

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงานรวมของรถไฟฟ้าใต้ดิน
สายเฉลิมรัชมงคลโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมร่วมกับ
อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถ



นายกันตนันท์ สกุดไพศาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**FEASIBILITY STUDY OF ENERGY CONSUMPTION
REDUCTION IN THE BANGKOK MRT BLUE LINE
BY USING OPTIMAL SPEED PROFILE
INTEGRATION WITH ON-BOARD
ENERGY STORAGE DEVICE**

Guntinan Sakulphaisan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

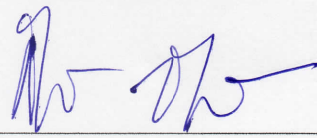
Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงานรวมของรถไฟฟ้าใต้ดิน
สายเฉลิมรัชมงคลโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมร่วมกับ
อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถ

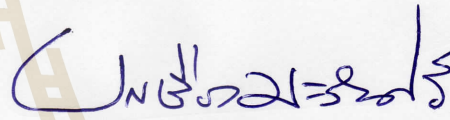
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. กীরติ ชยะกุลศิริ)

ประธานกรรมการ



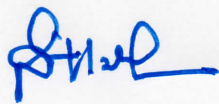
(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. กามณ์ เกิดชื่น)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กัณฑ์ที่ สกฤตไพศาล : การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงานรวมของ
รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมร่วมกับอุปกรณ์เก็บ
พลังงานชนิดติดตั้งบนรถ (FEASIBILITY STUDY OF ENERGY CONSUMPTION
REDUCTION IN THE BANGKOK MRT BLUE LINE BY USING OPTIMAL SPEED
PROFILE INTEGRATION WITH ON-BOARD ENERGY STORAGE DEVICE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 254 หน้า.

ในปัจจุบันพบว่ารถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงและมี
พลังงานสูญเสียเกิดขึ้นขณะที่รถไฟฟ้าเบรกสูง พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากพลังงานที่
เกิดขึ้นจากเบรกของรถไฟฟ้าไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์หรือส่งไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่นได้
ส่งผลให้พลังงานทั้งหมดถูกนำไปแปลงเป็นพลังงานความร้อนโดยตัวต้านทานเบรก ดังนั้นจึงต้องมี
การพัฒนาวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีการออกแบบเส้นโค้งความเร็วร่วมกับ
อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้ามาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เริ่มต้นด้วยการ
ออกแบบเส้นโค้งความเร็วและตำแหน่งชะลอความเร็วด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฟังก์ชัน
เพื่อออกแบบเส้นโค้งความเร็วสำหรับรถไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ไม่เร่งด่วน จากการแก้ไขปัญหาคือ
วิธีการออกแบบเส้นโค้งความเร็วสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 22.71% นอกจากนี้
แล้ว งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าเพื่อ
จำลองเก็บพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืน โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ผล
การจำลองพบว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 49.54% เมื่อ
นำวิธีการทั้งสองวิธีมาใช้งานร่วมกันพบว่า สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน
ได้ถึง 3 ล้านบาทต่อเดือน และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบติดตั้งบนตัวรถชนิดตัวเก็บ
ประจุยิ่งยวด มีระยะเวลาคืนทุน 8.85 ปี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา *Seantinaw. S.P.*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Ontharong*

GUNTINAN SAKULPHAISAN : FEASIBILITY STUDY OF ENERGY
CONSUMPTION REDUCTION IN THE BANGKOK MRT BLUE LINE BY
USING OPTIMAL SPEED PROFILE INTEGRATION WITH ON-BOARD
ENERGY STORAGE DEVICE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 254 PP.

ENERGY CONSUMPTION REDUCTION/OPTIMAL SPEED PROFILE/
ON-BOARD ENERGY STORAGE DEVICE/REGENERATIVE BRAKING
ENERGY/SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE

Nowadays, the Bangkok Metro Rapid Transit (the Bangkok MRT) or the Chalerm Ratchamongkol Line has a high cost of the energy consumption and high energy loss of the regenerative braking. Therefore, the propose of this thesis is to develop a solution to solve the problems by designing the optimal speed profile integrating with the onboard energy storage devices. The study has begun with the designing of the optimal speed profile and the optimal coasting position using the Particle Swarm Optimization method (PSO). The optimal speed profile of the off-peak hours has been redesigned for the Bangkok MRT services. The study result shows that the redesigned optimal speed profile reduces energy consumption by up to 22.71%. Furthermore, this thesis has included the onboard supercapacitor energy storage devices to collect the energy of regenerative braking in the simulation case. The simulation results show that the optimal speed profile integration with onboard supercapacitor energy storage device supports the reduction of energy consumption by up to 49.54%.

Moreover, the energy cost decreases up to 3 million baht/month, and the payback period of the installation cost of onboard energy storage devices is 8.85 years.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature Deentinnam. Snn.

Advisor's Signature กนกนที งามนิตย์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลกลุ่มต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำทั้ง ในด้านการเรียนและการทำงานวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์ อาจารย์ ดร. ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์ และคุณธวัช ชูจิต ที่ช่วยให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระบบรางอย่างดียิ่ง

อาจารย์ ชีรพงษ์ บุญรักษา ที่ช่วยตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

คุณ ปรัชญา ปัตถาวงศ์ สำหรับความรู้ด้านรถไฟฟ้าและข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างระบบ จำลองรถไฟฟ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถวายทอดประสพการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

กันตินันท์ สกุลไพศาล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	4
2 ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์วรรณกรรม	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ประวัติรถไฟฟ้ายานยนต์ในประเทศไทย.....	5
2.3 เส้นทางของรถไฟฟ้ายานยนต์สายเฉลิมรัชมงคล.....	7
2.3.1 ระบบไฟฟ้าของการขนส่งมวลชนแบบระบบราง	10
2.3.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ายานยนต์สายเฉลิมรัชมงคล	15
2.3.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สาม.....	17
2.4 วงจรย้อนกลับของรถไฟฟ้ายานยนต์.....	19
2.5 การป้องกันการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งของรถไฟฟ้ายานยนต์อย่างฉับพลัน	19
2.6 ชุดอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าและระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้ายานยนต์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1	ชุดอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน	21
2.6.2	วงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง	21
2.6.3	ชุดอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน	21
2.6.4	ชุดตัวต้านทานเบรก	22
2.6.5	ชุดอินเวอร์เตอร์.....	23
2.6.6	มอเตอร์จุดลากและชุดเกียร์.....	24
2.6.7	โหมคการทำงานของมอเตอร์	26
2.6.8	ข้อมูลทาลเทคนิคของรถไฟฟ้า	26
2.6.9	การทำงานของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า	27
2.7	ระบบเบรกของรถไฟฟ้า.....	31
2.7.1	การเบรกด้วยระบบลม	31
2.7.2	การเบรกด้วยระบบไฟฟ้า.....	32
2.8	อุปกรณ์เก็บพลังงานในระบบราง	33
2.8.1	อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟ	33
2.8.2	ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	34
2.9	เส้นโค้งความเร็ว	35
2.10	แรงจุดลาก	38
2.10.1	ช่วงแรงจุดลากคงที่.....	38
2.10.2	ช่วงกำลังไฟฟ้าคงที่.....	39
2.10.3	ช่วงการลดลงของสนามแม่เหล็ก.....	39
2.11	ตารางเวลาเดินรถ	39
2.11.1	เวลาในการปล่อยรถออกจากสถานี.....	40
2.11.2	เวลารับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีขนส่งผู้โดยสาร.....	40
2.12	การคำนวณประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า.....	42
2.12.1	แรงต้านทานการวิ่งและแรงต้านทานเนื่องจากทางโค้ง	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.12.2	แรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน.....	50
2.12.3	การคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่..	51
2.12.4	การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้า.....	52
2.13	การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	53
2.14	วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบฟลูงอนุภาค.....	53
2.14.1	อนุภาค.....	53
2.14.2	ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค.....	54
2.14.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	54
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
2.16	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61
2.17	สรุป.....	63
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	64
3.1	กล่าวนำ.....	64
3.2	การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของสายเฉลิมรัชมงคล.....	65
3.3	การจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว.....	67
3.3.1	ชุดคำสั่งคำนวณแรงจุดลากวิกฤต.....	67
3.3.2	ชุดคำสั่งคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในสถานะต่าง ๆ.....	69
3.3.3	ชุดคำสั่งคำนวณแรงจุดลากของรถไฟฟ้า.....	78
3.3.4	ชุดคำสั่งคำนวณความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้า.....	78
3.3.5	ชุดคำสั่งคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานของรถไฟฟ้า.....	81
3.4	การจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวน.....	81
3.4.1	โปรแกรมจับภาพโครงข่าย.....	83
3.5	การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	84
3.5.1	การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า.....	88
3.5.2	แรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	92
3.6	การออกแบบเส้นโค้งความเร็ว.....	93

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.1	การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฟุ้งอนุภาคเพื่อสร้างเส้นโค้ง ความเร็ว.....	94
3.7	อุปกรณ์เก็บพลังงาน	95
3.7.1	MAXWELL 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE.....	95
3.7.2	การประเมินขนาดตัวเก็บประจุยิ่งยวด	97
3.7.3	การจำลองการอัดประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	98
3.7.4	การจำลองการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	99
3.7.5	การประเมินสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน.....	100
3.7.6	การเปลี่ยนพลังงาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรคไปเป็นพลังงานความ ร้อนด้วยอุปกรณ์ตัวต้านทานเบรค.....	100
3.7.7	การประเมินขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบประเมินจากค่าพลังงาน ไฟฟ้าสูงสุดที่ได้กลับคืนจากการเบรค.....	101
3.8	กลยุทธ์การควบคุมการคายประจุแบบอัตราส่วน.....	102
3.9	การคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการ.....	102
3.10	ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	103
3.11	สรุป.....	105
4	ผลการดำเนินการจำลองระบบรถไฟฟ้า.....	106
4.1	กล่าวนำ.....	106
4.2	การจำลองแรงจลนลาภิกฤตและแรงเบรคกิกฤตของรถ ไฟฟ้า.....	106
4.3	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	109
4.3.1	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในกรณีฐาน.....	111
4.3.2	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยใช้เส้น โคงความเร็วที่ออกแบบ ขึ้นมาใหม่	128
4.3.3	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยใช้เส้น โคงความเร็วกรณีฐาน ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน	144

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบ ขึ้นมาใหม่ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน	161
4.3.5	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวนในหนึ่งวัน	176
4.3.6	คำนวณระยะเวลาคืนทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน	183
4.4	สรุป	185
5	บทสรุป	187
5.1	สรุป	187
5.2	ข้อเสนอแนะ	189
	รายการอ้างอิง	190
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	193
	ภาคผนวก ข ชุดคำสั่งที่ใช้ในการจำลอง.....	205
	ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนกับเส้นโค้ง ความเร็วที่ได้จากการจำลอง.....	236
	ประวัติผู้เขียน	254

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับแรงดันของระบบรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850	10
2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้า	27
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
3.1 แรงจลนศาสตร์สูงสุด.....	68
3.2 ค่าความเร็ว V_{c1}	68
3.3 ค่าความเร็ว V_{c2}	69
3.4 ข้อมูลของรถไฟฟ้ารุ่น Modular Metro เมื่อให้บริการแบบ 3 Car unit	70
4.1 ตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารและตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เส้นทางขาขึ้น.....	110
4.2 ตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารและตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เส้นทางขาล่อง.....	111
4.3 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน ในเส้นทางขาขึ้น.....	118
4.4 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน ในเส้นทางขาล่อง	119
4.5 ผลจำลองกับผลที่วัดได้จากการทดลองวิ่ง.....	121
4.6 ข้อมูลที่ได้รับจากการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว.....	129
4.7 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน ในเส้นทางขาขึ้น.....	135
4.8 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน ในเส้นทางขาล่อง	136
4.9 อัตราการใช้พลังงานของเส้นโค้งความเร็วแบบดั้งเดิมกับเส้นโค้งความเร็ว ที่ออกแบบใหม่.....	137
4.10 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาขึ้น	151
4.11 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาล่อง.....	152

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขบวนที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับขบวนที่ไม่ติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน	153
4.13 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาขึ้น	167
4.14 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาออก.....	168
4.15 ผลการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขบวนที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับขบวนที่ไม่ติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน	169
4.16 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าในกรณีที่ใช้เส้น โคนึงความเร็วแบบเดิมและไม่ติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน	183
4.17 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าในกรณีที่ใช้เส้น โคนึงความเร็วที่ออกแบบใหม่และติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน	183
4.18 มูลค่าของพลังงานที่ถูกนำมาประเมินเวลาคืนทุนของโครงการ	184
4.19 ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาคืนทุนของโครงการ.....	184



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	พระราชพิธีเปิดการเดินรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล 6
2.2	เส้นทางการให้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลส่วนแรก 8
2.3	เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลส่วนต่อขยาย 9
2.4	เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์และเปิดให้บริการ .. 9
2.5	การจัดขบวนรถไฟฟ้าแบบสามตู้โดยสาร 10
2.6	ระบบสายส่งเหนือศีรษะของรถรางในประเทศอังกฤษ 12
2.7	ระบบรางที่สี่ 14
2.8	รถไฟฟ้าใต้ดินลอนดอนที่ใช้ระบบรางที่สี่ 14
2.9	ผังแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามหานคร 15
2.10	หม้อแปลงเรียงกระแสที่ใช้ในเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล 16
2.11	วงจรของสถานีไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อน 17
2.12	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สาม 18
2.13	รูปแบบการรับพลังงานไฟฟ้าในระบบรางที่สาม 18
2.14	ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า 20
2.15	วงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง 21
2.16	ชุดตัวต้านทานเบรก 22
2.17	วงจรถดตัวต้านทานเบรก 23
2.18	วงจรถดอินเวอร์เตอร์ 24
2.19	โครงสร้างของมอเตอร์ชุดลาก 25
2.20	มอเตอร์ชุดลาก 26
2.21	ผังการทำงานของระบบขับเคลื่อนในสภาวะปกติที่ทำงานในโหมดขับเคลื่อน 28
2.22	ผังการทำงานของระบบขับเคลื่อนในสภาวะปกติที่ทำงานในโหมดเบรก 29
2.23	ผังการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่ทำงานในโหมดเบรกแบบนำพลังงานกลับ 29
2.24	ผังการทำงานของชุดขับเคลื่อนในโหมดป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินระดับที่หนึ่ง 30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25	ฟังก์ชันการทำงานของชุดขับเคลื่อนขณะทำงานในโหมดป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินระดับที่สอง 31
2.26	ตัวอย่างเส้นโค้งความเร็ว..... 36
2.27	ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า..... 37
2.28	แรงฉุดลากวิกฤตของรถไฟฟ้า..... 39
2.29	ตำแหน่งของระยะห่างของเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้าและเวลารับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานี ขนส่งผู้โดยสาร..... 41
2.30	ตารางเดินรถไฟฟ้า..... 41
2.31	Free body diagram ของรถไฟฟ้า..... 42
2.32	แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานของลูกปืน..... 45
2.33	แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัสของล้อรถกับหน้าสัมผัสของ ราง..... 45
2.34	แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเสียดรูปของรางวิ่ง..... 46
2.35	แนวการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากไถลออก ด้านข้างของรถไฟฟ้า..... 47
2.36	ลักษณะของล้อรถไฟฟ้า..... 47
2.37	การเปรียบเทียบรูปทรงของรถไฟฟ้า..... 48
2.38	แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของสมการเดวี..... 49
2.39	โมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในสภาพรางต่างระดับ..... 50
2.40	ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค..... 56
3.1	ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่..... 66
3.2	ตำแหน่งของความเร็วที่ทำให้มอเตอร์เปลี่ยนช่วงการทำงาน..... 68
3.3	แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของสมการเดวี..... 71
3.4	ความชันของเส้นทางและแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความลาดชันของเส้นทางสาย เฉลิมรัชมงคล..... 73
3.5	รัศมีทางโค้งและแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากทางโค้งของเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล 76
3.6	ความเร็วสูงสุดของเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล..... 77
3.7	แผนผังการทำงานของโปรแกรมคำนวณแรงฉุดลาก..... 79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	เส้น โคง้ความเร็ว..... 80
3.9	ตำแหน่งของรถไฟฟ้า..... 80
3.10	ชุดคำสั่งจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว..... 82
3.11	ตารางเวลาเดินรถไฟฟ้าหลายขบวน..... 83
3.12	โครงสร้างของโปรแกรมจับภาพโครงข่าย..... 84
3.13	ระบบไฟฟ้ากระแสตรงในระบบราง..... 84
3.14	วงจรไฟฟ้าในระบบราง..... 85
3.15	โมเดลสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย..... 86
3.16	โมเดลสายส่ง..... 87
3.17	กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า..... 88
3.18	ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการนิตกระแสไฟฟ้า..... 90
3.19	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพง..... 92
3.20	ตัวเก็บประจุยิ่งยวด..... 96
3.21	ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวด..... 96
3.22	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณการอัดและคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงาน . 101
4.1	แรงดูดลากริกฤตและแรงเบรกกริกฤตในชั่วโมงเร่งด่วน..... 107
4.2	แรงดูดลากริกฤตและแรงเบรกกริกฤตในชั่วโมงไม่เร่งด่วน..... 108
4.3	เส้น โคง้ความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง..... 113
4.4	การเปรียบเทียบเส้น โคง้ความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีหัวลำโพงกับสถานีสามย่าน 114
4.5	เส้น โคง้ความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีสามย่านกับสถานีสีลม..... 115
4.6	เส้น โคง้ความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีสีลมกับสถานีลุมพินี..... 116
4.7	เส้น โคง้ความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีลุมพินีกับสถานีคลองเตย..... 117
4.8	แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย..... 127
4.9	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า..... 128
4.10	เส้น โคง้ความเร็วแบบดั้งเดิมกับเส้น โคง้ความเร็วที่ออกแบบใหม่..... 129
4.11	กำลังไฟฟ้าของเส้น โคง้ความเร็วทั้งสองรูปแบบ..... 130
4.12	ตำแหน่งของรถไฟฟ้าของเส้น โคง้ความเร็วทั้งสองรูปแบบ..... 130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น..... 131
4.14	กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น..... 132
4.15	ตำแหน่งของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น..... 132
4.16	เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาล่อง..... 133
4.17	เส้นกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาล่อง..... 133
4.18	เส้นตำแหน่งของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาล่อง..... 134
4.19	แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย..... 143
4.20	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า..... 144
4.21	กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าขณะที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน..... 145
4.22	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น..... 147
4.23	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาล่อง..... 148
4.24	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้นระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้า..... 149
4.25	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้นระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้าถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ..... 149
4.26	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาล่องระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารบางซื่อถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตร..... 150
4.27	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาล่องระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง..... 150
4.28	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย..... 160
4.29	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า..... 160
4.30	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในเส้นทางขาขึ้น..... 163
4.31	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้นระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้า..... 164
4.32	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้นระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้าถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ..... 164
4.33	กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในเส้นทางขาล่อง..... 165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34	
กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางทดลองระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารบางซื่อถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตร	166
4.35	
กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางทดลองระหว่างสถานี ขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง	166
4.36	
แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย	175
4.37	
แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า	176
4.38	
เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าในการให้บริการหนึ่งวัน	178
4.39	
เส้นโค้งความเร็วในชั่วโมงเร่งด่วนช่วงเช้า	179
4.40	
การเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วในช่วงเช้า	180
4.41	
เส้นโค้งความเร็วช่วงเวลาไม่เร่งด่วน	181
4.42	
การเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วในช่วงเย็น	182

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของประเทศไทยกำลังมีการก่อสร้างเพิ่มเติมให้ครอบคลุมพื้นที่ส่วนต่าง ๆ ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปัจจุบันนี้มีผู้ให้บริการเส้นทางรถไฟฟ้าอยู่ 3 บริษัท ได้แก่ บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด(มหาชน) เป็นผู้ให้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทย โดยรับสัมปทานเป็นผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้า จากการรถไฟฟ้าแห่งประเทศไทย บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด(มหาชน) เป็นผู้ให้บริการรถไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้า และบริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด เป็นผู้ให้บริการรถไฟฟ้าด่วนขนส่งผู้โดยสารไปยังสนามบินสุวรรณภูมิ

รถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทยสร้างขึ้นในปี พ.ศ. 2542 เพื่อแก้ปัญหาความหนาแน่นของการจราจรในกรุงเทพมหานคร โดยสร้างแล้วเสร็จและเปิดให้บริการในปี พ.ศ. 2547 และถูกตั้งชื่อว่า “รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล” หรือ “รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน” ซึ่งเป็นชื่อเรียกที่ถูกกำหนดไว้ในแผนแม่บท รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลมีระยะทางยาว 19.8 km มีสถานีขนส่งผู้โดยสาร 19 สถานีตลอดเส้นทาง โดยจุดปลายของเส้นทางทั้งสองด้านเป็นที่ตั้งของสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงและสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ บางสถานีของรถไฟฟ้าใต้ดินถูกเชื่อมต่อกับรถไฟฟ้าสายอื่น เช่น สถานีขนส่งผู้โดยสารสีลม สถานีขนส่งผู้โดยสารสุขุมวิทและสถานีขนส่งผู้โดยสารจตุจักรถูกเชื่อมต่อเข้ากับรถไฟฟ้าบีทีเอส ในอนาคตเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินจะถูกก่อสร้างเพิ่มเติมให้เชื่อมต่อกับรถไฟฟ้าสายอื่นเช่น การก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าเตาปูนเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลเข้ากับรถไฟฟ้าสายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วง) และเชื่อมต่อกับรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์ที่สถานีขนส่งผู้โดยสารเพชรบุรี ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้ให้บริการขนส่งผู้โดยสารมาเป็นเวลา 10 ปี เทคโนโลยีต่าง ๆ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น เทคโนโลยีด้านวัสดุที่สามารถลดน้ำหนักของรถไฟฟ้า ลดแรงเสียดทานระหว่างล้อรถไฟฟ้ากับรางรับน้ำหนัก เทคโนโลยีด้านการผลิตที่สามารถลดราคาต้นทุนการผลิตรถไฟฟ้าและช่วยลดระยะเวลาในการผลิตและเทคโนโลยีด้านอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บพลังงานและลดพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากรถไฟฟ้าในระบบ

ที่ผ่านมา รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลเป็นรถไฟฟ้าที่มีระบบเบรกแบบนำพลังงานกลับคืน (Regenerative Braking) แต่พลังงานที่เกิดขึ้นได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก เนื่องจากปัญหาด้านตารางเวลาเดินรถและจำนวนรถที่ให้บริการอยู่ในเวลาต่าง ๆ ส่งผลให้พลังงานที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดถูกนำมาแปลงเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดพลังงานสูญเสียขึ้นในระบบ แต่ด้วยเทคโนโลยีอุปกรณ์เก็บพลังงานในปัจจุบัน การติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเข้าไปในระบบรถไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งแบบบนขบวนรถไฟฟ้า (On-Board Energy Storage System : OBESS) หรือติดตั้งตามเส้นทางเดินรถ (Wayside Energy Storage System : WESS) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาด้านพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ ด้วยโครงสร้างของเส้นทางรถไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าย่อยของเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคลที่ถูกก่อสร้างขึ้นมาในอดีตไม่เหมาะสมต่อการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าตามเส้นทางเดินรถ เนื่องจากพื้นที่ภายในอุโมงค์เดินรถไฟฟ้าหรือพื้นที่ในสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ ตามเส้นทางเดินรถไม่เพียงพอ ดังนั้นปัญหาด้านพลังงานสูญเสียจากการเบรกของรถไฟฟ้าจึงสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบติดตั้งบนขบวนรถเท่านั้นและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าได้คืนให้มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด การออกแบบเส้นทางความเร็วของรถไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการปรับเส้นทางความเร็วให้เหมาะสมกับช่วงเวลาต่าง ๆ ในการให้บริการรถไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้พยายามลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าได้คืนด้วยการนำประโยชน์ของการปรับเส้นทางความเร็วให้เหมาะสมแก่การให้บริการในแต่ละช่วงเวลาด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฟลูออเนติก เพื่อสร้างเส้นทางความเร็วสำหรับชั่วโมงไม่เร่งด่วนเป็นวิธีการที่ไม่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ต่อมาเพื่อให้ระบบรถไฟฟ้ามีพลังงานสูญเสียน้อยที่สุด จึงได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า เพื่อกักเก็บพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกและนำไปใช้งานในการเร่งความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่นิยมกันทั่วโลกใช้ในการลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการใช้พลังงานรวมของรถไฟฟ้าได้คืนสายเฉลิมรัชมงคล
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์พลังงานสูญเสียจากการเบรกของรถไฟฟ้าได้คืนขณะให้บริการ
- 1.2.3 เพื่อจำลองหาเส้นทางความเร็วที่เหมาะสม ที่ทำให้การใช้พลังงานรวมในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้คืนน้อยที่สุด
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบและประเมินผลการจำลองกรณีติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานบนรถไฟฟ้าและกรณีไม่มีอุปกรณ์เก็บพลังงานต่อพลังงานรวมที่ใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 จำลองระบบรถไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคลหรือสายสีน้ำเงินเท่านั้น

1.3.2 จำลองด้วยการเดินรถแบบรถไฟฟ้าขบวนเดียวและหลายขบวน

1.3.3 พิจารณาน้ำหนักผู้โดยสาร 2 ประเภท โดยจำแนกออกเป็น น้ำหนักผู้โดยสารในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนซึ่งมีน้ำหนักรวม 160 ตัน (AW3) และชั่วโมงไม่เร่งด่วนมีน้ำหนักรวม 152 ตัน (AW2)

1.3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบของการประหยัดการใช้พลังงานในการเดินทางตลอดสายใน 4 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถไฟฟ้าและไม่ได้คำนวณเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสม (Base Case)

กรณีที่ 2 ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถไฟฟ้าและคำนวณเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสม (Optimal Speed Profile Case)

กรณีที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถไฟฟ้าแบบติดตั้งบนรถไฟฟ้าและไม่คำนวณเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสม (Energy Storage Installation Case)

กรณีที่ 4 ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถไฟฟ้าแบบติดตั้งบนรถไฟฟ้าและคำนวณเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสม (Energy Storage Installation and Optimal Speed Profile Case)

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 พิจารณาเส้นทางเดินรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลที่ให้บริการอยู่เท่านั้น ไม่รวมเส้นทางส่วนต่อขยาย

1.4.2 กำหนดให้สถานีไฟฟ้าย่อยติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งสถานีขนส่งผู้โดยสารขาขึ้น

1.4.3 กำหนดจุดปล่อยรถ ณ เวลาเริ่มต้นของการให้บริการอยู่ที่สถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อและสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง

1.4.4 ไม่คำนึงถึงพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

1.4.5 กำหนดให้รถไฟฟ้าที่ให้บริการตลอดทั้งวันมีจำนวนคงที่ 18 ขบวน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้รับค่าพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าและพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเบรกของรถไฟฟ้า จากการจำลองการเดินรถไฟฟ้าด้วยเส้นโค้งความเร็วแบบต่าง ๆ
- 1.5.2 ได้รับเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิ่งในช่วงเวลาที่ไม่เร่งด่วน
- 1.5.3 ได้ทราบถึงความแตกต่างด้านพลังงานระหว่างระบบที่รถไฟฟ้าติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับระบบที่รถไฟฟ้าไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน
- 1.5.4 ได้รับผลคำนวณระยะเวลาคืนทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานขนาดต่าง ๆ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล เส้นทางที่ให้บริการ ระบบไฟฟ้าของระบบขนส่งมวลชนระบบราง ระบบส่งกำลังไฟฟ้า วงจรย้อนกลับของระบบรถไฟฟ้า กระแสตรง การป้องกันการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่รางวิ่ง ระบบขับเคลื่อนและชุดอุปกรณ์ป้องกันของรถไฟฟ้า อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟ เส้นโค้งความเร็ว ทฤษฎีในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการเคลื่อนที่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรวมถึงการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานเข้ากับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ การสร้างเส้นโค้งความเร็ว การจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว การจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวน การจำลองผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าและรถไฟฟ้า การออกแบบเส้นโค้งความเร็ว การวิเคราะห์การติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การจำลองกรณีฐาน การจำลองการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว การจำลองการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน และการจำลองการให้บริการรถไฟฟ้าตลอดทั้งวัน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงผลการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของโครงการอีกด้วย

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของการทดลองและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก นำเสนอ งานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ ชุดคำสั่งที่ใช้ในการจำลอง และการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วที่จำลองกับเส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางขาขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและปรัทัศนัวรรณกรรม

2.1 บทนำ

การศึกษาการปรับปรุงเส้น โคงงความเร็วของรถไฟไฟฟ้า ร่วมกับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดติดตั้งบนรถไฟไฟฟ้า เพื่อลดการใช้พลังงานรวมและลดพลังงานสูญเสียจากการเบรก เป็นกลยุทธ์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยในปัจจุบันรถไฟไฟฟ้าได้คืนสายเฉลิมรัชมงคลให้บริการด้วยเส้น โคงงความเร็วแบบเดียวในชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงไม่เร่งด่วน ซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าสูง รวมถึงด้วยปัญหาทางด้านตารางเดินรถและปริมาณรถที่วิ่งในแต่ละช่วงเวลาไม่เพียงพอ จึงทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกไม่สามารถส่งไปยังรถไฟอีกขบวนที่ต้องการใช้ไฟฟ้าได้ จึงส่งผลให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก 90 % นั้นถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและเป่าทิ้งไปในอากาศ ดังนั้นในบทนี้ได้รวบรวมข้อมูลจากหนังสือเรียน เอกสารตีพิมพ์ และงานวิจัยในอดีต เพื่อที่แสดงในบทนี้ได้ถูกจำแนกออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของรถไฟไฟฟ้าในประเทศไทย ข้อมูลทางเทคนิคของระบบรถไฟไฟฟ้า และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ของรถไฟไฟฟ้า

2.2 ประวัติรถไฟไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

รถไฟไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลหรือรถไฟฟ้ามหานคร หรือประชาชนนิยมเรียกว่า “รถไฟฟ้้าใต้ดิน” เนื่องมาจากช่วงเริ่มแรกให้บริการรถไฟฟ้้าเส้นนี้ เส้นทางเป็นระบบใต้ดินแห่งแรกของประเทศไทย ดำเนินการโดย บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ซึ่งได้รับสัมปทานจาก การรถไฟฟ้้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย เริ่มก่อสร้างในปี พ.ศ. 2542 และหลังจากที่เกิดความล่าช้าขึ้นหลายครั้ง ในที่สุดได้เปิดให้สาธารณชนทดลองใช้งานในวงจำกัดเมื่อวันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2547 และมีพิธีเปิดอย่างเป็นทางการในวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2547 โดย พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช พร้อมด้วยสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถและสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารีได้เสด็จพระราชดำเนินทรงเปิดการเดินทางโครงการรถไฟฟ้้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคลดังรูปที่ 2.1 สำหรับชื่อ “เฉลิมรัชมงคล” เป็นชื่อที่ พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช ทรงพระกรุณาโปรด

เกล้าฯ พระราชทานเพื่อเป็นชื่ออย่างเป็นทางการของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร ระยะแรก มีความหมายว่า “งานเฉลิมความเป็นมงคลแห่งความเป็นพระราชา”



(ก)



(ข)

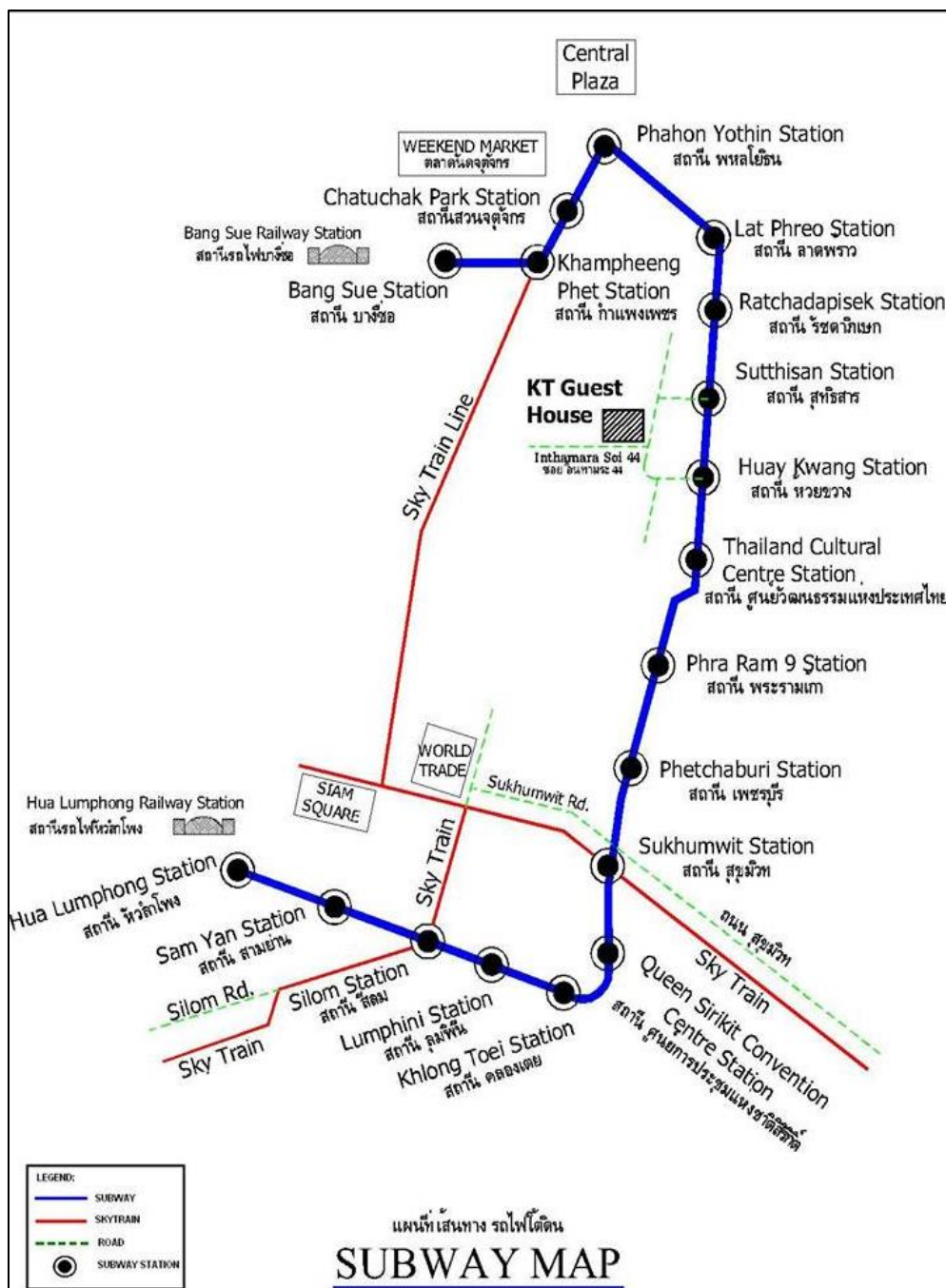
รูปที่ 2.1 พิธีเปิดการเดินทางรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล

ที่มา: <https://www.posttoday.com/social/general/462709> (เข้าถึงเมื่อ 12/12/2561)

ปัจจุบัน เส้นทางสายสีน้ำเงินมีโครงการก่อสร้างส่วนต่อขยายทั้งเส้นทางใต้ดินและยกระดับ จากปลายทางด้านทิศเหนือ สถานีเตาปูน ไปยังถนนจรัญสนิทวงศ์ และแยกท่าพระ และจาก ปลายทางด้านทิศใต้ สถานีหัวลำโพง ไปยังท่าพระและบางแค ซึ่งทั้ง 2 เส้นทางจะเชื่อมต่อกัน ที่ สถานีท่าพระ ก่อให้เกิดเป็นเส้นทางรถไฟฟ้าวงแหวน โดยโครงการได้มีการเปิดให้บริการอย่างเป็นทางการในช่วงบางซื่อถึงเตาปูน เมื่อวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2560 และจะเปิดบริการต่อไปในช่วง หัวลำโพงถึงหลักสอง ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2562 และช่วงเตาปูนถึงท่าพระ ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2563 ตามลำดับ

2.3 เส้นทางของรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

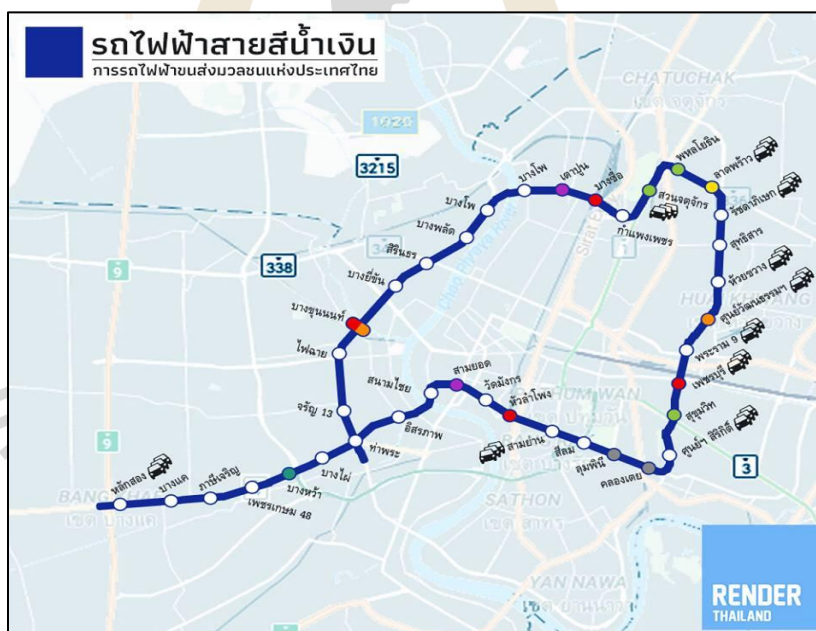
บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) เป็นผู้ที่ได้รับสัมปทานให้บริการ รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ในตอนเริ่มต้นของโครงการเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคลมีระยะทาง รวมเพียง 19.6 km ประกอบด้วย 18 สถานีขนส่งผู้โดยสาร 12 สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหรือแบ่งออกเป็น 10 ส่วนย่อย เส้นทางการเดินทางรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลแสดงในรูปที่ 2.2 ต่อมาโครงการรถไฟฟ้า ได้สร้างเส้นทางรถไฟฟ้ายกระดับ ซึ่งมีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า รถไฟฟ้าสาย “ฉลองรัชธรรม” หรือ “สายสีม่วง” ตามแผนแม่บท ด้วยรูปแบบของโครงสร้างของสถานีรถไฟฟ้าที่มีลักษณะต่างกัน และจุดสิ้นสุดของเส้นทางเดินทางรถไฟฟ้าทั้งสองเส้นทางไม่บรรจบกัน จึงทำให้ในปัจจุบันจำเป็นต้อง ก่อสร้างเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายขึ้นมาเพื่อเชื่อมต่อเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายสี น้ำเงินที่ถูกสร้างขึ้นในตอนต้นของโครงการเข้ากับเส้นทางรถไฟฟ้าสายสีม่วงที่เป็นทางยกระดับเข้า ด้วยกัน โดยเส้นทางของรถไฟฟ้าใต้ดินส่วนต่อขยายแสดงดังรูปที่ 2.3 และเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ เส้นทางเดินทางรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลจะมีระยะทางรวม 47 km และมีสถานีขนส่งผู้โดยสาร 38 สถานีดังแสดงในรูปที่ 2.4 โมเดลรถไฟฟ้าที่นำมาให้บริการคือรุ่น Modular Metro ผลิตโดยบริษัท Siemens Co. Ltd ประเทศเยอรมนี สำหรับการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าที่จำลองในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาขบวนรถไฟฟ้าแบบสามตู้โดยสาร (3 Car unit) จัดเรียงแบบ A-C-A โดย A คือ หัวรถลาก และบรรทุกผู้โดยสาร และ C คือ ตู้บรรทุกผู้โดยสาร ดังแสดงในรูปที่ 2.5



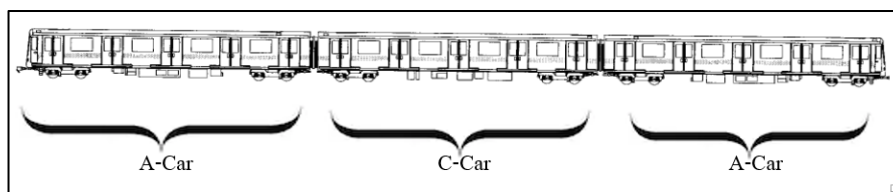
รูปที่ 2.2 เส้นทางให้บริการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลส่วนแรก
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)



รูปที่ 2.3 เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลส่วนต่อขยาย
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)



รูปที่ 2.4 เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์และเปิด
ให้บริการในอนาคต
(ที่มา: <https://www.renderthailand.com/3d-from-project-owner/> (เข้าถึงเมื่อ 12/12/2561))



รูปที่ 2.5 การจัดขบวนรถไฟฟ้าแบบสามตู้โดยสาร
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.3.1 ระบบไฟฟ้าของการขนส่งมวลชนแบบระบบราง

ระบบไฟฟ้าของการขนส่งมวลชนระบบรางสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ ระดับแรงดันไฟฟ้า รูปแบบกระแสไฟฟ้าและระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยการเลือกใช้ระบบไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดหาพลังงาน รูปแบบของเส้นทางเดินรถ การบำรุงรักษาและเงินลงทุน

1.) ระดับของแรงดันไฟฟ้า

ระดับแรงดันที่นิยมใช้มากที่สุดตามมาตรฐานยุโรปและมาตรฐานสากล มีอยู่ 6 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันของระบบรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850

ระบบไฟฟ้า	แรงดัน (V)				
	แรงดันต่ำสุด ไม่ถาวร	แรงดันต่ำสุด ถาวร	แรงดันปกติ	แรงดันสูงสุด ถาวร	แรงดันสูงสุด ไม่ถาวร
600 V _{DC}	400	400	600	720	800
750 V _{DC}	500	500	750	900	1,000
1,500 V _{DC}	1,000	1,000	1,500	1,800	1,950
3 kV _{DC}	2,000	2,000	3,000	3,600	3,900
15 kV _{AC} , 16.7 Hz	11,000	12,000	15,000	17,250	18,000
25 kV _{AC} , 50 Hz และ 60 Hz	17,500	19,000	25,000	27,500	29,000

2.) รูปแบบของกระแสไฟฟ้า

ก. ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานในระดับแรงดันสูงและถูกนำมาใช้ในระบบราง ส่งผลให้ในยุคนั้น ประสิทธิภาพของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้กับระบบขนส่งมวลชนระบบรางแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสูงกว่าระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งรูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง มี 2 รูปแบบได้แก่ ระบบสายส่งเหนือศีรษะ และระบบรางที่สาม ในระบบสายส่งเหนือศีรษะถูกใช้กับระบบที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 600 V_{DC} ถึง 1.5 kV_{DC} โดยมีระบบรถไฟไฟฟ้าในหลายประเทศที่ยังใช้ระบบนี้อยู่ อาทิเช่น รถรางในเมืองนอตติงแฮมที่ประเทศอังกฤษ ใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสายส่งเหนือศีรษะด้วยระดับแรงดัน 750 V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 2.6 รถไฟฟ้าในประเทศ อินโดนีเซียและญี่ปุ่น ใช้ระบบสายส่งเหนือศีรษะกับระดับแรงดันไฟฟ้า 1.5 kV_{DC} หรือ ประเทศกลุ่มอดีตสหภาพโซเวียต เช่น เบลเยียม อิตาลี สเปน โปแลนด์ สโลวาเกีย สโลวีเนีย ใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะกับระดับแรงดันไฟฟ้า 3 kV_{DC} เป็นต้น ระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สามถูกใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 600 V_{DC} ถึง 1.5 kV_{DC} เหมือนกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสายส่งเหนือศีรษะ แต่ระบบนี้จำเป็นต้องใช้ในระบบปิด เช่น เส้นทางรถไฟยกกระดานหรือเส้นทางรถไฟใต้ดิน เนื่องจากมีความอันตรายสูงกว่าแบบสายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะ โดยเส้นทางรถไฟที่ใช้ระบบรางที่สาม ได้แก่ รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 750 V_{DC} ในการป้อนให้รถไฟฟ้าด้วยรางที่สาม หรือในระดับแรงดันที่สูงขึ้น ได้แก่ รถไฟฟ้าสายเงินเงิน ในประเทศจีนที่ส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สามในระดับแรงดัน 1.5 kV_{DC} เป็นต้น

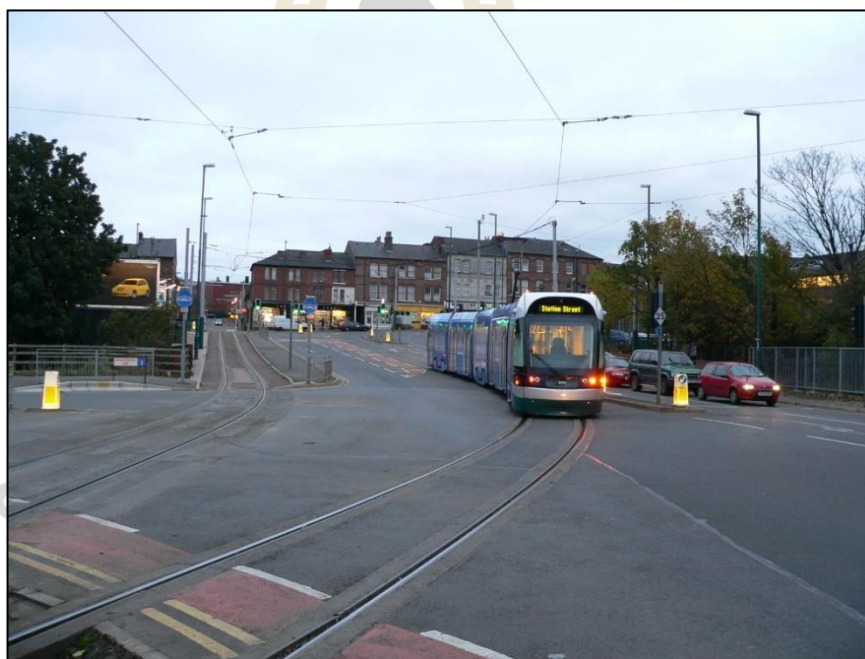
ข. ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามารถใช้ได้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสายส่งเหนือศีรษะเท่านั้น โดยการส่งกำลังไฟฟ้าจะต้องส่งด้วยแรงดันสูงเพื่อลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่ง ดังนั้นจึงต้องคิดตั้งหม้อแปลงกำลังไว้ที่หัวรถจักรเพื่อปรับลดแรงดันให้เหมาะสมกับมอเตอร์รถของรถไฟขบวนนั้น ๆ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหลักที่ใช้ในระบบราง มีอยู่ 2 ระบบได้แก่ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ และระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหลายเฟส

ในระยะแรก ไฟฟ้ากระแสสลับถูกนำมาใช้งานกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอุปกรณ์สลับทิศทางหมุนเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟ แต่อย่างไรก็ตามการเหนี่ยวนำของขดลวดในมอเตอร์ที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงทำให้เกิดกระแสไหลวนเป็นต้นเหตุให้เกิดความร้อนสูงในมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำจึงถูกสร้าง

ขึ้นมา โดยได้รับความร่วมมือจากกลุ่มประเทศในยุโรปจำนวน 5 ประเทศ ได้แก่ เยอรมนี ออสเตรีย สวิตเซอร์แลนด์ นอร์เวย์และสวีเดน ได้ร่วมกันสร้างมาตรฐานแรงดันไฟฟ้าที่ 15kV 16 2/3 Hz เฟสเดียว เพื่อแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มต้นใช้แรงดันไฟฟ้า 11 kV 25 Hz กับระบบรางเนื่องจากเป็นระบบความถี่เก่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมในยุคนั้น และถูกปรับเปลี่ยนความถี่เป็น 50 หรือ 60 Hz ในช่วงท้ายของศตวรรษที่ 20

ในตอนต้นของศตวรรษที่ 20 อิตาลีได้เริ่มใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เพื่อรองรับรถไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมา แต่ยังคงใช้เป็นระบบความถี่ต่ำ ในระดับแรงดันไฟฟ้า 3 kV ถึง 3.6 kV ที่ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเหนือศีรษะ ต่อมาในปี 1950 ในช่วงการพัฒนาฝรั่งเศสได้มีการกำหนดมาตรฐานความถี่กระแสสลับที่ความถี่ 50-60 Hz และถูกใช้อย่างแพร่หลาย เช่น รถไฟฟ้าในประเทศบราซิล สวิตเซอร์แลนด์และฝรั่งเศสได้ใช้แรงดันไฟฟ้า 750 V ถึง 3 kV 50 Hz ในการให้บริการในเส้นทางขึ้นเขา



รูปที่ 2.6 ระบบสายส่งเหนือศีรษะของรถรางในประเทศไทย

ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Railway_electrification_system#/media/File:NET_tram_201-03.jpg
(เข้าถึงเมื่อ 21/3/2562)

1.) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

รูปแบบของการส่งกำลังไฟฟ้าสามารถจำแนกได้ 3 ระบบได้แก่ ระบบสายส่งเหนือศีรษะ ระบบรางที่สาม และระบบรางที่สี่

ก. ระบบสายส่งเหนือศีรษะ

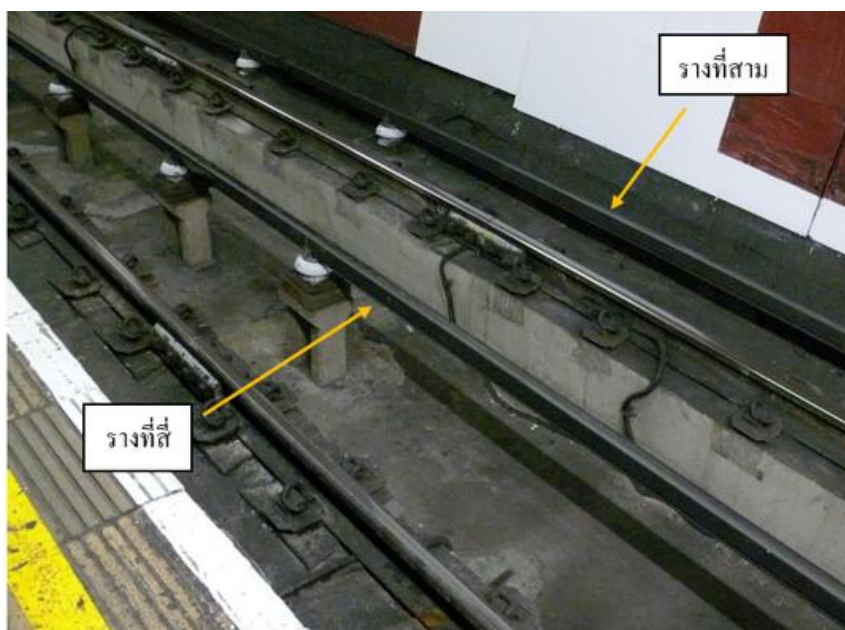
ระบบสายส่งเหนือศีรษะเป็นระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแก่ทางรถไฟไฟฟ้าประเภทหนึ่งประกอบไปด้วย สายตัวนำเปลือยที่ถูกติดตั้งไว้กับลูกถ้วยฉนวนและนำไปยึดไว้ที่เสาไฟฟ้า หัวรถจักรไฟฟ้าจะรับพลังงานไฟฟ้าได้จาก สาลี (Pantograph) ที่ติดตั้งไว้บนหลังคาของหัวรถจักร โดยระบบนี้สามารถใช้ได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่นิยมใช้งานได้แก่ ระดับแรงดันไฟฟ้า 1500 V_{DC} ที่ถูกใช้ในประเทศ ญี่ปุ่น อินโดนีเซียและฮ่องกง

ข. ระบบรางที่สาม

ระบบรางที่สามหมายถึงการส่งกำลังไฟฟ้าให้กับหัวรถจักรไฟฟ้าโดยการติดตั้งรางตัวนำขนานกับรางวิ่งของรถไฟไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถใช้งานกับรางที่สามอยู่ที่ 750 V ถึง 1.5 kV ด้วยรูปแบบของการติดตั้งและระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูง ระบบนี้จึงมีความอันตรายสูง ดังนั้นตำแหน่งที่ติดตั้งต้องเข้าถึงได้ยาก ส่งผลให้ระบบที่นิยมใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบรางที่สามจึงนิยมใช้กับเส้นทางยกระดับหรือเส้นทางใต้ดิน เป็นต้น ข้อดีของระบบรางที่สามคือ มีต้นทุนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบสายส่งเหนือศีรษะ และไม่บังคับทัศนียภาพและข้อเสียของระบบนี้คือ เป็นระบบที่อันตรายเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าสูง

ค. ระบบรางที่สี่

เป็นรางตัวนำที่ใช้สำหรับเป็นเส้นทางย้อนกลับของกระแสเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร รางที่สี่ถูกใช้ในกรณีที่ล้อของรถไฟไฟฟ้าถูกหุ้มด้วยยางหรือกระแสไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าไม่สามารถไหลย้อนกลับโดยผ่านรางวิ่งได้ รางที่สี่ถูกติดตั้งระหว่างรางวิ่งทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่ในบางแห่งรางที่สี่ถูกใช้เป็นตัวนำส่งกระแสไฟฟ้าลักษณะเดียวกันกับรางที่สาม เช่น รถไฟฟ้าใต้ดินลอนดอนในประเทศอังกฤษดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 630 V โดยใช้รางที่สามป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 420 V และใช้รางที่สี่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -210 V เมื่อรวมกันแล้วจะได้ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าเป็น 630 V_{DC} ตามที่ระบบรถไฟไฟฟ้าต้องการและใช้รางวิ่งของรถไฟไฟฟ้าเป็นตัวนำย้อนกลับเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร นอกจากการใช้ระบบรางที่สี่ยังถูกนำมาใช้กับระบบโมโนเรล ระดับแรงดัน 100 V_{DC} แม้ว่าเชื่อว่า โมโนเรล แต่ล้อของรถรางเป็นล้อยาง ซึ่งเป็นฉนวนทางไฟฟ้าจึงส่งผลให้รางวิ่งของโมโนเรลไม่สามารถเป็นตัวนำย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงแก้ไขปัญหานี้โดยการติดตั้งรางที่สี่เข้าไปในระบบเพื่อเป็นตัวนำย้อนกลับ



รูปที่ 2.7 ระบบรางที่สี่

ที่มา: <https://photobucket.com/gallery/user/msibnsf/media/cGF0aDovVW5kZXJncm91bmRTdWJ3YXlUcmFjay5qcGc=?ref=> (เข้าถึงเมื่อ 22/03/2562)



รูปที่ 2.8 รถไฟฟ้าใต้ดินลอนดอนที่ใช้ระบบรางที่สี่

ที่มา: <https://www.alamyimages.fr/photos-images/london-tube-trains.html> (เข้าถึงเมื่อ 22/03/2562)

2.3.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้รับจาก สถานีไฟฟ้าไฟฟ้าย่อยระดับแรงดัน 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวงที่ได้แก่ สถานีไฟฟ้าย่อยบางกะปิและสถานีไฟฟ้าย่อยรัชดาภิเษก ส่งกำลังไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าหลัก (Bulk Substation: BSS) ของรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ต่อมาสถานีไฟฟ้าหลักของรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลจะลดแรงดันไฟฟ้าลงเหลือแรงดัน 24 kV_{AC} เพื่อป้อนให้กับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยของส่วนบริการ (Service Substation: SSS) สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยของระบบขับเคลื่อน (Traction Substation: TSS) และป้อนให้กับระบบสำรองไฟ สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยของส่วนบริการมีหน้าที่ป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสิ่งอำนวยความสะดวกของสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ซึ่งได้แก่ ระบบแสงสว่าง ระบบระบายอากาศ ระบบสื่อสาร เป็นต้น โดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าในการปรับลดแรงดันจาก 24 kV_{AC} เหลือ 416 V_{AC} และสุดท้าย สถานีไฟฟ้าย่อยของระบบขับเคลื่อนมีหน้าที่จะแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 24 kV ลดลงเหลือ 750 V_{DC} โดยใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าในการลดระดับแรงดันจาก 24 kV_{AC} เหลือ 416 V_{AC} และนำมาป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 416 V_{AC} เป็น 750 V_{DC} เพื่อป้อนให้กับระบบรางที่สาม โดยโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงดังรูปที่ 2.9



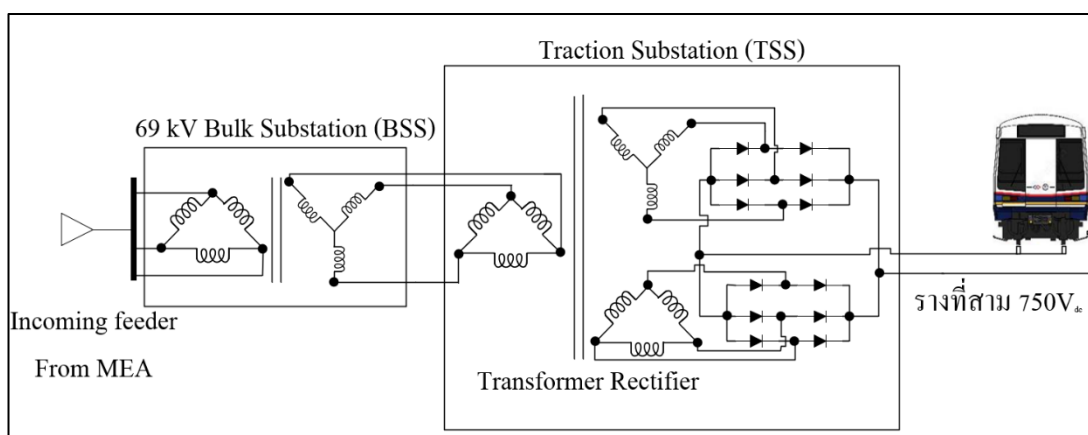
รูปที่ 2.9 ผังแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามหานคร

หม้อแปลงเรียงกระแส(Transformer Rectifier Unit:TRU) เป็นการรวมหม้อแปลง และวงจรเรียงกระแสอยู่ในอุปกรณ์ชิ้นเดียว โดยทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแปลงให้อยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หม้อแปลงเรียงกระแสถูกนำไปใช้งานได้หลายแบบ อาทิเช่น ใช้ในอุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ของรถยนต์ ใช้ระบบ Auxiliary Power Unit (APU) ของเครื่องบินโดยสาร หรือถูกใช้ในระบบขนส่งมวลชน เป็นต้น

หม้อแปลงเรียงกระแสชนิด 12 พัลส์ (12 Pulses Transformer Rectifier) นิยมใช้ใน ระบบขนส่งมวลชนอย่างแพร่หลาย วงจรของหม้อแปลงเรียงกระแสชนิดนี้สร้างขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการสวิตช์ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ชุดอุปกรณ์หม้อแปลงเรียงกระแสที่ใช้ในเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคลและวงจรของสถานีไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11 ตามลำดับ ประกอบด้วย ชุดวงจรเรียงกระแสแบบแบบบริดจ์ 6 พัลส์ จำนวน 2 ชุด ที่เชื่อมต่อกันแบบขนาน โดยให้ชุดวงจรเรียงกระแสชุดแรกเชื่อมต่อกับหม้อแปลงแบบ สตาร์-สตาร์ และชุดวงจรเรียงกระแสอีกชุดเชื่อมต่อกับหม้อแปลงอีกเครื่องที่เชื่อมต่อกับขดลวดภายใน แบบ เดลต้า-สตาร์ จึงทำให้รูปคลื่นของแรงดันด้านขาออกเกิดการเลื่อนเฟส 30 องศา



รูปที่ 2.10 หม้อแปลงเรียงกระแสที่ใช้ในเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล



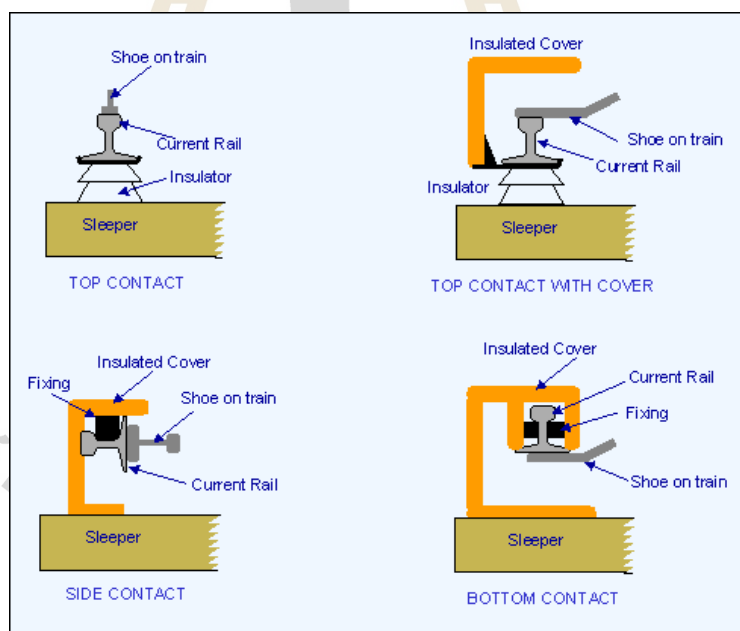
รูปที่ 2.11 วงจรของสถานีไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อน

2.3.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สาม

รางที่สามเป็นวิธีการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังหัวรถจักรไฟฟ้าหรือรถไฟฟ้าชนิดที่ใช้กับระบบขนส่งมวลชนที่มีเส้นทางให้บริการแยกออกจากเส้นทางของพาหนะชนิดอื่น ระบบรางที่สามเป็นการติดตั้งรางตัวนำขนานกับรางวิ่งของรถไฟฟ้าตลอดเส้นทาง มีหน้าที่ส่งกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าตลอดเส้นทาง โดยที่รถไฟฟ้ารับพลังงานผ่าน แหนบรับไฟ (Collector Shoe) ที่ติดตั้งตลอดขบวนรถไฟฟ้า ข้อจำกัดของการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สามคือ ความปลอดภัย เนื่องจากเป็นตัวนำที่ถูกลวงขนานไปกับรางรับน้ำหนักระบบนี้จึงเหมาะสมกับเส้นทางที่เป็นอุโมงค์ใต้ดินหรือเส้นทางยกระดับ และข้อจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้า ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำทำให้มีข้อจำกัดด้านระยะการส่งพลังงานไฟฟ้า ถ้าหากส่งในระยะไกลอาจทำให้เกิดแรงดันตกเป็นผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ของรถไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยจำนวนมากในเส้นทางเดินรถ และเพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสเข้ากับรางส่งกำลังไฟฟ้า รูปแบบการติดตั้งและรูปแบบการติดตั้งฉนวนป้องกันของรางที่สามแสดงในรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สาม
(ที่มา : <https://board.postjung.com/915446> (เข้าถึงเมื่อ 3/6/2561))



รูปที่ 2.13 รูปแบบการรับพลังงานไฟฟ้าในระบบรางที่สาม
(ที่มา : https://oer.learn.in.th/search_detail/result/11655 (เข้าถึงเมื่อ 3/6/2561))

2.4 วงจรย้อนกลับของรถไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรรนำกระแสย้อนกลับของรถไฟฟ้าที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกคือการใช้รางวิ่งของรถไฟฟ้าเป็นตัวนำย้อนกลับ เนื่องจากเป็นตัวนำที่วางตลอดเส้นทางทำให้บริการของรถไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรางรับน้ำหนักรับในปริมาณมาก จะทำให้เกิดแรงดันระหว่างรางรับน้ำหนักรับและระบบสายดิน ซึ่งแรงดันที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงดันที่รางวิ่ง(Rail Potential) โดยทั่วไปตัวนำย้อนกลับของรถไฟฟ้าจะไม่เชื่อมต่อเข้ากับระบบสายดินด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัยและค่าความต้านทานของรางวิ่งจะต้องมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นการเชื่อมต่อของรางรับน้ำหนักรับของรถไฟฟ้าจึงนิยมใช้การเชื่อมเพื่อให้ผิวสัมผัสเป็นผิวเดียวกันและมีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า การลดค่าความต้านทานต่อความยาวของรางตัวนำย้อนกลับสามารถทำได้โดยการนำตัวนำมาต่อขนานรางรับน้ำหนักรับทั้งสองด้านเข้าด้วยกัน

แรงดันที่รางรับน้ำหนักรับของรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างรางรับน้ำหนักรับกับกราวด์เสมือนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรถไฟฟ้าจะถูกส่งมายังรางรับน้ำหนักรับซึ่งรางรับน้ำหนักรับมีความต้านทานจึงส่งผลให้เกิดแรงดันตกขึ้นที่ราง โดยทั่วไปช่วงที่รถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งความเร็วจะมีการป้อนกระแสไฟฟ้าจำนวนมากให้แก่รถไฟฟ้าส่งผลให้เกิดแรงดันที่รางรับน้ำหนักรับสูงสุด

2.5 การป้องกันการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งของรถไฟฟ้าอย่างฉับพลัน

อุบัติเหตุทางไฟฟ้านั้นสามารถเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อเกิดแล้วอาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตผู้โดยสารหรือเกิดความเสียหายในระบบรถไฟฟ้าอาจนำไปสู่การหยุดให้บริการเพื่อซ่อมบำรุงและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าหรือการเกิดแรงดันที่รางวิ่งที่สูงเกินกำหนดเนื่องจากการจราจรหนาแน่น เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีระบบป้องกัน อาทิเช่น รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของชุดหม้อแปลงเรียงกระแส ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า หรือ อุปกรณ์จำกัดระดับแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์จำกัดระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นหลักเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้โดยสารที่เดินทางด้วยรถไฟฟ้า

อุปกรณ์จำกัดระดับแรงดันไฟฟ้า(Voltage Limiting Device: VLD) ทำหน้าที่ตรวจวัดแรงดันที่รางวิ่งเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันสูงเกินค่าที่กำหนดไว้ ถ้าอุปกรณ์ตรวจพบการเกิดแรงดันที่รางวิ่งมีค่าสูงเกินค่าที่กำหนด อุปกรณ์จะทำหน้าที่ตัดวงจรตัวนำย้อนกลับหรือรางวิ่งเข้ากับระบบสายดินของระบบเพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์ แต่ต้องแลกมาด้วยกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็วและส่งผลให้เกิดการกักความร้อนของโลหะภายในระบบรถไฟฟ้า ซึ่งเหตุการณ์แบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในทุก ๆ วัน ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนมีสาเหตุมาจากการที่รถไฟฟ้าหลาย ๆ ขบวนที่อยู่บนแทร็ก

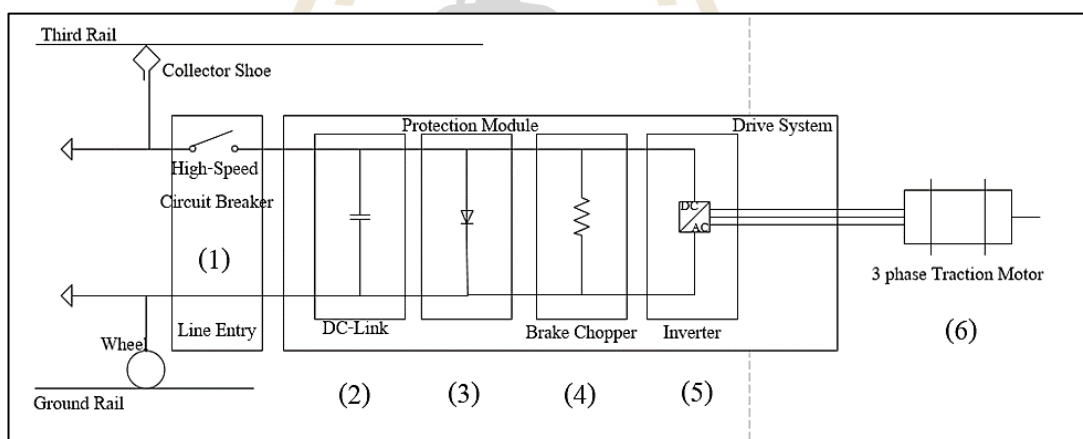
ชั้นเดียวกันออกตัวพร้อม ๆ กัน ทำให้กระแสขับเคลื่อนในรางวิ่งมีค่าสูงอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้แรงดันที่รางวิ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกัน

2.6 ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าและชุดอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

ชุดอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าและระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าเป็นหัวใจสำคัญของรถไฟฟ้าที่ทำให้รถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดต่าง ๆ ของเส้นทางได้อย่างรวดเร็วและมีความปลอดภัย โดยชุดอุปกรณ์เหล่านี้ถูกติดตั้งจำนวน 2 ชุดต่อ 1 A-Car ซึ่งประกอบด้วย

- 1.) ชุดอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (High-Speed Circuit Breaker)
- 2.) วงจรเชื่อมต่อทางระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Link)
- 3.) ชุดอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (Protection Module)
- 4.) ชุดตัวต้านทานเบรก (Brake Chopper)
- 5.) ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
- 6.) มอเตอร์ชุดลาก (Traction Motor)

แผนภาพของชุดอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าและระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

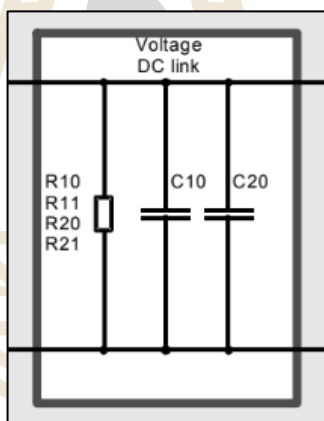
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.6.1 ชุดอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินถูกติดตั้งอยู่ที่ ส่วนรับไฟฟ้าเข้า (Line entry) ตามรูปที่ 2.14 ถูกใช้ในการป้องกันกระแสเกินที่เกิดจากการลัดวงจรหรือป้องกันการการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างฉับพลัน

2.6.2 วงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ถูกใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับแรงดันหรือทำหน้าที่เป็นวงจรคงค่าแรงดัน (Regulator Circuit) และลดความผันผวนของแรงดันไฟฟ้า ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โดยวงจรชนิดนี้มีหน้าที่เพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าคงที่ และทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ เป็นต้น โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานดังแสดงใน รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง

(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.6.3 ชุดอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ

1.) ระดับปกติ

เมื่อแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูงกว่า 900 V ชุดอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินจะเชื่อมต่อวงจรถูกเข้ากับชุดตัวต้านทานเบรก ที่มีหน้าที่ปรับแรงดันโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และเผาทิ้งไปในอากาศ โดยทั่วไปจะทำงานเพียง 12 วินาที และปลดวงจรให้ระบายความร้อนเป็นเวลา 72 วินาที

2.) ระดับการป้องกันขั้นที่หนึ่ง

เป็นการป้องกันระดับแรงดันที่มีค่าสูงกว่า 900 V โดยวงจรป้องกันแรงดันเกิน จะถูกต่อเข้ากับชุดตัวต้านทานเบรกอย่างถาวรเพื่อรักษาระดับแรงดัน

3.) ระดับการป้องกันขั้นที่สอง

เมื่ออุปกรณ์สามารถตรวจจับแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่า 1,200 V ไทริสเตอร์และ ไดโอดที่เป็นส่วนหนึ่งของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์จะถูกลัดวงจรเพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ตรวจพบการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างฉับพลันทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงานและเปิด วงจรออกโดยอัตโนมัติ หลังจากการลัดวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งผลให้ชุดระบบขับเคลื่อน ชุดนั้นไม่สามารถใช้งานได้จนกว่าจะเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อุปกรณ์ที่ลัดวงจร

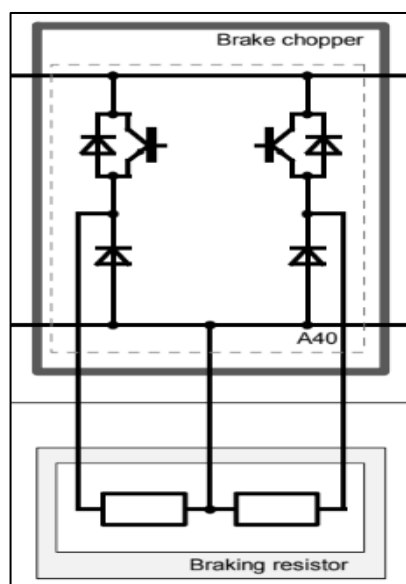
2.6.4 ชุดตัวต้านทานเบรก

ชุดตัวต้านทานเบรกทำหน้าที่กำจัดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นขณะที่รถไฟฟ้าเบรก การ เบรกของรถไฟฟ้า มอเตอร์ชุดลากจะเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าป้อน ออกจากมอเตอร์ไฟฟ้า ถ้าหากพลังงานที่เกิดขึ้นมีแรงดันไม่เกินพิกัดที่อุปกรณ์กำหนดไว้พลังงานจะ ถูกป้อนกลับไปยังระบบ แต่ถ้าหากพลังงานมีแรงดันเกินพิกัดที่กำหนดไว้แรงดันส่วนที่เกินจะถูก นำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยการกำจัดพลังงานส่วนที่เกินเกิดขึ้นจากการสวิตช์ของ ไอจีบีที โครงสร้างของชุดตัวต้านทานเบรกประกอบขึ้นจาก ชุดตัวนำที่มีค่าความต้านทานและจุด หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ตัวโครงที่บรรจุชุดตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานจะถูกออกแบบให้ อากาศไหลผ่านได้ง่าย เนื่องจากขณะที่อุปกรณ์ทำงานจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชุด ตัวนำ ในขณะที่รถไฟฟ้าวิ่งอากาศจะไหลผ่านช่องต่าง ๆ ของ โครงสร้างเพื่อนำระบายความร้อนที่ เกิดขึ้นและป้องกันการหลอมละลาย โดยชุดตัวต้านทานเบรกและวงจรควบคุมชุดตัวต้านทานเบรก แสดงดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ชุดตัวต้านทานเบรก

ที่มา <https://www.railway-technology.com/wp-content/uploads/sites/24/2017/10/1-braking-resistor.jpg> (เข้าถึงเมื่อ 25/6/2561)



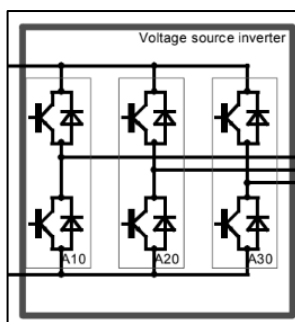
รูปที่ 2.17 วงจรชุดตัวต้านทานเบรก

(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.6.5 ชุดอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับรถไฟฟ้าในรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเป็นระบบ 3 เฟสที่สามารถปรับความถี่และระดับแรงดันทางด้านขาออกได้ เพื่อใช้สำหรับปรับความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ถูดลากได้อย่างต่อเนื่อง โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ แบ่งออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ โหมดขับเคลื่อนและโหมดเบรก ดังวงจรอินเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.18

การใช้งานทั้ง 2 โหมดมีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง โดย IGBT ที่เป็นส่วนประกอบหลักของชุดอินเวอร์เตอร์สามารถสวิตช์ได้ในความถี่สูง จึงทำให้สามารถปรับระดับแรงดันที่ด้านเอาพุตที่ได้อย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของมอเตอร์ถูดลาก โดยที่แรงดันพิกัดของอินเวอร์เตอร์ขึ้นอยู่กับแรงดันพิกัดของวงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง



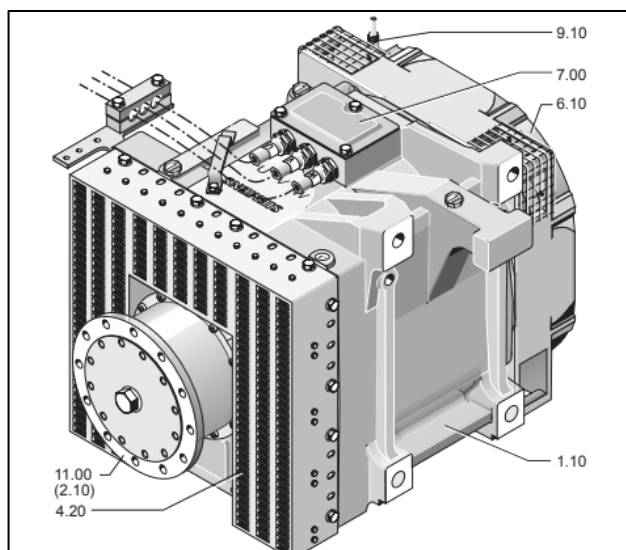
รูปที่ 2.18 วงจรอินเวอร์เตอร์

(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.6.6 มอเตอร์ฉุดลากและชุดเกียร์

มอเตอร์ฉุดลากถูกติดตั้งอยู่ที่โบกี้ของ A-Car ของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน โดยใช้ในการเร่งความเร็วและการเบรก ความเร็วของมอเตอร์ฉุดลากถูกควบคุมผ่านชุดควบคุมการขับเคลื่อนเพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ทำงานเกินพิกัด มอเตอร์ฉุดลากที่ใช้กับรถไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทยเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก ติดตั้งบนโบกี้ของรถไฟฟ้าจำนวน 2 เครื่อง ต่อ 1 A-Car ระบายความร้อนด้วยพัดลมที่ติดตั้งอยู่ภายใน ขับเคลื่อนผ่านชุดเกียร์ที่มีอัตราทดที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ในสภาวะต่าง ๆ ตลอดเส้นทางรถโดยสาร ดังแสดงในรูปที่ 2.19

โครงสร้างของมอเตอร์ฉุดลากที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้าต้องถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่ทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีความแน่นหนาของฝุ่นผงสูง และอุณหภูมิที่ใช้ทำงานสูง ดังนั้นโครงสร้างของมอเตอร์จึงต้องมีชุดระบายความร้อนประกอบมาด้วย ดังแสดงดังในรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของมอเตอร์รถตลาก

(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ตำแหน่ง 1.10 คือ โครงหุ้มของมอเตอร์ เป็น โครงสร้างที่ภายในประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์แบบกรงกระรอก ตำแหน่งที่ 4.20 คือตำแหน่งที่อากาศจากภายนอกไหลเข้าไปภายในมอเตอร์เพื่อระบายความร้อนผ่านซี่รังผึ้งที่ออกแบบมาพิเศษสำหรับระบบระบายความร้อน ตำแหน่งที่ 2.1 และ 11.00 คือแกนเพลลาและหน้าแปลนสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับชุดเกียร์ของรถไฟฟ้า และ ตำแหน่งที่ 7 และ 9 คือ ขั้วต่อสายไฟฟ้าสำหรับป้อนให้กับมอเตอร์และชุดเซ็นเซอร์วัดความเร็วของรถไฟฟ้า

ชุดเกียร์ของรถไฟฟ้าถูกใช้เพื่อสร้างแรงให้เหมาะสมกับความต้องการของรถไฟฟ้าในสถานะต่างๆ เช่น ในช่วงที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสถานีเป็นช่วงที่รถไฟฟ้าต้องการแรงบิดที่สูงเพื่อเอาชนะแรงบิดของโหลด ชุดเกียร์เป็นชุดอัตราทดความเร็วของมอเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดให้กับรถไฟฟ้า มีอัตราทด 6.316:1 กล่าวคือโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าหมุน 6.316 รอบ ชุดเกียร์ถึงจะหมุนล้อรถไฟฟ้าได้ 1 รอบ



รูปที่ 2.20 มอเตอร์รถลาก

(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.6.7 โหมดการทำงานของมอเตอร์

ขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในปัจจุบันมีการจัดขบวนรถไฟฟ้าแบบ A-C-A หรือ 3 Car unit โดยที่ A คือ A Car หรือ Motor car เป็นผู้ที่ติดตั้งชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า และ C Car หรือ Trailer car เป็นผู้ที่ใช้บรรทุกผู้โดยสาร

ในหัวข้อนี้จะ โฟกัสที่ Motor car หรือ A Car ที่ใช้ติดตั้งมอเตอร์รถลากของรถไฟฟ้า และการทำงานในโหมดต่าง ๆ ของมอเตอร์รถลากของรถไฟฟ้าทั้งขบวนกับการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า รถไฟฟ้า 1 ขบวน

2.6.8 ข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ประกอบด้วย ข้อมูลทางระบบไฟฟ้า ข้อมูลของระบบขับเคลื่อนและ ข้อมูลของมอเตอร์รถลากแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้า

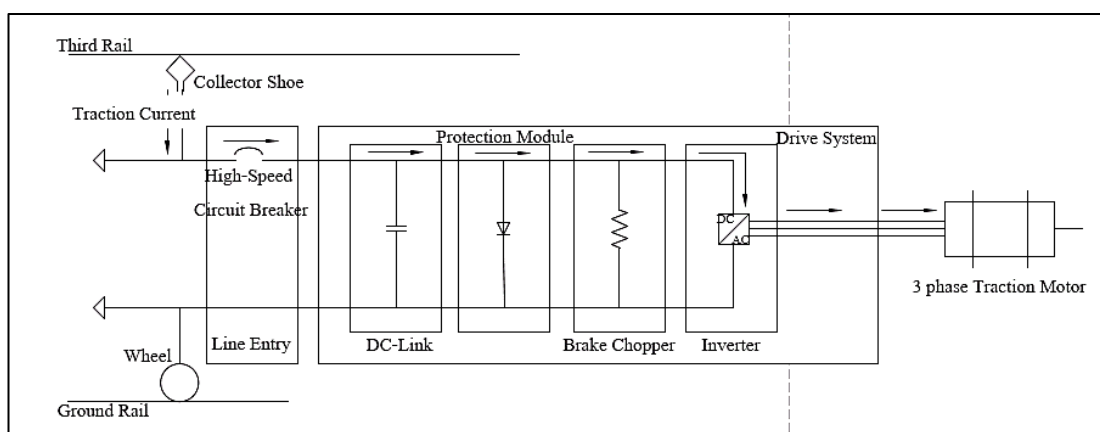
ข้อมูลทางระบบไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V)	750
ช่วงความผันผวนของแรงดันไฟฟ้า (V)	500 - 900
ข้อมูลของระบบขับเคลื่อน	
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ (V)	3 เฟส , 380 - 570
ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง (A/phase)	570
ความถี่ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ (Hz)	0 - 400
แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง (V)	950
แรงดันไฟฟ้าระดับปกติ (V)	554
กระแสไฟฟ้าระดับปกติ (A)	284
กำลังไฟฟ้าระดับปกติ (kW)	230
ความเร็วระดับปกติ (rpm)	1900
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)	721
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)	477
ความเร็วรอบสูงสุด (rpm)	4000

