของระบบมัลติบอดี้ทำให้สมการการเคลื่อนที่ของระบบมัลติบอดี้ถูกใช้คำนวณกลไก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของระบบแพนโทกราฟแบบไม่เชิงเส้นร่วมกับระบบแคทีนารียืดหยุ่นและแบบจำลองของระบบขนส่งทางรางด้วยการทำงานของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพียงโปรแกรมเดียวหรือสามารถหลีกเลี่ยงการใช้การทำงานของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ร่วมกันได้อีกประกอบไม่เชิงเส้นANCFถูกเขียนให้อยู่ในระเบียบวิธีANCFไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยก่อนหน้านี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแพนโทกราฟและแคทีนารีและได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ในรูปแบบอื่นๆ[6]พบว่าองค์ประกอบไม่เชิงเส้นแบบANCFได้นำเสนอลักษณะทางเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้นได้อย่างถูกต้องแม่นยำและยังสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการล็อกที่พบบนองค์ประกอบแบบเต็มของANCFไฟไนต์เอลิเมนต์[51,52]องค์ประกอบไม่เชิงเส้นANCFแบบเคเบิลสามารถใช้คำนวณการยืดและการตัดงอของสายเคเบิลได้ ดังนั้นแบบจำลองชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตโดยทั่วไปตำแหน่งสัมบูรณ์ของจุดที่สนใจบนองค์ประกอบไม่เชิงเส้นANCFถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่16

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{S}(\mathbf{x})\mathbf{e}(t) \quad 16$$

โดยที่ $\mathbf{x} = [x \ y \ z]^T$ เป็นเวกเตอร์ของคู่อันดับบนระนาบสามมิติ
 $\mathbf{S} = \mathbf{S}(\mathbf{x}) = [s_1\mathbf{I} \ s_2\mathbf{I} \ s_3\mathbf{I} \ s_4\mathbf{I}]$ เป็นเมทริกซ์รูปร่างที่เป็นฟังก์ชันของพิกัดบนระนาบสามมิติ
 $\mathbf{e} = \mathbf{e}(t)$ เป็นเวกเตอร์พิกัดรูปร่างที่ขึ้นกับเวลาและในองค์ประกอบไม่เชิงเส้นANCFแบบเคเบิลได้กำหนดเมทริกซ์รูปร่างและเวกเตอร์พิกัดรูปร่างตามสมการที่ 17

$$\mathbf{e}^k = \left[(\mathbf{r}^k)^T \ (\mathbf{r}_x^k)^T \right]^T, k = 1, 2 \quad 17$$

เมื่อค่าตัวแปรสมการที่ 16 ถูกแสดงไว้ในสมการที่ 18

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, & s_2 &= L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3), \\ s_3 &= 3\xi^2 - 2\xi^3, & s_4 &= L(-\xi^2 + \xi^3) \end{aligned} \right\} \quad 18$$

โดยที่ L แทนความยาวของแต่ละองค์ประกอบ

$$\xi = x/L \text{ เป็นตำแหน่งสัมบูรณ์บนองค์ประกอบ}$$

สามารถคำนวณหาเมทริกซ์ของมวลขององค์ประกอบไม่เชิงเส้นANCF ได้เป็นไปตามสมการที่ 19

$$\mathbf{M}_e = \int_0^L \rho_e A_e \mathbf{S}^T \mathbf{S} dx \quad 19$$

โดยที่ ρ_e คือความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ลวดเคเบิล

A_e คือพื้นที่หน้าตัดของลวดเคเบิลและแรงของการยืดหยุ่นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของงานเสมือนได้เป็นไปตามสมการที่ 20

$$\delta W_e = \int_0^L (EI_e \kappa \delta \kappa + EA_e \varepsilon_{xx} \delta \varepsilon_{xx}) dx \quad 20$$

เมื่อพจน์แรกในสมการที่ 20 บอกถึงแรงที่ทำให้เกิดการดัดของสายเคเบิลและพจน์หลังบอกถึงความเค้นตามแนวแกนโดยที่ค่า E คือค่ามอดูลัสยังยืดหยุ่นของวัสดุ I_e คือโมเมนต์ของพื้นที่ลำดับที่สอง κ คือค่าความโค้งทางเรขาคณิตสามารถเขียนได้จากสมการของSerret-Frenet ε_{xx} คือค่าความเครียดตามแนวแกน



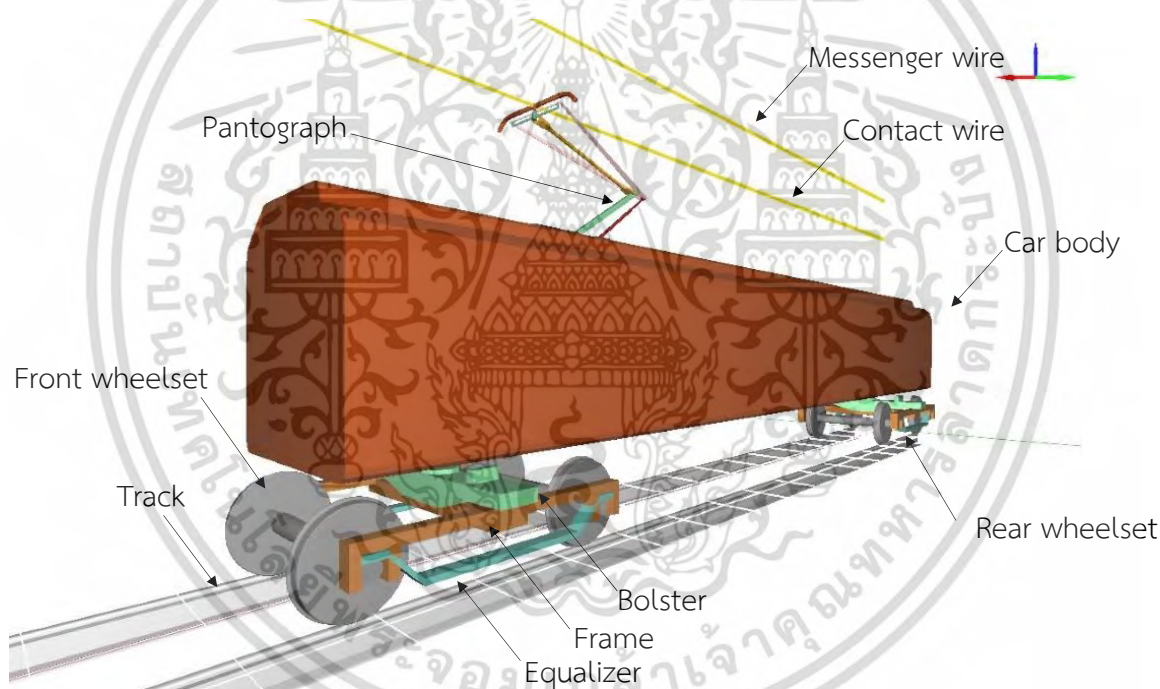
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ระบบมัลติบอดีและสมการการเคลื่อนที่

ในส่วนนี้ทำการบรรยายแบบจำลองมัลติบอดีของระบบส่งทางรางและนำเสนอสมการไม่เชิงเส้นที่ครอบคลุมพฤติกรรมเคลื่อนที่รวมถึงการอธิบายสมการสัมผัสระหว่างล้อและรางในการคำนวณได้ กำหนดให้แบบจำลองของระบบขนส่งทางรางถูกจำลองให้เป็นวัตถุแข็งเกร็งในขณะที่ระบบแคทีนารีถูกจำลองให้เป็นวัตถุที่มีความยืดหยุ่นโดยการคำนวณพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแบบจำลองทั้งหมดถูกคำนวณด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า Sigma/Sams (Systematic Integration of geometric modeling and analysis for the simulation of articulated mechanical system) โดยสามารถสร้างและแก้ไขสมการพีชคณิตที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นได้

5.1 แบบจำลองมัลติบอดีของระบบขนส่งทางรางและระบบแพนโทกราฟ



รูปที่ 5 แบบจำลองระบบขนส่งทางราง

รายละเอียดของขนาดในระบบสามมิติของแบบจำลองมัลติบอดีของระบบขนส่งทางรางที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการทำนายอัตราการสึกหรอในลวดสัมผัสสำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่แบบต่างๆโดยรายละเอียดของแบบจำลองนี้ได้ครอบคลุมไปถึงผลที่เกี่ยวข้องของพฤติกรรมทางพลวัตของระบบขนส่งทางรางและพฤติกรรมของแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นบนจุดสัมผัสของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารี อาทิเช่นการเคลื่อนที่แบบพิทซิงที่เป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนตามขวางของการเคลื่อนที่แบบต่างๆการเคลื่อนที่แบบกลิ้งเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนตามยาวของการเคลื่อนที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน

การเคลื่อนบนทางโค้งและผลของการยกตัวของรางรถไฟเป็นต้นโดยผลจากการเคลื่อนที่แบบต่างๆได้ถูกนำไปคำนวณรวมกันในการคำนวณของระบบมัลติบอดีที่ปราศจากการทำให้เป็นสมการเชิงเส้นหรือเทียบเท่าด้วยข้อสมมติฐาน รูปที่ 5 แสดงถึงแบบจำลองระบบขนส่งทางรางและส่วนประกอบต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Sigma/Sams แบบจำลองรถไฟประกอบไปด้วยตู้รถไฟเดี่ยว(Car body) และรองรับน้ำหนักด้วยสองโบกี้โดยในแต่ละโบกี้จะประกอบไปด้วย 6 ชิ้นส่วนได้แก่ ชุดล้อ(wheelset) 2 ชุด อีควอลไลเซอร์(Equalizer) 2 ชุด โครงแคร์(Frame) และ เบาะแคร์(Bolster) โดยใช้แบริ้งมาเชื่อมต่อระหว่างชุดล้อและอีควอลไลเซอร์ในขณะที่ยอมให้เกิดการหมุนเพียงแกนเดียวระหว่างเบาะแคร์และตู้รถไฟด้วยการใช้ข้อต่อแบบหมุน(Revolute Joint) และแบบจำลองทั้งหมดประกอบด้วย 14 วัตถุแข็งเกร็ง 48 ข้อต่อบุชชิ่ง(Bushing) 8 แบริ้ง และ 2 ข้อต่อแบบหมุน โดยค่าคงที่ของแบบจำลองระบบขนส่งทางรางถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลของแบบจำลองระบบขนส่งทางราง

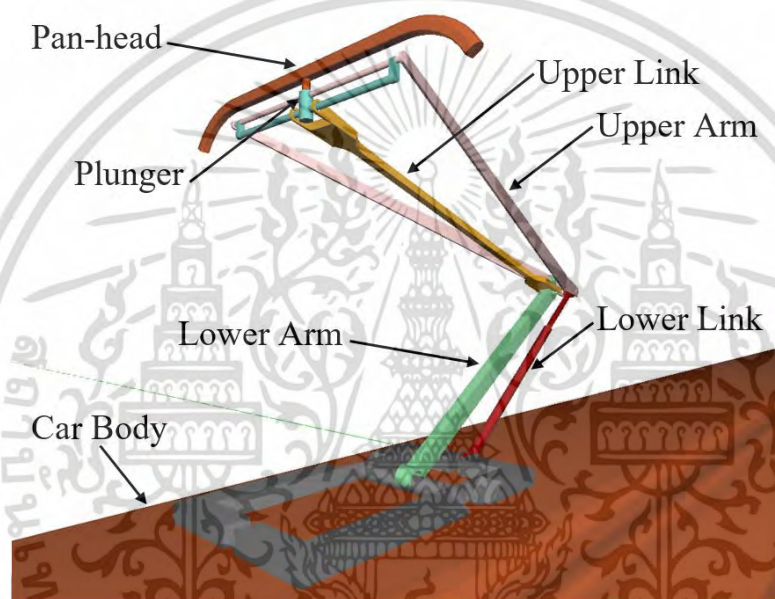
องค์ประกอบ	มวล (kg)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)			ตำแหน่งพิกัดเริ่มต้น (m) (x_0, y_0, z_0)
		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	
ชุดล้อ(wheelset)	2091	1098	191	1098	0, 0, 0.4570488
					2.5908, 0, 0.4570488
					12.573, 0, 0.4570488
					15.1638, 0, 0.4570488
อีควอลไลเซอร์ (Equalizer)	469	6.46	255	252	1.2954, 1.0287, 0.3049427
					1.2954, -1.0287, 0.3049427
					13.8684, 1.0287, 0.3049427
					13.8684, -1.0287, 0.3049427
โครงแคร์(Frame)	3214	1030	1054	2003	1.2954, 0, 0.5081427
					13.8684, 0, 0.5081427
เบาะแคร์(Bolster)	1107	498	20.4	458	1.2954, 0, 0.7088
					13.8684, 0, 0.7088
ตู้รถไฟ	24170	30000	687231	687231	1.8289, 0, 1.8289

แบบจำลองมัลติบอดีของแพนโทกราฟที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีต้นแบบมาจากแพนโทกราฟชนิด FaiveleyTransport CX ซึ่งเป็นแบบที่มีแถบสัมผัสเดี่ยว[11,17]โดยที่แพนโทกราฟชนิดนี้ประกอบไปด้วย 6

วัสดุแข็งเกร็งที่ถูกเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบหมุนได้ 1 แกนและแบบหมุนได้รอบตามตารางที่ 4 และมีค่าความเฉื่อยตำแหน่งสัมบูรณ์และค่าพิกัดมุมของแต่ละส่วนประกอบของระบบแพนโทกราฟตาม

ตารางที่ 5 โดยค่าพิกัดมุมเริ่มต้นได้ถูกแสดงให้อยู่ในรูปมุมของออยเลอร์ตามลำดับของ Z-X-Z ในระบบแกนสัมพันธ์ของแต่ละชิ้นส่วนเป็นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลและมีการหมุนของแกนให้อยู่ในทิศทางหลักของค่าความเฉื่อยของชิ้นส่วนนั้นๆ ในรูปที่ 6 แสดงถึงแผนภาพของระบบมัลติบอดี้ของระบบแพนโทกราฟจากการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจุดและแรงยกของแบบจำลองของแพนโทกราฟเป็นไปตาม

ตารางที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพของระบบมัลติบอดี้ของระบบแพนโทกราฟ

ตารางที่ 4 ข้อมูลการเชื่อมต่อบนแบบจำลองแพนโทกราฟ

องค์ประกอบแรก	องค์ประกอบที่สอง	การเชื่อมต่อ
Car Body	Lower Arm	ข้อต่อแบบหมุนได้ 1 แกน (Revolute)
Lower Arm	Upper Arm	ข้อต่อแบบหมุนได้ 1 แกน (Revolute)
Upper Arm	Plunger	ข้อต่อแบบหมุนได้ 1 แกน (Revolute)
Car Body	Lower Link	ข้อต่อแบบหมุนได้รอบ (Spherical)
Upper Arm	Lower Link	ข้อต่อแบบหมุนได้รอบ (Spherical)
Plunger	Upper Link	ข้อต่อแบบหมุนได้รอบ (Spherical)
Lower Arm	Upper Link	ข้อต่อแบบหมุนได้รอบ (Spherical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ข้อมูลของแบบจำลองแพนโทกราฟ

องค์ประกอบ	มวล (kg)	ตำแหน่งพิกัดเริ่มต้น (m) (x_0, y_0, z_0)	ขนาดของมุมเริ่มต้น (φ, θ, ψ)	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ($kg \cdot m^2$) (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})
Lower arm	32.18	11.26924156, 0, 3.84511275	$\pi/2, 0.5528807212,$ $-\pi/2$	0.31, 10.43, 10.65
Upper arm	15.60	11.45796454, 0, 4.52440451	$-\pi/2, 0.2896816713,$ $\pi/2$	0.15, 7.76, 7.86
Lower Link	3.10	10.96436876, 0, 3.81940451	$\pi/2, 0.6234559506,$ $-\pi/2$	0.05, 0.46, 0.46
Upper link	1.15	11.58587608, 0, 4.49940451	$-\pi/2, 0.3028168645,$ $\pi/2$	0.05, 0.48, 0.48
Plunger	1.51	12.5, 0, 4.835	0, 0, 0	0.07, 0.05, 0.07
Panhead	9.50	12.5, 0, 4.945	0, 0, 0	1.59, 0.21, 1.78

ตารางที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจุดและแรงยกที่ได้จากการทดลอง

องค์ประกอบ	สัมประสิทธิ์ของแรงจุด $C_D A$	สัมประสิทธิ์ของแรงยก $C_L A$
Lower arm	0.007	-0.0075
Lower link	0.008	-0.001
Upper arm	0.07	0.02
Panhead	0.05	0.02