2.6.9 การทำงานของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า

การทำงานของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่ การทำงานของระบบขับเคลื่อนในสถานะปกติในโหมดขับเคลื่อน การทำงานของระบบขับเคลื่อนในสถานะปกติในโหมดเบรก และการทำงานของระบบขับเคลื่อนในสถานะผิดปกติ

1.) การทำงานของระบบขับเคลื่อนในสถานะปกติในโหมดขับเคลื่อน

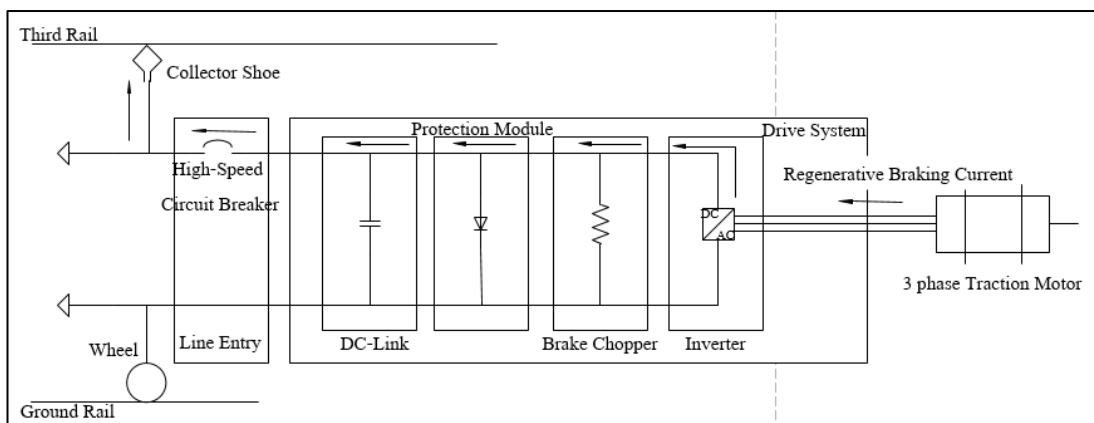
รถไฟฟ้าใช้เหน็บรับไฟรับพลังงานไฟฟ้าจากรางที่สาม ผ่านส่วนรับไฟเข้าของรถไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินแบบตัดวงจรเร็วที่ทำหน้าที่ป้องกันการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างฉับพลัน ต่อจากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะถูกลดความผันผวนด้วยวงจรเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรงทำให้แรงดันที่ด้านเอาต์พุตมีค่าคงที่ 750 V_{DC} ที่ หลังจากนั้นจะถูกป้อนให้กับชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เพื่อป้อนให้กับมอเตอร์จุดลากในลำดับต่อไป ลำดับขั้นตอนการทำงานแสดงในรูปแบบที่ 2.21



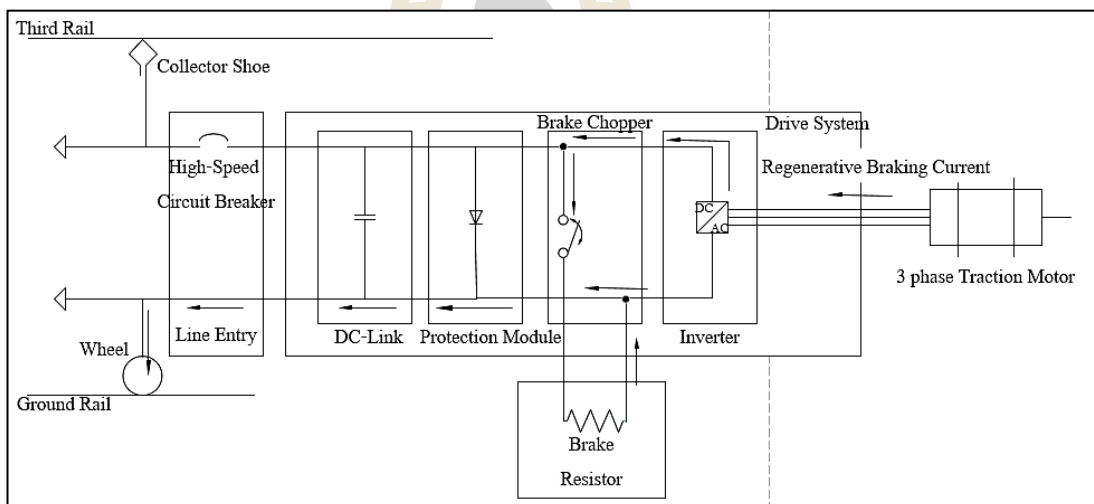
รูปที่ 2.21 ฟังก์ชันการทำงานของระบบขับเคลื่อนในสถานะปกติที่ทำงานในโหมดขับเคลื่อน
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.) การทำงานของระบบขับเคลื่อนในสถานะปกติในโหมดเบรก

ขณะที่รถไฟไฟฟ้าเบรกเพื่อลดความเร็ว โดยใช้การเบรกแบบไดนามิกส์ มอเตอร์จะเปลี่ยนตัวเองให้กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างแรงเบรกทางไฟฟ้าด้วยการนำความเร็วที่ล้อมาหมุนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับออกมาจากขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในโหมดเบรกการทำงานสามารถถูกจำแนกได้ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกสามารถย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงหรือรถไฟฟ้ายาวไกลได้ และ กรณีที่สองไม่สามารถย้อนพลังงานกลับไปยังสถานีไฟฟ้าและรถไฟฟ้ายาวไกลได้ โดยในกรณีที่สองพลังงานที่ไม่สามารถย้อนกลับไปยังรถไฟหรือสถานีไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงได้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและเผาทิ้งไปในอากาศโดยผ่านชุดตัวต้านทานเบรกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “การเบรกแบบไดนามิกส์” โดยรูปแบบการทำงานของในโหมดเบรกสามารถสรุปได้ในรูปที่ 2.22 แสดงการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ายาวไกลโดยที่พลังงานที่ได้จากการเบรกในกรณีที่สามารถย้อนคืนสู่สถานีไฟฟ้าใกล้เคียงหรือรถไฟฟ้ายาวไกลอื่นได้ และรูปที่ 2.23 แสดงการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้ายาวไกลโดยที่พลังงานที่ได้จากการเบรกในกรณีที่ไม่สามารถย้อนคืนสู่สถานีไฟฟ้าใกล้เคียงหรือรถไฟฟ้ายาวไกลอื่นได้



รูปที่ 2.22 ผังการทำงานของระบบขับเคลื่อนในสภาวะปกติที่ทำงานในโหมดเบรก
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)



รูปที่ 2.23 ผังการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่ทำงานในโหมดเบรกแบบนำพลังงานกลับ
(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

3.) การทำงานของระบบขับเคลื่อนในสภาวะผิดปกติ

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับรถไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ความผิดปกติที่เกิดจากการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าอย่างฉับพลันและความผิดปกติที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงผิดปกติ

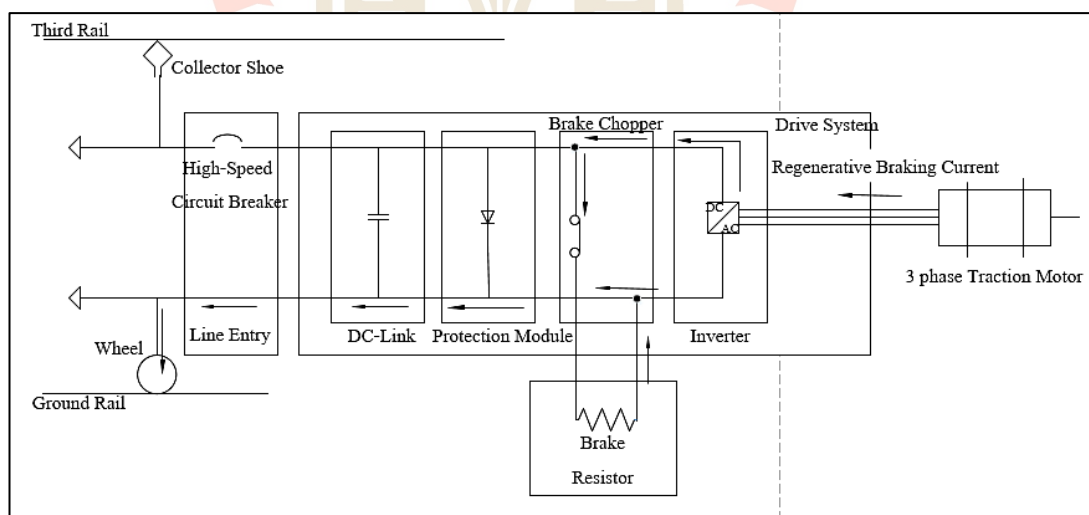
ก.) ความผิดปกติที่เกิดจากการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าอย่างฉับพลัน

กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าถูกควบคุมด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีความสามารถตัดวงจรด้วยความเร็วสูง เมื่อความผิดปกติที่เกิดจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าอย่างฉับพลันเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ชิ้นอื่น

ข.) ความผิดปกติที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงผิดปกติ

การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขณะที่รถไฟฟ้าทำงานในระบบเบรก โดยขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเปลี่ยนตัวเองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะที่เกิดการป้อนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งการป้องกันเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแค่ระดับการป้องกันขั้นที่หนึ่งและระดับการป้องกันขั้นที่สอง เนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระดับปกติเป็นการทำงานในสภาวะปกติของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินซึ่งไม่ได้เกิดจากการทำงานผิดพลาดของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

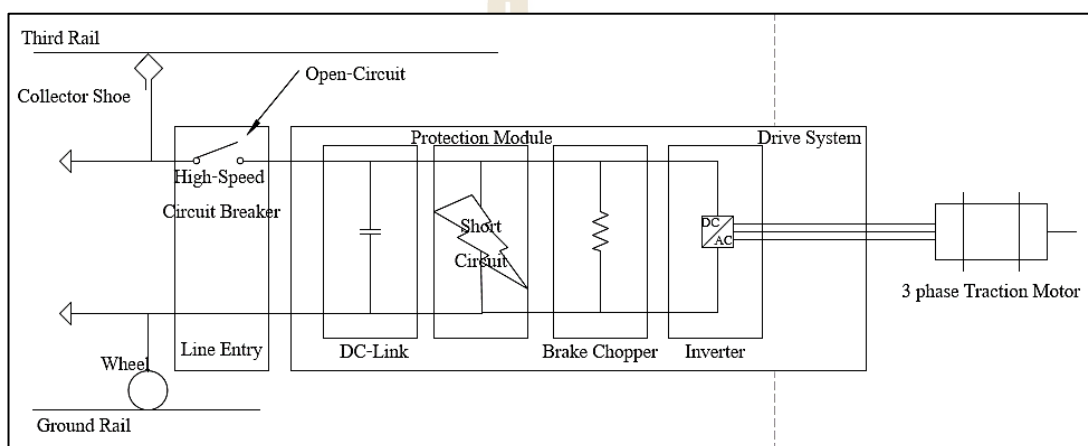
ระดับการป้องกันขั้นที่หนึ่ง เป็นการเชื่อมต่อชุดตัวต้านทานเบรกเข้ากับระบบขับเคลื่อนอย่างถาวร กล่าวคือพลังงานที่ได้จากการเบรกทั้งหมดจะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยใช้ตัวต้านทานเบรก จนกว่าจะได้รับการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นโดยวิศวกรที่ดูแล ฝั่งการทำงานโดยสรุปสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ฝั่งการทำงานของชุดขับเคลื่อนในโหมดป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินระดับที่หนึ่ง

(ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

ระดับป้องกันขั้นที่สอง การป้องกันในระดับนี้ถือว่าการป้องกันในระดับสูงที่สุด โดยชุดตัวป้องกันแรงดันเกินจะใช้การลัดวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งอยู่ภายในเพื่อทำให้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ตรวจพบการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าอย่างฉับพลันและปลดวงจรของระบบขับเคลื่อนชุดนี้เพื่อป้องกันความเสียหายส่วนอื่น ๆ อาจะที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากต้องการใช้งานชุดขับเคลื่อนชุดนี้อีกครั้งจะต้องนำรถไฟฟ้าขบวนนี้กลับไปเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสียหายจากการลัดวงจรเสียก่อน ผังการทำงานแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ผังการทำงานของชุดขับเคลื่อนขณะทำงานในโหมดป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินระดับที่สอง (ที่มา: บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน), 2547)

2.7 ระบบเบรกของรถไฟฟ้า

เป็นระบบที่สำคัญในรถไฟฟ้า เพราะว่าเป็นระบบที่เกี่ยวข้อง กับความปลอดภัย ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญในการตรวจสอบระบบเบรกเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการตรวจเช็คเกี่ยวกับการหล่อลื่นของตัวเบรก การรั่วของวาล์วต่าง ๆ ที่ควบคุมการเบรก ความสมบูรณ์ของผ้าเบรกและอื่น ๆ เป็นต้น ระบบเบรกของรถไฟฟ้ามียู่ 2 ระบบ คือ ระบบเบรกแบบไฟฟ้า (Electro Dynamics Brake: ED) และระบบเบรกด้วยระบบลม (Electro Pneumatic Brake: EP)

2.7.1 ระบบเบรกด้วยระบบลม

ระบบเบรกแบบลมเป็นการเบรกทางกลชนิดหนึ่งนำมาใช้งานในขณะที่มีความเร็วของรถไฟฟ้าต่ำกว่า 8 km/hr. เบรกแบบลมจะทำงานโดยการอัดอากาศไปยังชุดคาลิปเปอร์ที่ติดตั้งอยู่ งานเบรกติดตั้งอยู่ที่ล้อ ส่งผลให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ล้อรถไฟฟ้าเคลื่อน เพื่อชะลอความเร็วหรือหยุดรถไฟฟ้าตามตำแหน่งที่กำหนดไว้อย่างแม่นยำ ข้อเสียของระบบเบรกลมคือเมื่อทำงานจะเกิด

เสียงรบกวนต่อสภาพแวดล้อม โดยรอบและต้องทำการตรวจเช็คและซ่อมบำรุงระบบเบรก ได้แก่
 วัสดุควบคุมการไหลของลม แผ่นจานเบรก บั้มลม ผ้าเบรก ตลอดเวลา

2.7.2 การเบรกด้วยระบบไฟฟ้า

1.) การเบรกด้วยไฟฟ้าแบบไดนามิกส์

การเบรกแบบไดนามิกส์เป็นรูปแบบการเบรกแบบไฟฟ้าชนิดหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของโรเตอร์สูงกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ตามรูปแบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกป้อนให้กับตัวต้านทานเบรก เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและเป่าทิ้งไปในอากาศ

2.) การเบรกด้วยไฟฟ้าแบบนำพลังงานกลับคืน

ใช้หลักการเดียวกันกับการเบรกแบบไดนามิกส์แต่นำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปขับเคลื่อนขบวนรถอื่นที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งกำลังต้องการใช้พลังงานในการออกตัวหรือในการปฏิบัติงานในโหมดต่าง ๆ ในระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 900 V แรงดันไฟฟ้ดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบ แต่ถ้าหากเกิดแรงดันสูงกว่า 900 V แรงดันส่วนเกินจะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนด้วยตัวต้านทานเบรก เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน(Lu et al., 2016) โดยเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถไฟไฟฟ้าและลดพลังงานสูญเสียที่ ซึ่งเป็นอีกกระบวนการที่ใช้ประโยชน์จากพลังงานจลน์ที่ถูกเก็บอยู่ในรถไฟไฟฟ้า ปัจจุบันนิยมใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า(Electric Vehicle: EV)และรถยนต์ไฮบริดจ์ (Guo et al., 2009) ในการให้บริการรถไฟ การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟเข้ามามีบทบาทในการลดพลังงานสูญเสีย เมื่อรถไฟเข้าสู่โหมดการเบรก มอเตอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากนั้นแรงบิดจากล้อรถไฟจะถูกนำไปป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา เรียกว่า พลังงานจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืน เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การขนส่งระบบรางด้วยหัวรถจักรไฟฟ้าจึงได้นำเทคโนโลยีการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนมาใช้ (Kara et al., 2012) พลังงานจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายวิธีการเช่น การนำไปเก็บไว้ในอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบติดตั้งบนรถไฟ(Onboard Energy Storage System:OESS), นำไปเก็บไว้ที่อุปกรณ์เก็บพลังงานแบบติดตั้งตามสถานี(Stationary Energy Storage System:SESS) หรือ สามารถนำไปใช้งาน โดยรถไฟขบวนอื่นที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนที่อยู่ในรางส่งพลังงานรางเดียวกัน แต่ถ้าหากระบบไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน หรือไม่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจากรถไฟขบวนอื่นในรางส่งพลังงานรางเดียวกัน

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการเบรกจะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยผ่านตัวต้านทานเบรก

2.8 อุปกรณ์เก็บพลังงานในระบบราง

อุปกรณ์เก็บพลังงานในระบบรางแบ่งตามตำแหน่งการติดตั้งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า และแบบติดตั้งตามสถานีจ่ายไฟฟ้าหรือบนเส้นทางระหว่างสถานี แนวคิดพื้นฐานของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าของระบบราง คือ การป้องกันการเกิดพลังงานสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้นจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืน นอกจากนี้การติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้ายังสามารถเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบ และช่วยลดแรงดันตกอันเนื่องมาจากการออกตัวของรถไฟฟ้า (Killer et al., 2012) อุปกรณ์แบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าใช้ในการเก็บพลังงานที่ผลิตได้จากรถไฟซึ่งจะเก็บได้เฉพาะขบวนที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเท่านั้น ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ อุปกรณ์เก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้ามีความจุน้อยกว่าประเภทติดตั้งที่สถานีจ่ายพลังงาน เนื่องจากพลังงานป้อนให้กับอุปกรณ์เก็บพลังงานได้จากการเบรกของรถไฟฟ้าขบวนเดียว การใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Super-Capacitor) แบบติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าประหยัดพลังงานไฟฟ้า โดยการเก็บพลังงานที่ได้จากการเบรกชาร์จไว้ในตัวเก็บประจุ ก่อนดีสชาร์จในโหมดการเร่งความเร็วสามารถประหยัดพลังงานได้ 18.23% (Liu et al., 2017) การติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานตามสถานีจ่ายไฟฟ้าใช้ในการเก็บพลังงานจากการเบรกของรถไฟฟ้า โดยพลังงานมาจากการเบรกของรถไฟฟ้าทุกขบวนที่อยู่ในรางจ่ายชุดเดียวกัน ซึ่งถูกจ่ายผ่านรางที่สาม และป้อนให้กับอุปกรณ์เก็บพลังงานและถูกจ่ายผ่านรางที่ 3 มายัง รถไฟฟ้าขบวนต่าง ๆ ที่ต้องการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน ให้ความจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานประเภทนี้มีขนาดใหญ่ (Ghaviha et al., 2017)

2.8.1 อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟ

โดยทั่วไปถูกติดตั้งไว้บนหลังคารถไฟฟ้า ทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าขณะที่รถไฟฟ้าเบรกและป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนเมื่อรถไฟฟ้าเร่งความเร็วออกจากสถานีขนส่งผู้โดยสารหรือเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ลาดชัน ในปัจจุบันอุปกรณ์เก็บพลังงานที่นิยมติดตั้งบนรถไฟฟ้าคือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่น มีอายุการใช้งานได้ยาวนาน สามารถอัดประจุและคายได้รวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่จากการศึกษาผลของการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานติดตั้งบนรถไฟฟ้าพบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 40% (Steiner et al., 2004)

2.8.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าถูกคิดค้นครั้งแรกในปี 1800 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงในปี 1890 มีนักวิจัยชื่อว่า C. Pollak ได้ค้นพบวิธีการที่ทำให้ตัวเก็บประจุสามารถทำงานได้อย่างเสถียร ต่อมาในปี 1897 ได้มีการจดสิทธิบัตรสำหรับตัวเก็บประจุที่สร้างจากอลูมิเนียมบอแรกซ์ ในปี 1957 Howard Becker ได้จดสิทธิบัตรในหัวข้อตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่มีขั้วต่อ 2 ขั้ว โดยมีจุดประสงค์เพื่อเก็บพลังงานด้วยการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปที่แผ่นคาร์บอนที่มีรูพรุน ในปี 1966 บริษัท Standard Oil of Ohio จำกัด (มหาชน) ได้พัฒนาตัวเก็บประจุในรูปแบบอื่น ซึ่งต่อมาถูกเรียกว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในปี 1971 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกใช้เพื่อเป็นหน่วยสำรองไฟฟ้าให้กับหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ในบริษัท NEC จำกัด (มหาชน) ในกรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น (Mazen et al.,2017) หลังจากนั้นตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกใช้อย่างแพร่หลายตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้กับพลังงานทดแทนเพื่อลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (Jouanne et al.,2013) การใช้กับระบบรถบัสไฟฟ้าในประเทศจีน การใช้ในการเก็บพลังงานที่ได้จากเบรกแบบไฟฟ้าของรถยนต์ที่ติดตั้งเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือรถยนต์ไฟฟ้า และการใช้ในระบบ Stop-Start System หรือรู้จักกันในชื่อ Idling Stop, I-Stop (ขึ้นอยู่กับค่ายรถยนต์) เป็นการดับเครื่องยนต์ของรถยนต์ เพื่อลดการใช้น้ำมัน โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์อำนวยความสะดวก เช่น ระบบระบายอากาศ ระบบความบันเทิง ระบบมาตรวัดในรถยนต์ และใช้ในการสตาร์ทเครื่องยนต์ (Aarathy et al.,2015)

ข้อดีของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.) เวลาในการอัดประจุ

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอัตราการอัดประจุและคายประจุเทียบเท่ากับตัวเก็บประจุทั่วไป แต่ด้วยโครงที่ถูกออกแบบทำให้มีค่าความต้านทานภายในต่ำ ส่งผลให้ตัวเก็บประจุสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวเก็บประจุแบบธรรมดาหลายเท่า

2.) กำลังไฟฟ้าจำเพาะ

กำลังไฟฟ้าจำเพาะถูกใช้เป็นตัววัดความแตกต่างของเทคโนโลยีในรูปของการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อน้ำหนักของอุปกรณ์ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีกำลังไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าแบตเตอรี่ถึง 5-10 เท่า ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีกำลังไฟฟ้าจำเพาะ 1-3 kW/kg แต่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีกำลังไฟฟ้าจำเพาะประมาณ 10 kW/kg

3.) ความปลอดภัยและอายุการใช้งาน

ด้วยความต้านทานภายในที่มีค่าต่ำทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสร้างพลังงานความร้อนได้น้อย จึงปลอดภัยต่อการระเบิด หากเกิดการลัดวงจรของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขณะที่มีประจุ

เต็มทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานที่เก็บไว้อย่างรวดเร็วและอาจจะเป็นเหตุให้อุปกรณ์แตกต่างจากแบตเตอรี่ที่อาจเกิดการระเบิดของอุปกรณ์ได้

4.) อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถอัดประจุและคายประจุได้หลายล้านครั้งขณะที่แบตเตอรี่สามารถอัดและคายประจุได้เพียง 500-600 รอบ เพราะฉะนั้นหน้าที่ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีความถี่ในการอัดประจุและคายประจุสูง

2.9 เส้นโค้งความเร็ว

เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันมีโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าอยู่ 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดคงค่าความเร็ว โหมดชะลอความเร็ว และโหมดเบรก โดยแต่ละโหมดการทำงานอัตราการใช้พลังงานของรถไฟฟ้านั้นประกอบด้วยหลายองค์ประกอบและหนึ่งในส่วนประกอบหลักนั้นคือ ความเร็วและความเร่งของรถไฟฟ้า โดยที่ความเร็วของรถไฟฟ้านั้นมีผลกระทบต่อแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและความเร่งนั้นมีผลต่อแรงต้านเนื่องจากการเร่งความเร็วของรถไฟฟ้าเป็นต้น เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น 4 โหมดการเคลื่อนที่ซึ่งในแต่ละโหมดการเคลื่อนที่มีข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไปดังนี้

1.) โหมดเร่งความเร็ว

เกิดขึ้นในสถานะที่ความเร็วของรถไฟฟ้าอยู่ต่ำกว่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้ มอเตอร์จะดึงกระแสไฟฟ้าเพื่อที่จะสร้างแรงบิดทางกลเพื่อเอาชนะแรงบิดโหลดของรถไฟฟ้า ดังนั้นข้อกำหนดในโหมดเร่งความเร็วคือผลรวมของแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมาจะต้องไม่มีค่าสูงเกินกว่าแรงบิดสูงสุดของรถไฟฟ้า เพื่อป้องกันการลื่นไถลของล้อรถไฟฟ้า ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้รับในโหมดนี้คือ อัตราเร่งของมอเตอร์ที่สร้างแรงบิดสูงเกินกว่าแรงบิดสูงสุดของรถไฟฟ้า แรงบิดของรถไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟฟ้า ตำแหน่งของรถไฟฟ้า ณ เวลาใด ๆ

2.) โหมดคงค่าความเร็ว

เมื่อรถไฟฟ้าเร่งความเร็วจนถึงความเร็วที่ต้องการแล้ว รถไฟฟ้าจะเปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดเร่งความเร็วเป็นโหมดคงค่าความเร็ว ในโหมดนี้ อัตราเร่งของรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ แรงบิดของรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงต้านทานการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในโหมดนี้มีค่าน้อย

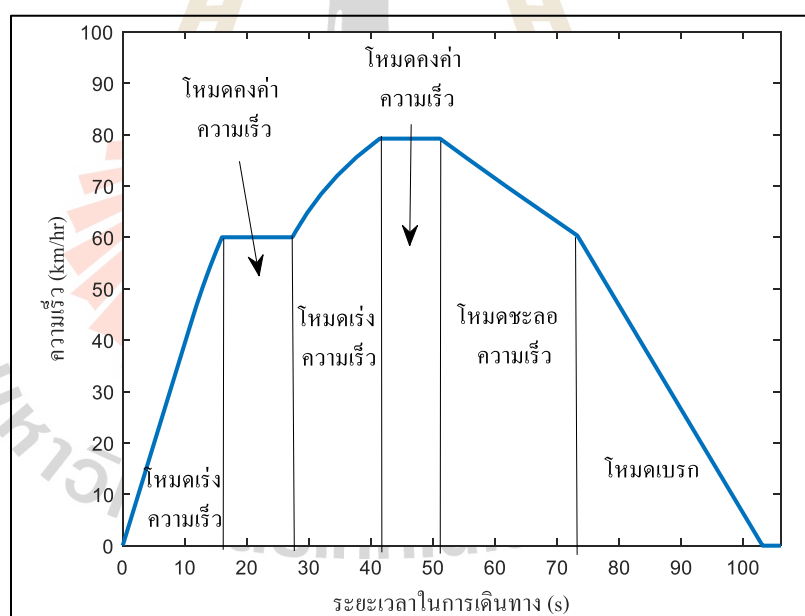
3.) โหมดชะลอความเร็ว

ในโหมดนี้รถไฟฟ้าจะไม่รับพลังงานจากสถานีไฟฟ้า ส่งผลให้มอเตอร์จะดึงกระแสตามแรงเฉื่อยของรถไฟฟ้าจึงส่งผลให้ความเร็วของรถไฟฟ้าลดลง เนื่องจากผลรวมของแรง

ด้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยโหมคนี้สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาไม่ว่าจะเป็น การชะลอความเร็วเพื่อเตรียมตัวเข้าจอดที่สถานีรับ-ส่งผู้โดยสารหรือการชะลอความเร็วเพื่อลดความเร็วให้ต่ำกว่าความเร็วสูงสุดของเส้นทาง เป็นต้น

4.) โหมคเบรก

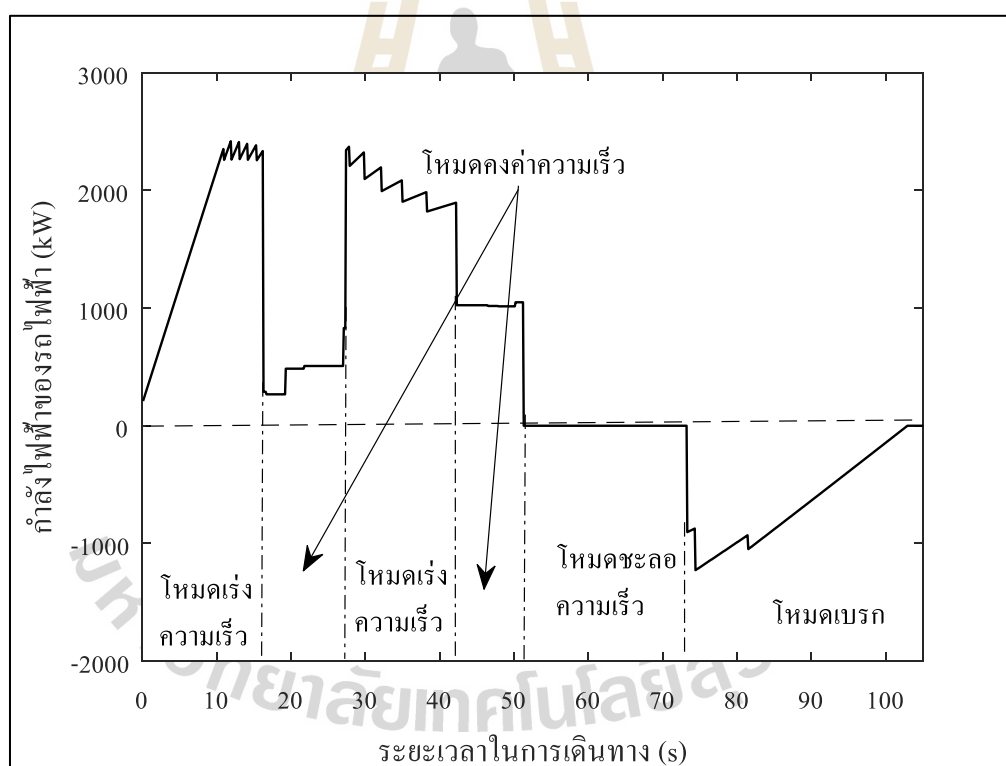
โดยทั่วไปการเบรกจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเบรกแบบไฟฟ้าและการเบรกทางกล โดยทั่วไปการเบรกแบบไฟฟ้าถูกใช้ใน ช่วงต้นของโหมคเบรกโดยเบรกแบบไฟฟ้าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเบรกไฟฟ้าแบบไดนามิกส์และการเบรกไฟฟ้าแบบนำพลังงานกลับคืน ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ การเบรกมีข้อกำหนดคล้ายกับโหมคเร่งความเร็ว โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการเบรกจะต้องไม่เกินค่าแรงบิดสูงสุดของรถไฟฟ้า เพื่อป้องกันการลื่นไถลของล้อรถไฟฟ้า ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในโหมคนี้คือ ความหน่วงของรถไฟฟ้าที่ไม่ทำให้เกิดแรงบิดสูงเกินกว่าค่าแรงบิดสูงสุด แรงบิดของรถไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟฟ้า และตำแหน่งของรถไฟฟ้า ขณะ เวลาใด ๆ เป็นต้น ตำแหน่งของแต่ละโหมคของเส้นโค้งความเร็วถูกแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างเส้น โค้งความเร็ว

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละโหมคการทำงานของรถไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2.27 โดยค่ายอดของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ขณะทำงานในโหมคเร่งความเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่รถไฟฟ้ามีย

แรงต้านทานการเคลื่อนที่สูง ต่อมาเมื่อรถไฟฟ้าเข้าสู่โหมคคงค่าความเร็วกำลังไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าจะสร้างแรงเพื่อรักษาความเร็วให้คงที่และเอาชนะแรงต้านทานที่มีค่าน้อยกว่าโหมคเร่งความเร็ว เมื่อรถไฟฟ้าเข้าสู่โหมคชะลอความเร็ว รถไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย ดังนั้นจึงไม่มีการสร้างแรงฉุดลากในโหมคนี้ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์อำนวยความสะดวก และท้ายที่สุดเมื่อรถไฟฟ้าเข้าสู่ระยะเบรก การติดลบของกำลังไฟฟ้าแสดงถึงการทำงานในโหมคเบรก ซึ่งเกิดจากการแทนความหน่วงที่มีค่าติดลบลงในสมการ กำลังไฟฟ้าในส่วนนี้สามารถนำไปพิจารณาได้ หลายรูปแบบ เช่น ถ้าหากนำมาพิจารณาในโหมคการเบรกทางกล กำลังไฟฟ้าในโหมคนี้ต้องถูกนำไปรวมกับกำลังไฟฟ้าในโหมคอื่น แต่ถ้าหากพิจารณาการเบรกที่เกิดขึ้นในโหมคนี้เป็นการเบรกทางไฟฟ้าแบบนำพลังงานกลับคืน ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถส่งไปยังรถไฟฟ้าขบวนใกล้เคียงได้



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

2.10 แรงฉุดลาก

แรงบิดที่ถูกสร้างจากมอเตอร์ฉุดลากสามารถถูกแปลงให้อยู่ในรูปของแรงฉุดลาก (Traction effort) หรือ แรง (Force) ตามสมการที่ 2.1

$$F_T = c_{GR} \left(\frac{\tau_m \omega_m}{r_w} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่	F_T	คือ แรงฉุดลาก (kN)
	c_{GR}	คือ อัตราทดของชุดส่งกำลัง
	τ_m	คือ แรงบิดทางกลของมอเตอร์ (Nm)
	ω_m	คือ จำนวนของมอเตอร์ (unit)
	r_w	คือ รัศมีของล้อ (m)

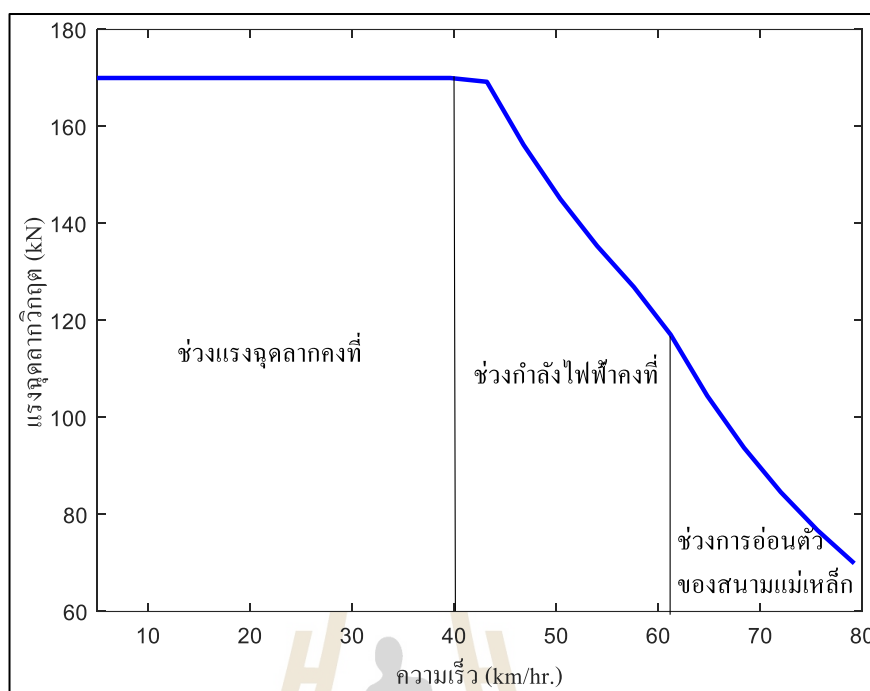
เพื่อตอบสนองความต้องการของรถไฟฟ้าซึ่งต้องการแรงฉุดลากในช่วงเริ่มต้นสูงขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำและต้องการแรงฉุดลากต่ำขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดังนั้นแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าจึงถูกทำให้คงที่จนถึงความเร็วที่ต้องการและก่อนที่จะเข้าสู่การลดแรงฉุดลากเพื่อเพิ่มความเร็วของรถไฟฟ้า ดังนั้นแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าจึงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.28

เพื่อให้ได้ตามที่ต้องการของรถไฟฟ้า การควบคุมมอเตอร์ฉุดลากของรถไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.10.1 ช่วงแรงฉุดลากคงที่ (Constant Torque Region)

ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ V/F ในทางอุดมคติ อัตราส่วนของแรงดันและความถี่ถูกกำหนดให้คงที่ เพื่อรักษาค่าของฟลักซ์ของมอเตอร์ให้คงที่ จึงส่งผลให้มอเตอร์สร้างแรงฉุดลากสูงสุด ณ เวลาเริ่มต้น

ในช่วงเวลาเริ่มต้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำจะถูกป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำผ่านอินเวอร์เตอร์ Sinusoidal pulse width modulation (SPWM) ในช่วงนี้มอเตอร์ฉุดลากเริ่มเพิ่มความเร็วอย่างต่อเนื่อง แรงดันและความถี่ที่ป้อนให้มอเตอร์เหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของการควบคุมมอเตอร์แบบ V/F ดังนั้นแรงบิดสูงสุดสามารถถูกสร้างได้ตามความเร็วที่ต้องการ



รูปที่ 2.28 แรงสูงสุดลากจูงของรถไฟฟ้า

2.10.2 ช่วงกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power Region)

ในช่วงนี้แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ถึงขีดจำกัด ซึ่งขีดจำกัดถูกกำหนดโดยอุปกรณ์เชื่อมต่อทางไฟฟ้ากระแสตรง แต่ค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามอัตราส่วนของความเร็วที่ต้องการ ทว่าการเพิ่มขึ้นของความถี่เพียงอย่างเดียวส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของช่องว่างอากาศลดลง ดังนั้นแรงดูดลากของมอเตอร์จึงลดลงในอัตราส่วนผกผันกับความเร็ว

2.10.3 ช่วงการอ่อนตัวของสนามแม่เหล็ก (Field Weakening Region)

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำงานด้วยความเร็วพิกัดจะลดลงเนื่องจากของขีดจำกัดของแรงดันพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าในขณะที่ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลงเนื่องจากฟลักซ์ของมอเตอร์ที่ลดลง

2.11 ตารางเวลาเดินรถ

นำมาใช้แสดงตำแหน่งของรถไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วการสร้างตารางเวลาเดินรถถูกใช้ในการพิจารณาการเดินรถไฟแบบหลายขบวน เพื่อให้ทราบตำแหน่งระยะห่างระหว่างรถไฟฟ้าและสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ตารางเวลาเดินรถประกอบด้วย ระยะห่างในการปล่อยรถออกจากสถานี(Headway) ตำแหน่งของรถไฟฟ้าของแต่ละขบวน เวลารับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีขนส่ง

ผู้โดยสาร (Dwell time) และตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารเป็นต้น โดยองค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 2.29

2.11.1 ระยะห่างของเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้า

ในระบบรถไฟฟ้าปัจจุบัน มีรถไฟฟ้าเดินทางพร้อมกันหลายขบวน ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการเดินทางและความสะดวกสบายของผู้โดยสาร การปล่อยรถไฟฟ้าในแต่ละครั้งจึงต้องกำหนดระยะห่างของเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้า โดยค่าของระยะห่างของเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับจำนวนของรถไฟฟ้าในระบบและระยะทางทั้งหมดของเส้นทาง

2.11.2 เวลารับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีขนส่งผู้โดยสาร

เวลารับ-ส่งผู้โดยสารเป็นส่วนที่สำคัญในระบบขนส่งมวลชนระบบราง ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการระบายผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟฟ้า โดยทั่วไปหากเป็นระบบขนส่งมวลชนในประเทศไทยค่าของเวลารับ-ส่งผู้โดยสารมีค่าอยู่ที่ 30-120 s แต่บางครั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนค่าของเวลารับ-ส่งผู้โดยสารอาจจะสูงขึ้นไปถึง 45-130 s บ่อยครั้งการเพิ่มขึ้นของเวลารับ-ส่งผู้โดยสารเป็นสาเหตุให้เกิดความล่าช้าในตารางเวลาเดินรถหรือเป็นสาเหตุให้เวลาการปล่อยตัวรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

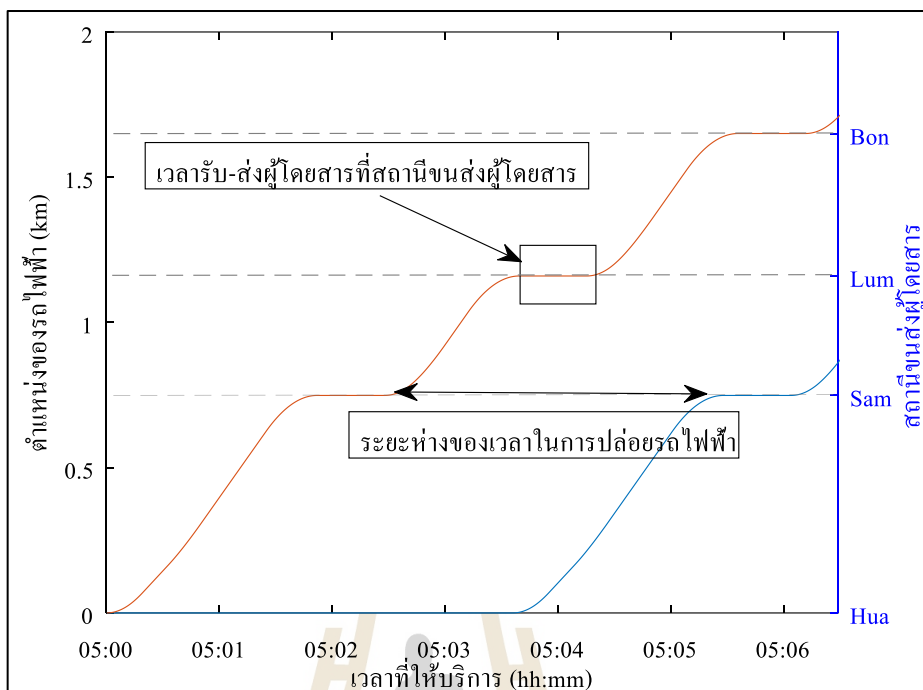
ซึ่งตำแหน่งของระยะห่างของเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้าออกจากสถานีและ เวลารับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีขนส่งผู้โดยสารอยู่ในตารางเดินรถแสดงดังรูปที่ 2. 29

โดยที่อักษรย่อ Hua หมายถึง สถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง Sam หมายถึง สถานีขนส่งผู้โดยสารสามย่าน Lum หมายถึง สถานีขนส่งผู้โดยสารลุมพินี และ Bon หมายถึง สถานีขนส่งผู้โดยสารบ่อนไก่ ซึ่งในบทที่ 4 จะกล่าวถึงตัวอย่างของสถานีต่าง ๆ ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารในเส้นทางขาขึ้นและขาล่อง

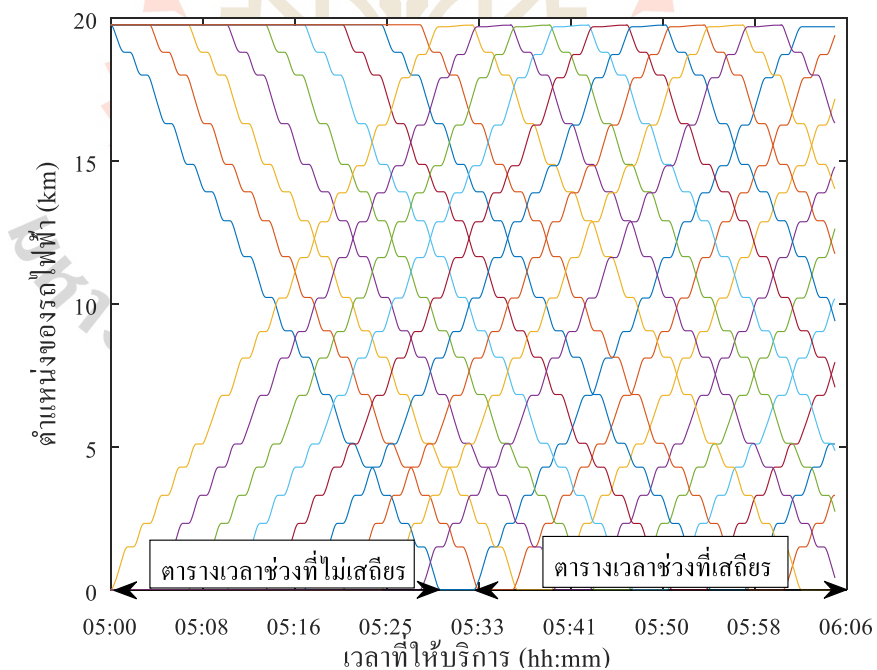
ตารางเวลาที่ใช้ในการจำลองการให้บริการของรถไฟฟ้าแบบหลายขบวนแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ตารางเวลาช่วงที่ไม่สแต๊ทและตารางเวลาช่วงที่สแต๊ท

ตารางเวลาช่วงที่ไม่สแต๊ทเกิดขึ้นในช่วงที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากโรงเก็บรถไฟฟ้าไปยังสถานีต่าง ๆ เพื่อเตรียมให้บริการแก่ลูกค้า ในส่วนนี้ไม่มีรูปแบบที่ตายตัวขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการเดินรถของบริษัทที่ให้บริการ

ตารางเวลาช่วงที่สแต๊ทเป็นรูปแบบของตารางเวลาที่จะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ ตลอดจนถึงสิ้นสุดการให้บริการลูกค้าในแต่ละวัน โดยตัวอย่างตารางเวลาที่ใช้ในการจำลองการให้บริการของรถไฟฟ้าแบบหลายขบวนแสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 ตำแหน่งของระยะห่างของเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้าและเวลารับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีขนส่งผู้โดยสาร



รูปที่ 2.30 ตารางเดินรถไฟฟ้า

2.12 การคำนวณประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้องอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตันและกฎการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ ในการคำนวณแรงลากจูง อัตราเร่ง ความเร็ว พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ และตำแหน่งของรถไฟฟ้า ระยะเวลาใด ๆ

สมการที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า อยู่ในรูปแบบของแรงที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน โดยการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น 4 โหมดการทำงานได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดคงค่าความเร็ว โหมดชะลอความเร็ว และโหมดเบรกคั้งที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงแรงกระทำต่าง ๆ ของรถไฟฟ้า ในส่วนนี้จึงได้กล่าวถึงสมการของแรง ประกอบด้วย แรงฉุดลากของหัวรถจักร(F_t) และแรงต้านการเคลื่อนที่ ($F_{resistance}$) ดังรูปที่ 2.31 โดยที่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ประกอบด้วย แรงต้านทานการวิ่ง($F_{rolling}$) แรงต้านทานทางโค้ง (F_{curve}) และแรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน(F_{grad}) ดังนั้นจากรูปที่ 2.31 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.2)-(2.5)



รูปที่ 2.31 Free body diagram ของรถไฟฟ้า

(ดัดแปลงจาก:https://www.iconfinder.com/icons/2443089/cartoon_commuter_electric_high_modern_speed_train_icon) (เข้าถึงเมื่อ 10/5/2562)

$$\sum F = ma$$

$$F_t = ma + F_{resistance} \quad (2.2)$$

$$m_{eff}a = F_t - F_{rolling} - F_{curve} - F_{grad} \quad (2.3)$$

$$m_{eff} = TareWeight (1 + \gamma) + Payload \quad (2.4)$$

$$F_t = m_{eff}a + F_{rolling} + F_{curve} + F_{grad} \quad (2.5)$$

โดยที่	m_{eff}	คือ มวลประสิทธิภาพ (ton)
	γ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของRotary portion (%)
	$TareWeight$	คือ น้ำหนักของรถไฟฟ้าขณะที่ไม่มีการบรรทุกผู้โดยสาร (ton)
	$Payload$	คือ น้ำหนักบรรทุกผู้โดยสาร (ton)
	a	คือ ความเร่งของรถไฟฟ้า (m/s^2)
	F_t	คือ แรงจุดของหัวรถจักร (kN)

หลังจากคำนวณแรงจุดลาก หากพบว่าค่าแรงจุดลากของรถไฟฟ้า (F_t) มีค่าสูงกว่าแรงจุดลากวิกฤตอาจทำให้เกิดการลื่นไถลของล้อรถไฟฟ้าอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาอัตราเร่งใหม่อีกครั้ง เพื่อลดแรงจุดลากของรถไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าแรงจุดลากวิกฤต สามารถคำนวณอัตราเร่งใหม่ได้จากสมการที่ 2.6

$$a = \left(\frac{F_{t_critical} - (F_{rolling} + F_{curve} + F_{grad})}{M_{eff}} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ $F_{t_critical}$ คือ แรงจุดลากวิกฤต (kN)

2.12.1 แรงต้านทานการวิ่งและแรงต้านทานเนื่องจากทางโค้ง

ในขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทางโค้งจะมีแรงต้านทานการเคลื่อนของรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งเป็นรูปของแรงเสียดทาน ประกอบด้วยแรงเสียดทานจากตลับลูกปืนและแรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์ โดยที่แรงเสียดทานของตลับลูกปืนมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนัก แรง

ด้านทานทางอากาศพลศาสตร์แปรผันตามน้ำหนักและความเร็ว ส่งผลให้เป็นเรื่องที่ยากมากในการคำนวณแรงต้านทานการวิ่งด้วยทฤษฎี ดังนั้นการคำนวณหาค่าแรงต้านทานการวิ่งจึงต้องนำรถไฟฟ้าไปวิ่งทดสอบบนสถานที่จริงและเก็บข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ แรงเบรก แรงต้านจากลม สภาพภูมิประเทศ ที่รถไฟฟ้าวิ่งผ่านมา ดังนั้นแรงต้านทานการวิ่งของรถไฟฟ้าจึงถูกจัดให้อยู่ในรูปของสมการเดวี(Davis Equation) (Mongkoldee et al., 2016) เพื่อประมาณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของพาหนะที่เคลื่อนที่โดยใช้รางดัง แสดงในสมการที่ 2.7

$$F_{running} = a + bv(s) + cv(s)^2 \quad (2.7)$$

โดยที่ a, b, c คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเดวี

ตัวแปร a เป็นสัมประสิทธิ์ที่แปรผันตามน้ำหนักที่ตกลงบนเพลลาของรถไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของโบกี้ ซึ่งสรุปได้ 3 ประเภทหลักได้แก่

ก. แรงเสียดทานของลูกปืนและคานรับน้ำหนัก

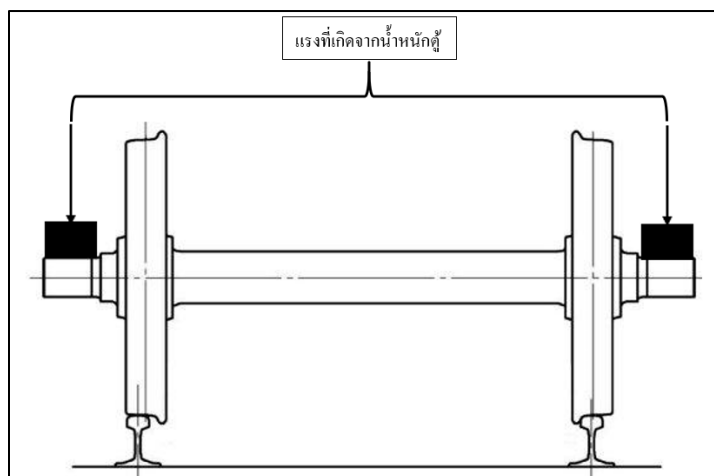
แรงเสียดทานของลูกปืนและคานรับน้ำหนัก เกิดจากน้ำหนักของตู้โดยสารหรือตู้หัวรถจักรกดลงบน โบกี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 โดยทิศทางลูกศรที่ชี้ลงเปรียบเสมือนกับน้ำหนักของตู้โดยสารกดลงไปยังเพลลาของล้อรถ

ข. แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างล้อรถไฟกับราง

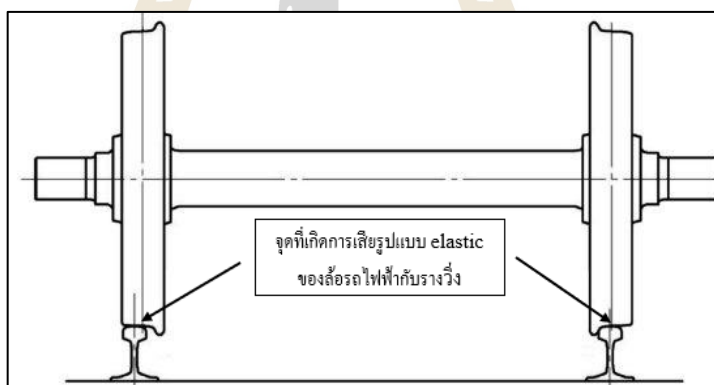
แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างล้อรถไฟกับราง เนื่องจากช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัสของล้อรถกับหน้าสัมผัสของราง ซึ่งขณะที่รถไฟฟ้าวิ่งล้อของรถไฟฟ้าที่เสียดสีกับรางวิ่งทำให้รางวิ่งเกิดการเสียดรูปแบบยืดหยุ่นส่งผลให้เกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.33

ค. แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเสียดรูปของรางวิ่ง

แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเสียดรูปของรางวิ่งทำให้รางวิ่งโค้งงอลักษณะคล้ายกับการตกห้องข้าง ทำให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในลักษณะวิ่งขึ้นทางลาดชันตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.34

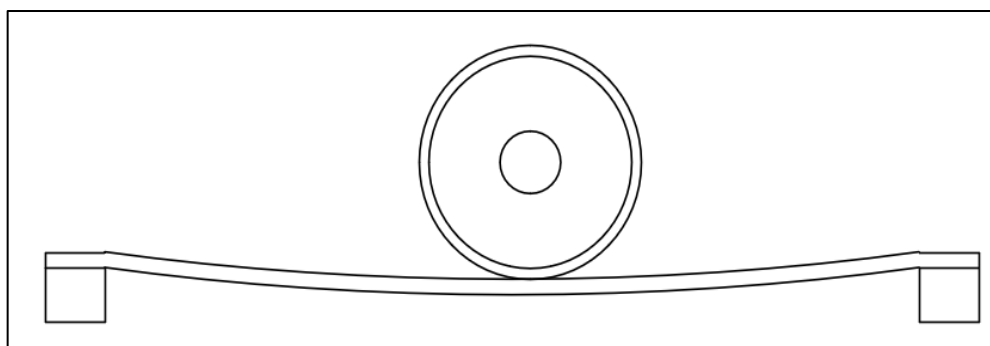


รูปที่ 2.32 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานของลูกปืน
(ดัดแปลงจาก: <https://www.quora.com/When-a-train-makes-a-turn-isnt-its-outer-wheel-covering-more-distance-than-the-inner-one>) (เข้าถึง 9/04/2562)



รูปที่ 2.33 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัสของล้อรถ
กับหน้าสัมผัสของราง

(ดัดแปลงจาก: <https://www.quora.com/When-a-train-makes-a-turn-isnt-its-outer-wheel-covering-more-distance-than-the-inner-one>) (เข้าถึง 9/04/2562)



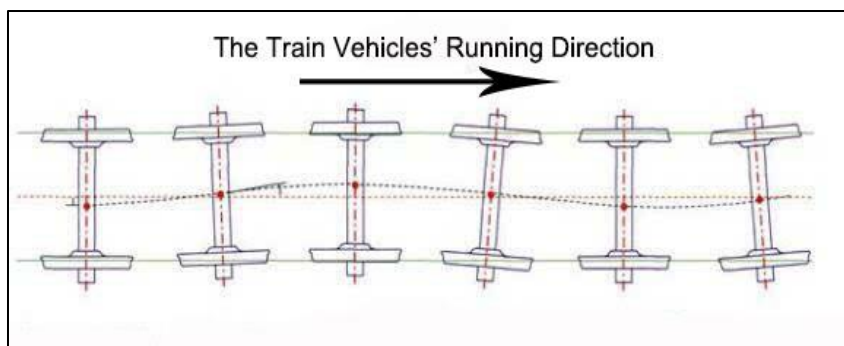
รูปที่ 2.34 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเสียดรูปของรางวิ่ง

(คัดแปลงจาก: <https://www.quora.com/When-a-train-makes-a-turn-isnt-its-outer-wheel-covering-more-distance-than-the-inner-one>) (เข้าถึง 9/04/2562)

ตัวแปร b เป็นสัมประสิทธิ์ที่แปรผันตามทิศทางของความเร็ว ซึ่งประกอบด้วย Flange contact resistance และแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากไถลออกด้านข้างของรถไฟ

Flange contact resistance เกิดจากการที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านทางโค้งของราง เนื่องจากล้อของรถไฟไม่สามารถหักเลี้ยวได้เหมือนรถยนต์ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านทางโค้งจึงทำให้เกิดแรงต้านที่รถไฟกระทำกับล้อรถไฟ โดยแรงต้านชนิดนี้สามารถลดลงได้จากการทำให้พื้นผิวของรางวิ่งและล้อมีความเรียบและลื่น

แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากไถลออกด้านข้างของรถไฟ แม้ว่าความกว้างของล้อรถไฟจะถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับราง แต่ในการเคลื่อนที่ในเชิงปฏิบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟนั้นไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเพียงอย่างเดียว แต่จะเคลื่อนที่ในทิศทางด้านข้างด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.35 โดยมีต้นเหตุมาจากลักษณะของล้อรถไฟซึ่งพื้นผิวสัมผัสของล้อกับรางมีลักษณะเป็นแนวทะแยง ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 แนวการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากไถลออกด้านข้างของรถไฟ

(ที่มา: <http://th.sincholdrail.net/info/how-to-ensure-train-track-security-and-keep-it-20016867.html>) (เข้าถึงเมื่อ 26/3/2562)



รูปที่ 2.36 ลักษณะของล้อรถไฟ

(ที่มา: <http://snf.ratp.free.fr/enginsratp.htm>) (เข้าถึงเมื่อ 26/3/2562)

ตัวแปร c เป็นสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟยกกำลังสอง หรือเรียกว่าแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงต้านของอากาศ การออกแบบรูปทรงของรถไฟไฟฟ้าให้ที่ลู่ลมหรือเพริยวลม (Streamlining) เช่นการทำให้พื้นผิวทั้งหมดของรถไฟเรียบ สามารถช่วยลด

ผลกระทบจากแรงต้านอากาศ ลดช่องว่างระหว่างตู้โดยสารลงเพื่อลดความผันผวนของอากาศที่ส่งผลให้แรงต้านอากาศสูงขึ้นหรือการปิดหลังคารถไฟฟ้าให้มีคอคอดและทำให้พื้นผิวเรียบเสมอกันสามารถช่วยลดแรงต้านอากาศได้เช่นกัน สิ่งที่กำลังกล่าวมาเหล่านี้ถูกใช้เป็นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของแรงต้านอากาศขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น โดยการเปรียบเทียบรูปทรงแบบเพียวลมและไม่เพียวลมแสดงในรูปที่ 2.37(ก)-(ข)



(ก) รูปทรงของรถไฟฟ้าที่มีแรงต้านอากาศสูง

(ที่มา: <https://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/rail>) (เข้าถึงเมื่อ 26/3/2562)

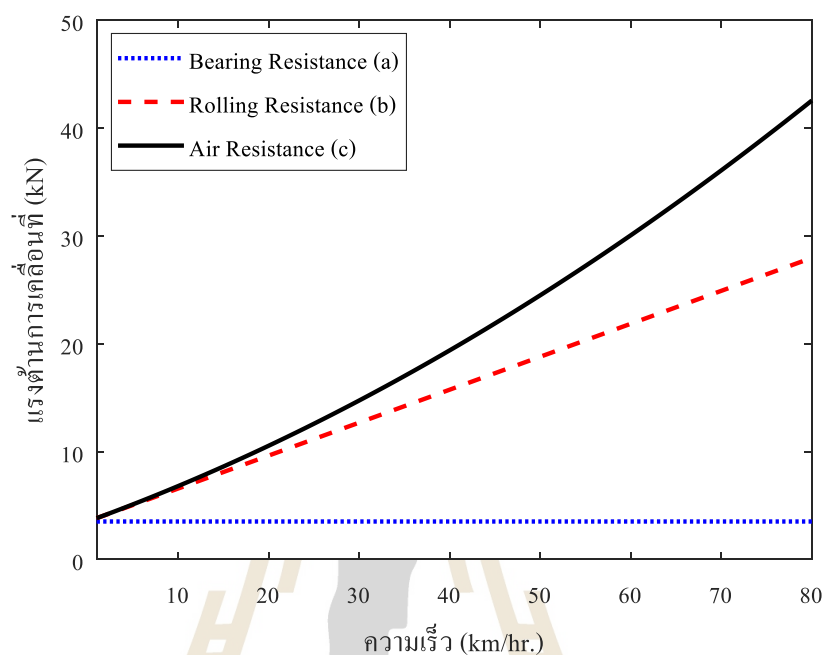


(ข) รูปทรงของรถไฟฟ้าที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดแรงต้านอากาศ

(ที่มา: <https://asknature.org/idea/shinkansen-train/attachment/500-series-shinkansen/#.XKH0Q5gzaM8>) (เข้าถึงเมื่อ 26/3/2562)

รูปที่ 2.37 การเปรียบเทียบรูปทรงของรถไฟฟ้า

เมื่อทราบถึงที่มาของค่าของสัมประสิทธิ์ของตัวแปรของสมการแล้ว รูปที่ 2.38 แสดงถึงตัวอย่างของค่าแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการแล้ว



รูปที่ 2.38 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของสมการแล้ว

นอกจากนี้ยังมีแรงเสียดทานประเภทอื่น ที่ต้องนำมาคำนวณแรงในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ได้แก่ แรงเสียดทานของรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง มีสาเหตุมาจาก ขอบนอกของวงล้อที่ทำหน้าที่เกาะทางรถไฟเกิดแรงเสียดทานจากการไถล และล้อด้านนอกหมุนเร็วกว่าล้อด้านใน จึงทำให้เกิดการสลิปเป็นเหตุให้แรงเสียดทานจากการไถลเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วแรงเสียดทานทางโค้งสามารถคำนวณด้วยสมการ Roeckl's formula ดังแสดงที่สมการที่ 2.8 และ สมการที่ 2.9 ตามเงื่อนไขรัศมีความโค้งของทางรถไฟ (Mongkoldee et al., 2016)

$$F_{curve} = \begin{cases} \frac{6.3}{r(s) - 55} m_{eff}; & \text{for } r(s) \geq 300m \\ \frac{4.91}{r(s) - 30} m_{eff}; & \text{for } r(s) \leq 300m \end{cases} \quad (2.8)$$

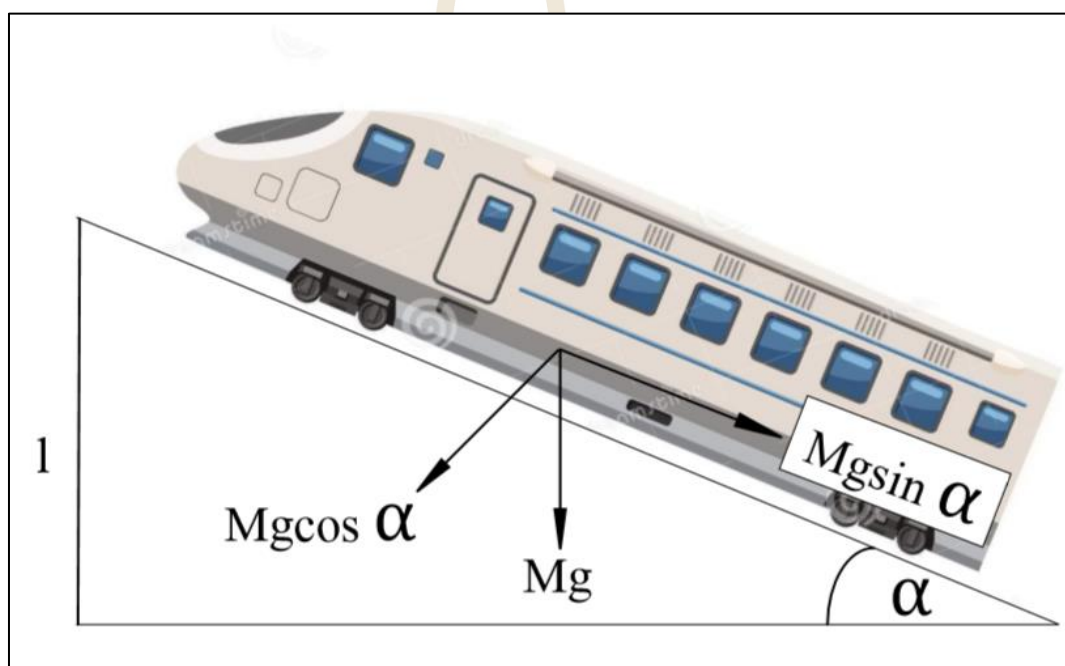
(2.9)

โดยที่ F_{curve} คือ แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง (kN)

$r(s)$ คือ รัศมีความโค้งของทางรถไฟ (m)

2.12.2 แรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน (Gradient Resistance)

รถไฟฟ้าขณะวิ่งขึ้นหรือลงเนิน ต้องการแรงจุดลากเพื่อเคลื่อนที่ให้ผ่านพ้นไปได้ โดยทั่วไปเส้นทางเดินรถของรถไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงของความชันตามระดับสถานีขนส่ง ผู้โดยสารที่ถูกสร้างขึ้นและค่าความชันของเส้นทางรถไฟฟ้าสามารถถูกกำหนดได้หลายรูปแบบ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับข้อมูลความชันจากแบบทางวิศวกรรมในรูปแบบ $\%Slope$ ดังนั้นการพิจารณาแรงต้านทานจากการวิ่งขึ้น-ลงเนินจึงต้องแปลงค่าจาก $\%Slope$ ให้เป็นมุม α โดยการใช้สมการที่ 2.10 และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงสมมุติให้มวลของรถไฟฟ้าทั้งหมด เป็นมวลจุดเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.39 ดังนั้นการคำนวณแรงต้านทานชนิดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13 (Mongkoldee et al., 2016)



รูปที่ 2.39 โมเดลจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในสภาพรางต่างระดับ

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\%slope}{100}\right) \quad (2.10)$$

$$\sin \alpha = \tan \alpha = \frac{1}{x} \quad (2.11)$$

$$\cos \alpha \approx 1 \quad (2.12)$$

$$F_{Grad} = \frac{\pm mg}{x} \quad (2.13)$$

โดยที่ % *slope* คือ ความชันของเส้นทาง (%)
g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s²)

2.12.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บนรถไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (Traction Energy consumption: E_{Tt}) และพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวก (Auxiliary Energy Consumption: E_{aux}) สำหรับใช้ในระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ พัดลมระบายความร้อน ระบบติดต่อสื่อสารและระบบไฟฟ้าสำรองโดยชาร์จด้วยแบตเตอรี่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดเป็นผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวก โดยพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวกมีค่าคงที่ ส่วนพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านั้นแปรผันตามความเร็ว และแรงฉุดลากของหัวรถจักร ประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนมีผลต่อแรงฉุดลากของหัวรถจักร แสดงในสมการที่ 2.14 ขณะที่รถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.15 แต่ถ้าหากรถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดการเบรก สมการของแรงฉุดลากจะเปลี่ยนแปลงเป็นสมการที่ 2.16 และผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเดินทางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 (Sumpavakup et al., 2018)

$$\eta = \begin{cases} \frac{\eta_{gear} \times n_{net_motor_motoring\ mode}}{100} & ; \text{ Motoring Mode} \\ \frac{\eta_{gear} \times n_{net_motor_braking\ mode}}{100} & ; \text{ Braking mode} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$P_t = \begin{cases} \frac{F_t \times v}{\eta} & ; \text{ Traction mode} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$F_b \times v \times \eta; \text{ Braking mode} \quad (2.16)$$

$$E_{total} = \left(\frac{P_t \Delta t}{3600} \right) + E_{aux} \quad (2.17)$$

โดยที่	$\eta_{gear} \times \eta_{net_motor_motoring\ mode}$	คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะทำงาน ในโหมดขับเคลื่อน
	$\eta_{gear} \times \eta_{net_motor_braking\ mode}$	คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะทำงาน ในโหมดเบรก
	η_{gear}	คือ ประสิทธิภาพของชุดเกียร์ (%)
	E_{aux}	คือ พลังงานที่ใช้ในระบบอำนวยความสะดวกบนรถไฟฟ้า (kWh)
	P_t	คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (kN)
	v	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)
	E_{total}	คือ พลังงานรวมที่รถไฟฟ้าใช้ในการ เดินทาง (kWh)

2.12.4 การปรับปรุงความเร็ว และ ตำแหน่งของรถไฟฟ้า

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่วิ่งไปตามเส้นทางต่าง ๆ ต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านั้นมีพื้นฐานมาจากสมการการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ ดังนั้นการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถ คำนวณได้จากสมการที่ 2.18 และ สมการที่ 2.19

$$v_{final} = v_{initial} + a\Delta t \quad (2.18)$$

$$S_{final} = S_{initial} + v_{initial}\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (2.19)$$

โดยที่	$v_{initial}$	คือ ความเร็วที่จุดเริ่มต้นของรถไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาใด ๆ (m/s)
	v_{final}	คือ ความเร็วที่จุดสุดท้ายของรถไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาใด ๆ (m/s)
	$S_{initial}$	คือ ตำแหน่งที่จุดเริ่มต้นของรถไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาใด ๆ (m)
	S_{final}	คือ ตำแหน่งที่จุดสุดท้ายของรถไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาใด ๆ (m)
	a	คือ อัตราเร่ง (m/s^2)
	Δt	คือ ช่วงเวลาใด ๆ (s)

2.13 การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรง

เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของแรงดันไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ อาทิเช่น แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อย แรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่รางรับน้ำหนัก เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ส่วนอื่นเพิ่มเติมได้ เช่น กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในรางตัวนำ การวิเคราะห์ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องอาศัยการคำนวณแบบวนรอบ เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรเรียงกระแส ทำให้การวิเคราะห์วงจรไม่อาจจะใช้วิธีการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐานได้ และอีกเหตุผลหนึ่งได้แก่ แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีคุณลักษณะไม่เหมือนกับแบตเตอรี่ คือกระแสไฟฟ้าสามารถไหลออกจากขั้วบวกได้เท่านั้นไม่สามารถไหลย้อนกลับได้เนื่องจากมีไดโอดกันกระแสย้อนกลับ จึงเป็นเหตุผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรแบบเม็ชได้

เครื่องมือการคำนวณเชิงตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้ามีหลายวิธีการ เช่น วิธีเกาส์ซีเซลล์ หรือนิวตันราฟสันก็สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้ รวมถึงวิธีการที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยเฉพาะ อย่างเช่น วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า (Current Injection Method : CIM) เป็นต้น

2.14 วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

คิดค้นโดย J. Kennedy และ R. Eberhart ในปี 1995 เป็นการสังเกตการณ์การเคลื่อนไหวของฝูงสัตว์เช่น ฝูงนกหรือฝูงปลา เป็นต้น ขณะที่สัตว์เหล่านี้หาอาหารจะมีการส่งสัญญาณเพื่อสื่อสารให้ทราบถึงตำแหน่งที่มีอาหารอยู่และเคลื่อนที่ไปหาอาหารที่ได้รับข้อมูลมา ดังนั้นเมื่อได้รับแนวคิดเหล่านั้นแล้ว PSO เป็นวิธีการค้นหาค่าตอบด้วยการใช้อนุภาคจำนวนมากที่แทนฝูงสัตว์ต่าง ๆ เคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ค้นหา เพื่อหาอาหารหรือคำตอบที่ดีที่สุด โดยองค์ประกอบของ PSO มีดังนี้

2.14.1 อนุภาค

อนุภาคเป็นสมาชิกที่อยู่ในกลุ่มของประชากร โดยที่อนุภาคจะประกอบด้วยความเร็วและตำแหน่ง เมื่อดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีนี้ อนุภาคจะถูกสร้างขึ้นมาในจำนวนมากและปล่อยเข้าสู่พื้นที่ค้นหา โดยรูปแบบของพื้นที่ค้นหาถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และ ณ เวลาใด ๆ ตำแหน่งของอนุภาคตัวอื่น ๆ จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของอนุภาคที่อยู่ใกล้ผลเฉลยมากที่สุด ซึ่งอนุภาคที่มีตำแหน่งดีที่สุดในแต่ละรอบถูกเรียกว่า “Personal Best Position ”

2.14.2 ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค

ตำแหน่งและความเร็วในตอนต้นของการคำนวณจะถูกผู้ใช้กำหนดหรือสุ่มขึ้นมา โดยที่ตำแหน่งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นผลลัพธ์ที่ของการนำความเร็วของอนุภาคไปแทนในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งถ้าหากนำอนุภาคหลายร้อยตัวที่มีความเร็วแตกต่างกันนำมาแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ตำแหน่งของอนุภาคจำนวนมาก และเมื่อนำตำแหน่งเหล่านั้นมาเปรียบเทียบเงื่อนไขของฟังก์ชันจะทำให้พบตำแหน่งที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มของฝูงอนุภาค ซึ่งถูกเรียกว่า “Personal Best Position”

2.14.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เป็นฟังก์ชันที่กำหนดเพื่อใช้ในการกำหนดรูปแบบของการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์มี 2 รูปแบบได้แก่ ฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่สูงที่สุดและฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่ต่ำที่สุด การที่อนุภาคจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ข้อกำหนดเงื่อนไขควบคุมอื่น ๆ เข้าไปด้วย โดยผลลัพธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ถูกเรียกว่า “Fitness Value” หรือค่าความฟิต

สรุปขั้นตอนการดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

การดำเนินงานเริ่มต้นจากการสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขจำกัดขอบเขตการหาค่าที่เหมาะสม ต่อมาสร้างฝูงอนุภาคร่วมกับสุ่มค่าความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคภายใต้ขอบเขตความเร็วสูงสุด ต่อมานำอนุภาคไปแทนลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าตำแหน่งของอนุภาคหรือ “Fitness Value” หลังจากนั้นนำค่าตำแหน่งของอนุภาคมาจัดเรียง หาค่าที่ต่ำหรือสูงที่สุดตามทีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดเอาไว้ ตำแหน่งที่ดีที่สุดถูกนำไปเป็น Personal Best Position เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ รอบการคำนวณอื่นต่อไป

หลังจากที่ทราบขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแล้ว ต่อมาจะอธิบายรายละเอียดของอนุภาค โดยจำลองให้อนุภาคคือนก การบินของนกหากมองเป็นพารามิเตอร์ประกอบด้วย ตำแหน่งที่นกกำลังบินอยู่และความเร็วในการเคลื่อนที่ หลังจากนั้นนกฝูงนี้จะถูกจำลองให้บินไปในแหล่งอาหาร

โดยที่ทุกตำแหน่งที่นกได้บินผ่านเพื่อไปหาอาหารจะถูกประเมินโดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และผลจากการประเมินทำให้ทราบถึงค่าความฟิตของนกแต่ละที่ตำแหน่งต่าง ๆ

หลังจากที่ประเมินค่าความฟิตของนกแต่ละตัวเสร็จแล้ว ต่อมาต้องนำค่าความฟิตแต่ละตัวมาหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อกำหนดให้เป็นผู้นำของนกตัวอื่น โดยที่ตำแหน่งของนกที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็น Personal Best Position และถูกกำหนดให้หยุดอยู่กับที่และนกตัวอื่นจะปรับตำแหน่งตามตำแหน่งของนกที่ดีที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้ถูกเรียกว่า การอัปเดตค่า P_{best}

โดยทั่วไปการจำลองหาค่าที่เหมาะสมนิยมจำลองซ้ำหลาย ๆ รอบซึ่งในแต่ละรอบมีโอกาสที่ผลเฉลยที่ดีที่สุดมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นผลลัพธ์ในแต่ละรอบจึงต้องถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดซึ่งถูกเรียกว่า Global Best Position หรือ G_{best}

หลังจากที่เราได้ทราบค่า P_{best} และ G_{best} แล้วขั้นตอนต่อมาคือการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของนกแต่ละตัวตามนกตัวที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการวนรอบการคำนวณรอบต่อไป โดยใช้สมการที่ 2.20 และ สมการที่ 2.21 ตามลำดับ

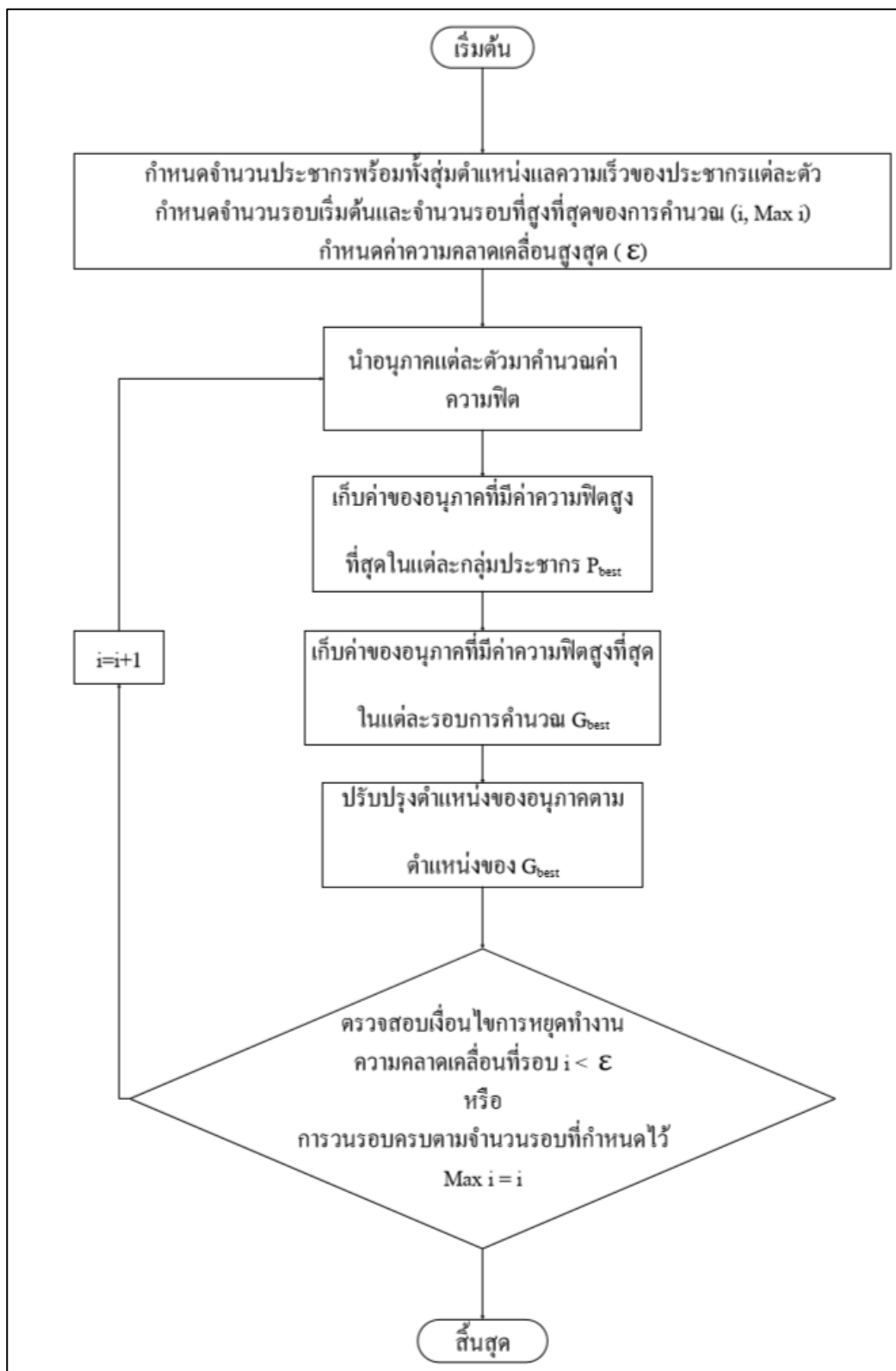
$$v_i(t+1) = v_i(t) + (c_1 \times rand() \times (p_i^{best} - p_i(t))) + (c_2 \times rand() \times (p_{Gbest} - p_i(t))) \quad (2.20)$$

$$p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t) \quad (2.21)$$

โดยที่	$v_i(t+1)$	คือ ความเร็วใหม่ของอนุภาคนกตัวที่ i
	c_1, c_2	คือ สัมประสิทธิ์น้ำหนักสำหรับ P_{best} และ G_{best} ตามลำดับ
	$p_i(t)$	คือ ตำแหน่งของอนุภาคนกตัวที่ i ในรอบที่ t
	p_i^{best}	คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคนก i
	p_{Gbest}	คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดในรอบปัจจุบัน
	$rand()$	คือ ฟังก์ชันที่ใช้ในการสุ่มค่าตัวแปร

ในการคำนวณแบบวนรอบต้องมีตัวบ่งชี้ที่ใช้ในการหยุดการคำนวณ อยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่ หยุดการคำนวณเนื่องจากคำนวณครบตามวงรอบที่กำหนดไว้และหยุดการคำนวณเนื่องจากผลเฉลยที่ได้มีค่าความผันผวนน้อยกว่าที่ตั้งเอาไว้

โดยลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคถูกแสดงในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ถูกสร้างขึ้นในอดีตที่มีคุณค่าต่อวิทยานิพนธ์ไม่ว่าจะเป็น การเสนอแนวทางแก้ไขปัญหา แนวคิดในการออกแบบโปรแกรม และความรู้ต่าง ๆ เกี่ยวกับ หัวข้อรถไฟฟ้า โดยสรุปอย่างย่อลงในตารางที่ 2.3 และหลังจากนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดความ สัมพันธ์ต่าง ๆ ของแต่ละงานวิจัยเก่าที่มีผลให้เกิดงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	ผู้ทำวิจัย	ผลดำเนินงานวิจัย
2004	Steiner, and Scholten	ได้นำเสนอประเภทของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ข้อดี ข้อเสีย และ โมเดลของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ติดตั้ง บนขบวนรถไฟฟ้า เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ แบตเตอรี่ วงล้อยუნกำลังและตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยข้อเสียของแบตเตอรี่คือ การมีอายุการใช้งานที่สั้น มีวงจรการคายประจุและอัดประจุน้อย จึงทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้บนรถไฟฟ้า ข้อเสียของวงล้อยุน กำลังคือ มีขนาดใหญ่ มีราคาแพงรวมกับพื้นที่ของ รถไฟฟ้าที่มีอย่างจำกัดจึงทำให้วงล้อยุนกำลังไม่เป็นที่ นิยมติดบนขบวนรถไฟฟ้า และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็น อุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้มีความหนาแน่นของ พลังงานที่สูงกว่าตัวเก็บประจุทั่วไป มีขนาดที่ เหมาะสมกับพื้นที่บนรถไฟฟ้า ไม่มีเสียงรบกวนขณะที่ อุปกรณ์กำลังทำงานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
2010	Grigans and Latkovskis	ได้นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกลยุทธ์ ควบคุมการจัดการพลังงานที่นำเสนอมี 4 ชนิด ได้แก่ กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย กลยุทธ์การควบคุม กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยประยุกต์ร่วมกับการทำนาย กลยุทธ์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบตัดจ่ายอดกำลังไฟฟ้า และ กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบสัดส่วน