5.2 การสัมผัสกันของล้อและราง

ความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองของจุดสัมผัสบนล้อและรางเป็นสิ่งสำคัญต่อการคำนวณพฤติกรรมแบบพลวัตของรถไฟแบบจำลองจุดสัมผัสสามมิติระหว่างล้อกับรางแบบอิสระต่อกันถูกใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณการสัมผัสของล้อและราง[18] ในรูปแบบการคำนวณการสัมผัสกันของล้อและรางนี้ยอมให้เกิดการแยกออกจากกันของล้อและรางโดยพิจารณาจากรูปทรงทางเรขาคณิตของล้อและรางซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากต่องานวิจัยนี้เพราะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสนใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่บนทางโค้งสมการพีชคณิตแบบไม่เชิงเส้นถูกนำมาใช้ร่วมกับแนวคิดของระบบพิกัดเฉพาะตามสมการที่ 21

$$\mathbf{C}^{w,r}(\mathbf{q}^r, \mathbf{q}^w, \mathbf{s}^r, \mathbf{s}^w, t) = \begin{bmatrix} (\mathbf{t}_1^r)^T (\mathbf{r}^w - \mathbf{r}^r) \\ (\mathbf{t}_2^r)^T (\mathbf{r}^w - \mathbf{r}^r) \\ (\mathbf{t}_1^w)^T \mathbf{n}^r \\ (\mathbf{t}_2^w)^T \mathbf{n}^r \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad 21$$

โดยที่ w และ r แสดงถึงล้อและรางตามลำดับ

\mathbf{t}_i^k คือเวกเตอร์ในแนวสัมผัสบนผิวของล้อกับรางที่จุดสัมผัส

\mathbf{n}^k คือเวกเตอร์ในแนวตั้งฉากบนผิวของล้อกับรางที่จุดสัมผัสโดยที่ $k = w, r$ และ

$i = 1, 2$

\mathbf{q}^k คือเวกเตอร์พิกัดทั่วไปของผิวสัมผัสของล้อและราง เมื่อ k มีค่าเป็น w และ r ตามลำดับ

\mathbf{s}^k แทนเวกเตอร์พิกัดสัมบูรณ์ของจุดสัมผัสบนล้อและรางเมื่อ k มีค่าเป็น w และ r ตามลำดับ

เมื่อเวกเตอร์พิกัดบนผิวสัมผัสของล้อและรางถูกกำหนดอยู่ในรูปของเวกเตอร์ \mathbf{q}^w และ \mathbf{q}^r ตามลำดับ ระบบสมการไม่เชิงเส้นในสมการที่ 18 สามารถแก้ไขโดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันเพื่อทำการหาค่าของพิกัดบนผิวสัมผัสทั้งสี่ในเวกเตอร์ \mathbf{s}^w และ \mathbf{s}^r โดยสามารถเขียนสมการการทำซ้ำของนิวตันได้เป็นไปตามสมการที่ 22

$$(\partial \mathbf{C}^{w,r} / \partial \mathbf{s}^w) \Delta \mathbf{s}^w + (\partial \mathbf{C}^{w,r} / \partial \mathbf{s}^r) \Delta \mathbf{s}^r = -\mathbf{C}^{w,r} \quad 22$$

โดยที่ค่า $\Delta \mathbf{s}^w$ และ $\Delta \mathbf{s}^r$ คือเวกเตอร์ค่าผลต่างของนิวตันและตำแหน่งของจุดสัมผัสบนล้อและรางถูกกำหนดโดยผลเฉลยของตัวแปรบนผิวสัมผัสทั้งสี่แนว \mathbf{s}^w และ \mathbf{s}^r โดยทั้งสองตัวแปรนี้สามารถหาได้จากผลเฉลยของสมการที่ 19 ในการหาเวกเตอร์ตำแหน่งที่ถูกต้องของจุดสัมผัสทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วของจุดสัมผัสและใช้แบบจำลองแรงสัมผัสในการหาเวกเตอร์แรงสัมผัสระหว่างล้อกับรางซึ่งรวมไปถึงแรงตามแนวสัมผัสบนผิวสัมผัสและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนจุดสัมผัสโดยที่แรงตามแนวสัมผัสบนผิวสัมผัสและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนจุดสัมผัสสามารถคำนวณได้จากแรงสัมผัสในแนวฉากร่วมกับรูปร่างทางเรขาคณิตของล้อและรางและคุณสมบัติของเนื้อวัสดุของล้อและราง

5.3 แบบจำลองของรางรถไฟ

รูปทรงทางเรขาคณิตของรางรถไฟถูกกำหนดโดยค่ามาตรฐานประกอบด้วยเกจหรือขนาดความกว้างของรางรถไฟ G ค่าความสูงการยกโค้ง(Superelevation) h ค่าความโค้งและมุมการยกโค้ง(Cant angle) โดยตัวแปรที่กำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของรางโค้งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 7 โดยรูปร่างทางเรขาคณิตของรางรถไฟโค้งที่ถูกกำหนดไว้จะใช้กำหนดสมการข้อจำกัดทางจลน์ของการเคลื่อนที่ของรถไฟบนรางโค้งซึ่งสามารถใช้บังคับให้รถไฟเคลื่อนที่ไปตามหน้าตามแนวโค้งบนรางรถไฟโค้งเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าบริเวณที่มีรัศมีความโค้งคงที่จะทำให้แรงตามแนวขวางส่งผลให้เกิดความสมดุลกับแรงเข้าสู่ศูนย์กลางซึ่งมีบทบาทอย่างมากต่อความเสถียรในการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วของรถไฟที่จะทำให้เกิดความสมดุลระหว่างแรงตามแนวขวางและแรงเข้าสู่ศูนย์กลางจะมีค่าเป็น $V = \sqrt{gRh/G}$ เมื่อ R คือรัศมีความโค้ง g คือค่าความเร่งโน้มถ่วงและสามารถคำนวณหาความเร็วสมดุลสำหรับทางโค้งที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีค่าประมาณ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 7 ค่าของตัวแปรที่กำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของรางโค้ง

ระยะทาง (ft)	องศาความโค้ง (deg)	ค่าความสูงการยกโค้ง (in)	มุมการยกโค้งของ รางขวา(rad)	มุมการยกโค้งของ รางซ้าย(rad)
0	0	0	0	0
82.021	0	0	0	0
266.5682	1.94051	3	0.025	-0.025
451.1155	1.94051	3	0.025	-0.025
635.6627	1.94051	3	0.025	-0.025
1189.304	1.94051	3	0.025	-0.025
2953.512	1.94051	3	0.025	-0.025

5.4 สมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองระบบมัลติบอดี

การจัดรูปสมการข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ในรูปแบบเมทริกซ์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งและวัตถุที่มีความยืดหยุ่นการรวมเมทริกซ์สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่วัตถุแข็งเกร็งและยืดหยุ่นและสมการข้อจำกัดในการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการคำนวณผลเฉลยของสมการพีชคณิตและสมการอนุพันธ์ไปพร้อมๆกัน[53]โดยรูปแบบของสมการข้อจำกัดต้องเขียนให้อยู่ในรูปของตำแหน่งความเร็วและความเร่งหรือเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ของเวลาสมการการเคลื่อนที่ของระบบมัลติบอดีสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของลากรางจ์ตามสมการที่ 23 และแผนผังการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{q_r}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ee} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_e^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_s^T \\ \mathbf{C}_{q_r} & \mathbf{C}_e & \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_r \\ \ddot{\mathbf{e}} \\ \ddot{\mathbf{s}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_r \\ \mathbf{Q}_e \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_c \end{bmatrix}$$

23

โดยที่ \mathbf{q}_r คือเวกเตอร์พิกัดตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็ง

\mathbf{e} คือเวกเตอร์พิกัดของแบบจำลองANCFสำหรับวัตถุที่มีความยืดหยุ่น

\mathbf{s} คือเวกเตอร์พิกัดบนรูปทรงเรขาคณิตของผิวสัมผัสล้อและรางบนสมการข้อจำกัดของจุดสัมผัสมีระหว่างล้อและราง

λ คือเวกเตอร์ตัวคูณของลากรางจ์

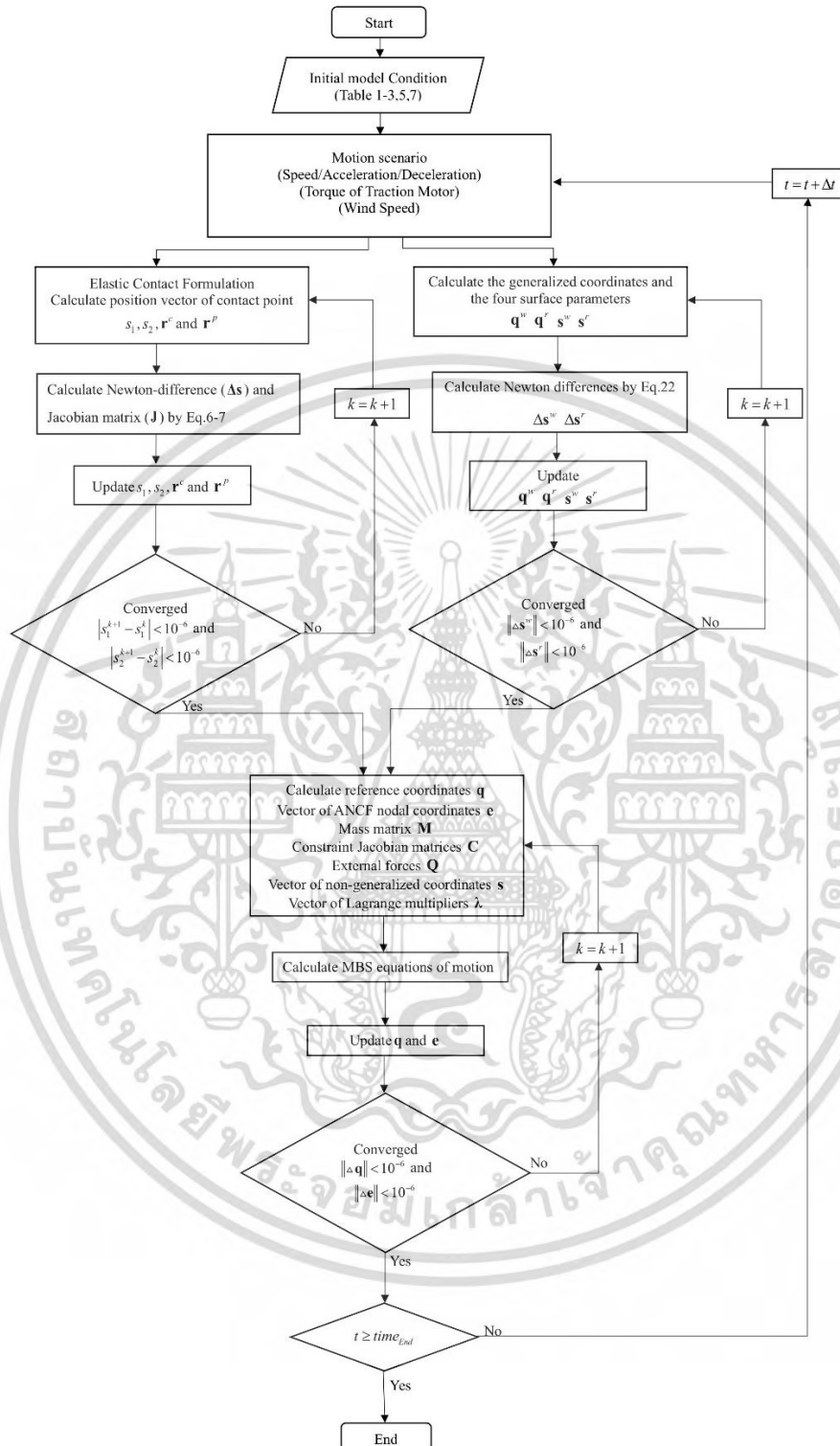
\mathbf{M}_{rr} คือเมทริกมวลบนพิกัดอ้างอิงของวัตถุแข็งเกร็ง

\mathbf{M}_{ee} คือเมทริกมวลบนพิกัดแบบจำลองANCF สำหรับวัตถุที่มีความยืดหยุ่น

\mathbf{C}_{q_r} , \mathbf{C}_e และ \mathbf{C}_s คือเมทริกซ์จาโคเบียนขอสมการข้อจำกัดสำหรับพิกัดอ้างอิงของวัตถุแข็งเกร็งพิกัดของแบบจำลองANCFของวัตถุที่มีความยืดหยุ่นและพิกัดบนรูปทรงเรขาคณิตของผิวสัมผัสล้อและรางตามลำดับ

\mathbf{Q}_r และ \mathbf{Q}_e คือแรงภายนอกบนพิกัดอ้างอิงสำหรับพิกัดอ้างอิงของวัตถุแข็งเกร็งและสำหรับพิกัดของแบบจำลองANCFของวัตถุที่มีความยืดหยุ่นตามลำดับ

\mathbf{Q}_c คือเวกเตอร์ความเร็วในรูปของสมการกำลังสองซึ่งเป็นผลมาจากการอนุพันธ์ลำดับที่สองเทียบกับเวลาของสมการข้อจำกัด



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของกรคำนวณทางคอมพิวเตอร์ด้วยสมการการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

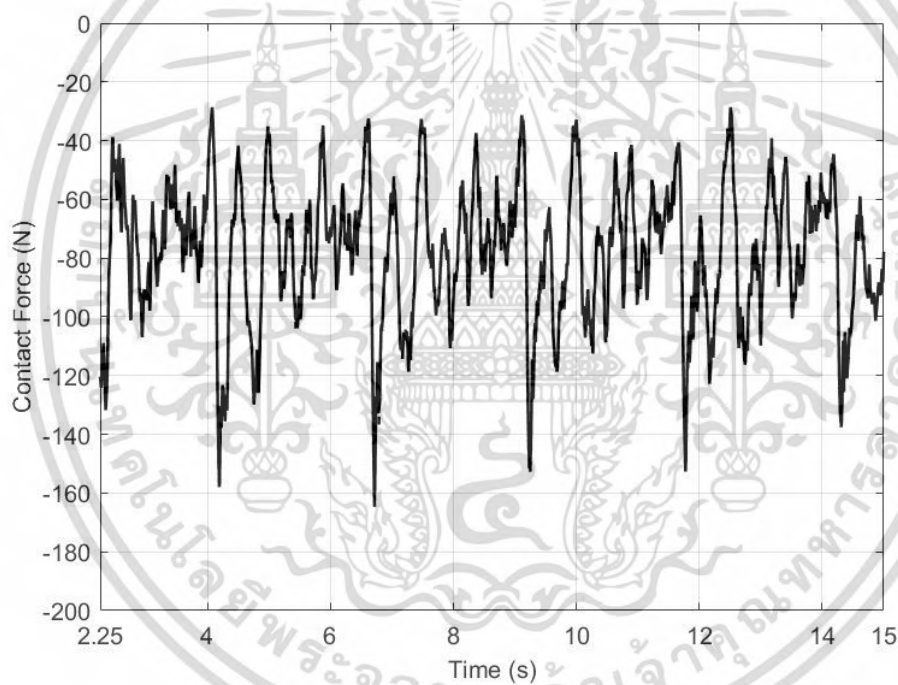
รูปแบบของการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันถูกพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อศึกษาผลของอัตราการศึกษาหรือของลวดสัมผัสบนระบบแคทีนารีที่มีผลมาจากการสัมผัสกันของลวดสัมผัสและแถบสัมผัสแบบพลวัตในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบแรกเป็นการเคลื่อนที่ของรถไฟบนรางโค้งที่อัตราเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้งเป็นค่าคงที่ผลของแรงเข้าสู่ศูนย์กลางที่เกิดขึ้นถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาอัตราการศึกษาหรือบนลวดสัมผัสและในรูปแบบการเคลื่อนที่อื่นๆได้สนใจผลของการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่มีความเร่งและความหน่วงต่ออัตราการศึกษาหรือที่เกิดขึ้นบนลวดสัมผัสในส่วนนี้นำเสนอและวิเคราะห์ผลการคำนวณของสมการการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบไปด้วยแรงและอัตราการศึกษาหรือภายใต้แบบจำลองของแรงสัมผัสที่มีการตรวจสอบความถูกต้องในงานวิจัยก่อนหน้านี้[16]

6.1 การเคลื่อนที่บนทางโค้งและการวิเคราะห์

การศึกษาหรือมาตรฐาน EN50367 และ EN50317 เป็นมาตรฐานที่กำหนดเกณฑ์ทางเทคนิคสำหรับพฤติกรรมทางพลวัตของระบบส่งกำลังเหนือหัวของระบบขนส่งทางรางโดยมีค่ามาตรฐานแสดงตามตารางที่ 8 ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และความถูกต้องของข้อมูลแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ต้องสอดคล้องกับข้อมูลภายใต้สภาวะการทำงานจริงรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางโค้งได้กำหนดให้มีรัศมีความโค้งเป็น 500 เมตรและที่มีรัศมีความโค้งคงที่มีอัตราเร็วการเข้าโค้งเป็น 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและมีแรงยกที่ใส่ให้กับชุดแพนโทกราฟเท่ากับ 1650.69 นิวตันเพื่อทำให้กลไกการทำงานของแพนโทกราฟรักษาสภาพสัมผัสกับระบบแคทีนารีในรูปที่ 8 แสดงค่าของแรงสัมผัสที่เปลี่ยนไปตามเวลาและพบว่าในช่วง 2 วินาทีแรกในการคำนวณผลของขอบเขตเริ่มต้นส่งผลให้เกิดคลื่นตามขวางบนแคทีนารีที่เป็นการรบกวนผลการคำนวณและผลของขอบเขตเริ่มต้นมีผลลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาทีพบว่าแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบที่สภาวะคงตัวในช่วงแรงของการคำนวณได้ออกแบบให้รถไฟเคลื่อนที่บนทางตรงและกำลังเคลื่อนที่เข้าทางโค้งที่มีรัศมีคงที่เพื่อลดการพิจารณาผลการคำนวณในช่วงสภาวะการเปลี่ยนแปลงค่าแรงสัมผัสสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อแพนโทกราฟเคลื่อนที่ผ่านเสารองรับระบบแคทีนารีและมีค่าต่ำสุดสัมพันธ์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านจุดที่เชื่อมระหว่างลวดสัมผัสและลวดส่งกำลังด้วยดรอปปเปอร์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าเป็น 23.517 และ 77.133 นิวตันโดยผลลัพธ์ทั้งสองที่ได้จากการคำนวณมีค่าตามข้อจำกัดของมาตรฐานที่นำมาใช้ใช้อ้างอิงและเมื่อนำผลลัพธ์บนทางโค้งมาเทียบกับการกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่บนทางตรงด้วยความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยและในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกันทั้งกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่บนทางตรงและทางโค้ง