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	ผู้ทำวิจัย	ผลดำเนินงานวิจัย
2010	Domínguez, Fernández, Cucala, and Blanquer	ได้นำเสนอวิธีการที่สามารถลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าด้วยการสร้างเส้นโค้งความเร็วใหม่โดยใช้เวลาและตัวบ่งชี้ความสบายในการเดินของผู้โดยสารเป็นเงื่อนไขซึ่งผลลัพธ์จากการออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพียงอย่างเดียวสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 25%
2013	Iannuzzi, Pagano and Tricoli	ได้ประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุสองชั้นเพื่อใช้รักษาแรงดันในสายส่งในระบบรางของรถไฟฟ้า โดยได้ทดลองศึกษาที่ระบบรถไฟฟ้าของเมือง นาโปลี ประเทศอิตาลีและได้คำนวณน้ำหนัก ขนาดของอุปกรณ์ตัวเก็บประจุ และตำแหน่งที่ติดตั้ง โดยผลจำลองได้แสดงถึงขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีขนาด 9.6 kWh และสามารถลดแรงดันตกได้ถึง 32 %
2013	Martinis, and Gallo	ได้นำเสนอโมเดลและวิธีการในการสร้างเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมของรถไฟฟ้าเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินทางระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าไปยังสถานีต่าง ๆ เพื่อพัฒนากลยุทธ์ที่ใช้ในการขับรถไฟฟ้าโดยกลยุทธ์ในการขับรถไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 21 %
2014	Matsuura	ได้สร้างเส้นโค้งความเร็วด้วยวิธีการไดนามิกส์โปรแกรม และได้กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการที่ใช้ในการหาเส้นโค้งความเร็ว ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งวิธีการนี้ใช้เวลาในการประมวลผลหาค่าที่เหมาะสมตามความละเอียดของชุดข้อมูลโดยการทดสอบนั้นได้ทดสอบโดยการจำลองการวิ่งของรถไฟฟ้าเป็นระยะทาง 1,000 m และ 10 km โดยผลลัพธ์นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วที่เหมาะสมสามารถการใช้พลังงานได้ถึง 4.28 kWh ที่ระยะทาง 10 km

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	ผู้ทำวิจัย	ผลดำเนินงานวิจัย
2015	Iannuzzi, and Tricoli	ได้นำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานในการเคลื่อนที่โดยการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบติดตั้งบนรถไฟฟ้าและเสนอกลยุทธ์ที่ควบคุมการคายพลังงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า โดยจากการจำลองระบบรถไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดติดตั้งบนรถไฟฟ้า สามารถช่วยลดค่ายอดของการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ได้สูงถึง 50% และยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากพลังงานที่ได้จากการเบรกถึง 30 %
2015	Tang, Dick, and Feng	ได้สร้างเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยมีเงื่อนไขในการลดการใช้พลังงานด้วยวิธีการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยผลลัพธ์ของการจำลองระบบรถไฟฟ้า ได้แสดงถึงการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและการลดความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า
2015	Kulworawanichpong	ได้นำเสนอการคำนวณการเคลื่อนที่และประเมินประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าและองค์ประกอบของการคำนวณเช่น การคำนวณแรงจุดลาก การคำนวณแรงต้านทางการวิ่ง(Rolling resistance, Aerodynamic drag resistance และ Gradient force) และในส่วนท้ายของเอกสารได้นำเสนอวิธีการคำนวณการไหลของระบบรถไฟฟ้าแบบเดินรถหลายขบวน โดยเปรียบเทียบวิธีการคำนวณรอบ 3 วิธีการได้แก่ เกาส์ซีเดล นิวตัน ราฟสันและวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า โดยผลลัพธ์ของเอกสารชุดนี้ได้แสดงผลลัพธ์ของ เส้นโค้งความเร็ว ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อย กำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อย

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ค.ศ.	ผู้ทำวิจัย	ผลดำเนินงานวิจัย
2016	Villalba, Ricardo, Pablo, and Andres	ได้กล่าวถึงเทคนิคการขับรถไฟฟ้าย่างมีประสิทธิภาพ โดยเทคนิคนี้จะสร้างเส้นโค้งความเร็ว ระหว่างสองสถานีที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด แต่ไม่คำนึงถึงเวลาในการเดินทางและความสะดวกสบายของผู้โดยสาร โดยผลลัพธ์ของการจำลองผลแสดงให้เห็นถึงการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับรถไฟฟ้ายแบบดั้งเดิม โดยสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 19 %
2016	Mongkoldee, Leeton and et al.	ได้นำเสนอการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายแบบขบวนเดียวพร้อมทั้งศึกษาแรงดันที่วางรังอันเกิดจากแรงดันตกคร่อมระหว่างวางรังกับกราวด์โดยใช้วิธีการคำนวณรอบแบบชนิดกระแสไฟฟ้า การจำลองผลใช้เส้นทางของรถไฟฟ้ายบีทีเอส ซึ่งผลลัพธ์จากการจำลองได้นำเสนอ เส้นโค้งความเร็ว กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ายกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อย กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่รางที่สามและแรงดันที่วางรัง
2016	Mohammad, and Sandidzadeh	ได้ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมด้วยขั้นตอนเชิงพันธุกรรม และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระบบอนุกรมการทดลอง เพื่อหาจุดที่ใช้ในการเปลี่ยนโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าย

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

ค.ศ.	ผู้ทำวิจัย	ผลดำเนินงานวิจัย
2017	Ghaviha, Campillo, Bohlin, and Dahlquist	การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานในระบบรถไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าถูกใช้เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนของรถไฟฟ้าและมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบที่ติดตั้งอยู่ตามสถานีไฟฟ้าและพลังงานเก็บได้ไม่สามารถส่งให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่นที่ต้องการใช้ได้ และอีกประเภทหนึ่งคืออุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งตามสถานีไฟฟ้าจะมีขนาดใหญ่กว่าประเภทที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าเนื่องจากต้องรองรับพลังงานไฟฟ้าจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนทุกขบวนที่อยู่ในส่วนเดียวกัน
2017	Sumpavakup Ratniyomchai and Kulworawanichpong	ได้ศึกษาปัญหาค่ายอดของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนโดยการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าร่วมกับกลยุทธ์การตัดค่ายอดกำลังไฟฟ้า ซึ่งพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในอุปกรณ์เก็บพลังงานนั้นสามารถอัดประจุได้จากช่วงเบรกของรถไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีย่อยลดลง 63.49 % และการใช้พลังงานสุทธิลดลง 15.56 %

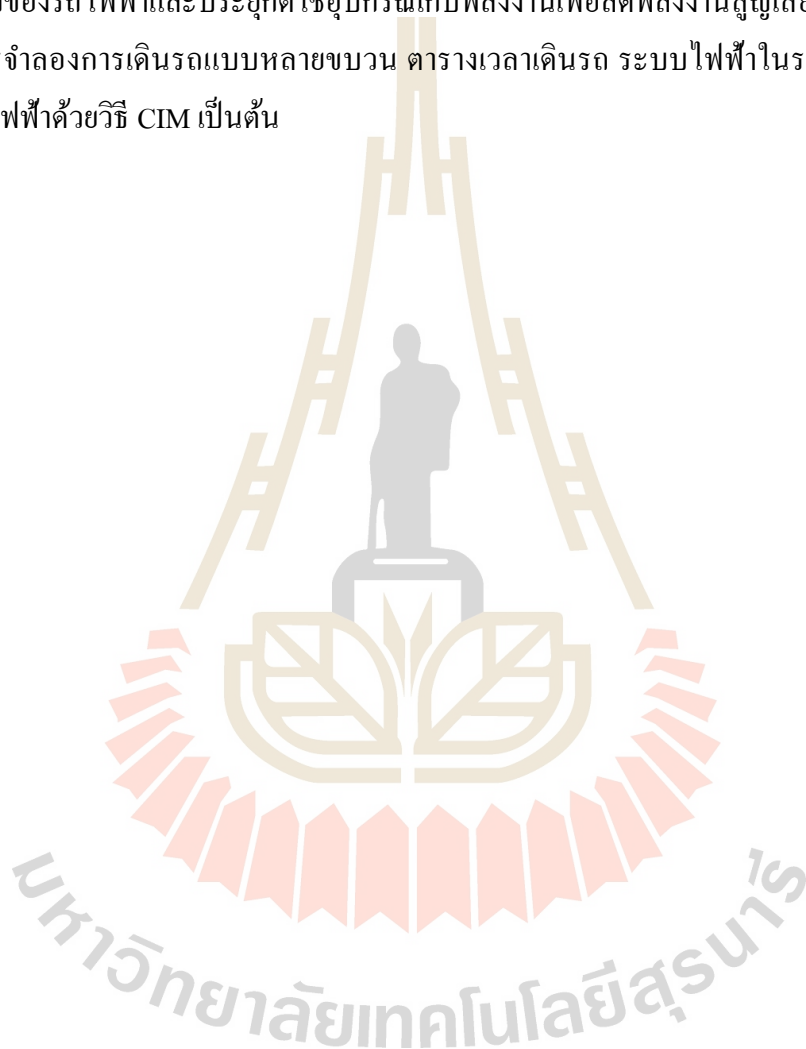
2.16 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากวรรณกรรมที่ได้ศึกษามา ทำให้ทราบว่าเมื่อศึกษาตามเวลาที่มีการตีพิมพ์งานวิจัย อุปกรณ์เก็บพลังงานที่ใช้กับระบบรางถูกประยุกต์ใช้ในช่วงก่อนปี 2543 สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งตามเส้นทางเดินรถ โดยในยุคนั้นได้ประยุกต์ใช้ วงล้อตุนกำลัง แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Steiner, and Scholten, 2004) ต่อมาในปี 2553 มีนักวิจัย 2 ท่านได้นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงาน 4 ประเภท โดยมุ่งเน้นกลยุทธ์ควบคุมการคายประจุแบบสัดส่วนเพื่อใช้ในการควบคุม

กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงานขณะที่คายประจุ (Grigan and Latkovskis, 2010) นอกจากการใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานเพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเบรกและนำไปใช้ในการลดการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน หลังจากนั้นในปี 2557 ได้มีกลุ่มนักวิจัยจำลองประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุสองชั้นเพื่อรักษาแรงดันในระบบสายส่งของเมืองนาโปลี ประเทศ อิตาลี โดยผลการจำลองได้แสดงถึงความสามารถของอุปกรณ์เก็บพลังงาน อาทิเช่น การลดแรงดันตกภายในสายส่งของระบบรถไฟฟ้า ที่สามารถลดลงได้ถึง 32 % (Iannuzzi, Pagano and Tricoli, 2013) ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถทำลดการใช้พลังงานได้และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำคือ การออกแบบเส้นโค้งความเร็ว ในปี 2553 ได้มีการนำเสนอวิธีการลดการใช้พลังงานโดยการออกแบบเส้นโค้งความเร็วใหม่โดยใช้เวลาในการเดินทางและความสะดวกสบายของผู้โดยสารเป็นวัตถุประสงค์ในการสร้างเส้นโค้งความเร็ว ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่า การออกแบบเส้นโค้งความเร็วด้วยวัตถุประสงค์แบบนี้สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 25 % (Domínguez, Fernández, Cucala, and Blanquer, 2010) การศึกษาการใช้พลังงาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถไฟฟ้าร่วมกับกลยุทธ์ควบคุมการคายพลังงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า จากการจำลองพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 50 % และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานที่ได้จากการเบรก 30 % (Iannuzzi and Tricoli, 2015) ซึ่งต่อมาในปี 2560 ได้มีการนำกลยุทธ์ตัดคายออกกำลังไฟฟ้ามาใช้ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ถูกจำลองด้วยระบบรถไฟฟ้า BTS ในประเทศไทย (Sumpavakup, 2017) หลังจากนั้นมีการพัฒนากลยุทธ์การสร้างเสียโค้งความเร็ว โดยผลจำลองการเดินทางของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีพบว่า พลังงานที่ใช้ลดลงถึง 21 % หลังจากปรับเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็ว (Martinis and Gallo, 2013) ในปี 2557 วิธีการจำลองแบบไดนามิกส์ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเส้นโค้งความเร็ว โดยเส้นโค้งความเร็วที่สร้างขึ้นถูกทดสอบด้วยเส้นทางจำลองที่มีความยาว 1 km และ 10 km โดยที่เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 4.28 kWh (Matsuura, 2014) เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าซึ่งเป็นพื้นฐานของการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า จำเป็นต้องศึกษาโปรแกรมจำลองประสิทธิภาพการเดินทาง ซึ่งในปี 2558 ได้มีนักวิจัยได้นำเสนอการจำลองเส้นโค้งความเร็วที่เป็นพื้นฐานในการศึกษาระบบรถไฟฟ้า ผลจากการสร้างเส้นโค้งความเร็วทำให้ทราบถึงการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ ระยะเวลาในการเดินทาง และตำแหน่งของรถไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา การสร้างเส้นโค้งความเร็วต้องอาศัยการคำนวณด้านพลวัตของรถไฟฟ้าที่ประกอบด้วย การคำนวณแรงจุดลากของรถไฟฟ้าและการคำนวณแรงต้านทานแบบต่าง ๆ เป็นต้น (Kulworawanichpong, 2015)

2.17 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้ศึกษาทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE Science Direct หนังสือและสื่ออ้างอิงบนเว็บไซต์ เป็นต้น ทำให้ทราบถึงผลการดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์แนวทางต่าง ๆ ได้ชัดเจน ในส่วนของทฤษฎีและเนื้อหาเป็นส่วนที่ให้ความเข้าใจ และการดำเนินการเบื้องต้นก่อนที่จะนำเข้าสู่การศึกษาเรื่องการออกแบบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าและประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานเพื่อลดพลังงานสูญเสียเนื่องจากการเบรก เช่น การจำลองการเดินรถแบบหลายขบวน ตารางเวลาเดินรถ ระบบไฟฟ้าในระบบราง การหาค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธี CIM เป็นต้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

จากความสำคัญของปัญหาและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มุ่งศึกษาการวางแผนการจัดการพลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าโดยอ้างอิงข้อมูลรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้แก่ ลดพลังงานที่รถไฟฟ้าใช้ในการเดินทางและนำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงาน การจำลองการเดินทางรถไฟฟ้าหลายขบวนและการศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยมีขั้นตอนการดำเนินการในแต่ละส่วนดังนี้

ส่วนแรกของการจำลองคือ การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่โดยอ้างอิงจากเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล โดยข้อมูลที่จำเป็นต้องสร้าง ได้แก่ ตำแหน่งของสถานี รูปแบบของเส้นทาง ความชันของเส้นทาง ลักษณะทางโค้งของรางรถไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเพื่อประเมินการใช้พลังงานในส่วนถัดไป

ส่วนที่สอง คือการจำลองการเดินทางรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียวเพื่อนำมาใช้เป็นกรณีฐานและประยุกต์สร้างฟังก์ชันกัณฑ์ประสมค่าในหัวข้อถัดไป โดยในส่วนนี้จำเป็นต้องจำลอง แรงดูดลากวิกฤต แรงเบรกวิกฤต แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ ลักษณะของกำลังไฟฟ้าและการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

ส่วนที่สาม คือการจำลองการเดินทางรถไฟฟ้าแบบหลายขบวน โดยการนำการจำลองการเดินทางรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียวมา พิจารณาการระยะห่างของเวลาการปล่อยตัว โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในส่วนนี้จะถูกนำไปเก็บค่าโดยโปรแกรมจับภาพโครงข่ายเพื่อใช้ในการจำลองหาผลเฉลยแรงดันในส่วนถัดไป

ส่วนที่สี่ คือการนำผลการจำลองในส่วนที่สองและส่วนที่สามมาใช้ในการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยและผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะของการตกของแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งอุปกรณ์และหลังติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า

ส่วนที่ห้า กล่าวถึงการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฟลูออเนติก และนำค่าที่หาได้ไปใช้ในการจำลองการเดินรถไฟฟ้าในส่วนที่สอง

ส่วนที่หก กล่าวถึงการวิเคราะห์การติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน การคำนวณขนาดอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยใช้อัตราส่วนของพลังงานที่ได้จากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืน การคำนวณการคายประจุไฟฟ้าและการอัดประจุไฟฟ้า

ส่วนที่เจ็ด กล่าวถึงการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

3.2 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของสายเฉลิมรัชมงคล

นำข้อมูลของเส้นทางเดินรถสายเฉลิมรัชมงคล อาทิเช่น ความชันของเส้นทางวิ่ง รัศมีความโค้งของเส้นทางวิ่ง ความเร็วสูงสุดของรางวิ่งแต่ละช่วง ตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารและตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เป็นต้น ไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมโครงข่ายการเดินรถไฟฟ้าด้วย Matlab 2018a ซึ่งตัวอย่างของข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 3.1

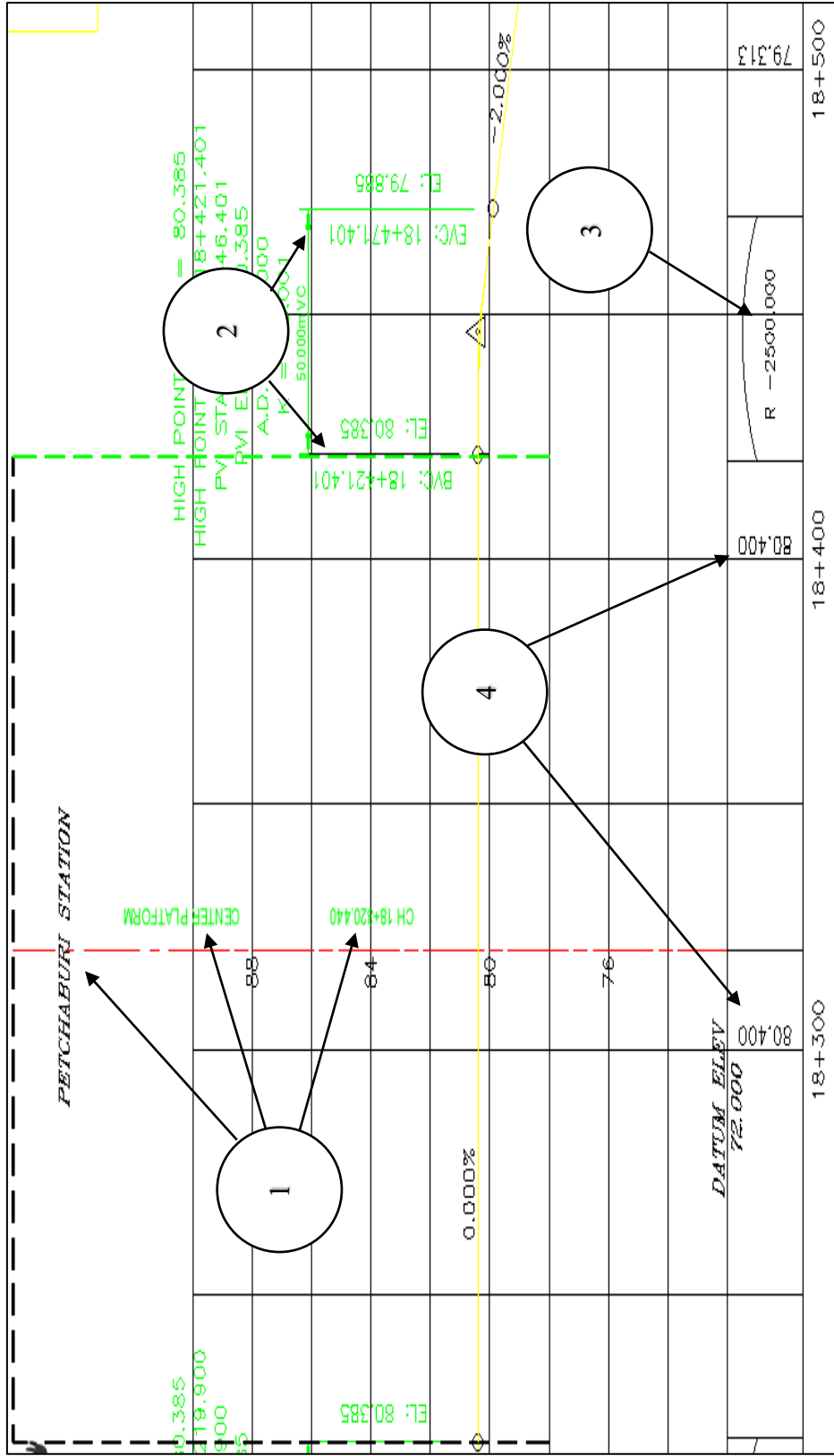
รูปที่ 3.1 คือแผนผังโครงสร้างของสถานีขนส่งผู้โดยสารกับเส้นทางรถไฟฟ้าที่ระบุถึงตำแหน่งที่ต้องของสถานีขนส่งผู้โดยสาร ความลาดชันของรางรถไฟฟ้า รัศมีทางโค้งของรางรถไฟฟ้า และความเร็วสูงสุดของเส้นทาง โดยภายในรูปจะปรากฏตัวเลขจำนวน 5 ชุด โดยตัวเลขแต่ละชุดมีความหมายดังนี้

เลข 1 หมายถึง ชื่อของสถานีขนส่งผู้โดยสารและตำแหน่งกึ่งกลางของสถานีขนส่งผู้โดยสาร ที่ประกอบด้วยตัวเลข 2 ชุด ได้แก่ 18+320.440 ซึ่งหมายถึง ตำแหน่งของกึ่งกลางของสถานีผู้โดยสาร ห่างจากตำแหน่งอ้างอิง (0+000) 18.320 กิโลเมตร โดยเลข 18 หมายถึง ระยะห่างจากจุดอ้างอิงในหน่วย กิโลเมตร และ 320.440 หมายถึงระยะห่างจากจุดอ้างอิงในหน่วยเมตร

เลข 2 ประกอบด้วย ชุดข้อมูลความชันและตำแหน่งของความชัน โดยที่ BVC และ EVC จะแสดงตำแหน่งของจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันและ EL คือค่าความชัน ณ ตำแหน่ง นั้น ๆ

เลข 3 รัศมีความโค้งของรางรถไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น R-2500.000 หมายถึง ตำแหน่งที่ 18+421 ถึง ตำแหน่ง 18.471 มีทางโค้งรัศมี 2500.000 เมตร โดยเครื่องหมายลบใช้แสดงถึง โค้งทางซ้ายหรือโค้งทางขวาเท่านั้น ไม่มีผลต่อการใช้ในการคำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่

เลขที่ 4 หมายถึงความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าที่วิ่งได้ในช่วงนั้นๆ โดยการกำหนดความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าจะกำหนดทุก ๆ 100 เมตร เช่น ระยะ 18+300 ถึง 18+400 ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 80 km/hr.



รูปที่ 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่

3.3 การจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว

เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองการเดินรถไฟฟ้าเรียกว่า เครื่องมือจำลองประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า (Train Performance Simulator :TPS) โดยส่วนของประกอบของการจำลองการเดินรถไฟฟ้าประกอบด้วย ชุดคำสั่งคำนวณแรงฉุดลากวิกฤตและแรงเบรกวิกฤต ชุดคำสั่งคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในสภาวะต่าง ๆ ชุดคำสั่งคำนวณแรงฉุดลากของรถไฟฟ้า ชุดคำสั่งคำนวณอัตราเร่งของรถไฟฟ้า ชุดคำสั่งคำนวณความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้า และชุดคำสั่งคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

3.3.1 ชุดคำสั่งคำนวณแรงฉุดลากวิกฤต

ในส่วนนี้นำเสนอผลของแรงฉุดลากวิกฤตและแรงเบรกวิกฤตที่มีต่อรถไฟฟ้า จากข้อมูลในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.10 ได้นำเสนอรูปแบบเส้นโค้งของแรงฉุดลากวิกฤตที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ฉุดลากที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรงฉุดลากคงที่ ช่วงกำลังไฟฟ้าคงที่ และช่วงกำลังไฟฟ้าลดลง โดยในแต่ละส่วนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 – 3.3

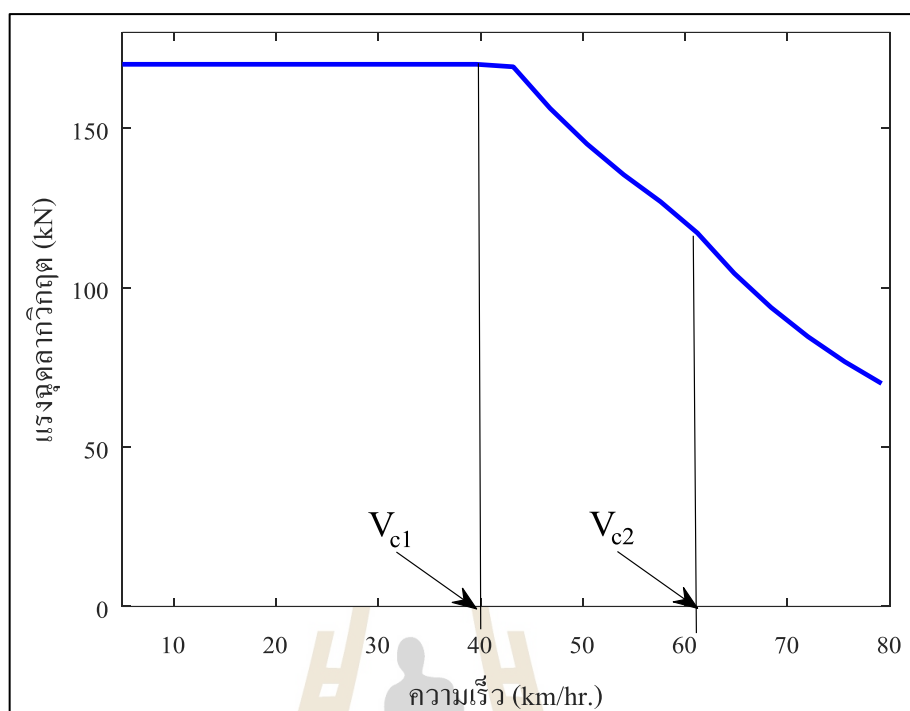
$$F = TE_{\max} \quad (3.1)$$

$$F = \frac{TE_{\max} \times V_{c1}}{v} \quad (3.2)$$

$$F = \frac{TE_{\max} \times V_{c1} \times V_{c2}}{v^2} \quad (3.3)$$

โดยที่	F	คือ แรงฉุดลากวิกฤต (kN)
	TE_{\max}	คือ แรงฉุดลากสูงสุดที่มอเตอร์ที่ไม่ทำให้ล้อรถไถล (kN)
	V_{c1}, V_{c2}	คือ ค่าคงที่ของความเร็วที่ถูกใช้กำหนดจุดเปลี่ยนช่วงการทำงานของมอเตอร์
	v	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (km/hr.)

ค่า TE_{\max} , V_{c1} และ V_{c2} ได้จากการทดสอบรถไฟฟ้าของผู้ผลิตรถไฟฟ้า ซึ่ง V_{c1} เป็นค่าความเร็วของรถไฟฟ้าที่ทำให้แรงฉุดลากของรถไฟฟ้าเปลี่ยนจากช่วงคงค่าแรงฉุดลากเข้าสู่ช่วงคงค่ากำลังไฟฟ้า และค่า V_{c2} เป็นค่าความเร็วที่แรงฉุดลากวิกฤตของรถไฟฟ้าเปลี่ยนจากช่วงคงค่ากำลังไฟฟ้าเข้าสู่ช่วงการลดลงของกำลังไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.2 รถไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองมีข้อมูลแรงฉุดลากวิกฤตดังตารางที่ 3.1 และค่าของตัวแปร V_{c1} , V_{c2} แสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของความเร็วที่ทำให้มอเตอร์เปลี่ยนช่วงการทำงาน

ตารางที่ 3.1 แรงสูงสุดลากวิถีสุงที่สุด

แรงสูงสุดลากวิถีสุงที่สุด (TE_{max}) (kN)	AW0	118
	AW1	125
	AW2	170
	AW3	180
	AW4	210

ตารางที่ 3.2 ค่าความเร็ว V_{c1}

ค่าของความเร็วที่ทำให้แรงสูงสุดลากวิถีสุงที่สุดของรถไฟฟ้าเข้าสู่ช่วงคงค่ากำลังไฟฟ้า (V_{c1}) (km/hr.)	AW0	61
	AW1	59
	AW2	43
	AW3	41
	AW4	35

ตารางที่ 3.3 ค่าความเร็ว V_{c2}

ค่าของความเร็วที่ทำให้แรงจุดลากวิกฤตของรถไฟฟ้าเข้าสู่ช่วงการลดลงของกำลังไฟฟ้า (V_{c2}) (km/hr.)	AW0	80
	AW1	60
	AW2	60
	AW3	60
	AW4	60

โดยที่ AW0–AW4 ในตารางที่ 3.1-3.3 เป็นชื่อย่อที่ใช้เรียกน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้า โดยน้ำหนักสุทธิเป็นผลรวมระหว่างน้ำหนักรถเปล่ากับน้ำหนักบรรทุกรถไฟฟ้าไม่ได้บรรทุกผู้โดยสาร จะมีน้ำหนักอยู่ที่ 107 ตัน ซึ่งถูกแทนด้วยตัวย่อ AW0

ตัวย่อ AW 1 หรือ Seated Weight แทนน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าที่บรรทุกผู้โดยสารเต็มทุกที่นั่งบนรถไฟฟ้า โดยน้ำหนักรวมในกรณีนี้อยู่ที่ 114 ตัน ในการให้บริการในชีวิตประจำวันของรถไฟฟ้าใต้ดิน น้ำหนักกรณีนี้ถูกใช้งานไม่บ่อยนักเนื่องจากตลอดทั้งวันมีผู้โดยสารใช้เกินกว่าที่นั่งที่ติดตั้งไว้บนขบวนรถไฟฟ้า

ตัวย่อ AW2 หรือ Normal Weight เป็นนิยามของรถไฟฟ้าที่มีผู้โดยสารนั่งเต็มที่นั่งทุกที่นั่ง และมีผู้โดยสารยืนอยู่ในรถไฟฟ้า จำนวน 5 คนต่อตารางเมตร น้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าในกรณีนี้อยู่ที่ 152 ตัน น้ำหนักกรณีนี้จะปรากฏในช่วงเวลาที่ไม่ว่างค่วนของการให้บริการในหนึ่งวัน

ตัวย่อ AW3 หรือ Peak Weight ถูกใช้ในการนิยามน้ำหนักรถไฟฟ้าที่มีผู้โดยสารนั่งเต็มทุกที่นั่งและมีผู้โดยสารยืนอยู่ในรถไฟฟ้า จำนวน 6 คนต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้มีน้ำหนักสุทธิ 160 ตัน น้ำหนักกรณีนี้ถูกใช้งานในช่วงชั่วโมงเร่งค่วนของการบริการในหนึ่งวัน

ตัวย่อ AW4 คือน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าที่บรรทุกผู้โดยสารเต็มทุกที่นั่งและมีผู้โดยสารยืนอยู่ในรถไฟฟ้า จำนวน 8 คนต่อตารางเมตร มีน้ำหนักสุทธิ 175 ตัน น้ำหนักกรณีนี้ถูกใช้งานไม่บ่อยนัก เนื่องจากมีข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและข้อกำหนดด้านการเดินรถไฟฟ้า ซึ่งกล่าวไว้ว่า หากรถไฟฟ้าให้บริการด้วย AW4 ในระยะทางเกินกว่า 4 สถานีขนส่งผู้โดยสาร ผู้ให้บริการรถไฟฟ้าจำเป็นต้องเพิ่มขบวนรถไฟฟ้าเข้ามาในระบบเพื่อลดความหนาแน่นของผู้โดยสารที่ใช้บริการ

3.3.2 ชุดค่าสั่งคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในสถานะต่าง

แรงต้านทานการเคลื่อนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยมีองค์ประกอบหลายส่วน ได้แก่ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ในรูปของสมการเควี แรงต้านทานการเดินทางขึ้น-ลงทางลาดชันและแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากทางโค้ง เป็นต้น โดย

ค่าตัวแปรต่างๆของรถไฟฟ้าได้จากผู้ผลิตรถไฟฟ้า ซึ่งมีตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นข้อมูลของรถไฟฟ้ายี่ห้อ Siemen รุ่น Modular Metro ที่ถูกนำมาให้บริการในประเทศไทย

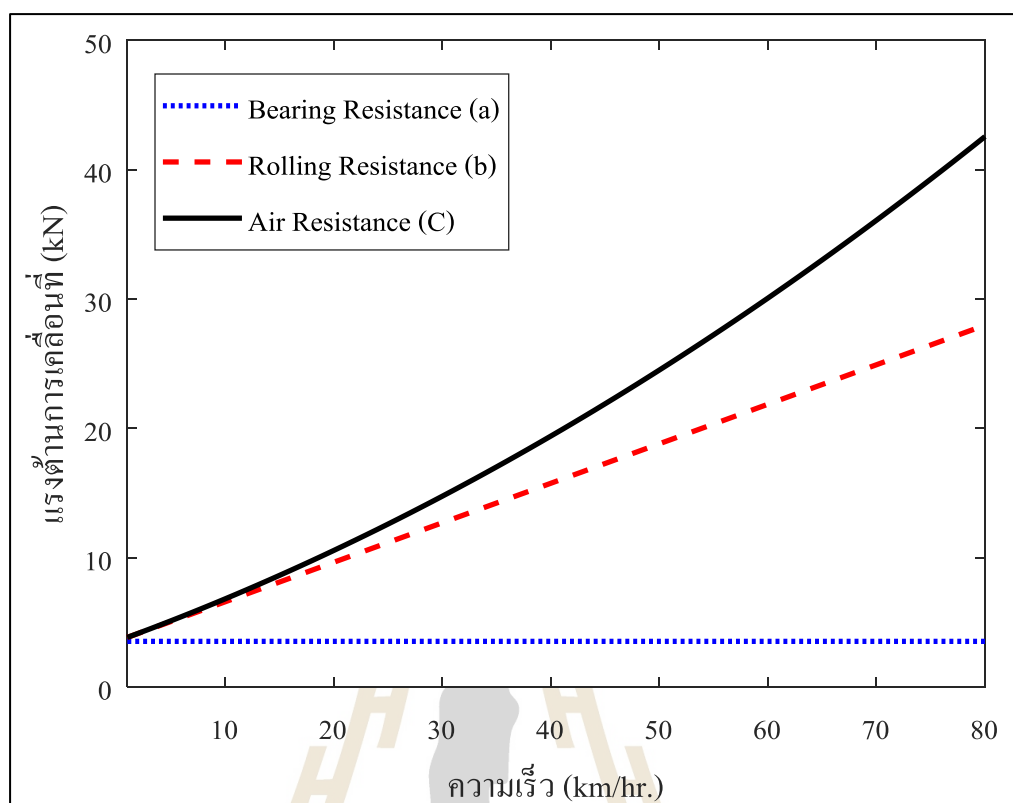
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของรถไฟฟ้ารุ่น Modular Metro เมื่อให้บริการแบบ 3 Car unit

ความเร็วสูงสุดที่ให้บริการ		80	km/hr.
อัตราเร่งสูงสุด		1.2	m/s ²
อัตราเบรกสูงสุด		0.96	m/s ²
น้ำหนักสูงสุดที่ให้บริการ		175	Ton
น้ำหนักรถเปล่า(AW0)		107	Ton
น้ำหนักรถเปล่า+น้ำหนักบรรทุก	AW1	114	Ton
	AW2	152	Ton
	AW3	160	Ton
	AW4	175	Ton
อัตราทดของเกียร์		6.316	
ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับรถไฟฟ้า		525-900	V
ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเดวี	a	3.52	kN
	b	110	kg/s
	c	13.867	kg/m

จากข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 3.4 สามารถนำไปคำนวณแรงต้านการเคลื่อนในรูปแบบต่างๆ ได้ดังนี้

ก. แรงต้านทานการเคลื่อนจากการวิ่ง

การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ด้วยสมการเดวีโดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.4 ได้ ผลการคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.3 ผลการจำลองถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่แสดงอยู่ในรูปเดียวกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของค่าตัวแปร a b และ c ของสมการเดวี โดยความหมายของค่าตัวแปรต่าง ๆ ของสมการเดวีถูกอธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.12.1

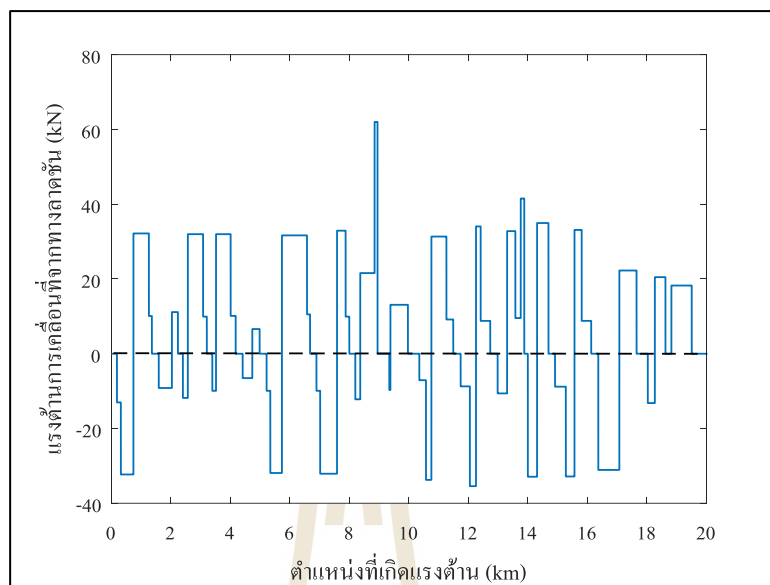


รูปที่ 3.3 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของสมการเดวี

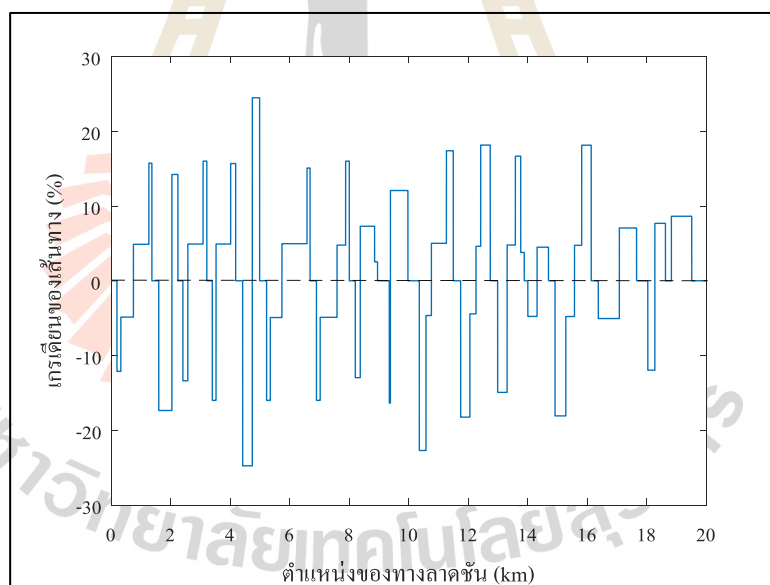
ข. แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากทางลาดชัน

การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่จากการขึ้น-ลงทางลาดชัน ต้องอาศัยข้อมูลทางภูมิศาสตร์ที่จำลองไว้ในหัวข้อ 3.2 ร่วมกับน้ำหนักของรถไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.13 ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.12.2 แรงต้านทานในรูปแบบนี้สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ขึ้นอยู่กับรูปแบบการวิ่ง ผลการจำลองแรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงทางลาดชัน เบื้องต้นถูกแสดงในรูปที่ 3.4 (ก)-(ข)

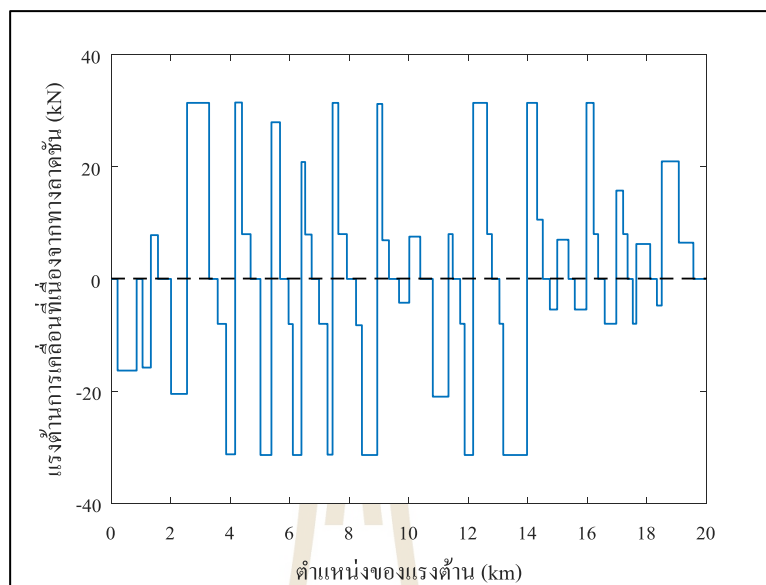
โดยข้อมูลความลาดชันตลอดทั้งเส้นทางขาขึ้นและขาล่องถูกรวบรวมและนำมาสร้างกราฟที่แสดงดังรูปที่ 3.4 (ข) และรูปที่ 3.5 (ง) หลังจากนั้นนำข้อมูลของความลาดชันไปแทนค่าในสมการที่ 2.13 ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ผลลัพธ์ของสมการจะแสดงถึงค่าแรงต้านทานเคลื่อนที่ขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเส้นทางลาดชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ



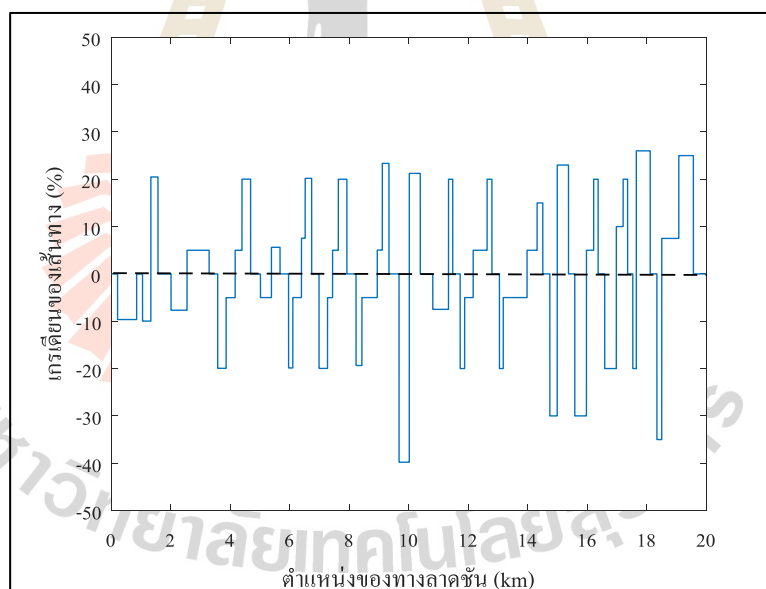
(ก) แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความลาดชันของเส้นทางเส้นทางขาขึ้น



(ข) ความชันของเส้นทางขาขึ้น



(ค) แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความลาดชันของเส้นทางเส้นทางขาล่อง

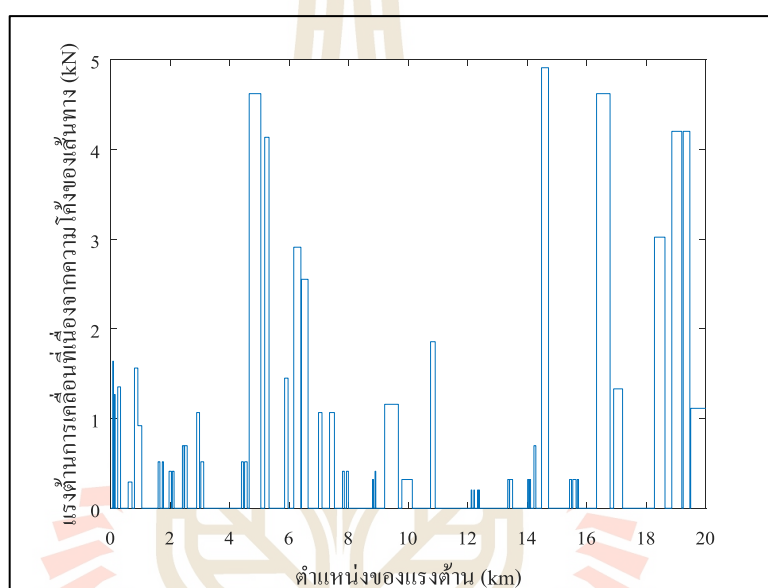


(ง) ความชันของเส้นทางขาล่อง

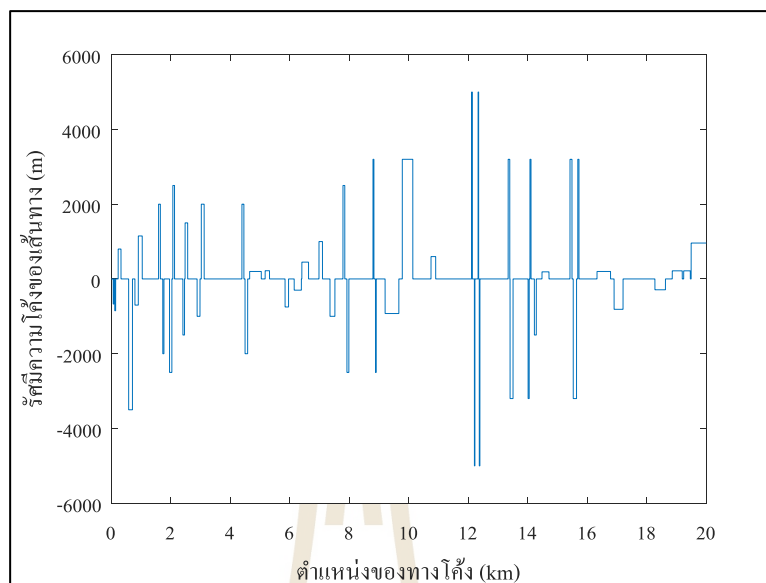
รูปที่ 3.4 ความชันของเส้นทางและแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความลาดชันของเส้นทาง
สายเฉลิมรัชมงคล

ค. แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง

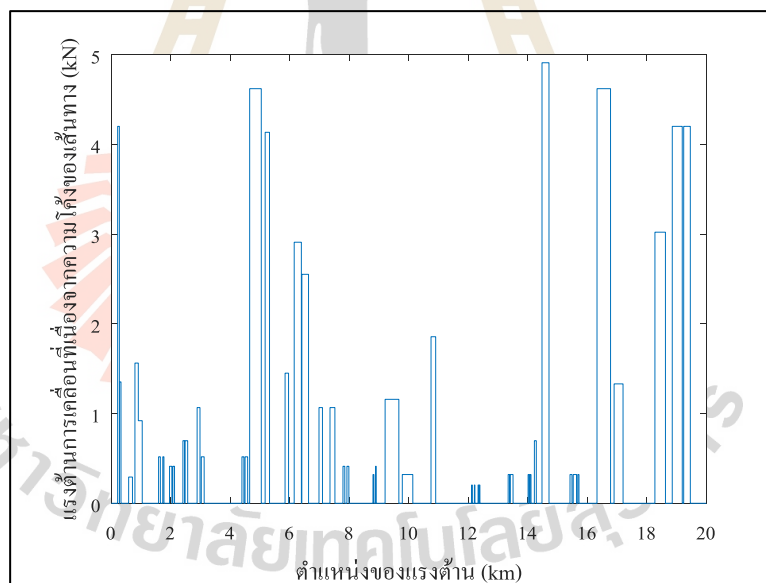
แรงต้านทานการเคลื่อนที่จากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง ขึ้นอยู่กับรัศมีความโค้งของเส้นทางรถไฟไฟฟ้า โดยแรงต้านทานการเคลื่อนที่ชนิดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ที่ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.12.1 ซึ่งผลการจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้งและรัศมีทางโค้งของเส้นทางขาขึ้นและขาลงถูกแสดงในรูปที่ 3.5 (ก)-(ง) โดยที่ค่ารัศมีของทางโค้งสามารถมีค่าได้ทั้งค่าบวกและค่าลบถูกกำหนดเพื่อใช้แทน โค้งทางซ้ายและโค้งทางขวา แต่เครื่องหมายบวกจะไม่ถูกนำไปพิจารณาในการคำนวณแรงต้าน



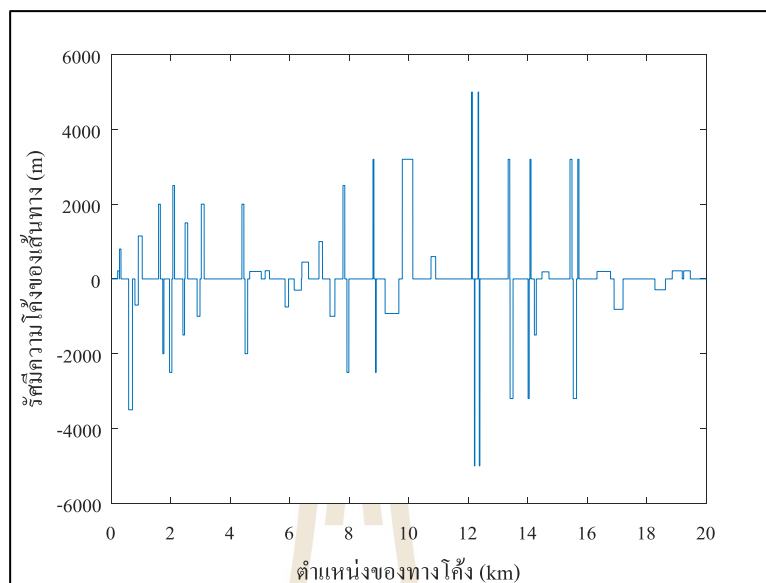
(ก) แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้งของเส้นทางขาขึ้น



(ข) รัศมีทางโค้งของเส้นทางขาขึ้น



(ค) แรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากความโค้งของเส้นทางเส้นทางขาล่อง



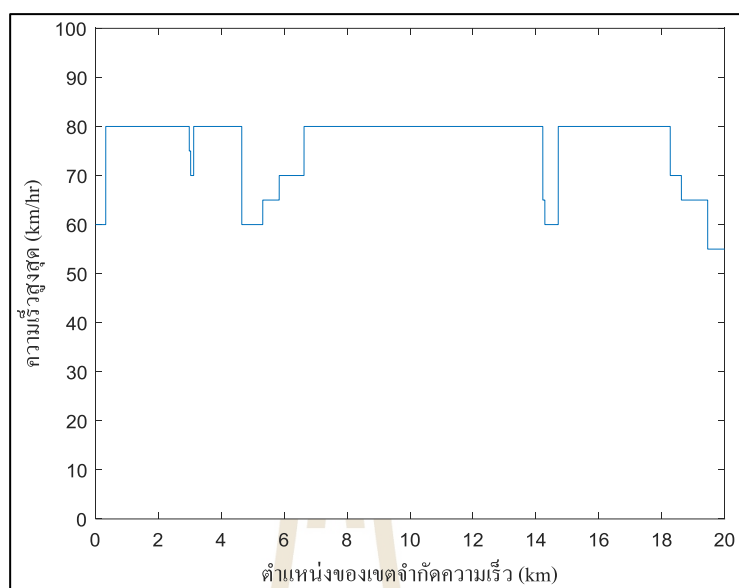
(ง) รัศมีทางโค้งของเส้นทางขาล่อง

รูปที่ 3.5 รัศมีทางโค้งและแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากทางโค้ง
ของเส้นทางสายเคเบิลรัชมงคล

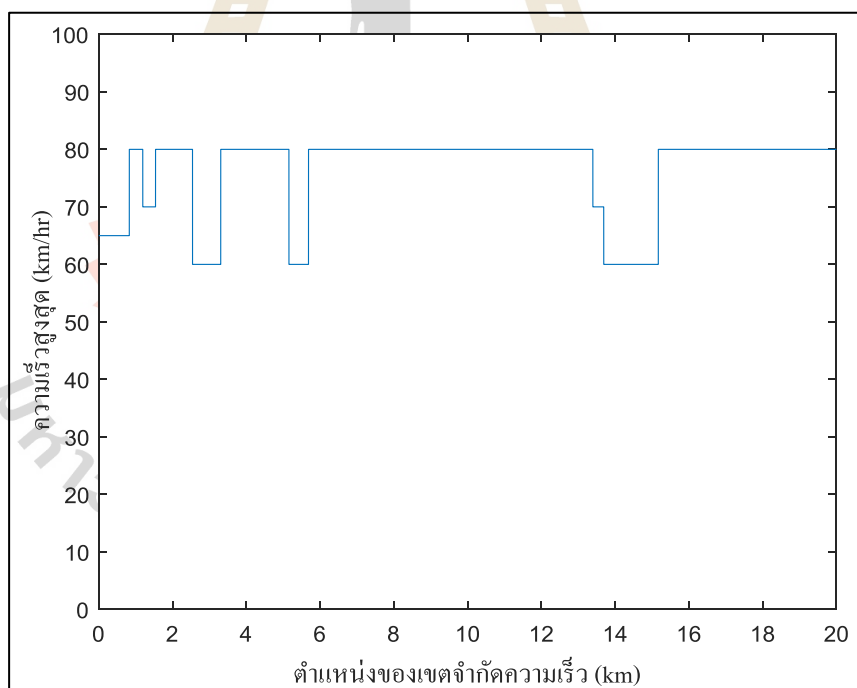
จากรูปที่ 3.5 (ข) และ (ง) แสดงถึงรัศมีทางโค้งของเส้นทางที่มีหน่วยเป็น เมตร โดยข้อมูลนี้สามารถทราบได้จาก แผนผังการก่อสร้างที่แสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากที่ทราบถึงรัศมีของทางโค้งทั้งหมดแล้ว รูปที่ 3.5 (ก) และ (ง) แสดงถึงแรงต้านทานการเคลื่อนที่จากการคำนวณด้วยสมการที่ 2.8 และ 2.9 โดยการเลือกใช้สมการขึ้นอยู่กับขนาดของรัศมีทางโค้ง

ง. ความเร็วสูงสุด

รัศมีทางโค้งนอกจากจะสร้างแรงต้านทานการเคลื่อนที่ให้กับรถไฟฟ้าแล้ว ยังถูกใช้ในการกำหนดความเร็วสูงสุดของเส้นทางแต่ละช่วงอีกด้วย โดยความเร็วสูงสุดของเส้นทางขาขึ้นและขาล่องแสดงดังรูปที่ 3.6 โดยข้อมูลความเร็วสูงสุดสามารถรวบรวมได้จากแผนผังก่อสร้างที่แสดงในรูปที่ 3.1



(ก) ความเร็วสูงสุดของเส้นทางขาขึ้น



(ข) ความเร็วสูงสุดของเส้นทางขาล่อง

รูปที่ 3.6 ความเร็วสูงสุดของเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล

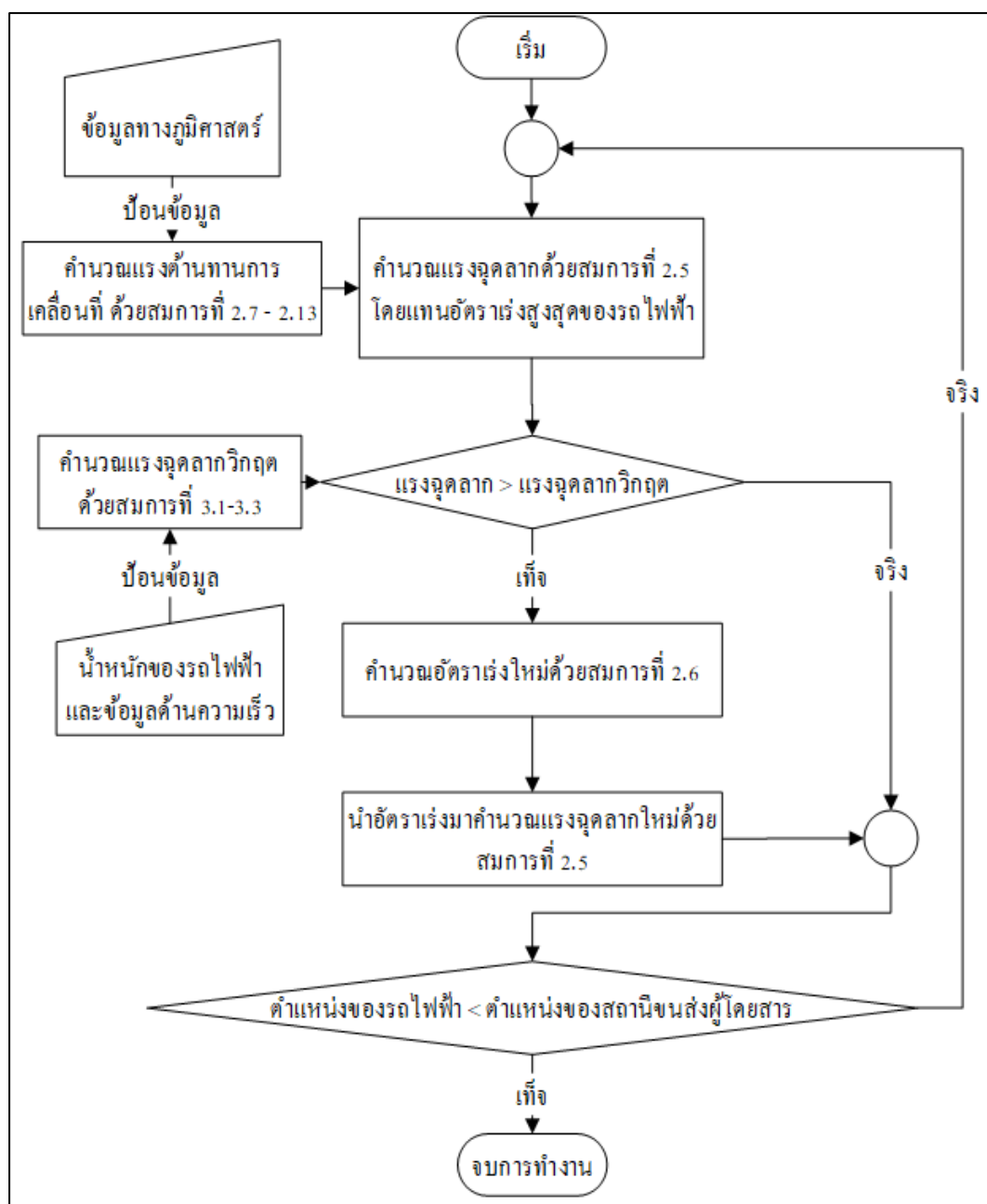
หลังจากที่ทราบถึงแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ แล้ว หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการคำนวณแรงฉุดลากของรถไฟฟ้า โดยนำข้อมูลแรงต้านทานทุกรูปแบบมาพิจารณา

3.3.3 ชุดคำสั่งคำนวณแรงฉุดลากของรถไฟฟ้า

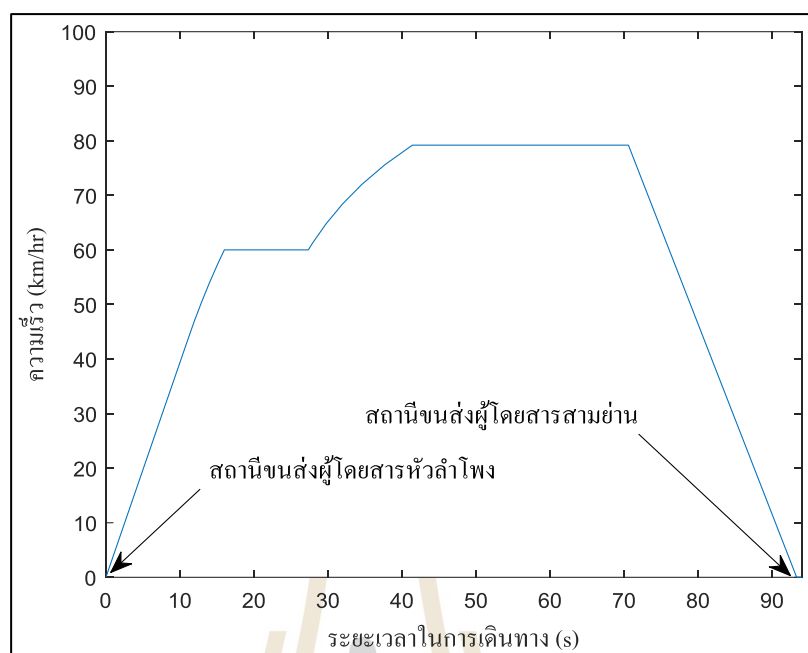
การคำนวณแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าต้องใช้ข้อมูลน้ำหนักของรถไฟฟ้า อัตราเร่ง และแรงต้านการเคลื่อนที่ทุกรูปแบบ โดยเงื่อนไขของการคำนวณแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าคือแรงฉุดลากที่สร้างขึ้นจากมอเตอร์ฉุดลากของรถไฟฟ้าห้ามมีค่าสูงเกินแรงบิดฉุดลากวิกฤตที่ถูกคำนวณในตอนที 3.3.1 ถ้าหากผลลัพธ์ของแรงฉุดลากที่เกิดขึ้นนั้นเกินค่าแรงฉุดลากวิกฤตต้องแก้ไขด้วยการกำหนดอัตราเร่งของรถไฟฟ้าใหม่เพื่อลดค่าแรงฉุดลากลงเพื่อให้ต่ำกว่าแรงฉุดลากวิกฤต โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงฉุดลากและคำนวณอัตราเร่ง ถูกกล่าวถึงในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.10 และแผนผังการทำงานของโปรแกรมถูกแสดงดังรูปที่ 3.7

3.3.4 ชุดคำสั่งคำนวณความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้า

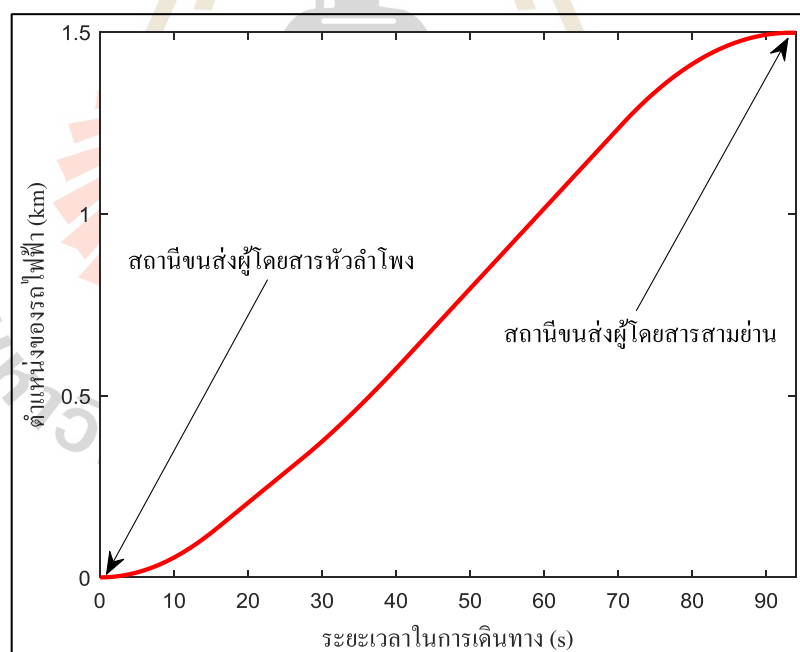
การคำนวณความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้าถือว่าเป็นข้อมูลสำคัญในการคำนวณแรงฉุดลาก เพราะความเร็วของรถไฟฟ้าส่งผลต่อแรงต้านทานการเคลื่อนที่และตำแหน่งของรถไฟฟ้าส่งผลต่อแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง แรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการวิ่งขึ้น-ลงทางลาดชันและขีดจำกัดของความเร็ว เนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่จำพวกนี้ต้องอาศัยตำแหน่งของรถไฟฟ้าในการดึงข้อมูลทางภูมิศาสตร์มาใช้ในการคำนวณ ผลการจำลองความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้าสามารถนำมาสร้างเส้นโค้งความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้าได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.8 – 3.9 ตามลำดับ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้า ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.12.4



รูปที่ 3.7 การทำงานของโปรแกรมคำนวณแรงจุดลาก



รูปที่ 3.8 เส้นโค้งความเร็ว



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของรถไฟฟ้า

3.3.5 ชุดคำสั่งคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานของรถไฟฟ้า

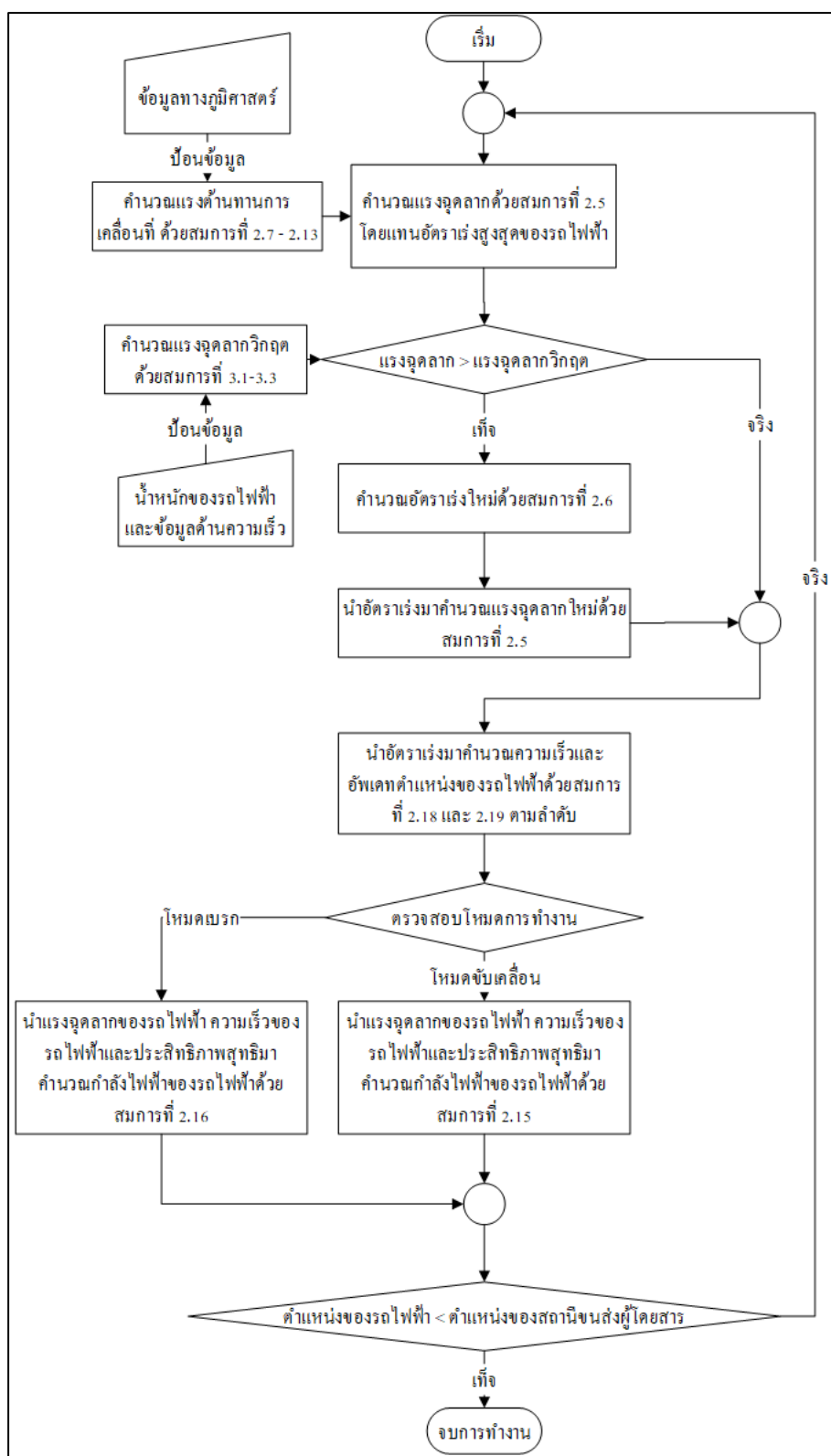
เป็นการนำผลลัพธ์การคำนวณแรงจลลาคและความเร็วของรถไฟฟ้ามาคำนวณกำลังไฟฟ้า ผลลัพธ์ถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีการที่แสดงในหัวข้อที่ 3.5 โดยใช้สมการคำนวณกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ดังที่กล่าวไว้ในในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.12.3 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากับข้อมูลที่ได้จากการพื้นที่จริงและใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับระบบเดิม

จากชุดคำสั่งย่อยทั้ง 5 ชุดที่กล่าวมาสามารถนำมาสร้างเป็นชุดคำสั่งจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียวได้ โดยมีแผนผังการทำงานของชุดคำสั่งดังแสดงดังรูปที่ 3.10

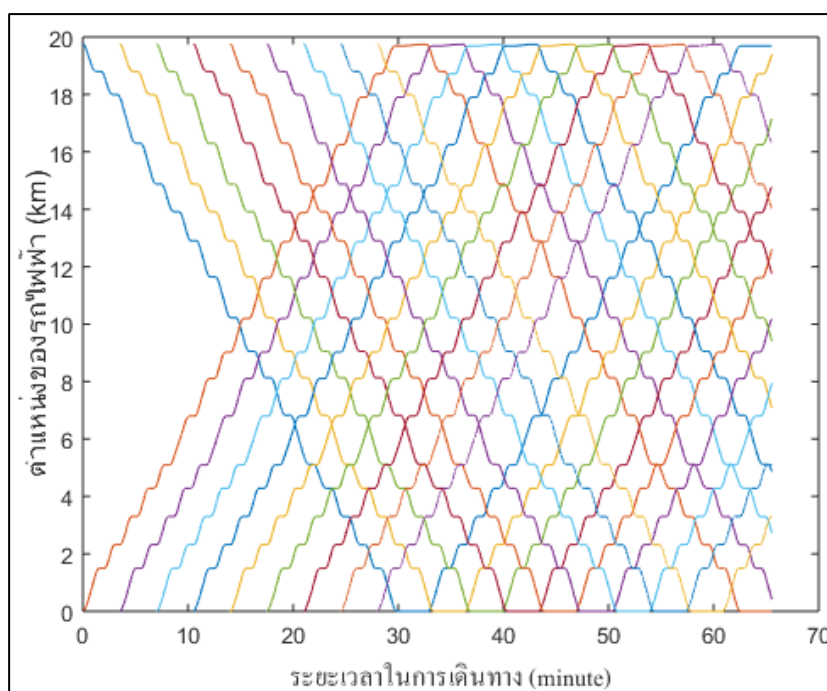
โดยชุดคำสั่งที่ใช้ในการจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียวจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผู้เขียนคำสั่ง

3.4 การจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวน

การจำลองการเดินรถไฟฟ้าหลายขบวนคือการสร้างการระบบการเดินรถไฟฟ้าที่แสดงถึงตำแหน่งของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ใช้ ณ เวลา ดังนั้นจึงต้องอาศัยข้อมูลความเร็วของรถไฟฟ้า ตำแหน่งของรถไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า จากการจำลองรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียวและนำมาพิจารณาร่วมกับระยะห่างของการปล่อยรถกับระยะเวลาการจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวนจึงถูกแสดงในรูปของตารางเวลาเดินรถไฟฟ้าที่แสดงถึงตำแหน่งของรถไฟฟ้าทุกขบวนในเส้นทางที่ให้บริการดังแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ชุดคำสั่งจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว



รูปที่ 3.11 ตารางเวลาเดินทางรถไฟฟ้าหลายขบวน

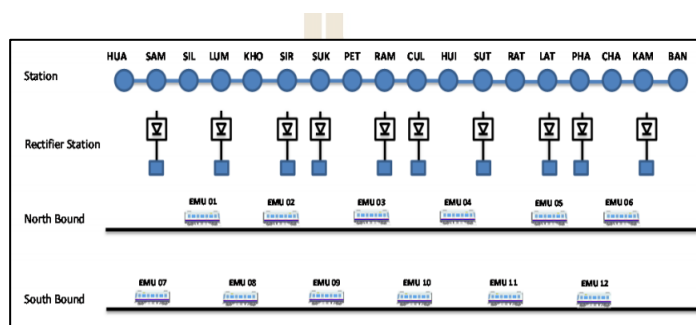
3.4.1 โปรแกรมจับภาพโครงข่าย

โปรแกรมจับภาพโครงข่ายคือชุดคำสั่งที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งผู้โดยสาร ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ตำแหน่งของรถไฟฟ้าที่ให้บริการและกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าขณะให้บริการเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้า ค่าแรงดันในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงของการเดินทางรถไฟฟ้าหลายขบวนต้องอาศัยการจำลองที่มีความซับซ้อนเนื่องจากต้องนำข้อมูลของรถไฟฟ้าหลายชุดมาประมวลผลร่วมกัน อาทิเช่น ข้อมูลด้านกำลังไฟฟ้า ตำแหน่งของรถไฟฟ้า ตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้อรรถาธิบายข้อมูลเหล่านี้ของรถไฟฟ้า ณ เวลาใด ๆ จึงต้องสร้าง โปรแกรมนี้ ข้อมูลที่ถูกเก็บโดยโปรแกรมจับภาพโครงข่ายแบ่งออกเป็น 4 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งได้แก่ ชั้นสถานีจ่ายพลังงานไฟฟ้าย่อย ชั้นโครงข่ายระบบไฟฟ้า ชั้นสถานีผู้โดยสารและชั้นรางวิ่งซึ่งได้แก่รางวิ่งขาขึ้น ชั้นรางวิ่งขาล่อง

ชั้นสถานีรับ-ส่งผู้โดยสารมีหน้าที่กำหนดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามีผลต่อการควบคุมความเร็วทำให้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงาน ชั้นสถานีจ่ายพลังงานไฟฟ้าย่อยเป็นส่วนที่ระบุตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ป้อน

พลังงานให้กับรถไฟไฟฟ้า ค่าความต้านทานภายในและค่าความต้านทานของกราวด์ของสถานีไฟฟ้า ในชั้นนี้เป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการหาผลเฉลยแรงดันและกำลังไฟฟ้าของระบบ

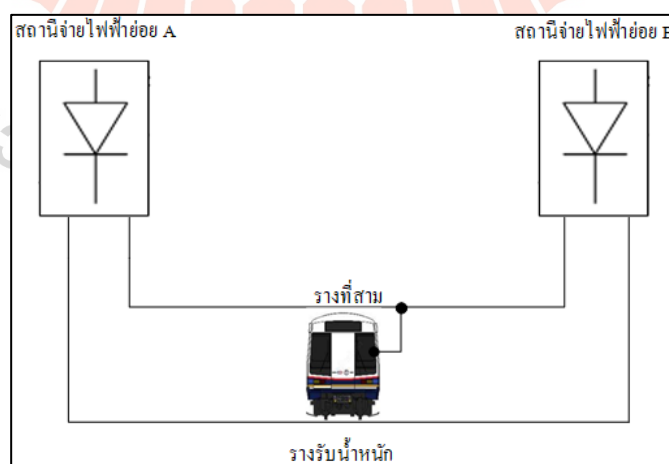
ชั้นรางวิ่งขาขึ้นและขาล่องเป็นชั้นที่แสดงตำแหน่งของขบวนรถไฟไฟฟ้าที่กำลังให้บริการอยู่ในระบบ ซึ่งมีเส้นทางแยกกันอย่างชัดเจนข้อมูลในส่วนนี้ต้องระบุข้อมูลของโหนดของขบวนรถไฟไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในระบบ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของโปรแกรมจับภาพโครงข่าย

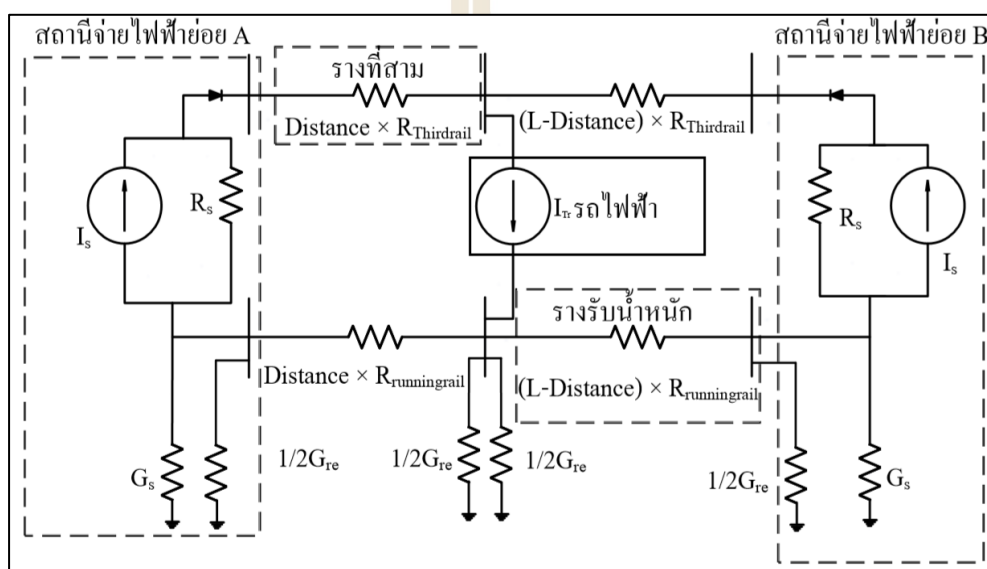
3.5 การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของระบบรถไฟไฟฟ้ากระแสตรง

การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าจำเป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากระแสตรงในระบบราง ซึ่งประกอบด้วย สถานีไฟฟ้าย่อย รางตัวนำหรือรางที่สาม รถไฟฟ้า และตัวนำย้อนกลับหรือรางรับน้ำหนักร ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ระบบไฟฟ้ากระแสตรงในระบบราง

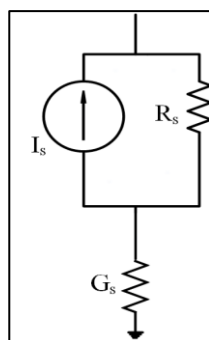
โดยองค์ประกอบต่าง ๆ ต้องถูกนำไปแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีคำนวณแบบวนรอบที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้หาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าที่ชื่อว่าวิธีการคิดกระแสไฟฟ้า จึงทำให้ต้องแปลงวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยรางที่สาม รางวิ่ง และรถไฟไฟฟ้า ให้อยู่ในโมเดลที่เหมาะสมต่อการคำนวณ โดยโมเดลแต่ละแบบถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.14 วงจรไฟฟ้าในระบบราง

ก. โมเดลสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

โครงสร้างของสถานีไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนประกอบหลายส่วน เช่น หม้อแปลงกำลัง วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและองค์ประกอบอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งส่งผลให้มีค่าพารามิเตอร์ในระบบจำนวนมาก เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจึงถูกแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลของนอร์ตัน ที่เป็นการจัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยให้อยู่ในรูปของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้านานกับตัวต้านทาน โดยที่ค่าของตัวต้านทานเกิดจากผลรวมของตัวต้านทานภายในระบบ ซึ่งผลการแปลงวงจร แสดงในรูปที่ 3.15

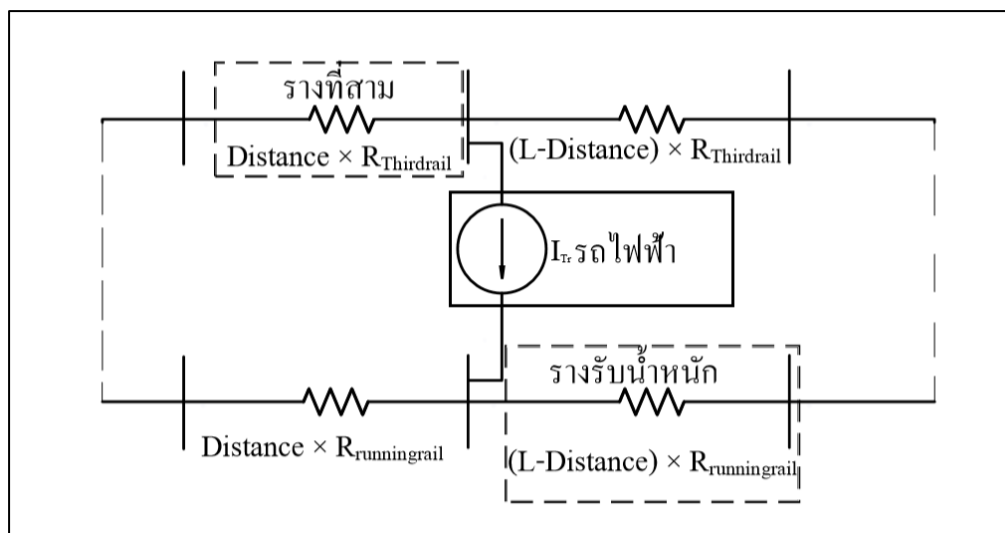


รูปที่ 3.15 โมเดลสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

โดยที่ I_s	คือ กระแสตัวจจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (kA)
R_s	คือ ค่าความต้านทานภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Ω)
G_s	คือ ค่าความนำไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (S)

ข. โมเดลสายส่ง

เนื่องจากรางที่สามและรางรับน้ำหนักเป็น โลหะตัวนำจึงถูกพิจารณาเป็นตัวต้านทานที่มีค่าแปรผันตามระยะทาง โดยที่รางรับน้ำหนักของรถไฟฟ้ามีการติดตั้งฉนวนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรตัวนำย้อนกลับจึงทำให้มีค่าความต้านทานระหว่างรางรับน้ำหนักกับกราวด์ติดตั้งอยู่เป็นช่วงๆและเพื่อทำให้ความต้านทานของรางรับน้ำหนักมีค่าน้อยที่สุด จึงได้มีการนำสายไฟตัวนำมาต่อขนานกันระหว่างรางวิ่งทั้งสองด้านเพื่อลดค่าความต้านทานให้มีค่าต่ำที่สุด จึงทำให้ระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ต้องอาศัยโมเดลสายส่งกำลังไฟฟ้าแบบพาย เพื่อช่วยให้อุปกรณ์วงจรได้ง่ายขึ้น โมเดลสายส่งแสดงในรูปที่ 3.16