ตารางที่ 8 ค่ามาตรฐานสำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารี

ตัวแปรบนแพนโทกราฟ	ค่าที่ยอมรับได้
ค่าเฉลี่ยแรงสัมผัส	$F_m = 0.00097v^2 + 70\text{N}$
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$\sigma_{max} < 0.3F_m$
แรงสัมผัสสูงสุด	$F_{max} < 350\text{N}$
ระยะยกสูงสุดบนแขนจับลวดทั้งสอง	$d_{up} \leq 120\text{mm}$
ค่าแอมพลิจูดของการสั่นบนแพนโทกราฟ	$\Delta_c \leq 80\text{mm}$
ร้อยละการสูญเสียการสัมผัส	$NQ \leq 0.2\%$

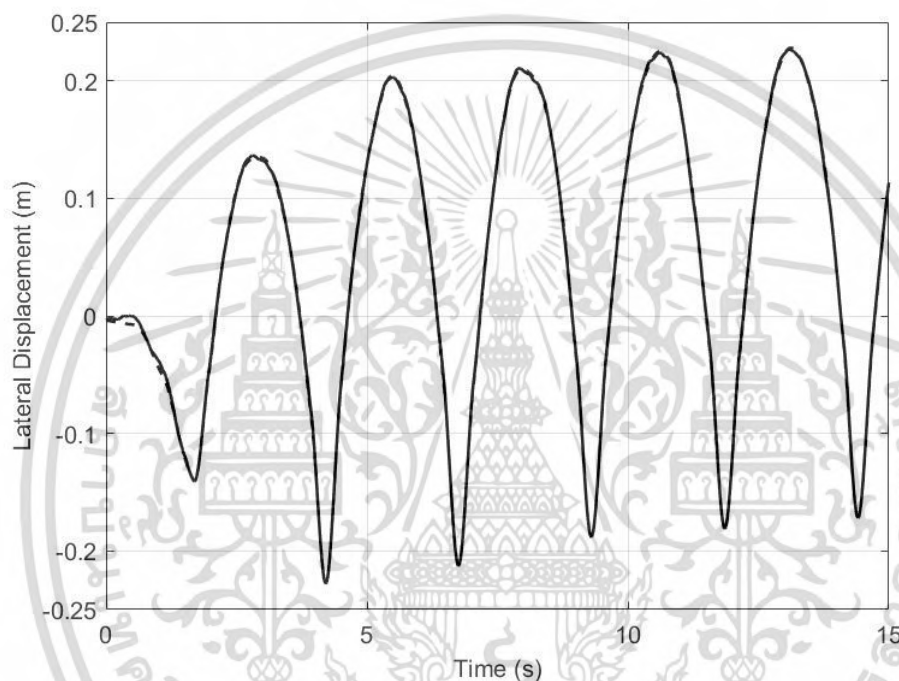


รูปที่ 8 แรงสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นเป็นการคำนวณเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบระบบแคทีนารีบนการเคลื่อนที่บนทางโค้งภายใต้ข้อจำกัดของตำแหน่งของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสที่ต้องมีระยะตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสไม่เกินความยาวขอบแถบสัมผัส รูปที่ 9 แสดงถึงการเปรียบเทียบของระยะตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสจากการออกแบบและจากการคำนวณที่สภาวะการทำงานจริง ซึ่งประกอบด้วยเส้นประที่แสดงถึงระยะตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสที่ได้จากการออกแบบและเส้นทึบแสดงถึงระยะตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัสที่ได้จากการออกแบบสามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปทรงทางเรขาคณิตของระบบแคทีนารีและความยาวของแถบสัมผัสและใช้สมการการเคลื่อนที่ของระบบมัลติบอดีคำนวณหาระยะตามแนวขวางบนแถบสัมผัสที่สภาวะการทำงานจริงจากผลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระยะตามแนวขวางบนแถบสัมผัสจากการคำนวณทั้งสองวิธีมีค่าแทบจะเท่ากันหมดเว้นแต่มีความแตกต่างที่เกิดขึ้นบนช่องแรกที่มีผลมาจากค่าเริ่มต้นของการคำนวณที่สภาวะการทำงานจริงมีความแตกต่างของผลลัพธ์มีผลมากการเคลื่อนที่ของรถไฟที่กำลังเคลื่อนที่เข้าทางโค้งก่อนที่จะถึงทางโค้งที่มีรัศมีความโค้งคงที่และผลการคำนวณในช่องสภาวะการเปลี่ยนแปลง

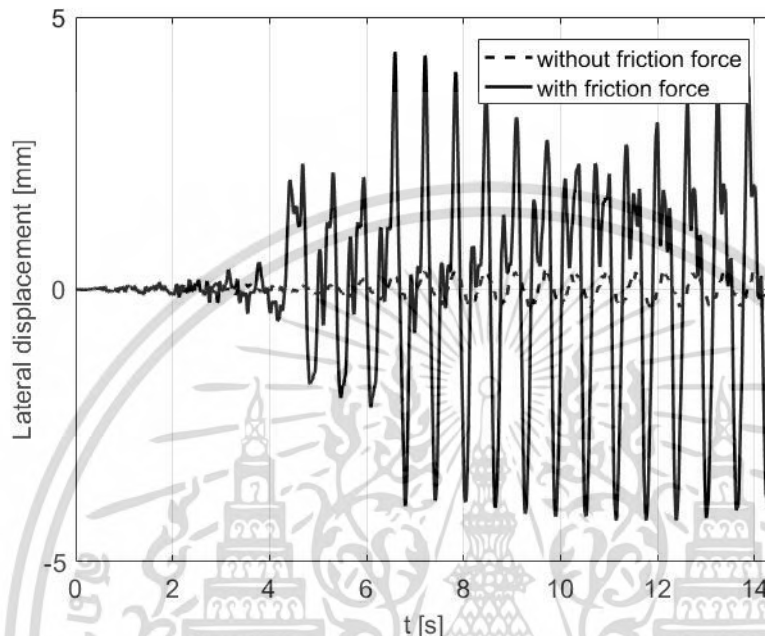


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบของระยะตามแนวขวางของจุดสัมผัสบนแถบสัมผัส (— การคำนวณ - - - การออกแบบ)

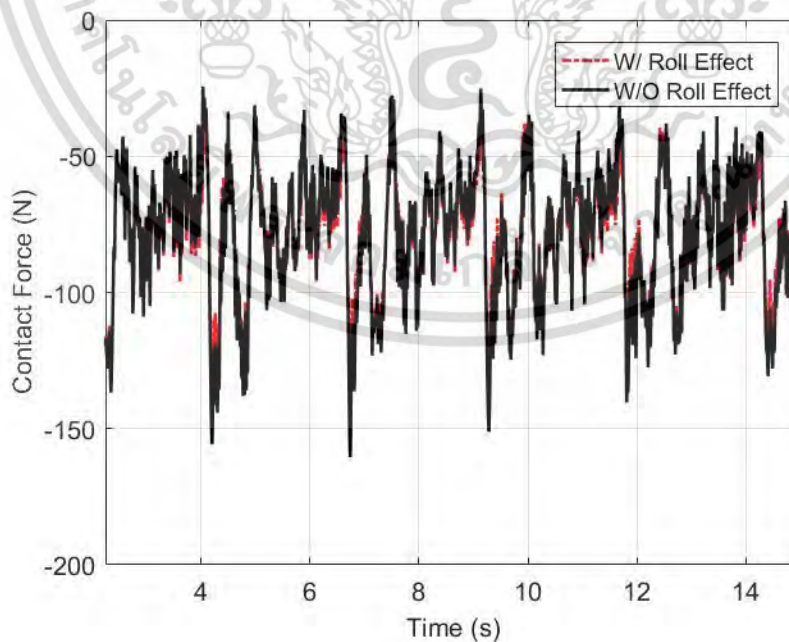
เมื่อทำการพิจารณาผลเนื่องมาจากแรงเสียดทานพบว่าทำให้เกิดการสั่นขึ้นของเส้นลวดส่งกำลังแสดงในตารางที่ 8 โดยพบว่ามี การสั่นตามแกนตามขวางเพียงเล็กน้อยเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของปลอกบนแพนเฮดมีค่าต่ำ จากความสัมพันธ์ของแรงสัมผัสโดยการคำนวณหาตำแหน่งที่ถูกต้องและพิจารณาผลของการหมุนของแพนโทกราฟเนื่องมาจากความเอียงของรางรถไฟขณะเข้าโค้ง ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 11 พบว่า แรงสัมผัสที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีพิจารณาผลของการเคลื่อนที่แบบหมุนของแพนโทกราฟจะมีค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสเท่ากับ 78.1749 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่ากับ 24.3242 นิวตัน แต่เมื่อทำการพิจารณาผลของการเคลื่อนที่แบบหมุนของแพนโทกราฟจะมีค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสเท่ากับ 78.2921 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่ากับ 21.8147 นิวตัน พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสนั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลมีค่าลดลง โดยการลดลงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของระบบส่งกำลัง ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการหาตำแหน่งที่ถูกต้องของจุดสัมผัสเพื่อใช้ในการพิจารณาผลของการเคลื่อนที่แบบหมุนของแพนโทกราฟที่เคลื่อนที่บนทางโค้ง



รูปที่ 10 แสดงระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวดที่ถูกสัมผัสตามแนวแกนตามขวางเมื่อมีการพิจารณาผลของแรงเสียดทานและไม่มีผลของแรงเสียดทาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 11 แสดงแรงสัมพันธ์ระหว่างแพนเฮดกับลวดที่ถูกสัมผัสเมื่อพิจารณาและพิจารณาผลของการเคลื่อนที่แบบหมุนของแพนโทกราฟบนทางโค้ง

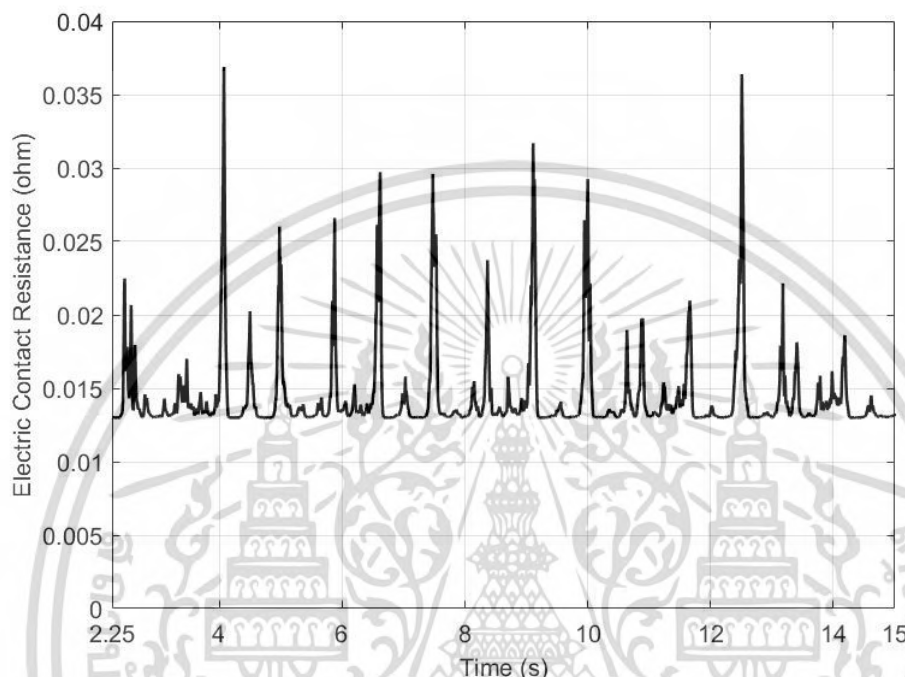
สำหรับการศึกษาการสึกหรอได้แบ่งการเคลื่อนที่บนทางโค้งออกเป็น 5 ส่วนและทำการวิเคราะห์การสึกหรอแต่ละส่วนเพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนการเคลื่อนที่บนทางโค้งในตารางที่ 9 แสดงผลสรุปจากการคำนวณในแต่ละช่วงซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงสัมผัสอัตราการสึกหรอทางกลและทางไฟฟ้ารวมไปถึงค่าอัตราการสึกหรอรวมจากผลการคำนวณที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 5 ช่วงในขณะที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าลดลงเล็กน้อยและภายใต้ข้อสมมติของกระแสไฟฟ้าคงที่ขนาด 500 แอมแปร์สามารถคำนวณเขียนค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสตามสมการที่ 2 ให้เป็นฟังก์ชันของเวลาและได้ผลลัพธ์เป็นไปตามรูปที่ 12 ในการวิเคราะห์การสึกหรอบนทางโค้งพบว่าไม่เกิดการสูญเสียสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสด้วยเหตุนี้ที่จะไม่พิจารณาการสึกหรอเนื่องจากการอาร์กไฟฟ้าและแสดงผลของการสึกหรอทางกลและทางไฟฟ้าตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 13 และ รูปที่ 14 ตามลำดับผลของอัตราการสึกหรอของทางกลและไฟฟ้าถูกคำนวณจากสมการการสึกหรอที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในแบบจำลองข้างต้นสามารถอธิบายความเป็นจริงภายใต้สภาวะการทำงานที่มีความเร็วไม่มากและมีขนาดของกระแสไฟฟ้ามากที่ทำให้ผลของการระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนจากอากาศโดยรอบไม่เพียงพอที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เป็นสาเหตุของการสึกหรอ อัตราการสึกหรอที่มีกลไกการทำงานอย่างอิสระสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองการสึกหรอในสมการที่ 1 ค่าสูงสุดของอัตราการสึกหรอรวมที่เกิดจากการสึกหรอทางกลและทางไฟฟ้าคือจุดเดียวกับจุดที่มีค่าแรงสัมผัสสูงสุดโดยค่าอัตราการสึกหรอที่เวลาเปลี่ยนไปถูกแสดงในรูปที่ 15

ตารางที่ 9 ผลการคำนวณในแต่ละช่วงบนการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

ช่วง	ค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (N)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางกล (mm^3/km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางไฟฟ้า (mm^3/km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอรวม (mm^3/km)
1	77.2803	25.1056	2.4043	2.3905	4.7948
2	77.0065	24.8834	2.3792	2.4057	4.7849
3	77.9047	23.2131	2.3018	2.4143	4.7152
4	77.0895	22.0273	2.2591	2.3749	4.6340

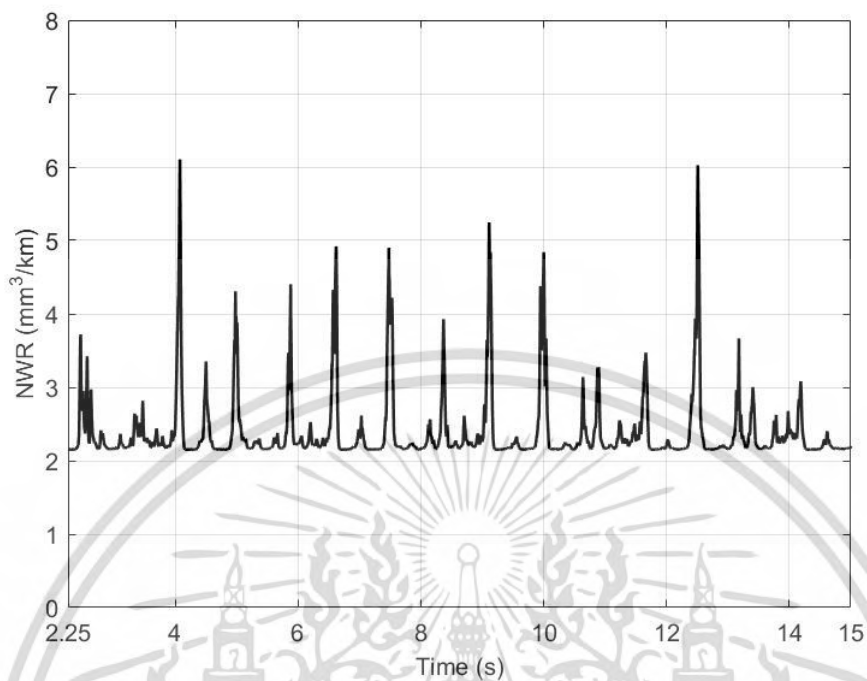
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5	77.3871	22.3667	2.2894	2.3819	4.6713
รวม	77.1330	23.5175	2.3251	2.3932	4.7183