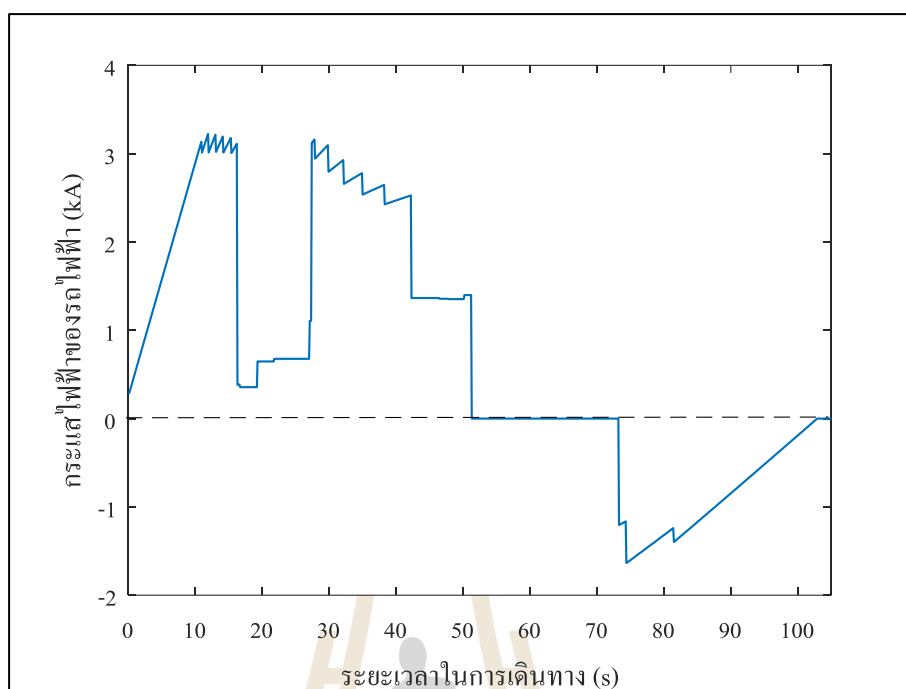
รูปที่ 3.16 โมเดลสายส่ง

ค. โมเดลของรถไฟฟ้า

การหาผลเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการคิดกระแสไฟฟ้า ขบวนการไฟฟ้าจำเป็นต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างรางตัวนำและรางวิ่ง โดยที่คุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าของรถจะเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าถูกคำนวณด้วยสมการที่ 3.4 และมีลักษณะดังรูปที่ 3.17

$$I_r = \frac{P_t}{V_t} \quad (3.4)$$

โดยที่ P_t คือ กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ (kW)
 V_t คือ แรงดันของรถไฟฟ้า (V)
 I_r คือ กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า (kA)



รูปที่ 3.17 กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

รูปที่ 3.17 สามารถแบ่งออกเป็น 3 โหมดการทำงานเช่นเดียวกันกับ เส้นโค้งความเร็วและกำลังไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้แสดงถึงการใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ณ สถานะต่าง ๆ หลังจากที่เตรียมข้อมูลต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำวงจรไฟฟ้าของโครงข่ายระบบไฟฟ้าในระบบรางมาหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าในหัวข้อถัดไป

3.5.1 การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้า

โหนดทางไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจึงไม่สามารถหาใช้วิธีวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่ายได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยเครื่องมือเชิงตัวเลขในการคำนวณหาผลเฉลยการไหลของกำลังไฟฟ้า มีวิธีการคำนวณรอบที่นิยมหลายวิธี เช่น วิธีการนิวตัน-ราฟสัน วิธีการเกาส์-ซีเดล หรือวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากเป็นวิธีการที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้กับระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรง

วิธีหาค่ากระแสไฟฟ้าเป็นวิธีการคำนวณแบบวนรอบที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้แก้ปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อแก้ไขปัญหาของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถใช้การวิเคราะห์แบบ

โนดได้ โดยวิธีการหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธวิธีแสดงดังรูปที่ 3.18
จากรูปที่ 3.18 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเริ่มต้น แรงดันไฟฟ้าของระบบเริ่มต้น ค่าความต้านทานของรางที่สามและรางวิ่ง

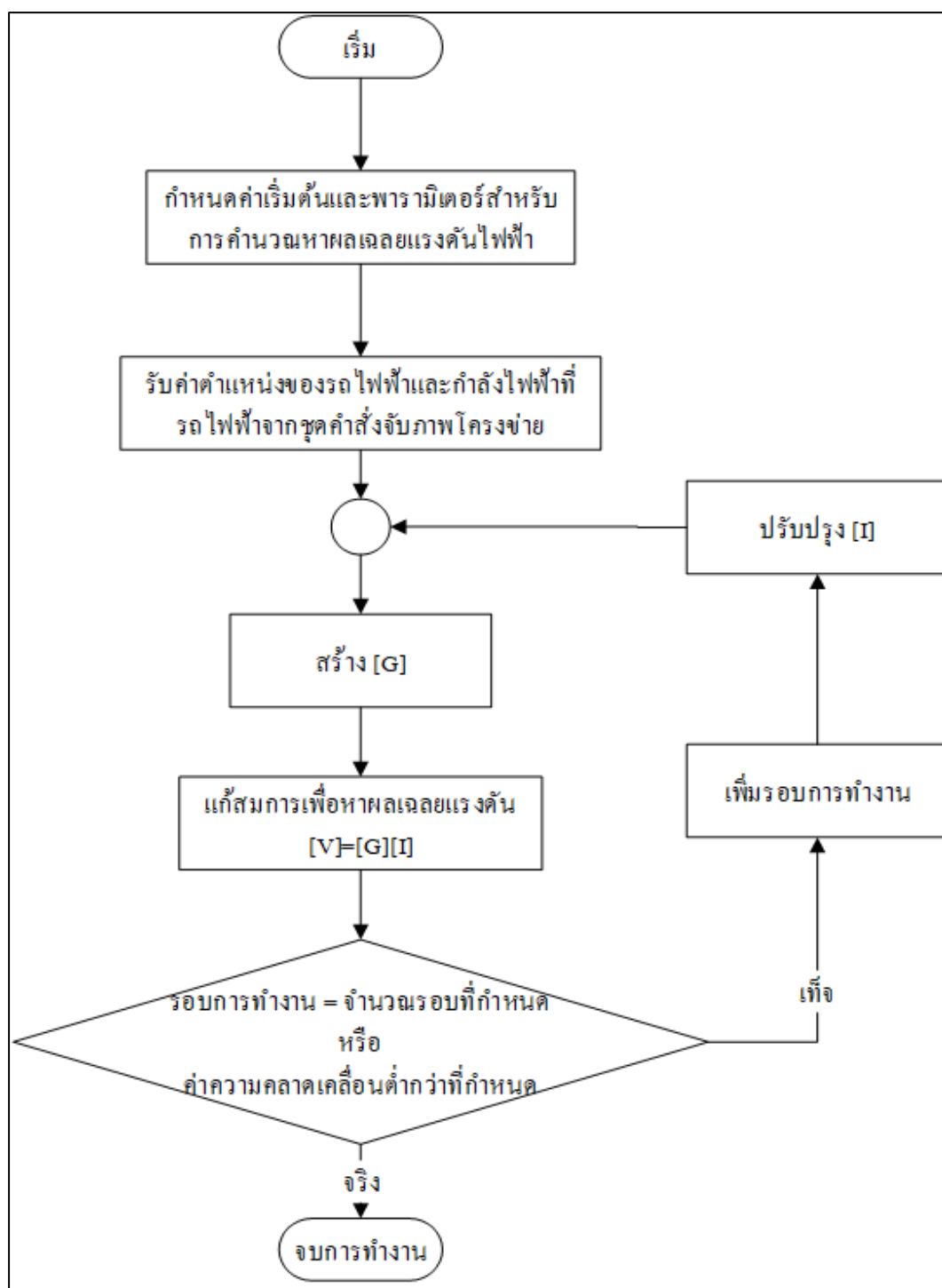
ขั้นตอนที่ 2 การสร้าง [G] จากวงจรโครงข่ายไฟฟ้าที่ได้รับการแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมแล้ว โดย [G] ทั้งหมดถูกแสดงในสมการที่ 3.5 และสร้าง [I] จากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยและกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากการสร้าง [G] แล้ว นำค่า [G] มาคำนวณหาค่า [V] ด้วยสมการ $[G][V]=[I]$ หรือจัดอยู่ในรูปสมการที่ 3.6

ขั้นตอนที่ 4 นำค่า [V] ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 มาคำนวณความคลาดเคลื่อน

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน หากค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าที่กำหนดให้โปรแกรมยุติการทำงานและแสดงค่า [V] แต่ถ้าหากค่าความคลาดเคลื่อนยังไม่เป็นไปตามค่าเงื่อนไขที่กำหนด ต้องนำค่า [V] มาอัปเดตเป็นแรงดันเริ่มต้นและนำไปคำนวณหากระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป

รูปที่ 3.14 เป็นตัวอย่างวงจรไฟฟ้าในระบบรางที่ผ่านการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในโมเดลที่เหมาะสม ที่จะนำมาใช้ในการสร้าง [G] ของระบบ ซึ่ง [G] ถูกแสดงดังสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการจัดกระแสไฟฟ้า

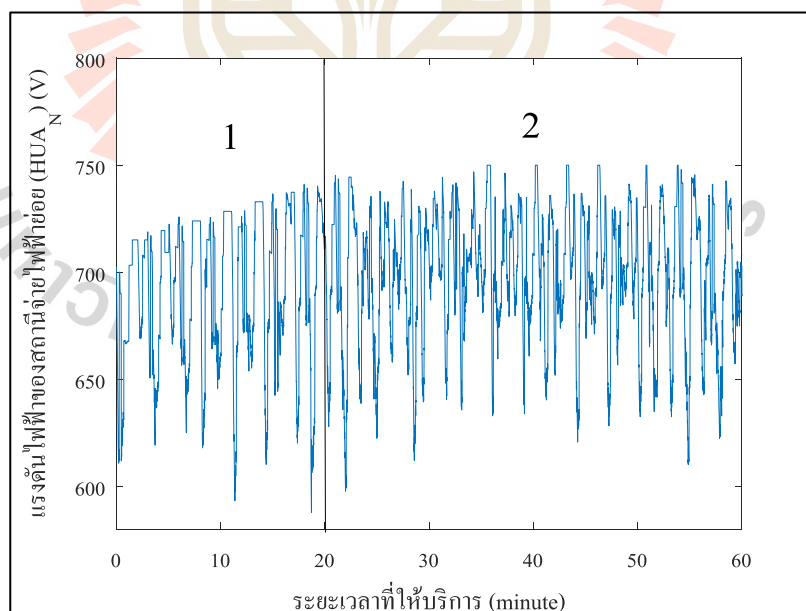
$$[G] = \begin{bmatrix}
 \frac{1}{R_{z-d}} + \frac{1}{d \times R_{Thindrai}} & 0 & 0 & \frac{1}{d \times R_{Thindrai}} & 0 \\
 \frac{1}{R_{z-d}} & \frac{1}{R_{z-d} + R_{sp}} + \frac{1}{d \times R_{Runingrai}} + \frac{G_{re}}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{d \times R_{Runingrai}} \\
 0 & \frac{1}{R_{z-d}} + \frac{1}{(L-d) \times R_{Thindrai}} & -\frac{1}{R_{z-B}} & \frac{1}{(L-d) \times R_{Thindrai}} & 0 \\
 0 & -\frac{1}{R_{z-B}} & \frac{1}{R_{z-B} + R_{sp}} + \frac{1}{(L-d) \times R_{Runingrai}} + \frac{G_{re}}{2} & 0 & 0 \\
 -\frac{1}{d \times R_{Thindrai}} & -\frac{1}{(L-d) \times R_{Thindrai}} & 0 & \frac{1}{d \times R_{Thindrai}} + \frac{1}{(L-d) \times R_{Thindrai}} & 0 \\
 0 & -\frac{1}{d \times R_{Runingrai}} & -\frac{1}{(L-d) \times R_{Runingrai}} & \frac{1}{d \times R_{Runingrai}} + \frac{1}{(L-d) \times R_{Runingrai}} + \frac{G_{re}}{2} & \frac{1}{d \times R_{Runingrai}} + \frac{1}{(L-d) \times R_{Runingrai}} + G_{re}
 \end{bmatrix}$$

สมการที่ 3.5

โดยที่	$R_{Thirdrail}$	คือ ค่าความต้านทานของรางตัวนำต่อความยาว (Ω/m)
	$R_{Runningrail}$	คือ ค่าความต้านทานของรางรับน้ำหนักรถต่อความยาว (Ω/m)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างรถไฟฟ้ายกกับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยปลายทาง (m)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างรถไฟฟ้ายกกับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยต้นทาง (m)
	R_{se_A}	คือ ค่าความต้านทานลัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย A (Ω)
	R_{s_B}	คือ ค่าความต้านทานลัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย B (Ω)
	G_{re}	คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน (S/m)
	I_A	คือ กระแสไฟฟ้ลัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย A (A)
	I_B	คือ กระแสไฟฟ้ลัดวงจรของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย B (A)
	I_{Tr}	คือ กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้ายก (A)

3.5.2 แรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ายกกระแสตรง

ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ายกกระแสตรง อาทิเช่น แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้ายก แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่งของ เป็นต้น ซึ่งผลเฉลยแรงดันสามารถนำมาใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบหรือใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขณะที่ให้บริการ เป็นต้น



รูปที่ 3.19 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพง

แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสามารถบอกถึงความหนาแน่นของการจราจรในเส้นทางเดินรถไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 จากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงหมายเลข 1 เป็นช่วงที่รถไฟฟ้าจอดรวมกันอยู่ที่สถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงจำนวน 9 ขบวนเปรียบเทียบได้เหมือนการจราจรที่หนาแน่นบนเส้นทางเดินรถไฟฟ้า สังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพงตกลงมาถึง $615 V_{dc}$ ซึ่งต่อมาแรงดันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากรถไฟฟ้าได้เคลื่อนที่ออกจากสถานีหัวลำโพงตามตารางเวลาที่ได้กำหนดเอาไว้ หมายเลข 2 เป็นช่วงที่การจราจรไม่หนาแน่นจะสังเกตได้ว่าความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีลักษณะแปรผันตามการทำงานของรถไฟฟ้าในแต่ละโหมค โดยการตกลงของแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงเร่งความเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่มอเตอร์ดูดพลังงานกระแสไฟฟ้าจำนวนมากเพื่อสร้างแรงดูดลากให้เพียงพอต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจึงจ่ายกระแสให้เพียงพอต่อการทำงานของมอเตอร์ดูดลากจึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลดลง

ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยถูกกำหนดด้วยมาตรฐาน EN 50163 และ 60850 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน $750 V_{dc}$ สามารถมีแรงดันต่ำสุดไม่ถาวรอยู่ที่ $500 V_{dc}$ และแรงดันสูงสุดไม่ถาวรอยู่ที่ $1,000 V_{dc}$

3.6 การออกแบบเส้นโค้งความเร็ว

การออกแบบเส้นโค้งความเร็วเป็นกลยุทธ์ที่ใช้เพื่อการลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน โดยเงื่อนไขที่ที่ใช้ในการออกแบบเส้นโค้งความเร็วขึ้นอยู่กับองค์กรที่ควบคุมดูแลการเดินรถ ตัวอย่างเช่น บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้า จำกัด(มหาชน) ได้รับสัมปทานการเดินรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล เป็นระยะเวลา 25 ปี จากหน่วยงาน รถไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (รฟม.) โดย รฟม. ได้กำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการให้บริการผู้โดยสารเอาไว้ดังนี้

1. ความเร็วเฉลี่ยระหว่าง สถานี A ถึง สถานี B ต้องสูงกว่า 35 km/hrs.
2. ระยะเวลาเดินทางระหว่าง สถานี A ถึง สถานี B ต้องไม่เกิน 5 นาที

ดังนั้นการออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อนำมาใช้งานต้องสามารถบรรลุเงื่อนไขที่กำหนดเพื่อให้ได้เส้นโค้งความเร็วที่มีประสิทธิภาพที่สุดตามเงื่อนไขที่กำหนดเอาไว้ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมจึงเป็นตัวเลือกที่นำมาใช้ในการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว โดยที่ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฟูลอณาการเพื่อสร้างเส้นโค้งความเร็ว ซึ่งถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.6.1 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเพื่อสร้างเส้นโค้งความเร็ว

วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมอย่างง่ายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย การนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบเส้นโค้งความเร็วจำเป็นต้องสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของคำตอบ เป้าหมายของการออกแบบเส้นโค้งความเร็วคือการสร้างเส้นโค้งความเร็วที่ใช้พลังงานในการเดินทางน้อยที่สุดและการเดินทางของรถไฟฟ้ายังอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขของคำตอบที่กำหนดเอาไว้ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการสร้างเส้นโค้งความเร็วถูกแสดงดังสมการที่ 3.6 หมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทางของรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟฟ้าและแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าสร้างขึ้นตลอดการเดินทางและเงื่อนไขขอบเขตของคำตอบถูกแสดงในสมการที่ 3.7 - 3.9 ซึ่งถูกจากเงื่อนไขในการให้บริการรถไฟฟ้าที่กำหนดโดยรฟม. อาทิเช่น ระยะเวลาในการเดินทางระหว่างสถานีต้นทางกับปลายทาง ระยะเวลารอคอยของผู้โดยสาร ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้า เป็นต้น ในทางปฏิบัติ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เนื่องจากโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการเดินทางได้ และเป็น โปรแกรมพื้นฐานที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในกรณีฐาน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\min E = \int (F_r(t) \times v(t)) dt \quad (3.6)$$

โดยที่ $F_r(t)$ คือ แรงฉุดลากของรถไฟฟ้า ณ เวลาใด ๆ (kN)
 $v(t)$ คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า ณ เวลาใด ๆ (m/s)
 E คือ พลังงานที่ใช้ในการเดินทางของรถไฟฟ้า (kWh)

ขอบเขตในการจำลองการสร้างเส้นโค้งความเร็ว

$$v_{av} \geq 9.72 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

$$t_{tripOp} \leq t_{trip} + 10 \text{ s} \quad (3.8)$$

$$t_{waiting} \leq 300 \text{ s} \quad (3.9)$$

โดยที่	v_{av}	คือ ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร (m/s)
	t_{trip}	คือ ระยะเวลาในการเดินทางก่อนการปรับปรุงเส้นทางโค้งความเร็ว (s)
	t_{tripOp}	คือ ระยะเวลาในการเดินทางหลังการปรับปรุงเส้นทางโค้งความเร็ว (s)
	$t_{waiting}$	คือ ระยะเวลารอคอยของผู้โดยสาร (s)

3.7 อุปกรณ์เก็บพลังงาน

การเลือกใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานที่เหมาะสมกับกลยุทธ์ที่เลือกใช้ถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากอุปกรณ์เก็บพลังงานบางชนิดไม่เหมาะสมกับกลยุทธ์บางแบบ เช่น การใช้แบตเตอรี่กับกลยุทธ์การตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟเป็นตัวอย่างการใช้อุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสมกับกลยุทธ์ เนื่องจาก แบตเตอรี่มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่ำ จึงส่งผลให้ความสามารถในการกระแสไฟฟ้าต่ำจึงไม่สามารถพลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานในช่วงเร่งความเร็วได้เนื่องจากในช่วงเร่งความเร็วกระแสไฟฟ้าที่รถไฟดึงจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อมมีค่าสูง ซึ่งสามารถดูตัวอย่างของกระแสไฟฟ้าของรถไฟได้จากรูปที่ 3.17 ดังนั้นแบตเตอรี่จึงเหมาะสมกับการเป็นระบบสำรองไฟ เป็นต้น

ด้วยลักษณะของกระแสไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนของรถไฟที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเร่งความเร็ว เพื่อตอบสนองลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ นำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานที่ได้กลับคืนจากการเบรก ด้วยความสามารถของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง จึงสามารถตอบสนองความต้องการของกำลังไฟฟ้าที่รถไฟต้องการในการทำงานในแต่ละโหมดได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอขั้นตอนในการวิเคราะห์ขนาดและแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและการประเมินสถานะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นต้น

3.7.1 Maxwell 125V Heavy Transportation Module

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ยี่ห้อ MAXWELL รุ่น 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE แสดงดังรูปที่ 3.20 เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ถูกเลือกใช้ในการจำลอง เนื่องจากอุปกรณ์มีคุณสมบัติในการตอบสนองการทำงานของรถไฟได้อย่างเหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง จึงทำให้มีค่ากระแสพิคกิ้งที่สูงถึง 1900 A ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการอัดและคายประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ แรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ที่มีค่าสูงถึง 125 V_{DC} โดยรายละเอียดส่วนอื่นของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ถูกแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

(ที่มา: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/125v-tran-modules>)

(เข้าถึงเมื่อ:22/3/2562)

PRODUCT SPECIFICATIONS	
ELECTRICAL	BMOD0063 P125 B08
Rated Capacitance ¹	63 F
Minimum Capacitance, initial ¹	63 F
Maximum Capacitance, initial ¹	76 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage ²	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	10 mA
Maximum Series Voltage	1500 V
Capacitance of Individual Cells ¹¹	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell ¹¹	3.0 Wh
Number of Cells	48

รูปที่ 3.21 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

(ที่มา: https://www.maxwell.com/images/documents/125V_Module_datasheet.pdf)

(เข้าถึงเมื่อ:22/3/2562)

3.7.2 การประเมินขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การประเมินต้องขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานต้องคำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมกับค่าพลังงานที่ได้กลับคืนจากการเบรก ค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในกรณีของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่นำมาศึกษา จำเป็นต้องประเมินความจุทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้เหมาะสมกับสถานการณ์ต่างๆที่ต้องการนำไปใช้ ซึ่งการคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นอาศัยหลักการต่ออนุกรมและขนานของตัวเก็บประจุทั่วไปเพื่อให้ได้ผลลัพธ์แรงดันและความจุทางไฟฟ้าที่ต้องการ โดยในขั้นแรกให้คำนวณระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าเท่ากับระดับแรงดันของระบบรถไฟฟ้าเสียก่อน โดยการนำมาคำนวณแบบการต่ออนุกรมดังที่แสดงในสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12

ก. การต่ออนุกรมของตัวเก็บประจุ

$$V = L \times V_{Supercap} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{C_{total_s}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (3.12)$$

โดยที่	L	คือ จำนวน โมดูลเชื่อมต่อแบบอนุกรม
	$V_{Supercap}$	คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในแต่ละ โมดูล (V)
	C_{total_s}	คือ ผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม (F)
	$C_{1,2,3,\dots,n}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (F)

หลังจากที่คำนวณจำนวนของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ทำให้แรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าที่ต้องการแล้ว ต่อมาต้องพิจารณาความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าเพียงพอต่อการเก็บพลังงานที่ได้จากการเบรกของรถไฟฟ้าโดยการนำมาต่อขนานกันเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น โดยใช้ในการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 3.13 และสมการที่ 3.14

ข. การต่อขนานของตัวเก็บประจุ

$$E_{Max_regen} = \frac{1}{2} C_{total} V^2 \quad (3.13)$$

$$C_{total} = C_{total_p} \times n \quad (3.14)$$

โดยที่	V	คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (V)
	C_{total}	คือ ความจุไฟฟ้ารวม (F)
	E_{Max_regen}	คือ พลังงานสุทธิ (J)
	n	คือ จำนวนโมดูลที่เชื่อมต่อแบบขนาน
	C_{total_p}	คือ ผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าที่ต่อแบบขนาน

จากการคำนวณในสมการที่ 3.13 ทำให้ทราบถึงค่าตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับเก็บพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกของรถไฟฟ้าแล้ว หลังจากนั้นนำสมการที่ 3.14 มาคำนวณจำนวนของตัวเก็บประจุที่ต้องนำมาต่อขนานเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามที่ต้องการ

3.7.3 การจำลองการอัดประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

อันดับแรกของขั้นตอนนี้คือการตรวจสอบโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าเสียก่อน ซึ่งโหมดการอัดประจุทำงานก็ต่อเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก หลังจากนั้นทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนด้วยสมการที่ 3.15 เมื่อพิจารณาอุปกรณ์เก็บพลังงานจำเป็นต้องคำนวณปริมาณพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ ดังนั้นการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.16

$$P_{Charge} = F_t \times v \times \eta_{braking} \eta_{sc} \quad (3.15)$$

$$E_{Store} = E_{Store} + (P_{reg} \Delta t) \quad (3.16)$$

โดยที่	P_{Charge}	คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะที่อัดประจุ (kW)
	F_t	คือ แรงฉุดลากของรถไฟฟ้า (F)
	v	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)
	$\eta_{braking}$	คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบรกของรถไฟฟ้า
	η_{sc}	คือ ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า
	E_{Store}	คือ พลังงานในอุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
	P_{reg}	คือ จำนวนตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เชื่อมต่อแบบขนาน
	Δt	คือ Time step (s)

3.7.4 การจำลองการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ในขั้นตอนนี้มีหลักการทำงานคล้ายกับการอัดประจุ โดยเริ่มจากการตรวจสอบ โหมดการเคลื่อนที่ซึ่งการคายประจุจะทำงานเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน แต่ทว่าการคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานต้องมีการคำนึงถึงกระแสพิคคของอุปกรณ์เก็บพลังงานอยู่ตลอดเวลา เพื่อป้องกันการเสียหายต่ออุปกรณ์ในกรณีที่เกิดการจ่ายกระแสเกินพิกัด ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าในช่วงคายประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.17 และพลังงานไฟฟ้าที่คงเหลือในอุปกรณ์เก็บพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.18

$$P_{Discharge} = \frac{F_t \times v}{\eta_{motoring} \eta_{sc}} \quad (3.17)$$

$$E_{Store} = E_{Store} - (P_{Discharge} \Delta t) \quad (3.18)$$

โดยเงื่อนไขการคายประจุกำหนดด้วย

$$I_{tr} < I_{rated} \quad (3.19)$$

โดยที่	$P_{Discharge}$	คือ กำลังไฟฟ้าขณะคายประจุ (kW)
	F_t	คือ แรงขูดลาก (F)
	v	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)
	$\eta_{motoring}$	คือ ประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า
	η_{sc}	คือ ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า
	E_{Store}	คือ พลังงานในอุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
	Δt	คือ Time step (s)
	I_{tr}	คือ กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (kA)
	I_{rated}	คือ กระแสไฟฟ้าพิกัดของอุปกรณ์เก็บพลังงาน (kA)

3.7.5 การประเมินสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน (State Of Charge : SOC)

การอัดประจุหรือคายประจุของรถไฟฟ้าจำเป็นต้องคำนวณสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน (SOC) เพื่อประเมินว่าพลังงานในอุปกรณ์มีสถานะพร้อมคายประจุหรืออัดประจุหรือไม่ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.19

$$SOC = \frac{E_{Store}}{E_{Max}} \times 100\% \quad (3.19)$$

โดยที่	E_{Store}	คือ พลังงานไฟฟ้าคงเหลือในอุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
	E_{Max}	คือ พลังงานสูงสุดของอุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
	SOC	คือ สถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน (%)

3.7.6 การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรคไปเป็นพลังงานความร้อนด้วยอุปกรณ์ตัวต้านทานเบรค

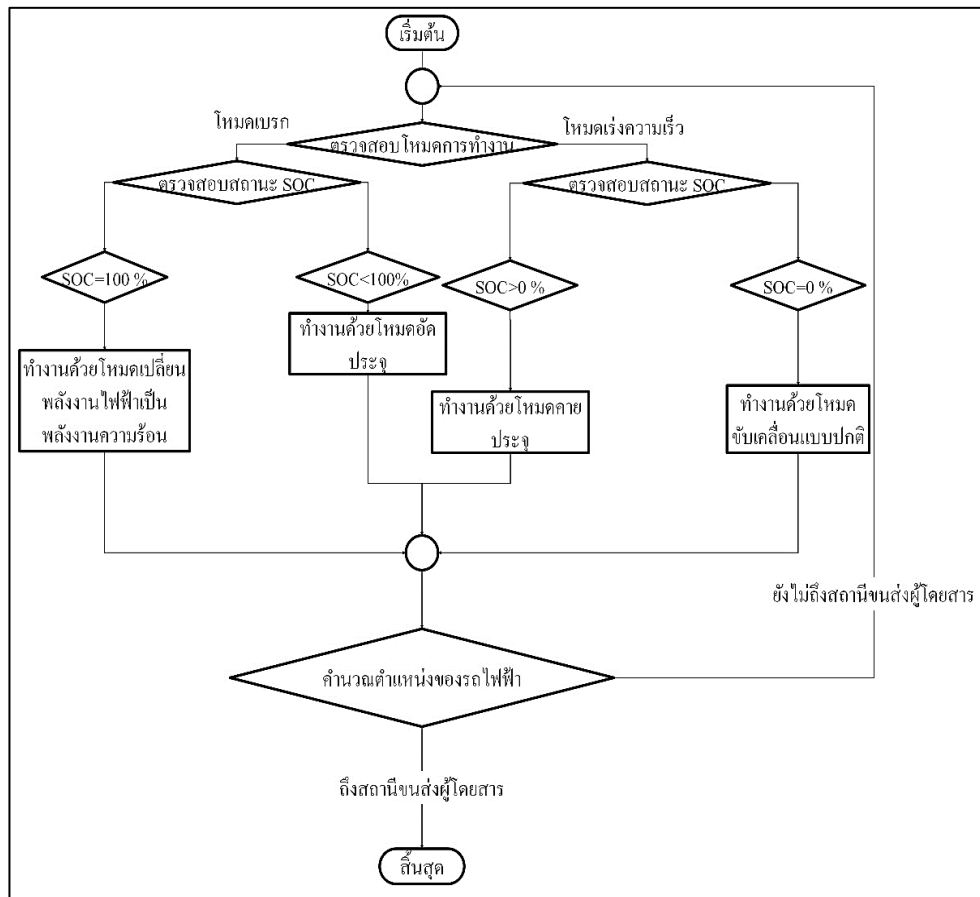
การทำงานในโหมดนี้เกิดขึ้นเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรคและพลังงานไฟฟ้าในอุปกรณ์เก็บพลังงานหรือสถานะของการอัดประจุมีค่าสูงเกินกว่าที่ตั้งค่าเอาไว้โดยในการจำลองนี้กำหนดไว้ที่ 100 % ดังนั้นหากเกิดสถานะนี้ การเบรคของรถไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากการเบรคแบบนำพลังงานกลับคืนไปเป็นการเบรคแบบไดนามิกส์ โดยที่พลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปแปลงเป็นพลังงานความร้อนโดยผ่านอุปกรณ์ตัวต้านทานเบรคที่ติดตั้งไว้ที่รถไฟฟ้า โดยการสมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงานที่ได้จากการเบรคสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.20 และสมการที่ 3.21

$$P_{BRLoss} = P_{Charge} = F_t \times v \times \eta \quad (3.20)$$

$$E_{RBLoss} = E_{RBLoss} + (P_{RBLoss} \Delta t) \quad (3.21)$$

โดยที่	P_{BRLoss}	คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดพลังงานสูญเสีย (kW)
	F_t	คือ แรงฉุดลาก (kN)
	v	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)
	η	คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบ
	E_{RBLoss}	คือ พลังงานสูญเสียรวม (kWh)

โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองการอัดประจุและคายประจุแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณการอัดและคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงาน

3.7.7 การประเมินขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบประเมินจากค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้กลับคืนจากการเบรก

การประเมินขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการติดตั้งบนรถไฟฟ้าประเมินจากพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดจากการเบรกและสามารถนำมาปรับค่าได้โดยการนำมาคูณตัวปรับคูณ (C) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.22)

$$E_{store} = Z \times E_{regen_max} \quad (3.22)$$

โดยที่ Z คือ ตัวปรับคูณที่ใช้ในการปรับขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงาน
 E_{regen_max} คือ พลังงานที่ได้จากการนำพลังงานกลับคืนที่สูงที่สุด (kWh)

3.8 กลยุทธ์การควบคุมการคายประจุแบบอัตราส่วน

กลยุทธ์การควบคุมการคายประจุแบบอัตราส่วนคือการควบคุมการอัดประจุและคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานด้วยอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ใช้การขับเคลื่อนหรือกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการเบรก เพื่อป้องกันการทำงานเกินพิกัดของอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ 3.23 และ 3.24 โดยที่ผลของการคายประจุและการอัดประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานต้องไม่สูงเกินกระแสไฟฟ้าพิกัดของอุปกรณ์และต้องไม่เกินความจุไฟฟ้าสูงสุดของอุปกรณ์

$$P_{charge} = k \times P_{regen} \quad (3.23)$$

$$P_{dis} = k \times P_{traction} \quad (3.24)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ในการปรับอัตราส่วนการอัดประจุและคายประจุ
 P_{regen} คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะที่รถไฟฟ้าเบรก (kW)
 $P_{traction}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้การขับเคลื่อน (kW)
 P_{charge} คือ กำลังไฟฟ้าขณะอัดประจุ (kW)
 $P_{discharge}$ คือ กำลังไฟฟ้าขณะคายประจุ (kW)

3.9 การคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ ใช้หลักการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ เพื่อพิจารณาว่าผลประโยชน์ของโครงการมากกว่าหรือน้อยกว่าต้นทุนของโครงการ เพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณาตัดสินใจว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่ เพื่อช่วยในการตัดสินใจ ใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการคำนวณเวลาคืนทุนของโครงการใช้เกณฑ์การตัดสินใจแบบปรับค่าเวลา โดยการนำเวลาเข้ามาเป็นปัจจัย เนื่องจากมูลค่าของเงินในแต่ละปีมีความแตกต่างกัน จึงส่งผลให้ต้องปรับค่าของเงินในอนาคตให้เท่ากับมูลค่าของเงินในปัจจุบัน โดยการลดมูลค่าของเงินที่เกิดขึ้นในอนาคตด้วยอัตราคิดลด ดังนั้นมูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.25

$$NPV = -C_0 + \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (3.25)$$

โดยที่	C_0	คือ เงินลงทุนในปีแรก (บาท)
	C_i	คือ รายได้ในปีที่ i (บาท)
	i	คือ ปีของโครงการ (ปี)
	r	คือ อัตราคิดลด (%)

การประเมินว่าโครงการนำลงทุนใหม่ สามารถดูได้จากค่า NPV ถ้าหากค่า NPV ไม่ติดลบ แสดงว่าโครงการนี้น่าลงทุน แต่ในบางกรณีในโครงการที่ได้รับสัมปทานจากรัฐบาล ค่า NPV ที่เป็นบวกสามารถบอกได้เพียงว่าโครงการนี้จะคุ้มทุนในปีที่ i ดังนั้นระยะเวลาที่เหลือของสัมปทานถูกนำมาใช้พิจารณาในการลงทุน อาทิเช่น กำหนดระยะเวลาสัมปทานที่เหลือ (T) = 5 ปี และทำการคำนวณค่า NPV ปรากฏว่า การลงทุนในโครงการนี้คืนทุนในปีที่ 3 ซึ่งเหลือระยะเวลาในการสร้างกำไรเพียง 2 ปี ในมุมมองของการประเมินด้วย NPV โครงการนี้น่าลงทุนเนื่องจากเป็นโครงการที่ทำแล้วไม่ขาดทุน แต่ในมุมมองของบริษัทที่จะลงทุน โครงการนี้อาจจะไม่น่าลงทุนเนื่องจากมีระยะเวลาสร้างกำไรน้อยเกินไป ซึ่งบริษัทอาจจะตัดสินใจลงทุนโครงการอื่นที่เห็นผลกำไรได้เร็วกว่า เป็นต้น

3.10 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากข้อมูลที่ถูกรวบรวมขึ้นมาสามารถนำมาสร้างโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า สำหรับใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้า และข้อมูลการเดินทางอื่น ๆ อีกมากมาย โดยขั้นตอนการวิจัยได้ถูกแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่หนึ่ง คือการสร้างชุดข้อมูลจำพวกข้อมูลทางภูมิศาสตร์ แรงดูดลากวิกฤตและแรงเบรกวิกฤต เป็นต้น

ขั้นตอนที่สอง คือการสร้างโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว โดยอาศัยข้อมูลจากขั้นตอนที่หนึ่งร่วมกับข้อมูลน้ำหนักของรถไฟฟ้า อัตราเร่งสูงสุด อัตราเบรกสูงสุด และข้อมูลอื่น ๆ ที่ถูกแสดงในตารางที่ 3.4 ร่วมกับชุดสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ แรงดูดลาก กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า โดยข้อมูลของสมการทั้งหมดที่กล่าวมาถูกแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 2.12 และผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองได้แก่ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

เส้นโค้งความเร็ว ตำแหน่งของรถไฟ และพลังงานที่ใช้ในการเดินทาง เป็นต้น โดยตัวอย่างของผลลัพธ์ถูกแสดงดังรูปที่ 2.27, 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่สาม คือการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของการจำลองการเดินทางรถไฟแบบขบวนเดียว โดยอาศัยวิธีนิตกระแสไฟฟ้าที่แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.5

ขั้นตอนที่สี่ คือการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟหลายขบวน โดยการสร้างโปรแกรมจำลองรถไฟแบบขบวนเดียวมาหลาย ๆ ชุด และกำหนดระยะห่างของการปล่อยรถไฟ โดยตัวอย่างของตารางเดินรถไฟแบบหลายขบวนถูกแสดงในรูปที่ 3.11 และข้อมูลของกรเดินทางรถไฟหลายขบวนถูกแสดงในหัวข้อที่ 3.4

ขั้นตอนที่ห้า คือการเก็บข้อมูลตำแหน่งของรถไฟทุกขบวนที่ได้จากขั้นตอนที่สี่ด้วยโปรแกรมจับภาพโครงข่าย โดยรายละเอียดของโปรแกรมถูกแสดงที่หัวข้อ 3.4.1

ขั้นตอนที่หก นำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ห้าและขั้นตอนที่สี่ มาประเมินหาผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟ

ขั้นตอนที่เจ็ด คือการออกแบบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟ โดยอาศัยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคที่มีรายละเอียดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคถูกแสดงที่หัวข้อที่ 2.14 และการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคในการออกแบบเส้นโค้งความเร็วถูกแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.6.1

หลังจากที่ได้เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมมาแล้ว ให้ย้อนกลับไปจะลองการเคลื่อนที่รถไฟแบบหลายขบวนในขั้นตอนที่สี่และคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟตามลำดับ หลังจากเสร็จสิ้นการสร้างเส้นโค้งความเร็วและคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการประเมินขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ซึ่งถูกแสดงในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่แปด อย่างที่ทราบว่าการประเมินขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานต้องอาศัยพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.72 หลังจากที่ได้ขนาดความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงานแล้ว นำความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณจำนวน โมดูลของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ด้วยสมการที่ 3.11-3.14 การประเมินสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานและการกำจัดพลังงานเกินที่เกิดขึ้นในกรณีอุปกรณ์เก็บพลังงานมีพลังงานเต็มพิกัด

ขั้นตอนที่เก้า หลังจากที่ได้ขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานและจำนวน โมดูลแล้ว ต่อมาคือการคำนวณการคายประจุและอัดประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยการคายประจุและอัดประจุต้องถูกควบคุมด้วยกลยุทธ์การควบคุมการคายประจุแบบอัตราส่วนที่แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.9

3.11 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองของระบบรถไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย การคำนวณประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า การจำลองการคายประจุ อัปเดตประจุและการตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานและการคำนวณค่าแรงดันในระบบไฟฟ้า โดยมีหัวข้อการอธิบายดังนี้ การคำนวณแรงกูดลาถของรถไฟฟ้า การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ การคำนวณกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า การคำนวณการอัด-คายประจุ-ตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน การคำนวณเวลาคืนทุน การคำนวณแรงดันไฟฟ้าในระบบด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า เป็นต้น



บทที่ 4

ผลการดำเนินการจำลองระบบรถไฟฟ้

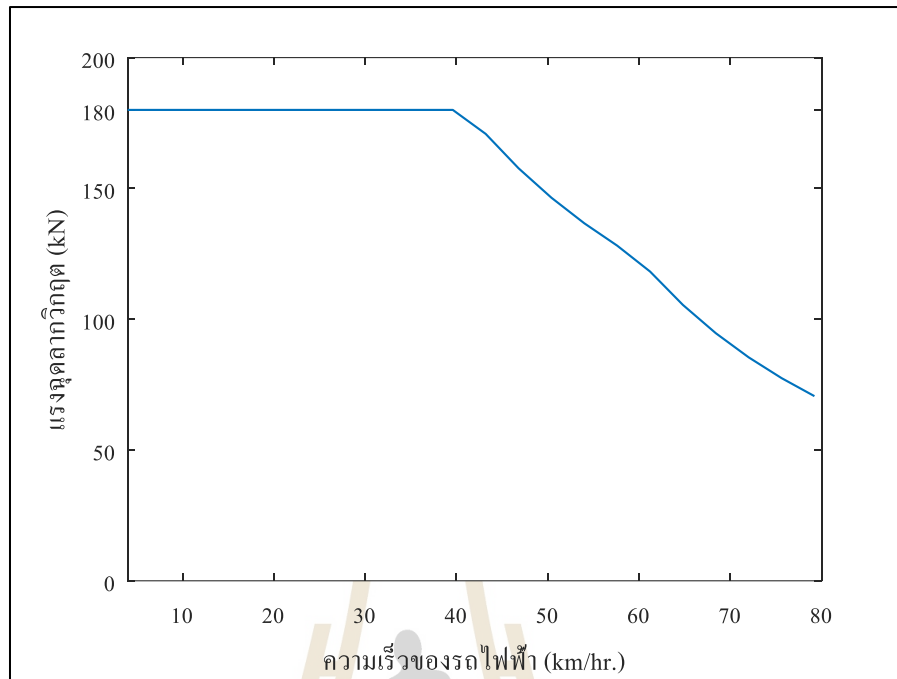
4.1 กล่าวนำ

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ต้องอาศัยข้อมูลหลายส่วน อาทิเช่น ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของรถไฟฟ้ไม่ว่าจะเป็น ความชัน รัศมีทางโค้ง จีดจำกัดความเร็วของรถไฟฟ้ หรือชุดข้อมูลทางเทคนิคของรถไฟฟ้ไม่ว่าจะเป็น แรงขุดลากวิกฤตของรถไฟฟ้ ค่าพารามิเตอร์ของสมการเดวี อัตราร่งหรืออัตราน่วงสูงสุด เป็นต้น ชุดข้อมูลเหล่านี้ล้วนเป็นข้อมูลที่สำคัญที่ทำให้รถไฟฟ้ให้บริการได้อย่างปลอดภัย

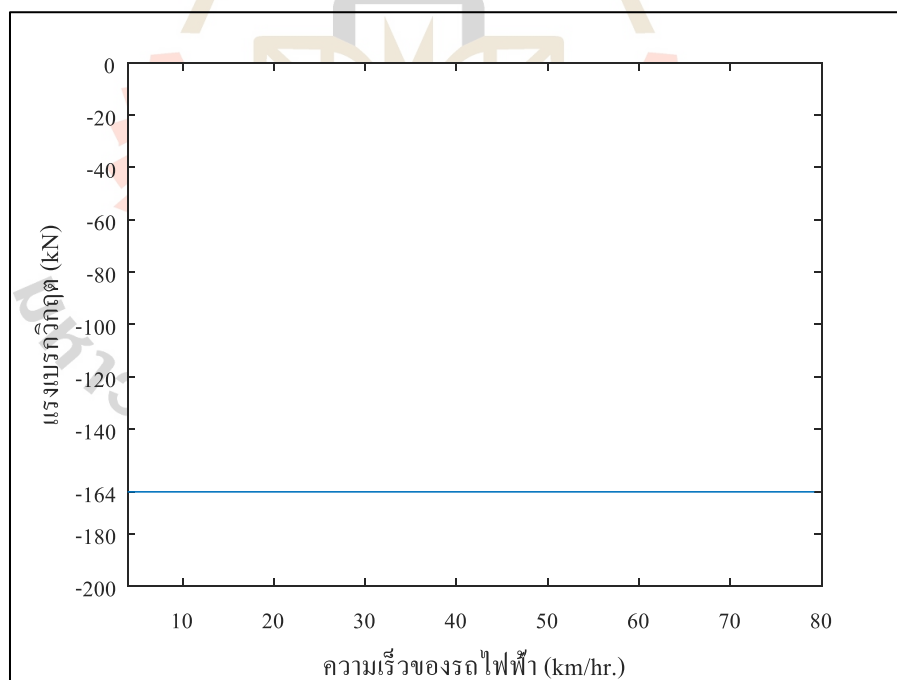
ในบทนี้ผู้ทำวิจัยนำเสนอชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและจำลองทั้งหมด อาทิเช่น ข้อมูลความชัน ข้อมูลความเร็วสูงสุดของแต่ละช่วงเส้นทางและเส้นทางโค้ง ข้อมูลแรงบิดวิกฤตของรถไฟฟ้ เส้นทางโค้งความเร็ว ตำแหน่งของรถไฟฟ้ และข้อมูลอื่น ๆ อีกมากมาย

4.2 การจำลองแรงขุดลากวิกฤตและแรงเบรกวิกฤตของรถไฟฟ้

แรงขุดลากวิกฤตและแรงบิดวิกฤตของรถไฟฟ้ันั้นถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในด้านความปลอดภัย ถ้าหากรถไฟฟ้เคลื่อนที่ด้วยแรงขุดลากที่สูงกว่าค่าแรงขุดลากวิกฤต(ในกรณีรถไฟฟ้ทำงานในโหมดขับเคลื่อน)หรือต่ำกว่าค่าแรงเบรกวิกฤต(กรณีรถไฟฟ้ทำงานในโหมดเบรก)อาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้เนื่องจากการลื่นไถลของล้อรถไฟฟ้ ในส่วนนี้จึงได้นำข้อมูลรถไฟฟ้มาจำลองเส้นทางโค้งแรงขุดลากวิกฤตและแรงบิดวิกฤตซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีที่ประกอบด้วย กรณีชั่วโมงเร่งด่วน โดยพิจารณาน้ำหนักรถไฟฟ้ AW 3 และชั่วโมงไม่เร่งด่วนโดยพิจารณาน้ำหนักรถไฟฟ้ AW 2 ดังนั้นผลการจำลองแรงขุดลากวิกฤตและแรงเบรกวิกฤตของรถไฟฟ้ถูกแสดงในรูปแบบที่ 4.1 (ก) - (ข) และ 4.2 (ก) - (ข) ตามลำดับ

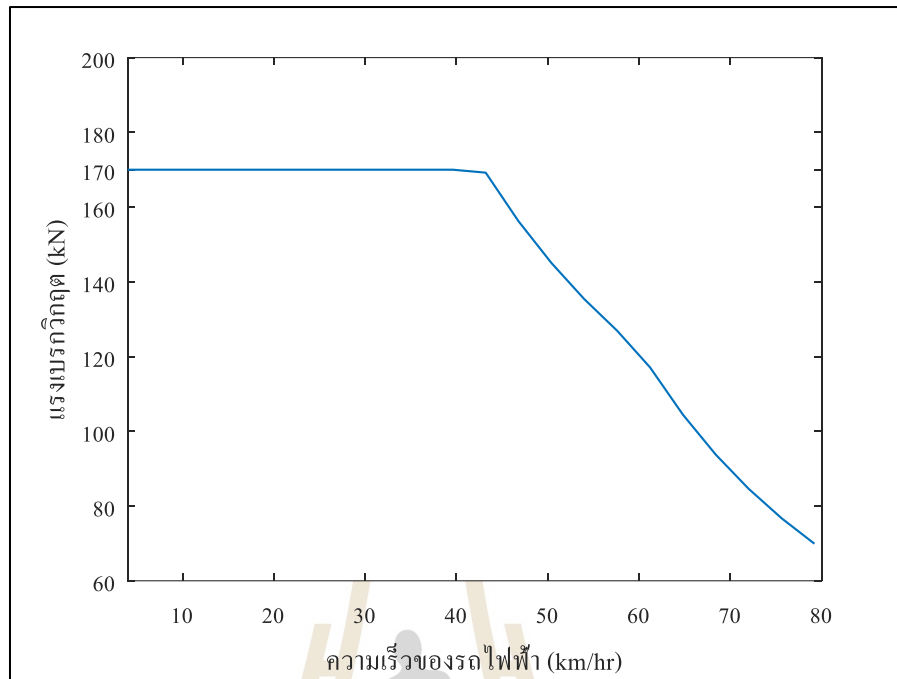


(ก) แรงสูงสุดลากวิกิถุดในชั่วโมงเร่งด่วน

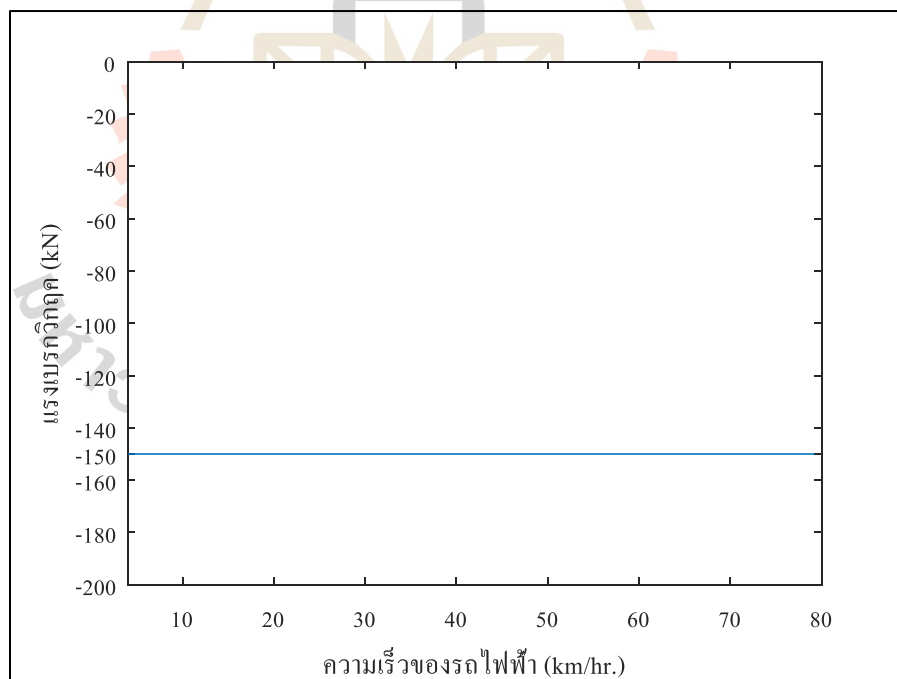


(ข) แรงเบรวิกิถุดในชั่วโมงเร่งด่วน

รูปที่ 4.1 แรงสูงสุดลากวิกิถุดและแรงเบรวิกิถุดในชั่วโมงเร่งด่วน



(ก) แรงจุดลากวิกฤตในชั่วโมงไม่เร่งด่วน



(ข) แรงเบรกวิกฤตในชั่วโมงไม่เร่งด่วน

รูปที่ 4.2 แรงจุดลากวิกฤตและแรงเบรกวิกฤตในชั่วโมงไม่เร่งด่วน

4.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองของโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังเช่น เส้นโค้งความเร็ว ตำแหน่งของรถไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ เป็นต้น โดยจำแนกหัวข้อดังนี้

4.3.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในกรณีฐาน

4.3.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่

4.3.3 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

4.3.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า

4.3.5 การจำลองการเดินรถไฟฟ้าหลายขบวน โดยอ้างอิงน้ำหนักบรรทุกที่ AW3 ที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

4.3.6 คำนวณระยะเวลาคืนทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

ก่อนที่จะทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจำเป็นต้องสร้างเส้นทางและรูปแบบแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีสมการที่ใช้สำหรับคำนวณและ ที่นำเสนอในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.2 เสียก่อน ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แรงต้านการเคลื่อนที่ของสมการควี แรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงทางลาดชัน และแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากทางโค้ง นอกจากนี้ยังต้องการตำแหน่งที่ตั้งของสถานีขนส่งผู้โดยสารของเส้นทางขึ้นและขาล่อง เพื่อกำหนดจุดเบรกของรถไฟฟ้า ตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยในเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากไม่สามารถระบุตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยได้จึงสมมติให้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยตั้งอยู่ที่ตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารเส้นทางขาขึ้น โดยข้อมูลตำแหน่งของที่ตั้งสถานีขนส่งผู้โดยสารขาขึ้นและขาล่อง ถูกแสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารและตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเส้นทางขาขึ้น

เส้นทางขาขึ้น			
ชื่อสถานี	ตัวย่อ	ตำแหน่งของสถานี	การติดตั้งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
หัวลำโพง	HUA_N	0	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
สามย่าน	SAM_N	1498	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
สีลม	SI_N	2320	-
ลุมพินี	LUM_N	3301	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
บ่อนไก่	BON_N	4286	-
ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิต	QUEEN_N	5905	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
สุขุมวิท	SUK_N	6796	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
เพชรบูรณ์	PET_N	8101	-
พระราม 9	PHRA_N	9028	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
เทียมรวมมิตร	THIAM_N	10200	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
ห้วยขวาง	PRA_N	11610	-
สุทธิสาร	SUT_N	12870	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
รัชดาภิเษก	RAT_N	13880	-
ลาดพร้าว	LAT_N	14830	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
พหลโยธิน	PHA_N	16250	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
หมอชิต	MO_N	17900	-
กำแพงเพชร	KAM_N	18720	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
บางซื่อ	BANG_N	19700	มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของสถานีขนส่งผู้โดยสารและตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเส้นทางชาล่อง

เส้นทางชาล่อง			
ชื่อสถานี	ตัวย่อ	ตำแหน่งของสถานี	การติดตั้งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย
หัวลำโพง	HUA_D	0	-
สามย่าน	SAM_D	1494	-
สีลม	SI_D	2317	-
ลุมพินี	LUM_D	3298	-
บ่อนไก่	BON_D	4284	-
ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิต	QUEEN_D	5121	-
สุขุมวิท	SUK_D	6826	-
เพชรบูรณ์	PET_D	8131	-
พระราม 9	PHRA_D	9055	-
เทียมรวมมิตร	THIAM_D	10220	-
ห้วยขวาง	PRA_D	11650	-
สุทธิสาร	SUT_D	12900	-
รัชดาภิเษก	RAT_D	13920	-
ลาดพร้าว	LAT_D	14870	-
พหลโยธิน	PHA_D	16300	-
หมอชิต	MO_D	18000	-
กำแพงเพชร	KAM_D	18800	-
บางซื่อ	BANG_D	19750	-

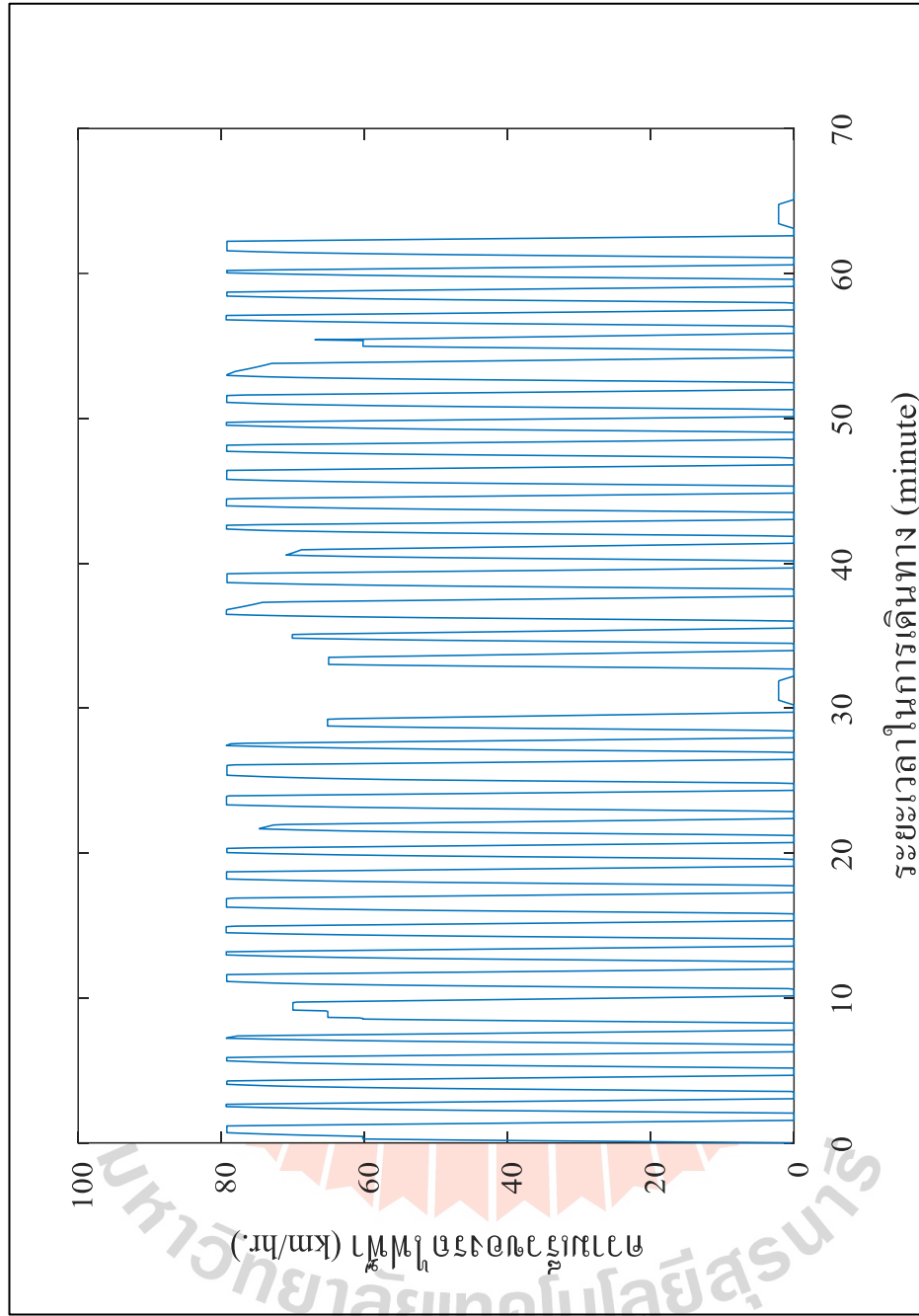
4.3.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในกรณีฐาน

การจำลองในหัวข้อนี้อาศัยข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ AW 3 เพื่อทดสอบความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรแกรมจำลองที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB กับชุดข้อมูลที่เก็บมาจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน (TCU) ของรถไฟฟ้า

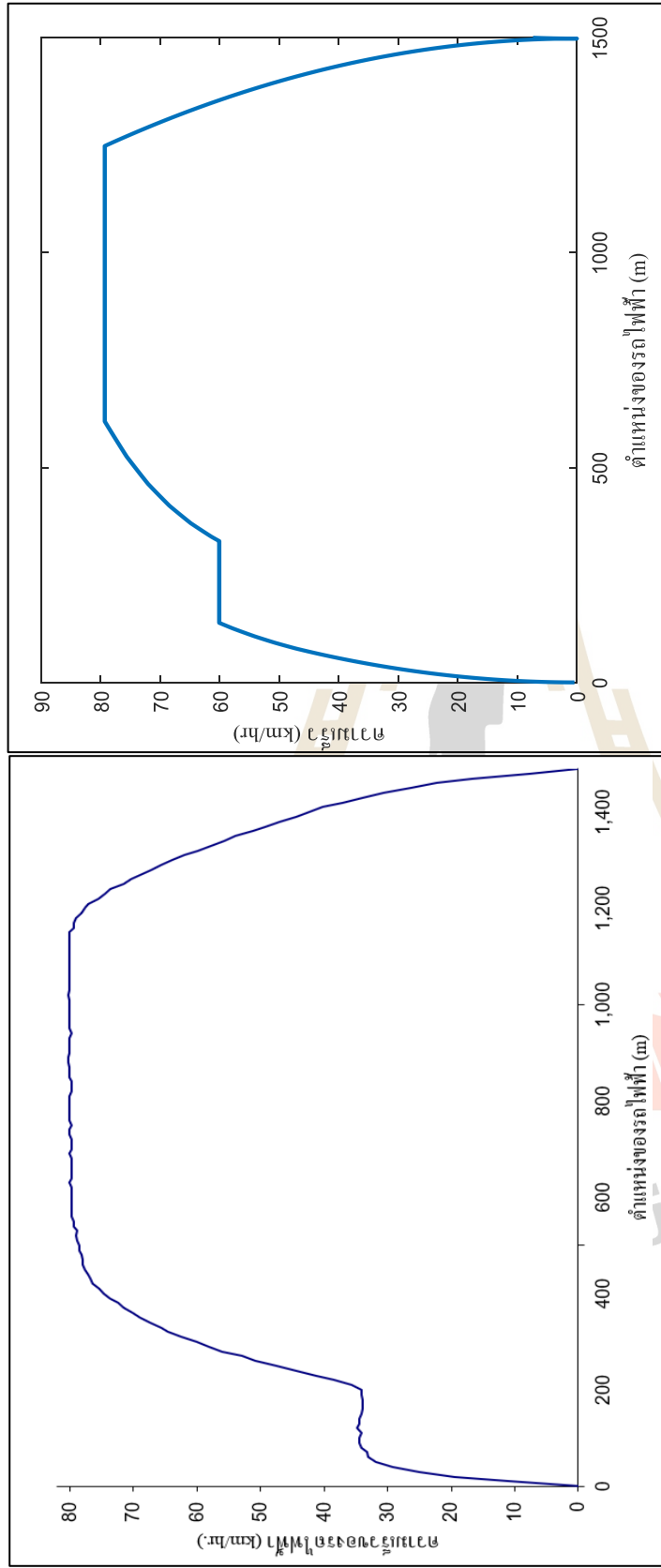
ในการทดสอบกรณีฐานของรถไฟฟ้า กำหนดให้รถไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวน ที่มีน้ำหนัก AW3 วิ่งจากสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงไปยังสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ และ วิ่งจากสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อกลับมายังสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง เพื่อนำข้อมูลการใช้พลังงาน

ที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้รับจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า โดยผลการจำลองถูกแสดงในรูปแบบ เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมตลอดทั้งเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคลถูกแสดงดังรูปที่ 4.3 และการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกับเส้นโค้งความเร็วจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนถูกตั้งแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7 และการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วของสถานีอื่น ๆ ถูกนำไปแสดงที่ภาคผนวก ค.





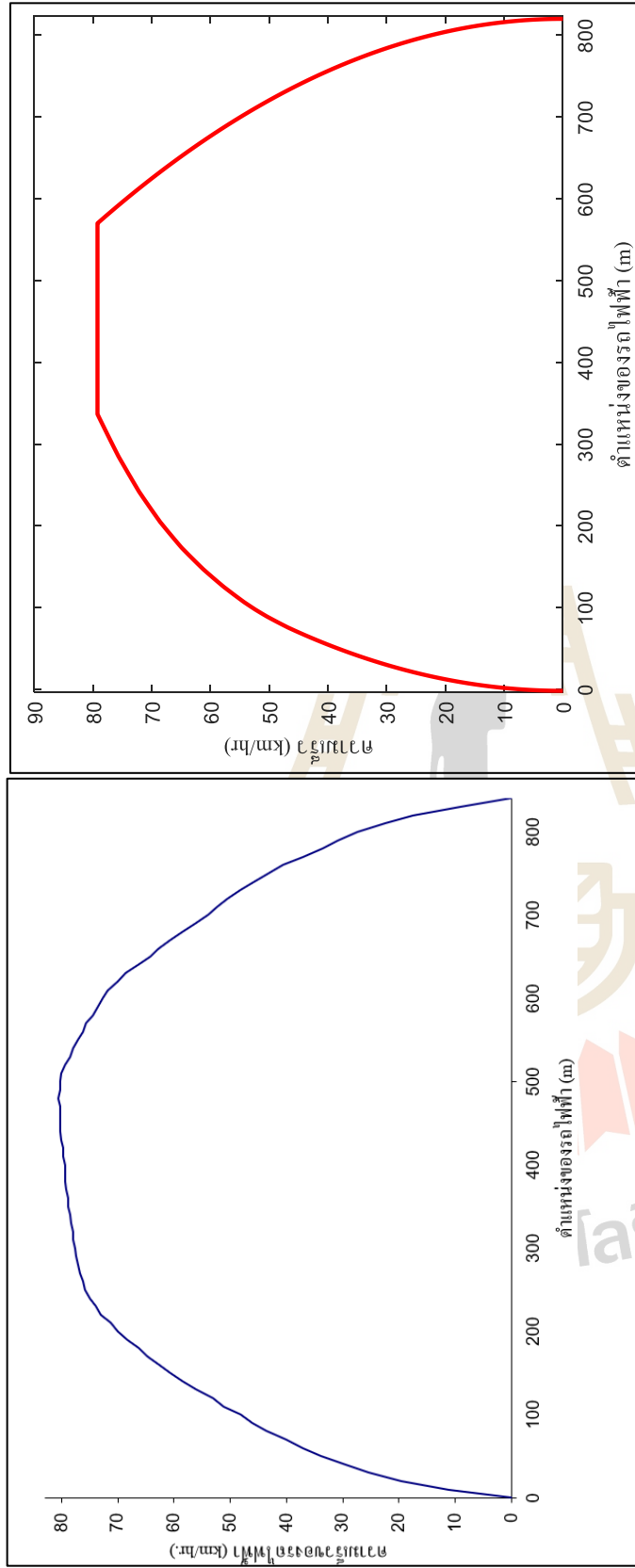
รูปที่ 4.3 เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง



ความเร็วของรถไฟฟ้าจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

ความเร็วของรถไฟฟ้าจากการจำลอง

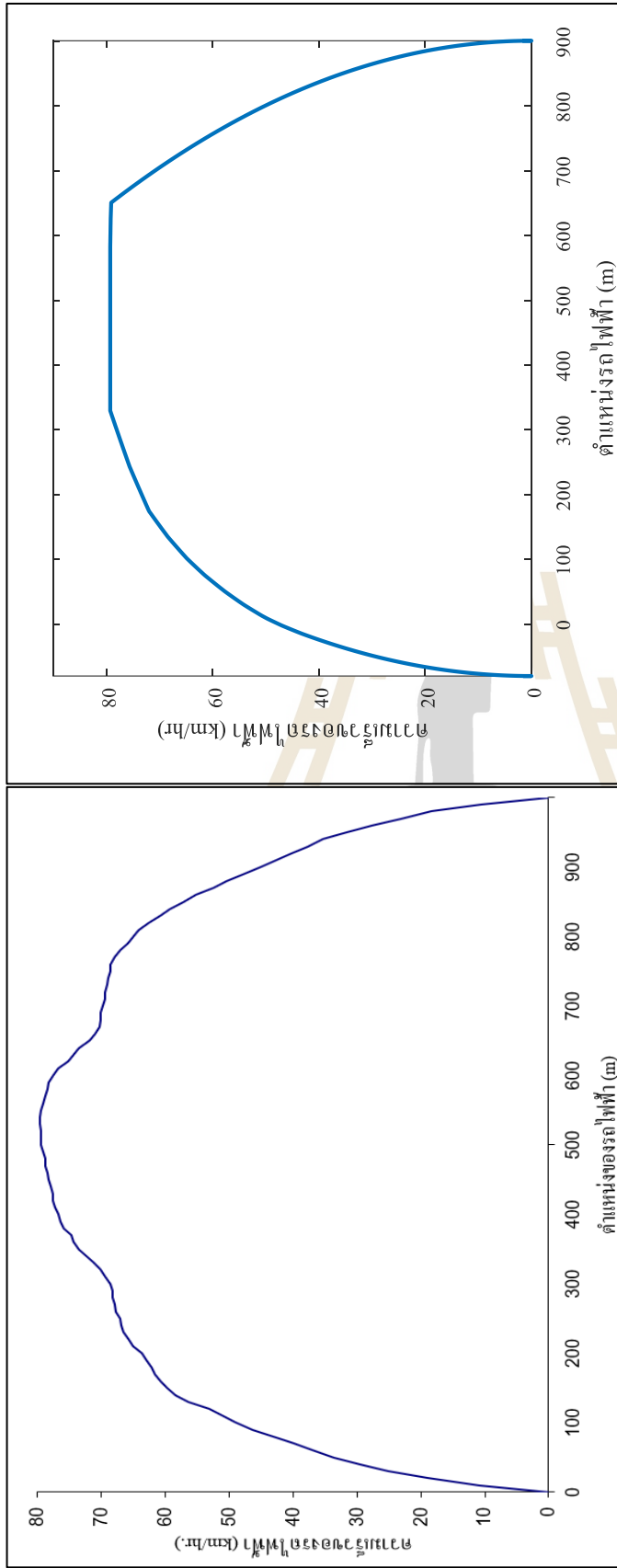
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีหัวลำโพงกับสถานี สามย่าน



ความเร็วยานยนต์ไฟฟ้าจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

ความเร็วของรถไฟฟ้าจากการจำลอง

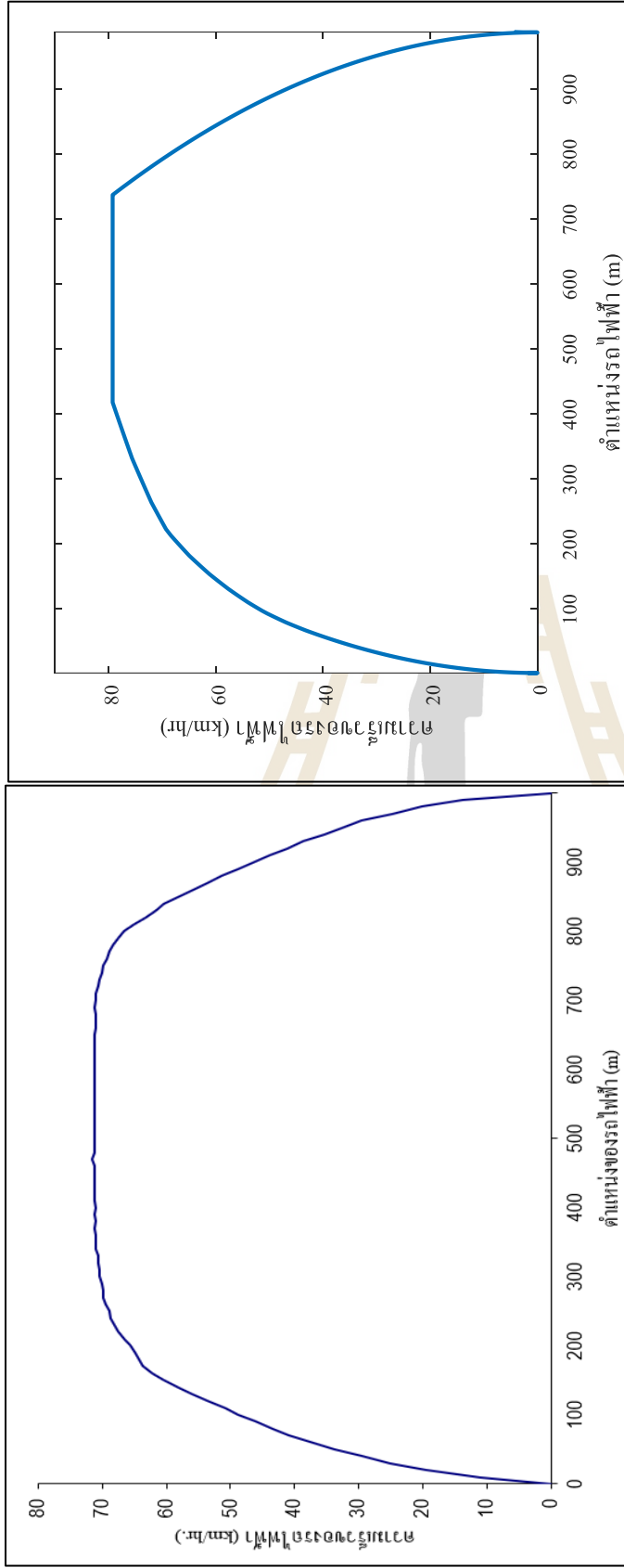
รูปที่ 4.5 เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีสามย่านกับสถานีสีลม



ความเร็วของรถที่ไฟจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

ความเร็วของรถที่ไฟจากกาจราจร

รูปที่ 4.6 เส้นโค้งความเร็วของรถที่ระหว่างสถานีติดลมกับสถานีลูมฟินี



ความเร็วของรถไฟฟ้าจากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

ความเร็วของรถไฟฟ้าจากการจำลอง

รูปที่ 4.7 เส้น โกงความเร็วของรถไฟฟ้าระหว่างสถานีลูมพินีกับสถานีคลองเตย

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า เส้นโค้งความเร็วมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก

1.) อัตราเร่งที่ใช้ในรถไฟฟ้าจริงมีอัตราไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถไฟฟ้าที่ให้บริการและความล่าช้าของตารางเวลาเดินรถไฟฟ้าในขณะนั้น แต่ในการจำลองตัวโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาได้กำหนดให้อัตราเร่งที่ใช้ในการเร่งความเร็วคงที่

2.) มวลของรถไฟฟ้าที่ใช้ในชีวิตจริงไม่เป็นมวลแบบจุดเดียว แต่ในการจำลองด้วยโปรแกรมมวลของรถไฟฟ้าถูกกำหนดให้เป็นจุดเดียว

3.) ระยะเวลาที่ใช้ในการลดความเร็วเพื่อจอดที่สถานีรับ-ส่งผู้โดยสารของรถไฟฟ้าที่ใช้ในชีวิตจริง มีการเปลี่ยนแปลงตามความล่าช้าของตารางเวลาเดินรถไฟฟ้า จึงมีค่าไม่คงที่ แต่ในโปรแกรมจำลองระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองถูกกำหนดให้คงที่

ดังนั้นหากนำผลการจำลองด้านพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเอกสารทางเทคนิคจะทำให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิด พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองในขณะที่รถไฟฟ้าให้บริการในระบบที่จำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในแต่ละช่วงสถานีถูกแสดงดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางขาขึ้น

สถานีขนส่งผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่งผู้โดยสารปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง (kWh)	ความคลาดเคลื่อน (%)
HUA_N	SAM_N	21.38	22.78	6.5
SAM_N	SI_N	14.43	13.69	5.1
SI_N	LUM_N	18.82	17.65	6.21
LUM_N	BON_N	15.69	17.65	12.49
BON_N	QUEEN_N	16.74	12.96	22.50
QUEEN_N	SUK_N	23.58	23.17	1.73
SUK_N	PET_N	18.75	21.46	14.45

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางขาขึ้น (ต่อ)

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากหน่วย ควบคุมการ ขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากการ จำลอง (kWh)	ความคลาด เคลื่อน (%)
PET_N	PHRA_N	18.16	15.69	13.60
PHRA_N	THIAM_N	19.8	15.36	22.42
THIAM_N	PRA_N	21.12	20.56	2.65
PRA_N	SUT_N	19.7	18.06	8.32
SUT_N	RAT_N	17.69	16.44	7.06
RAT_N	LAT_N	15.99	16.54	3.43
LAT_N	PHA_N	20.7	19.9	3.86
PHA_N	MO_N	22.71	24.63	8.54
MO_N	KAM_N	16.55	14.37	13.17
KAM_N	BANG_N	17.19	12.73	25.94
รวม		319.00	303.64	4.81

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางขาล่อง

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากหน่วย ควบคุมการ ขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากการ จำลอง (kWh)	ความคลาด เคลื่อน (%)
BANG_D	KAM_D	11.11	11.23	1.08
KAM_D	Mo_D	15.88	11.49	27.64
Mo_D	PHA_D	22.39	21.69	3.12
PHA_D	LAT_D	21.05	19.44	7.64

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางขาล่อง (ต่อ)

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากหน่วย ควบคุมการ ขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ ได้จากการ จำลอง (kWh)	ความคลาด เคลื่อน (%)
LAT_D	RAT_D	17.47	15.18	13.10
RAT_D	SUT_D	17.90	17.02	4.91
SUT_D	PRA_D	19.83	17.67	10.89
PRA_D	THIAM_D	20.45	20.47	0.09
THIAM_D	PHRA_D	20.85	14.19	31.90
PHRA_D	PET_D	16.19	15.94	1.54
PET_D	SUK_D	20.42	20.54	0.58
SUK_D	QUEEN_D	21.27	23.03	8.22
QUEEN_D	BON_D	17.00	9.98	41.20
BON_D	LUM_D	14.97	15.45	3.20
LUM_D	SI_D	16.25	15.04	7.44
SI_D	SAM_D	19.13	13.27	30.60
SAM_D	HUA_D	26.89	18.96	30.00
รวม		319.05	280.58	12.05

หลังจากที่ได้ผลจำลองในแต่ละช่วงสถานีแล้ว ต่อมาต้องประเมินความคลาดเคลื่อนของทั้งระบบ โดยการนำพลังงานในการเคลื่อนที่ที่ได้รับจากการจำลองมารวมกันเพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน เนื่องการเปรียบเทียบสังเกตการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าได้ง่ายกว่าการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่ช่วงสถานี เมื่อเปลี่ยนรูปแบบของเส้นโค้งความเร็วหรือนำอุปกรณ์เก็บพลังงานมาประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นผลการเปรียบเทียบพลังงานรวมและคำนวณความคลาดเคลื่อนถูกแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลจำลองกับผลที่วัดได้จากการทดลองวิ่ง

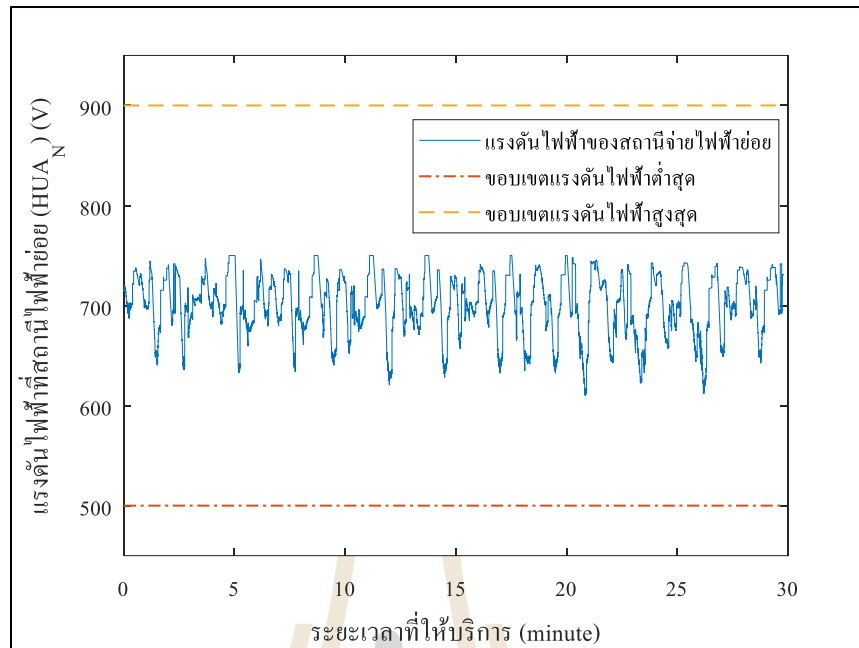
น้ำหนักของ รถไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้ในการ ขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานสูญเสียที่ เกิดขึ้นจากการเบรก (kWh)	เวลาที่ใช้ในการเดินทาง (Minute)
ค่าจากการวิ่งจริง	638.05	267.68	64.65
ค่าจากการจำลอง	580.22	295.24	65.6
ค่าความผิดพลาด	9.06 %	10.29 %	1.4 %

หลังจากทราบความคลาดเคลื่อนของระบบที่ใช้ในการจำลองแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการนำระบบที่สร้างขึ้นมาใช้ออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานสุทธิในการเคลื่อนที่

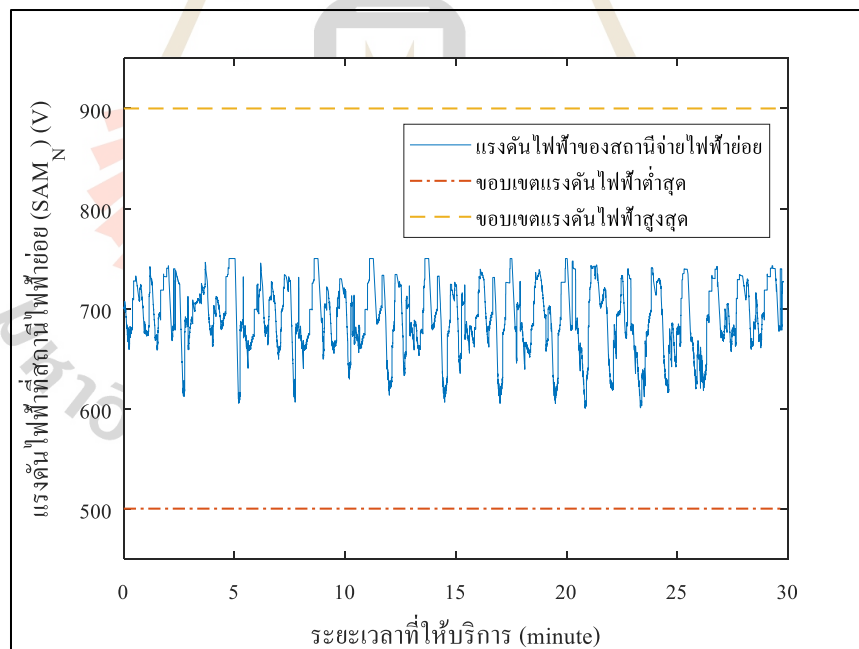
หลังจากทราบถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อมาก็จะนำเสนอผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการฉีดกระแสไฟฟ้า โดยระบบที่ใช้ในการหาผลเฉลยเป็นการเป็นการจำลองเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวนที่ประกอบด้วยรถไฟฟ้าจำนวน 18 ขบวน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ประกอบด้วยรถไฟฟ้าจำนวน 9 ขบวน จุดปล่อยรถไฟฟ้าอยู่ที่สถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง ระยะห่างในการปล่อยรถไฟฟ้าออกจากสถานีห่างกัน 2.19 นาทีและส่วนที่สองประกอบด้วยรถไฟฟ้าจำนวน 9 ขบวน จุดปล่อยรถไฟฟ้าอยู่ที่สถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ ระยะห่างในการปล่อยรถไฟฟ้าออกจากสถานีห่างกัน 2.19 นาที เช่นเดียวกัน ผลเฉลยแรงดันที่นำเสนอถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยและแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)-(ข) และ รูปที่ 4.9 ตามลำดับ

จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยที่ถูกแสดงถึงรูปที่ 4.8 (ก)-(ข) สังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยมีความผันผวน ซึ่งเกิดจากลักษณะการเดินรถไฟฟ้าและรูปแบบของกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการให้บริการ โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ผันผวนจะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ผลของการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้รถไฟฟ้าสูงขึ้นซึ่งทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รถไฟฟ้าเกิดความเสียหาย