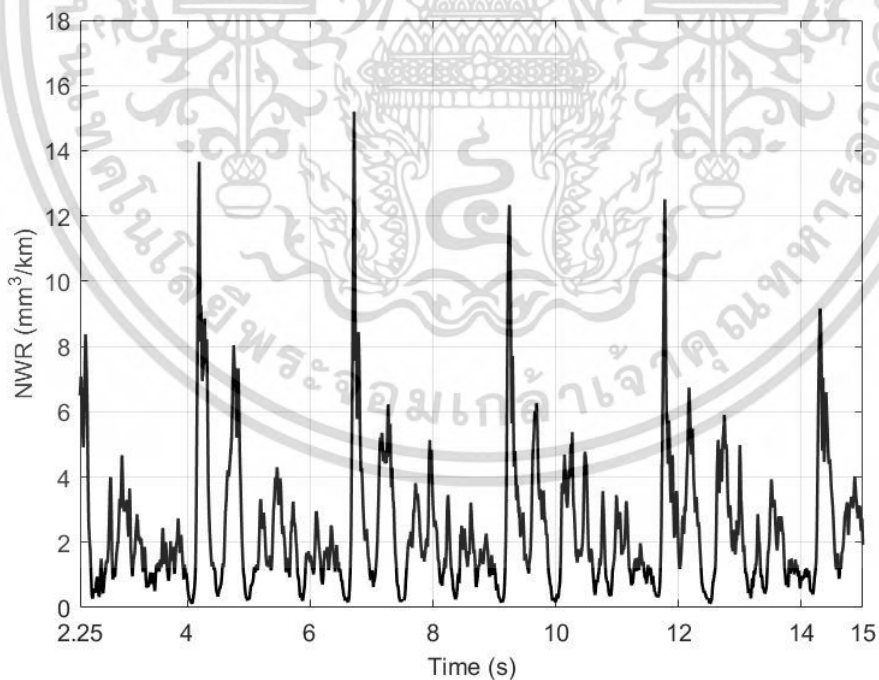


รูปที่ 12 ความต้านทานที่จุดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

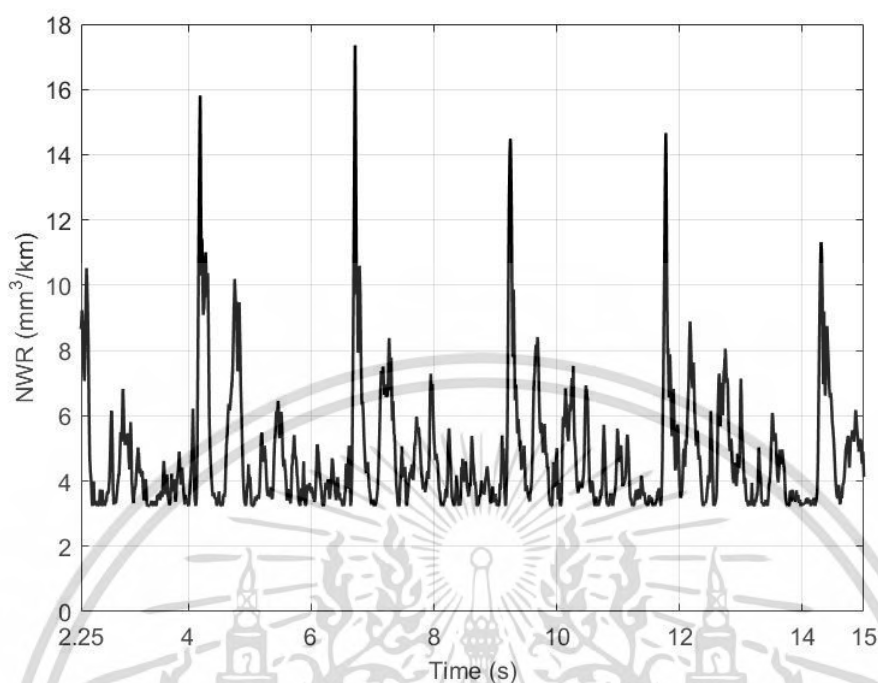


รูปที่ 13 การสีกหรือทางกลตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง



รูปที่ 14 การสีกหรือทางไฟฟ้าตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 การสีกหรือรวมตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้ง

6.2 การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงและการวิเคราะห์การสีกหรือ

พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบรถไฟที่เคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีโมเมนต์การยกที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งและความหน่วงที่ทำให้การเคลื่อนที่ของในลักษณะการหมุนระบบแพนโทกราฟที่เปลี่ยนไปซึ่งมีผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็นการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง 3 กรณีและการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงอีก 3 กรณี ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 10 โดยจะบรรยายผลของการเคลื่อนที่รูปแบบต่างๆต่อแรงสัมผัสและการวิเคราะห์การสีกหรือ

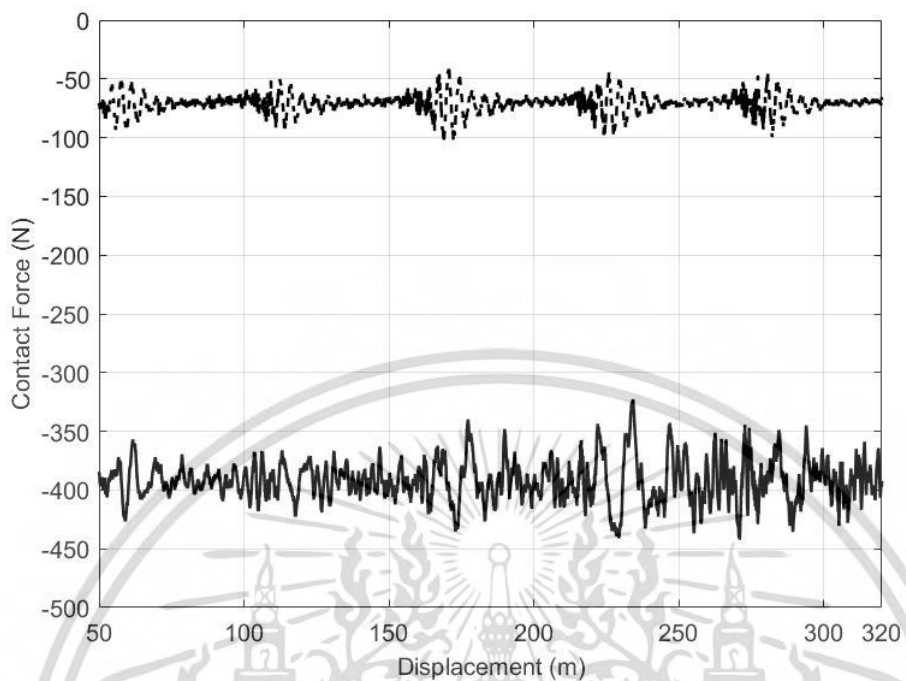
ตารางที่ 10 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่เคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วง

กรณี	ชนิดของการเคลื่อนที่	อัตราเร็วเริ่มต้น (km/hr)	อัตราเร็วสุดท้าย (km/hr)	แรงยกบนแพนโทกราฟ (N)	ค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (N)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N)	แรงสัมผัสต่ำสุด (N)	แรงสัมผัสสูงสุด (N)
1	Straight	20	20	1615.69	70.7107	7.2161	38.460	104.656

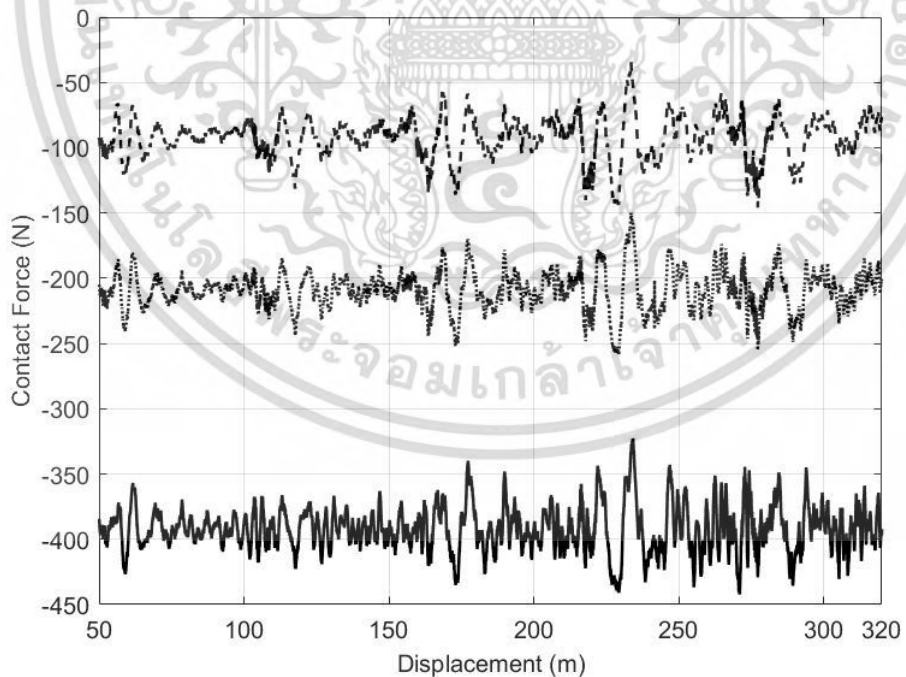
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2	Straight	80	80	1650.69	78.6123	23.0675	22.486	174.114
3	Straight	20	80	315.69	92.2238	16.7582	34.300	145.928
4	Straight	20	80	815.69	209.2872	15.9340	150.096	258.876
5	Straight	20	80	1615.69	391.9301	18.1337	322.643	442.245
6	Straight	80	20	2865.69	37.6282	13.3723	0.838	89.014
7	Straight	80	20	2965.69	60.9817	13.1716	24.978	111.968
8	Straight	80	20	3115.69	96.0815	13.0098	59.606	146.609
9	Curved	80	80	1650.69	77.1330	23.5175	28.599	163.028

สำหรับกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของรถไฟภายใต้ความเร่งทั้ง 3 กรณี(กรณีที่ 3 ถึง 5) ในตารางที่ 10 มีค่าความเร่งของการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.748 m/s^2 ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นถูกจำลองโดยการใส่เทอร์กบนชุดล้อในขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่ที่มีความเร่งการเคลื่อนที่แบบยกของระบบแพนโทกราฟเป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสมีค่ามากขึ้นโดยถูกแสดงอย่างชัดเจนด้วยค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสในกรณีที่ 5 และพบว่าค่าของแรงยกในระบบแพนโทกราฟมีผลต่อค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสอย่างเห็นได้ชัดโดยที่ในกรณีที่ 3 ใช้แรงยกที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 315.69 นิวตันและทำให้เกิดค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสสูงถึง 92.2 นิวตันและในกรณีที่ 4 และ 5 มีการใช้แรงยกที่มีค่าสูงขึ้นและทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างมากต่อค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสและถ้าแรงยกมีค่ามากตามกรณีที่ 5 อาจส่งผลให้เกิดการขีดจำกัดของมาตรฐานซึ่งมีค่าเกิน 350 นิวตัน ดังนั้นค่าแรงยกที่ใช้สามารถเลือกใช้โดยระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมเพื่อทำให้ได้ค่าแรงสัมผัสที่น้อยสุดในส่วนของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญมากเมื่อเทียบกับผลจากความเร็วในการเคลื่อนที่ค่าแรงของสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆของกรณีที่ 1 และ 5 ถูกนำมาเปรียบเทียบและแสดงในรูปที่ 16 โดยที่กรณีที่ 1 เป็นการสมมติให้รถไฟเคลื่อนที่ภายใต้ความเร็วคงที่บนทางตรงและที่รูปที่ 17 แสดงถึงการเปรียบเทียบของค่าแรงสัมผัสสำหรับทั้งสามกรณีของการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและแสดงถึงค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อค่าของแรงยกมีค่ามากขึ้น



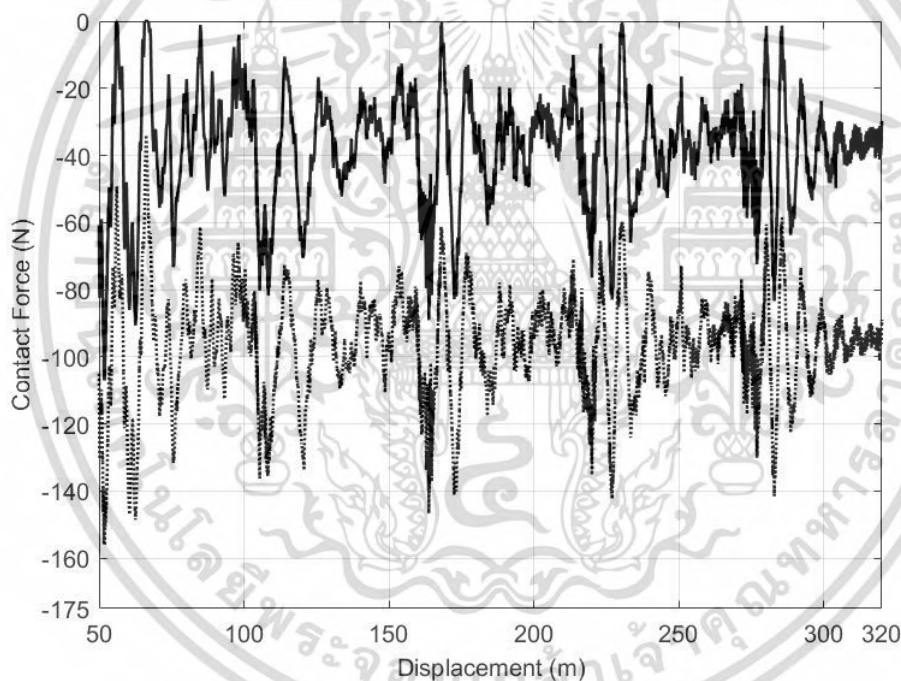
รูปที่ 16 การเปรียบเทียบแรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความเร็วคงที่ (--- กรณีที่ 1, ——— กรณีที่ 5)



รูปที่ 17 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (--- กรณีที่ 3, กรณีที่ 4, ——— กรณีที่ 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์ผลของการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงถูกแบ่งออกเป็นวิเคราะห์สองรูปแบบการวิเคราะห์แบบแรกคือการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันกับการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งโดยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงคงที่และแรงยกมีค่าเปลี่ยนไปผลการคำนวณที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงอยู่ในตารางที่ 9 กรณีที่ 6 ถึง 8 โดยการวิเคราะห์ทั้งสามกรณีนี้พบว่าค่าแรงยกในกรณีที่มีค่าความหน่วงคงที่มีค่ามากกว่าค่าแรงยกที่ใช้ในกรณีที่มีค่าความเร่งคงที่และค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดค่าความหน่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่มีค่าเท่ากับ 0.748 m/s^2 ในกรณีที่ 6 พบว่าค่าของค่าเฉลี่ยแรงสัมผัสมีค่าน้อยมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการอาร์กไฟฟ้าได้ในขณะที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่ได้มีผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงยกในการเปรียบเทียบกรณีที่ 6 และ 8 ถูกแสดงในรูปที่ 18 และในตารางที่ 11 เป็นการแสดงวิเคราะห์ในแบบที่ 2 โดยการเปลี่ยนค่าขนาดของความหน่วงขณะที่มีแรงยกคงที่ทั้ง 5 กรณี



รูปที่ 18 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีที่ 6 กรณีที่ 8)

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่เคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงที่มีร้อยละการเกิดการสูญเสียการสัมผัส

กรณี	อัตราเร็ว เริ่มต้น (km/hr)	ค่าเฉลี่ยของ ความหน่วง (m/s^2)	แรงยก บนแพน	ค่าเฉลี่ย ของแรง	ค่าส่วน เบี่ยงเบน	แรง สัมผัส	แรง สัมผัส	ร้อยละการเกิด การสูญเสียการ สัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

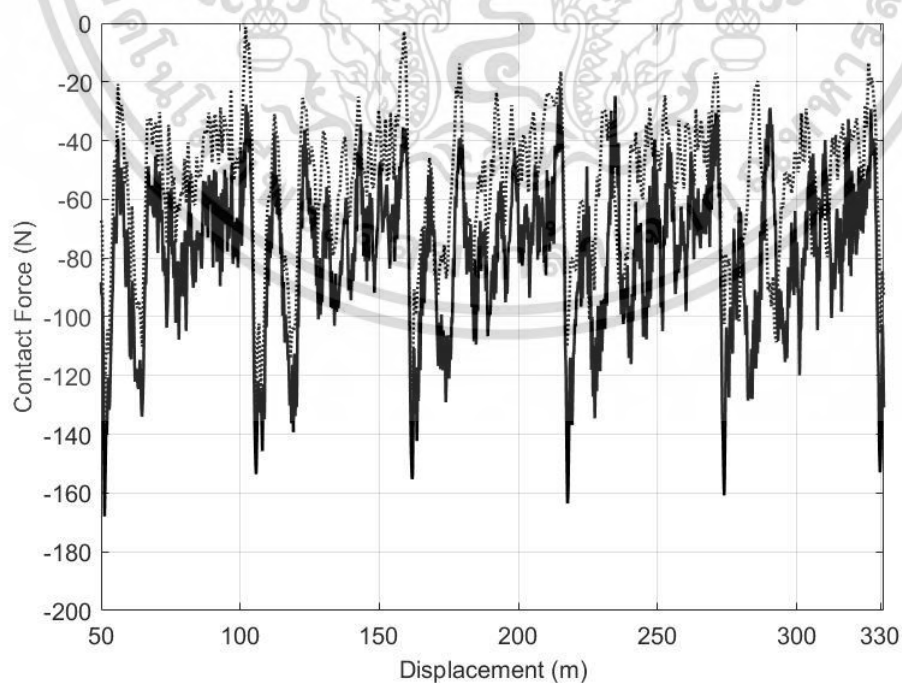
			โทกราฟ (N)	สัมผัส (N)	มาตรฐาน (N)	ต่ำสุด (N)	สูงสุด (N)	
1	80	0.0373	1650.69	62.6571	23.4616	5.558	160.295	0
2	80	0.0523	1650.69	56.1411	23.0740	2.232	147.183	0
3	80	0.0747	1650.69	46.3170	23.6042	0	136.981	1.4021
4	80	0.1121	1650.69	29.4788	21.7360	0	111.898	5.4424
5	80	0.1870	1650.69	-	-	-	-	100

จากผลที่แสดงไว้พบว่าขนาดของความหน่วงที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียการสัมผัสกันของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสที่เพิ่มขึ้นและค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าลดลงเนื่องจากการกดต่ำของการเคลื่อนที่ของรถไฟที่ทำให้แพนโทกราฟมีแนวโน้มเคลื่อนที่ลงในการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงได้การจำลองทอร์กเข้าไปในระบบล้อเพื่อทำให้เกิดแรงเบรกและด้วยการใช้สมการการสัมผัสกันแบบยืดหยุ่นยอมให้เกิดการแยกออกจากกันของแบบจำลองแพนโทกราฟและแคทีนารีเป็นเหตุที่ทำให้การวิเคราะห์แสดงถึงค่าแรงยกที่ต้องเพิ่มขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการสูญเสียการสัมผัสกันของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสภายใต้การเคลื่อนที่ที่มีความหน่วงและในตารางที่ 11 กรณีที่ 5 แสดงถึงการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสหลังจากการพิจารณาผลของการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงและแรงยกในแพนโทกราฟต่อแรงสัมผัสแล้วรูปแบบการวิเคราะห์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาอัตราการสึกหรอโดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การสึกหรอบนลวดสัมผัสประกอบไปด้วยอัตราเร็วเริ่มต้นขนาดของความเร่งและความหน่วงและแรงยกบนแพนโทกราฟซึ่งรูปแบบของปัจจัยที่ต่างกันเหล่านี้ส่งผลต่อผลลัพธ์ของค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสที่แตกต่างกันตามตารางที่ 12 โดยมีกระแสไฟฟ้าคงที่ขนาด 500 แอมแปร์บนลวดสัมผัสรูปที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบแรงสัมผัสในกรณีที่ 1 และ 3 สำหรับการเปรียบเทียบภายใต้ค่าความหน่วงที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่ 3 เทียบกับความเร็วคงที่ในกรณีที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าลดลงจาก 78.61 เป็น 54.59 นิวตันและรูปที่ 20 และรูปที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและอัตราการสึกหรอบนลวดสัมผัสที่มีผลมาจากไฟฟ้าโดยพบว่าค่าความเร่งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานระหว่างลวดสัมผัสและแถบสัมผัสที่สูงขึ้นและส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอเนื่องจากผลทางไฟฟ้าด้วยในรูปที่ 22 แสดงอัตราการสึกหรอเนื่องจากปัจจัยทางกลสำหรับกรณีที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นไปตามการคาดการณ์เมื่อค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการสึกหรอเนื่องจากปัจจัยทางกลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและอัตราการสึกหรอเนื่องจากปัจจัยทางกลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและอัตราการสึกหรอรวมสำหรับกรณีที่ 2 และ 3 ถูกแสดงในรูปที่ 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

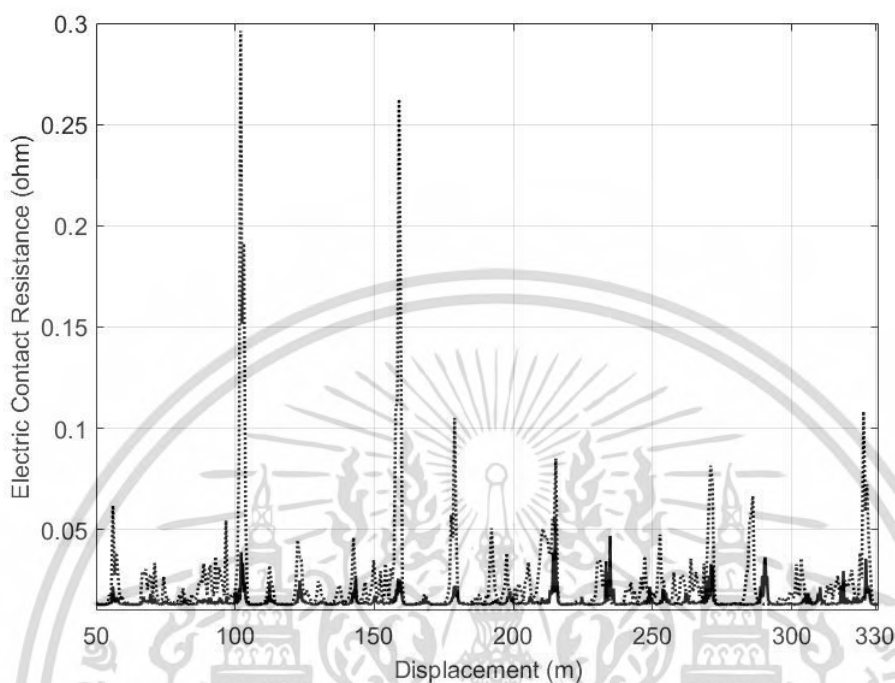
ตารางที่ 12 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่เคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงต่างกัน

กรณี	อัตราเร็ว เริ่มต้น (km/hr)	ค่าอัตราเร่ง (m/s ²)	แรงยกบน แพนโท กราฟ (N)	ค่าเฉลี่ยของแรง สัมผัส (N)	ค่าเฉลี่ย ของอัตรา การสึก หรือทาง กล (mm ³ /k m)	ค่าเฉลี่ย ของอัตรา การสึกหรือ ทางไฟฟ้า (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ย ของอัตรา การสึก หรือรวม (mm ³ /k m)
1	80	0.0	1650.69	78.6123	2.5475	2.3834	4.9309
2	80	-0.0101	1650.69	74.9739	2.2207	2.4757	4.6964
3	80	-0.0599	1650.69	54.5911	1.0757	4.0291	5.1048
4	20	0.0	1615.69	70.7107	1.4996	9.0292	10.5288
5	20	0.0373	1615.69	87.1226	2.6818	7.3732	10.0550
6	20	0.1121	1615.69	126.8903	7.6257	5.9564	13.5821

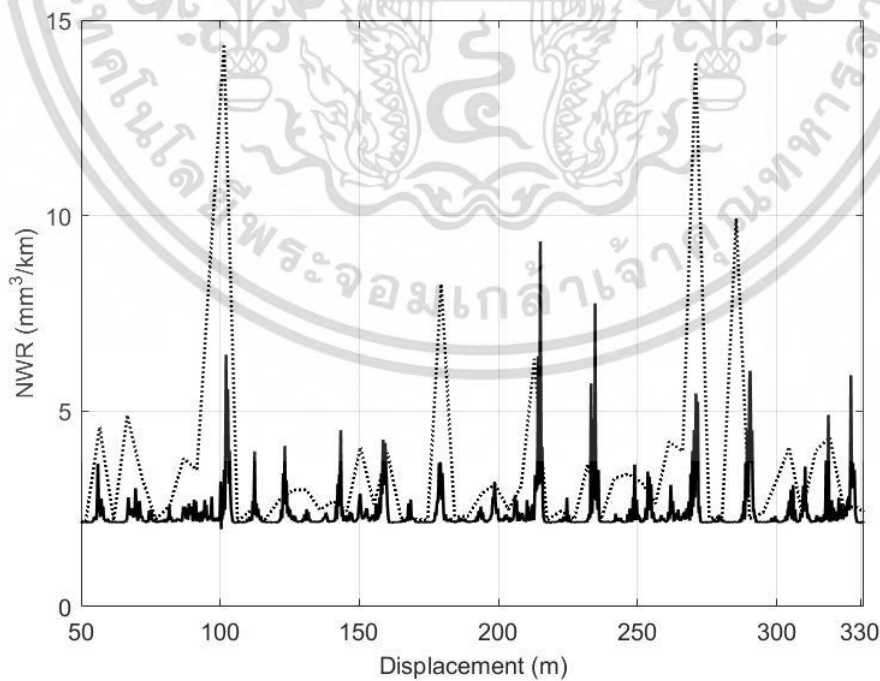


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 19 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีสที่ 1, กรณีสที่ 3)

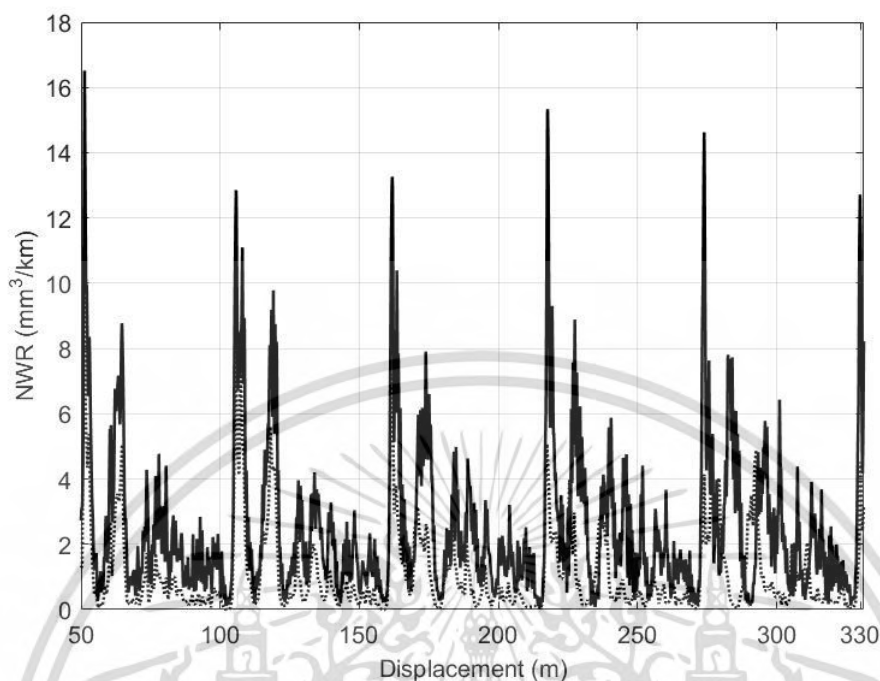


รูปที่ 20 ความต้านทานที่จุดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีสที่ 1, กรณีสที่ 3)

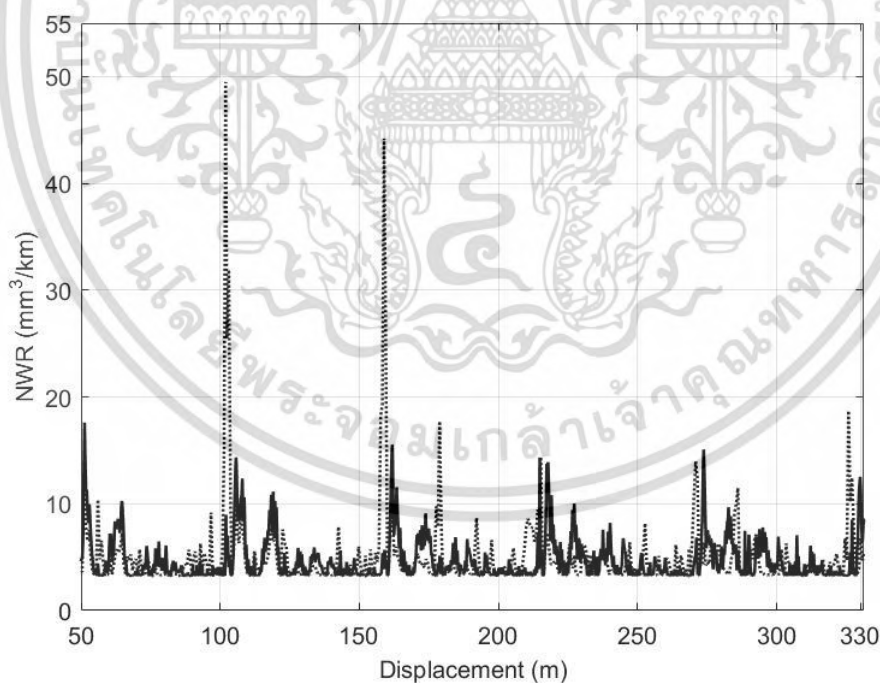


รูปที่ 21 การสึกหรอทางไฟฟ้าบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีสที่ 1, กรณีสที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 การสีกหรือทางกลบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีที่ 1, กรณีที่ 3)

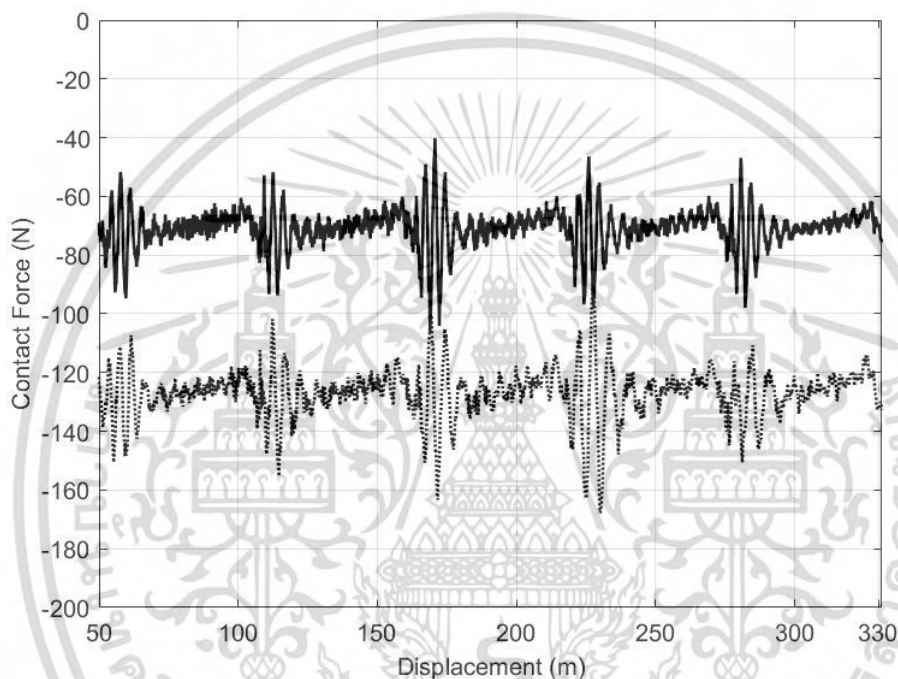


รูปที่ 23 การสีกหรือรวมบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วง (— กรณีที่ 2, กรณีที่ 3)

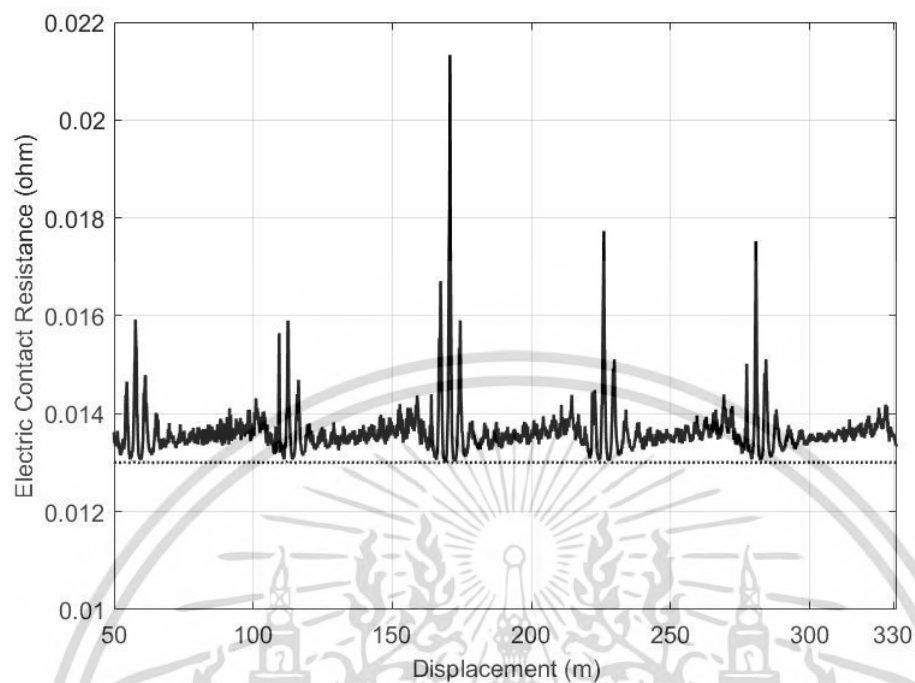
รูปแบบในการวิเคราะห์การสีกหรือที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งมีรูปแบบเหมือนกับการวิเคราะห์การสีกหรือที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงในรูปที่ 24 แสดงค่าแรงสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆของกรณี 4 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