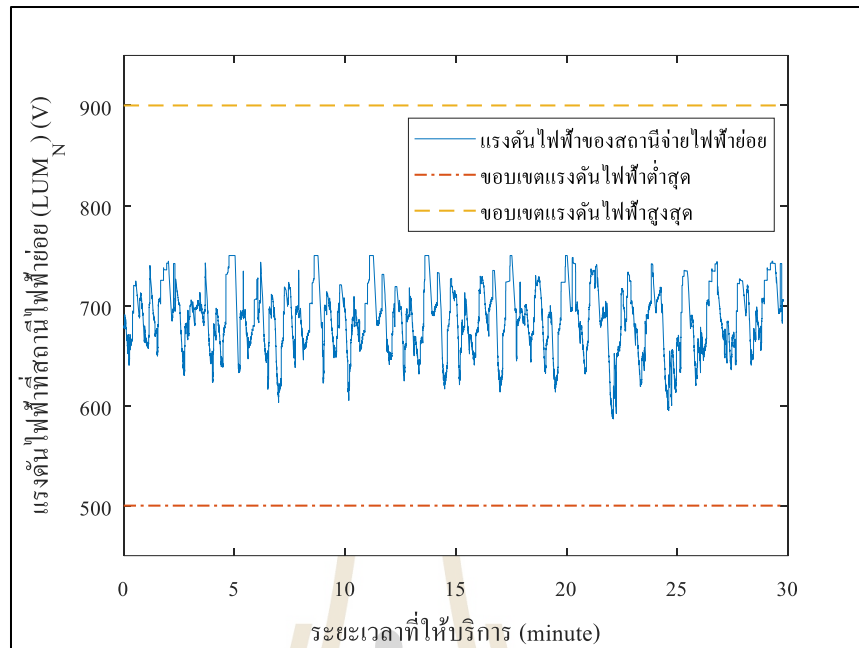
จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่ามีลักษณะผันผวนคล้ายกับผลเฉลยแรงดันของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย แต่การลดลงของระดับแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าจะถูกกำหนดด้วยแรงดันที่เหมาะสมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้ผลิตรถไฟฟ้า



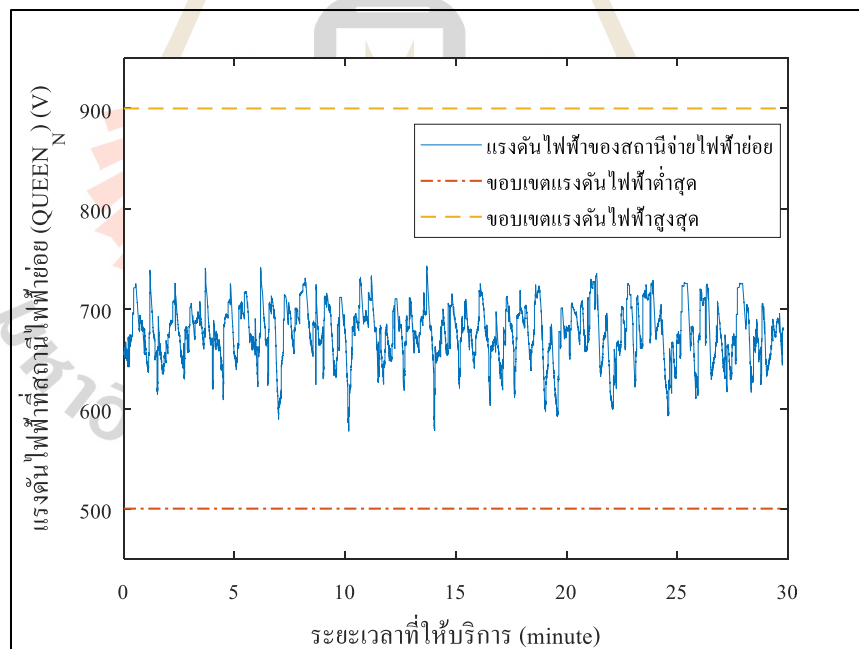
(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพง



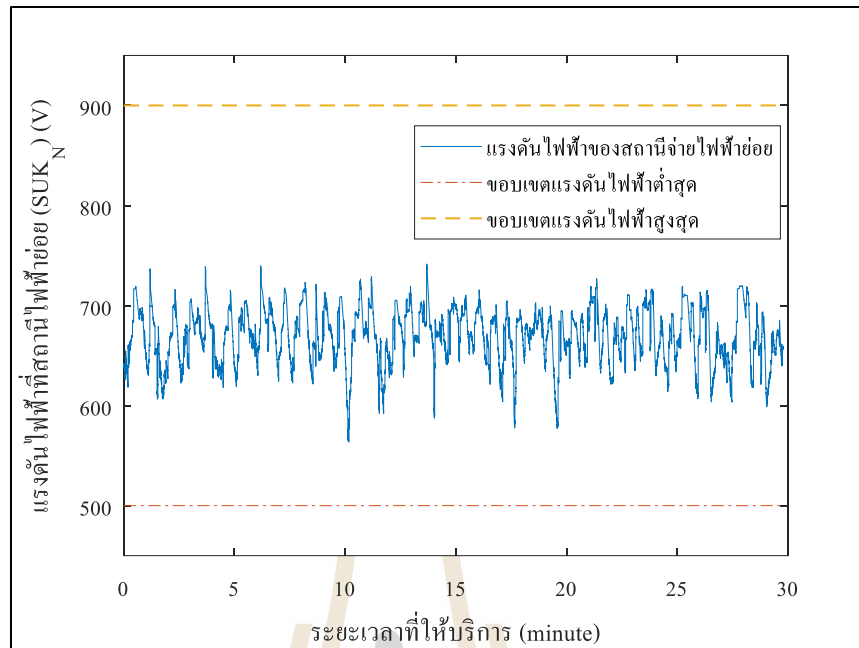
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสามย่าน



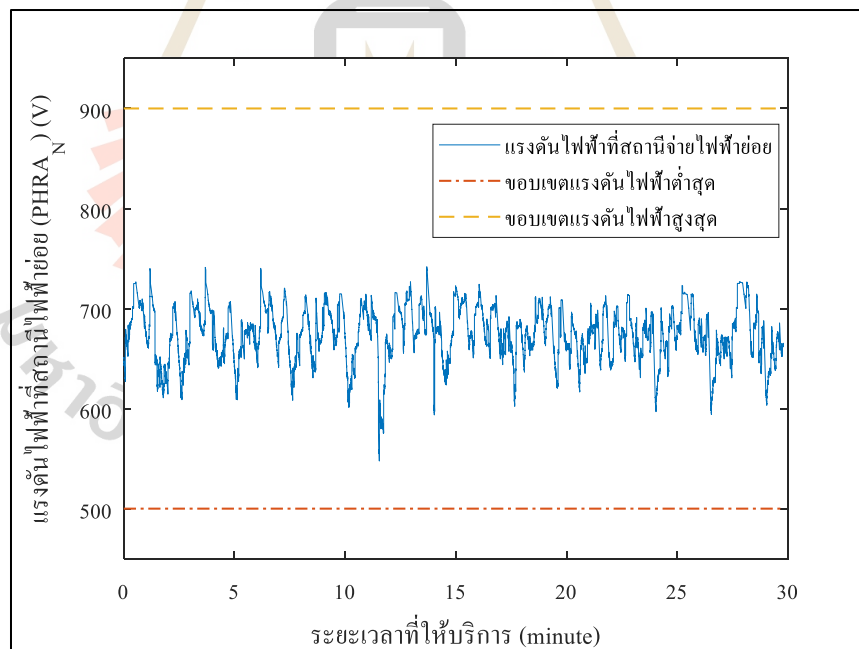
(ค) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลุมพินี



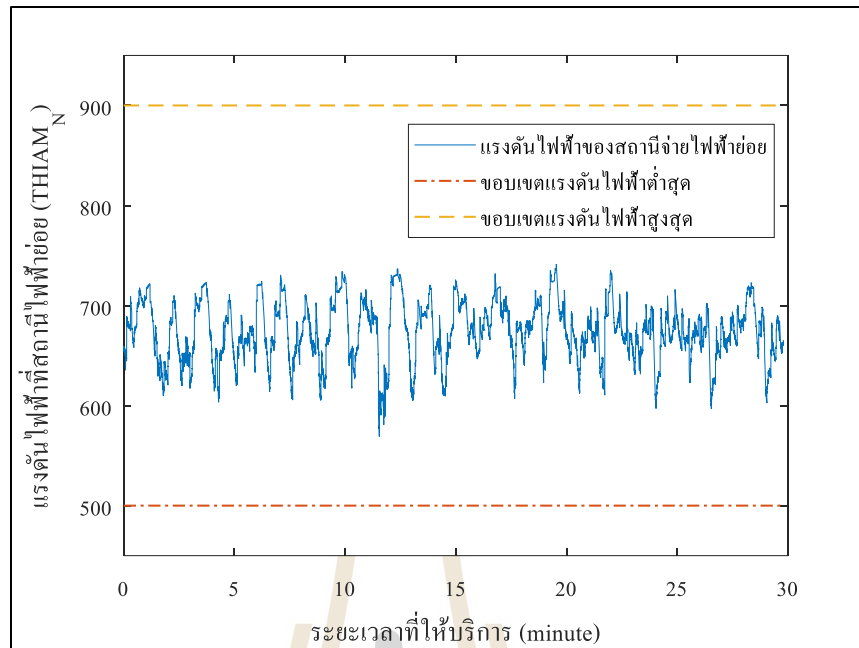
(ง) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์



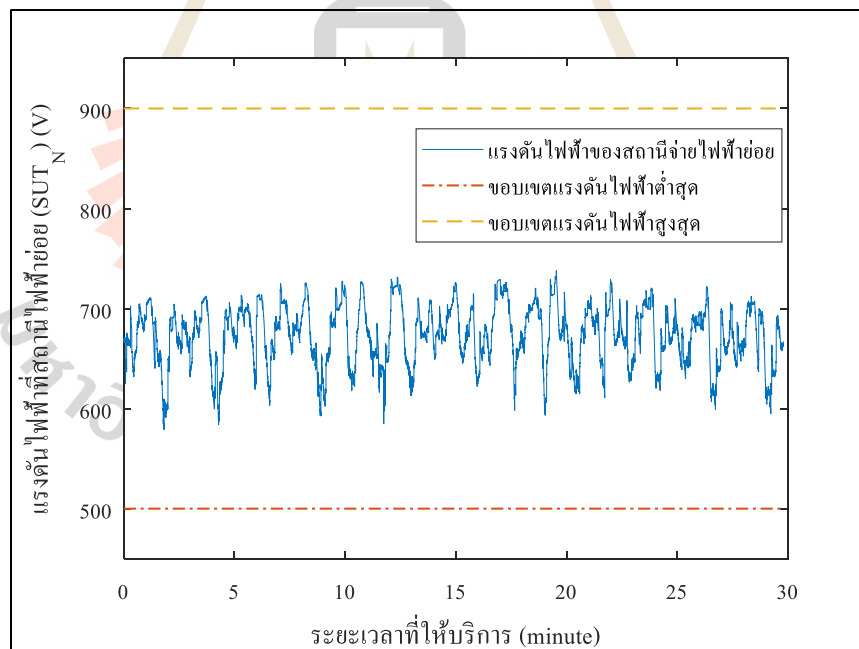
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุขุมวิท



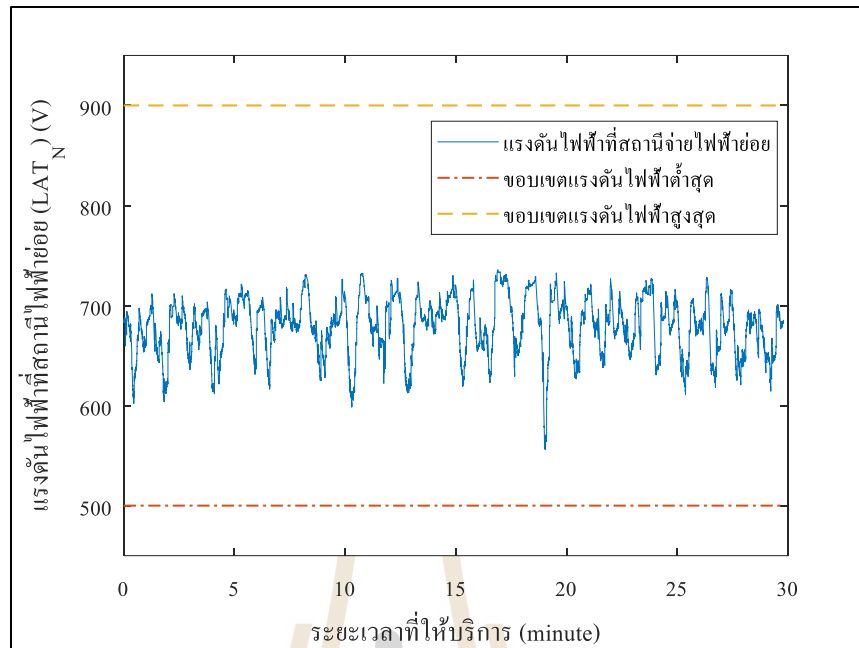
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพระราม 9



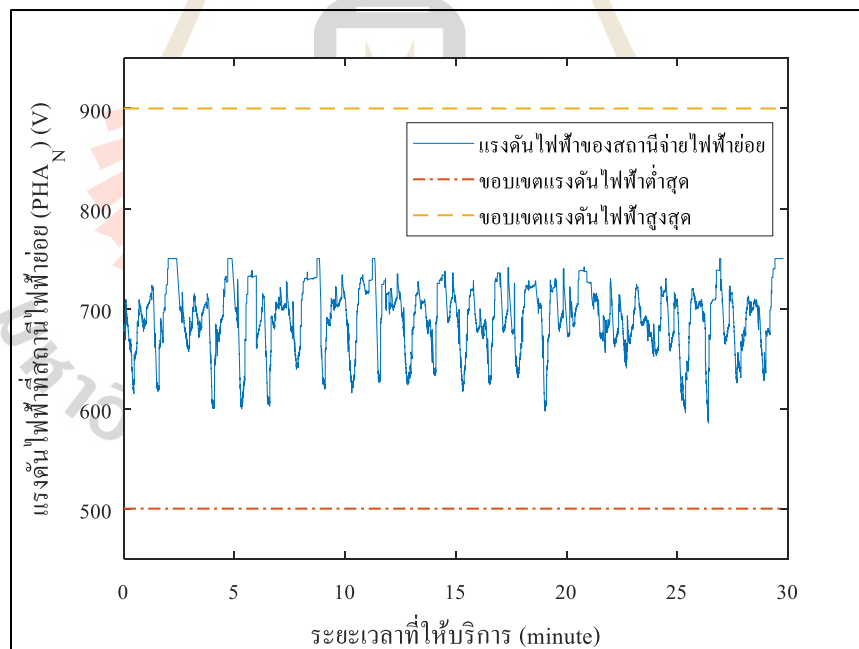
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเทียมรวมมิตร



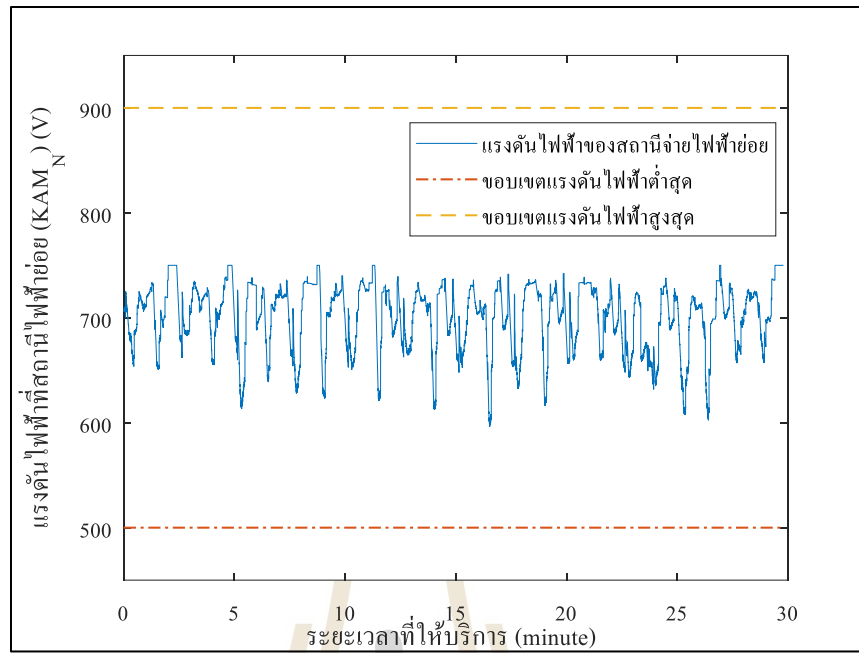
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุทธิศาร



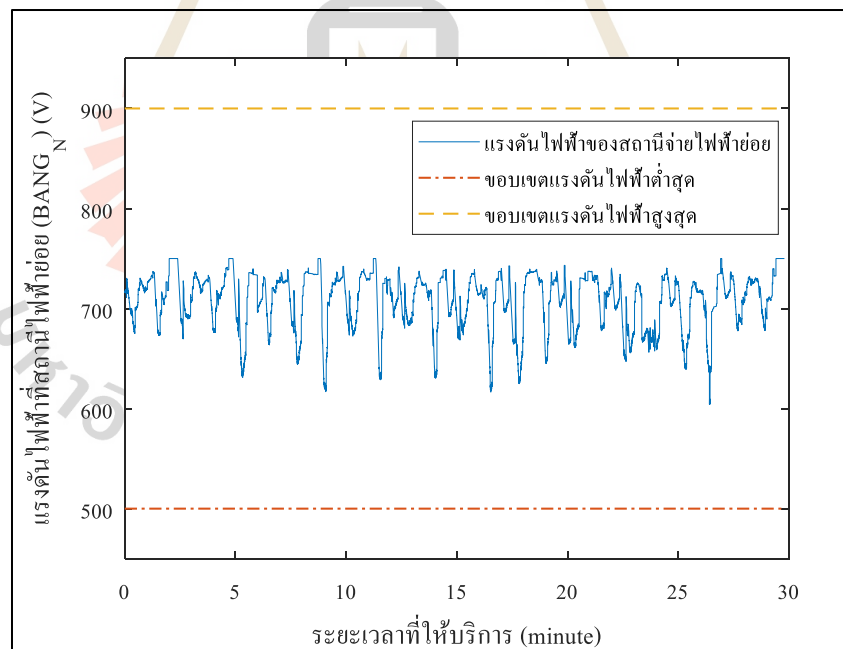
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลาดพร้าว



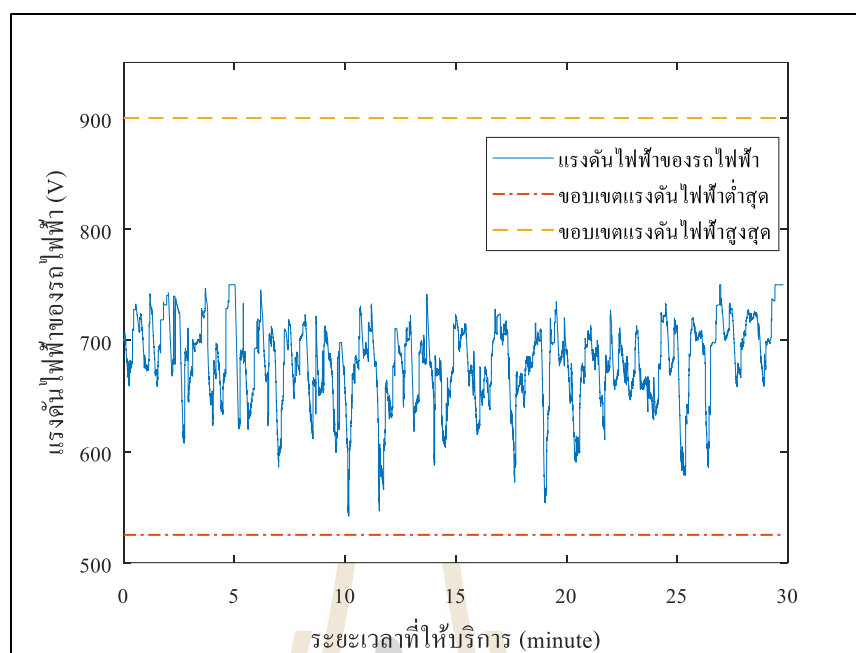
(ญ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพหลโยธิน



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยกำแพงเพชร



(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยบางซื่อ
รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.8(ก)-(ง) สังเกตได้ว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณอยู่ในขอบเขตที่กำหนด การลดลงของแรงดันสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ อาทิเช่น ความหนาแน่นของการจราจรในช่วงสถานีนั้น ๆ เป็นต้น

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงแรงดันของรถไฟฟ้าที่ให้บริการ โดยจำลองการเคลื่อนที่จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ พบว่าผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดและไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงดัน เนื่องจากการจำลองได้กำหนดให้ในกรณีนี้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกทั้งหมดถูกนำไปเผาทิ้งโดยใช้ตัวต้านทานเบรก

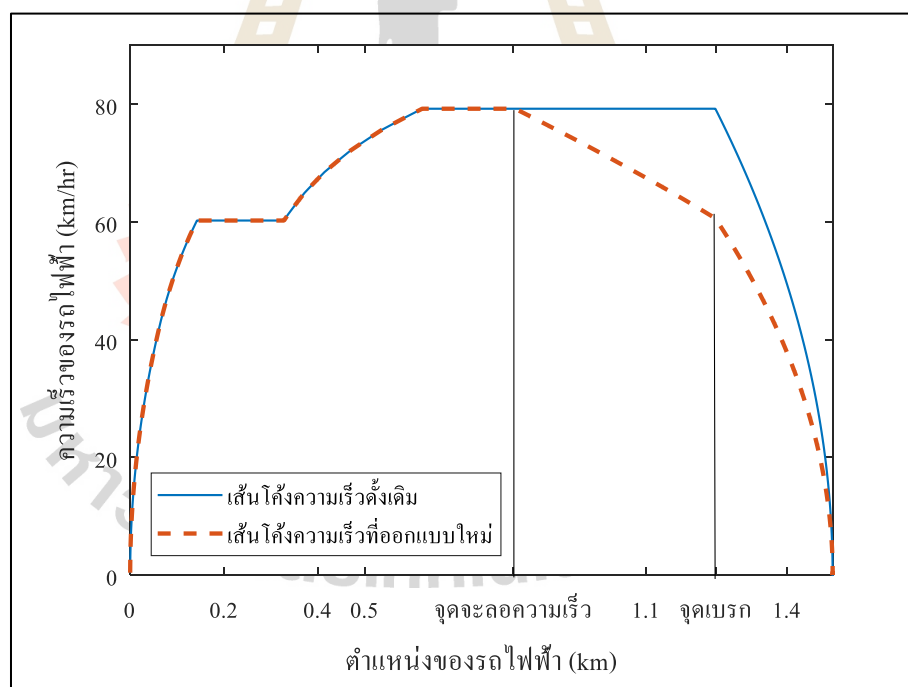
4.3.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่

การจำลองในหัวข้อนี้อาศัยข้อมูลน้ำหนักบรรทุกทุกที่ AW2 มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าทั้งหมด 152 ตัน ซึ่งถูกใช้จำลองการเดินทางในเวลาไม่เร่งด่วน เพื่อศึกษาผลของความเร็วสูงสุดและผลของการทำงานของรถไฟฟ้าในโหมดชะลอความเร็วต่อรถไฟฟ้า โดยที่ผลลัพธ์จากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่น้ำหนัก AW2 ดังนั้นผลการจำลองต่าง ๆ จำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งจะแสดงถึง เส้นโค้งความเร็วกำลังไฟฟ้า และตำแหน่งของรถไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ระหว่างสถานี เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งความเร็ว กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยข้อมูลทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.12 รูปแบบที่สองจะนำเสนอการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลง

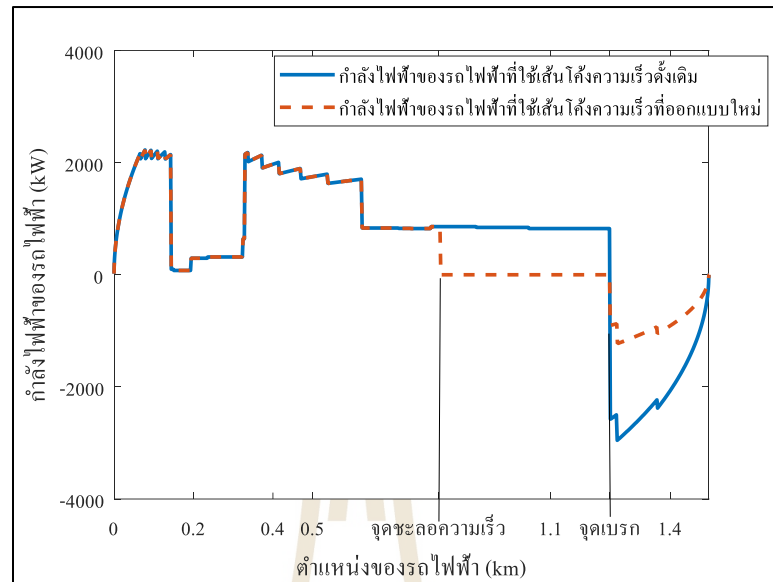
เส้นโค้งความเร็วที่มีต่อกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและตำแหน่งของรถไฟฟ้าตลอดเส้นทางขาขึ้นและขาล่อง โดยการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.11 คือเส้นโค้งความเร็วในเส้นทางขาขึ้นและรูปที่ 4.12 คือเส้นโค้งความเร็วในเส้นทางขาล่อง และตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว อาทิเช่น ตำแหน่งการชะลอความเร็ว ความเร็วสูงสุด ถูกแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ได้รับจากการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว

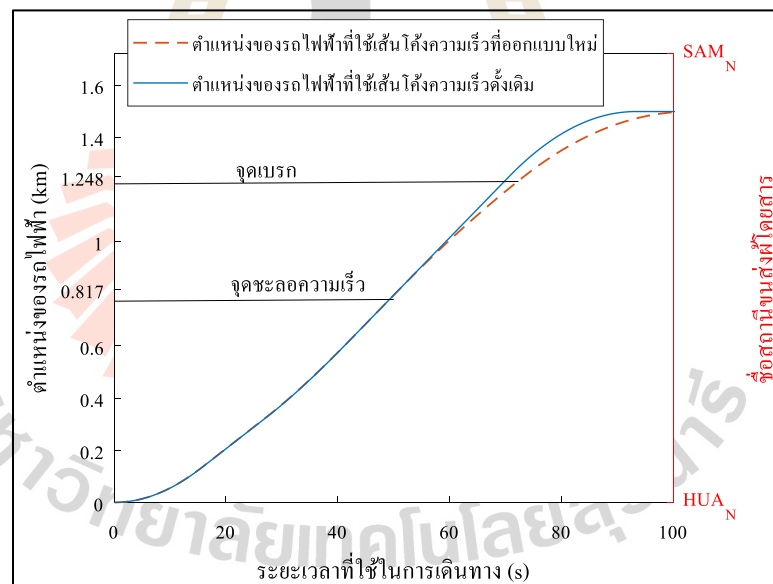
สถานีต้นทาง	สถานีปลายทาง	ตำแหน่งโหมดชะลอความเร็ว	ความเร็วสูงสุด	ตำแหน่งเบรก
ตำแหน่งสถานี (km)	ตำแหน่งสถานี (km)	(km)	(km/hr.)	(km)
หัวลำโพง	สามย่าน	0.817	80	1.248
0	1.498			



รูปที่ 4.10 เส้นโค้งความเร็วแบบดั้งเดิมกับเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่

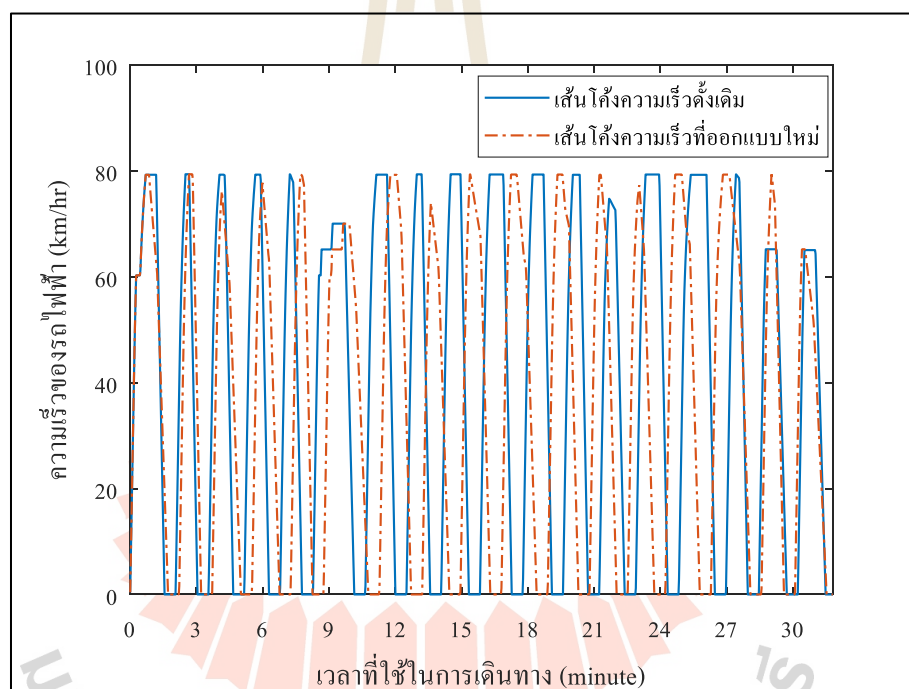


รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าของเส้นโค้งความเร็วทั้งสองรูปแบบ

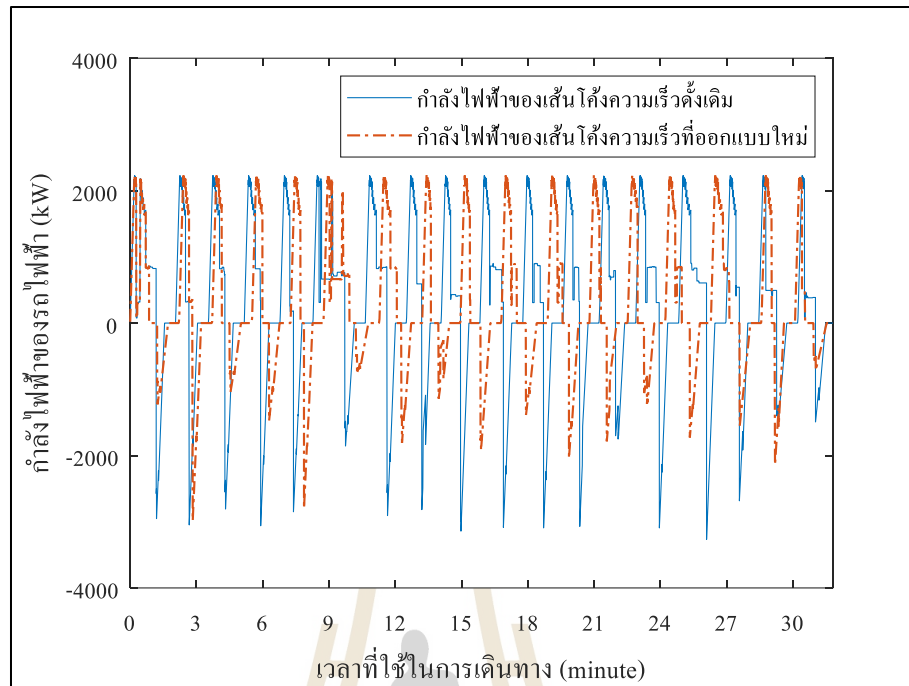


รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของรถไฟฟ้าของเส้นโค้งความเร็วทั้งสองรูปแบบ

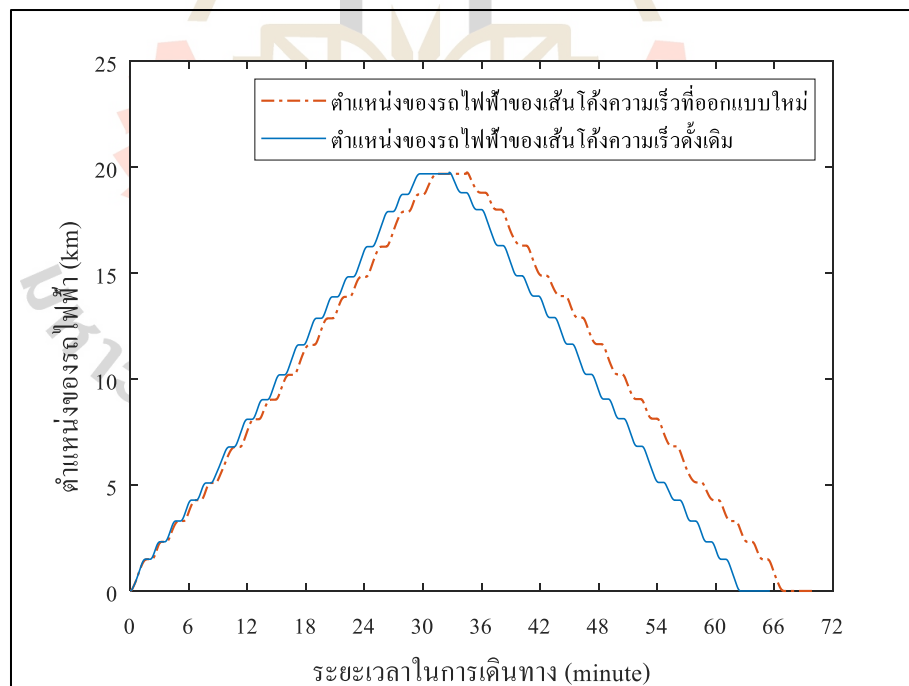
หลังจากที่ทราบถึงรูปแบบของเส้นโค้งความเร็วที่ได้รับจากการออกแบบแล้ว ต่อไปนี้จะนำเสนอเส้นโค้งความเร็วของเส้นทางขาขึ้นและเส้นทางขาล่อง พร้อมทั้ง กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและตำแหน่งของรถไฟฟ้า เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมการออกเส้นโค้งความเร็วและเห็นความแตกต่างของเส้นโค้งความเร็วแบบดั้งเดิมและส่วนที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ พร้อมทั้งประเมินพลังงานสุทธิตลอดเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล โดยที่ผลการจำลองเส้นโค้งความเร็ว กำลังไฟฟ้า และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลการจำลองส่วนขาขึ้นและผลการจำลองส่วนขาล่อง โดยที่ผลการจำลองส่วนขาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.15 และผลการจำลองในส่วนขาล่องแสดงดังรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18



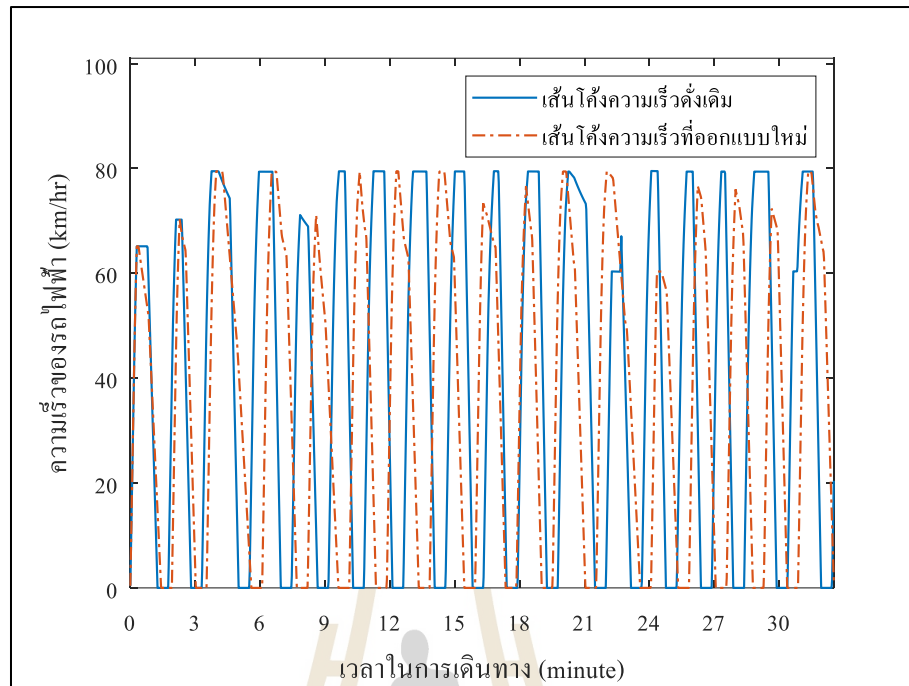
รูปที่ 4.13 เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น



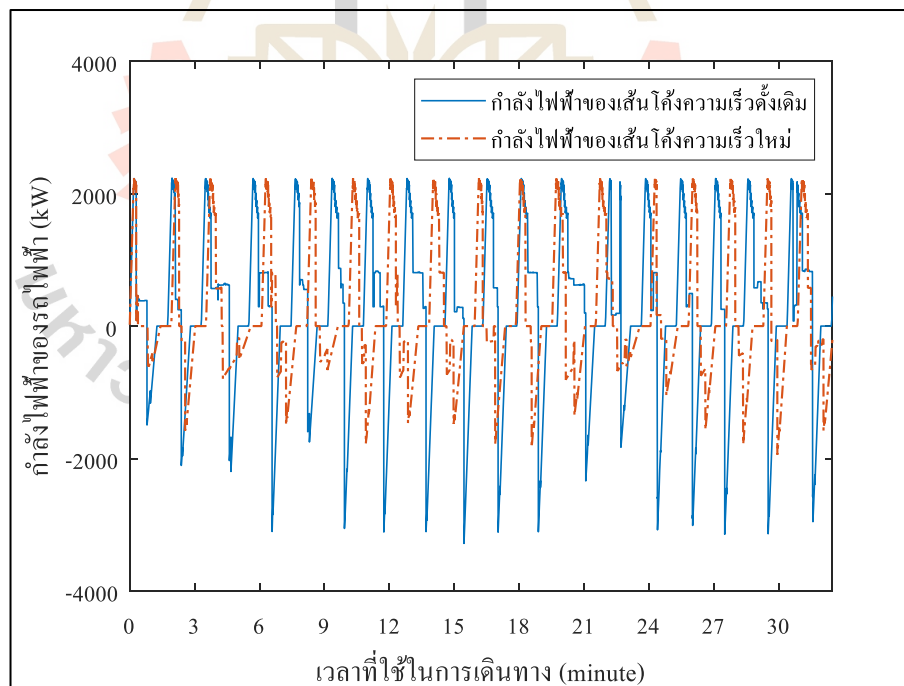
รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น



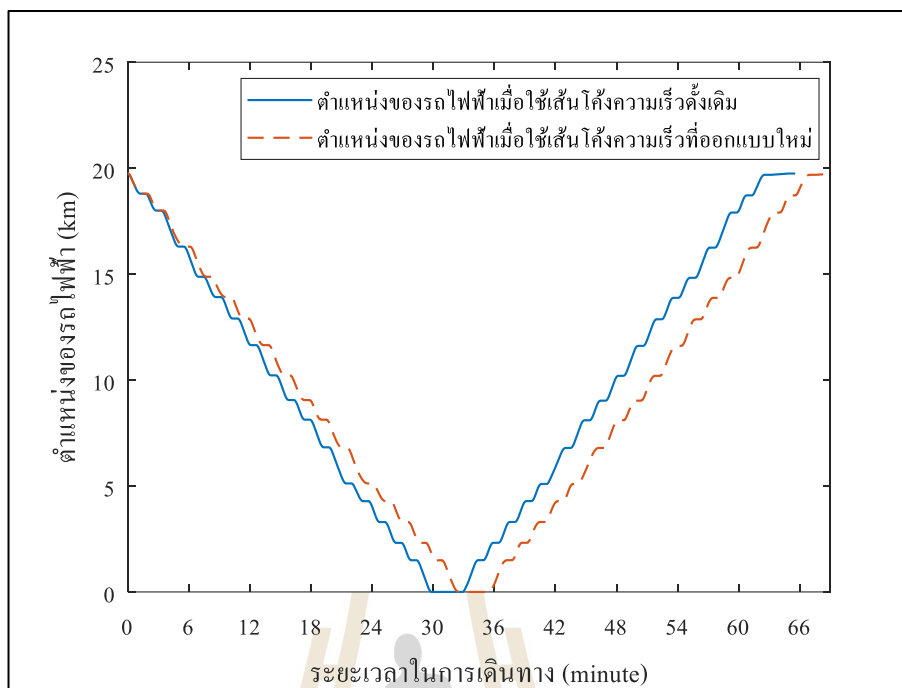
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น



รูปที่ 4.16 เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าในเส้นทางชาล่อง



รูปที่ 4.17 กำลังไฟฟ้ของรถไฟฟ้าในเส้นทางชาล่อง



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งของรถไฟฟ้าในเส้นทางขาล่อง

พลังงานที่ลดลงจากการปรับปรุงเส้น โถ้งความเร็วเกิดขึ้นระหว่างที่รถไฟฟ้าทำงาน ด้วยโหมดชะลอความเร็ว โดยในเส้น โถ้งความเร็วแบบดั้งเดิมไม่มีการชะลอความเร็วเนื่องจาก รถไฟฟ้าได้คืนสายเคเบิลที่ขมวดอยู่ในประเภทรถไฟฟ้ายกให้บริการพิสัยใกล้หรือระยะห่างของ สถานีขนส่งผู้โดยสารมีระยะห่างน้อย ดังนั้น โหมดชะลอความเร็วจึงไม่ถูกนำมาใช้นำมาใช้งานกับ รถไฟฟ้าใต้ดินในปัจจุบัน การทำงานของโหมดชะลอความเร็วระบบขับเคลื่อนจะหยุดรับพลังงาน ไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหรืออุปกรณ์เก็บพลังงานและปล่อยให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย ดังนั้นจึงส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ลดลง

จากการจำลองการเปรียบเทียบตำแหน่งของรถไฟฟ้างานรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาในการเดินทางที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยสาเหตุเส้น โถ้งความเร็วที่ ออกแบบขึ้นมาใหม่มีเวลาเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเข้าสู่โหมดชะลอความเร็วส่งผลให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ช้าลง ส่งผลให้ระยะเวลาในการเดินทางตลอดทั้งสายเพิ่มขึ้นประมาณ 5 นาที

ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเส้น โถ้งความเร็วที่ออกแบบใหม่ แสดงใน ตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.11 โดยตารางที่ 4.7 และ 4.8 นำเสนอการเปรียบเทียบพลังงานของรถไฟฟ้า ระหว่างเส้น โถ้งความเร็วแบบเดิมและเส้น โถ้งความเร็วแบบใหม่ ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการใช้ พลังงานของรถไฟฟ้า เมื่อให้บริการด้วยเส้น โถ้งความเร็วแบบเดิมเปรียบเทียบกับรถไฟฟ้าที่

ให้บริการด้วยเส้นโค้งความเร็วที่ถูกรื้อออกแบบขึ้นมาใหม่ ในส่วนของตารางที่ 4.10 และ 4.11 จะนำเสนอข้อมูลของจุดชะลอความเร็วที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางขาขึ้น

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสารปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าที่ เกิดการใช้ เส้นโค้งความเร็ว ดั้งเดิม (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ เกิดการใช้ เส้นโค้งความเร็ว ที่ออกแบบใหม่ (kWh)	ตำแหน่งที่ ชะลอ ความเร็ว (m)
HUA_N	SAM_N	21.76	17.16	808
SAM_N	SI_N	13.00	12.86	2,145
SI_N	LUM_N	16.83	12.10	2,654
LUM_N	BON_N	16.82	13.02	3,916
BON_N	QUEEN_N	12.35	11.84	4,669
QUEEN_N	SUK_N	22.15	18.68	6,766
SUK_N	PET_N	20.46	17.68	7,361
PET_N	PHRA_N	14.93	10.69	8,452
PHRA_N	THIAM_N	14.64	11.58	9,451
THIAM_N	PRA_N	19.61	15.30	10,804
PRA_N	SUT_N	17.23	14.70	12,125
SUT_N	RAT_N	15.68	12.54	13,278
RAT_N	LAT_N	15.94	12.44	14,391
LAT_N	PHA_N	19.01	15.62	15,688
PHA_N	MO_N	23.49852	19.18	16,668
MO_N	KAM_N	13.68	12.35	18,341
KAM_N	BANG_N	12.14	9.29	19,063
รวม		289.80	237.09	-

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองกับหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนในเส้นทางจำลอง

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าที่ เกิดจากการใช้ เส้นโค้งความเร็ว ดั้งเดิม (kWh)	พลังงานไฟฟ้าที่ เกิดจากการใช้ เส้นโค้งความเร็ว ที่ออกแบบใหม่ (kWh)	ตำแหน่งที่ชะลอ ความเร็ว (m)
BANG_D	KAM_D	18.12	14.18	388
KAM_D	Mo_D	12.64	9.85	1,732
Mo_D	PHA_D	14.35	11.39	2,738
PHA_D	LAT_D	14.71	11.09	3,731
LAT_D	RAT_D	9.62	7.22	4,526
RAT_D	SUT_D	21.98	16.80	5,768
SUT_D	PRA_D	19.60	15.14	7,295
PRA_D	THIAM_D	15.18	12.26	8,556
THIAM_D	PHRA_D	13.55	10.05	9,299
PHRA_D	PET_D	19.54	15.41	10,734
PET_D	SUK_D	16.87	12.67	12,212
SUK_D	QUEEN_D	16.23	13.08	13,369
QUEEN_D	BON_D	14.64	10.41	14,328
BON_D	LUM_D	18.55	14.47	15,299
LUM_D	SI_D	20.71	14.71	16,827
SI_D	SAM_D	10.96	9.54	18,240
SAM_D	HUA_D	10.72	7.96	19,151
รวม		268.05	206.66	-

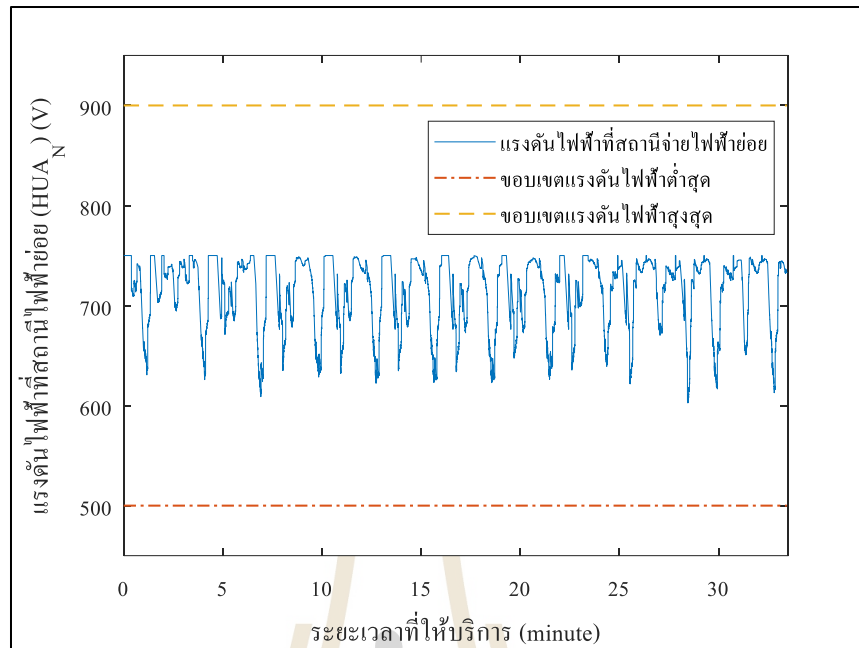
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานของเส้น โต้ังความเร็วแบบดั้งเดิมกับเส้น โต้ังความเร็วที่
ออกแบบใหม่

น้ำหนักของ รถไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้ใน การขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานสูญเสียที่ เกิดขึ้นจากการเบรก (kWh)	พลังงานสุทธิ (kWh)	เวลาที่ใช้ในการ เดินทาง (Minute)
AW2 เส้น โต้ัง ความเร็วเดิม	557.85	280.66	557.82	65.4
AW2 เส้น โต้ัง ความเร็วใหม่	433.75	217.56	433.75	70.92
Energy saver(%)	22.71 %	-	22.71	-

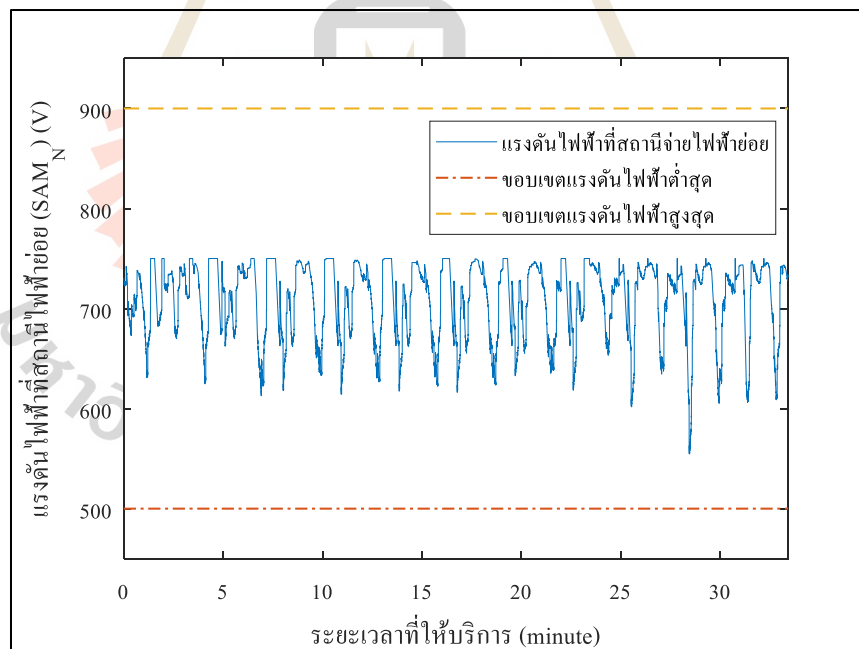
จากผลการจำลองพบว่ารถ ไฟฟ้าการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของค่าความเร็วสูงสุดของ
รถไฟฟ้าพบว่า ด้วยเงื่อนไขการด้านเวลาที่กำหนดให้เวลาในการเดินทางของรถไฟฟ้าสามารถเพิ่ม
ได้เพียง 10 วินาทีในแต่ละการเดินทางระหว่างสถานีต้นทางและสถานีปลายทาง ทำให้การปรับ
ความเร็วสูงสุดไม่สามารถทำได้เนื่องจากผลลัพธ์ของการจำลองได้แสดงค่าความเร็วสูงสุดที่ 80
km/hr. ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้า แต่การกำหนดตำแหน่งชะลอความเร็วของรถไฟฟ้า
สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเห็น ได้ชัด โดยผลจากการทำงานในโหมดชะลอความเร็ว
สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 22.71 %

ผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่รถ ไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยเส้น โต้ังความเร็วที่
ออกแบบขึ้นมาใหม่จะถูกนำมาเป็นกรณีฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับกรณีการจำลองการเคลื่อนที่
ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้น โต้ังความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ถูกนำเสนอ
ในหัวข้อที่ 4.3.4 โดยผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยแสดงในรูปที่ 4.19(ก)-(ฎ) และ
แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.20

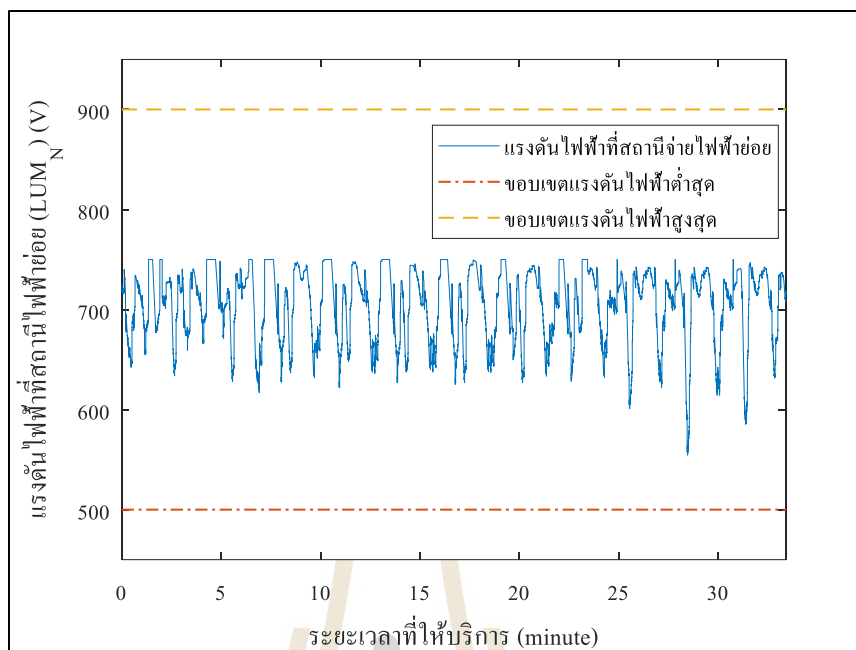
ผลเฉลยแรงดันของรถไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถูกนำไปเปรียบเทียบกับกรณี
จำลองผลเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้น โต้ังความเร็วออกแบบใหม่ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน
เพื่อเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้งสองกรณี



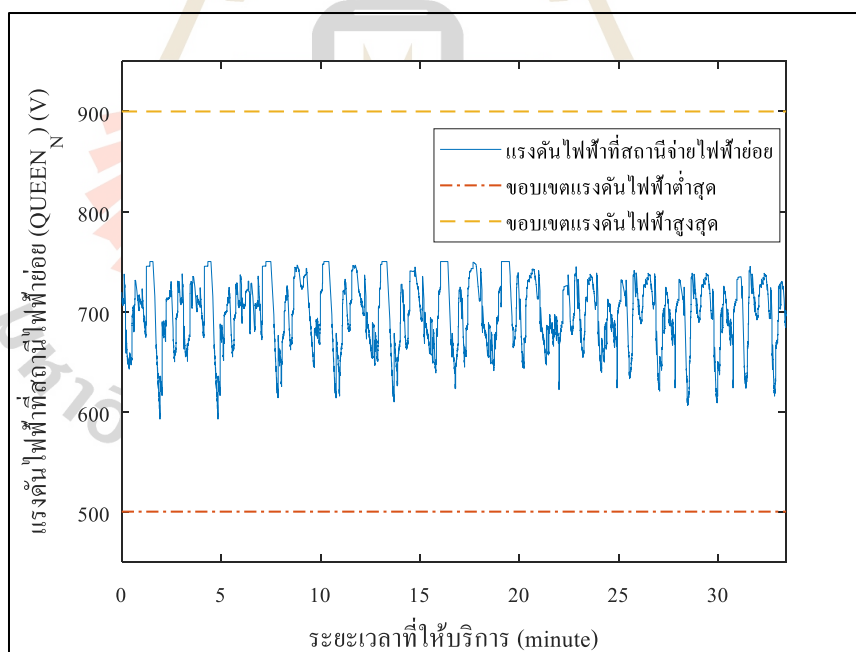
(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพง



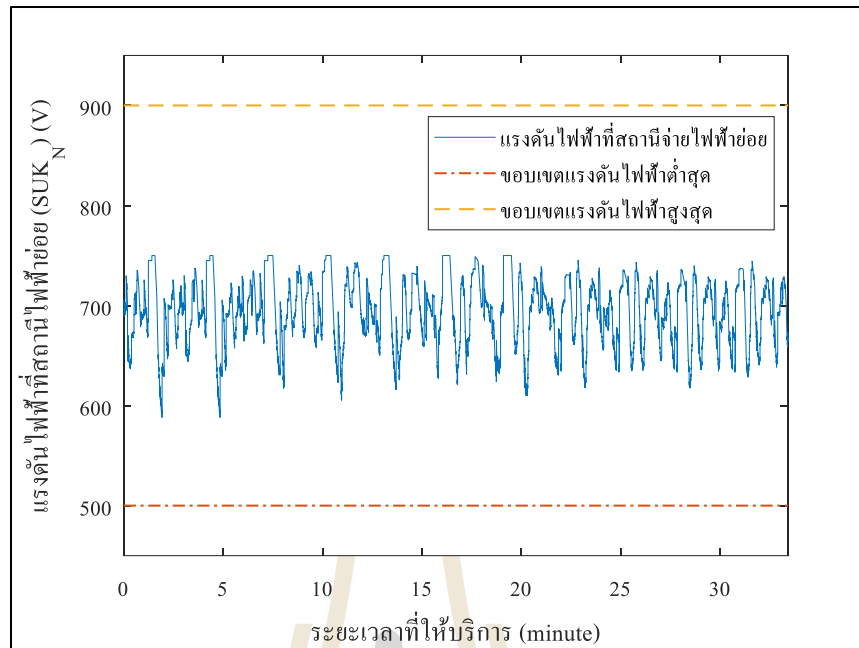
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสามย่าน



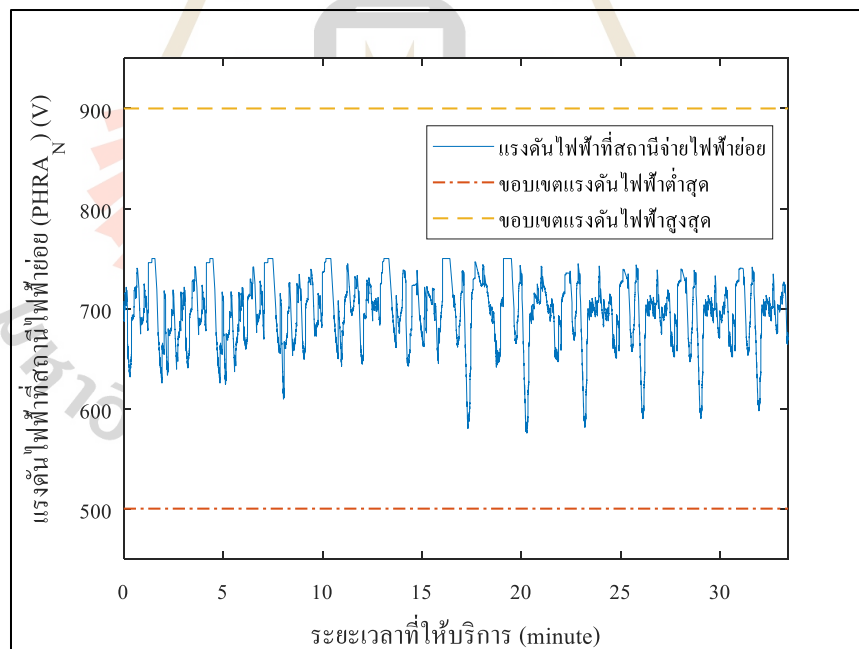
(ค) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลุมพินี



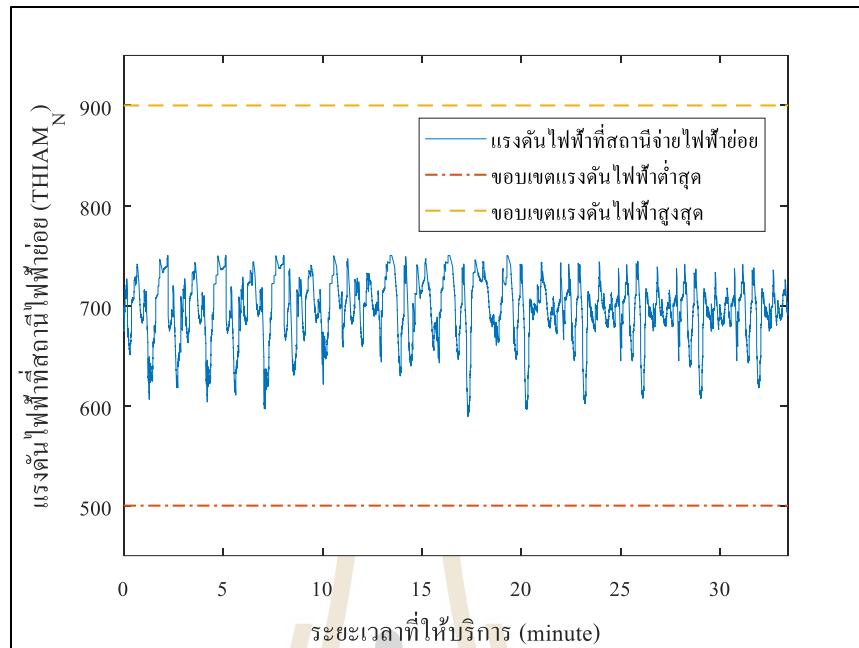
(ง) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์



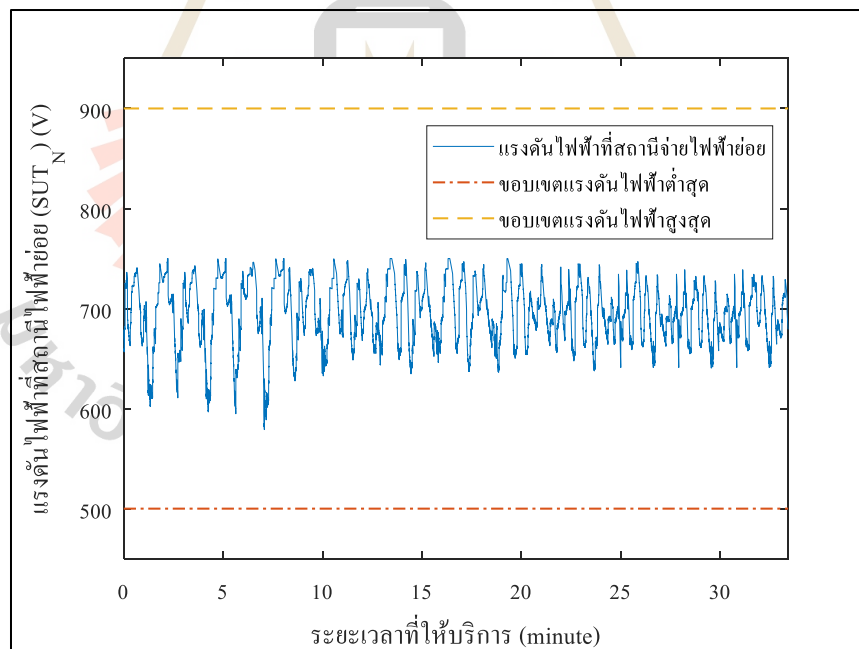
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุขุมวิท



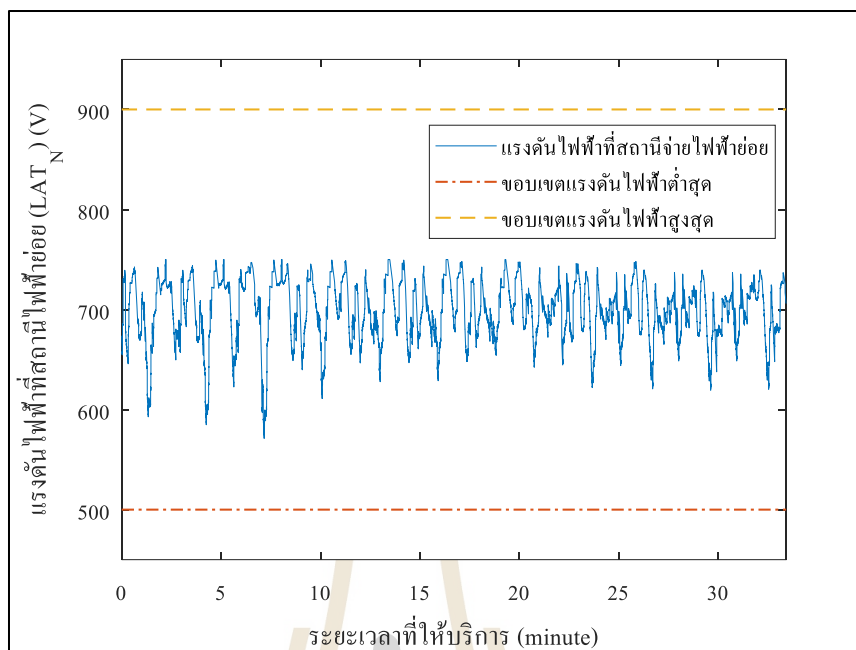
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพระราม 9



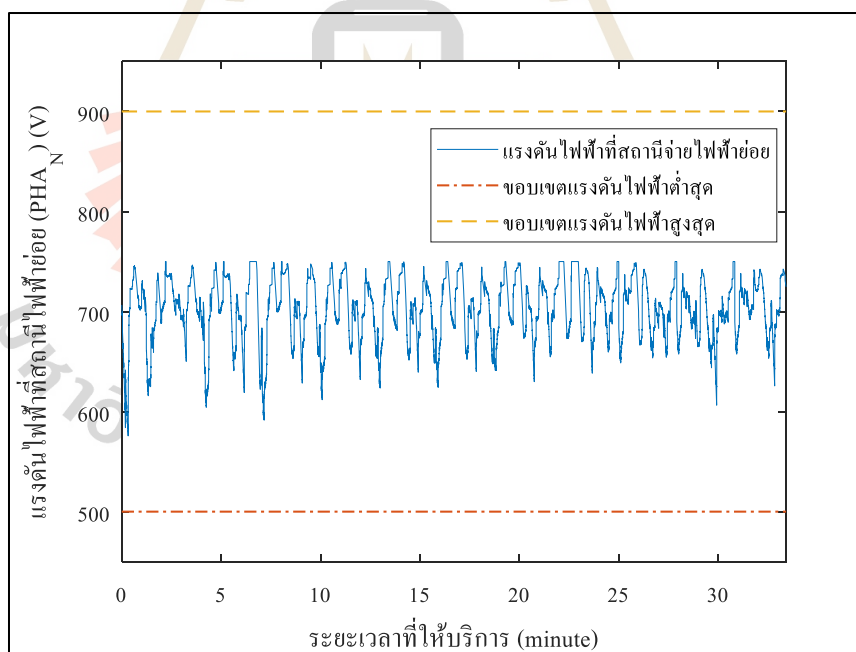
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเทียมรวมมิตร



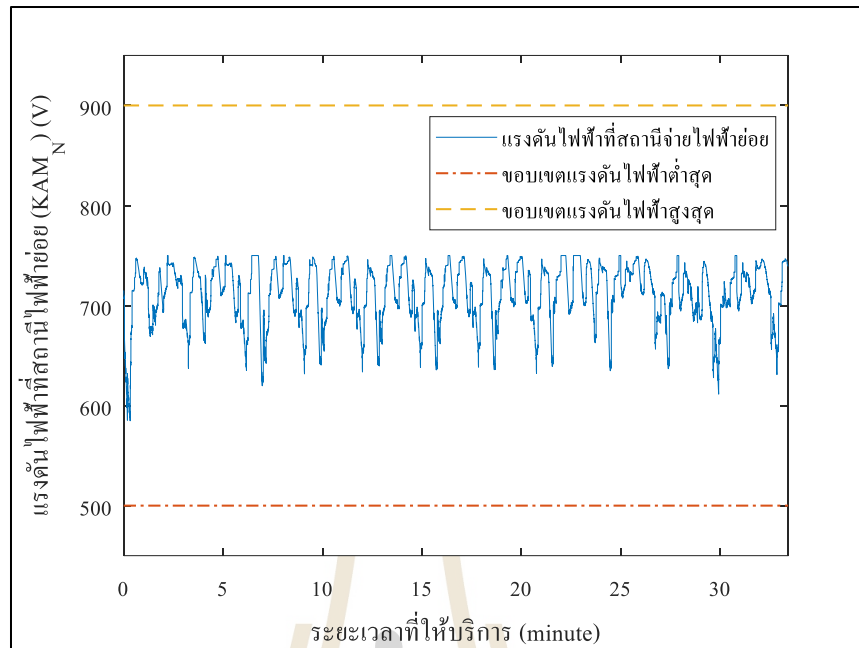
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุทธีสาร



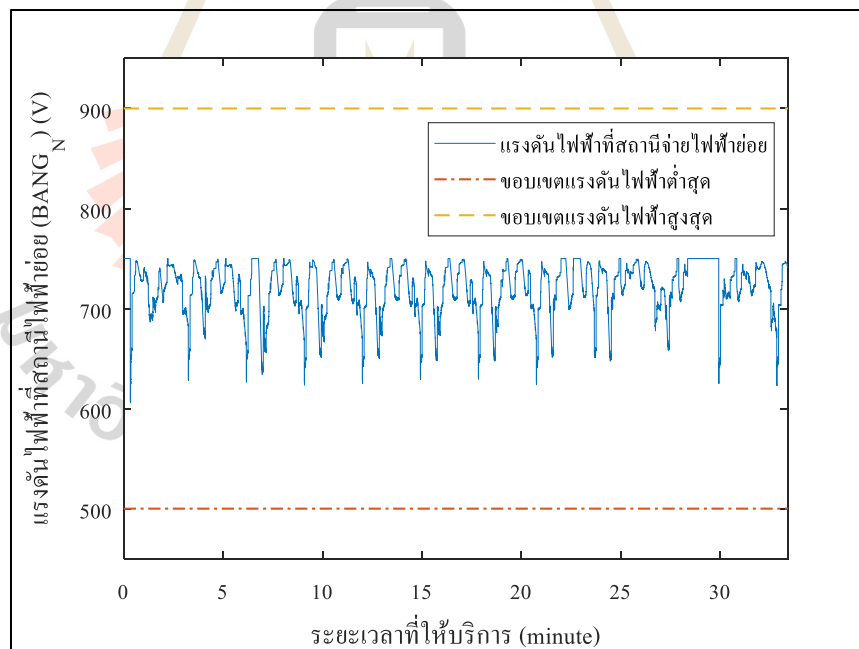
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลาดพร้าว



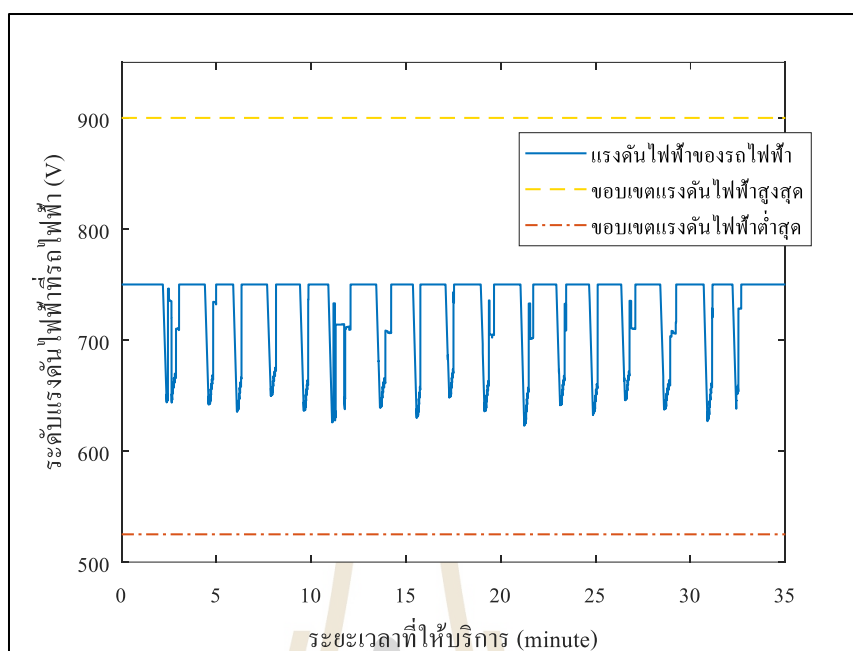
(ญ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพหลโยธิน



(ฎ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยกำแพงเพชร



(ฏ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยบางซื่อ
รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย



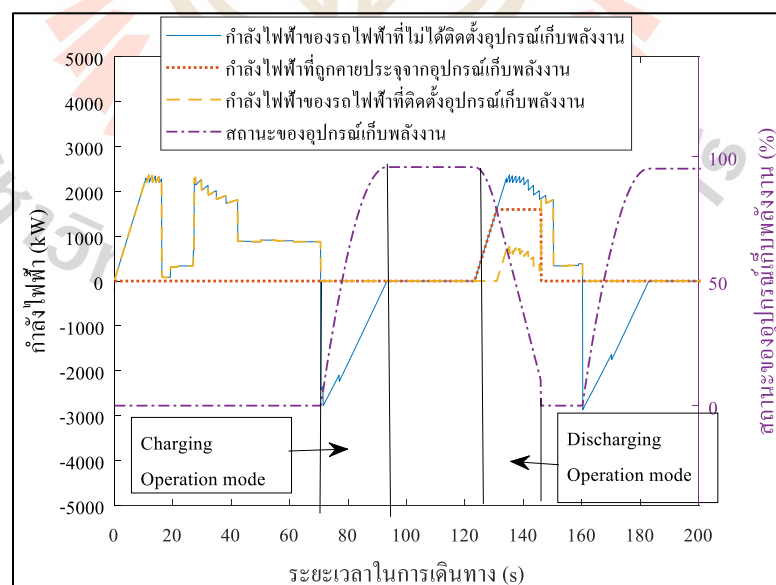
รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

4.3.3 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วกรณีฐานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน

การจำลองในหัวข้อนี้ใช้น้ำหนักบรรทุกที่ AW3 รวมกับน้ำหนักของอุปกรณ์เก็บพลังงาน 4.3 ตัน ดังนั้นน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าคือ 164.3 ตัน ซึ่งเป็นการจำลองการเดินรถในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานที่นำมาแสดงในผลการจำลองเป็นขนาดใหญ่ที่สุดร่วมกับกลยุทธ์ควบคุมการคายประจุแบบอัตราส่วน เพื่อให้เห็นผลของการนำพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกมาลดการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน ซึ่งผลลัพธ์ที่แสดงประกอบ ผลการจำลองกำลังไฟฟ้า อัตราส่วนการคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงาน และสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในส่วน of เส้นโค้งความเร็ว ตำแหน่งของรถไฟฟ้า แรงฉุดลากของรถไฟฟ้า สามารถดูได้จากผลการจำลองในกรณีฐานเนื่องจากมีลักษณะเดียวกัน ผลการจำลองพลังงานไฟฟ้าถูกจำแนกออกเป็น 2 ส่วน

ผลการจำลองส่วนแรกนำเสนอผลการจำลองเพียงช่วงสถานีเดียว เพื่อให้เห็นถึงรูปแบบการทำงานของกลยุทธ์ควบคุมการคายประจุแบบสัดส่วนร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยผลการจำลองที่นำเสนอในส่วนนี้ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า อัตราส่วนการคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ไฟฟ้าที่และสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.21

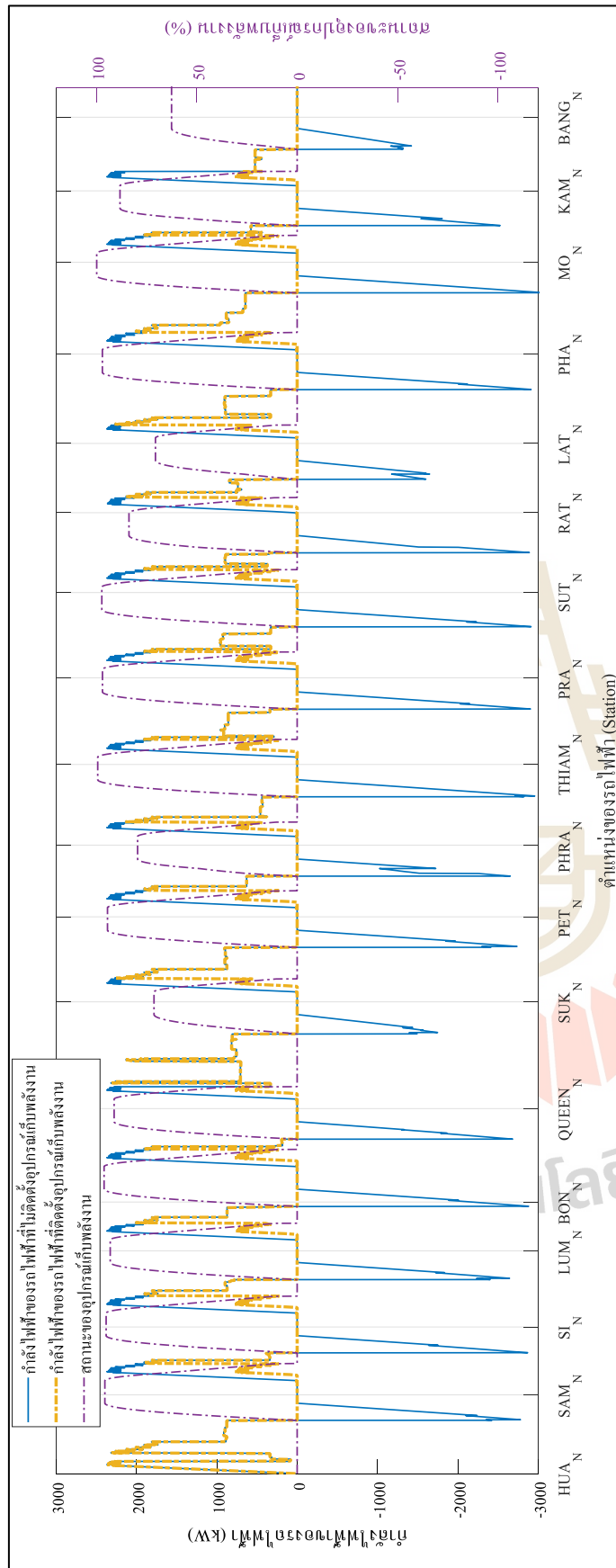
ส่วนที่สองนำเสนอผลการจำลองตลอดเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคลทั้งส่วนขาขึ้นและขาล่อง เพื่อให้เห็นการทำงานของกลยุทธ์ควบคุมการคายประจุแบบสัดส่วนกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานและไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานตลอดเส้นทางสายเฉลิมรัชมงคล โดยรูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในเส้นทางขาขึ้น และรูปที่ 4.43 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในเส้นทางขาล่อง แต่รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 สามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงได้ยาก ดังนั้นจึงนำมาแบ่งออกเป็น 4 รูป ได้แก่ เส้นทางส่วนขาขึ้นจำนวน 2 รูป และส่วนขาล่องจำนวน 2 รูป แสดงดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.25 ในข้อมูลในส่วนขาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.25 ถึง รูปที่ 4.27 โดยที่รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้าและรูปที่ 4.25 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานขณะที่เคลื่อนที่ออกจากสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้าถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ รูปที่ 4.26 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าขณะที่เคลื่อนที่จากสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมนวมมิตรและรูปที่ 4.27 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าขณะที่เคลื่อนที่จากสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมนวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง



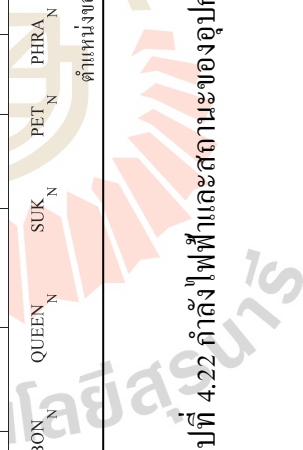
รูปที่ 4.21 กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าขณะที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

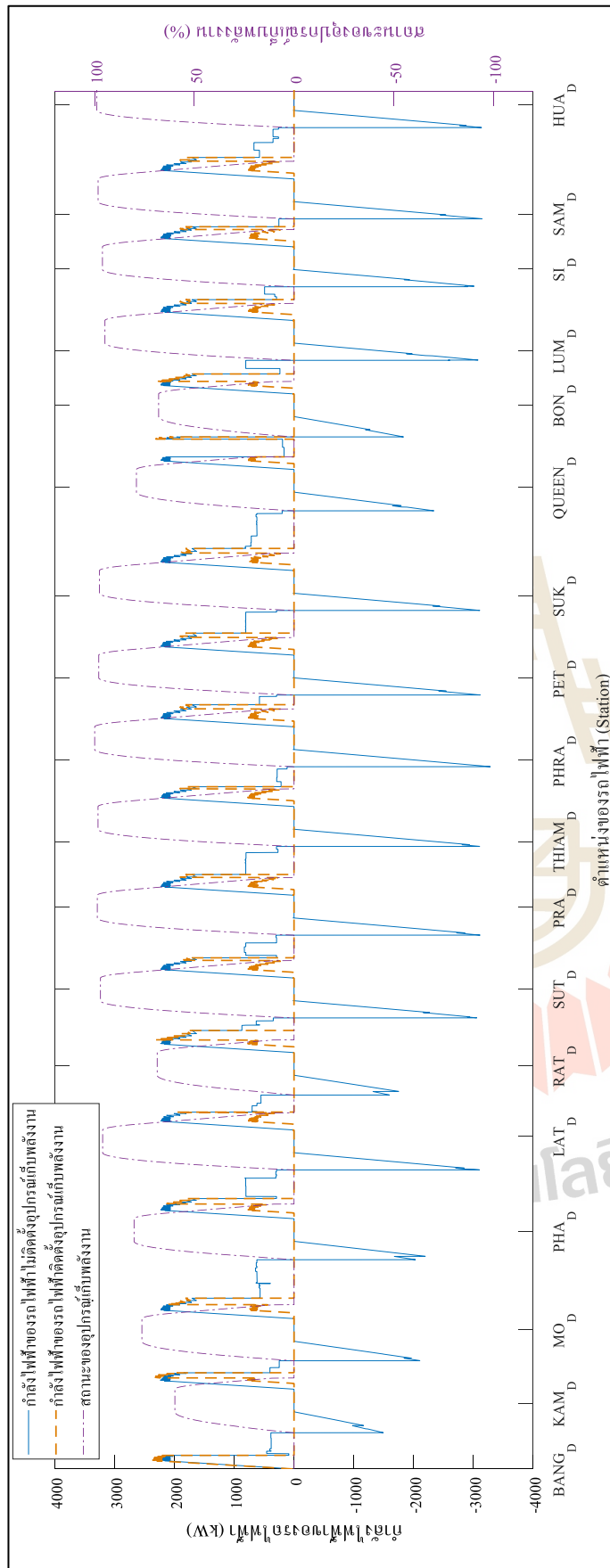
จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงการทำงานของโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้่าที่ถูกดัดแปลงเพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้่าที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยที่สถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานจะแสดงถึงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในอุปกรณ์เก็บพลังงาน การลดลงของสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานหมายถึงรถไฟฟ้่ากำลังทำงานในโหมดเร่งความเร็ว พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกป้อนออกมาจากอุปกรณ์เก็บพลังงานเพื่อช่วยลดค่ายอดของกำลังไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้่าย่อย และเมื่อรถไฟฟ้่าเข้าสู่โหมดเบรกกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้่าจะมีค่าติดลบ ในช่วงเดียวกันนั้นสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์เก็บพลังงานจะเข้าสู่โหมดอัดประจุเพื่อนำพลังงานที่เกิดขึ้นไปใช้งานในการเร่งความเร็วรอบถัดไป