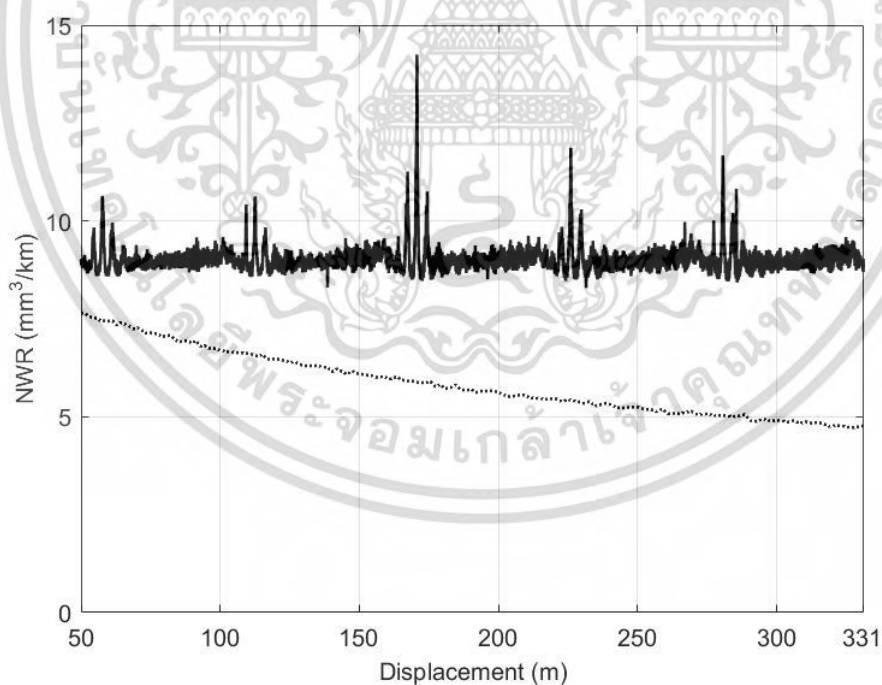
6 ในตารางที่ 12 ผลของรูปนี้แสดงให้เห็นถึงค่าของแรงสัมผัสที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งที่มากขึ้นการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ 4 และ 6 สำหรับค่าความต้านทานระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัส อัตราการสึกหรอเนื่องจากปัจจัยทางไฟฟ้าและทางกลถูกแสดงไว้ในรูปที่ 25 ถึงรูปที่ 27 ตามลำดับและในรูปที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบของอัตราการสึกหรอรวมส่วนใหญ่มีผลมาจากอัตราการสึกหรอเชิงกลหรือมาจากการสึกหรอแบบเสียดสีที่ไม่มีสารหล่อลื่นและการสึกหรอเชิงกลจะมีบทบาทมากขึ้นต่ออัตราการสึกหรอรวมเมื่อเป็นการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งที่มากขึ้น



รูปที่ 24 แรงสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (——— กรณีที่ 4, กรณีที่ 6)

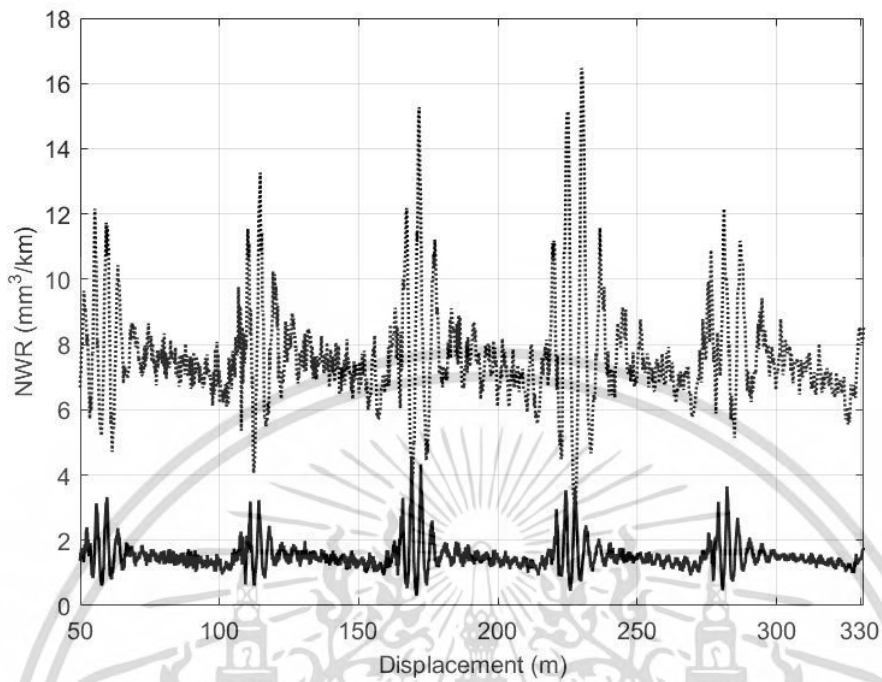


รูปที่ 25 ความต้านทานที่จุดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (— กรณีที่ 4 กรณีที่ 6)

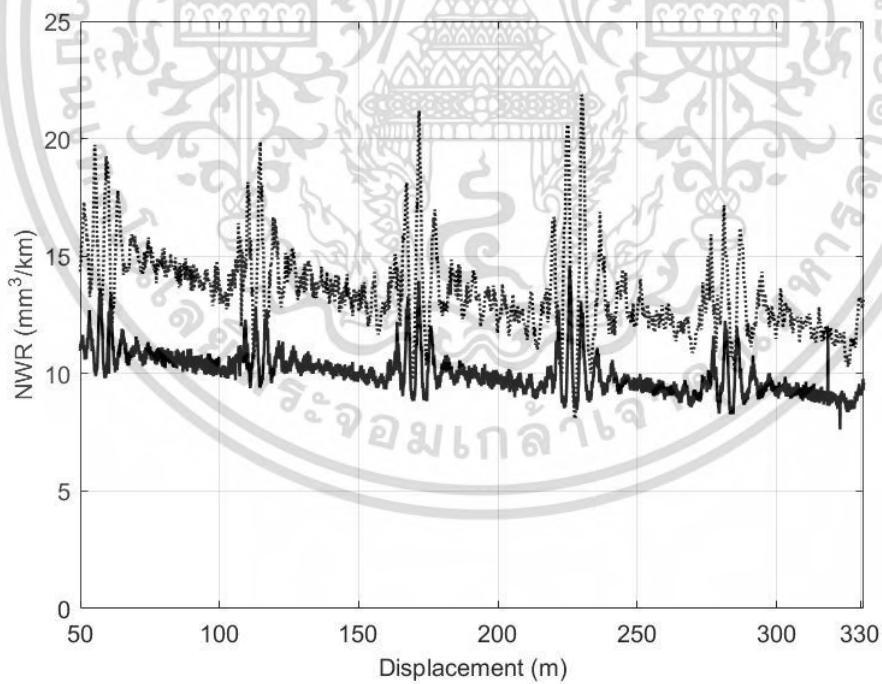


รูปที่ 26 การสึกหรอทางไฟฟ้าบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (— กรณีที่ 4 กรณีที่ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 การสีกหรือทางกลบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (— กรณีที่ 4 กรณีที่ 6)

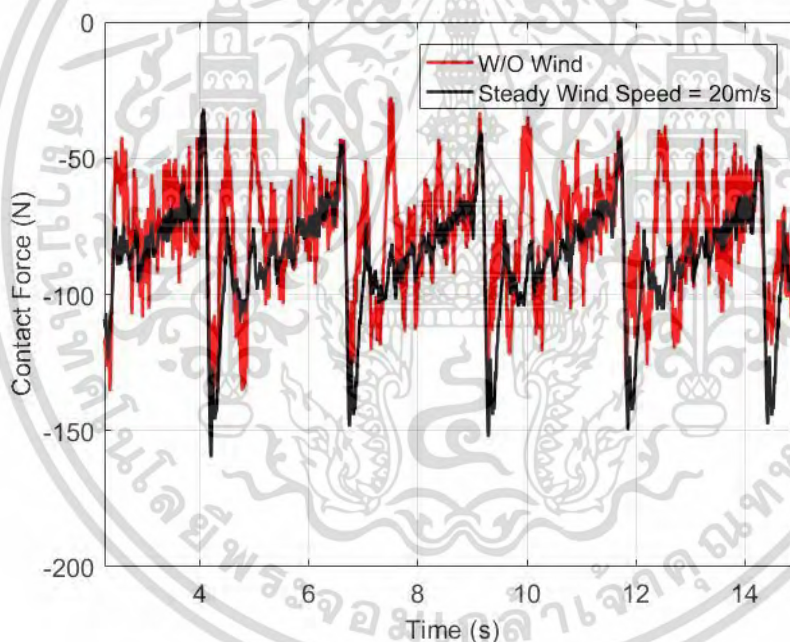


รูปที่ 28 การสีกหรือรวมบนรูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่ง (— กรณีที่ 5 กรณีที่ 6)

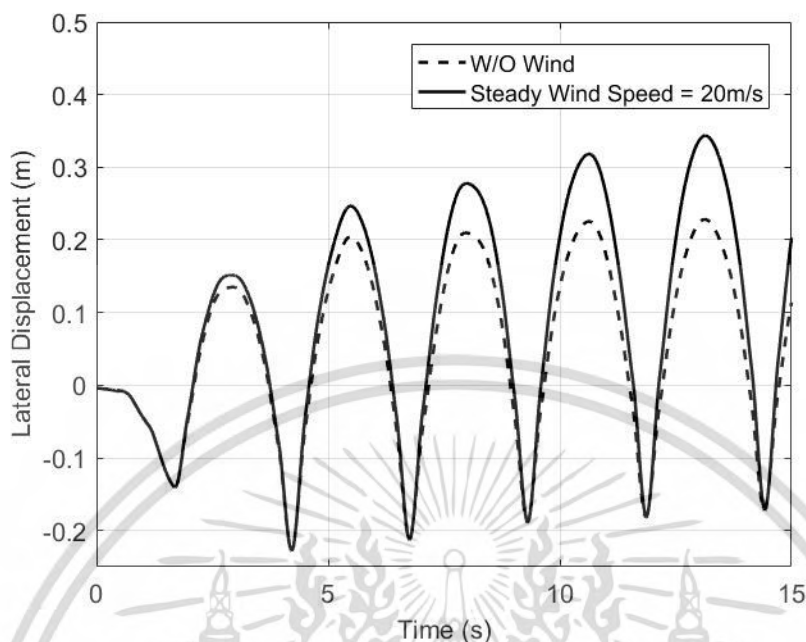
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การเคลื่อนที่ของรถไฟภายใต้การก่อกวนของลมและการวิเคราะห์การสั่นไหว

ในการพิจารณาผลอันเนื่องมาจากการก่อกวนของลมระบบทั้งระบบทำให้เกิดแรงภายนอกเกิดขึ้นบนวัตถุแต่ละชิ้นซึ่งพบว่าแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดแปรผันตรงกับขนาดของความเร็วสัมพัทธ์โดยตรงเมื่อทำการคำนวณภายใต้ลมที่มีขนาดคงที่เท่ากับ 20 เมตรต่อวินาทีที่มีทิศทางพุ่งเข้าจากด้านนอกของโค้งสู่ด้านในของการโค้งพบว่าแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 29 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโดยที่แรงสัมผัสนั้นมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 78.2921 นิวตันเป็น 86.9547 นิวตัน และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลลดลงจาก 21.8147 นิวตันเป็น 20.7408 นิวตัน จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างล้วนแต่ส่งผลดีต่อการออกแบบ แต่เมื่อทำการพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวดสัมผัสตามแนวแกนตามขวางของจุดสัมผัส หรือตำแหน่งของจุดสัมผัสที่แสดงอยู่ในรูปที่ 30 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ส่งผลให้ค่าสูงสุดของระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแผนเขตตามแกนตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22.8 เซนติเมตรเป็น 34.4 เซนติเมตร ซึ่งเป็นถือว่าเป็นนัยสำคัญในการออกแบบเมื่อมีการเคลื่อนที่ของสุดสัมผัสตามแนวแกนตามขวาง

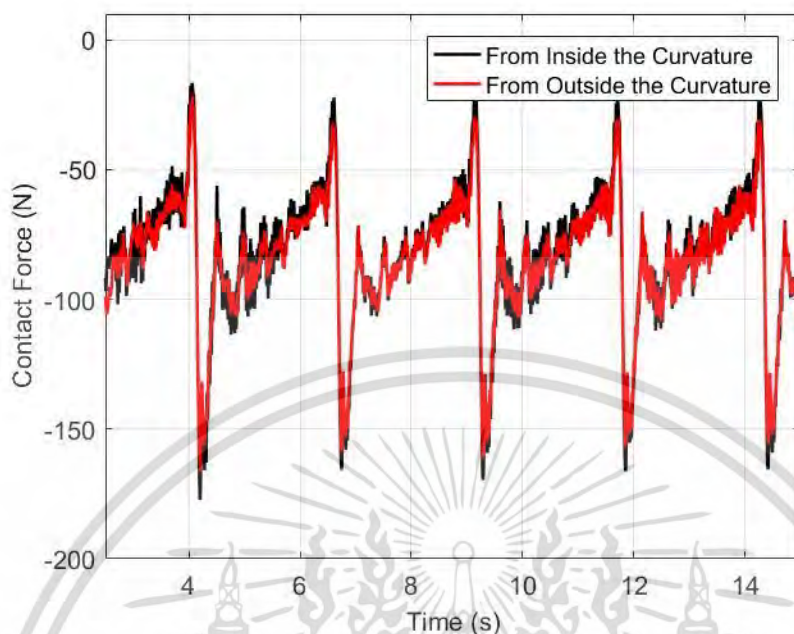


รูปที่ 29 แสดงแรงสัมผัสในกรณีที่มีลมและไม่มีลมพัดผ่านระบบ

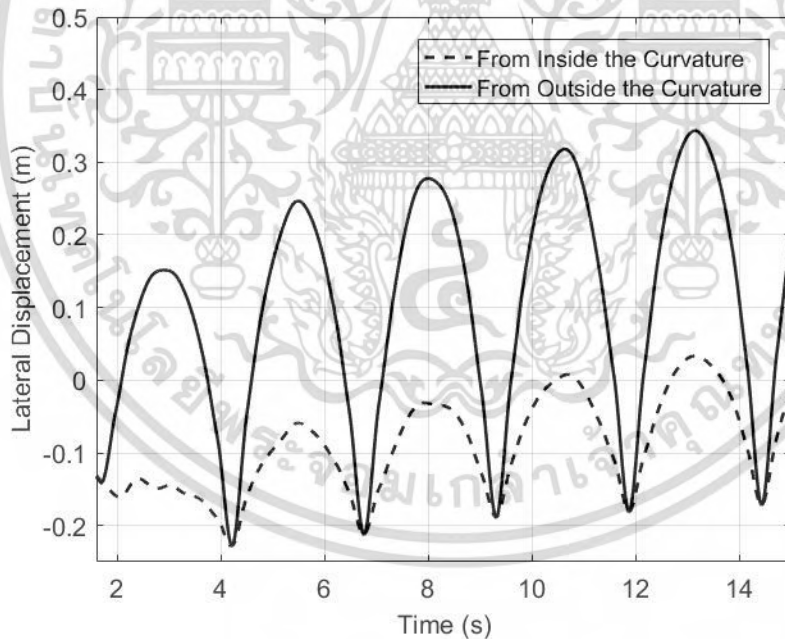


รูปที่ 30 แสดงระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแพนเฮดตามแกนตามขวางในกรณีที่มีลมและไม่มีลมพัดผ่านระบบ

เมื่อทำการพิจารณาผลทิศทางลมโดยขนาดของลมที่พัดมีความเร็วคงที่ 20 เมตรต่อวินาที แต่มีทิศทางที่ต่างกันได้แก่ทิศทางพุ่งจากด้านในของโค้งออกไปด้านนอกของโค้ง และ ทิศทางพุ่งจากด้านนอกของโค้งเข้าสู่ด้านในของโค้ง พบว่าแรงสัมผัสและระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแพนเฮดตามแกนตามขวางแสดงในรูปที่ 31 และ รูปที่ 32 ตามลำดับ พบว่าแรงสัมผัสมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้งค่าเฉลี่ยของข้อมูลและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล แต่ระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแพนเฮดตามแกนตามขวางพบว่า เมื่อลมที่พัดผ่านระบบมีทิศทางพุ่งเข้าจากด้านนอกของโค้งสู่ด้านในของการโค้งจะทำให้เกิดระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแพนเฮดตามแกนตามขวางมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการออกแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้งเพราะจะทำให้จุดที่แพนเฮดสัมผัสกับลวดที่ถูกสัมผัสออกไปนอกป्लอกที่อยู่บนแพนเฮด นั่นหมายถึงไม่มีการส่งกำลังผ่านระบบส่งกำลังเหนือหัว



รูปที่ 31 แสดงแรงสัมผัสเมื่อลมที่ผ่านระบบมีทิศทางลมแตกต่างกัน

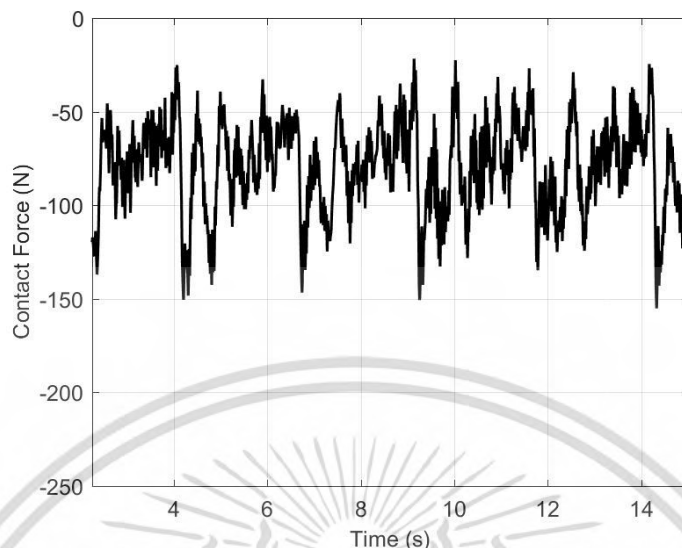


รูปที่ 32 แสดงระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสกับจุดกึ่งกลางบนแผนเฮดตามแกนตามขวางเมื่อลมที่ผ่านระบบมีทิศทางลมแตกต่างกัน

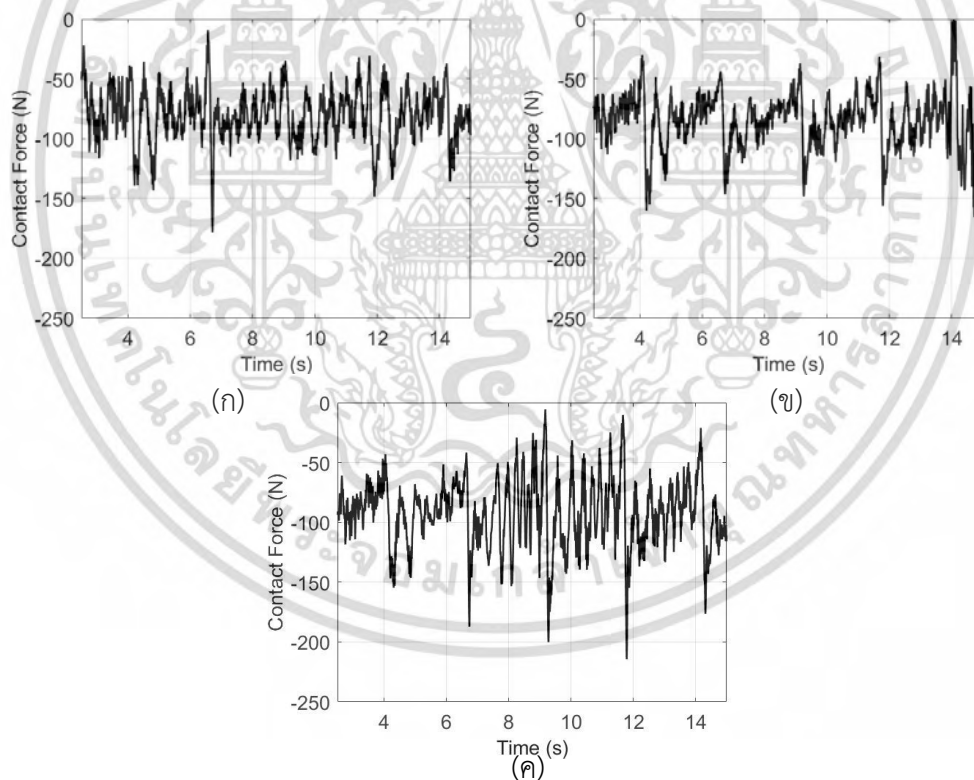
ภายใต้สภาวะการทำงานจริงของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์คคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตันพบว่าผลการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 33 ซึ่งมีค่าที่ยอมรับได้สำหรับมาตรฐาน EN50367 และ EN50317 ซึ่งเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางการพลวัตเนื่องจากผลของแรงลมคงตัวที่มีทิศทางของลมอยู่ในแนวระดับและตั้งฉากกับรางโดยรูปที่ 34 แสดงถึงค่าแรงสัมผัสที่เวลาต่างๆเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ภายใต้แรงลมคงที่และการวิเคราะห์การสัมผัสด้วยค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถูกสรุปไว้ในตารางที่ 13 การวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นหรือของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีถูกวิเคราะห์ด้วยค่าผลการคำนวณซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าอัตราการสึกหรอเชิงกลค่าอัตราการสึกหรอเชิงไฟฟ้าค่าอัตราการสึกหรอของรวมและการสูญเสียการสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและ ลวดสัมผัสผลการคำนวณแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสที่มีค่าสูงขึ้นตามขนาดของความเร็วลมเพราะการออกแบบระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีโดยการออกแบบระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีถูกออกแบบภายใต้หลักการทางอากาศพลศาสตร์ให้เกิดแรงยกและแรงกดตามลำดับหรืออีกนัยหนึ่งเป็นการทำให้แถบสัมผัสและลวดสัมผัสติดกันมากขึ้นและแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียการสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสที่ลดลงแต่ทำให้เกิดการสึกหรอเชิงกลเพิ่มขึ้นโดยค่าอัตราการสึกหรอเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในขณะที่อัตราการสึกหรอมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งทำให้อัตราการสึกหรอรวมมีปัจจัยหลักมาจากการสึกหรอเชิงกลและเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของความเร็วลมพบว่ามีสาเหตุมาจากแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นและการสั่นในระบบแคทีนารีแต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มสูญเสียการสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสเพราะมีค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสที่มากขึ้นเพื่อการยืนยันถึงอัตราการสึกหรอเชิงไฟฟ้าโดยไม่พิจารณาผลของการสูญเสียระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสที่เกิดขึ้นในตารางที่ 13 ได้ทำการเพิ่มแรงยกในระบบแพนโทกราฟจาก 1650.69 นิวตันเป็น 1815.69 นิวตันและผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 14 พบว่าแนวโน้มของผลลัพธ์เป็นไปตามตารางที่ 13 รวมไปถึงค่าอัตราการสึกหรอเชิงไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและอัตราการสึกหรอเชิงกลที่เพิ่มขึ้นตามขนาดเองความเร็วลมเป็นปัจจัยหลักของการเพิ่มอัตราการสึกหรอรวมจากผลลัพธ์เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นพบว่าเป็นไปตามมาตรฐาน EN50367 และ EN50317 และการออกแบบของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีตามหลักอากาศพลศาสตร์แสดงถึงข้อดีของการออกแบบที่ทำให้เกิดการสัมผัสที่แน่นขึ้นของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสเพื่อช่วยลดการสูญเสียการสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสและการลดลงของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านลมคงตัวที่มีขนาดความเร็วที่ไม่มาก



รูปที่ 33 แรงสัมผัสบนการเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตัน



รูปที่ 34 ค่าแรงสัมผัสที่เวลาต่างๆเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ภายใต้แรงลมคงที่ที่มีขนาดความเร็วต่างกัน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 30 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่มีความเร็วลมคงตัวและขนาดของความเร็วมุมที่ต่างกันภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตัน

ความเร็วมุม	ค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (N)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางกล (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางไฟฟ้า (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอรวม (mm ³ /km)	ร้อยละการเกิดการสูญเสียการสัมผัส
ไม่มีลม	79.0544	25.5508	2.5514	2.4552	5.0067	0
10 m/s	80.9416	23.8995	2.6307	2.3721	5.0028	0
20 m/s	85.3727	25.8908	2.9396	2.4647	5.4044	0.08
30 m/s	92.1626	28.9224	3.9078	2.4055	6.3133	0

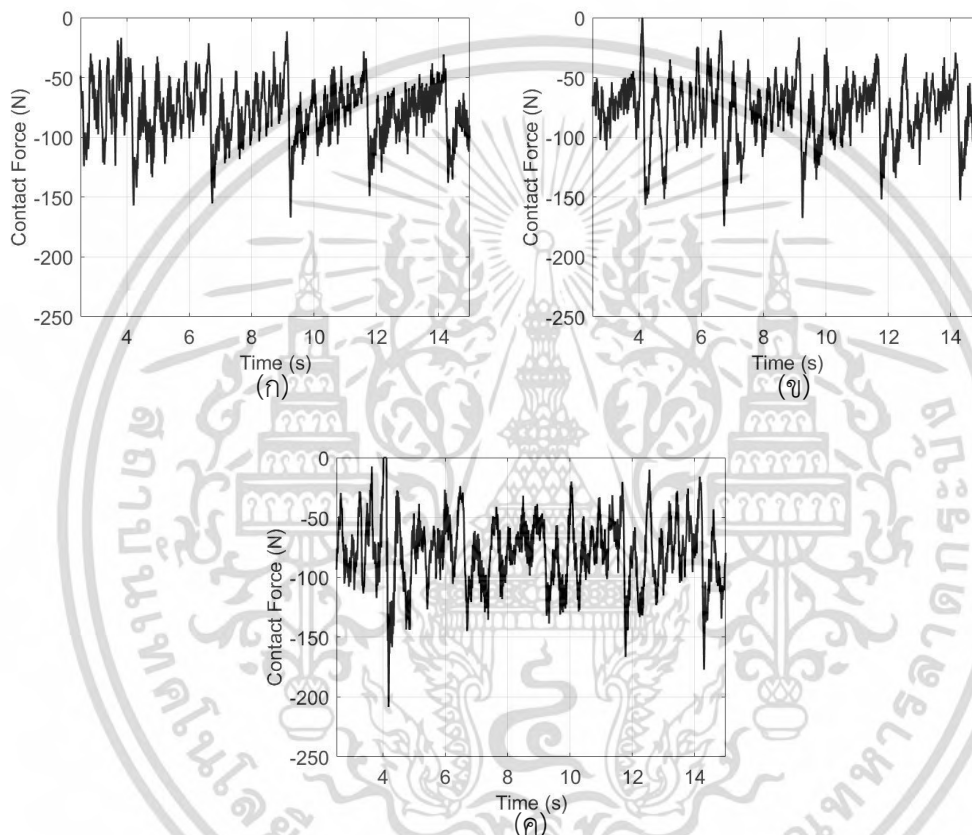
ตารางที่ 14 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่มีความเร็วลมคงตัวและขนาดของความเร็วมุมที่ต่างกันภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1815.69 นิวตัน

ความเร็วมุม	ค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (N)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางกล (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางไฟฟ้า (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอรวม (mm ³ /km)	ร้อยละการเกิดการสูญเสียการสัมผัส
ไม่มีลม	118.2223	22.2572	6.7288	2.1616	8.8904	0
10 m/s	120.1296	21.1782	6.9961	2.1594	9.1555	0
20 m/s	124.0970	20.8028	7.6066	2.1596	9.7662	0
30 m/s	130.9205	24.6741	8.9854	2.1626	11.1480	0

ในกรณีที่ทำการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของการสั่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรบกวนของลมในการวิเคราะห์ด้วยความซับซ้อนของระบบแคทีนารีการสั่นที่เกิดขึ้นบนลวดส่งกำลังส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของลวดสัมผัสได้ทำการสร้างแบบจำลองการสั่นที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของโดยใช้ขนาดของลมที่มารบกวนระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดแคทีนารีโดยกำหนดให้ลมที่มารบกวนเป็นเวลา 2.5 วินาทีและมีทิศทางในแนวระดับและตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟบนรางตรงที่มีความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และแรงยกบนระบบแพนโทกราฟ 1650.69 นิวตันในรูปที่ 35 แสดงแรงสัมผัสที่เวลาต่างๆและตารางที่ 15 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอัตราการสึกหรอเชิงกลเชิงไฟฟ้าและอัตราการสึกหรอรวมและร้อยละการเกิดสูญเสียการสัมผัสของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสมีค่าใกล้เคียงเดิมถึงแม้จะมีการสั่นที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของความเร็วลม



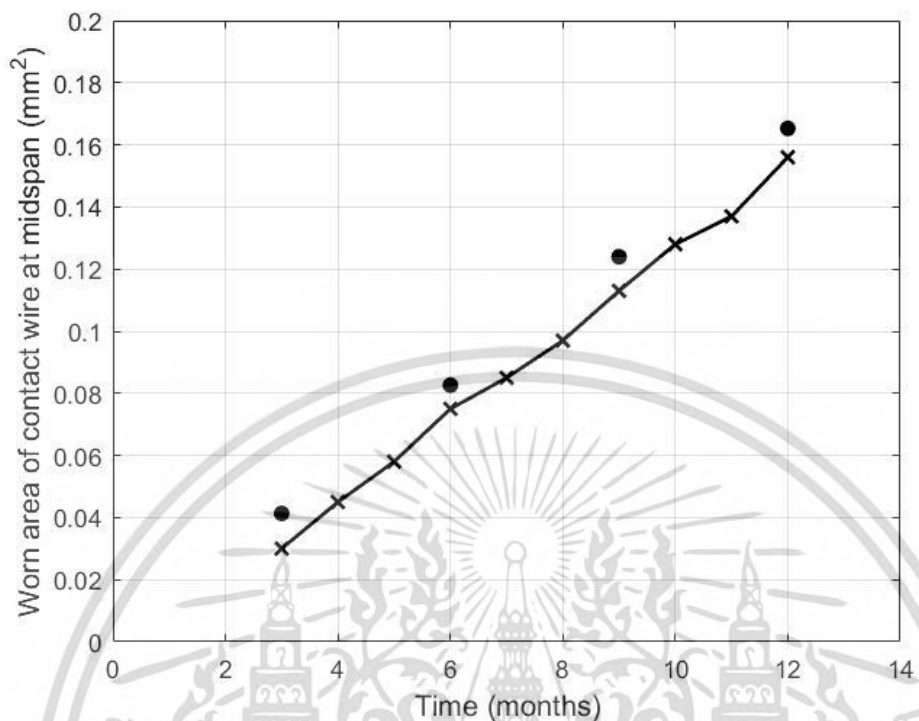
รูปที่ 35 ค่าแรงสัมผัสที่เวลาต่างๆเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ภายใต้แรงลมรบกวนที่มีขนาดความเร็วต่างกัน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 30 m/s

ตารางที่ 15 ผลการคำนวณในแต่ละกรณีที่มีการรบกวนจากลมและขนาดของความเร็วลมที่ต่างกันภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟบนทางตรงที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าทอร์กคงที่และมีแรงยกบนระบบแคทีนารีเท่ากับ 1650.69 นิวตัน

ความเร็วลม	ค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัส (N)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางกล (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอทางไฟฟ้า (mm ³ /km)	ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอรวม (mm ³ /km)	ร้อยละการเกิดการสูญเสียการสัมผัส
ไม่มีลม	79.0544	25.5508	2.5514	2.4552	5.0067	0
10 m/s	79.3732	25.5514	2.5531	2.5580	5.1111	0
20 m/s	79.6138	27.1695	2.6672	2.5930	5.2602	0.09
30 m/s	80.0312	29.2231	2.7840	2.9855	5.7695	0.65

6.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากมาตรฐาน EN50367 และ EN50317 การยืนยันความถูกต้องด้วยการทดลองของแบบจำลองการสึกหรอถูกจัดทำขึ้นโดย Bucca และ Collina [7] และถูกใช้เป็นพื้นฐานในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบบจำลองที่ใช้อ้างอิง [7] มีพื้นฐานมาจากแนวคิดของชนิดการสึกหรอแบบต่างๆ และแสดงให้เห็นถึงการยอมรับที่ดีเมื่อเทียบกับข้อมูลผลการทดลองสำหรับลวดสัมผัสทองแดงและแถบสัมผัสแบบ Kasperovski การเปรียบเทียบการสูญเสียพื้นที่ของลวดสัมผัสที่ได้ในสมการอ้างอิง [7] และจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องซึ่งมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ 70 เมตรต่อวินาทีบนทางตรง และได้ผลการคำนวณเชิงตัวเลขของค่าเฉลี่ยของแรงสัมผัสและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเป็น 60.41 และ 31.82 นิวตันตามลำดับ รูปที่ 36 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียของพื้นที่ของลวดสัมผัสที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และจากเอกสารอ้างอิง [7] ซึ่งพบว่าผลจากที่ได้จากข้อมูลทั้งสองเป็นที่น่ายอมรับได้ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างกันของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และความหนาของลวดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสูญเสียของพื้นที่ไป