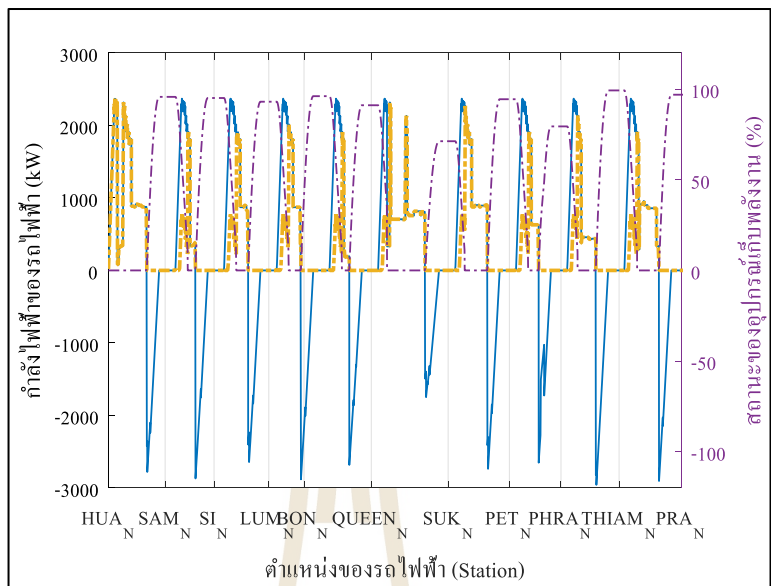


รูปที่ 4.22 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของโรงไฟฟ้าในเส้นทางจากจีน

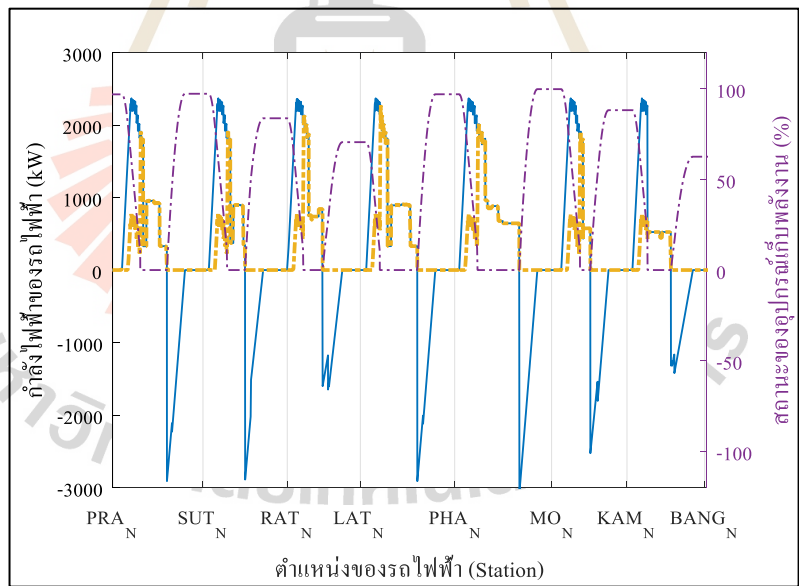




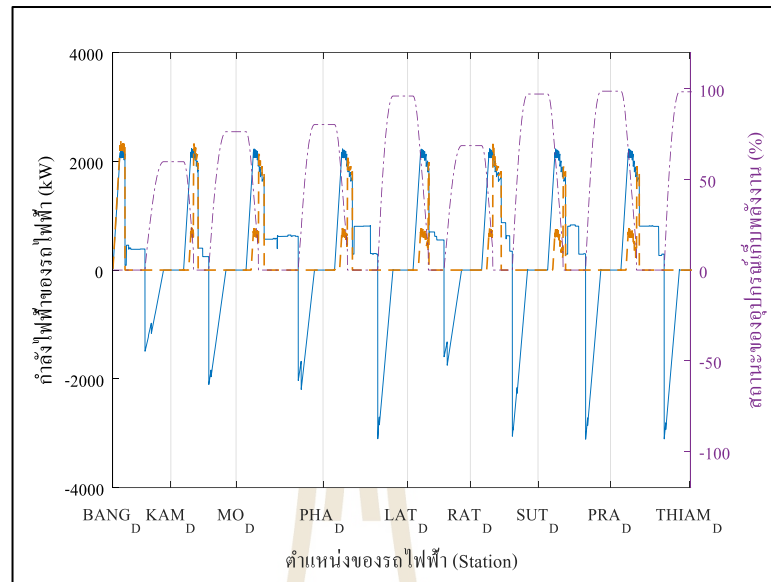
รูปที่ 4.23 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของโรงไฟฟ้าในเส้นทางทดลอง



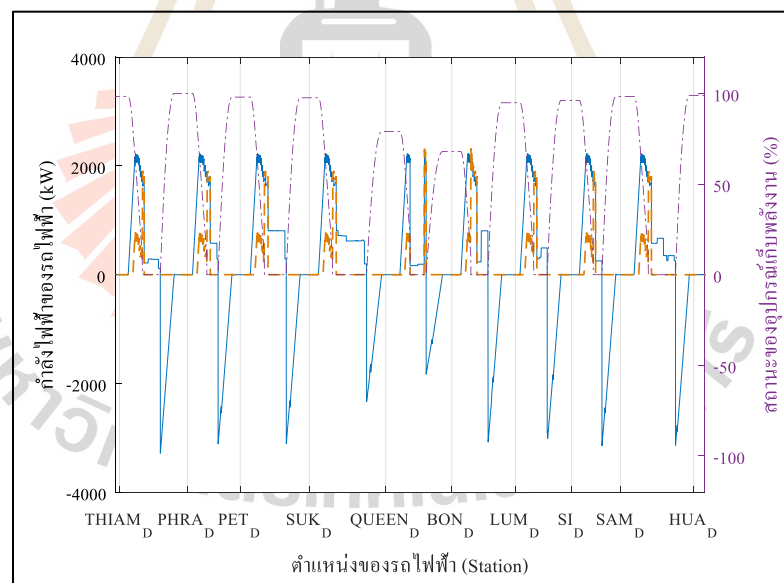
รูปที่ 4.24 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้นระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้า



รูปที่ 4.25 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้นระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้าถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ



รูปที่ 4.26 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาล่องระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตร



รูปที่ 4.27 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าเส้นทางขาล่องระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง

รูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.27 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าแบบติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานและรถไฟฟ้าแบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน ซึ่งเส้นประสีส้มแสดงถึงกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน เส้นสีน้ำเงินแสดงถึงกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน และเส้นประสีม่วงหมายถึงสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน เมื่อรถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าจะดึงพลังงานจากอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยที่ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนออกมาจากอุปกรณ์เก็บพลังงานจะเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนทั้งหมด ขณะอุปกรณ์เก็บพลังงานป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อน สถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานจะมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากนั้นระบบขับเคลื่อนจะถูกป้อนกำลังไฟฟ้าโดยผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเช่นดั่งเดิม และสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อรถไฟฟ้าเข้าสู่โหมดเบรกหรือโหมดอัดประจุ พลังงานที่เก็บไว้ในอุปกรณ์เก็บพลังงานจะถูกนำมาใช้งานเพื่อลดภาระของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ณ จุดต่าง ๆ ที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน

ตารางที่ 4.10 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทาง ขาขึ้น

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
HUA_N	SAM_N	22.78	12.17
SAM_N	SI_N	13.66	5.59
SI_N	LUM_N	17.65	9.92
LUM_N	BON_N	17.65	10.11
BON_N	QUEEN_N	12.93	4.79
QUEEN_N	SUK_N	23.17	18.66
SUK_N	PET_N	21.46	16.41
PET_N	PHRA_N	15.69	7.89
PHRA_N	THIAM_N	15.36	9.08
THIAM_N	PRA_N	20.56	12.55
PRA_N	SUT_N	18.06	10.12
SUT_N	RAT_N	16.44	8.40
RAT_N	LAT_N	16.54	9.92

ตารางที่ 4.10 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาขึ้น (ต่อ)

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
LAT_N	PHA_N	19.90	14.85
PHA_N	MO_N	24.63	17.10
MO_N	KAM_N	14.37	5.91
KAM_N	BANG_N	12.73	6.39
รวม		303.68	179.98

ตารางที่ 4.11 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาล่อง

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
BANG_D	KAM_D	18.96	8.46
KAM_D	MO_D	13.27	5.44
MO_D	PHA_D	15.04	6.53
PHA_D	LAT_D	15.45	5.93
LAT_D	RAT_D	9.98	2.86
RAT_D	SUT_D	23.02	8.54
SUT_D	PRA_D	20.54	4.24
PRA_D	THIAM_D	15.94	4.47
THIAM_D	PHRA_D	14.19	3.82
PHRA_D	PET_D	20.47	5.43
PET_D	SUK_D	17.67	5.44
SUK_D	QUEEN_D	17.02	5.53
QUEEN_D	BON_D	15.18	3.29

ตารางที่ 4.11 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทางขาล่อง (ต่อ)

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
BON_D	LUM_D	19.44	7.14
LUM_D	SI_D	21.69	4.94
SI_D	SAM_D	11.49	4.29
SAM_D	HUA_D	11.23	5.04
รวม		280.64	91.94

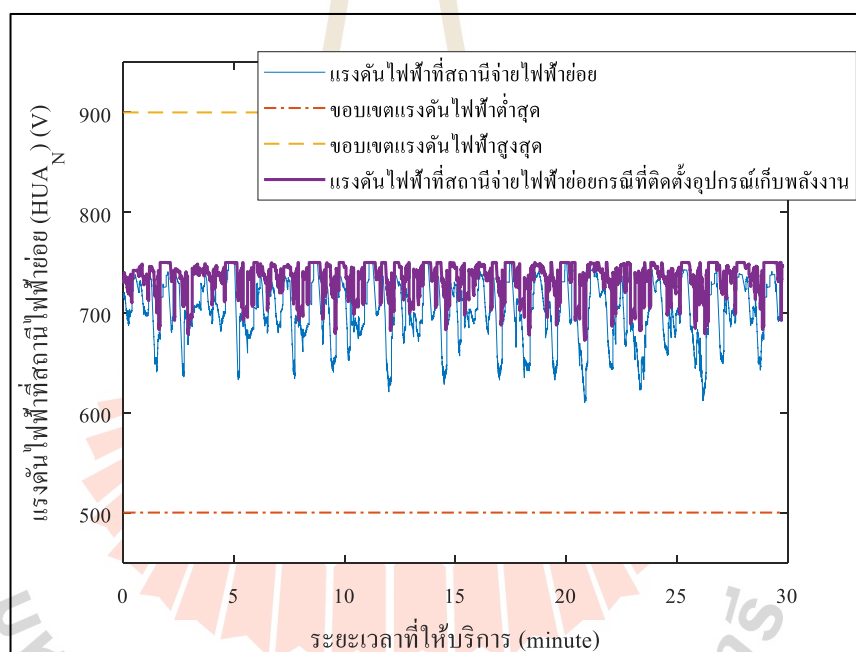
ตารางที่ 4.12 การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขบวนที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับขบวนที่ไม่ติดตั้ง
อุปกรณ์เก็บพลังงาน

น้ำหนักของ รถไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้ในการ ขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก (kWh)	พลังงานสุทธิ (kWh)
AW3 แบบไม่ ติดตั้งอุปกรณ์	584.32	295.55 (ไม่ถูกนำไปใช้งาน)	584.32
AW3 แบบติดตั้ง อุปกรณ์	598.25	303.42	294.83
Energy Saver(%)	-	-	49.54 %

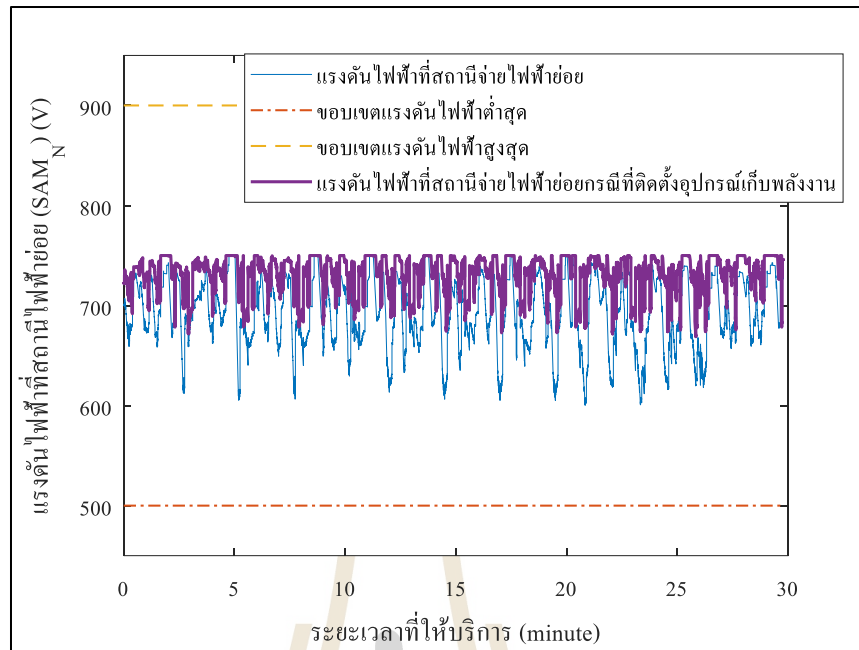
การจำลองในหัวข้อนี้ทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลในการจำลองการเดินรถตลอดทั้งวันในหัวข้อที่ 4.3.5 อัตราการลดลงของพลังงานสุทธิเกิดจากขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานและอัตราส่วนการคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานตามวิธีการคำนวณดังหัวข้อที่ 3.7.7 และหัวข้อที่ 3.8 ตามลำดับ เนื่องจากการจำลองใช้ขนาดของอุปกรณ์เท่ากับ 9.77 kWh ซึ่งเป็นค่าพลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการเบรก จึงส่งผลให้สามารถลดพลังงานสุทธิของรถไฟฟ้าได้มาก มีพลังงานสูญเสียดำเนินเนื่องจากขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานที่นำมาจำลองมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะเก็บพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกทั้งหมด แต่ข้อเสียของการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่คือ มีต้นทุนการติดตั้งสูง และระยะเวลาในการคืนทุนนาน โดยวิธีการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการได้นำเสนอไว้ที่หัวข้อ

ผลการจำลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นถึง ข้อดีและประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยผลการจำลองส่วนของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนและพลังงานที่ใช้ในการเบรกของกรณี AW 3 แบบติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากได้เพิ่มน้ำหนักของอุปกรณ์เก็บพลังงานเข้าไปในน้ำหนักของรถไฟฟ้า โดยผลลัพธ์สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 303.42 kWh ต่อรอบการให้บริการ

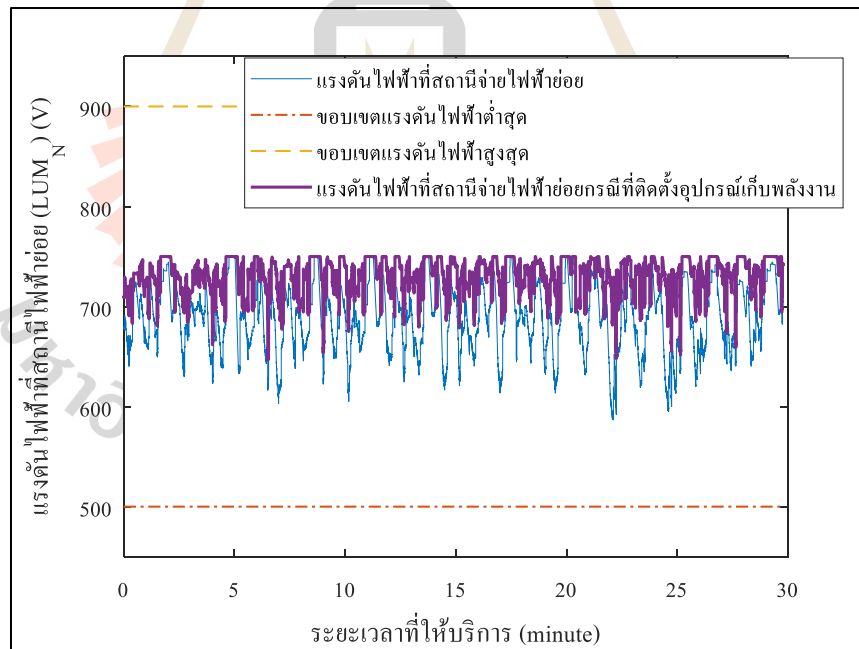
ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วกรณีฐานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย และผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.28(ก)-(ง) และ 4.29 ตามลำดับ



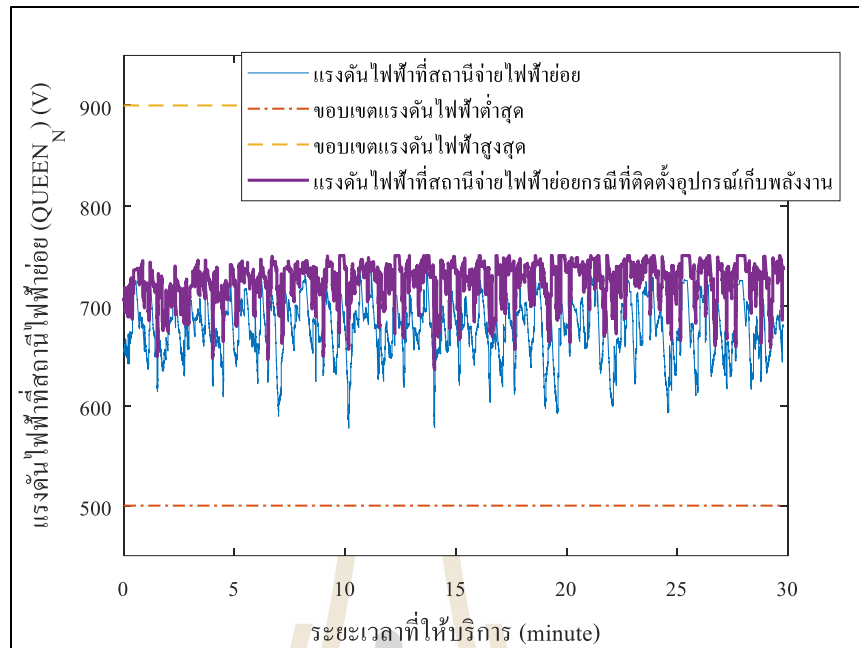
(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพง



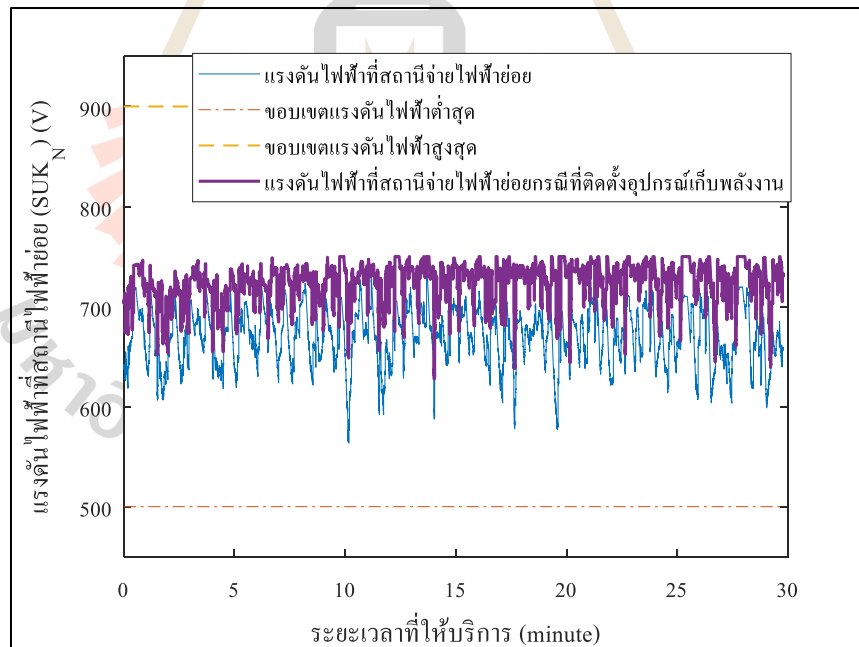
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสามย่าน



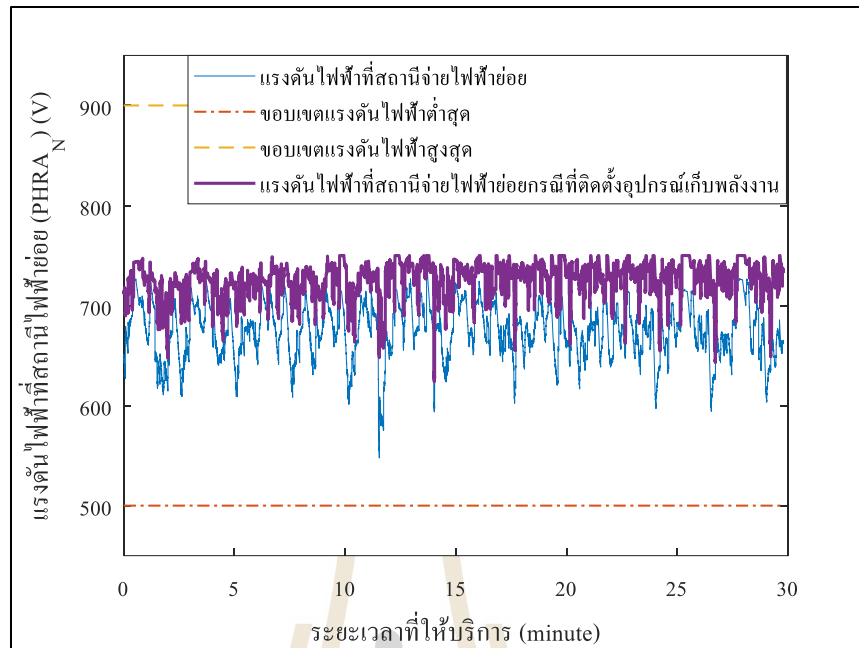
(ค) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลุมพินี



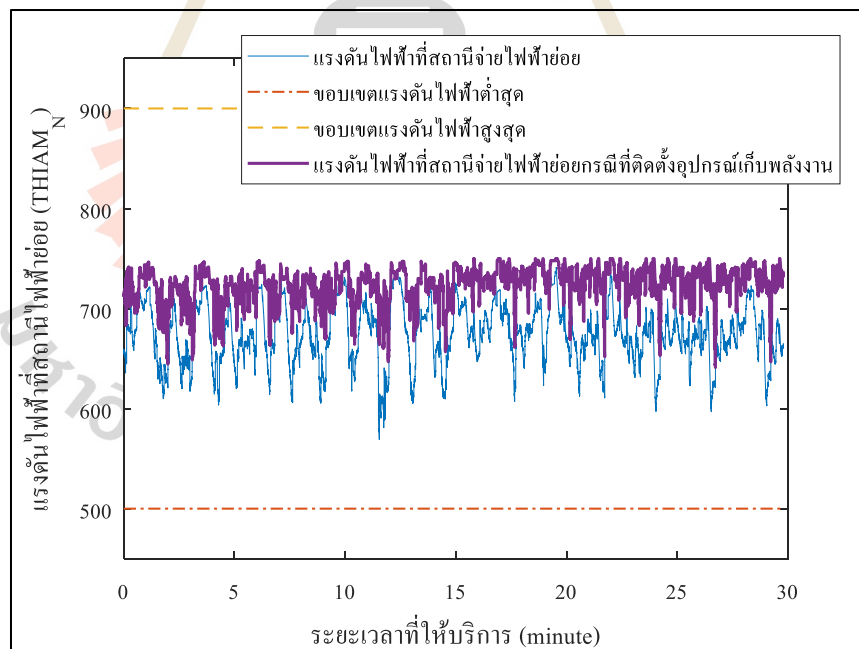
(ง) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์



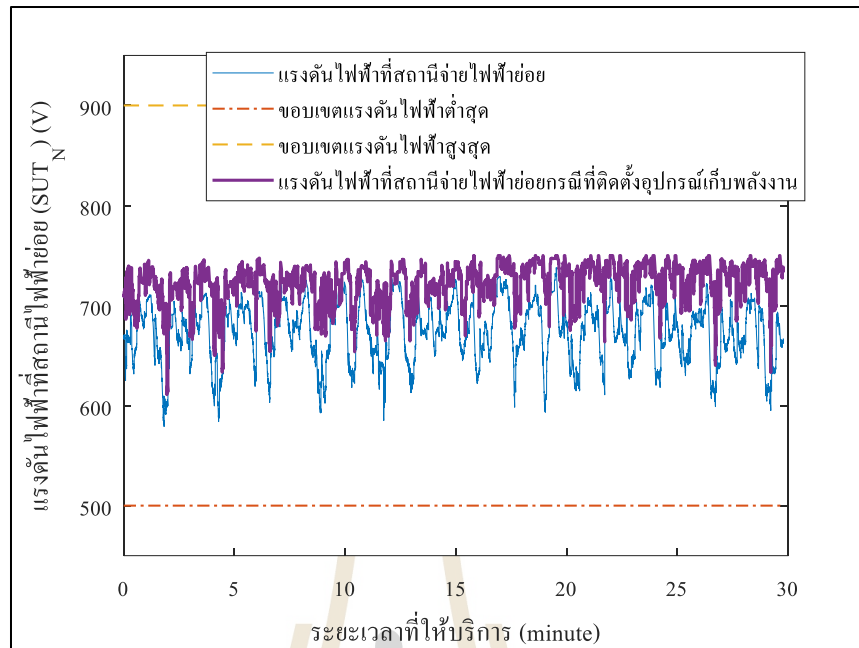
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุขุมวิท



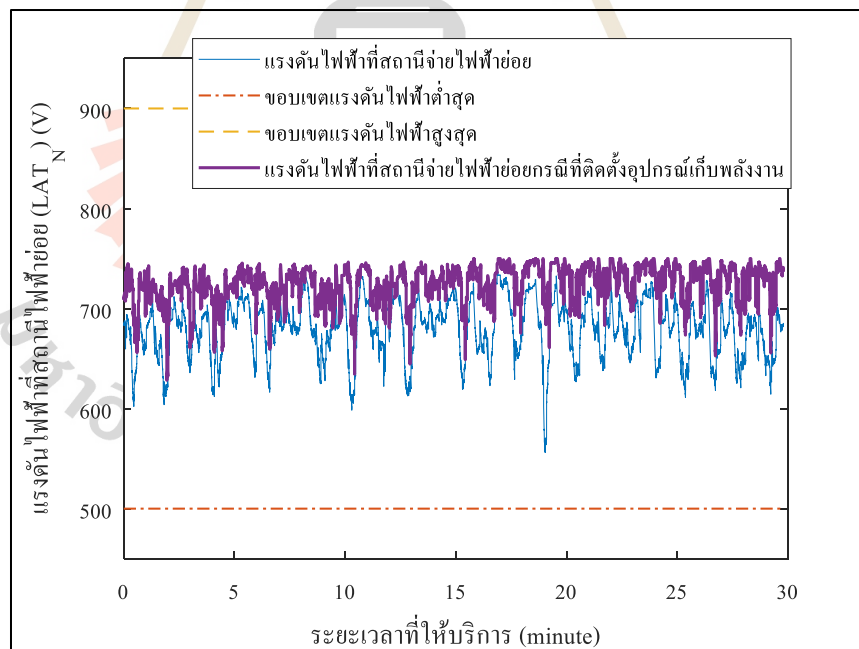
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพระราม 9



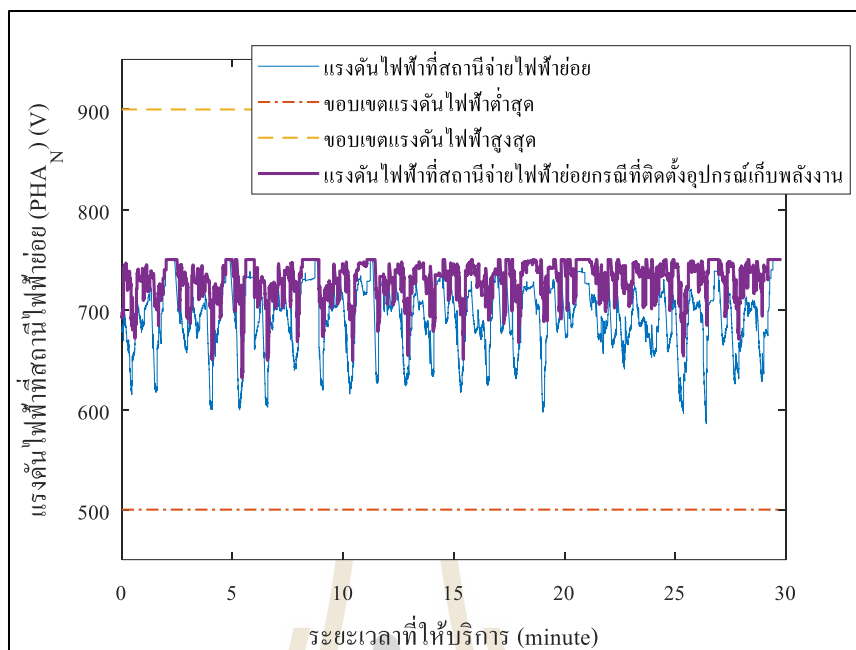
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเทียมรวมมิตร



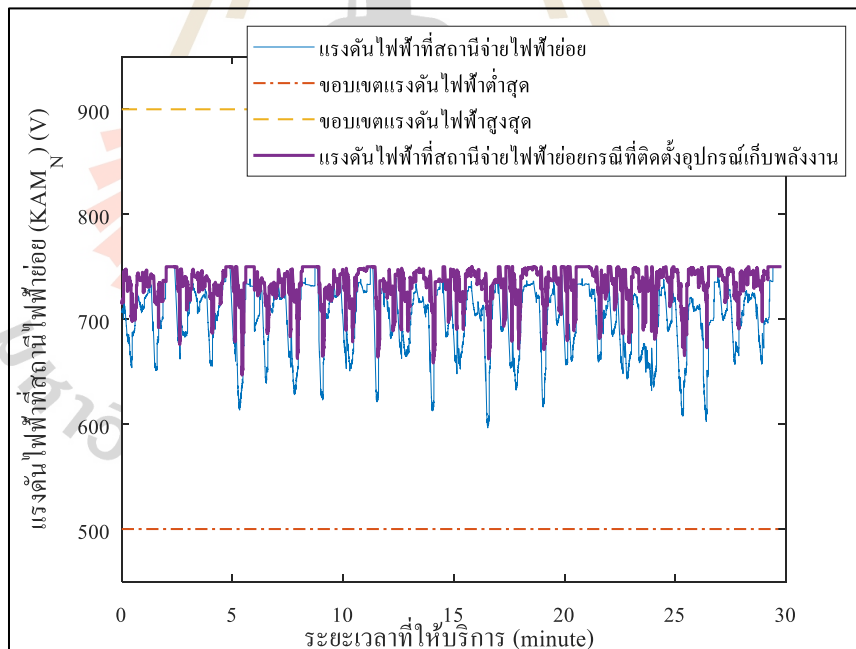
(ซ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าอยุธยาสุทธินิสาร



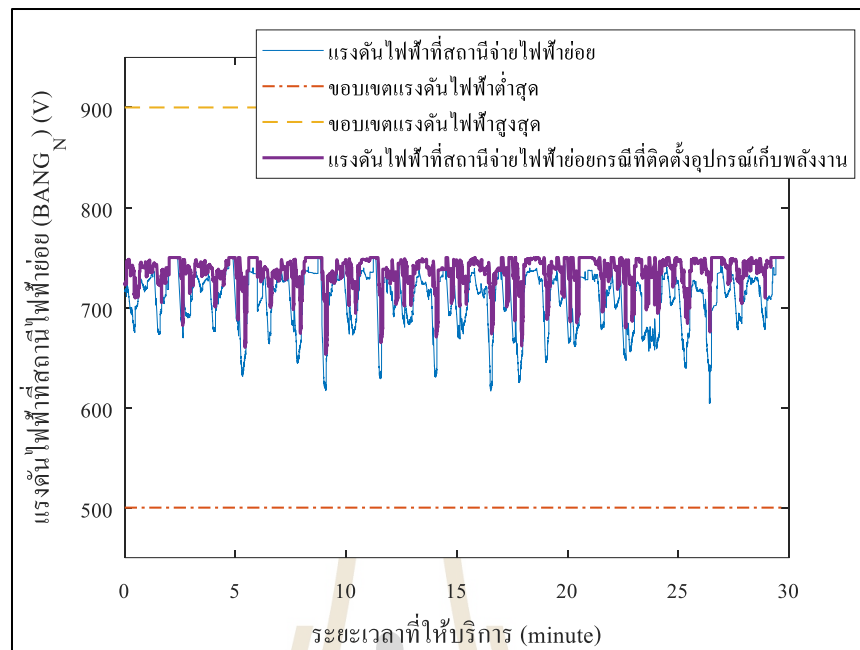
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าอยุธยาลาดพร้าว



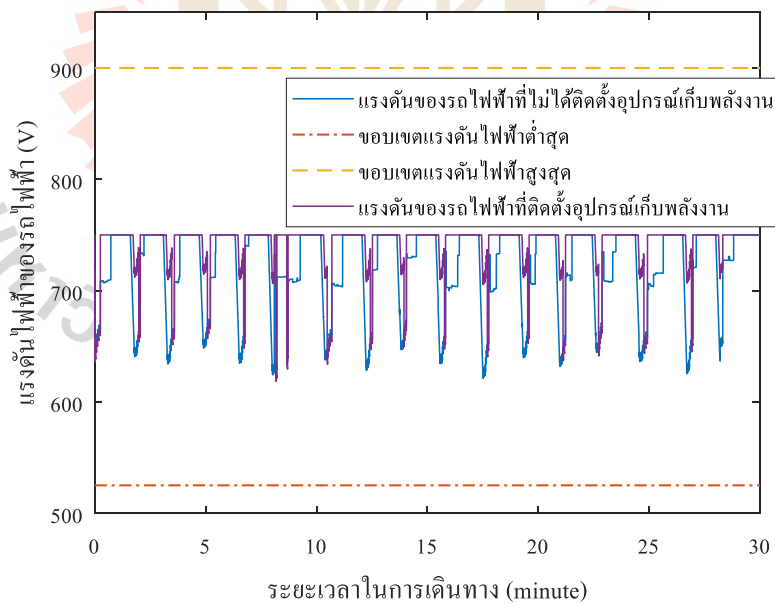
(ญ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพลโยชิน



(ฎ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยกำแพงเพชร



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยบางชื่อ
รูปที่ 4.28 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

เมื่อนำผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าที่แสดงอยู่ในตอนที่ 4.3.1 มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของตอนที่ 4.3.3 จะพบว่า แรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าในตอนที่ 4.3.3 มีความผันผวนน้อยกว่าตอนที่ 4.3.1 เนื่องจากในช่วงที่รถไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งความเร็วในตอน 4.3.1 สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าทั้งหมดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าตกลง แต่ในตอน 4.3.1 ได้มีการนำอุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้งานส่งผลให้ในโหมดเร่งความเร็วของรถไฟฟ้า อุปกรณ์เก็บพลังงานช่วยลดภาระการจ่ายกำลังไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยตกลงน้อยกว่าตอนที่ 4.3.1

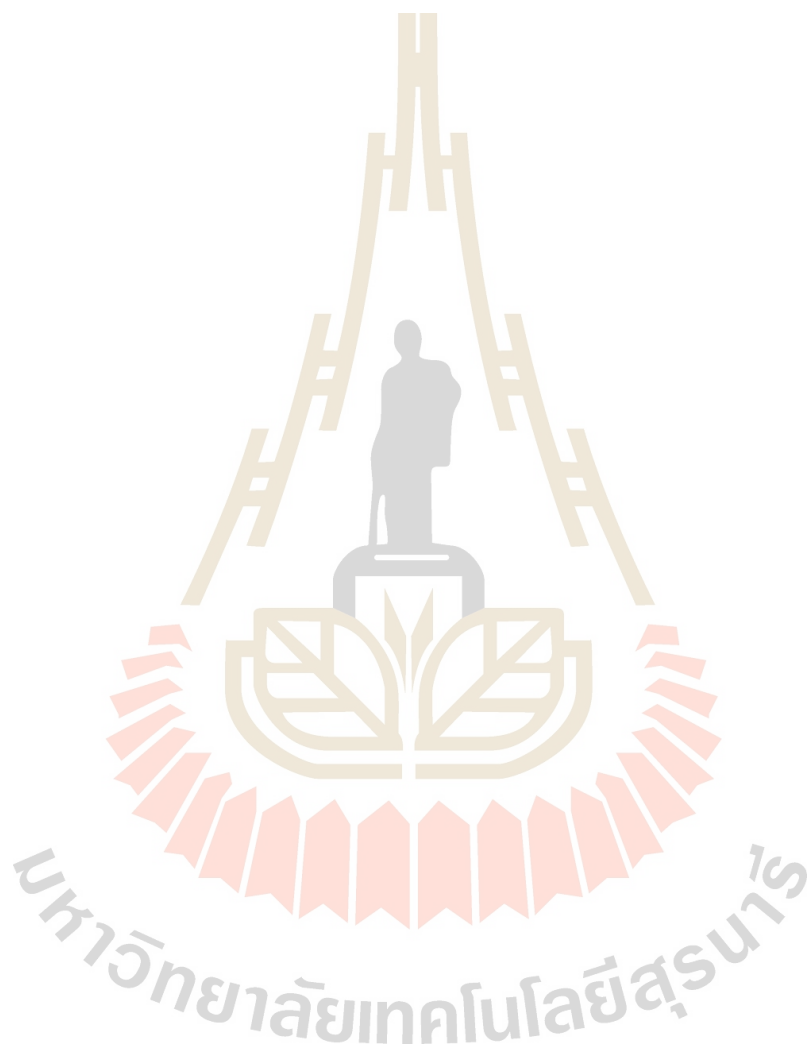
4.3.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน

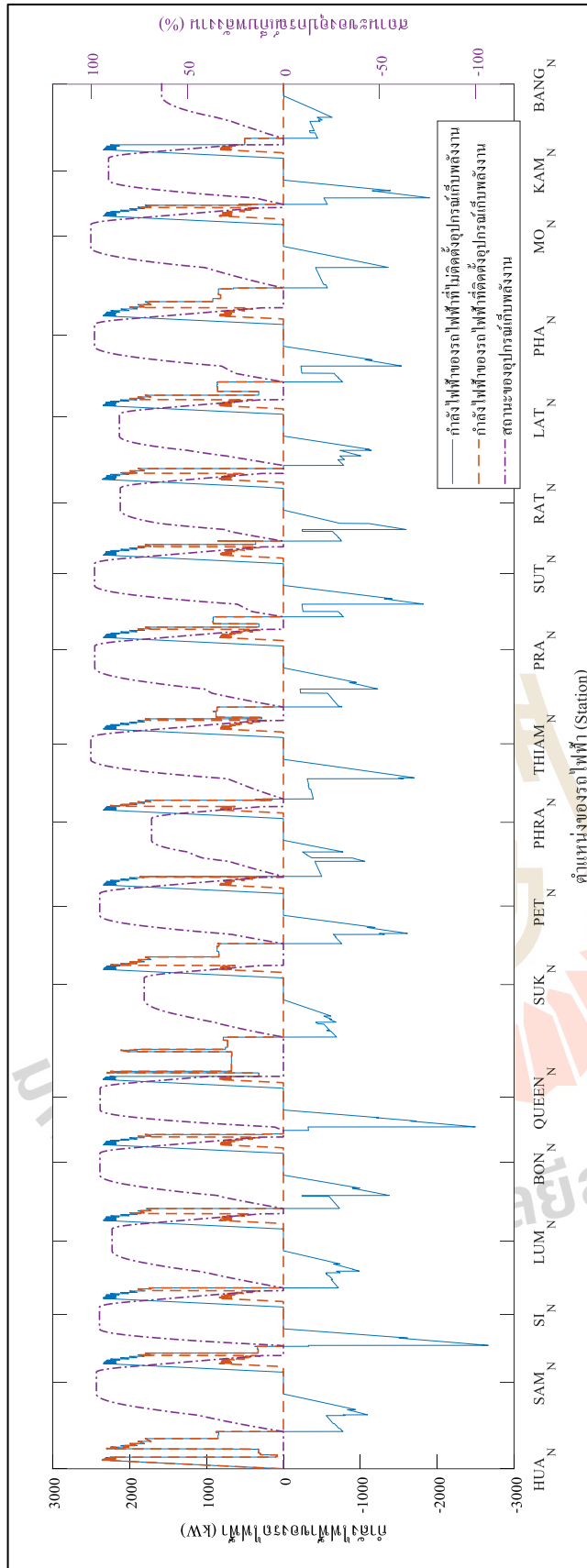
การจำลองในหัวข้อนี้คล้ายกับการจำลองในหัวข้อที่ 4.3.3 แต่อาศัยข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ AW 2 รวมกับน้ำหนักของอุปกรณ์เก็บพลังงานซึ่งมีน้ำหนัก 4.3 ตัน ดังนั้นรวมน้ำหนักรวมของรถไฟฟ้า 156.3 ตัน ถูกใช้จำลองการเดินรถไฟฟ้าในช่วงเวลาเร่งด่วน ขนาดของอุปกรณ์เก็บพลังงานในการจำลองจะเป็นขนาดใหญ่ที่สุดเช่นเดียวกับการจำลองในหัวข้อที่ 4.3.4 ผลลัพธ์การจำลองในหัวข้อนี้ถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนแรกนำเสนอการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานระหว่างรถไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานและรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานของการให้บริการรถไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้น ผลลัพธ์ของส่วนแรกถูกแสดงดังรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.32 โดยรูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งระบุสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าตลอดทั้งเส้นทางขาขึ้น เพื่อให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้น รูปที่ 4.30 จึงถูกแยกออกเป็น 2 รูป ได้แก่ รูปที่ 4.31 ที่แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าในช่วงการให้บริการระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้า และรูปที่ 4.32 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าในช่วงการให้บริการระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้าถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ

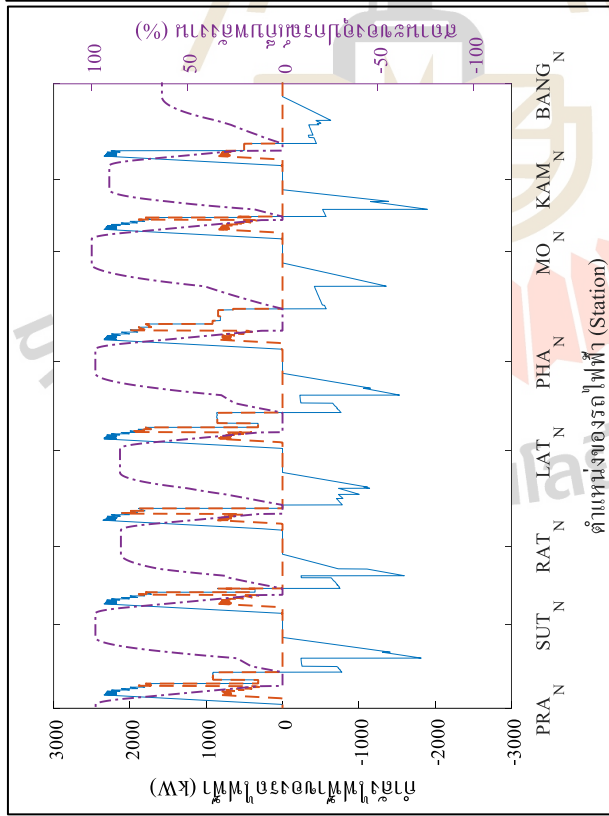
ส่วนที่สองจะนำเสนอเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานระหว่างรถไฟฟ้าที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานและรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานของการให้บริการรถไฟฟ้าในเส้นทางขาล่อง โดยที่ผลลัพธ์การจำลองแสดงดังรูปที่ 4.33 ถึงรูปที่ 4.35 ในรูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าขณะให้บริการในเส้นทางขาล่อง โดยรูปที่ 4.34 และ รูปที่ 4.35 คือการนำรูปที่ 4.33 มาแบ่งออกเป็น 2

ส่วน ใต้แ่รูปที่ 4.34 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าขณะให้บริการในช่วงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตร และรูปที่ 4.35 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้าขณะให้บริการในช่วงสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง

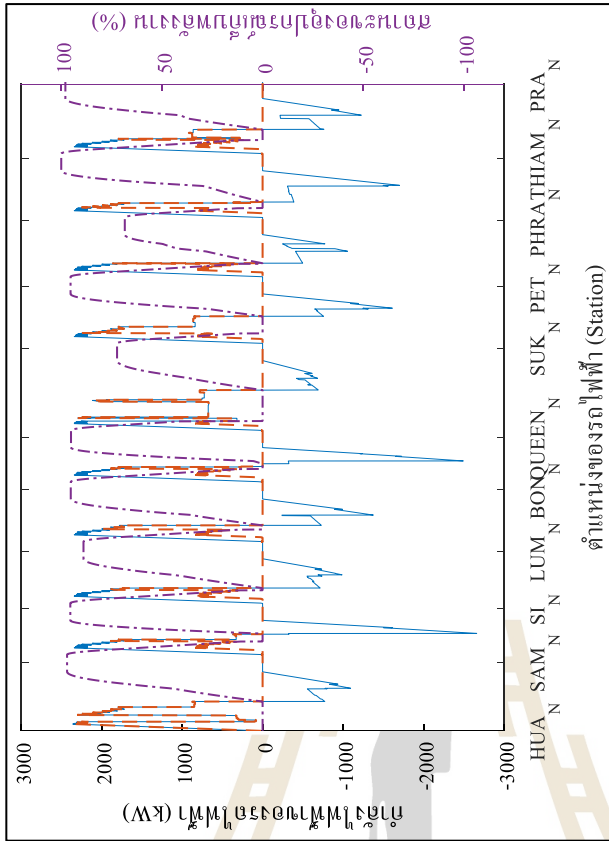




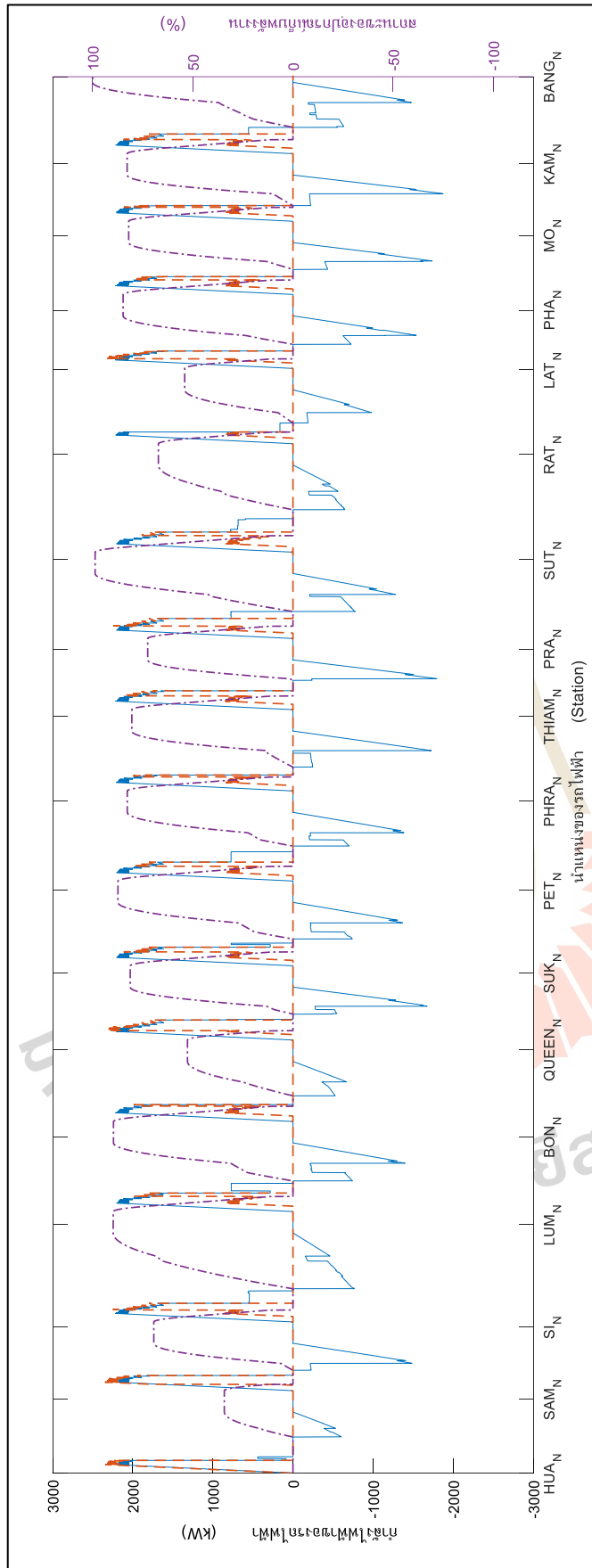
รูปที่ 4.30 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในเส้นทางขาขึ้น



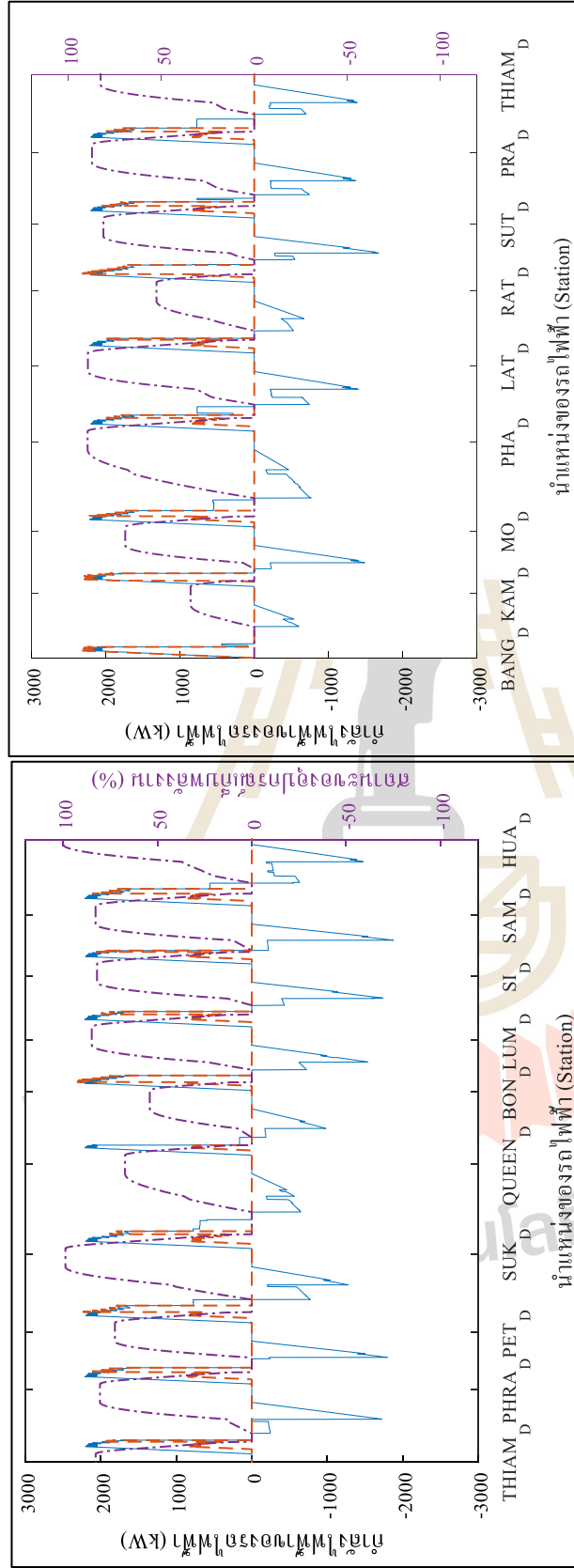
รูปที่ 4.32 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของ
 รถไฟฟ้าเส้นทางขึ้นระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร
 พระรามเก้าถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ



รูปที่ 4.31 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของรถไฟฟ้า
 เส้นทางขึ้นระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารเทียมรวมมิตรถึง
 สถานีขนส่งผู้โดยสารพระรามเก้า



รูปที่ 4.33 กักตังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานในเส้นทางขาดอง



รูปที่ 4.35 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของ
รถไฟฟ้าเส้นทางขาล่องระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร
เท็มรวมมิตรถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพง

รูปที่ 4.34 กำลังไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงานของ
รถไฟฟ้าเส้นทางขาล่องระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร
บางซื่อถึงสถานีขนส่งผู้โดยสารเท็มรวมมิตร

ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการให้บริการถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าของเส้นทางขาขึ้น และพลังงานไฟฟ้าของเส้นทางขาล่อง โดยที่การเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าในเส้นทางขาขึ้นถูกแสดงดังตารางที่ 4.13 และการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในเส้นทางขาล่องถูกแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

เส้นทางขาขึ้น

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
HUA_N	SAM_N	19.16	18.24
SAM_N	SI_N	12.86	5.17
SI_N	LUM_N	12.10	4.54
LUM_N	BON_N	13.02	6.14
BON_N	QUEEN_N	11.84	4.27
QUEEN_N	SUK_N	18.68	14.33
SUK_N	PET_N	17.68	12.73
PET_N	PHRA_N	10.69	3.04
PHRA_N	THIAM_N	11.58	6.65
THIAM_N	PRA_N	15.30	7.50
PRA_N	SUT_N	14.70	7.04
SUT_N	RAT_N	12.54	4.75
RAT_N	LAT_N	12.44	5.96
LAT_N	PHA_N	15.62	9.30
PHA_N	MO_N	19.18	11.80
MO_N	KAM_N	12.35	4.36
KAM_N	BANG_N	9.30	3.29
รวม		237.09	129.19

ตารางที่ 4.14 การใช้พลังงานในแต่ละสถานีจากการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเส้นทาง
ขาห้อง

สถานีขนส่ง ผู้โดยสารต้นทาง	สถานีขนส่ง ผู้โดยสาร ปลายทาง	พลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)	พลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้ง อุปกรณ์เก็บพลังงาน (kWh)
BANG_D	KAM_D	9.12	8.04
KAM_D	MO_D	9.5	7.77
MO_D	PHA_D	14.71	6.86
PHA_D	LAT_D	14.47	4.84
LAT_D	RAT_D	10.79	3.71
RAT_D	SUT_D	13.08	9.53
SUT_D	PRA_D	12.67	5.68
PRA_D	THIAM_D	15.41	5.32
THIAM_D	PHRA_D	10.00	3.56
PHRA_D	PET_D	12.26	6.18
PET_D	SUK_D	15.14	7.64
SUK_D	QUEEN_D	16.80	5.11
QUEEN_D	BON_D	7.22	1.47
BON_D	LUM_D	11.09	7.51
LUM_D	SI_D	11.39	4.81
SI_D	SAM_D	9.85	3.48
SAM_D	HUA_D	14.18	6.38
รวม		206.66	97.97

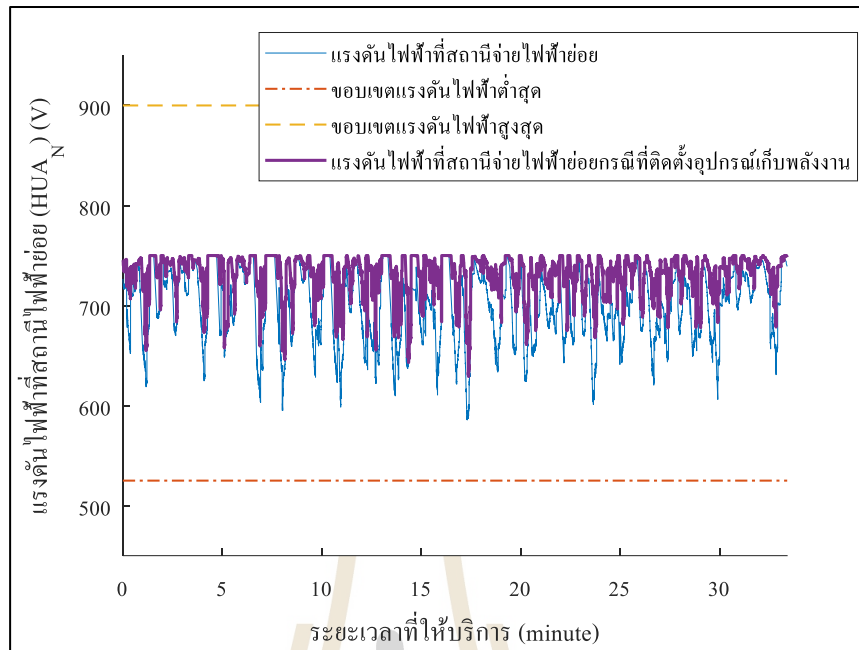
เนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงผลของการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานอย่างชัดเจน
ถูกแสดงดังตารางที่ 4.13 เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาน้ำหนัก AW3
และผลของกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.15 ผลการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขบวนที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับ
ขบวนที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

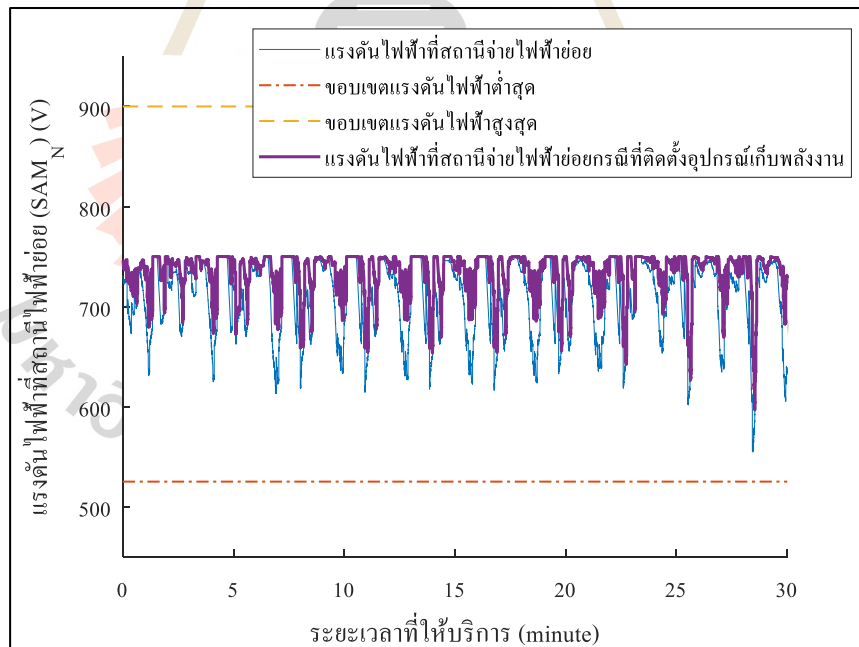
น้ำหนักของ รถไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้ในการ ขับเคลื่อน (kWh)	พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก (kWh)	พลังงานสุทธิ (kWh)
AW2 แบบไม่ ติดตั้งอุปกรณ์	443.75	217.56 (ไม่ถูกนำไปใช้งาน)	443.75
AW2 แบบติดตั้ง อุปกรณ์	453.58	222.65	227.172
Energy Saver(%)	-	-	48.80 %

ผลการจำลองตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 มีแนวโน้มคล้ายกับผลการจำลองในตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.12 แต่ค่าพลังงานสุทธิที่ใช้ในการขับเคลื่อนมีค่าน้อยกว่าตารางที่ 4.12 เนื่องจาก การปรับลดน้ำหนัก AW 3 ลงมาเหลือ AW 2 ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ลดลงมา รวมถึงพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกก็นลดลงมาด้วยเช่นกัน ในส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก AW 2 แบบไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน มีค่าน้อยกว่า AW 2 แบบติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน เพราะการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานส่งผลให้น้ำหนักรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 5 ตัน

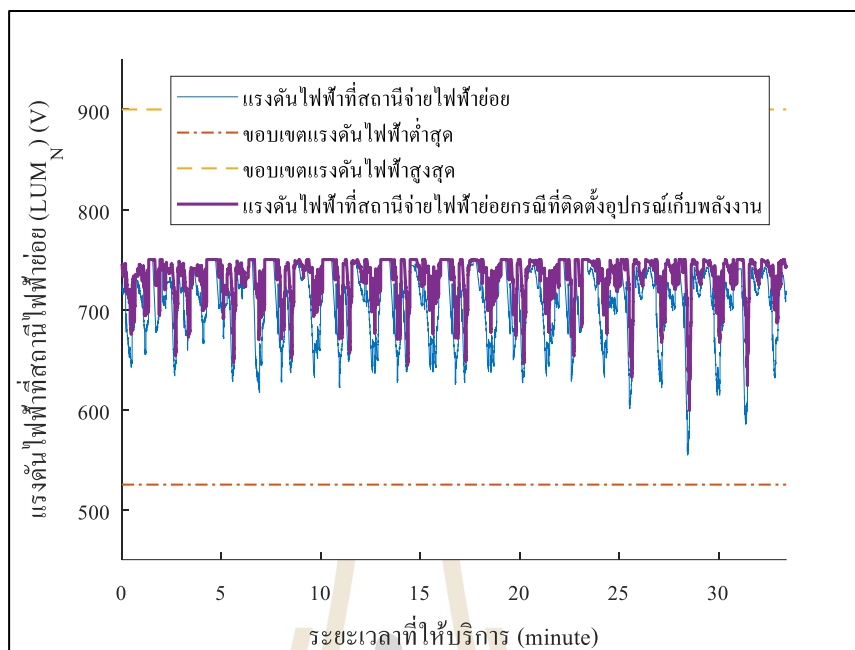
ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอในส่วนนี้จะนำผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าและผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบถึงผลการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน ร่วมกับการใช้งานเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่สำหรับใช้งานในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน โดยที่ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยถูกแสดงดังรูปที่ 4.36(ก)-(ฎ) และ ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าถูกแสดงดังรูปที่ 4.37



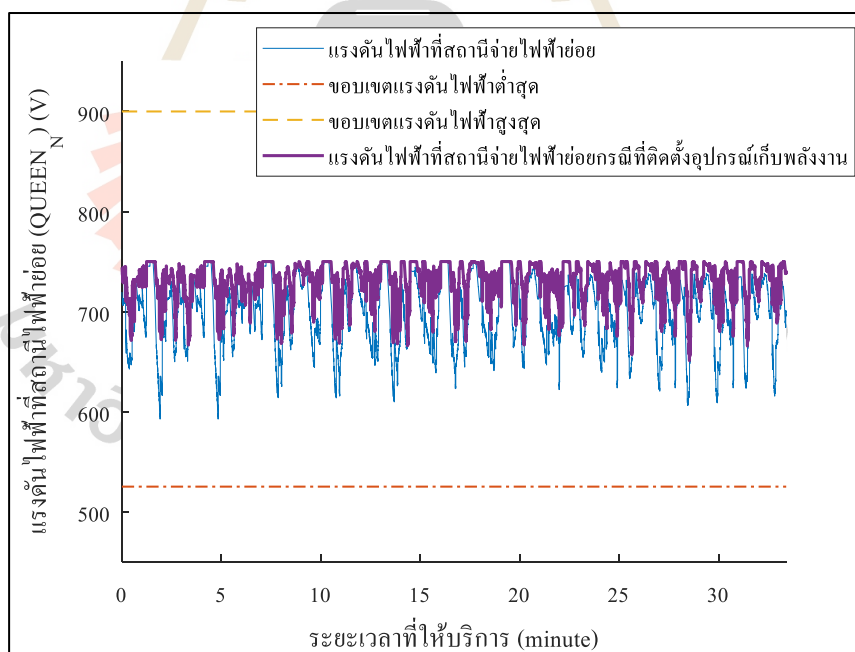
(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยหัวลำโพง



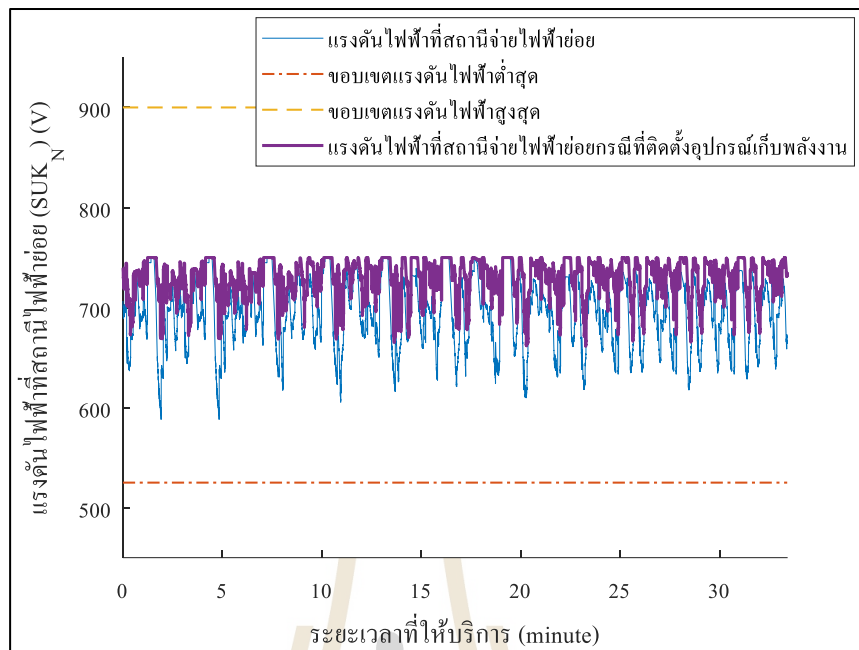
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสามย่าน



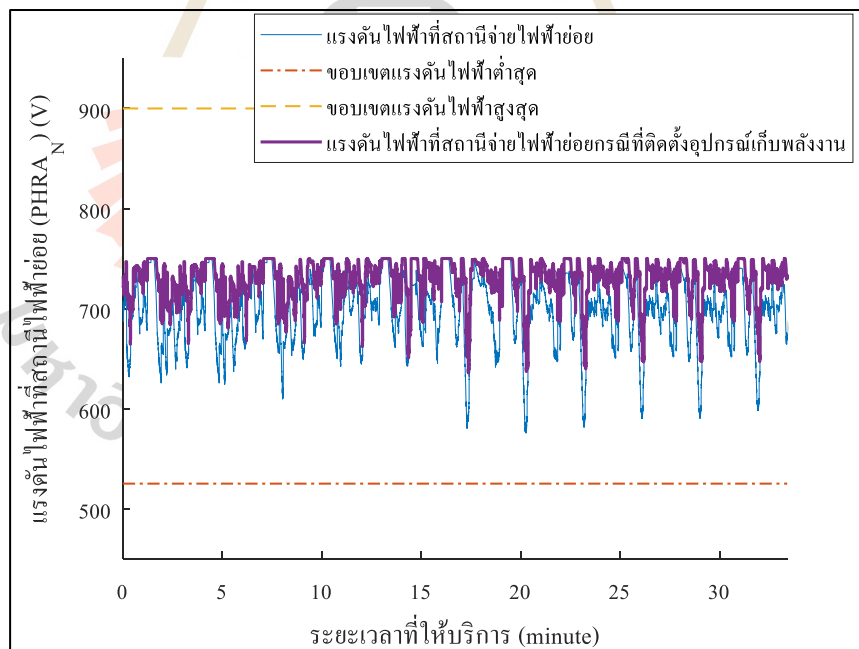
(ค) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลุมพินี



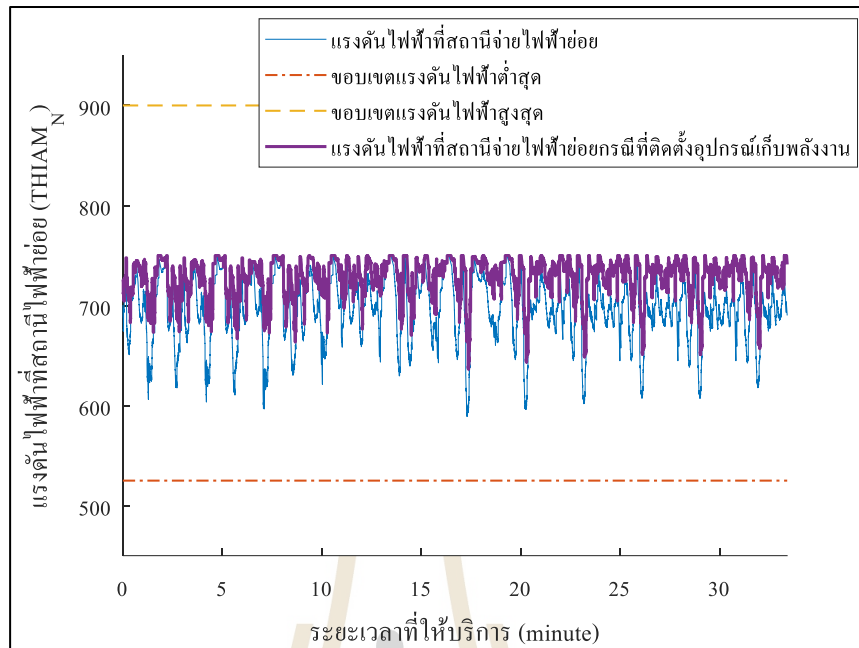
(ง) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์



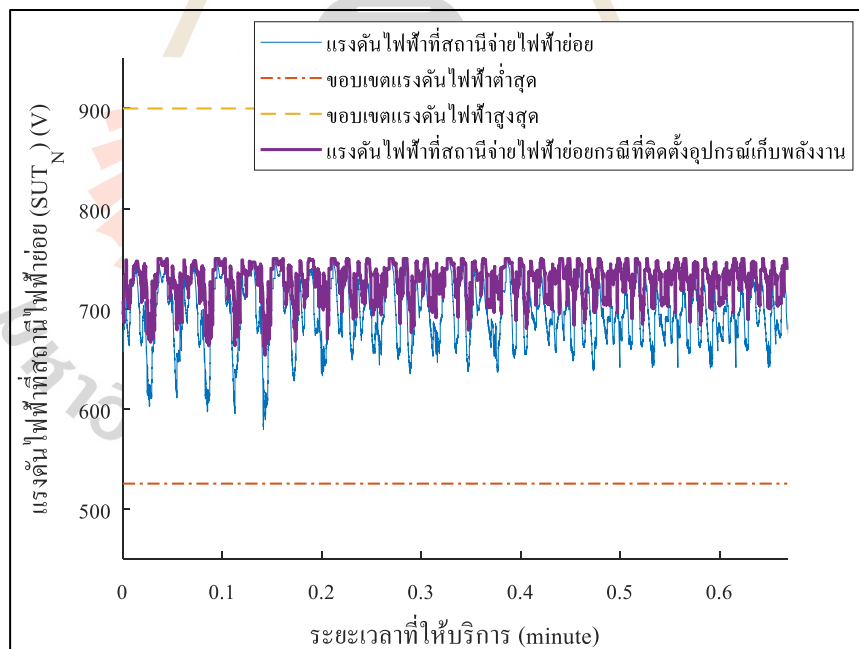
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุขุมวิท



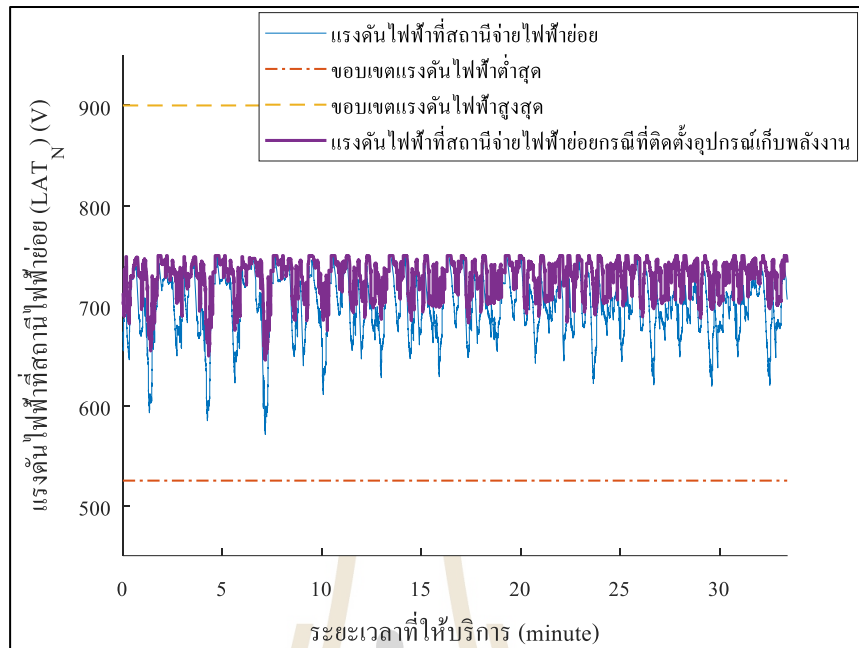
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพระราม 9



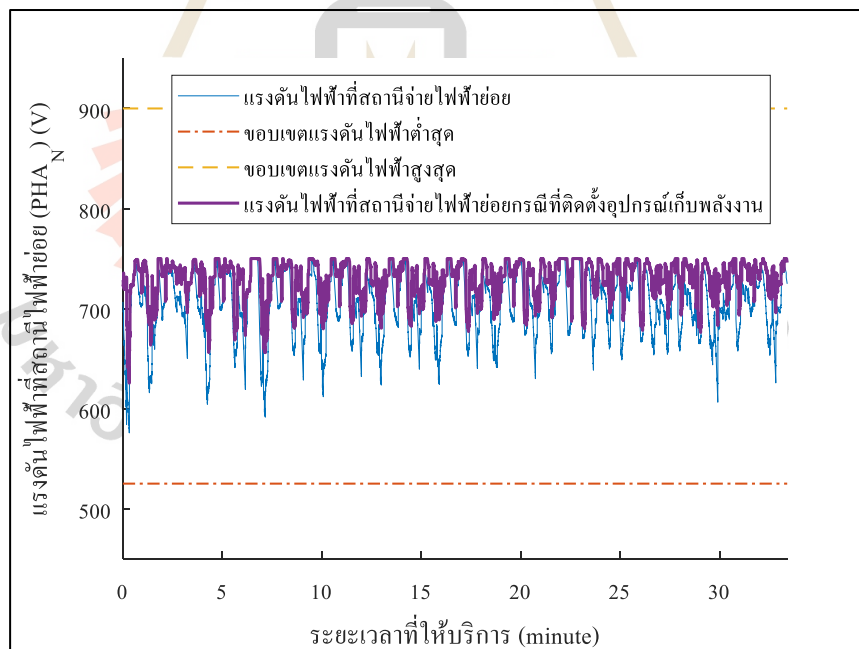
(จ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเทียมรวมมิตร



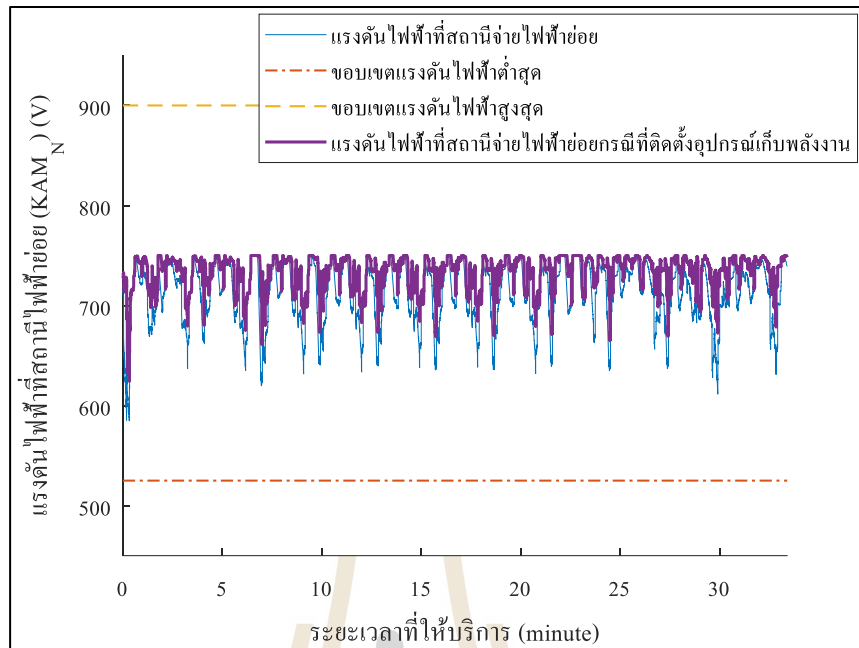
(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยสุทธินสาร



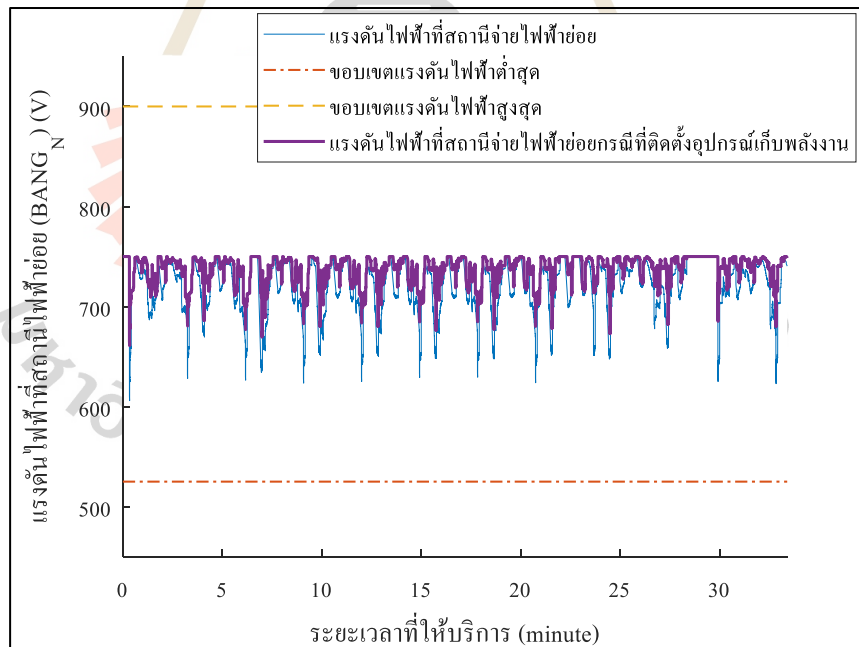
(ฉ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยลาดพร้าว



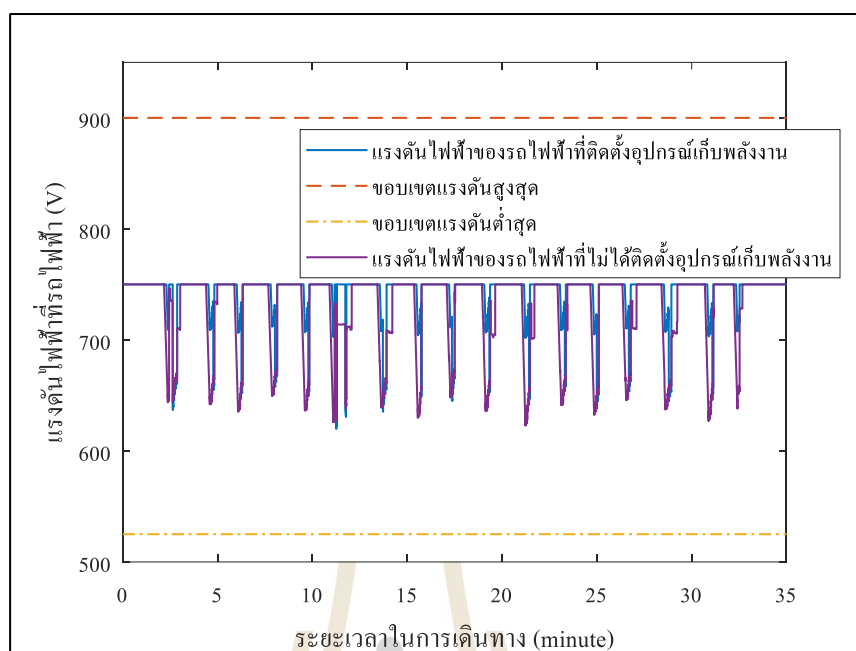
(ญ) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพหลโยธิน



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยกำแพงเพชร



(ข) แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยบางซื่อ
รูปที่ 4.36 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 4.37 แรงดัน ไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

จากผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพบว่า หากใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานสามารถลดความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าได้ไม่ต่างจากกรณีที่ตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเพียงอย่างเดียวเนื่องจากความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากโหมดเร่งความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่นั้นเป็นการเพิ่มโหมดชะลอความเร็ว ดังนั้นจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงเร่งความเร็วของรถไฟฟ้ายังผันผวนในลักษณะเดิม แต่ผลของการออกแบบเส้นโค้งความเร็วคือการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเนื่องจากโหมดชะลอความเร็วรถไฟฟ้าจะป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนดังนั้นจึงทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ลดลง

4.3.5 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวนในหนึ่งวัน

การจำลองในหัวข้อนี้อาศัยข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ AW 3 และ AW 2 มีน้ำหนักสุทธิของรถไฟฟ้าทั้งขบวน 164.3 ตัน และ 156.3 ตัน ตามลำดับ วิ่งในระบบจำนวน 18 ขบวน แบ่งออกเป็น ขาขึ้น 9 ขบวน และขาล่อง 9 ขบวน พิจารณาเวลาให้บริการ 18 ชั่วโมง เริ่มจาก 06:00 น. ถึง 24:00 น. แบ่งออกเป็น ชั่วโมงเร่งด่วน 6 ชั่วโมงต่อวัน ชั่วโมงไม่เร่งด่วนนั้นมีจำนวน 12 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นผลลัพธ์การจำลองเส้นโค้งความเร็ว รูปแบบการเดินทางของรถไฟฟ้าถูกแสดงไว้ดังนี้

จากรูปที่ 4.38 แสดงถึงเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนที่ให้บริการตลอดทั้งวัน ซึ่งยากต่อการอ่านค่า ดังนั้นผู้เขียนจึงนำรูปที่ 4.38 มาแยกออกเป็น 5 ส่วน เพื่อให้เห็นถึงการ

ประยุกต์ใช้เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมในการให้บริการตลอดทั้งวัน โดยส่วนแรก จะแสดงเส้นโค้งความเร็วในชั่วโมงเร่งด่วนในช่วงเวลา 06:00-09:00 น. หลังจากนั้นส่วนที่สอง รถไฟฟ้าจะเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็ว ในช่วงเวลา 09:00-10:00 น. และส่วนที่สามคือการแสดงเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าขณะที่ให้บริการด้วยเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ในช่วงเวลาไม่เร่งด่วน 10:00 – 17:00 น. ส่วนที่สี่แสดงถึงการเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วจากเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่กลับไปเป็นเส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมในช่วงเวลา 17:00 ถึง 18:00 และส่วนที่ห้า คือการให้บริการด้วยเส้นโค้งความเร็วแบบดั้งเดิมในชั่วโมงเร่งด่วน และส่วนสุดท้ายคือการเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วที่มีลักษณะเหมือนส่วนที่สอง

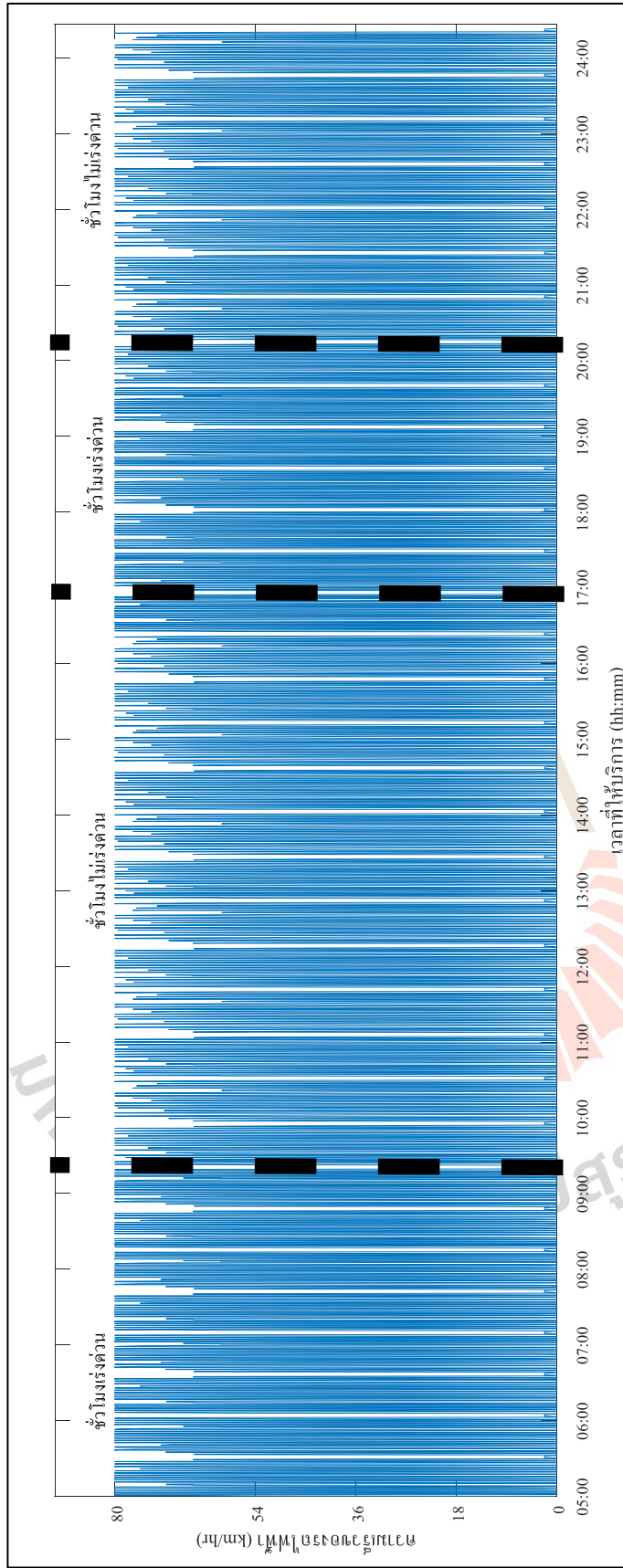
โดยส่วนแรกแสดงที่รูป 4.39 คือส่วนของเส้นโค้งความเร็วที่ให้บริการในชั่วโมงเร่งด่วน (06:00-09:00 น.) ที่เกิดจากการนำเส้นโค้งความเร็วที่ถูกจำลองในตอนี่ 4.3.1 รูปที่ 4.3 มาเรียงต่อกันจนครบเวลาชั่วโมงเร่งด่วน

ส่วนที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.40 กล่าวถึงรอยต่อของเส้นโค้งความเร็วของชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงไม่เร่งด่วนที่เกิดขึ้นในช่วง 09.00-10.00 น. ในส่วนนี้จะเป็นการเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วจากเส้นโค้งความเร็วในตอนี่ 4.3.1 รูปที่ 4.3 มาเป็นเส้นโค้งความเร็วในตอนี่ 4.3.2 รูปที่ 4.13

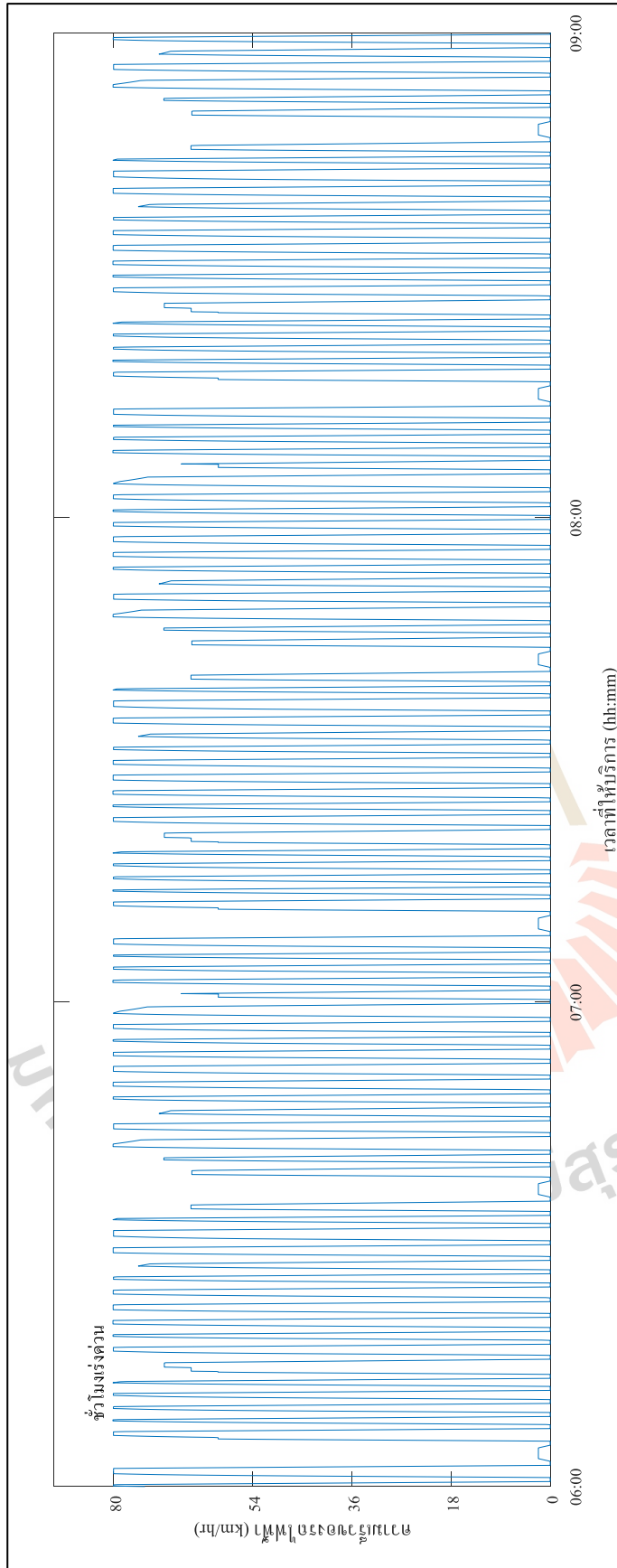
ส่วนที่สามแสดงถึงการใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบในตอนี่ 4.3.2 รูปที่ 4.13 มาใช้งานต่อเนื่องจนหมดชั่วโมงไม่เร่งด่วน ถูกแสดงดังรูปที่ 4.33

ส่วนที่สี่แสดงในรูปที่ 4.41 คือส่วนรอยต่อระหว่างชั่วโมงไม่เร่งด่วนและชั่วโมงไม่เร่งด่วนในตอนเย็น รถไฟฟ้าจะเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วจากเส้นโค้งความเร็วในชั่วโมงไม่เร่งด่วน กลับมาใช้เส้นโค้งความเร็วชั่วโมงเร่งด่วน และจะใช้เส้นโค้งความเร็วชั่วโมงเร่งด่วนจนถึงเวลา 19.30 น.