รูปที่ 36 การเปรียบเทียบการสูญเสียของพื้นที่ของลวดสัมผัส (—x— จากเอกสารอ้างอิง[7] ● วิธีที่นำเสนอ
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุป

ระเบียบวิธีทางระบบมัลติบอดีที่ถูกรวบรวมเสนอในการศึกษานี้เพื่อผลของการทำนายการสึกหรอของลวดสัมผัสบนระบบแคทีนารีจากผลลัพธ์ของพฤติกรรมทางพลวัตของแพนโทกราฟโดยวิธีที่ถูกรวบรวมเสนอสามารถรวมสมการการคำนวณการสึกหรอเชิงวิเคราะห์และจากการทดลองเข้ากับรายละเอียดของแบบจำลองสามมิติของระบบขนส่งทางราง การใช้กรอบการทำงานทางคอมพิวเตอร์ของระบบมัลติบอดีที่ถูกรวบรวมเสนอและพิสูจน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้วิเคราะห์พฤติกรรมการสัมผัสกันของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีและการสึกหรอในสถานะการเคลื่อนที่แบบต่างๆซึ่งรวมไปถึงการเคลื่อนที่บนทางโค้งการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงแบบจำลองของแคทีนารีที่มีความยืดหยุ่นถูกจำลองด้วยแบบจำลองไม่เชิงเส้น ANCF และพัฒนารูปแบบสำหรับการเคลื่อนที่บนทางโค้งที่ระยะตามแนวขวางบนแถบสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงพิกัดองค์ประกอบ ANCF แบบเคเบิลถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองของลวดสัมผัสและลวดส่งกำลังแบบจำลองสำหรับแรงสัมผัสที่มีความยืดหยุ่นแบบพลวัตถูกสร้างด้วยความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นระหว่างแพนโทกราฟที่เป็นวัสดุแข็งเกร็งและแคทีนารีที่มีความยืดหยุ่นและโมเดลการสัมผัสถูกตรวจสอบความถูกต้องในงานวิจัยที่ผ่านมา [16] และสามารถใช้พิจารณาการสูญเสียการสัมผัสระหว่างลวดสัมผัสและแถบสัมผัสรายละเอียดของการวิเคราะห์การสึกหรอของลวดสัมผัสบนรูปแบบการเคลื่อนที่บนทางโค้งถูกรวบรวมเสนอโดยการวิเคราะห์ผลเนื่องจากปัจจัยทางกลและทางไฟฟ้าและมีการพิสูจน์แบบจำลองการสึกหรอด้วยชุดการทดลองที่สร้างขึ้นมาและที่สถานะการทำงานจริง [8] รูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันภายใต้สถานะที่มีความเร่งและความหน่วงบนทางตรงถูกวิเคราะห์ผลทางพลวัตของระบบรถไฟต่อแรงสัมผัสระหว่างแพนโทกราฟและแคทีนารีและอัตราการสึกหรอผลของการคำนวณแสดงให้เห็นถึงผลของค่าความเร่งที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงสัมผัสมีค่ามากขึ้นและสามารถใช้ค่าแรงยกที่ลดลงเพื่อรักษาสภาพการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องได้ในทางตรงกันข้ามผลของความหน่วงที่เพิ่มขึ้นแถบสัมผัสบนแพนเฮดอาจมีการตกลงมาตามแนวตั้งซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการใช้แรงเบรกดังนั้นค่าที่เพิ่มขึ้นของแรงยกเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อทำให้รักษาการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องและหลีกเลี่ยงผลของการอาร์กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแยกออกจากกันของแถบสัมผัสและลวดสัมผัสผลของการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งและความหน่วงต่อค่าอัตราการสึกหรอบนลวดสัมผัสถูกศึกษาในงานวิจัยและพบว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความหน่วงที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการสึกหรอเนื่องมาจากปัจจัยทางกลและทางไฟฟ้าลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับในขณะที่รูปแบบการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งพบว่าการสึกหรอเนื่องมาจากปัจจัยทางกลเป็นปัจจัยหลักต่อการสึกหรอรวม พฤติกรรมทางพลวัตของระบบแพนโทกราฟและแคทีนารีเนื่องจากแรงลมคงตัวบนทางตรงถูกพิจารณาภายใต้ความเร่งคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีทอร์กคงที่และมีทิศทางลมในแนวระดับตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถสรุปได้ว่าอัตราการสึกหรอรวมมีการเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดของความเร่งลมที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเพิ่มขึ้นส่วนมากมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอเชิงกลเพราะการเพิ่มขึ้นของแรงสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสและเนื่องจากความแปรปรวนของแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นที่ขึ้นตามขนาดของความเร็วลมทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอรวมมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะไม่เชิงเส้นทำให้การเพิ่มขึ้นของอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ขนาดของความเร็วลมและข้อดีของการออกแบบภายใต้หลักการอากาศพลศาสตร์แสดงให้เห็นถึงลดการเกิดการสูญเสียการสัมผัสที่ลดลงและการวิเคราะห์ผลของการสึกหรอของลวดสัมผัสเนื่องจากการสั่นที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของลมภายใต้การหายไปของข้อดีในการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ในระบบแผงโซลาร์เซลล์และแคทีนารีแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในขณะที่แรงสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียการสัมผัสระหว่างแผงโซลาร์เซลล์และแคทีนารีอย่างมีนัยสำคัญและส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นทั้งอัตราการสึกหรอเชิงกลและไฟฟ้าและผลของการสั่นเนื่องจากความเร็วลมสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแคทีนารีอย่างมากและส่งผลให้เกิดการสูญเสียการสัมผัสระหว่างแถบสัมผัสและลวดสัมผัสทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงยกในระบบแผงโซลาร์เซลล์ควรมีบทบาทเพิ่มขึ้นเพื่อมาชดเชยการสั่นที่เกิดขึ้นดังนั้นแรงสัมผัสเฉลี่ยที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นขณะที่การลดลงของแรงสัมผัสเฉลี่ยที่ลดลงทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบแผงโซลาร์เซลล์และแคทีนารีลดลง โดยผลการคำนวณทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปตามมาตรฐาน EN50367 และ EN50317 มาตรฐานทั้งสองนี้ถูกใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการทำงานที่เหมาะสมของระบบแคทีนารีและแผงโซลาร์เซลล์และถูกใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนและความไม่เชิงเส้นสูงและนอกจากนี้ผลที่ได้นำเสนอในงานวิจัยที่ใช้อ้างอิง [7] ถูกนำมาใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการสึกหรอที่ได้จากวิธีการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของระบบมัลติบอดีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Lee, J.H., and Park, T.W., 2012, “Development of a three-dimensional catenary model using cable elements based on absolute nodal coordinate formulation”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, pp. 3933 – 3941 (DOI 10.1007/s12206-012-0892-7).
2. Seo, J. H., Sugiyama, H., and Shabana, A. A., 2005, “Three-dimensional large deformation analysis of the multibody pantograph/catenary systems”, *Nonlinear Dynamics*, 42(2), pp. 199-215.
3. Seo, J. H., Kim, S. W., Jung, I. H., Park, T. W., Mok, J. Y., Kim, Y. G., and Chai, J. B., 2006, “Dynamic analysis of a pantograph–catenary system using absolute nodal coordinates”, *Vehicle System Dynamics*, 44(8), pp. 615-630.
4. Jung, , S.P., Kim, Y.G., Paik, J.S., and Park, T.W., 2012, “Estimation of Dynamic Contact Force Between a Pantograph and Catenary Using the Finite Element Method”, *ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 7, doi:10.1115/1.4006733.
5. Arnold, M., and Simeon, B., 2000, “Pantograph and catenary dynamics: a benchmark problem and its numerical solution”, *Applied Numerical Mathematics*, 34(4), pp. 345-362.
6. Bruni, S., Ambrosio, J., Carnicero, A., Cho, Y. H., Finner, L., Ikeda, M., and Zhang, W., 2015, “The results of the pantograph–catenary interaction benchmark”, *Vehicle System Dynamics*, 53(3), pp. 412-435.
7. Bucca, G. and Collina, A., 2009, “A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system”, *Wear*, 266(1-2), pp.46-59.
8. Bucca, G. and Collina, A., 2015, “Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model”, *Tribology International*, 92, pp.47-56.
9. Bucca, G., Collina, A., Manigrasso, R., Mapelli, F. and Tarsitano, D., 2011, “Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph–catenary interaction”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5), pp.483-500.
10. Massat, J. P., Laine, J. P., and Bobillot, A., 2006, “Pantograph–catenary dynamics simulation”, *Vehicle System Dynamics*, 44(1), pp. 551-559.

11. Pappalardo, C. M., Patel, M. D., Tinsley, B., and Shabana, A. A., 2015, “Contact force control in multibody pantograph/catenary systems”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multibody Dynamics*, 230(4), pp. 307-328.
12. Poetsch, G., Evans, J., Meisinger, R., Kortüm, W., Baldauf, W., Veitl, A., and Wallaschek, J., 1997, “Pantograph/catenary dynamics and control”, *Vehicle System Dynamics*, 28(2-3), pp. 159-195.
13. Bociolone, M., Resta, F., Rocchi, D., Tosi, A., and Collina, A., 2006, “Pantograph aerodynamic effects on the pantograph–catenary interaction”, *Vehicle System Dynamics*, 44(1), pp. 560-570.
14. Carnevale, M., Facchinetti, A., Maggiori, L., and Rocchi, D., 2015, “Computational fluid dynamics as a means of assessing the influence of aerodynamic forces on the mean contact force acting on a pantograph”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(7), pp.1698-1713.
15. Cheli, F., Ripamonti, F., Rocchi, D., and Tomasini, G., 2010, “Aerodynamic behaviour investigation of the new EMUV250 train to cross wind”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(4), pp. 189-201.
16. Kulkarni, S., Pappalardo, C. M., and Shabana, A. A., 2017, “Pantograph/Catenary Contact Formulations”, *ASME Journal of Vibrations and Acoustics*, 139(1), pp. 1-12.
17. Pombo, J., Ambrósio, J., Pereira, M., Rauter, F., Collina, A., and Facchinetti, A., 2009, “Influence of the aerodynamic forces on the pantograph–catenary system for high-speed trains”, *Vehicle System Dynamics*, 47(11), pp. 1327-1347.
18. Shabana, A.A., Zaazaa, K.E., and Sugiyama, H., 2007, *Railroad vehicle dynamics: a computational approach*, CRC press.
19. Shabana, A.A. and Sany, J.R., 2001, “A survey of rail vehicle track simulations and flexible multibody dynamics”, *Nonlinear Dynamics*, 26(2), pp.179-212.
20. Zboinski, K., 1998, “Dynamical investigation of railway vehicles on a curved track”, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 17(6), pp.1001-1020.
21. Zboinski, K. and Dusza, M., 2006, “Development of the method and analysis for non-linear lateral stability of railway vehicles in a curved track”, *Vehicle System Dynamics*, 44(sup1), pp.147-157.

22. Zhou, L. and Shen, Z.Y., 2013, “Dynamic analysis of a high-speed train operating on a curved track with failed fasteners”, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 14(6), pp.447-458.
23. Otsuka, K., Makihara, K., and Sugiyama, H., 2022, “Recent advances in the absolute nodal coordinate Formulation: Literature review from 2012 to 2020”, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 17(8), 080803.
24. Daocharoenporn, S., Mongkolwongroj, M., Kulkarni, S., and Shabana, A. A., 2019, “Prediction of the pantograph/catenary wear using nonlinear multibody system dynamic algorithms”, *Journal of Tribology*, 141(5), 051603.
25. Peng, C., Yang, C., Xue, J., Gong, Y., and Zhang, W., 2022 “An adaptive variable-length cable element method for form-finding analysis of railway catenaries in an absolute nodal coordinate formulation” *European Journal of Mechanics*, 93, 104545.
26. Shi, H., Chen, G., and Yang, Y., 2021, “A comparative study on pantograph-catenary models and effect of parameters on pantograph-catenary dynamics under crosswind”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 211, 104587.
27. Song, Y., Jiang, T., Nåvik, P., and Rønquist, A., 2021, “Geometry deviation effects of railway catenaries on pantograph–catenary interaction: A case study in Norwegian railway system”, *Railway Engineering Science*, 29(4), pp. 350–361.
28. Song, Y., Rønquist, A., Jiang, T., and Nåvik, P., 2021, “Identification of short-wavelength contact wire irregularities in electrified railway pantograph–catenary system”, *Mechanism and Machine Theory*, 162, 104338.
29. Song, Y., Wang, Z., Liu, Z., and Wang, R., 2021, “A spatial coupling model to study dynamic performance of pantograph-catenary with vehicle-track excitation” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 151, 107336.
30. Bucca, G., and Collina, A., 2015, “Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model”, *Tribology International*, 92, pp. 47-56.
31. Bucca, G., Collina, A., Manigrasso, R., Mapelli, F., and Tarsitano, D., 2011, “Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph–catenary

- interaction”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 225(5), pp. 483-500.
32. Bucca, G., and Collina, A., 2009, “A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system”, *Wear*, 266(1-2), pp. 46-59.
 33. Zhang, Y., Li, C., Pang, X., Song, C., Ni, F., and Zhang, Y., 2021, “Evolution processes of the tribological properties in pantograph/catenary system affected by dynamic contact force during current-carrying sliding”, *Wear*, 477, 203809.
 34. Carnevale, M., Facchinetti, A., Maggiori, L., and Rocchi, D., 2016, “Computational fluid dynamics as a means of assessing the influence of aerodynamic forces on the mean contact force acting on a pantograph”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 230(7), pp. 1698-1713.
 35. Song, Y., Liu, Z., Wang, H., Lu, X., and Zhang, J., 2016, “Nonlinear analysis of wind-induced vibration of high-speed railway catenary and its influence on pantograph–catenary interaction”, *Vehicle System Dynamics*, 54(6), pp. 723-747.
 36. Yao, Y., Zou, D., Zhou, N., Mei, G., Wang, J., and Zhang, W., 2021, “A study on the mechanism of vehicle body vibration affecting the dynamic interaction in the pantograph–catenary system”, *Vehicle System Dynamics*, 59(9), pp. 1335-1354.
 37. Dai, Z., Li, T., Zhou, N., Zhang, J., and Zhang, W., 2021, “Numerical simulation and optimization of aerodynamic uplift force of a high-speed pantograph”, *Railway Engineering Science*, 30, 117-128.
 38. Song, Y., Liu, Z., Duan, F., Lu, X., and Wang, H., 2018, “Study on wind-induced vibration behaviour of railway catenary in spatial stochastic wind field based on nonlinear finite element procedure”, *Journal of Vibration and Acoustics*, 140(1), 011010.
 39. Ding, T., Chen, G.X., Wang, X., Zhu, M.H., Zhang, W.H. and Zhou, W.X., 2011, “Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds”, *Tribology International*, 44(4), pp.437-444.
 40. He, D.H., Manory, R.R. and Grady, N., 1998, “Wear of railway contact wires against current collector materials”, *Wear*, 215(1-2), pp.146-155.
 41. Klapas, D., Benson, F.A., Hackam, R. and Evison, P.R., 1988, “Wear in simulated railway overhead current collection systems”, *Wear*, 126(2), pp.167-190.

42. Kubo, S. and Kato, K., 1998, "Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current", *Wear*, 216(2), pp.172-178.
43. Kubo, S. and Kato, K., 1999, "Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk", *Tribology International*, 32(7), pp.367-378.
44. Yokoyama, N., 2009, "Research and Development Toward Wear Reduction of Current Collecting System", *JR East Technical Review*, (13).
45. Chen, G.X., Yang, H.J., Zhang, W.H., Wang, X., Zhang, S.D. and Zhou, Z.R., 2013, "Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current", *Tribology International*, 61, pp.88-94.
46. Kubota, Y., Nagasaka, S., Miyauchi, T., Yamashita, C. and Kakishima, H., 2013, "Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current", *Wear*, 302(1-2), pp.1492-1498.
47. Gere, J. M., and Weaver, W., 1965, *Analysis of framed structures*, Van Nostrand, New York.
48. Shabana, A. A., 2013, *Dynamics of multibody systems*, 4th Edition, Cambridge university press.
49. Huan, R.H., Pan, G.F. and Zhu, W.Q., 2012, "Dynamics of pantograph-catenary system considering local singularities of contact wire with critical wavelengths", *Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 319-333.
50. Tur, M., García, E., Baeza, L. and Fuenmayor, F.J., 2014, "A 3D absolute nodal coordinate finite element model to compute the initial configuration of a railway catenary", *Engineering Structures*, 71, pp. 234-243.
51. Gerstmayr, J., and Shabana, A. A., 2006, "Analysis of thin beams and cables using the absolute nodal co-ordinate formulation", *Nonlinear Dynamics*, 45(1-2), pp. 109-130.
52. Shabana, A.A., 2018, *Computational Continuum Mechanics*, Third Edition, Wiley & Sons, Chichester, UK.
53. Aboubakr, A.K. and Shabana, A.A., 2015, "Efficient and robust implementation of the TLISMNI method", *Journal of Sound and Vibration*, 353, pp. 220-242.