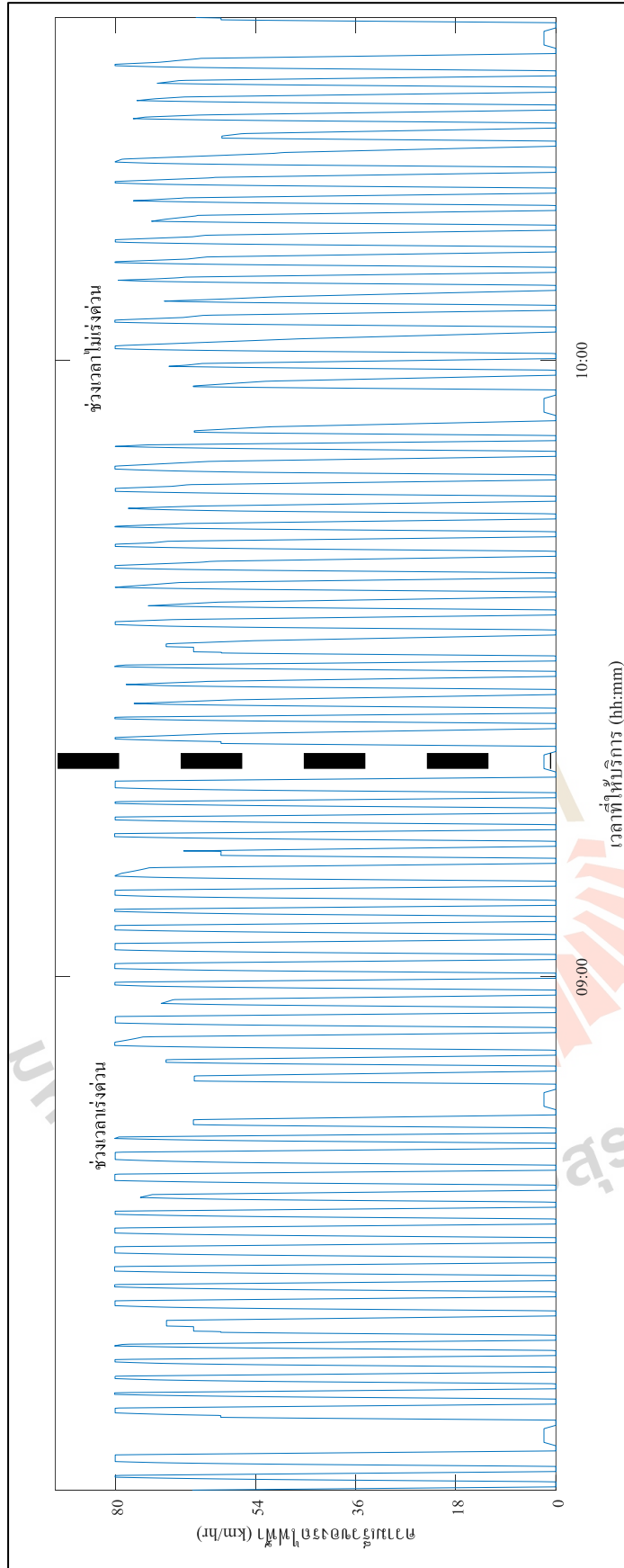
เมื่อสิ้นสุดเวลาเร่งด่วนของวัน ณ เวลา 19:30 น. รถไฟฟ้าจะเปลี่ยนเส้นโค้งความเร็วเข้าสู่เส้นโค้งความเร็วชั่วโมงไม่เร่งด่วนดังแสดงในรูปที่ 4.38 จนสิ้นสุดการให้บริการในวันนั้นที่เวลา 24.00 น.



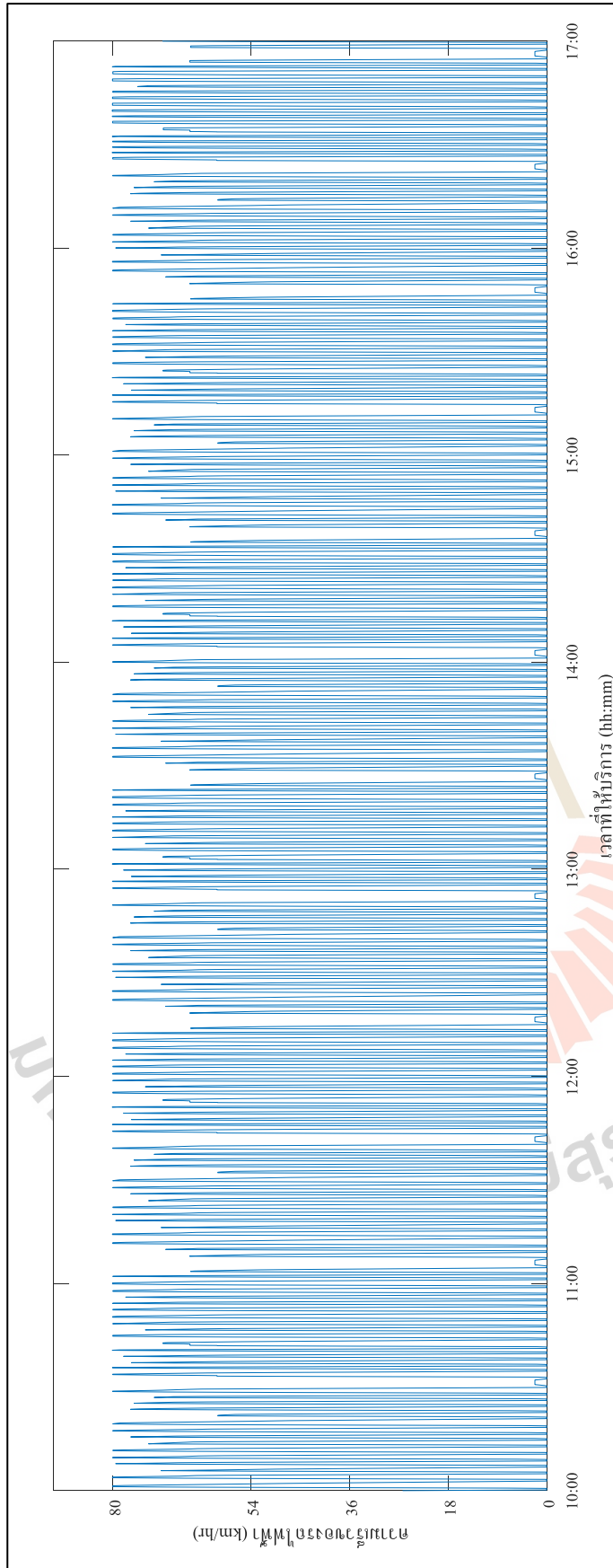
รูปที่ 4.38 เส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าในการให้บริการหนึ่งวัน



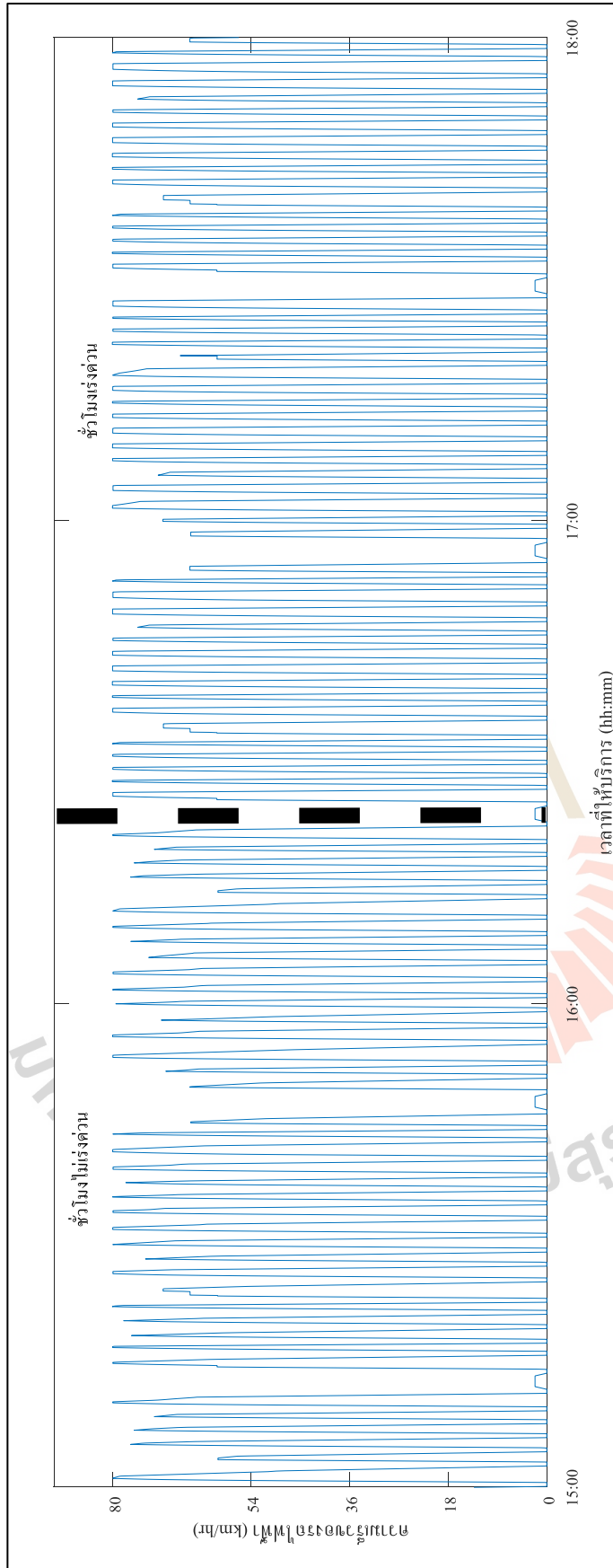
รูปที่ 4.39 เส้น โค้งความเร็วในช่วงเช้า



รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งความเร็วในช่วงเช้า



รูปที่ 4.41 เส้นโค้งความเร็วช่วงเวลาไม่เร่งด่วน



รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งความเร็วในช่วงเย็น

หลังจากที่จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในหนึ่งวันแล้ว ต่อมาได้สรุปข้อมูลพลังงานที่ใช้ในการเดินทางตลอดทั้งวัน พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเบรก พลังงานสุทธิและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเดือนเอาไว้ในตารางที่ 4.16 และ ตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าในกรณีที่ใช้เส้นโค้งความเร็วแบบเดิมและไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน (kWh per day)	พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเบรก (kWh per day)	พลังงานสุทธิ (kWh)	ค่าใช้จ่าย (บาทต่อเดือน)
2,278,584	939,060	2,278,584	7,973,910

ตารางที่ 4.17 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าในกรณีที่ใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่และติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน (kWh per month)	พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรก (kWh per month)	พลังงานสุทธิ (kWh per month)	ค่าใช้จ่าย (บาทต่อเดือน)
2,278,584	939,060	1,338,660	4,685,310

จากรูปภาพ 4.36 แสดงให้เห็นถึงการเดินทางของรถไฟฟ้าจำนวน 18 ขบวน ที่เคลื่อนที่ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน โดยพิจารณาระยะเวลาการปล่อยรถต่างกัน ซึ่งในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ระยะเวลาการปล่อยรถมีค่า 3 นาที ส่วนชั่วโมงไม่เร่งด่วนมีค่า 5 นาที ทำให้ผลจำลองที่แสดงออกมาแสดงให้เห็นผลของความแตกต่างของความหนาแน่นของการจราจรในระบบรางในช่วงเวลาที่ต่างกัน และตารางที่ 4.16 กับ 4.17 แสดงให้เห็นถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเดือนในกรณีที่ใช้เส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมและไม่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานและติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานร่วมกับเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่

4.3.6 คำนวณระยะเวลาคืนทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน

ในส่วนนี้นำเสนอระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงาน โดยอุปกรณ์ที่นำมาพิจารณาคือ โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด ยี่ห้อ Maxwell ที่มีแรงดัน 125 V/module ความจุไฟฟ้า 63 F/module น้ำหนัก 61 kg/module และราคา 6,224.40 USD/module หรือ 193,703.32 Baht/module (1 USD เท่ากับ 31.14 Baht) ดังนั้นการคำนวณเวลาคืนทุนนั้นถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินใจใน

การลงทุนกับเทคโนโลยีเก็บพลังงาน ผลลัพธ์การคำนวณค่าใช้จ่ายและระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานกับรถไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 4.18 และตารางที่ 4.19 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 มูลค่าของพลังงานที่ถูกนำมาประเมินเวลาคืนทุนของโครงการ

พลังงานที่ได้จากการเบรก (kWh)	มูลค่าของพลังงานที่ไม่สามารถทำประโยชน์ได้ (Baht/year)	มูลค่าของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ (Baht/year)
9.7956 (C=1)	-	33,600,000
8.8160 (C=0.9)	3,360,000	30,240,000
8.8160 (C=0.8)	6,720,000	26,880,000
6.8569 (C=0.7)	10,080,000	23,520,000
5.8773 (C=0.6)	13,440,000	20,160,000
4.8978 (C=0.5)	16,800,000	16,800,000
3.9182 (C=0.4)	20,160,000	13,440,000
2.9387 (C=0.3)	23,520,000	10,080,000
1.9591 (C=0.2)	26,880,000	6,720,000
0.9796 (C=0.1)	30,240,000	3,360,000

ตารางที่ 4.19 ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

พลังงานที่ได้จากการเบรก (kWh)	จำนวนโมดูลที่ต่ออนุกรม (โมดูล)	จำนวนโมดูลที่ต่อขนาน (โมดูล)	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งต่อขบวน(บาท)	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งรวม(บาท)	เวลาคืนทุน (ปี)
9.7956 (C=1)	8	9	13,891,968	250,055,424	8.85
8.8160 (C=0.9)	8	8	12,350,400	222,307,200	8.77
8.8160 (C=0.8)	8	7	10,806,600	194,518,800	8.65
6.8569 (C=0.7)	8	6	9,262,800	166,730,400	8.51
5.8773 (C=0.6)	8	5	7,719,000	138,942,000	8.31
4.8978 (C=0.5)	8	4	6,175,200	111,153,600	8.02
3.9182 (C=0.4)	8	4	6,175,200	111,153,600	8.02

ตารางที่ 4.19 ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (ต่อ)

พลังงานที่ได้ จากการเบรก (kWh)	จำนวนโมดูล ที่ต่ออนุกรม (โมดูล)	จำนวนโมดูลที่ ต่อขนาน (โมดูล)	ค่าใช้จ่ายใน การติดตั้งต่อ ขบวน(บาท)	ค่าใช้จ่ายใน การติดตั้ง รวม(บาท)	เวลาคืน ทุน (ปี)
2.9387 (C=0.3)	8	3	4,631,400	83,365,200	>10
1.9591 (C=0.2)	8	2	3,087,600	55,576,800	>10
0.9796 (C=0.1)	8	1	1,543,800	27,788,400	>10

ถ้าหากพิจารณาตามค่า NPV และระยะเวลาคืนทุนนั้นแสดงให้เห็นว่า โครงการนี้จะเหมาะแก่การลงทุนเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีขนาด 0.6 เท่าขึ้นไป แต่ถ้าหากพิจารณาในมุมมองของบริษัทที่บริหารงาน โดยเอกชนพบว่าบริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้า จำกัด(มหาชน) เหลือเวลาสัมปทานอยู่เพียง 16 ปี ประกอบกับมีต้นทุนการติดตั้งจำนวนมากและคืนทุนช้า ดังนั้นบริษัทจึงเลือกพิจารณาวิธีการอื่นที่คืนทุนได้ไวกว่าโครงการนี้

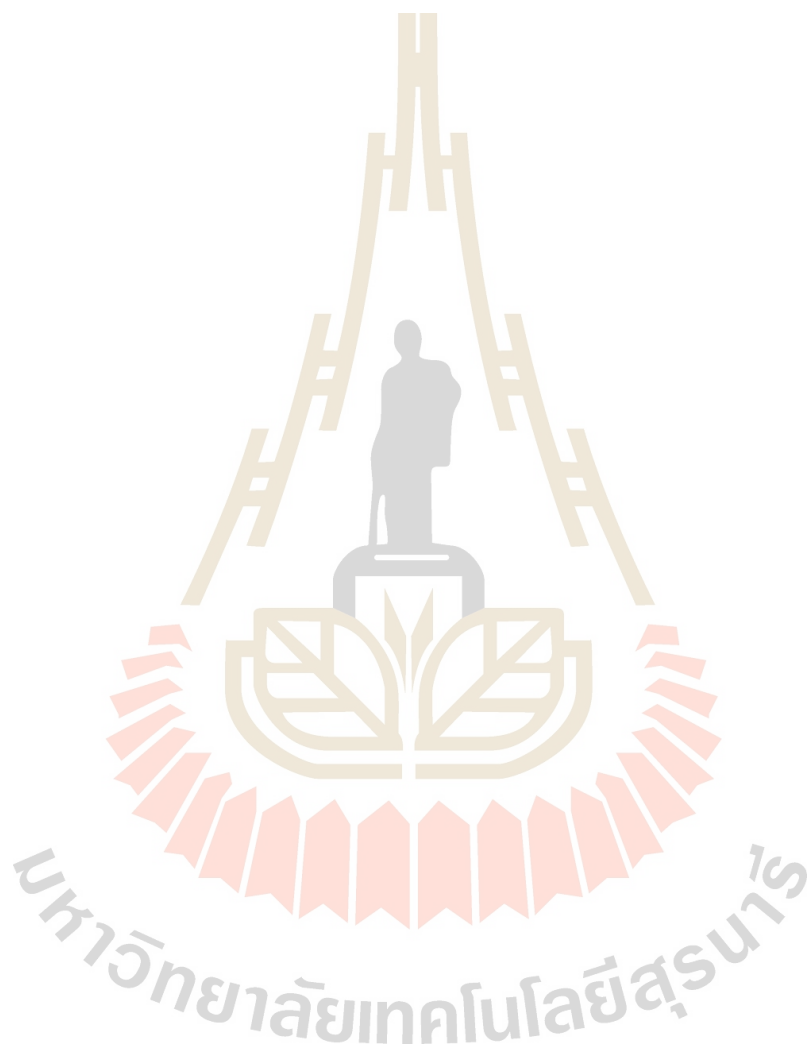
4.4 สรุป

ดังนั้นผลการจำลองที่แสดงในบทนี้ทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงผลของน้ำหนักของรถไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราเร่งของรถไฟฟ้า แรงฉุดลากสูงสุดของรถไฟฟ้า ผลของการใช้โหมดชะลอความเร็วของรถไฟฟ้าที่สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 26 % ผลของการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยเก็บพลังงานที่เกิดขึ้นจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนมาใช้ งาน ระยะเวลาคืนทุนได้เสนอเวลาคืนทุน ความเหมาะสมที่พิจารณา IRR NPV และ ระยะเวลาคืนทุน รวมถึงการจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวน

การออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อให้ถึงผลของความเร็วสูงสุดและการกำหนดตำแหน่งของจุดชะลอความเร็วให้เห็นได้ชัด ต้องกำหนดให้ความเร็วของรถไฟฟ้าวิ่งได้ถึง 100 km/hr. ซึ่งเกินกว่าประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าในปัจจุบันและผลการจำลองในกรณีที่รถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็ว 100 km/hr. ได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก

เนื่องจากข้อมูลที่ได้อาจการวิ่งจริงของรถไฟฟ้ามีเพียงน้ำหนัก AW3 ดังนั้นในกรณีฐานจะนำพลังงานรวมของรถไฟฟ้าที่ได้จากการวิ่งจริงและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกันเพื่อประเมินความผิดพลาดของระบบที่ใช้ในการจำลอง ผลความคลาดเคลื่อนเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการจำลองของระบบรถไฟฟ้า อัตราเร่งความเร็วของรถไฟฟ้า และความแตกต่างของเส้นโค้งความเร็วที่ใช้ในการจำลองกับเส้นโค้งความเร็วของการวิ่งจริงมีค่าความ

คลาดเคลื่อนอยู่บางส่วน มีสาเหตุมาจากการวิ่งจริงของรถไฟฟ้าที่มีเรื่องตารางเดินรถมาเกี่ยวข้อง ซึ่งผลที่ได้รับมาไม่สามารถระบุได้ว่าสถานะของตารางเวลาเดินรถ ณ เวลานั้นเป็นอย่างไร เนื่องจากหากรถไฟฟ้าเดินทางล่าช้าไม่ตรงตามตารางเวลาที่กำหนดไว้ไม่ว่าจะเกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสาร หรือการจราจรที่หนาแน่น รถไฟฟ้าจะทำการปรับเส้นโค้งความเร็วโดยอัตโนมัติ จึงส่งผลให้เส้นโค้งความเร็วที่ใช้วิ่ง ณ ช่วงสถานีเดียวกัน อาจจะมีรูปร่างที่ไม่เหมือนกัน ณ ช่วงเวลาที่ต่างกัน



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยตรง ซึ่งอาศัยระบบรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลหรือสายสีน้ำเงินในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีได้นำเส้นโค้งความเร็วมาออกแบบใหม่โดยการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค เพื่อหาค่าความเร็วสูงสุดที่เหมาะสมและตำแหน่งที่รถไฟฟ้าเริ่มเข้าสู่โหมดชะลอความเร็ว เป็นต้น และยังได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานที่ติดตั้งบนรถไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนและยังได้คำนวณเวลาคืนทุนเพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงในการลงทุนของโครงการนี้ ซึ่งการดำเนินงานวิจัยนี้ได้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมีปัญหาหลักเกี่ยวกับเส้นโค้งความเร็วที่ใช้ในปัจจุบันรวมถึงปัญหาด้านพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเบรกแบบนำพลังงานกลับคืนของรถไฟฟ้า เพื่อนำมากำหนด ขอบเขตของงานวิจัย วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาระบบรถไฟฟ้าโดยตรง อุปกรณ์เก็บพลังงานที่ใช้ในระบบราง ทฤษฎีและวิธีการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรมได้กล่าวถึงผลงานวิจัยของนักวิจัยในอดีตที่มีประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยผลงานวิจัยได้ถูกค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE Science-Direct หนังสือและสื่ออ้างอิงบางเว็บไซต์จาก เป็นต้น ทำให้ทราบถึงแนวทางของงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับใช้และสร้างงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3 ได้นำเสนอสมการและรูปแบบของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยชิ้นนี้ อีกทั้งยังกล่าวถึงการประเมินขนาดอุปกรณ์เก็บพลังงานที่อาศัยการประเมินแบบสัดส่วนของพลังงานที่ได้กลับคืนจากการเบรกสูงสุดและกล่าวถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคในการคำนวณหาผลเฉลยแรงดันของรถไฟฟ้า ผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย และแรงดันที่รางรถไฟฟ้า เป็นต้น

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงผลการจำลองของโปรแกรมจำลองประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า โดยแสดงให้เห็นถึงรูปแบบเส้นโค้งความเร็ว พลังงานของรถไฟฟ้า ใช้ในการเคลื่อนที่ที่พลังงานที่ได้กลับคืนจากการเบรก และพลังงานสุทธิเป็นต้น ในส่วนท้ายได้นำเสนอผลการติดอุปกรณ์เก็บพลังงาน การจำลองการเดินรถแบบหลายขบวนและระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการนี้ โดยในบทนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อย่อย อันได้แก่ การจำลองแรงจลลาควิกฤตและแรงเบรกวิกฤตของรถไฟฟ้า ผลจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ซึ่งถูกแยกย่อยออกเป็น 6 หัวข้อย่อย ได้แก่ หัวข้อที่หนึ่งการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากรณีฐาน ในส่วนนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากการจำลองกับพลังงานที่ได้จากเอกสารทางเทคนิค เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่ใช้ในการจำลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากความผิดพลาดในส่วนของ การสร้างเส้นโค้งความเร็ว เนื่องจากตัวเอกสารไม่ได้ระบุอัตราเร่ง ตำแหน่งที่รถไฟฟ้าเปลี่ยนจากโหมดการทำงาน ทำให้ต้องกำหนดเงื่อนไขการสร้างเส้นโค้งความเร็วขึ้นมาใหม่ โดยอ้างอิงความเร็วสูงสุดของเส้นทางเป็นตัวกำหนดโหมดการทำงาน จึงส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น หัวข้อที่สองการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ ในหัวข้อนี้เส้นโค้งความเร็วจะถูกสร้างโดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ ตามที่ รฟม. กำหนดไว้ทุกประการ โดยเส้นโค้งความเร็วอันใหม่จะถูกใช้งานในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนเท่านั้น เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อตารางเวลาเดินรถ ผลจากการออกแบบเส้นโค้งความเร็วส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 26.8 % แต่เวลาในการเดินทางตลอดทั้งสายเพิ่มขึ้น 5 นาที ซึ่งยังคงเป็นไปตามมาตรฐานที่ รฟม. กำหนดไว้ หัวข้อที่สามการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้เส้นโค้งความเร็วกรณีฐานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงาน ในส่วนนี้มีการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า โดยขนาดที่พิจารณาเป็นขนาดที่เท่ากับพลังงานที่สูงสุดที่ได้กลับคืนจากการเบรก เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ซึ่งผลการติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 147.24 kWh ในกรณีพิจารณาน้ำหนัก AW 3 และ 138.52 ในกรณีที่พิจารณาน้ำหนัก AW 2 และเมื่อนำไปจำลองการเคลื่อนที่ตลอดทั้งวันในหัวข้อที่สี่ ทำให้พบว่า การติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานร่วมกับการออกแบบเส้นโค้งความเร็วทำให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 939,060 kWh/day หรือสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 3,300,000 บาทต่อเดือน หัวข้อสุดท้ายเป็นการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการ เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ค่อนข้างสูง การประเมินระยะเวลาคืนทุนถือเป็นสิ่งสำคัญ โดยผลการจำลองที่แสดงในบทที่ 4 รถไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองได้ติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานขนาด 9.79 kWh ซึ่งประกอบด้วย โมดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด จำนวน 72 โมดูล โดยต่อแบบอนุกรมจำนวน 8 โมดูลเพื่อให้ได้แรงดันของระบบที่ต้องการ และต่อขนานจำนวน 9 โมดูลเพื่อให้มีความจุไฟฟ้าเพียงพอต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนจากการเบรก ซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูงถึง 13,891,968 บาทต่อขบวน

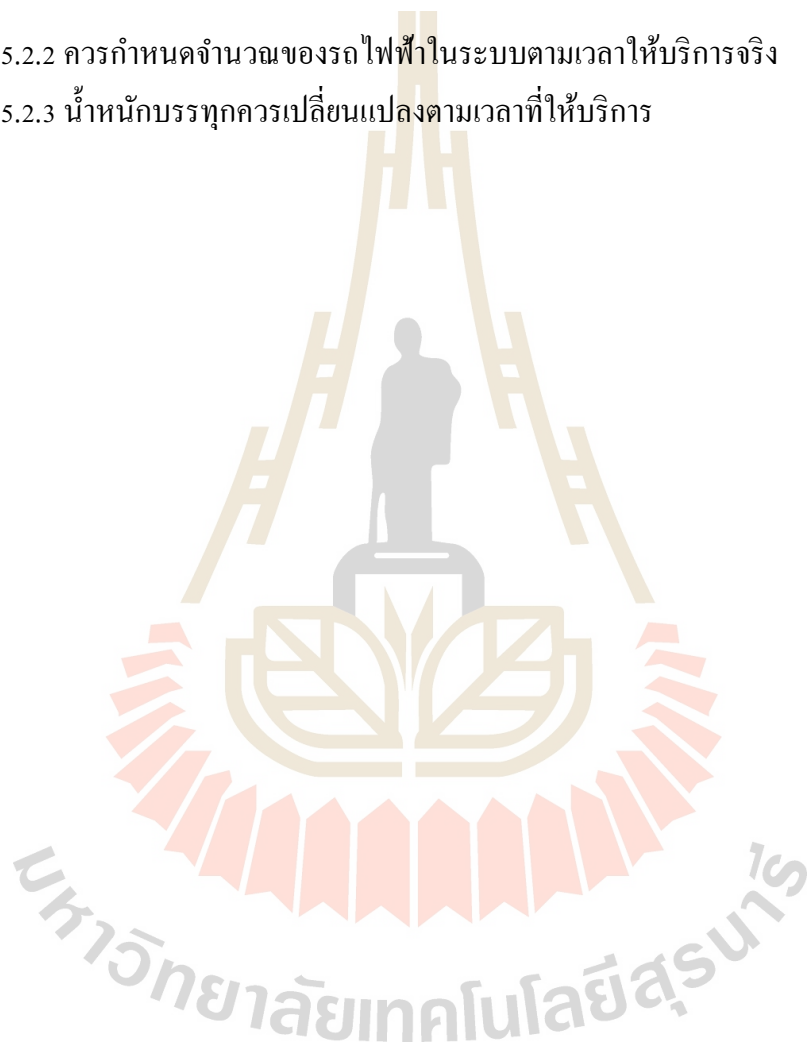
และเมื่อติดตั้งรวมทุกขบวนจะมีค่าใช้จ่ายสูงถึง 250,055,424 บาท เมื่อนำมาพิจารณาเวลาคืนทุน ในการลงทุนครั้งนี้ต้องใช้เวลาคืนทุนถึง 8.85 ปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรระบุตำแหน่งที่แน่ชัดของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันในระบบ

5.2.2 ควรกำหนดจำนวนของรถไฟฟ้าในระบบตามเวลาให้บริการจริง

5.2.3 นำหนักบรรทุกควรเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ให้บริการ

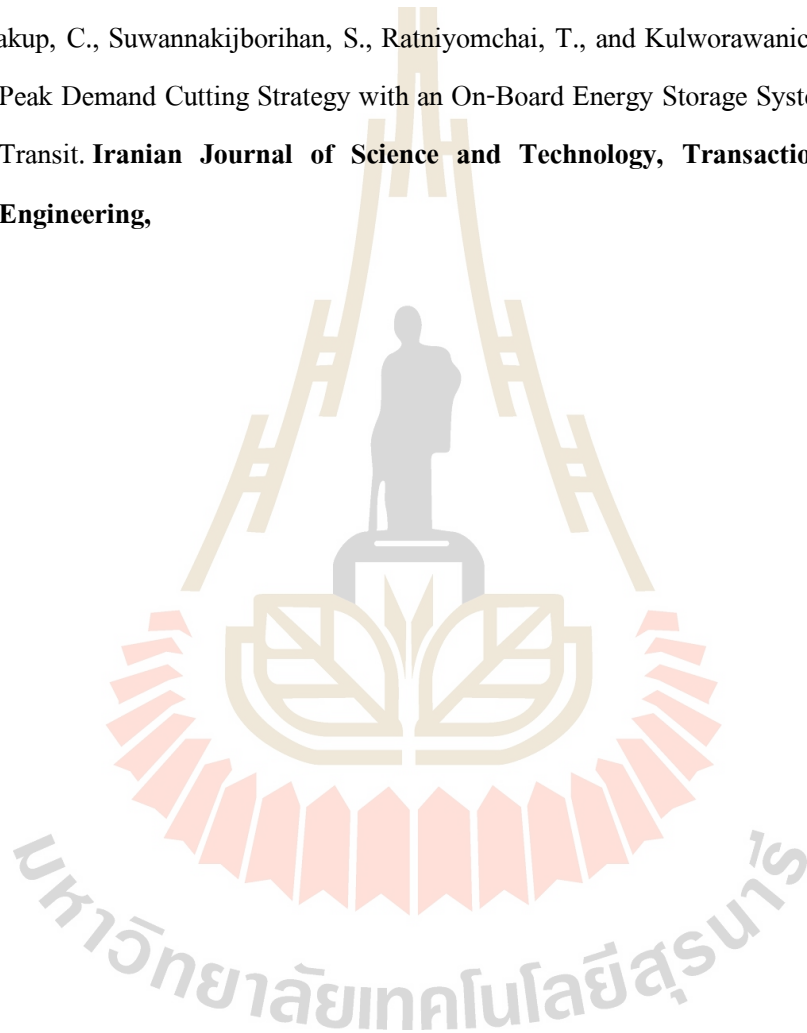


รายการอ้างอิง

- อภิรักษ์ ชัดวิลาศ (2546). การประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด. **MUTP Research Journal**, Vol. 5, No. 2,
- Aarathy, M., and Abinaya, S. (2015). Efficacious idle-stop system in automobiles using intelligent traffic control algorithm. *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. doi:10.1109/icecct.2015.7225929
- Domínguez, M., Fernández, A., Cucala, A. P., and Lukaszewicz, P. (2011). Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**
- Domínguez, M., Fernández, A., Cucala, A. P., and Blanquer, J. (2010). Efficient design of Automatic Train Operation speed profiles with on board energy storage devices. **Computers in Railways XII**.
- Flavio Ciccarelli (2014). **Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems**. PhD Thesis University of Naples
- Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., and Dahlquist, E. (2017). Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. **Energy Procedia**
- Guo, J., Wang, J., and Cao, B. (2009). Regenerative braking strategy for electric vehicles. **2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium**
- Iannuzzi, D., and Tricoli, P. (2010). Metro trains equipped onboard with supercapacitors: A control technique for energy saving. **Speedam 2010**.
- Iannuzzi, D., Pagano, E., and Tricoli, P. (2013). The Use of Energy Storage Systems for Supporting the Voltage Needs of Urban and Suburban Railway Contact Lines. **Energies**,6

- Kara, A., Mardikyan, K., and Baran, S. (2012). Application of regenerative braking energy to Istanbul metro operation system. **2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion.**
- Killer, A., Armstorfer, A., Diez, A. E., and Biechl, H. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems. **2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS).**
- Liu, W., Xu, J., and Tang, J. (2017). Study on control strategy of urban rail train with on-board regenerative braking energy storage system. **IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.**
- Lu, S., Weston, P., Hillmansen, S., Gooi, H. B., and Roberts, C. (2014). Increasing the Regenerative Braking Energy for Railway Vehicles. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,15(6), 2506-2515.**
- Martinis, V. D., and Gallo, M. (2013). Models and Methods to Optimise Train Speed Profiles with and without Energy Recovery Systems: A Suburban Test Case. **Procedia - Social and Behavioral Sciences,87, 222-233.**
- Martinis, V. D., and Gallo, M. (2013). Models and Methods to Optimise Train Speed Profiles with and without Energy Recovery Systems: A Suburban Test Case. **Procedia - Social and Behavioral Sciences,87, 222-233.**
- Matsuura, G. (2014). Optimal train speed profiles by dynamic programming with parallel computing and the fine-tuning of mesh. **Computers in Railways XIV.**
- Mongkoldee, K., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T. (2016). Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration. **2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII).**
- Sanchis, I. V., and Zuriaga, P. S. (2016). An energy-efficient metro speed profiles for energy savings: Application to the Valencia metro. **Libro De Actas CIT2016. XII Congreso De Ingeniería Del Transporte.**
- Sandidzadeh, M. A., and Alai, M. R. (2016). Optimal speed control of a multiple-mass train for minimum energy consumption using ant colony and genetic algorithms. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.**

- Steiner, M., and Scholten, J. (n.d.). Energy storage on board of DC fed railway vehicles PESC 2004 conference in Aachen, Germany. **2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)**
- Su, S., Tang, T., and Wang, Y. (2016). Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. **Energies**
- Sumpavakup, C., Suwannakijborihan, S., Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T. (2018). Peak Demand Cutting Strategy with an On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering,**





ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

กัณดินันท์ สกุลไพศาล ชีระพงษ์ บุญรักษา และ บุญเรือง มะรังศรี (2561). การออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินในประเทศไทย. การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 (TREC 11). จังหวัดชัยภูมิ

Sakulphaisan, G., & Marungsri, B. (2018). Optimal Maximum Speed during Off-Peak Hours for Reduced Energy Consumption of the Bangkok MRT. *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018)*. doi:10.2991/iceea-18.2018.30

Pratchaya Patthawong, **Guntinan Sakulphaisan** and Boonruang Marungsri, “Speed Profile Design Integrating Energy Storage Device For Reducing Energy Consumption of The Bangkok MRT by using PSO” **GMSARN International Journal (2018)**. Vol 13 no 2: pp 86-95.



DE88

**การออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน
ในประเทศไทย**

**Design Speed Profile for Reducing Energy Consumption of the Bangkok MRT
Blue Line**

กัณดินันท์ สกุลไพศาล อีระพงษ์ บุญรักษา และบุญเรือง มะรังศรี
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการออกแบบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นของผู้โดยสารต่ำหรือช่วงเวลาไม่เร่งด่วน (Off-Peak Hours) การออกแบบเส้นโค้งความเร็วถูกออกแบบโดยการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) ในการหาค่าความเร็วสูงสุดที่เหมาะสมในแต่ละช่วงของสถานี โดยไม่คำนึงถึงตารางเวลาการเดินทาง เนื่องจากการปรับความเร็วของรถไฟนั้นส่งผลกระทบท่อตารางเวลาของรถไฟฟ้าโดยตรงและการสร้างตารางเดินรถใหม่นั้นถือว่ามีความซับซ้อนอย่างมาก กรณีศึกษาของบทความนี้ใช้เส้นทางและข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่และเส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเดิมที่ได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเส้นทางที่ศึกษา ผลลัพธ์ของบทความนี้แสดงถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ใน 1 รอบการวิ่งให้บริการ ซึ่งการออกแบบเส้นโค้งความเร็วใหม่สามารถลดการใช้พลังงานรวมได้ถึง 180 kWh ต่อรอบการวิ่งให้บริการ

คำสำคัญ: ออกแบบเส้นโค้งความเร็ว รถไฟฟ้าใต้ดิน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

*Corresponding author: Tel.: 089-7177065. E-mail address: bmshvee@sut.ac.th

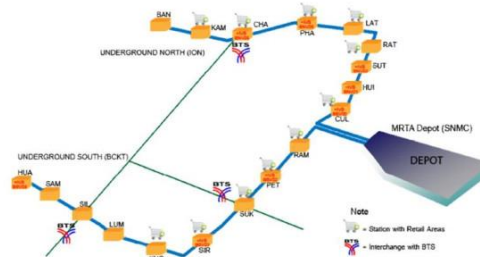
บทนำ

ในปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทยกำลังขยายออกให้ครอบคลุมทั่วกรุงเทพฯและปริมณฑล ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายประชาชนได้จำนวนมากและทำให้การเดินทางมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น แต่ต้องแลกกับการรับภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานอย่างมหาศาล ดังนั้นการลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่ความหนาแน่นของผู้โดยสารต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่ง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือส่งผลกระทบต่อตารางเวลาเดินทาง

การออกแบบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นของผู้โดยสารต่ำต้องเป็นไปตามมาตรฐานการเดินรถไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามหานครที่กำหนดไว้ว่า ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่า 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และการเดินทางระหว่างสถานีต้องต่ำกว่า 5 นาที ดังนั้นจากข้อมูลของมาตรฐานจึงถูกนำมากำหนดเป็นข้อกำหนดในการสร้างเส้นโค้งความเร็วและใช้เส้นทางสายสีน้ำเงินซึ่งมีระยะทางรวม 20 กิโลเมตร สถานีขนส่งผู้โดยสาร 18 สถานีและพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบเดินรถขบวนเดียว เส้นทางของสายสีน้ำเงินถูกแสดงในภาพที่ 1



วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้ทำงานง่ายและเป็นที่ยอมรับ ในปัจจุบันวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในระบบรถไฟฟ้าอยู่บ่อยครั้งในงานวิจัย ซึ่งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้ทำงานง่ายและเป็นที่ยอมรับ ในปัจจุบันวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในระบบรถไฟฟ้าอยู่บ่อยครั้งเช่นงานวิจัย [1] ได้จำลองหาพลังงานที่ต่ำที่สุดในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ซึ่งผลลัพธ์ได้แสดงถึงการลดการใช้พลังงานที่มีค่าตั้งแต่ 3% - 14% ต่อมาได้นำมาประยุกต์ใช้ในการในการปรับปรุง โดยวิธีการสร้างเส้นโค้งความเร็วขึ้นมาใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานสามารถลดการใช้พลังงานได้สูงที่สุดถึง 25% ดังเช่นงานวิจัยดังต่อไปนี้ [2] ได้นำเสนอโมเดลและวิธีการในการสร้างเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมของรถไฟฟ้าเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินทางระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าไปยังสถานีต่าง ๆ เพื่อพัฒนากลยุทธ์ที่ใช้ในการขับรถไฟฟ้า โดยกลยุทธ์ในการขับรถไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 21%, [3] ได้นำเสนอวิธีการที่สามารถลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าโดยการสร้างเส้นโค้งความเร็วใหม่โดยใช้เวลาและตัวบังคับซึ่งความสบายในการเดินทางของผู้โดยสารเป็นเงื่อนไขซึ่งผลลัพธ์จากการออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพียงอย่างเดียวสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 25% และ [4] ได้สร้างเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยมีเงื่อนไขในการลดการใช้พลังงานด้วยวิธีการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยผลลัพธ์ของการจำลองระบบรถไฟฟ้า ได้แสดงถึงการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและการลดความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 1 เส้นทางการเดินทางของรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น 4 โหมดการทำงานได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดคงค่าความเร็ว โหมดชะลอความเร็ว และโหมดเบรก โดยแต่ละโหมดการทำงาน พลังงานที่ใช้ในแต่ละโหมดการทำงานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณด้านพลวัตของรถไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย แรงฉุดลากของหัวรถจักร แรงต้านทานการวิ่ง แรงต้านทานทางโค้งและแรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน ซึ่งเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 2

แรงต้านทานการวิ่ง ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ประกอบด้วย แรงลากทางพลศาสตร์และแรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ ซึ่งทิศทางของแรงตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยนิยมจัดให้อยู่ในรูปของสมการเดวี (Davis Equation)

แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง มีสาเหตุมาจาก ขอบนอกของวงล้อที่ทำหน้าที่เกาะทางรถไฟเกิดแรงเสียดทานจากการไถลและล้อด้านนอกหมุนเร็วกว่าล้อด้านในจึงทำให้เกิดการสลิปเป็นเหตุให้แรงเสียดทานจากการไถลเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วแรงเสียดทานทางโค้ง ถูกคำนวณด้วยสมการ Roeckl's formula



แรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน โดยทั่วไปเส้นทางเดินรถของรถไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงตามสถานีขนส่งผู้โดยสารที่ถูกร่างขึ้น การพิจารณาแรงต้านทานจากการวิ่งขึ้น-ลงเนิน โดยปกติถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบการคำนวณอย่างง่ายโดยการสมมติให้รถไฟฟ้าทั้งขบวนเป็นมวลจุดเดียว

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บนรถไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ที่ถูกใช้ในระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ พัดลมระบายความร้อน ระบบติดต่อสื่อสาร โดยการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดเกิดจากผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวกดังสมการที่ 8 โดยพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวกจะมีค่าคงที่ ส่วนพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้านั้นจะแปรผันตามความเร็วและแรงฉุดลากของหัวรถจักรโดยประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนมีผลต่อแรงฉุดลากของหัวรถจักร[5]-[6]

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

การสร้างเส้นโค้งความเร็วใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ซึ่งสร้างขึ้นโดยคุณ Kennedy และ Eberhart ในปี พ.ศ.2538 โดยมีแรงบันดาลใจมาจากการสังเกตการเคลื่อนไหวของนกฝูงหนึ่ง เช่น ฝูงนก ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่สอดคล้องกันในเวลาได้ออกหาอาหาร ดังนั้นการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคคือการใช้ฝูงอนุภาคจำนวนมากเคลื่อนที่ไปบนพื้นที่ที่ต้องการค้นหาเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด [7] โดยการออกแบบเส้นโค้งความเร็วมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดดังสมการที่ (1)-(7)

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad \text{Minimum} \quad E = \int P_f(v, s) \, ds \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$s(0) = 0; \quad (2)$$

$$s(t) = L \quad (3)$$

$$a \leq 1.2 \, m/s^2 \quad (4)$$

$$0 \leq v(s) \leq \text{speed limit}(s) \quad (5)$$

$$\text{Trip time} < 300 \, s \quad (6)$$

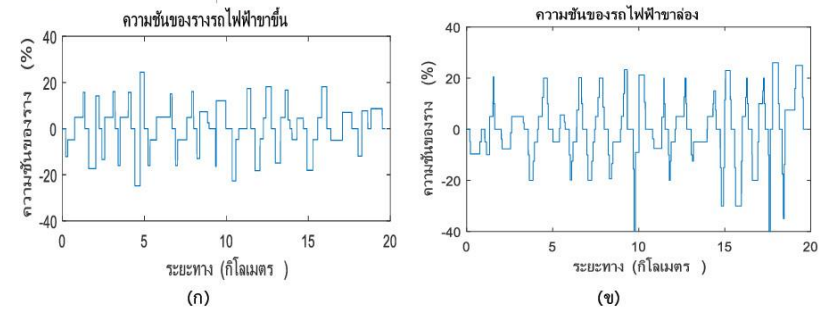
$$\text{Average speed} > 40 \, \text{km/hrs.} \quad (7)$$

วิธีการจำลองของระบบ

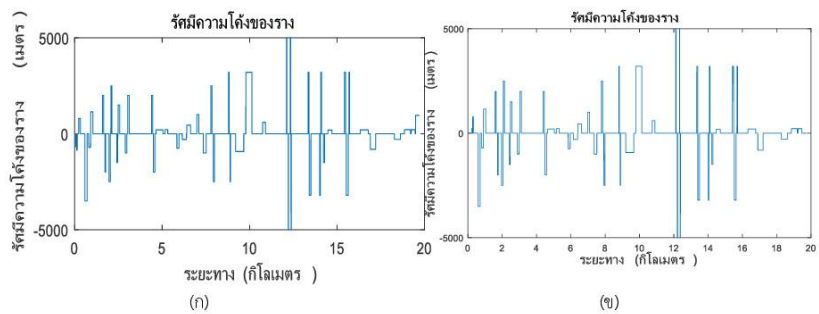
ข้อมูลที่น่าสนใจในการสร้างระบบและจำลองผลลัพธ์นั้นประกอบด้วย ความชันของรางรถไฟฟ้า รัศมีความโค้งของรางรถไฟฟ้า และข้อมูลของขบวนรถไฟฟ้าให้บริการในปัจจุบัน การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ตลอดสายทั้งข้างขึ้น(จากสถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ) และข้างลง (จากสถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 และตารางที่ 1

ตารางที่ 2 ข้อมูลของขบวนรถไฟฟ้า

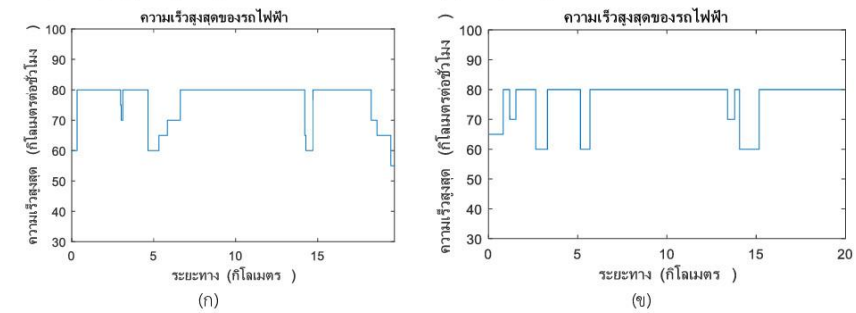
หัวข้อ	ค่า	หน่วย
น้ำหนัก	160	Ton
อัตราเร่งและอัตราเบรกสูงสุด	1.2, 1.2	m/s ²
ความเร็วสูงสุด	80	Km/hr.
Davis constant a,b,c	3.52, 30.56, 2.28	



ภาพที่ 2 (ก) ความผันของแรงดันไฟฟ้าสายขึ้น (ข) ความผันของแรงดันไฟฟ้าสายาล่อง



ภาพที่ 3 (ก) รัศมีความโค้งของแรงดันไฟฟ้าสายทางขึ้น (ข) รัศมีความโค้งของแรงดันไฟฟ้าสายาล่อง



ภาพที่ 4 (ก) ความเร็วสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าสายทางขึ้น (ข) ความความเร็วสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าสายาล่อง

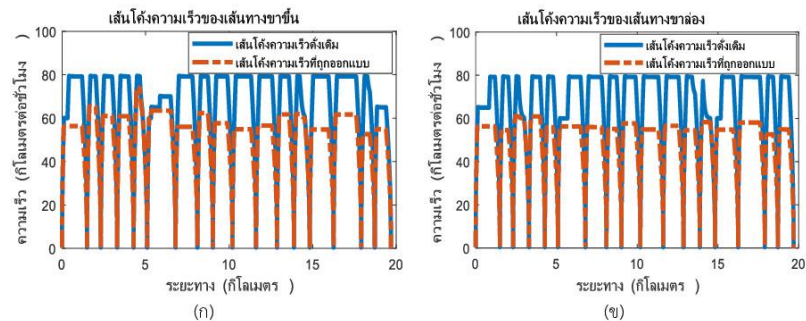
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ข้อจำกัดของรถไฟฟ้และข้อมูลจากตารางที่ 1 สามารถนำมาสร้างระบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB 2016a ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงเป็นเส้นโค้งความเร็วซึ่งถูกแยกออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมและเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่

เส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมที่ถูกจำลองขึ้นมาถูกกำหนดให้รถไฟวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด โดยมีข้อกำหนดคือแรงบิดที่ใช้ในช่วงการเร่งความเร็วจะต้องไม่เกินค่าความเร่งสูงสุดและเส้นทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่มี 2 เส้นทาง คือเส้นทางขาขึ้นและเส้นทางขาล่อง มีรูปแบบของเส้นโค้งความเร็วดังภาพที่ 5 (ก)-(ข) (เส้นที่บี)



เส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบใหม่เหมาะสมสำหรับช่วงเวลาไม่เร่งด่วนเท่านั้น ซึ่งการออกแบบเส้นโค้งความเร็วเป็นการปรับลดความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าลงมา โดยที่รถไฟฟ้าต้องสามารถให้บริการตามมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ ผลการจำลองการเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่มีรูปแบบของเส้นโค้งความเร็วภาพรูปที่ 5 (ก)-(ข) (เส้นประ)



ภาพที่ 5 (ก) การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมกับเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบส่วนของขาขึ้น
(ข) การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วที่ดั้งเดิมกับเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบส่วนของขาล่อง

ตารางที่ 2 การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าหลังจากการใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่

เส้นทาง	พลังงานที่ใช้ (kWh)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (minutes)
ขาขึ้น (สถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ)	190	22
ขาล่อง(สถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง)	184	22

ตารางที่ 3 การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าหลังจากการใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่

เส้นทาง	พลังงานที่ใช้ (kWh)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (minutes)
ขาขึ้น (สถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ)	119	30
ขาล่อง(สถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง)	121	28

ผลจากการปรับความเร็วส่งผลให้มีระยะเวลาในการเดินทางรวมสูงขึ้น 16 นาทีต่อรอบ โดยเวลาที่ใช้ในการเดินทางเฉลี่ยของแต่ละสถานีที่เพิ่มขึ้นสถานีละ 55 วินาที แต่สามารถลดการใช้พลังงานรวมของการเดินทางในแต่ละรอบได้ถึง 137 kWh ต่อรอบการวิ่งให้บริการ ซึ่งหลังจากปรับปรุงเส้นโค้งความเร็วแล้ว ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้ามีค่า 35 km/hrs. และเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีไม่เกิน 300 วินาที

สรุปผลการวิจัย

จากปัญหาด้านค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าใต้ดินในปัจจุบัน การสร้างเส้นโค้งความเร็วที่สอดคล้องกับช่วงเวลาต่างๆของการให้บริการถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมและไม่เสียค่าใช้จ่ายในด้านติดตั้งอุปกรณ์เสริม และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเดือนอีกด้วย จากผลการทดลองปรับความเร็วแสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียที่เกิดขึ้น โดยข้อดีที่เกิดขึ้นคือสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้จำนวนมากหากพิจารณาการเดินทางรถไฟฟ้าแบบหลาย



ขบวน แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ผู้โดยสารต้องใช้เวลาในการเดินทางมากขึ้นจึงทำให้เส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่สามารถใช้ได้ในเวลาที่ไม่ว่างคั่งเท่าที่นั้น และมีผลกระทบต่อตารางเวลาเดินรถจำเป็นต้องสร้างตารางเดินรถในช่วงเวลาไม่ว่างคั่งขึ้นมาใหม่เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบในการเดินทางของรถไฟฟ้าหรืออาจจะต้องเพิ่มจำนวนรถที่ให้บริการในช่วงเวลาไม่ว่างคั่งเพื่อลดเวลารอคอยของผู้โดยสารให้เหมาะสมกับวิธีชีวิตคนกรุงเทพฯ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี ที่ให้คำปรึกษาพร้อมชี้แนะแนวทางในการแก้ไขข้อหาที่เกิดขึ้นตลอดการดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fernandez-Rodriguez, A., Fernandez-Cardador, A., Cucala, A. P., Dominguez, M., & Gonsalves, T. (2015). Design of Robust and Energy-Efficient ATO Speed Profiles of Metropolitan Lines Considering Train Load Variations and Delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 2061-2071. doi:10.1109/tits.2015.2391831
- [2] Martinis, V. D., & Gallo, M. (2013). Models and Methods to Optimise Train Speed Profiles with and without Energy Recovery Systems: A Suburban Test Case. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 87, 222-233.
- [3] Dominguez, M., Fernández, A., Cucala, A. P., & Lukaszewicz, P. (2011). Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*
- [4] Su, S., Tang, T., & Wang, Y. (2016). Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. *Energies*
- [5] Mongkoldee, K., Leeton, U., & Kulworawanichpong, T. (2016). Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration. *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*.
- [6] Sumpavakup, C., Suwannakijborihan, S., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2018). Peak Demand Cutting Strategy with an On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*.
- [7] N. (2016, April 18). [Algorithm]Particle Swarm Optimization. Retrieved from <https://www.algorithmtut.com/particleswarmoptimization/>

Optimal Maximum Speed during Off-Peak Hours for Reduced Energy Consumption of the Bangkok MRT

Guntinan SAKULPHAISAN and Boonruang MARUNGSRI*

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

*Corresponding author

Abstract—Nowadays, energy management is an essential strategy for reducing the energy cost in the metro system. This paper discusses the energy efficiency management by control the speed of metro for reducing the energy consumption during the off-peak period of the Chalem Ratchamongkol metro line or the Bangkok MRT. The control conditions included the average speed throughout the route is not lower than 40 km/hr. and the trip time must be less than 5 minutes. The optimal maximum speed was determined by using Particle Swarm Optimization Technique (PSO). The simulation result showed that the energy consumption after changing the maximum speed to the optimal value reduced up to 20.89 kWh per trip.

Keywords—energy consumption; optimal maximum speed; particle swarm optimization; energy management strategy

I. INTRODUCTION

Presently, Bangkok MRT Organization is the metro service in Bangkok consists of 18 stations having total distance 19.5 km. The Bangkok MRT services 19 hours per day consists of 12 hours during off-peak hours and 7 hours for peak-hours. The metro network is called Chalem Ratchamongkol line that separates into two sections. The first section is a north section which the route of the north section start at Bang sue station and the end at Thailand Cultural Center station. The second section is a south section which starts at Pha Ram IX station to Hua Lumpong station. The route of Bangkok MRT is shown in Figure 1.

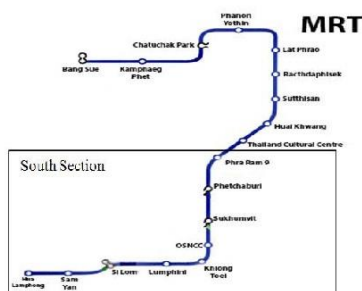


FIGURE 1. THE CHALERM RATCHAMONGKOL LINE OR THE BANGKOK MRT

Various methods were used to reduce the energy consumption of metro network. Installation of energy storage system to store braking energy during the braking period is one of the methods for this proposed. Also, designing the metro with the low weight of material or design the shape of metro for reducing rolling force is adopted. Furthermore, the optimal timetable provides optimal energy consumption during the service period. The last method is the optimal metro speed for reducing energy consumption during off-peak hours.

To find the best solution, many researchers studied this problem. Fan et al. (2015) introduced the two important components of speed profile and tracking strategy to analyze energy consumption by using Ant Colony Algorithm. Their result showed that the optimal speed profile could save usage energy consumption up to 8.64 % [1]. Aradi, Becsi, and Gaspar (2013) introduced the predictive optimization method for a train speed profile. Their goal was to generate a speed profile which the highest efficiency of energy consumption by using an algorithm approach both traveling time and energy consumption. By using their optimization method, the result showed that the energy consumption reduced from 79.5kWh to 67.3kWh [2]. Hamid et al. (2016) investigated the train positioning systems for saving energy with optimized train trajectories. They reduced the metro speed which has a significant effect on the traction energy consumption because the reduction of speed can reduce running resistance force of the metro [3]. Ahmadi and Dastfan (2016) obtained the energy consumption-time by using the non-dominated sorting algorithm. They used the speed profile optimization with two objective functions of net energy and the traveling time interstation distance. Their result showed the relation of the rate of regenerative energy, energy consumption saving, and operational management [4]. Ghaviha, Bohlin, and Dahlquist (2016) studied the speed profile optimization of an electric train with onboard energy storage and continuous tractive effort. They developed the algorithm for speed profile optimization with onboard energy storage device which metro model. The objective function was based on the equation of motion [5]. Martinis and Gallo (2013) introduced models and methods to optimize train speed profiles with and without Energy Recovery Systems. Their primary energy consumption model was based on operation energy requirement by traction unit and the energy requirement for the auxiliary system [6]. Mahamad (2016) developed the particle swarm optimization code for Matlab Program that uses to find a minimum value of problem [7].

II. CHARACTERISTIC OF THE METRO

The energy using in traction system of metro consists of traction energy and loss energy of traction substation. The energy consumption of metro depends on traction effort, which varies speed, accelerates, the slope of the railway and running resistance. Speed profile of the subway was separated into four

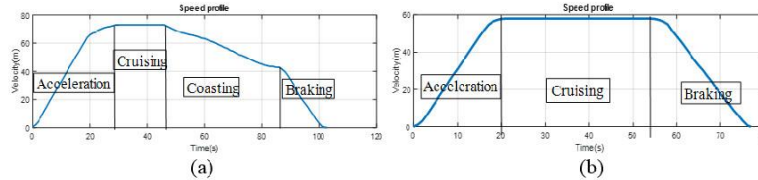


FIGURE II. (A) THE GENERAL SPEED PROFILE AND (B) THE SIMULATION SPEED PROFILE

The problem of the metro system isn't installs energy storage device that causes regenerative braking energy can't store. Therefore, the total regenerative braking energy was converted to heat energy. The calculation of energy consumption in this paper based on energy consumption model which explained the energy required for metro running along a track with motion parameters could be expressed as the integral of the mechanical power over time. The mechanical power is the power measured at the wheel-rail interface and can be computed as the product of the traction effort, and speed. the equation (1) is the of energy consumption model. When $F(v,t)$ is traction effort, v is speed and E is energy consumption

$$E = \int_{t \in T} P_{mech}(t) dt = \int_{t \in T} v \cdot F(v, t) dt \quad (1)$$

III. MECHANICAL MODEL

The aims of this section to introduce the mathematic equations of the metro model and factors affecting the energy consumption.

A. Metro Model

The metro is considered as the single mass model. The characteristic of traction effort is based on the 2nd force law of Newton. Total acting forces expressed in equation (2).

$$\sum F = F_t - F_{RR} - F_G \quad (2)$$

Where F_t , F_{RR} , F_G are traction effort, rolling force, gradient force or slope force, respectively.

B. Rolling Force(F_{RR})

Rolling resistance is the resistance to movement of the metro. It is a fictional torque. The manufacturer usually determined the rolling force with the aerodynamic drag force. The result of rolling force and aerodynamic drag force are proposed in Davis equation. The Davis equation is shown in equation (3).

$$F_{RR} = a + bv + cv^2 \quad (3)$$

Where a , b , c are Davis Coefficient and v is the velocity of the metro.

C. Gradient Force(F_G)

Gradient force is a resistance force that occurs when the metro moves uphill, downhill or move through different levels. The gradient force equation was shown in equation (4)

$$F_G = \pm M_{eff} g \sin \theta \quad (4)$$

When M_{eff} is effective mass and θ is the angle of slope. Equation (2), (3) and (4) can apply to the equation for movement mode of the metro. The movement modes of the metro are separated into three modes. The equation of each mode is shown in next section.

D. Accelerating Mode

In this mode the equation of traction effort is

$$F_t = M \times a + F_{RR} + F_G \quad (5)$$

The energy consumption in this accelerating mode for prepare velocity of the metro to cruising mode can calculate from equation (6)

$$E_{acc} = M \times \frac{v_{t1}^2 + v_l^2}{2} + F_{RR} \times S^{acc} + F_G \times S^{acc} \quad (6)$$

E. Cruising Mode

In this part speed of metro is a constant value and traction effort equal total rolling resistance. The energy consumption for the metro at cruising mode is shown in equation (7).

$$E_{cruis} = F_{RR} \times S^{cruis} + F_G \times S^{cruis} \quad (7)$$

F. Braking Mode

In this part braking effort was fed to traction system for resist train movement. In general, during braking period kinematic energy is negative due to accelerate value in this mode in negative. The negative kinematic energy is affected by the slope of speed profile. Energy consumption during the braking period was shown in equation (8)

$$E_{brake} = -M \times \frac{v_{i+1}^2 + v_i^2}{2} + F_{RR} \times S^{brake} + F_G \times S^{brake} \quad (8)$$

G. Trip Time for Each Mode Calculation

Trip time of metro after change velocity is an essential condition to find optimal speed. So that trip time equation of journey separated into three modes is time for accelerating mode, time for cruising mode and time for braking mode. The equations for each mode are shown in equation (9), (10), (11) and (12), respectively

$$T_{trip} = T_{acc} + T_{cruis} + T_{braking} \quad (9)$$

$$T_{acc} = \frac{v(i)}{a} \quad (10)$$

$$T_{cruis} = \frac{v(i+1) - v(i)}{a} \quad (11)$$

$$T_{brake} = \frac{v(i)}{\beta} \quad (12)$$

IV. OPTIMIZATION MODEL

The route of metro each station consists of three modes which discussed at section 2. Assume acceleration rate and deceleration rate are a maximum value for the metro runs with safety. First, the metro departs from station A with accelerating mode after velocity of train reach optimal maximum speed; The

metro must change from accelerating mode to cruising mode for keeping the speed constant. After that before arrival station B the metro have to switch from cruising mode to braking mode for reducing the speed of metro. After that, the optimal maximum speeds for reducing the energy consumption of metro need the equation (6), (7) and (8). Therefore the objective function of optimal speed for minimum energy consumption is shown in equation (13).

$$\min E = \sum E_{acc} + E_{cruis} + E_{brake} \quad (13)$$

The conditions for determining the area of the objective function are shown in equations (14), (15) and (16). Respectively.

$$0 < v_i < 80 \quad (14)$$

$$40 > \frac{\sum_{i=0}^N v_i}{N} \quad (15)$$

$$T_{trip} < 600 \quad (16)$$

V. SIMULATION RESULTS

This paper selected a southern section of the Bangkok MRT or Chehalem Ratchamongkol line for study the optimal maximum speed of the metro. The study case start at Hua Lumpong station and end at Pha Ram IX station. The Bangkok MRT is a DC-fed line with six traction substations. The simulations considered only the case of one-train moves along the track. The optimization criterion was verified by using the PSO technique. The parameters of the Bangkok MRT are shown in Table I Details of the routes are shown in Table II. The track elevation is shown in Figure III.

TABLE I. PARAMETERS OF THE BANGKOK MRT

Parameter	Value	Parameter	Value
Tare weight	107.1 Ton	Maximum speed	80 km/hr
Payload	53.2 Ton	Accelerate	1.3 m/s ²
Rolling resistance	3,520+30.56v+2.28v ²	Decelerate	0.9 m/s ²

TABLE II. ROUTE OF THE BANGKOK MRT

Departure	Arrival	Distance (m)	Trip time (s)	Maximum Speed (km/hr)	Energy Consumed (kWh)
Hua Lumpong	Samyan	1,496	90.7	80	23.60
Samyan	Si lom	821	59.9	80	15.59
Si lom	Lumphini	983	68.0	80	20.05
Lumphini	Bonkai	985	67.4	80	17.12
Bonkai	Queen Sirikit	809	64.3	80	18.07
Queen Sirikit	Sukhumvit	1700	103.9	80	26.54
Sukhumvit	Phetchaburi	1306	81.8	80	21.00
Phetchaburi	Pha Ram IX	926	64.8	80	19.75

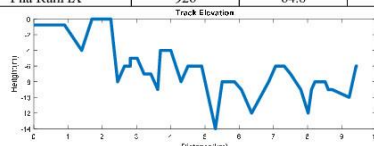


FIGURE III. THE TRACK ELEVATION

TABLE III. THE SIMULATION RESULT OF ENERGY CONSUMED, TRIP TIME AND MAXIMUM SPEED

Departure	Arrival	Trip time (s)	Maximum speed (km/hr)	Energy consumed(kWh)
Hua Lumpong	Samyan	162	66	20.50
Samyan	Si Lom	156	64	13.94
Si lom	Lumphini	117	60	18.22
Lumphini	Bonkai	108	63	14.97
Bonkai	Queen Sirikit	91	64	14.70
Queen Sirikit	Sukhumvit	229	53	22.00
Sukhumvit	Phetchaburi	156	60	19.48
Phetchaburi	Pha Ram IX	103	65	17.02

The optimal speed for reducing the energy consumption of the Bangkok MRT was obtained from the simulation result. Reduced the maximum speed from 80 km/hr to optimal speed for each trip obtained the energy saving up to 4.54 kWh per trip or 20.89 kWh per throughout route. Decreasing the maximum speed effects the increasing of trip time. However, the trip time of the Bangkok MRT is still following the standard even reducing the maximum speed.

VI. CONCLUSION

The optimal maximum speed to minimize the energy consumption for the Chalerom Ratchamongkul metro network or the Bangkok MRT was proposed in this paper. The proposed method based on an energy consumption model. The energy consumption model required parameters from the mechanical model for creating an objective function and the condition equation of each case. The mechanical model is a part of energy consumption model consists of a metro model, rolling force and gradient force used to calculate a traction effort of the metro. Therefore the result of optimal maximum speed for given minimum energy consumption depends on traction effort, distance and speed. The results showed that the energy consumption after the adjusted maximum speed of the metro to an optimal value by using PSO technique via Matlab program.

REFERENCES

- [1] Fan, L., Cao, F., Ke, B., & Tang, T. Speed profile optimization for train operation based on ant colony algorithm. 2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (2015).
- [2] Aradi, S., Beesi, T., & Gaspar, P. A predictive optimization method for energy-optimal speed profile generation for trains. 2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (2013).
- [3] Hamid, H. A., Nicholson, G. L., Douglas, H., Zhao, N., & Roberts, C. The investigation into train positioning systems for saving energy with optimised train trajectories. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (2016).
- [4] Ahmadi, S., & Dastfan, A. Energy saving in urban railway using speed profile optimization. 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (2016).
- [5] Ghaviha, N., Bohlin, M., & Dahlquist, E. Speed profile optimization of an electric train with onboard energy storage and continuous tractive effort. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (2016).
- [6] Martinis, V. D., & Gallo, M. (2013). Models and Methods to Optimise Train Speed Profiles with and without Energy Recovery Systems: A Suburban Test Case. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, (2013).
- [7] Information on https://www.researchgate.net/publication/296636431_Codes_in_MATLAB_for_Particle_Swarm_Optimization.



ภาคผนวก ข

ชุดคำสั่งและสมการที่ใช้ในการจำลอง

ข.1 โคลด์ที่ใช้ในการจำลอง

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าที่ประกอบด้วย 3 โปรแกรมหลัก ซึ่งได้แก่ โปรแกรมจำลองข้อมูลพื้นฐานของรถไฟฟ้า โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ โปรแกรมสร้างตารางเวลาเดินรถและโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

ข.1.1 โปรแกรมจำลองข้อมูลพื้นฐานของรถไฟฟ้า

ประกอบขึ้นจำนวน 3 โปรแกรม ได้แก่ โปรแกรมคำนวณแรงต้านทานต่างๆ เช่น แรงต้านทานการเคลื่อนที่ แรงต้านทานเนื่องจากความโค้งของรางและแรงต้านทานเนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงเนิน โปรแกรมจำลองแรงบิดวิกฤตและแรงเบรกวิกฤตและโปรแกรมจำลองความเร็วสูงสุดของระบบ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณถูกแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 สมการที่ใช้ในการจำลองข้อมูลพื้นฐาน

ชื่อสมการ(หน้า)	สมการ	ลำดับสมการ
คำนวณแรงฉุดลาก (หน้า 36-37)	$\sum F = Ma$	(1)
	$M_{eff}a = F_t - F_{rolling} - F_{curve} - F_{grad}$	(2)
	$M_{eff} \frac{dv}{dt} = F_t - F_{rolling} - F_{curve} - F_{grad}$	(3)
	$M_{eff} = TareWeight (1 + \gamma) + Payload$	(4)
	$F_t = M_{eff}a + F_{rolling} + F_{curve} + F_{grad}$	(5)
	$a = \left(\frac{F_{t_critical} - (F_{rolling} + F_{curve} + F_{grad})}{M_{eff}} \right)$	(6)
คำนวณแรงต้าน การเคลื่อนที่ (หน้า 37-40)	$F_{running} = a + bv(s) + cv(s)^2$	(7)
	$F_{curve} = \begin{cases} \frac{6.3}{r(s) - 55} M_{eff}; for r(s) \geq 300 m \\ \frac{4.91}{r(s) - 30} M_{eff}; for r(s) \leq 300 m \end{cases}$	(8)
	$\alpha = \arctan\left(\frac{\%slope}{100}\right)$	(10)
	$\sin \alpha = \tan \alpha = \frac{1}{X}$	(11)

ตารางที่ ข.1 สมการที่ใช้ในการจำลองข้อมูลพื้นฐาน (ต่อ)

คำนวณแรงต้าน การเคลื่อนที่ (ต่อ) (หน้า 37-40)	$\sin \alpha = \tan \alpha = \frac{1}{X}$	(11)
	$\cos \alpha \approx 1$	(12)
	$F_{Grad} = \frac{\pm Mg}{X}$	(13)
คำนวณกำลังไฟฟ้า และพลังงานที่ใช้ ในการเคลื่อนที่ (หน้า 40)	$\eta = \eta_{net_motor} \times \eta_{gear}$	(14)
	$P_t = \frac{F_t \times v}{\eta} ; \text{Traction Mode}$	(15)
	$P_b = F_b \times v \times \eta ; \text{Braking Mode}$	(16)
	$E_{total} = \left(\frac{P_t \Delta t - P_b \Delta t}{3600} \right) + E_{aux}$	(17)
การปรับปรุง ความเร็วและ ตำแหน่ง(หน้า 40)	$v_{final} = v_{initial} + a\Delta t$	(18)
	$s_{final} = s_{initial} + v_{initial} \Delta t + \frac{1}{2} \times a\Delta t$	(19)
คำนวณแรงดัน และความจุไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุ แบบต่ออนุกรม (หน้า 41)	$V = m \times V_{Supercap}$	(20)
	$\frac{1}{C_{total_s}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \dots + \frac{1}{C_n}$	(21)
การคำนวณ พลังงานสูงสุดและ ความจุไฟฟ้าของ ตัวเก็บประจุแบบ ต่อขนาน (หน้า 42)	$E_{Max_regen} = \frac{1}{2} C_{total} V^2$	(22)
	$C_{total} = C_{total_s} \times n$	(23)
อัตราประจุ (หน้า 42)	$P_{Charge} = F_t \times v \times \eta$	(24)
	$E_{Store} = E_{Store} + (P_{reg} \Delta t)$	(25)

ตารางที่ ข.1 สมการที่ใช้ในการจำลองข้อมูลพื้นฐาน (ต่อ)

กายประจุ (หน้าที่ 43)	$P_{Discharge} = k \times \frac{F_t \times v}{\eta}$	(26)
	$E_{Store} = E_{Store} - (P_{Discharge} \Delta t)$	(27)
สถานะอุปกรณ์ เก็บพลังงาน (หน้า 43)	$SOC = \frac{E_{Store}}{E_{Max}} \times 100\%$	(28)
พลังงานสูญเสีย จากการเบรก (หน้า 45)	$P_{BRLoss} = P_{Charge} = F_t \times v \times \eta$	(29)
	$E_{RBLoss} = E_{RBLoss} + (P_{RBLoss} \Delta t)$	(30)
ประเมินขนาด อุปกรณ์เก็บ พลังงาน (หน้า 44)	$E_{store} = C \times E_{regen_max}$	(28)
ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ และ เงื่อนไขการ คำนวณ (หน้า 45)	$Min E_{tr} = \frac{\int P_{tr} dt}{3600}$	(28)
	$v_{ave} \geq 35 \text{ km / hrs.}$	(29)
	$triptime \leq triptime_{existing} + 10$	(30)
	$station_{position} = train_{position}$	(31)

คำสั่งจำลองข้อมูลพื้นฐาน

```

%% Calculate parameter
fprintf("Generating initial Parameter.....\n")
TP.BE=Bemaxcal(aw);
TP.TE=Temaxcal(aw);
TP.Roll=Rollcal();
Geo.Gradient=Gradientcal(TP);
Geo.Curve=Curvecal(TP);
Geo.Speedlimit=Speedlimitcal(TP);
Geo.Station=Stationcal();
Geo1.Gradient=Gradientcal1(TP);
Geo1.Curve=Curvecal1(TP);
Geo1.Speedlimit=Speedlimitcal1(TP);
Geo1.Station=Stationcal1();
fprintf("Complete Generating initial Parameter\n")

```

ชุดคำสั่งที่ 1 ชุดคำสั่งจำลองข้อมูลพื้นฐาน

ในคำสั่งชุดที่ 1 ได้ประกอบด้วยชุดคำสั่งจำนวน 7 คำสั่งย่อยซึ่งได้แก่

ฟังก์ชัน $Bemaxcal(aw)$; เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณแรงเบรกวิกฤต โดยที่ aw เป็นตัวแปรแทนค่าน้ำหนักของรถไฟฟ้า ในหน่วย “ตัน” โดยในวิธานิพนธ์เล่มนี้ทราบข้อมูลของแรงเบรกเป็นค่าคงที่ตามน้ำหนักของรถไฟฟ้า ซึ่งในความจริงแล้วแรงเบรกวิกฤตของรถไฟฟ้าในบางรุ่นอาจมีค่าไม่คงที่และแปรผันตามน้ำหนักกับความเร็วของรถไฟฟ้า

ฟังก์ชัน $Temaxcal(aw)$; ถูกใช้ในการคำนวณแรงบิดวิกฤต โดยที่ใช้สมการที่ ... ในการคำนวณแรงบิด ซึ่งแรงบิดนี้เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณอัตราเร่งของรถไฟฟ้า ซึ่ง aw ที่แสดงในฟังก์ชัน ถูกแทนที่ด้วยน้ำหนักของรถไฟฟ้า ในหน่วย “ตัน”

ฟังก์ชัน $Rollcal()$; ใช้ในการคำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ โดยอาศัยสมการดีวี และสัมประสิทธิ์ของสมการที่ได้รับจากผู้ผลิตรถไฟในการคำนวณ ซึ่งฟังก์ชันนี้จะไม่มีการคำนวณ

ฟังก์ชัน $Gradientcal(TP)$; ใช้ในการคำนวณค่าแรงต้านทานการเคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนที่ ขึ้น-ลงทางชัน โดยตัวแปรที่ป้อนเข้าไปให้ฟังก์ชันนี้ได้แก่ น้ำหนักของรถไฟฟ้า ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ $\%slope$ ของรางรับน้ำหนักรถไฟฟ้า

ฟังก์ชัน Curvecal(TP); ใช้ในการคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากทางโค้งของรางรับน้ำหนัก โดยตัวแปรที่ป้อนให้ฟังก์ชันนี้คือน้ำหนักของรถไฟไฟฟ้าและรัศมีของรางรับน้ำหนัก

ฟังก์ชัน Speedlimitcal(TP); ใช้ในการสร้างเส้นกำหนดความเร็วสูงสุดของรถไฟไฟฟ้า

หลังจากที่สร้างชุดข้อมูลที่เป็นข้อกำหนดต่างๆของการเคลื่อนที่เสร็จแล้ว ต่อมาต้องสร้างโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้าที่เคลื่อนไปตามชุดข้อมูลต่างๆตามที่ได้สร้างไว้ก่อนหน้า โปรแกรมนี้จะนำข้อมูลข้างต้นมาคำนวณการอัตราเร่งของรถไฟไฟฟ้า แรงฉุดลากของรถไฟไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟไฟฟ้าและอัตราเร่งของรถไฟไฟฟ้า เป็นต้น

```
%Mode Select
If initial_s<Geo.Station(2,j+1)-CBD && initial_s<
(L*Geo.Station(1,j)+Geo.Station(2,j))
mode=1;
else if initial_s>=Geo.Station(2,j+1)-CBD
mode=2;
else if initial_s>(L*Geo.Station(1,j)+Geo.Station(2,j))&& initial_s<Geo.Station(2,j+1)-
CBD
mode=3;
end
end
end
% end mode select
```

ชุดคำสั่งที่ 2 ชุดคำสั่งกำหนดโหมดการทำงานของรถไฟไฟฟ้า

ส่วนประกอบแรกของฟังก์ชันนี้ถูกแสดงในชุดคำสั่งที่ 2 คือการกำหนดโหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของโปรแกรมเนื่องจากการทำงานในแต่ละโหมด จะมีสมการที่ใช้คำนวณแตกต่างกันออกไป โดยในคำสั่งนี้ถ้าหากรถไฟไฟฟ้าทำงานในโหมดเร่งความเร็ว โหมดรถไฟไฟฟ้าจะให้ผลลัพธ์เป็น 1 ถ้าหากรถไฟไฟฟ้าทำงานในโหมดคงค่าความเร็วหรือโหมดชะลอความเร็ว รถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดที่ 2 และ ถ้าหากรถไฟไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรกรถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดที่ 3

```

%% กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

accmax=1.2;
if initial_s<1
    speedlimit=16.667;
else if floor(initial_s)>=1; %% initial Determination
    Fc=Geo.Curve(1,floor(initial_s));
    Fg=Geo.Gradient(1,round(initial_s));
    speedlimit=Geo.Speedlimit(1,round(initial_s));
end %% End initial Determination
end
if initial_v<1
    Fr=3.553;
TEM=TP.TE(1);
BEM=TP.BE(1);
else
    Fr=TP.Roll(floor(initial_v));
    TEM=TP.TE(floor(initial_v));
    BEM=TP.BE(floor(initial_v));
end
%% speedlimit control
if SL< speedlimit
    speedlimit=SL;
else
    speedlimit= speedlimit;
end

```

ชุดคำสั่งที่ 5 ชุดคำสั่งกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

ต่อมาหลังจากกำหนดโหมดการทำงานของรถไฟฟ้าข้อมูลจะถูกส่งมายังชุดคำสั่งที่ 5 เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น โดยและตรวจสอบตำแหน่งของรถไฟฟ้าเพื่อเลือกค่าแรงกดลากวิกฤต และแรงเบรกวิกฤต แรงต้านการเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ และความเร็วสูงสุด

```

%% เลือกรูปแบบการทำงานของโหมดแทรกชั้น
if mode ==1
%% เร่งความเร็ว
if initial_v<speedlimit
%Calculate Speed position
%acceleration phase
final_v=initial_v+accmax*(t2-t1);
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+((0.5)*accmax*((t2-t1)^2)));
Ft=(TP.Masseff*accmax)+Fc+abs(Fg)+Fr;

mode=111;
if Ft>TEM
new_te=TEM-Fc-abs(Fg)-Fr;
acc=new_te/TP.Masseff;
%acc= (Ft-TEM)/TP.Masseff;
Ft=(TP.Masseff*acc)+Fc+abs(Fg)+Fr;
final_v=initial_v+acc*(t2-t1);
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+((0.5)*acc*((t2-t1)^2)));
%Ft=TEM;
mode=120;
end

```

ชุดคำสั่งที่ 6 ชุดคำสั่งคำนวณค่าในโหมดเร่งความเร็ว

ชุดคำสั่งที่ 6 ทำงานเมื่อโหมดมีค่ามากกว่า 0 ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการทำงานของโปรแกรม เมื่อโหมดมีค่าเป็น 1 กล่าวคือเป็นการจำลองรถไฟฟ้าในโหมดเร่งความเร็ว โดยการทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีได้แก่ กรณีที่แรงครูดลากของรถไฟฟ้าไม่เกิดแรงบิดวิกฤต ในกรณีนี้สามารถใช้อัตราเร่งสูงสุดได้เลยและคำนวณความเร็ว แรงบิด ตำแหน่งของรถไฟฟ้าได้เลย แต่ถ้าหากแรงบิดของรถไฟฟ้าเกินกว่าแรงบิดวิกฤต ในกรณีนี้จำเป็นต้องคำนวณหาอัตราเร่งที่เหมาะสมใหม่ ก่อนที่จะ

คำนวณหาอัตราเร่ง ความเร็วและตำแหน่งของรถไฟฟ้าได้ โดยการกำหนดค่าโหมดของการทำงานให้มีค่าแตกต่างกันเพื่อใช้เช็คการทำงานของโปรแกรมว่าทำงานในส่วนไหน

```

else if round(initial_v) == round(speedlimit) %% โหมดคงค่าความเร็ว
final_v=initial_v;
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1)));
Ft=Fc+abs(Fg)+Fr;
mode=150;
acc=0;
else if initial_v > speedlimit %% โหมดลดความเร็ว
acc=(speedlimit-initial_v)/100;
final_v=initial_v+acc*(t2-t1);
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+abs((0.5)*acc*((t2-t1)^2)));
Ft=(TP.Masseff*acc)+Fc+abs(Fg)+Fr;
mode=112;
    if Ft<BEM
acc=(Ft-BEM)/TP.Masseff;
Ft=(TP.Masseff*acc)+Fc+abs(Fg)+Fr;
final_v=initial_v+acc*(t2-t1);
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+abs((0.5)*acc*((t2-t1)^2)));
mode=113;
    end
    end
    end
end
end

```

ชุดคำสั่งที่ 7 ชุดคำสั่งคำนวณค่าในโหมดคงค่าความเร็ว

ในชุดคำสั่งที่ 7 ใช้กำหนดในการคงค่าความเร็วของรถไฟฟ้าจะทำงานเมื่อ โหมดมีค่าเป็น 2 คือเป็นการจำลองรถไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ในโหมดคงค่าความเร็ว และโหมดชะลอความเร็ว โดยใน โหมดคงค่าความเร็วรถไฟฟ้าจะแสดงโหมดการงานด้วยตัวเลข 150 และ โหมดชะลอความเร็วจะแสดงโหมดในตัวเลข 113 ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางข้างบน

```

if mode ==2 %% braking mode
    if b==0
        bcc=-(initial_v^2)/(CBD*2);
        b=1;
    end
    final_v=initial_v+(bcc*(t2-t1));
    final_s=initial_s+abs((initial_v*(t2-t1))+((0.5)*bcc*((t2-t1)^2)));
    Ft=(TP.Masseff*bcc)+Fc+abs(Fg)+Fr;
    % if Ft>BEM
    % new_be=BEM+Fc+abs(Fg)+Fr;
    % bcc=new_be/TP.Masseff;
    % %bcc= (Ft+BEM)/TP.Masseff;
    % Ft=(TP.Masseff*bcc)+Fc+abs(Fg)+Fr;
    % final_v=initial_v+bcc*(t2-t1);
    % final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+((0.5)*bcc*((t2-t1)^2)));
    % Ft=BEM;
    mode=300;

%end
end

```

ชุดคำสั่งที่ 8 ชุดคำสั่งคำนวณค่าในโหมดเบรก

ชุดคำสั่งที่ 8 ทำงานเมื่อเมื่อรถไฟไฟฟ้ามีระยะทางห่างจากสถานีต่ำกว่า 250 เมตร รถไฟฟ้าจะเข้าสู่โหมดเบรก กล่าวคือรถไฟไฟฟ้าจะลดความเร็วด้วยอัตราเร่งที่คงที่ที่ไม่ทำให้แรงเบรกที่รถไฟไฟฟ้าสร้างขึ้นสูงเกินไปแรงเบรกวิกฤต ดังนั้นคำสั่งที่ใช้ในส่วนนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แต่เนื่องจากการเบรกในกรณีที่เกิดขึ้นไม่ทำให้เกิดแรงเบรกที่สูงเกินไปแรงเบรกวิกฤต ดังนั้นชุดคำสั่งคำนวณแรงเบรกใหม่จึงไม่ถูกนำมาใช้งาน

```

if mode==3
if Fg>0
Ft=-(Fc+abs(Fg)+Fr);
acc=Ft/TP.Masseff;
final_v=initial_v+acc*(t2-t1);
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+abs((0.5)*acc*((t2-t1)^2)));
mode=333;
else
Ft=-(Fc-abs(Fg)+Fr);
acc=Ft/TP.Masseff;
final_v=initial_v+acc*(t2-t1);
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1))+abs((0.5)*acc*((t2-t1)^2)));
Ft=0;
mode=333;
end
end
end

```

ชุดคำสั่งที่ 9 ชุดคำสั่งคำนวณค่าในโหมดชะลอความเร็ว

ชุดคำสั่งที่ 9 เป็นชุดคำสั่งที่ออกแบบมาเพื่อให้รถไฟไฟฟ้าทำงานในคงค่าชะลอความเร็ว แต่โหมดนี้จะใช้งานได้เมื่อทราบตำแหน่งที่รถไฟไฟฟ้าทำงานในโหมดชะลอความเร็วซึ่งสามารถกำหนดขึ้นมาเองก็ได้หรือว่าจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการหาตำแหน่งชะลอความเร็วก็สามารถทำได้

เช่นกัน ในส่วนนี้ผลการจำลองแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าจะมีค่าติดลบเนื่องจากช่วงนี้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย

```

result(1,fha)=initial_v;
result(2,fha)=initial_s;
result(3,fha)=Ft;
result(4,fha)=accmax;
result(5,fha)=speedlimit;
result(6,fha)=effort;
result(8,fha)=Fg;
result(7,fha)=mode;

%%update parameter

```

ชุดคำสั่งที่ 10 ชุดคำสั่งอัปเดตค่าพารามิเตอร์

ชุดคำสั่งที่ 10 เป็นส่วนสุดท้ายของโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าซึ่งเป็นการอัปเดตและเก็บค่าจากการคำนวณต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณรอบต่อไป

ข.2 พลังงานกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

ในส่วนต่อไปนำเสนอโปรแกรมคำนวณกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันของสถานีไฟฟ้าย่อย แรงดันที่วางวิ่ง หรือประเมินการบริโภคพลังงานของรถไฟฟ้า คำสั่งในส่วนนี้ถูกใช้ในการเก็บค่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากการทำงานในโหมดขับเคลื่อนและการทำงานในโหมดเบรก ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 พลังงานก็ได้แก่ พลังงานเก็บพลังงานรวมและพลังงานกำลังไฟฟ้า

```

function info=Energycal_HB1(k_HB,TP,eff)
fha=1;
for i=1:k_HB
    power=TP.Speed_HB1(1,i)*TP.Speed_HB1(3,i);
    if power>0
        TractionPower(i)=power/eff;

```

```
    RegenPower(i)=0;
  else
    RegenPower(i)=power*eff;
    TractionPower(i)=0;
  end
end
for a=1:35
  for i=1:k_HB
    if TP.Speed_HB1(10,i)==999

      NUM(a,1)=i;
      TP.Speed_HB1(10,i)=0;
      break
    else
      NUM(a,2)=i;
    end
  end
end
end
info=[Regen/36000
];
```

ชุดคำสั่งที่ 11 คำสั่งคำนวณพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรก

ชุดคำสั่งที่ 11 ใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรกของรถไฟฟ้า ซึ่งถูกใช้ร่วมกับฟังก์ชันการประเมินขนาด การคายประจุ การอัดประจุและการประเมินสถานะของอุปกรณ์เก็บพลังงาน

```
function info=Powercal_HB(k_HB,TP)
a=1;

for i=1:k_HB
MW(a,i)=TP.Speed_HB1(3,i)*TP.Speed_HB1(1,i);
if MW(a,i) >0
    MW(a,i) =MW(1,i);
else
    MW(a,i)=0;
end
end
info=MW;
```

ชุดคำสั่งที่ 12 คำสั่งคำนวณพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหมดขับเคลื่อน

ชุดคำสั่งที่ 12 ใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากโหมดขับเคลื่อน เพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันของรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยและแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่ง เป็นต้น

```
function GGGG=Energycal(k,TP,eff)
```

```

energycon=zeros(2,k);
netenegy=zeros(1,1);
totalenergycon=zeros(2,2);
for i=1:k
if TP.Speed_BH(8,i) == 111 ||TP.Speed_BH(8,i) == 112 ||TP.Speed_BH(8,i) == 113
||TP.Speed_BH(8,i) == 120 ||TP.Speed_BH(8,i) == 150
    energycon(1,i)=abs(TP.Speed_BH(3,i)*TP.Speed_BH(1,i));
    energycon(1,i) =(energycon(1,i)+190)*0.1*eff;
    energycon(2,i) =0;
    netenegy(1,1)=0;
else if TP.Speed_BH(8,i) >= 333 || TP.Speed_BH(8,i) <= 0
    energycon(2,i) =0;
else if TP.Speed_BH(8,i) == 300
    energycon(2,i)=TP.Speed_BH(3,i)*TP.Speed_BH(1,i);
    energycon(2,i)=(energycon(2,i)+190)*0.1/eff;
end
end
totalenergycon(1,1)=sum(energycon(1,:))/3600;
totalenergycon(2,1)=sum(energycon(2,:))/3600;
netenegy(1,1)=totalenergycon(1,1)+totalenergycon(2,1);
GGGG=[netenegy
    totalenergycon(1,1)
    totalenergycon(2,1)
];

```

ชุดคำสั่งที่ 13 คำสั่งคำนวณพลังงานสุทธิ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน และพลังงานที่ได้
กลับคืนจากการเบรก

ชุดคำสั่งที่ 13 เป็นชุดคำสั่งคำนวณพลังงานไฟฟ้าทุกรูปแบบที่ใช้ในระบบรถไฟฟ้า ซึ่งถูก
ใช้คำนวณพลังงานที่ใช้ในการวิ่งในโหมดต่างๆ หรือการปรับน้ำหนักรถไฟฟ้า

```

function Timetable=Timgenerate(multi,k_BH,x)
kk=length(multi.Dis(1,:));
a=1;

for i=a:kk %% HEADWAY 2.19 MIN

    if i<=2100
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable4(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable6(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable8(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable10(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable12(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=0;
Tim.Timetable5(1,a)=0;
Tim.Timetable7(1,a)=0;
Tim.Timetable9(1,a)=0;
Tim.Timetable11(1,a)=0;
Tim.Timetable13(1,a)=0;
Tim.Timetable15(1,a)=0;
Tim.Timetable17(1,a)=0;
a=a+1;

    else if i>2100 && i<=4200
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);

```

Tim.Timetable4(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable6(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable8(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable10(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable12(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
 Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
 Tim.Timetable5(1,a)=0;
 Tim.Timetable7(1,a)=0;
 Tim.Timetable9(1,a)=0;
 Tim.Timetable11(1,a)=0;
 Tim.Timetable13(1,a)=0;
 Tim.Timetable15(1,a)=0;
 Tim.Timetable17(1,a)=0;

a=a+1;

else if i>4200 && i<=6300

Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
 Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
 Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
 Tim.Timetable6(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable8(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable10(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable12(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
 Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);


```

Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=0;
Tim.Timetable9(1,a)=0;
Tim.Timetable11(1,a)=0;
Tim.Timetable13(1,a)=0;
Tim.Timetable15(1,a)=0;
Tim.Timetable17(1,a)=0;
a=a+1;
else if i>6300 && i<=8400
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable10(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable12(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=0;
Tim.Timetable11(1,a)=0;
Tim.Timetable13(1,a)=0;
Tim.Timetable15(1,a)=0;
Tim.Timetable17(1,a)=0;

```

```

a=a+1;
else if i>8400 && i<=10500
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
Tim.Timetable10(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable12(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
Tim.Timetable11(1,a)=0;
Tim.Timetable13(1,a)=0;
Tim.Timetable15(1,a)=0;
Tim.Timetable17(1,a)=0;
a=a+1;
else if i>10500 && i<=12600
Tim.Timetable(1,i)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
Tim.Timetable10(1,a)=multi.Dis(12,i-10500-x);
Tim.Timetable12(1,a)=19756.9944860313;

```

```

Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
Tim.Timetable11(1,a)=multi.Dis(11,i-10500-x);
Tim.Timetable13(1,a)=0;
Tim.Timetable15(1,a)=0;
Tim.Timetable17(1,a)=0;
a=a+1;
else if i>12600 && i<=14700
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
Tim.Timetable10(1,a)=multi.Dis(12,i-10500-x);
Tim.Timetable12(1,a)=multi.Dis(14,i-12600-x);
Tim.Timetable14(1,a)=19756.9944860313;
Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
Tim.Timetable11(1,a)=multi.Dis(11,i-10500-x);

```

```
Tim.Timetable13(1,a)=multi.Dis(13,i-12600-x);
```

```
Tim.Timetable15(1,a)=0;
```

```
Tim.Timetable17(1,a)=0;
```

```
a=a+1;
```

```
else if i>14700 && i<=16800
```

```
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
```

```
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
```

```
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
```

```
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
```

```
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
```

```
Tim.Timetable10(1,a)=multi.Dis(12,i-10500-x);
```

```
Tim.Timetable12(1,a)=multi.Dis(14,i-12600-x);
```

```
Tim.Timetable14(1,a)=multi.Dis(16,i-14700-x);
```

```
Tim.Timetable16(1,a)=19756.9944860313;
```

```
Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
```

```
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
```

```
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
```

```
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
```

```
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
```

```
Tim.Timetable11(1,a)=multi.Dis(11,i-10500-x);
```

```
Tim.Timetable13(1,a)=multi.Dis(13,i-12600-x);
```

```
Tim.Timetable15(1,a)=multi.Dis(15,i-14700-x);
```

```
Tim.Timetable17(1,a)=0;
```

```
a=a+1;
```

```
else if i>16800 && i<=17010
```

```

Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
Tim.Timetable10(1,a)=multi.Dis(12,i-10500-x);
Tim.Timetable12(1,a)=multi.Dis(14,i-12600-x);
Tim.Timetable14(1,a)=multi.Dis(16,i-14700-x);
Tim.Timetable16(1,a)=multi.Dis(18,i-16800-x);

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
Tim.Timetable11(1,a)=multi.Dis(11,i-10500-x);
Tim.Timetable13(1,a)=multi.Dis(13,i-12600-x);
Tim.Timetable15(1,a)=multi.Dis(15,i-14700-x);
Tim.Timetable17(1,a)=multi.Dis(17,i-16800-x);
a=a+1;
else if i>17010 && i<=18000
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
Tim.Timetable10(1,a)=multi.Dis(12,i-10500-x);
Tim.Timetable12(1,a)=multi.Dis(14,i-12600-x);
Tim.Timetable14(1,a)=multi.Dis(16,i-14700-x);
Tim.Timetable16(1,a)=multi.Dis(18,i-16800-x);

```

```

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
Tim.Timetable11(1,a)=multi.Dis(11,i-10500-x);
Tim.Timetable13(1,a)=multi.Dis(13,i-12600-x);
Tim.Timetable15(1,a)=multi.Dis(15,i-14700-x);
Tim.Timetable17(1,a)=multi.Dis(17,i-16800-x);
a=a+1;
else if i>18000 && i<k_BH
Tim.Timetable(1,a)=multi.Dis(2,i);
Tim.Timetable2(1,a)=multi.Dis(4,i-2100-x);
Tim.Timetable4(1,a)=multi.Dis(6,i-4200-x);
Tim.Timetable6(1,a)=multi.Dis(8,i-6300-x);
Tim.Timetable8(1,a)=multi.Dis(10,i-8400-x);
Tim.Timetable10(1,a)=multi.Dis(12,i-10500-x);
Tim.Timetable12(1,a)=multi.Dis(14,i-12600-x);
Tim.Timetable14(1,a)=multi.Dis(16,i-14700-x);
Tim.Timetable16(1,a)=multi.Dis(18,i-16800-x);

Tim.Timetable1(1,a)=multi.Dis(1,i);
Tim.Timetable3(1,a)=multi.Dis(3,i-2100-x);
Tim.Timetable5(1,a)=multi.Dis(5,i-4200-x);
Tim.Timetable7(1,a)=multi.Dis(7,i-6300-x);
Tim.Timetable9(1,a)=multi.Dis(9,i-8400-x);
Tim.Timetable11(1,a)=multi.Dis(11,i-10500-x);
Tim.Timetable13(1,a)=multi.Dis(13,i-12600-x);
Tim.Timetable15(1,a)=multi.Dis(15,i-14700-x);

```

```
Tim.Timetable17(1,a)=multi.Dis(17,i-16800-x);
```

```
a=a+1;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
Timetable=Tim;
```

ชุดคำสั่งที่ 14 คำสั่งคำนวณพลังงานสุทธิ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน และพลังงานที่ได้
กลับคืนจากการเบรก

ชุดคำสั่งที่ 14 ใช้ในการสร้างตารางเวลาและเก็บค่ากำลังไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาต่างๆ หลังจาก
รถไฟฟ้าคำนวณข้อมูลทางพลวัตน์และประเมินกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอน
ต่อไปในการคำนวณการเดินรถไฟฟ้าแบบหลายขบวนคือการสร้างตารางเดินรถไฟฟ้าและเก็บ
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรถไฟฟ้า

```
Timetable=TimgenerateOptimal(multi,K_SC_HB,x);
```

```
Powercontable=PowertablegenerateOptimal(multi,K_SC_HB);
```

```
p=Powercon(Powercontable,Geo);
```

```
s=stationmark(Timetable,Geo);
```

```
for j=1:18
```

```

for i=1:length(s)
    if s(j,i)>=Geo.Station(8,1)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,1);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,2);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,1)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,2)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,1);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,2);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,2)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,3)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,2);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,4);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,3)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,4)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,2);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,4);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,4)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,5)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,4);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,5);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,5)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,6)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,5);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,7);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,6)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,7)
        Tr1(j,i)=Geo.Station(6,5);
        Tr2(j,i)=Geo.Station(6,7);
        Dis(j,i)=s(j,i);
    else if s(j,i)<Geo.Station(8,7)&& s(j,i)>=Geo.Station(8,8)

```



```

Tr1(j,i)=Geo.Station(6,7);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,9);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,8)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,9)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,7);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,9);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,9)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,10)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,9);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,10);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,10)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,11)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,10);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,12);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,11)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,12)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,10);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,12);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,12)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,13)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,12);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,14);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,13)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,14)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,12);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,14);
Dis(j,i)=s(j,i);
else if s(j,i)<Geo.Station(8,14)&&s(j,i)>=Geo.Station(8,15)
Tr1(j,i)=Geo.Station(6,14);
Tr2(j,i)=Geo.Station(6,15);

```



```

end
end
end
end
end
end
end
Trs=Trsgen(Tr1,Tr2,Geo); %ต้นทาง
Trd=Trdgen(Tr1,Tr2,Geo); %ปลายทาง

```

ชุดคำสั่งที่ 15 ชุดคำสั่งจับภาพโครงข่ายกำลังไฟฟ้า

หลังจากที่สร้างตารางเดินรถพร้อมทั้งเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ข้อมูลจะถูกส่งมายังชุดคำสั่งที่ 15 เพื่อแยกชุดข้อมูลออกมาเป็นชุดๆเช่น ข้อมูลกำลังไฟฟ้า ข้อมูลตำแหน่งของรถไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานของราง

```

bus.Ibase = bus.Pbase/bus.Vbase;
bus.data=[ 1 0 0      750      0.06  10000 0 0.01  % Hua
           2 0 1495/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Samyan
           3 0 3300/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Lumpkini
           4 0 4285/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Queen-Sirikit
           5 0 6826/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Sukhumvit
           6 0 9057/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Pharam IX
           7 0 10222/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Thiam Ruam Mit
           8 0 12904/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Sutthisan
           9 0 14875/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Lat Phrao
          10 0 16299/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Phahon Yothin
          11 0 18796/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Kamphaeng Phet
          12 0 19757/1000  750      0.06  10000 0 0.01 % Bang Sue
          13 2 Dis(1,i)/1000  p(1,i)/1000  0  0  p(1,i) 0  % Hua-Bang 1

```

14	2	Dis(2,i)/1000	p(2,i)/1000	0	0	p(2,i) 0	% Hua-Bang 2
15	2	Dis(3,i)/1000	p(3,i)/1000	0	0	p(3,i) 0	% Hua-Bang 3
16	2	Dis(4,i)/1000	p(4,i)/1000	0	0	p(4,i) 0	% Hua-Bang 4
17	2	Dis(5,i)/1000	p(5,i)/1000	0	0	p(5,i) 0	% Hua-Bang 5
18	2	Dis(6,i)/1000	p(6,i)/1000	0	0	p(6,i) 0	% Hua-Bang 6
19	2	Dis(7,i)/1000	p(7,i)/1000	0	0	p(7,i) 0	% Hua-Bang 7
20	2	Dis(8,i)/1000	p(8,i)/1000	0	0	p(8,i) 0	% Hua-Bang 8
21	2	Dis(9,i)/1000	p(9,i)/1000	0	0	p(9,i) 0	% Hua-Bang 9
22	2	Dis(10,i)/1000	p(10,i)/1000	0	0	p(10,i) 0	% Bang-Hua 1
23	2	Dis(11,i)/1000	p(11,i)/1000	0	0	p(11,i) 0	% Bang-Hua 2
24	2	Dis(12,i)/1000	p(12,i)/1000	0	0	p(12,i) 0	% Bang-Hua 3
25	2	Dis(13,i)/1000	p(13,i)/1000	0	0	p(13,i) 0	% Bang-Hua 4
26	2	Dis(14,i)/1000	p(14,i)/1000	0	0	p(14,i) 0	% Bang-Hua 5
27	2	Dis(15,i)/1000	p(15,i)/1000	0	0	p(15,i) 0	% Bang-Hua 6
28	2	Dis(16,i)/1000	p(16,i)/1000	0	0	p(16,i) 0	% Bang-Hua 7

bus.Linedata=[1 Tr1(1,i) 13 abs(Trd(1,i)-Dis(1,i))/1000

2 13 Tr2(1,i) abs(Dis(1,i)-Trs(1,i))/1000

3 Tr1(2,i) 14 abs(Trd(2,i)-Dis(2,i))/1000

4 14 Tr2(2,i) abs(Dis(2,i)-Trs(2,i))/1000

5 Tr1(3,i) 15 abs(Trd(3,i)-Dis(3,i))/1000

6 15 Tr2(3,i) abs(Dis(3,i)-Trs(3,i))/1000

7 Tr1(4,i) 16 abs(Trd(4,i)-Dis(4,i))/1000

8 16 Tr2(4,i) abs(Dis(4,i)-Trs(4,i))/1000

9 Tr1(5,i) 17 abs(Trd(5,i)-Dis(5,i))/1000

10 17 Tr2(5,i) abs(Dis(5,i)-Trs(5,i))/1000

11 Tr1(6,i) 18 abs(Trd(6,i)-Dis(6,i))/1000

12 18 Tr2(6,i) abs(Dis(6,i)-Trs(6,i))/1000

13 Tr1(7,i) 19 abs(Trd(7,i)-Dis(7,i))/1000

14 19 Tr2(7,i) abs(Dis(7,i)-Trs(7,i))/1000

15 Tr1(8,i) 20 abs(Trd(8,i)-Dis(8,i))/1000

```

16 20    Tr2(8,i)  abs(Dis(8,i)-Trs(8,i))/1000
17 Tr1(9,i) 21      abs(Trd(9,i)-Dis(9,i))/1000  %%%% Reference north route 0
18 21     Tr2(9,i)  abs(Dis(9,i)-Trs(9,i))/1000
19 Tr1(10,i) 22      abs(Trd(10,i)-Dis(10,i))/1000
20 22     Tr2(10,i) abs(Dis(10,i)-Trs(10,i))/1000
21 Tr1(11,i) 23      abs(Trd(11,i)-Dis(11,i))/1000
22 23     Tr2(11,i) abs(Dis(11,i)-Trs(11,i))/1000
23 Tr1(12,i) 24      abs(Trd(12,i)-Dis(12,i))/1000
24 24     Tr2(12,i) abs(Dis(12,i)-Trs(12,i))/1000
25 Tr1(13,i) 25      abs(Trd(13,i)-Dis(13,i))/1000
26 25     Tr2(13,i) abs(Dis(13,i)-Trs(13,i))/1000
27 Tr1(14,i) 26      abs(Trd(14,i)-Dis(14,i))/1000
28 26     Tr2(14,i) abs(Dis(14,i)-Trs(14,i))/1000
29 Tr1(15,i) 27      abs(Trd(15,i)-Dis(15,i))/1000
30 27     Tr2(15,i) abs(Dis(15,i)-Trs(15,i))/1000
31 Tr1(16,i) 28      abs(Trd(16,i)-Dis(16,i))/1000
32 28     Tr2(16,i) abs(Dis(16,i)-Trs(16,i))/1000
33 Tr1(17,i) 29      abs(Trd(17,i)-Dis(17,i))/1000
34 29     Tr2(17,i) abs(Dis(17,i)-Trs(17,i))/1000
35 Tr1(18,i) 30      abs(Trd(18,i)-Dis(18,i))/1000  %%%% Reference north
route 19685
36 30     Tr2(18,i) abs(Dis(18,i)-Trs(18,i))/1000];
bus.Linedata(:,5) = x*bus.Rrail;
bus.Linedata(:,6) = x*bus.G_RE/2;
bus.Nbus=size(bus.data,1);
bus.Nline=size(bus.Linedata,1);
bus.Nsub=12;
bus.Vbus=bus.Vbase*ones(bus.Nbus,1);

```

ชุดคำสั่งที่ 16 ชุดคำสั่งสร้างบัสข้อมูล

ชุดคำสั่งที่ 16 ใช้ในการสร้างชุดข้อมูล Busdata และ Linedata เพื่อใช้ในการหาผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าย่อย และแรงดันที่วางรับน้ำหนักของรถไฟฟ้า

```

for z = 1:10000
    bus.Gbus = build_Gbusrp(bus,TP);
    bus.Ibus = build_Ibusrp(bus,TP);
    V0 = linsolve(bus.Gbus,bus.Ibus);
    bus.Verr_max = norm(bus.Vbus-V0,inf)/bus.Vbase;
    bus.Vbus = V0;
    if bus.Verr_max<1
        break
    end
    if z >= 10000
        error('Solution does not');
        pause(10);
    end
end
end

```

ชุดคำสั่งที่ 17 ชุดคำสั่งคำนวณหาผลเฉลยแรงดันด้วยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า

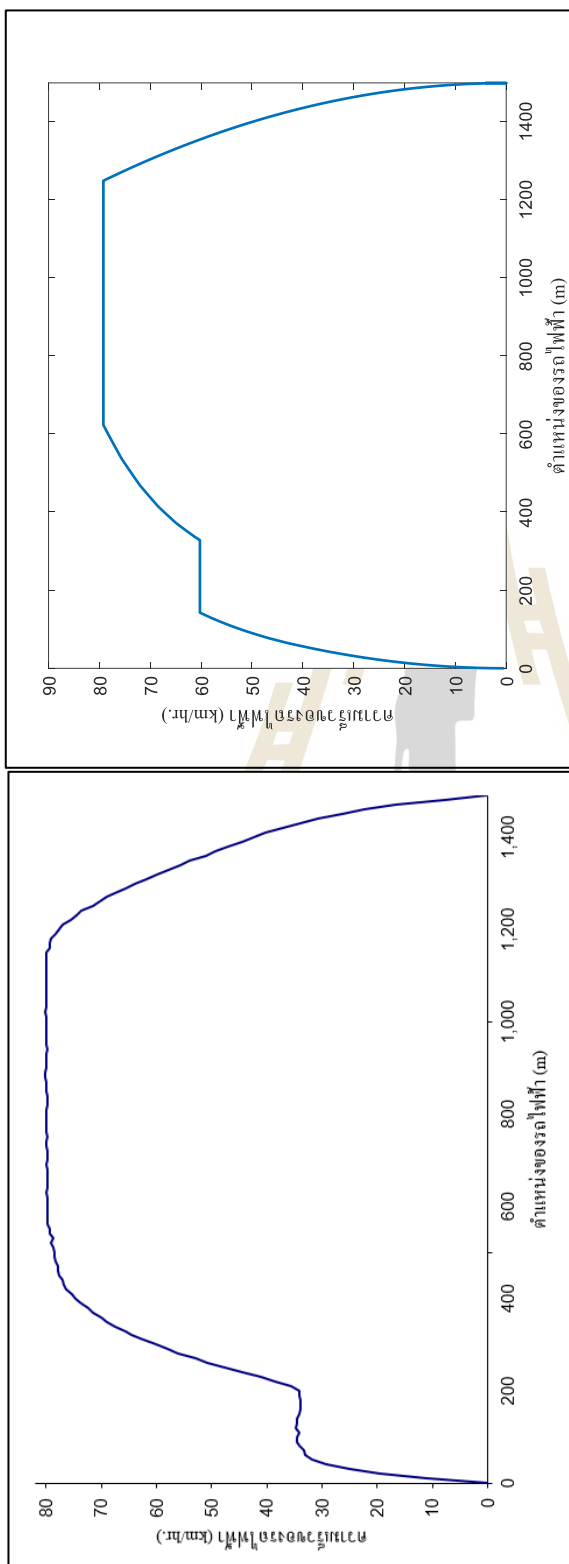
ชุดคำสั่งที่ 17 ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของแรงดันรถไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยการสร้างชุดเมทริกซ์ G และ I จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณผลเฉลยแรงดัน โดยวิธีการฉีดกระแสไฟฟ้า



ภาคผนวก ค

การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อนกับเส้น
โค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

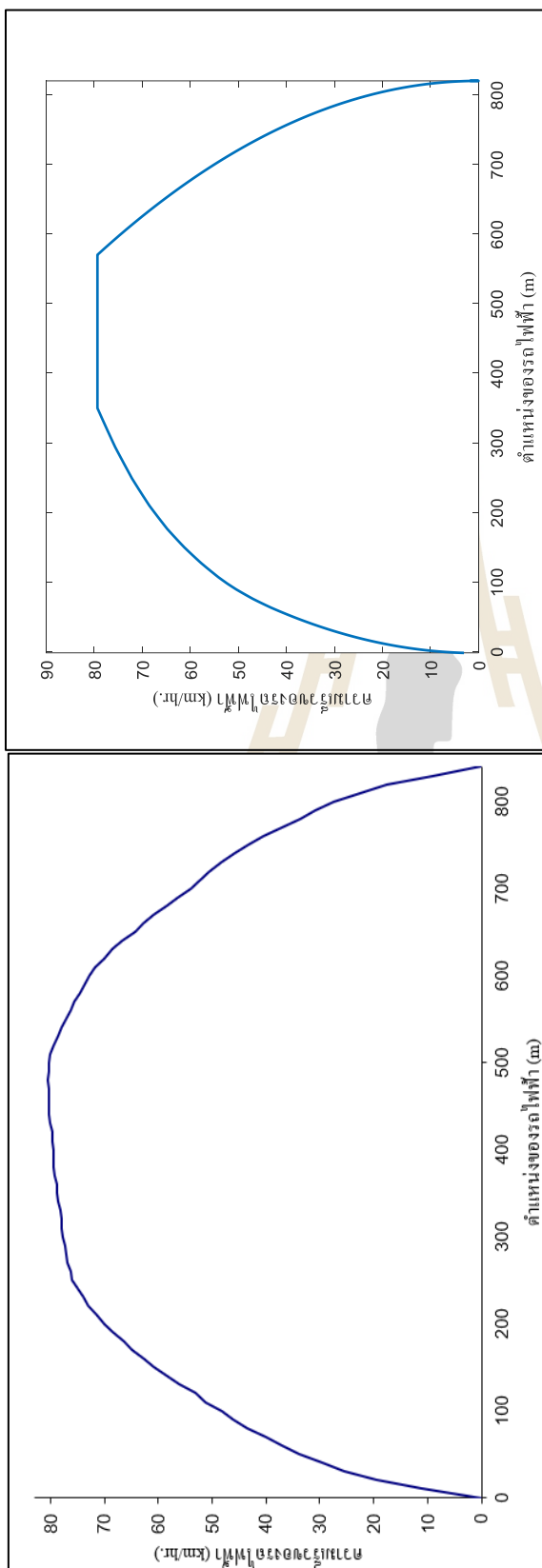
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

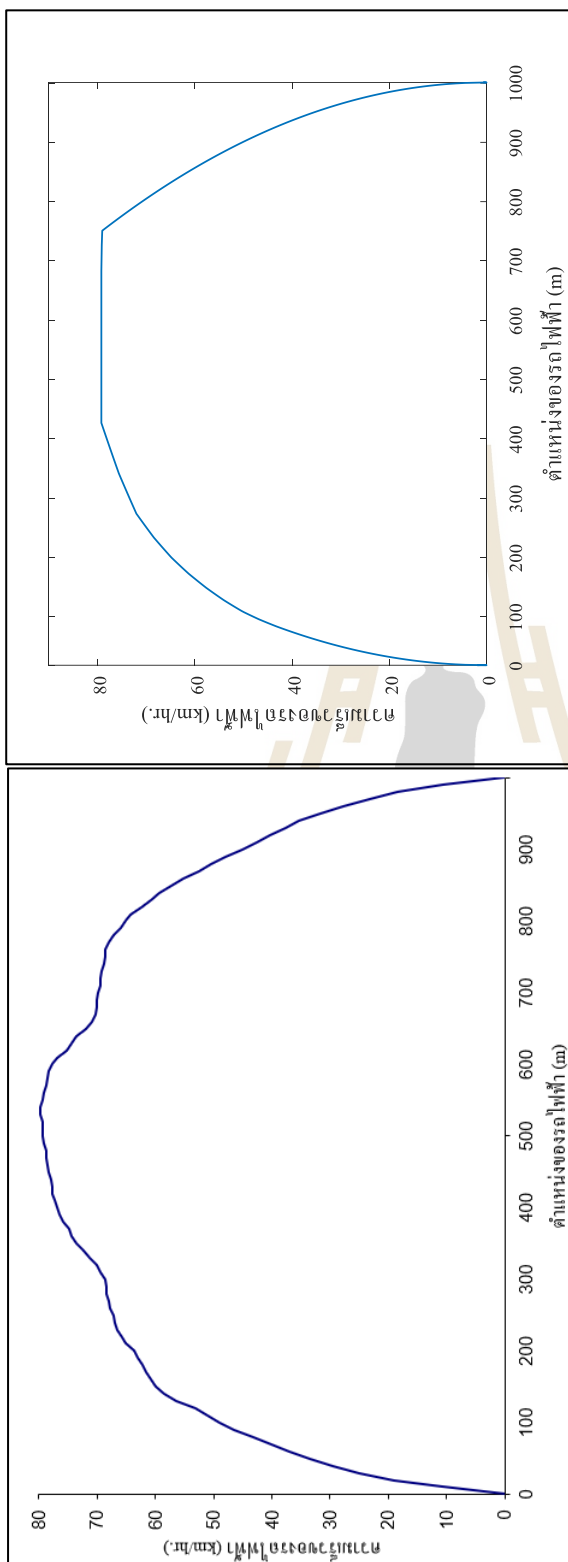
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวลำโพงกับสถานีขนส่งผู้โดยสารสามย่าน



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

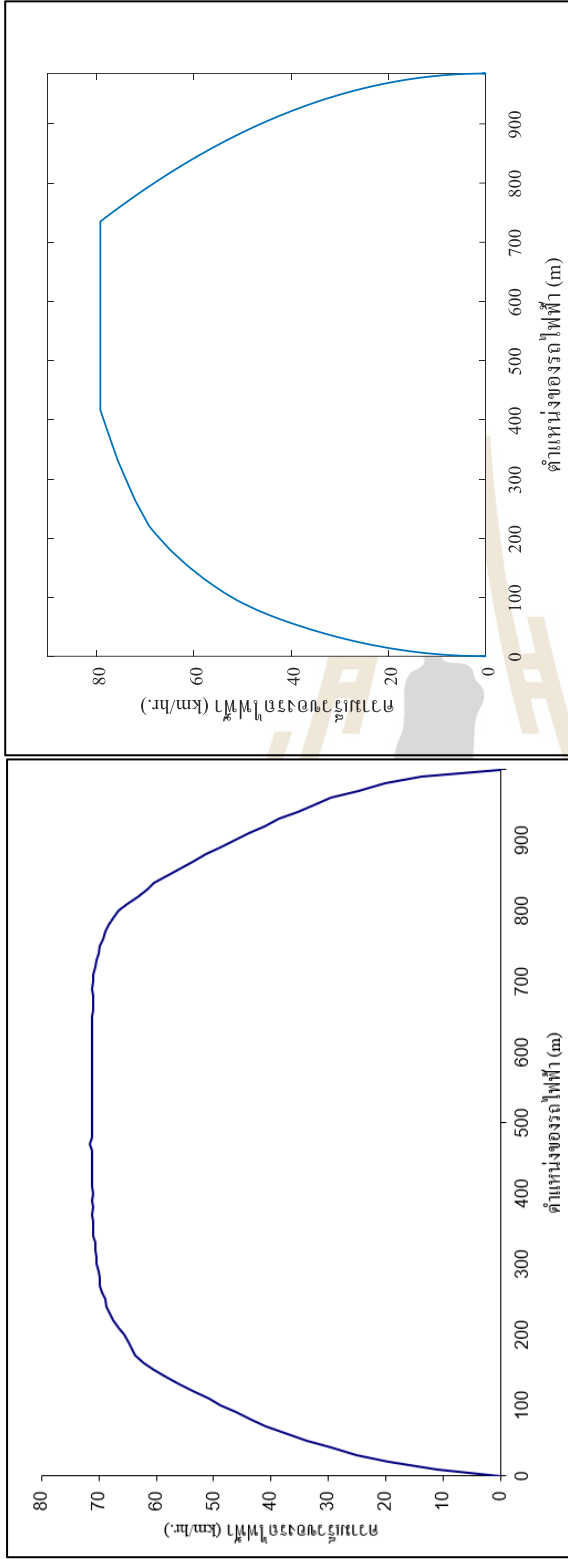
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารสามย่านกับสถานีขนส่งผู้โดยสารสีลม



สายโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการจับเคลื่อน

สายโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

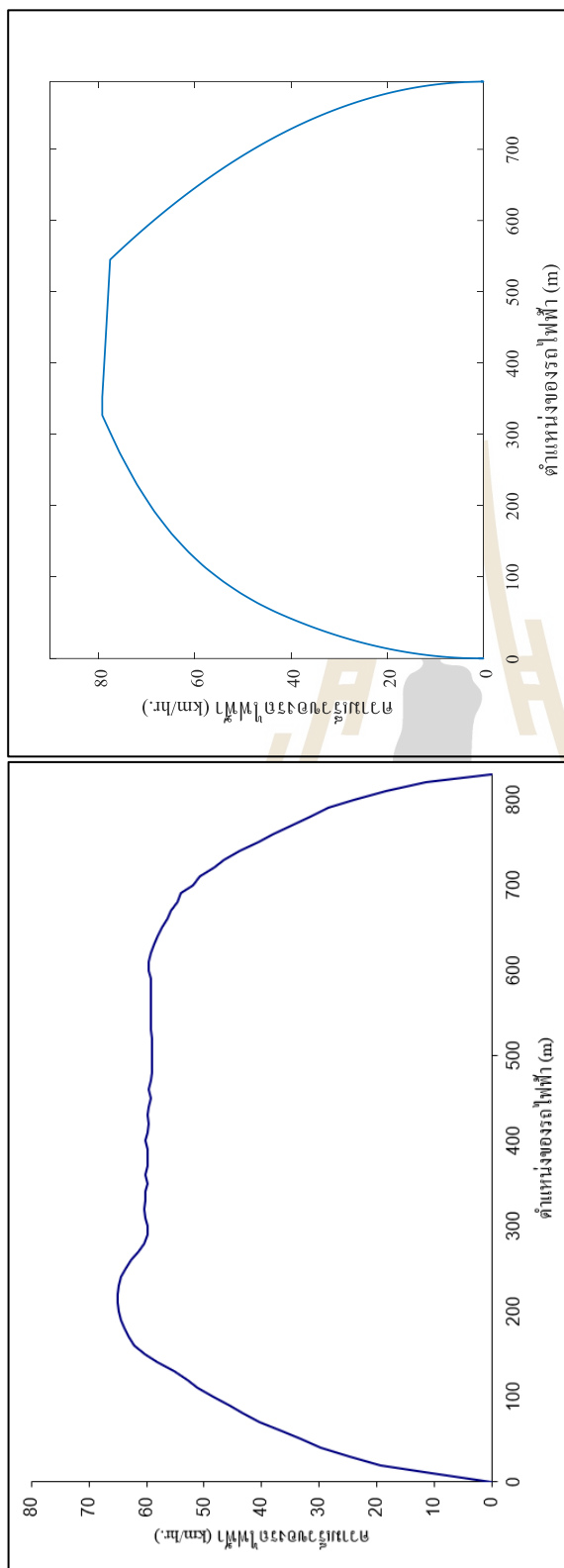
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีจนถึงผู้โดยสารกลุ่มพิณ



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

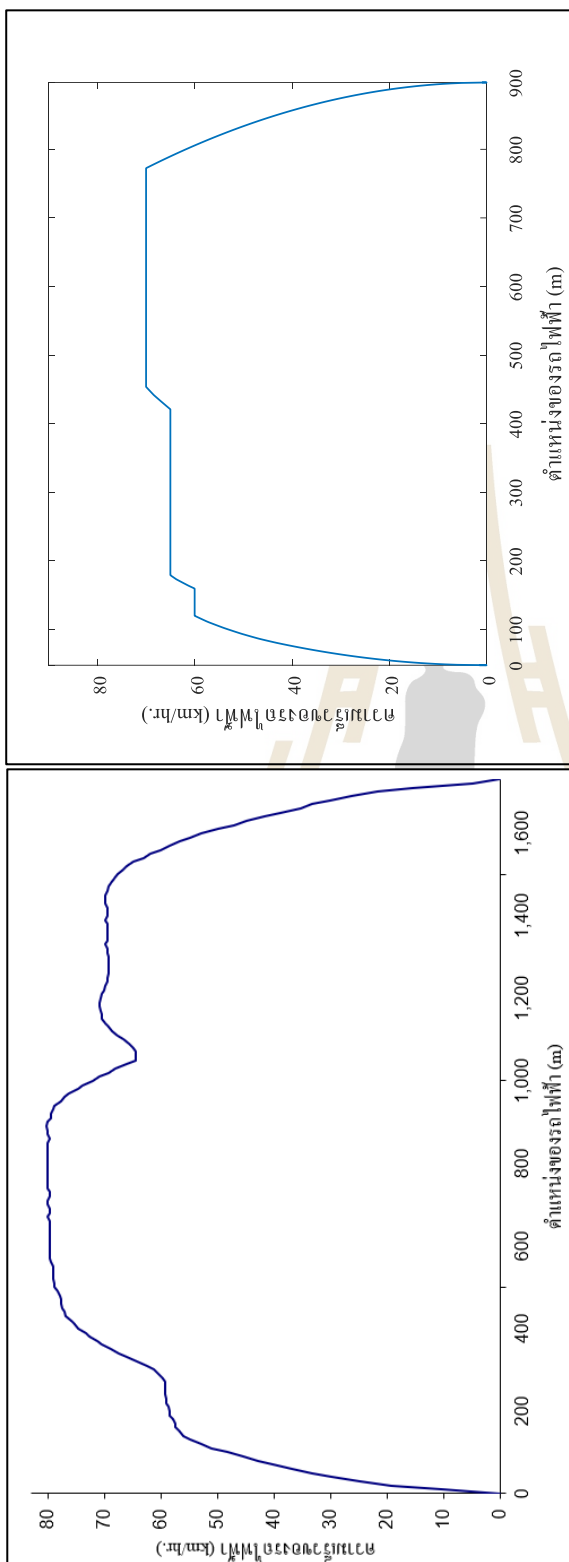
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารลูมพินีกับสถานีขนส่งผู้โดยสารบ่อนไก่



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

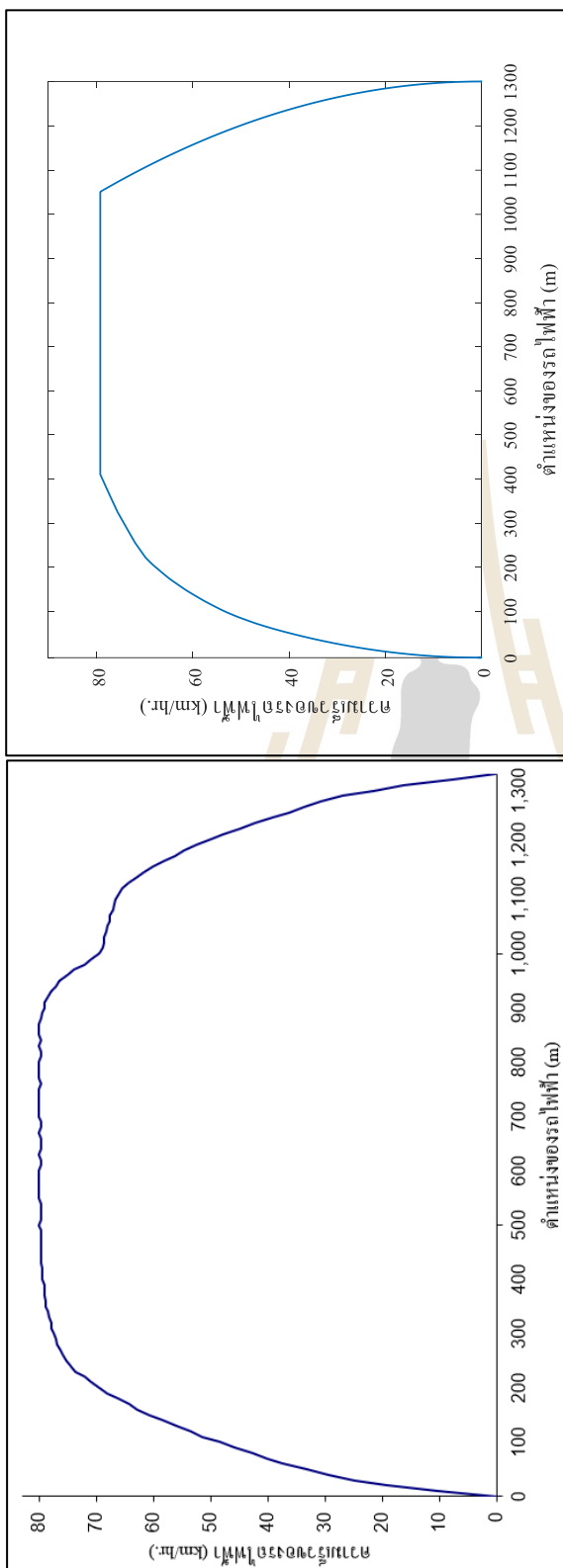
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารบ่อน กับสถานีขนส่งผู้โดยสารศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการจับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

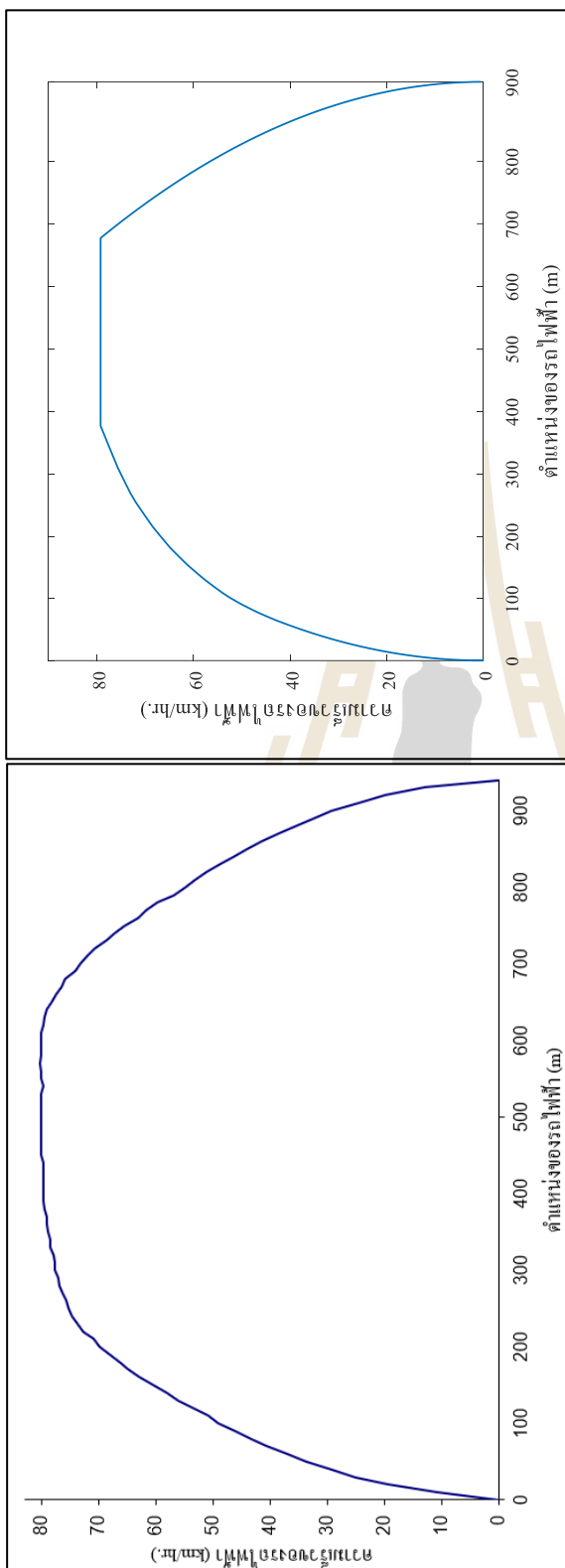
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์กับสถานีขนส่งผู้โดยสารสุภูมิวิทช์



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

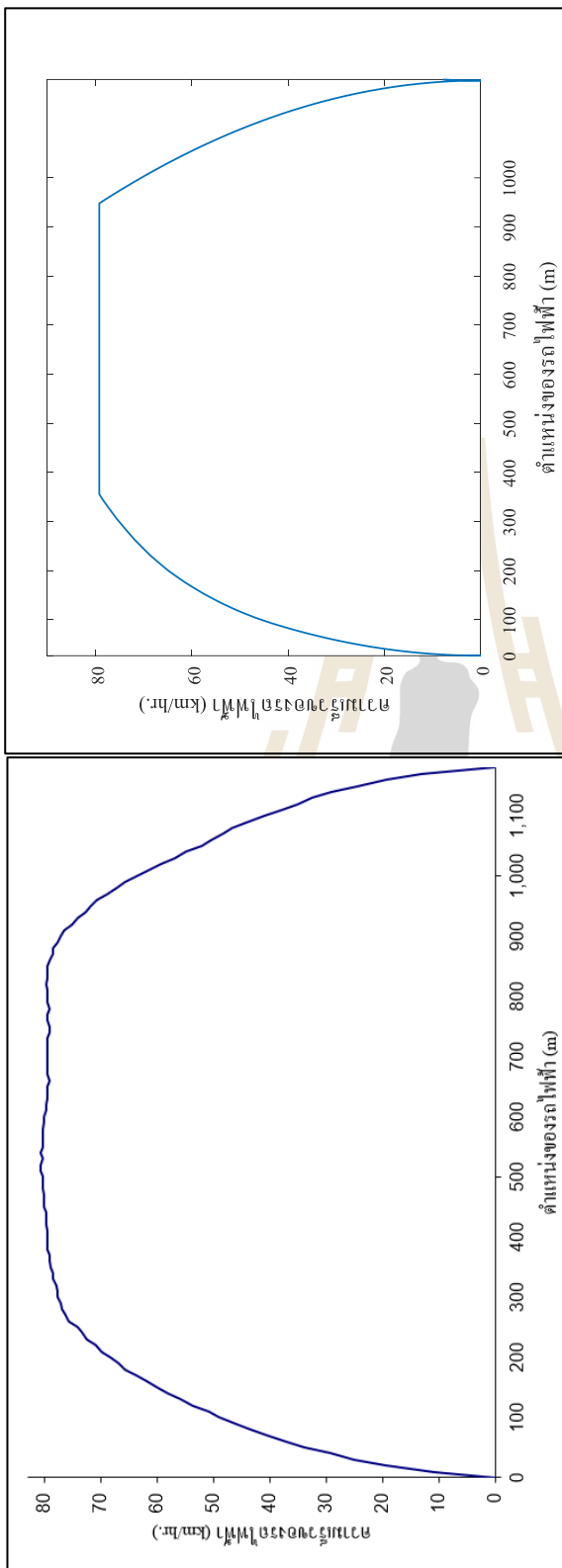
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารสุภูมิวิทยกับสถานีขนส่งผู้โดยสารเพชรบุรี



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

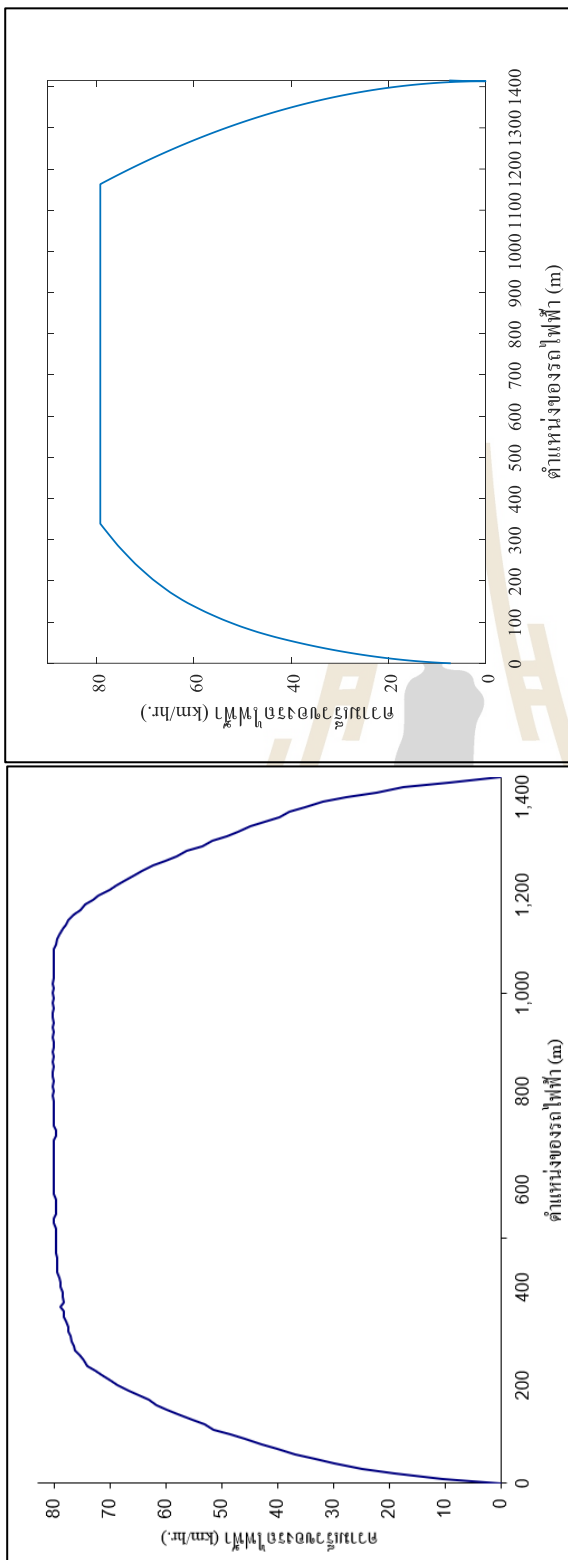
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารเพชรบุรีกับสถานีขนส่งผู้โดยสารพระราม 9



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

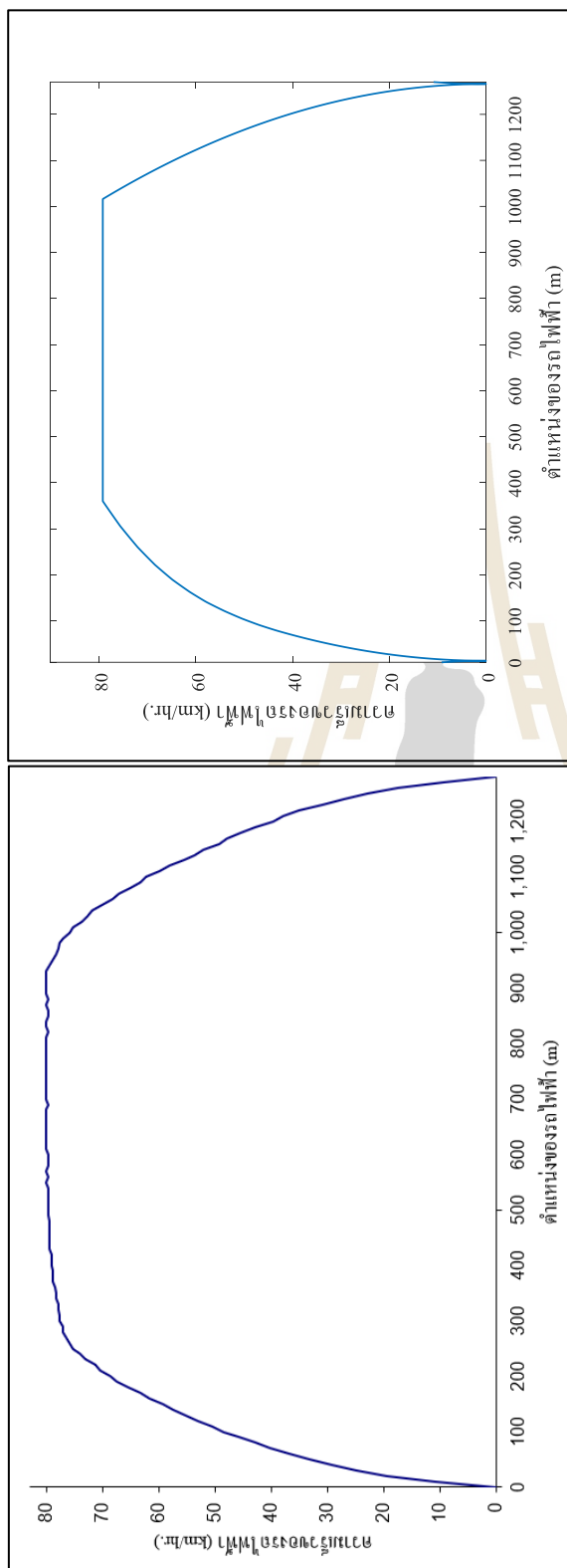
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารพระราม 9 กับสถานีขนส่งผู้โดยสารทีชมรมมิตร



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

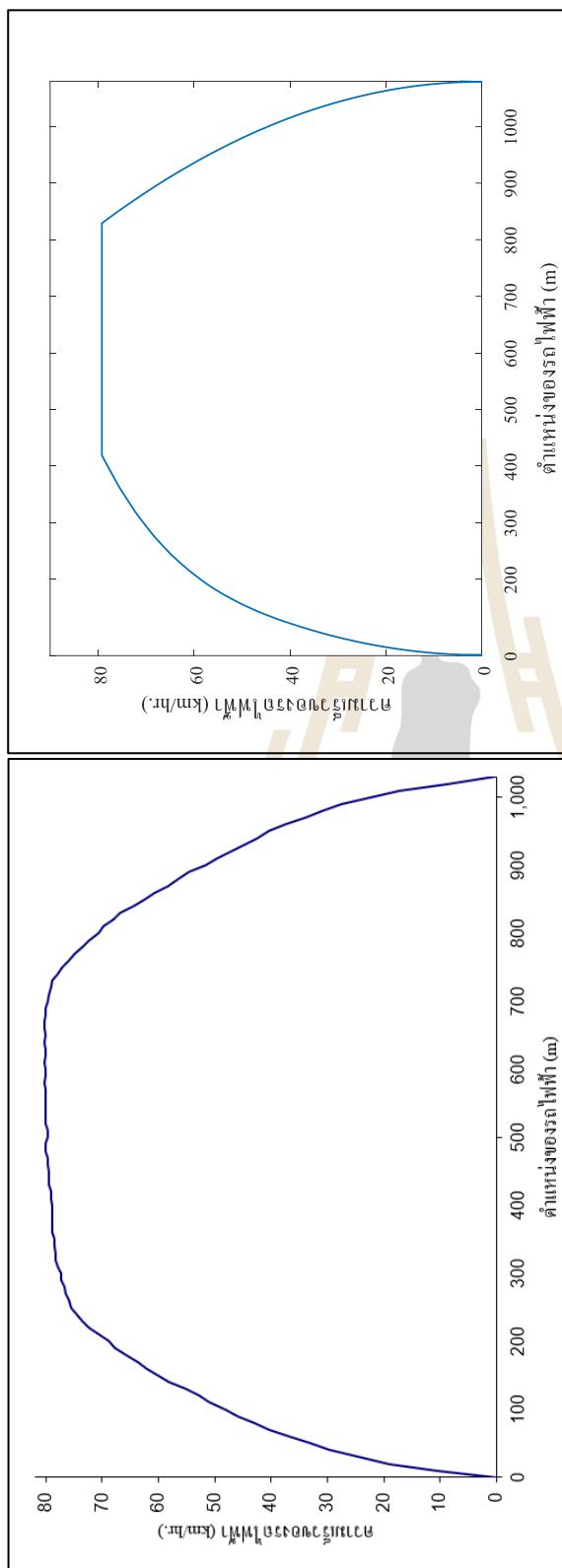
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารที่เชื่อมกับสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวขบวน



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

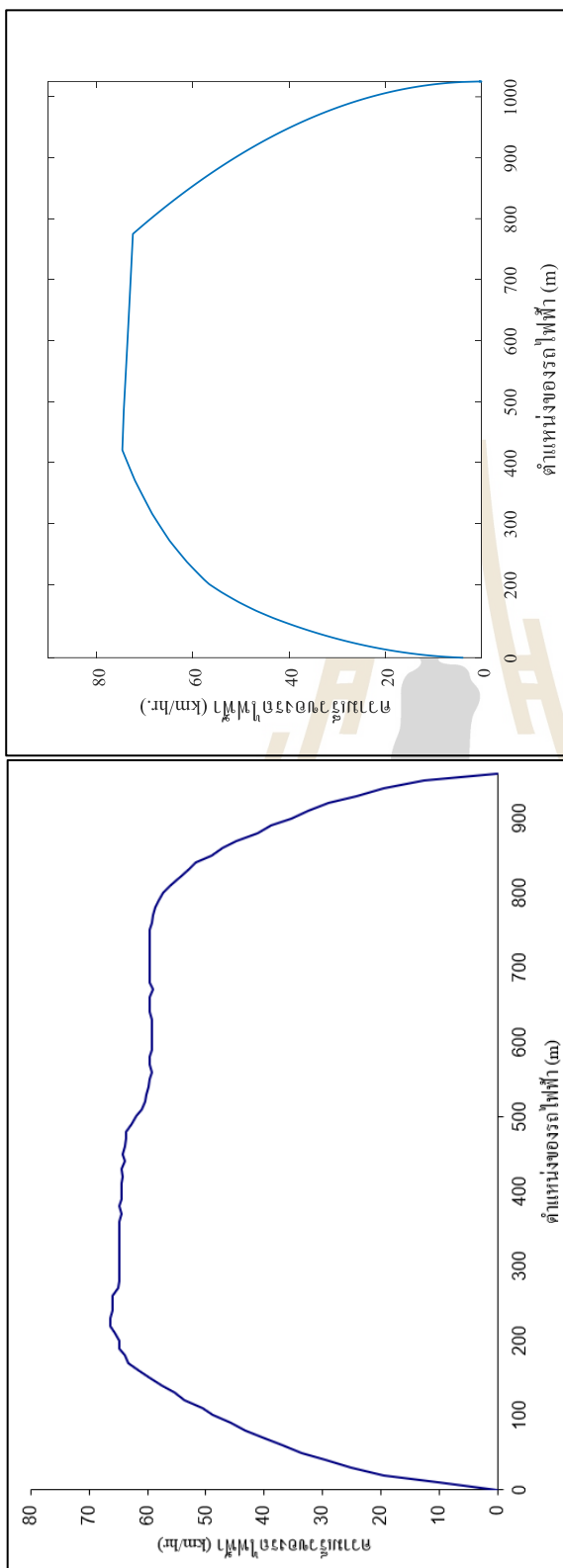
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารหัวขบวนกับสถานีขนส่งผู้โดยสารสุทธาร



ไลน์โค้งความเร็วที่ได้ออกหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

ไลน์โค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

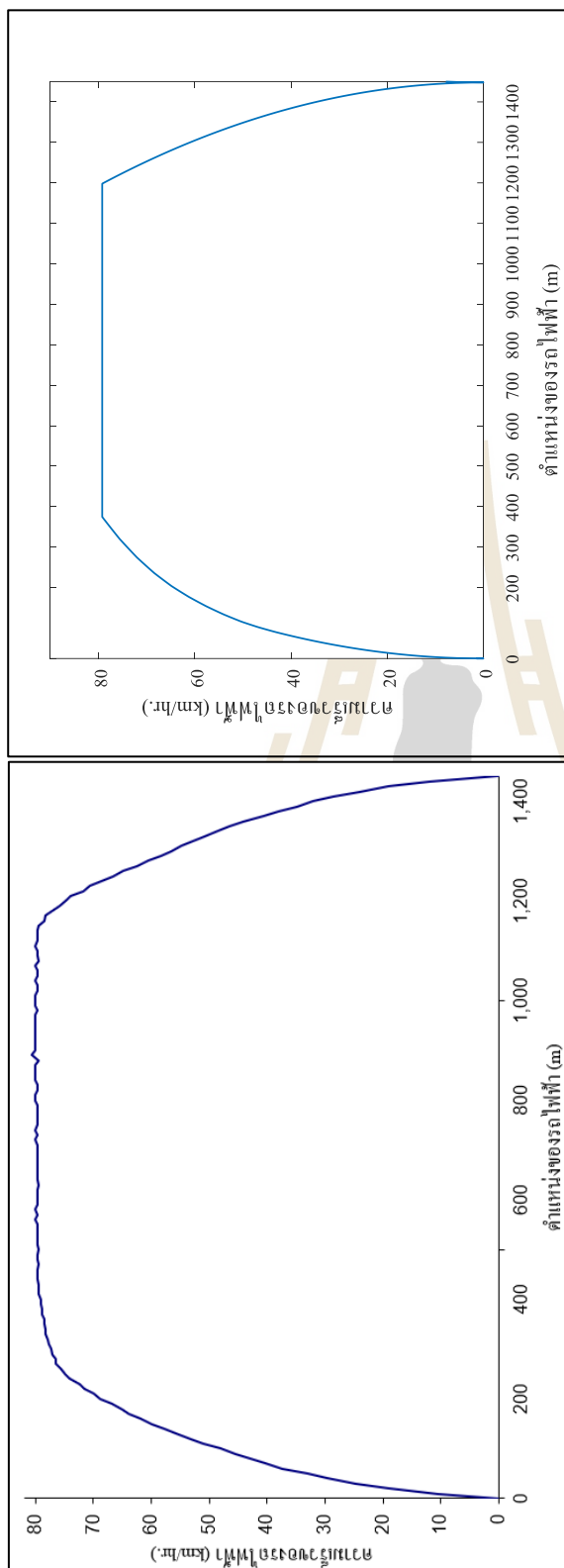
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารสุทธิสารกับสถานีขนส่งผู้โดยสารรังสิตเกษม



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

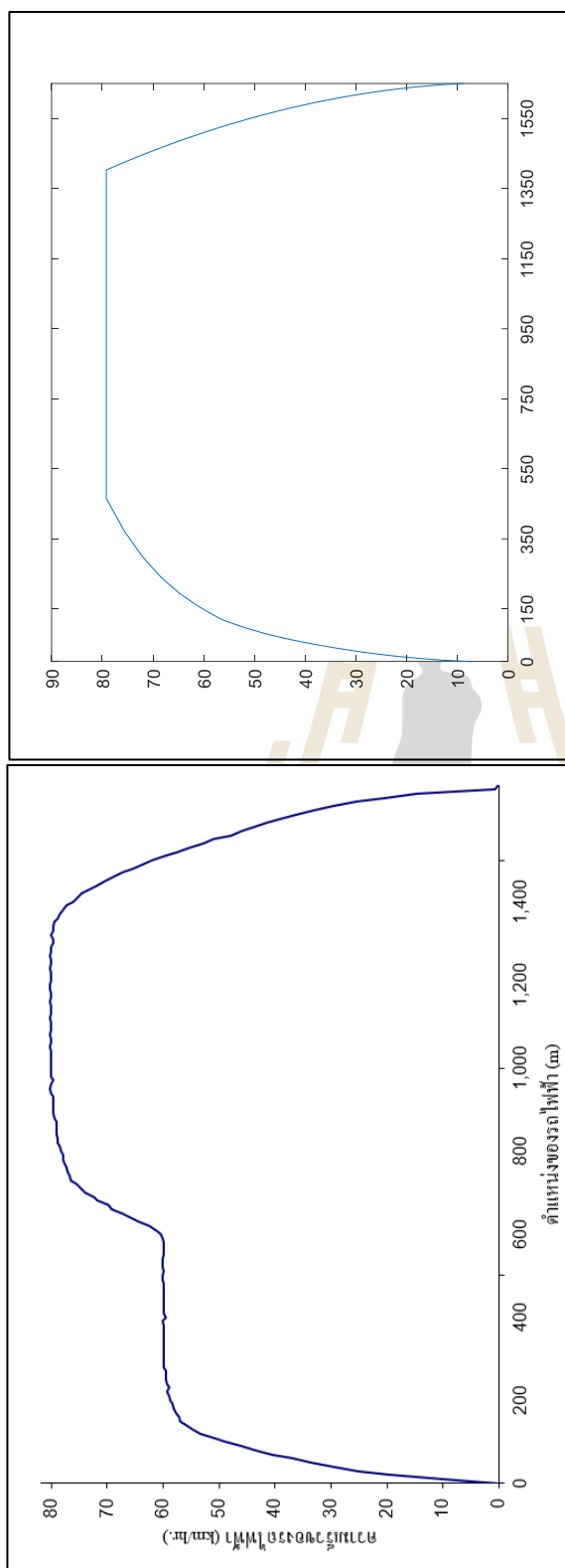
เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารรังสิตกับสถานีขนส่งผู้โดยสารลาดพร้าว



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารลาดพร้าวกับสถานีขนส่งผู้โดยสารท่าพลโยธิน

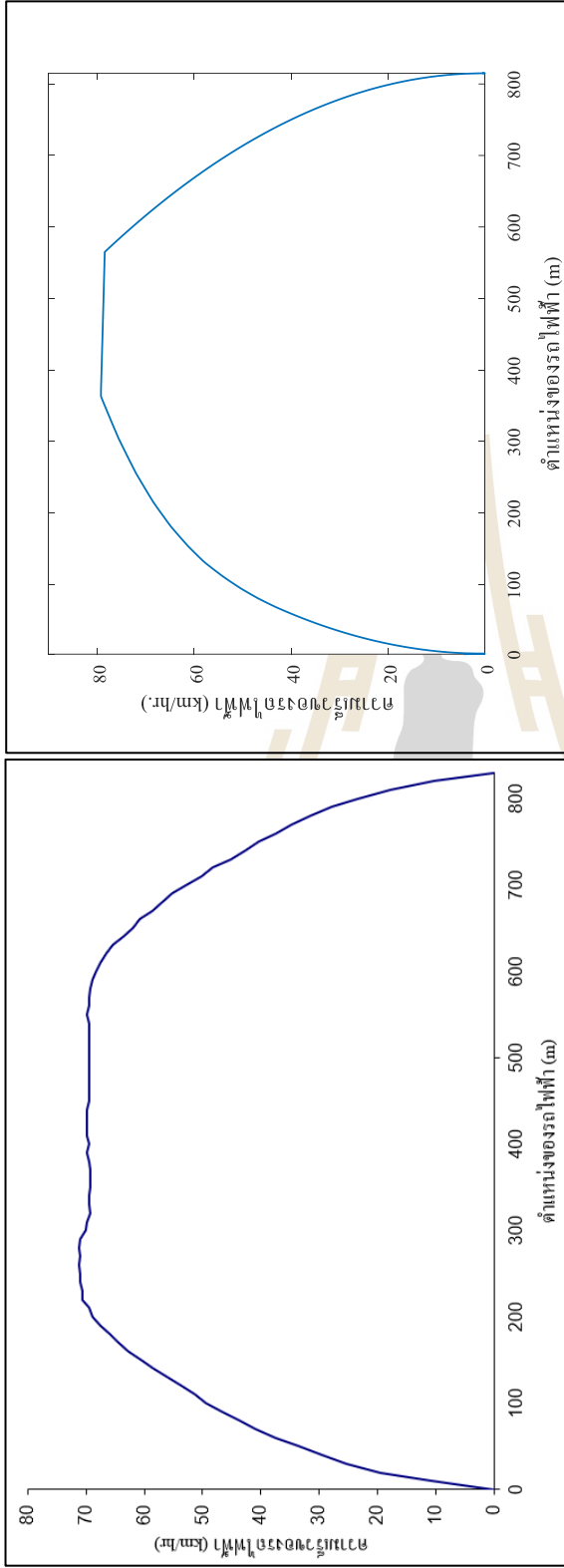


เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการจับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารพลโยธินกับสถานีขนส่งผู้โดยสารหมอชิต

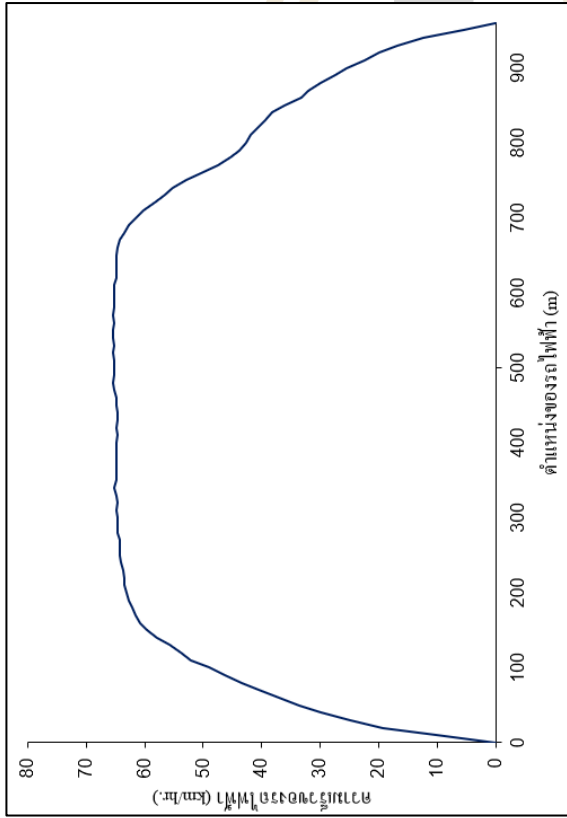




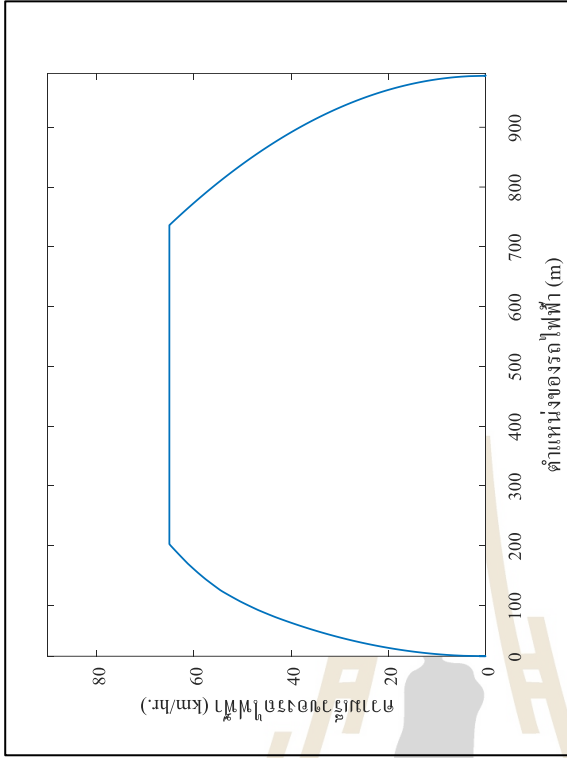
เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน

เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารเหมือนกับสถานีกำแพงเพชร



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากหน่วยควบคุมการขับเคลื่อน



เส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการจำลอง

เส้นโค้งความเร็วระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสารท่าแพงเพชรกับสถานีขนส่งผู้โดยสารบางซื่อ

ประวัติผู้เขียน

นายกันดินันท์ สกุลไพศาล เกิดเมื่อวันที่ 14 เมษายน พ.ศ.2538 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 2 ที่โรงเรียนอนุบาลเมืองชัยภูมิ ต่อมาย้ายมาศึกษาต่อชั้นประถมศึกษาปีที่ 3 ถึง มัธยมศึกษาปีที่ 3 ที่โรงเรียนมารีย์วิทยา นครราชสีมา และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 - 6 ที่โรงเรียนอัสสัมชัญ นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2559 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีแล้วได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่เรียนได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า อาทิ เช่น ปฏิบัติการวิชาดิจิตอล ลอจิกส์ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าและปฏิบัติการวงจรไฟฟ้าพื้นฐานสำหรับนักศึกษา ระดับปริญญาตรี เป็นต้น และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้าในระบบราง ระบบรถไฟฟ้า ความเร็วสูง รถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์เก็บพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี