

การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งรางเบาที่มีแบตเตอรี่
บนขบวนรถด้วยลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

MINIMIZING ENERGY CONSUMPTION OF ON-BOARD BATTERY
SYSTEM OF LIGHT RAIL TRANSIT BY SPEED PROFILE
OPTIMIZATION USING DYNAMIC PROGRAMMING



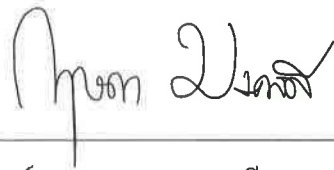
CHALITA JOB SOONGNERN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งรางเบาที่มีแบตเตอรี่บน
ขบวนรถด้วยลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อาจารย์ ดร. กฤษดา มงคลดี)
ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. ทศพล รัตน์นิยมชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. ชันตชัย กุลวรวานิชพงษ์)
กรรมการ



(รศ. ดร. กীরติ ชยะกุลคีรี)
กรรมการ



(รศ. ดร. ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชลิตา จบสูงเนิน : การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งรางเบาที่มี
แบตเตอรี่บนขบวนรถด้วยลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต
(MINIMIZING ENERGY CONSUMPTION OF ON-BOARD BATTERY SYSTEM OF LIGHT
RAIL TRANSIT BY SPEED PROFILE OPTIMIZATION USING DYNAMIC PROGRAMMING)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล รัตน์นิยมชัย, 115 หน้า.

คำสำคัญ : การขนส่งรถไฟฟ้ารางเบา, กำหนดการพลวัต, ลักษณะความเร็วที่เหมาะสม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งรถไฟฟ้า
รางเบาที่มีแบตเตอรี่บนขบวนรถเป็นแหล่งจ่ายเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยการหาลักษณะความเร็วใน
การเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต กรณีศึกษาเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของ
รถไฟฟ้ารางเบา 1 ขบวน โดยใช้เส้นทางของโครงการรถไฟฟ้ารางเบา Korat LRT สายสีเขียว จังหวัด
นครราชสีมา ประเทศไทย รวมระยะทางการเดินรถไปและกลับประมาณ 22 กิโลเมตร มีจำนวนสถานี
ผู้โดยสารทั้งหมด 21 สถานี ซึ่งมีการชาร์จพลังงานแบตเตอรี่บนขบวนรถหลังจากให้บริการในการ
เดินทางขาไปและขากลับครบทุกสถานี ในระหว่างเส้นทางนั้นจะมีส่วนของรางเฉพาะของรถไฟฟ้าราง
เบา และส่วนที่ใช้ร่วมกับถนนสาธารณะ ซึ่งการหาความเร็วที่เหมาะสมนี้ จะทำการหาเฉพาะส่วน
เส้นทางที่ใช้รางเฉพาะที่รถไฟฟ้ารางเบามีความเร็วคงที่เท่านั้น และเพื่อให้ได้ความเร็วที่เหมาะสมที่สุด
กำหนดการพลวัตได้ใช้พลังงานในการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยจำกัดขอบเขตค่าความเร็ว
ความเร่ง และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพื่อประสิทธิภาพของระบบขนส่ง มีการนำเสนอแบบจำลอง
การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา และแบบจำลองของแบตเตอรี่บนขบวนรถเพื่อใช้ในการคำนวณ
โดยวิธีกำหนดการพลวัตได้คำนวณแบบไปข้างหน้าและแบบย้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบและหาผลลัพธ์
ที่ดีที่สุด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลการศึกษาพบว่า พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดได้จาก
การคำนวณแบบย้อนกลับ คือ 64.12 kWh ซึ่งคิดเป็นการประหยัดพลังงาน 12.31%

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ชลิตา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ทศพล

CHALITA JOBSOONGNERN : MINIMIZING ENERGY CONSUMPTION OF ON-BOARD BATTERY SYSTEM OF LIGHT RAIL TRANSIT BY SPEED PROFILE OPTIMIZATION USING DYNAMIC PROGRAMMING. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TOSAPHOL RATNIYOMCHAI, Ph.D., 115 PP.

Keyword : Light rail transit, Dynamic programming, Optimal speed profile

This thesis presents minimizing energy consumption of light rail transport systems with only on-board batteries as the only power source by speed profile optimization using dynamic programming. This case study uses the route of the Korat light rail transit green line, Nakhon Ratchasima, Thailand, with a total distance of 22 km and 21 passenger stations. The light rail vehicle recharges the on-board battery after round trip service. The route has a specific path and mixed traffic section with public roads which find the optimal speed profile, only the specific path section where the light rail vehicle has a constant speed will be searched and to get the most suitable speed profile. Dynamic programming uses energy consumption as an objective function by limiting the velocity, acceleration, and running time for the service efficiency of the transport system. A light rail vehicle movement model and a model of the battery on the train for use in the calculations are presented. The forward and backward approaches of dynamic programming are calculated to compare and find the best solution. For the simulation using MATLAB, the result of the minimum energy consumption was 64.12 kWh, representing a 12.31% energy savings which are calculated by the dynamic programming backward approach.

School of Electrical Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature Chalita
Advisor's Signature Tosaphol

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งทางด้านวิชาการและงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล รัตนนิมิตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิตชัย กุลรวรานิชพงษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และอาจารย์ ดร. กฤษดา มงคลดี อาจารย์ประจำสถาบันระบบราง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ แนะนำแนวทางของงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ดีและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงาน วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจในการทำวิจัย และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างยิ่งมาโดยตลอด

ชลิตา จบสูงเนิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของขนส่งมวลชนระบบรางที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ บนขบวนรถ	7
2.3 การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งมวลชนระบบราง	11
2.4 สรุป	13
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
3.1 บทนำ	14
3.2 ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบา	14
3.3 แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้ารางเบาแบบบนขบวนรถ	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 แบตเตอรี่ (Battery).....	17
3.3.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor)	19
3.3.3 ล้อตุนกำลัง (flywheel)	19
3.4 การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน.....	20
3.5 สรุป.....	20
4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ...	21
4.1 บทนำ.....	21
4.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา	21
4.3 แบบจำลองของแบตเตอรี่.....	26
4.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา	27
4.5 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา	32
4.5.1 ขนาดของแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีและผลการจำลองการเคลื่อนที่ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่	35
4.5.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่	37
4.5.3 การพิจารณาตำแหน่งของโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย	54
4.6 สรุป.....	57
5 การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดด้วยการหาลักษณะความเร็วเหมาะสมโดยใช้ กำหนดการพลวัต	58
5.1 บทนำ.....	58
5.2 กำหนดการพลวัต (Dynamic programming).....	58
5.3 การสร้างขอบเขตความเร็วในการเคลื่อนที่.....	60
5.4 การสร้างระดับความเร็วในขอบเขตความเร็วที่กำหนด	62
5.5 การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต.....	64
5.6 สรุป.....	68
6 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	69
6.1 บทนำ.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 ผลการจำลองกำหนดการพลวัตโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า.....	69
6.3 ผลการจำลองกำหนดการพลวัตโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ.....	73
6.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณแบบย้อนกลับและแบบไปข้างหน้า.....	77
6.5 สรุป.....	80
7 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	81
7.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	81
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารางเบากรณีต่าง ๆ.....	87
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN50163 หรือ IEC60850 16
4.1	ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ขาไปของแต่ละสถานี 28
4.2	ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ขากลับของแต่ละสถานี 29
4.3	ค่าพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้างานเบาที่ใช้ในการจำลอง 30
4.4	กรณีศึกษาของตำแหน่งในการชาร์จ 36
4.5	ค่าพารามิเตอร์ของโมดูลแบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลอง 36
4.6	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แพคในกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี 37
4.7	การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน 52
4.8	การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่และต้นทุนเบื้องต้นในแต่ละกรณี 53
4.9	การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อมีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย 57
5.1	ขอบเขตของความเร็วสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละสถานีของการเคลื่อนที่ขาไป 60
5.2	ขอบเขตของความเร็วสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละสถานีของการเคลื่อนที่ขากลับ 61
6.1	การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า 72
6.2	การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุด 76

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ระบบขนส่งรางเบา เมืองเซบิยา ประเทศสเปน 2
1.2	ระบบขนส่งรางเบา เมืองหนานจิง ประเทศจีน 2
1.3	โครงการระบบขนส่งรางเบา Korat LRT สายสีเขียว เมืองนครราชสีมา ประเทศไทย..... 3
2.1	การทำงานของระบบขับเคลื่อนขณะมีตัวนำแคทีนารี 8
2.2	การทำงานของระบบขับเคลื่อนขณะไม่มีตัวนำแคทีนารี 9
2.3	แบบจำลองของแบตเตอรี่แบบอย่างง่าย 10
2.4	ตัวเลือกความเร็วตามวิธีการเคลื่อนที่ในระยะทาง 12
3.1	รถไฟฟ้ารางเบาที่เมืองอัมสเตอร์ดัม ประเทศเนเธอร์แลนด์..... 14
3.2	รถไฟฟ้ารางเบาที่เมืองซิดนีย์ รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย..... 15
3.3	รถไฟฟ้ารางเบาที่เมืองเซบิยา ประเทศสเปน 15
4.1	โหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา..... 22
4.2	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา..... 22
4.3	ลักษณะคุณสมบัติของแรงฉุดหัวรถจักรไฟฟ้ากับความเร็วเชิงเส้น..... 25
4.4	แผนภาพระยะวิกฤติการเบรก 25
4.5	แบบจำลองของแบตเตอรี่..... 26
4.6	เส้นทางการเดินรถของโครงการ Korat LRT สายสีเขียว 28
4.7	หลักการการทำงานของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่าย เป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ 31
4.8	ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถรางเบาเทียบกับระยะทาง 32
4.9	ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถรางเบาเทียบกับเวลา..... 33
4.10	กำลังไฟฟ้าของรางเบาเทียบกับระยะทาง..... 33
4.11	แรงฉุดของขบวนรถรางเบาเทียบกับเวลา 34
4.12	พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถรางเบาเทียบกับระยะทาง..... 34
4.13	แบตเตอรี่โมดูลที่ใช้ในการจำลอง ผลิตโดย Altairmano 35
4.14	ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 1 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41	ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับเวลา 56
4.42	พลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อมีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับระยะทาง.. 56
5.1	ตัวอย่างการคำนวณกำหนดการพลวัต..... 59
5.2	การสร้างขอบเขตความเร็วในการเคลื่อนที่ 60
5.3	หาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า..... 65
5.4	หาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบย้อนกลับ..... 65
5.5	ตัวอย่างลักษณะความเร็วที่สามารถเป็นไปได้ของสถานีที่ 1..... 66
5.6	ตัวอย่างลักษณะความเร็วที่สามารถเป็นไปได้ของสถานีที่ 15 66
5.7	แผนผังการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยกำหนดการพลวัต..... 67
6.1	ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า 69
6.2	พลังงานในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า.... 70
6.3	ระดับประจุแบตเตอรี่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า 71
6.4	ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ 73
6.5	พลังงานในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า..... 74
6.6	ระดับประจุแบตเตอรี่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ 75
6.7	ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่กรณีต่าง ๆ เทียบกับระยะทาง..... 77
6.8	พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับระยะทาง..... 78
6.9	ระดับประจุที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับเวลา 79
6.10	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับระยะทาง..... 80
ก.1	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 1 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 88
ก.2	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 2 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 88
ก.3	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 89
ก.4	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 4 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 89
ก.5	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 5 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 90
ก.6	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 6 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 90
ก.7	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 91
ก.8	กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก..... 91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.9 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 3 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก.....	92
ก.10 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 4 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก.....	92
ก.11 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 5 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก.....	93
ก.12 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีที่ 6 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก.....	93
ก.13 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้า ที่ $K = 6$	94
ก.14 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้า ที่ $K = 10$	94
ก.15 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้า ที่ $K = 15$	95
ก.16 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้า ที่ $K = 20$	95
ก.17 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้า ที่ $K = 25$	96
ก.18 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้า ที่ $K = 30$	96
ก.19 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบย้อนกลับที่ $K = 6$	97
ก.20 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบย้อนกลับที่ $K = 10$	97
ก.21 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบย้อนกลับที่ $K = 15$	98
ก.22 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบย้อนกลับที่ $K = 20$	98
ก.23 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบย้อนกลับที่ $K = 25$	99
ก.24 กำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลา กรณีคำนวณแบบย้อนกลับที่ $K = 30$	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขนส่งมวลชนระบบรางเป็นที่นิยมแพร่หลายทั่วโลก และมีหลากหลายประเภทให้เลือกใช้ตามความต้องการของผู้ใช้บริการ ซึ่งมีทั้งรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารระหว่างเมือง รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนหรือรถไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารในเมืองหลวงและเมืองรองขนาดใหญ่ที่มีประชากรหนาแน่น นอกจากนี้ยังมีรถรางที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารในเมือง ซึ่งขนส่งผู้โดยสารในระยะทางที่สั้นและใช้ความเร็วต่ำในการให้บริการ เช่นเดียวกับกับระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit: LRT) นอกจากสถานีที่อยู่ใกล้และเข้าถึงง่ายมากกว่าสถานีของระบบขนส่งอื่นๆ ยังมีการก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และยังได้รับความสนใจในสังคมผู้สูงอายุอีกด้วย (Ishino et al., 2012) แหล่งพลังงานของรถไฟนั้นมีหลากหลายประเภท ในยุคแรกเริ่มใช้เป็นหัวรถจักรไอน้ำ ต่อมาได้พัฒนาโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซล ในปัจจุบันพลังงานที่เป็นที่แพร่หลายในโลก คือ รถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้า หรือเรียกว่า รถไฟฟ้า ขั้วดีของรถไฟฟ้า คือ ไม่ปล่อยควันที่เป็นมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นเรื่องที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจในขณะนี้ และด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน รูปแบบของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถไฟนั้นมีหลากหลายประเภทมากขึ้น เช่น การจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านตัวนำแคทีนารี (Catenary) การจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านราง และประเภทที่งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษา คือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ (on-board energy storage system) เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และการชาร์จอย่างรวดเร็วในแต่ละสถานี ทำให้มีระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบาที่ไม่ใช่การจ่ายพลังงานผ่านตัวนำแคทีนารี และมีแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ โดยมีข้อดี ดังนี้ มีการก่อสร้างที่ไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับระบบจ่ายพลังงานผ่านตัวนำแคทีนารี และแบบจ่ายพลังงานผ่านราง ไม่มีสายตัวนำแคทีนารีที่บดบังทัศนวิสัยที่สวยงามของเมือง นอกจากนี้ การสร้างระบบขนส่งทางรางไฟฟ้าแบบจ่ายพลังงานผ่านตัวนำแคทีนารี เป็นเรื่องยากที่จะได้รับความยินยอมจากประชาชนและนักวางผังเมือง เนื่องจาก อาจเป็นการเปลี่ยนวิถีชีวิตเดิมของชาวเมือง และสายไฟที่ติดตั้งตามถนนอาจทำให้เมืองดูย่ำแย่ (Becker et al., 2016) ดังนั้น การสร้างรถไฟแบบที่ไม่ใช่แหล่งพลังงานจากสายไฟเหนือศีรษะจึงมีโอกาที่เป็นไปได้มากกว่า งานวิจัยฉบับนี้ ได้เน้นศึกษาในเรื่องระบบขนส่งรางเบาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการ

ขับเคลื่อน โดยระบบขนส่งรางเบาประเภทนี้นั้น ได้เริ่มมีการเปิดให้บริการในหลายประเทศ ซึ่งให้บริการแบบผสมระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานผ่านตัวนำแคทีนารี และแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ คือ แบตเตอรี่ โดยช่วงของเส้นทางที่ไม่มีการจ่ายพลังงานผ่านตัวนำแคทีนารี ขบวนรถจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เท่านั้น และจอดชาร์จพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีผู้โดยสาร ซึ่งระบบนี้ในปัจจุบันมีหลากหลายประเทศที่ได้เปิดให้บริการ ตัวอย่างเช่น ที่เมืองเซบิยา ประเทศสเปน โดยในเส้นทางที่ใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่มีสถานีผู้โดยสาร 5 สถานี ระยะทาง 2.2 km (Boris, 2018) เปิดให้บริการปี ค.ศ. 2007 ดังรูปที่ 1.1 และที่เมืองหนานจิง ประเทศจีน ระยะทาง 7.65 km มีสถานีผู้โดยสาร 13 สถานี เปิดให้บริการปี ค.ศ. 2014 (Becker et al., 2021) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ระบบขนส่งรางเบา เมืองเซบิยา ประเทศสเปน
ที่มาภาพ: (lan, 2017)



รูปที่ 1.2 ระบบขนส่งรางเบา เมืองหนานจิง ประเทศจีน
ที่มาภาพ: (Becker et al., 2017)

ปัจจุบันประเทศไทย เมืองนครราชสีมา ซึ่งเป็นเมืองที่ใหญ่เป็นอันดับสองของประเทศ ได้ริเริ่มโครงการระบบขนส่งสาธารณะระบบรางเบา Korat LRT (Korat Light Rail Transit) สายสีเขียว

ดังรูปที่ 1.3 เพื่อแก้ปัญหาการจราจร และนโยบายการขนส่งอื่น ๆ โดยเป็นโครงการระบบขนส่งรางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ โดยมีจำนวนสถานีทั้งหมด 21 สถานี ให้บริการตั้งแต่สถานีตลาดเซฟวันถึงสถานีบ้านนารีสวัสดิ์ เป็นระยะทางรวมขาไป และขากลับ 22 km (Jobsoongnern et al., 2022)



รูปที่ 1.3 โครงการระบบขนส่งรางเบา Korat LRT สายสีเขียว เมืองนครราชสีมา ประเทศไทย
ที่มาภาพ: <https://wekorat.com/2017/07/30/korat-lrt-light-rail-july-2017/>
[เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2565]

งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเส้นทางของโครงการ Korat LRT สายสีเขียว มาพัฒนาเป็นงานวิจัย ที่ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งรางเบาที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ และระบบการชาร์จแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วที่สถานีขณะจอดรับผู้โดยสาร ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากระยะทางที่แตกต่างกันของตำแหน่งจุดชาร์จแบตเตอรี่ โดยได้แบ่งศึกษาเป็น 6 กรณี คือ กรณีที่ 1 ชาร์จทุก ๆ สถานี กรณีที่ 2 ชาร์จทุก ๆ 2 สถานี กรณีที่ 3 ชาร์จทุก ๆ 3 สถานี กรณีที่ 4 ชาร์จทุก ๆ 5 สถานี กรณีที่ 5 ชาร์จที่สถานีปลายทาง และกรณีที่ 6 ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ โดยได้พิจารณาเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Energy consumption) พลังงานที่ชาร์จแบตเตอรี่เมื่อสิ้นสุดการเดินทางที่สถานีสุดท้าย (Recharge energy) และพลังงานที่ประหยัดได้จากการเบรก (Regenerative braking energy) และมีเป้าหมายเพื่อมุ่งเน้นนำเสนอแนวทางการลดพลังงานในการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งรางเบา ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่โดยวิธีกำหนดการพลวัต (Dynamic programming) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนด้วยการแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ

1.2.2 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่เกิดจากผลของตำแหน่งการชาร์จที่แตกต่างกัน และพลังงานที่ได้จากการเบรก

1.2.3 ศึกษาการลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่โดยการเพิ่มประสิทธิภาพลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาด้วยวิธีกำหนดการพลวัต และเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ก่อนและหลังการเพิ่มประสิทธิภาพ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาลดลงเมื่อมีลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา โดยการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.2 ข้อมูลการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ข้อมูลเส้นทางของโครงการ Korat LRT สายสีเขียว เมืองนครราชสีมา ประเทศไทย

1.4.3 จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาเป็นแบบการเคลื่อนที่ไป-กลับจำนวน 1 ขบวน

1.4.4 แหล่งพลังงานของรถไฟฟ้ารางเบาเป็นแบบแบตเตอรี่บนขบวนรถเท่านั้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งพลังงานเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ

1.5.2 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อมีตำแหน่งจุดชาร์จที่แตกต่างกัน

1.5.3 ลดพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยการเพิ่มประสิทธิภาพลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ด้วยวิธีกำหนดการพลวัต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ

1.6.2 มีความรู้เกี่ยวกับระบบที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ

1.6.3 สามารถนำหลักการของการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ารางเบาไปประยุกต์ และพัฒนาใช้กับการขนส่งมวลชนระบบอื่น ๆ ได้

1.6.4 มีความรู้เกี่ยวหลักการเพิ่มประสิทธิภาพลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถด้วยวิธีกำหนดการพลวัต และประยุกต์ใช้กับปัญหาอื่น ๆ ได้

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ ได้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษาค้นคว้า และสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่มีผู้ที่ศึกษามาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยแบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบาที่ไม่ใช้ตัวนำแคทีนารี (catenary free) โดยมีแหล่งจ่ายพลังงานบนขบวนรถ และการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดโดยการหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยของวิทยานิพนธ์ โดยประกอบด้วย ระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบขนส่งรางเบาในปัจจุบัน เทคโนโลยีแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ และการเบรกจ่ายคืนพลังงาน

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ โดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ และแบบจำลองของแบตเตอรี่อย่างง่ายที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานบนขบวนรถ นอกจากนี้ ได้มีการพิจารณาดำเนินการชาร์จที่แตกต่างกัน 6 กรณี การประหยัดพลังงานจากการเบรก และจากการเพิ่มโหมดการเล่นในลักษณะการเคลื่อนที่ปกติ

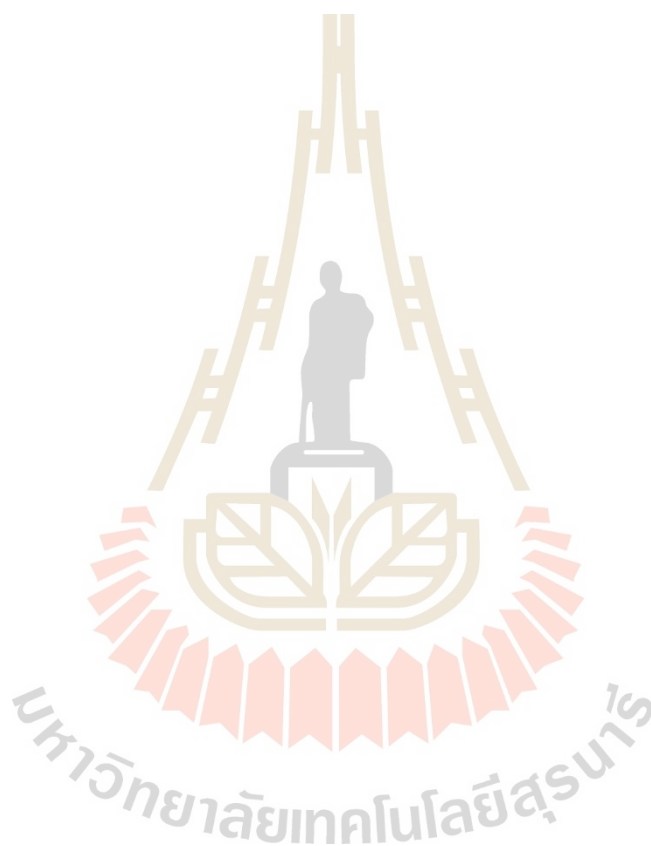
บทที่ 5 การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดด้วยการหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต โดยได้กล่าวถึงทฤษฎีของกำหนดการพลวัต ขั้นตอนการสร้างขอบเขตความเร็ว และระดับความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขเวลาที่จำกัด ซึ่งได้ใช้พลังงานในการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยเปรียบเทียบทั้งการคำนวณแบบไปข้างหน้า และแบบย้อนกลับ

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลการศึกษาของการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดด้วยการหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต ทั้งการคำนวณแบบไปข้างหน้า และแบบย้อนกลับ

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ภาคผนวก ก. ผลของกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่

ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะอยู่ในระหว่างการศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ระบบขนส่งมวลชนระบบรางที่มีแหล่งพลังงานแบบต่าง ๆ เช่น แบบตัวนำแคทีนารี แบบแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ และแบบที่มีทั้งตัวนำแคทีนารีและแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ ได้มีการศึกษาการลดพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยวิธีต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย บทนี้ได้นำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งระบบรางที่มีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถโดยใช้เป็นแบตเตอรี่ ซึ่งครอบคลุมทั้งแหล่งกักเก็บพลังงานที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายบนขบวนรถ แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ และการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งมวลชนระบบราง โดยได้ศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

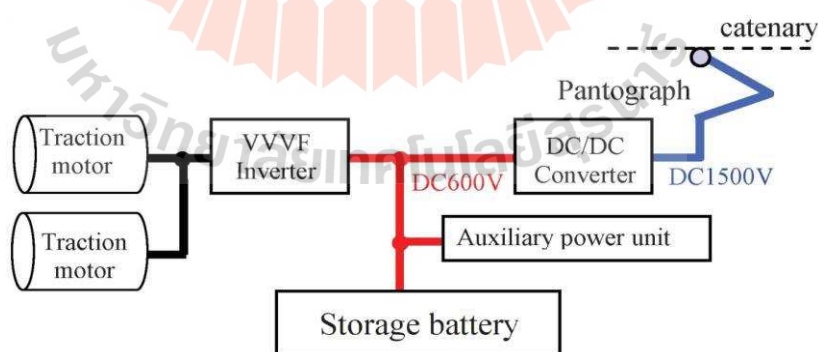
2.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งมวลชนระบบรางที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ

ในปัจจุบันแนวโน้มการเติบโตของเมืองอย่างต่อเนื่อง และความจำเป็นของระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพ เชื่อถือได้ และยั่งยืน ส่งผลให้เกิดการฟื้นฟูระบบรถไฟฟ้าวางเบา ควบคู่กับข้อดีที่ชัดเจน เช่น มีแหล่งพลังงานที่ปราศจากการปล่อยมลพิษ และการส่งเสริมให้ยานพาหนะส่วนบุคคลที่ใช้เครื่องยนต์ลดลง แต่อาจมีข้อจำกัดสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ ผลกระทบต่อภูมิทัศน์ของเมืองโดยการติดตั้งสายตัวนำเหนือศีรษะ ซึ่งอาจไม่ได้รับการยอมรับจากนักวางผังเมือง และสาธารณชนสำหรับเมืองที่มีนักท่องเที่ยว หรือมีความสำคัญด้านสุนทรียศาสตร์ และยังมีสภาพการก่อสร้างที่ยากลำบาก เช่น ทางแยก และสภาพพื้นที่คับแคบ ในกรณีนี้จึงต้องพิจารณาถึงระบบที่ไม่มีสายตัวนำเหนือศีรษะ โดยมีสองระบบ คือ ระบบจ่ายพลังงานผ่านรางที่สาม และระบบที่มีแหล่งจ่ายพลังงานเป็นระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ (Hussain et al., 2015)

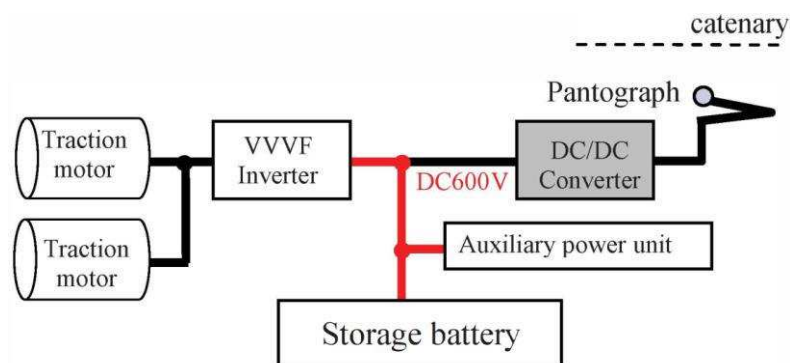
การติดตั้งรางที่สาม (third rail) ขบวนรถจะได้รับพลังงานในการขับเคลื่อนอย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดด้านการนำไฟฟ้า คือ ระบบรางที่สามไวต่อสิ่งสกปรก ความชื้น และหิมะ อาจทำให้มีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของพลังงานจากการเบรก นอกจากนี้ ระบบรางที่สาม

ต้องใช้ต้นทุนสูงในการติดตั้งและบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐาน ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของแหล่งกักเก็บพลังงานทำให้สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับขบวนรถไฟฟาราง ซึ่งได้ปรากฏในเส้นทางต่าง ๆ ในหลายประเทศ เช่น เมืองหนานจิง ประเทศจีน ระยะทาง 7.65 km 13 สถานี โดยเป็นระบบรถไฟฟารางเบาที่ 90% ของเส้นทางเป็นการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (li-ion) เป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟาราง และมีการจอดชาร์จแบตเตอรี่จากตัวนำแคทีนารีผ่านแหวนรับไฟ (pantograph) ที่สถานีผู้โดยสาร ซึ่งมีความยาว 90 m ตลอดแนวขบวนรถ (Becker et al., 2017)

ณ ประเทศญี่ปุ่น บริษัท East Japan Railway ได้พัฒนาระบบรถไฟไฮบริดแบบแหล่งจ่ายตัวนำแคทีนารีและแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากระบบเก่าที่เป็นระบบดีเซล และได้มีการทดสอบการชาร์จอย่างรวดเร็ว โดยได้เริ่มการทดสอบการทำงานขั้นสุดท้ายตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 2011 โดยขบวนรถใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนขนาด 70 kWh 600 V เป็นแหล่งจ่ายเดี่ยวขณะที่วิ่งในเส้นทางช่วงที่ไม่มีตัวนำแคทีนารี โดยขณะที่อยู่ในช่วงการทำงานที่มีตัวนำแคทีนารีจะรับพลังงานจากระบบแรงดัน 1500 VDC และแปลงเป็น 600 V ด้วยตัวแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC/DC converter) เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับแบตเตอรี่ มอเตอร์ชุดลาก และหน่วยพลังงานเสริม (auxiliary power unit) ดังรูปที่ 2.1 และขณะที่อยู่ในช่วงที่ไม่มีตัวนำแคทีนารี ตัวแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจะหยุดการทำงาน และขบวนรถจะวิ่งโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เท่านั้น และพลังงานที่สร้างขึ้นจากการเบรกจะชาร์จพลังงานกลับคืนสู่แบตเตอรี่ และจ่ายให้กับหน่วยพลังงานเสริมอีกด้วย (Hiroshi et al., 2012) ดังรูปที่ 2.2 โดยได้นำไปเป็นแบบจำลองในการจ่ายพลังงานและชาร์จพลังงานของแบตเตอรี่ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย



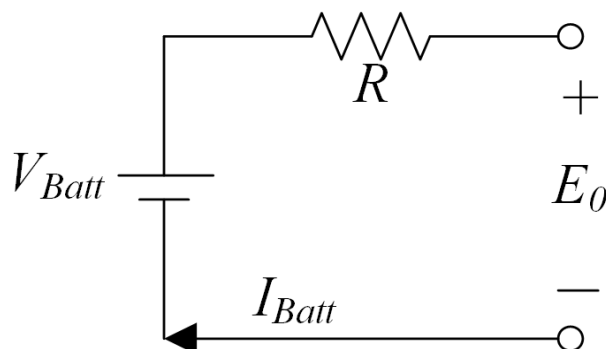
รูปที่ 2.1 การทำงานของระบบขับเคลื่อนขณะมีตัวนำแคทีนารี
ที่มาภาพ: (Hiroshi et al., 2012)



รูปที่ 2.2 การทำงานของระบบขับเคลื่อนขณะไม่มีตัวนำแคทีนารี

ที่มาภาพ: (Hiroshi et al., 2012)

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้แหล่งจ่ายที่เป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ ซึ่งจากผู้แต่ง (Ghaviha et al., 2019) ได้ทำการทดสอบแบบจำลองของแบตเตอรี่แบบทั่วไป (Generic battery model) ที่ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแบตเตอรี่ในการคำนวณ และแบบจำลองของแบตเตอรี่แบบอย่างง่าย (Simplified battery model) ที่มีเพียงแหล่งจ่ายและตัวต้านทานภายใน โดยเปรียบเทียบกับ การทดลองจริง ซึ่งเป็นการทดลองในส่วนหนึ่งของเส้นทางเมย์ฟลาวเวอร์ ในเมืองเอสเซกซ์ ประเทศอังกฤษ โดยรถไฟที่ใช้ คือ Bombardier 4 car Electrostar Class 379 EMU มีน้ำหนัก 185 ตัน และใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายที่ติดตั้งบนขบวนรถขนาด 550 Ah ระยะทางในการทดสอบ 34 km เวลาที่ใช้ในการเดินทาง 2200 วินาที โดยแบตเตอรี่จ่ายกระแสสูงสุดประมาณ 1300 A และกระแสชาร์จจากการเบรกสูงสุดประมาณ 900 A และแรงดันสูงสุดประมาณ 820 V โดยขบวนรถมีความเร็วสูงสุด 100 km/h ผลของการทดสอบพบว่าแบบจำลองของแบตเตอรี่แบบทั่วไปและแบบอย่างง่ายนั้น มีค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และสถานะประจุ (state of charge) ของแบตเตอรี่ มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกับผลของการทดลองจริง ผู้แต่งจึงเลือกใช้ แบบจำลองของแบตเตอรี่แบบอย่างง่าย ดังรูปที่ 2.3 ที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองของแบตเตอรี่แบบทั่วไป ดังสมการที่ (1.1) มาใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ เช่นเดียวกับที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของแบตเตอรี่แบบอย่างง่าย

$$V_{Batt} = E_0 - I_{Batt} \cdot R \quad (1.1)$$

จากสมการที่ (1.1)

V_{Batt} คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่

E_0 คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่

I_{Batt} คือ กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่

R คือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

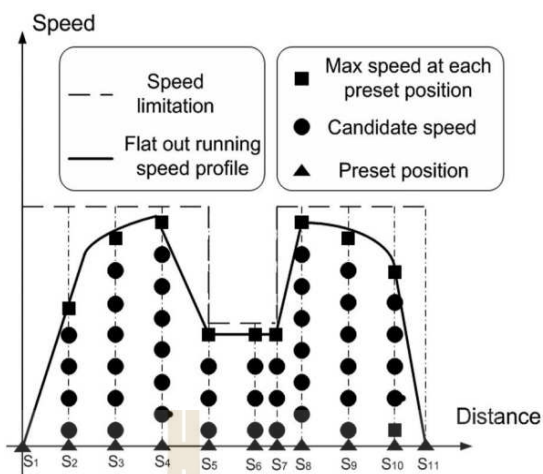
จากบทความ (Mwambeleko et al., 2017) ได้มีการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ โดยช่วงการเร่งความเร็ว รถไฟฟ้ารางเบาจะใช้พลังงานจากตัวนำแคทีนารี ทำให้สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้จากแบตเตอรี่ได้ขณะเร่งความเร็ว เมื่อเคลื่อนที่ถึงช่วงความเร็วสูงสุดและจากนั้นเป็นช่วงความเร็วคงที่ โดยรถไฟฟ้ารางเบาจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ระบบนี้มีระยะทางในการจำลอง 12 km สถานีผู้โดยสาร 8 สถานี ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 40 km/h และใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไททาเนท (LTO) ผลิตโดยบริษัท Altairmano ขนาด 24 V 60 Ah ซึ่งผู้แต่งได้ออกแบบค่าแบตเตอรี่แพคเกจขนาด 348 V 60 Ah ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา เนื่องด้วยระบบรถไฟฟ้ารางเบาของโครงการ Korat LRT สายสีเขียว ได้มีการพิจารณาให้เป็นแหล่งจ่ายแบบติดตั้งบนขบวนรถ ซึ่งการใช้แหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถเป็นแหล่งจ่ายเพียงอย่างเดียว มีข้อเสีย คือ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่จำกัด อาจทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากโหลดผู้โดยสาร ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือที่ลดลง จึงต้องมีการออกแบบขนาดของแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถให้เพียงพอต่อการใช้งาน และการพิจารณาตำแหน่งในการชาร์จระหว่างการให้บริการ เช่น การชาร์จที่สถานีผู้โดยสารขณะรับผู้โดยสารในแต่ละสถานี ซึ่งตำแหน่งในการชาร์จที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ขนาดของกำลังในการชาร์จ เวลาในการชาร์จ

และขนาดของแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถแตกต่างกันด้วย (Jobsoongnern et al., 2022) ดังนั้น การพิจารณาในการหาวิธีการเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดจึงสำคัญสำหรับระบบรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานบนขบวนรถเพียงอย่างเดียว โดยวิธีการหาการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งมวลชนระบบรางจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งมวลชนระบบราง

การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบขนส่งมวลชนระบบราง สามารถแก้ปัญหาได้จากการปรับระบบขนส่งให้เหมาะสมโดยคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ตารางเวลา และความต้องการของผู้โดยสาร ซึ่งปัจจัยอื่น ๆ ที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้โดยตรง คือ แรงฉุดที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถ โดยทำได้จากการค้นหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุด โดยกลยุทธ์นี้ เป็นการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ขอบเขตที่จำกัด เช่น ระยะทางในการเคลื่อนที่ ความเร็วสูงสุด ความเร็วต่ำสุด และเวลาในการเคลื่อนที่ เป็นต้น (Yin et al., 2016) โดยในหลายงานวิจัยมีการใช้อัลกอริทึมในการคำนวณค้นหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมแตกต่างกัน

จากงานวิจัยของผู้แต่ง (Lu et al., 2013) ได้กล่าวว่า การใช้อัลกอริทึมที่แตกต่างกันสามารถช่วยในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้ โดยผู้แต่งได้ใช้อัลกอริทึมอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่อ้างอิงมาจากพฤติกรรมของฝูงมด ในอัลกอริทึมใช้ชุดมดเทียมโดยการสื่อสารทางฟีโรโมนเพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหา และอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ซึ่งได้จากพฤติกรรมของโครโมโซม สุดท้ายได้ใช้อัลกอริทึมกำหนดการพลวัต ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่แบ่งปัญหาที่ซับซ้อนให้เป็นปัญหาย่อย โดยทั้งสามอัลกอริทึมนี้ใช้หาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม เพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟ ได้ใช้การสร้างตัวเลือกความเร็ว (speed candidate) เพื่อหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.4 และผลลัพธ์ที่ได้ คือ อัลกอริทึมกำหนดการพลวัต ให้ผลลัพธ์ของลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ทำให้การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด และลักษณะความเร็วที่ได้มีความราบเรียบ ไม่มีการรบกวนเหมือนอัลกอริทึมอาณานิคมมดและอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 2.4 ตัวเลือกความเร็วตามวิธีการเคลื่อนที่ในระยะทาง
ที่มาภาพ: (Lu et al., 2013)

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่เปรียบเทียบการใช้อัลกอริทึมกำหนดการพลวัต อัลกอริทึม Gradient Method และอัลกอริทึม Sequential Quadratic Equation Programming (SQP) โดยผู้แต่ง (Miyatake et al., 2010) ได้ใช้ทั้งสามอัลกอริทึมในการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม โดยกล่าวว่า จากผลลัพธ์ในการคำนวณ พบว่าแต่ละอัลกอริทึมมีข้อดีและข้อเสียดังนี้ อัลกอริทึมกำหนดการพลวัตและอัลกอริทึม Gradient Method มีการคำนวณที่ช้า ในขณะที่อัลกอริทึม SQP มีการคำนวณที่เร็วกว่า และอัลกอริทึมกำหนดการพลวัต มีการกำหนดลักษณะความเร็วที่ราบรื่นกว่า อัลกอริทึม Gradient Method และอัลกอริทึม SQP นอกจากนี้ อัลกอริทึมกำหนดการพลวัตเป็นอัลกอริทึมที่ง่ายในการจัดการกับข้อจำกัดของตัวแปรสถานะ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่จำกัด และยังเป็นที่ยอมรับในการใช้หาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม จากหลายงานวิจัยดังต่อไปนี้

สำหรับการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยการกำหนดพลวัต สำหรับระบบรถไฟที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่อยู่บนขบวนรถ ผู้แต่ง (Noda et al., 2017) ได้หาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม โดยใช้สถานะประจุแบตเตอรี่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งได้นำไปสู่การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดอีกด้วย โดยการจำลองระบบรถไฟที่มีความเร็วสูงสุด 80 km/h ระยะทางระหว่างสถานี 3 km โดยให้ผลลัพธ์พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ลดลงจาก 6.394 kWh เป็น 6.629 kWh ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่ประหยัดได้ 3.5% นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นที่สามารถนำมาพิจารณาในการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม คือ พลังงานจากการเบรก โดยจะชาร์จพลังงานกลับคืนสู่แบตเตอรี่บนขบวนรถ ส่งผลให้การใช้พลังงานโดยรวมทั้งหมดลดลงด้วย (Gil et al., 2013)

นอกจากนี้ การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต ยังสามารถกำหนดค่าความเร่งและค่าความหน่วงที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในระหว่างสถานีภายใต้ขอบเขตเวลาในการให้บริการที่กำหนด เพื่อจัดการพลังงานของระบบรถไฟที่มีระบบกักเก็บพลังงานชั่วคราวหรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Electric Double Layer Capacitor: EDLC) (Miyatake et al., 2010) และจากงานวิจัยโดยผู้แต่ง (Arikan et al., 2019) ยังได้มีการนำเสนอการแบ่งเวลาที่จำกัดในการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งเป็นเวลาที่คลาดเคลื่อนจากเดิม 5% และ 10% ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันโดยจำลองระบบรถไฟที่ความเร็วสูงสุด 80 km/h ซึ่งสามารถลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ 7.6% ถึง 21%

เนื่องด้วยวิทยานิพนธ์เล่มนี้มุ่งเน้นการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดของระบบรถไฟฟารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ และจากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาวิธีที่ใช้อัลกอริทึมกำหนดการพลวัต ได้ถูกเลือกใช้ในการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมของรถไฟฟารางเบาแล้วอย่างแพร่หลายจากงานวิจัยข้างต้นที่ได้กล่าวมา ดังนั้น วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมกำหนดการพลวัต โดยมุ่งเน้นการลดพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟารางเบาให้น้อยที่สุด โดยใช้พลังงานในการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การใช้อัลกอริทึมกำหนดการพลวัตนี้ ได้ใช้การสร้างตัวเลือกความเร็ว โดยประยุกต์จากงานวิจัย (Huang et al., 2018) และทำการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม และระยะทางเปรียบเสมือนขั้นตอน (stage) และเวลาในการเคลื่อนที่ที่จะต้องถูกกำหนดไว้แล้วเท่านั้น

2.4 สรุป

บทนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ และงานวิจัยจากผลการทดสอบจริงของการเคลื่อนที่ของขบวนรถที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถที่กล่าวถึงขนาดพิกัดของแบตเตอรี่ การเลือกใช้แบบจำลองของแบตเตอรี่ และสถานะของแบตเตอรี่ขณะอยู่ในโหมดชาร์จพลังงานและโหมดจ่ายพลังงาน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟารางเบาของเส้นทาง Korat LRT สายสีเขียว นอกจากนี้ ยังได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดโดยการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม ซึ่งกล่าวถึงอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่ผู้แต่งเลือกจากหลายงานวิจัยเลือกใช้ รวมทั้งข้อดีข้อเสีย และได้สรุปว่าอัลกอริทึมที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เลือกที่จะประยุกต์ใช้ คือ กำหนดการพลวัต

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบา ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการจำลองผลของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยกล่าวถึงระบบจ่ายไฟฟ้าและเทคโนโลยีแหล่งจ่ายพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ของระบบรถไฟฟ้ารางเบา และเทคโนโลยีแหล่งจ่ายพลังงานแบบบนขบวนรถสำหรับระบบรถไฟฟ้ารางเบา โดยเน้นในเรื่องแบตเตอรี่ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเบรกจ่ายคืนพลังงาน

3.2 ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบา

ระบบจ่ายไฟสำหรับจุดลากเป็นหนึ่งในระบบสำคัญของการขนส่งทางราง ผสมผสานความต้องการด้านภูมิทัศน์ของสถานที่ท่องเที่ยว การเลือกวิธีการจ่ายไฟฟ้าที่เหมาะสมกับลักษณะของเส้นทาง และแผนการขับเคลื่อนซึ่งมีความจำเป็นต่อโครงการขนส่งทางราง ในปัจจุบันระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบาามีวิธีการจ่ายไฟฟ้าหลักสามวิธี คือ การจ่ายไฟแบบตัวนำแคทีนารี ตัวอย่างดังรูปที่ 3.1 เมืองอัมสเตอร์ดัม ประเทศเนเธอร์แลนด์ และแหล่งจ่ายไฟแบบภาคพื้นดินหรือรางที่สาม ตัวอย่างดังรูปที่ 3.2 แหล่งจ่ายไฟแบบการใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ ตัวอย่างดังรูปที่ 3.3 เมืองเซบิยา ประเทศสเปน (Jin., 2021)



รูปที่ 3.1 รถไฟฟ้ารางเบาที่เมืองอัมสเตอร์ดัม ประเทศเนเธอร์แลนด์
ที่มาภาพ: https://en.wikipedia.org/wiki/Trams_in_Amsterdam

[เข้าถึงเมื่อ 25 สิงหาคม 2563]



รูปที่ 3.2 รถไฟฟ้ารางเบาที่เมืองซิดนีย์ รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย
ที่มาภาพ: https://en.wikipedia.org/wiki/Light_rail_in_Sydney
[เข้าถึงเมื่อ 25 สิงหาคม 2563]



รูปที่ 3.3 รถไฟฟ้ารางเบาที่เมืองเซบิยา ประเทศสเปน
ที่มาภาพ: <https://en.wikipedia.org/wiki/MetroCentro>
[เข้าถึงเมื่อ 25 สิงหาคม 2563]

ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟรางเบา จะใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงพิกัดแรงดัน 600 V และ 750 V เช่นเดียวกับระบบขนส่งในเมืองอื่น ๆ เช่น ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง และระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น โดยระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะเริ่มต้นจากสถานีไฟฟ้าประธานที่รับไฟฟ้ากระแสสลับในระดับแรงดันสูง และแปลงแรงดันผ่านหม้อแปลงให้เป็นระดับแรงดันปานกลาง เพื่อจ่ายให้กับสถานีเรียงกระแสไฟฟ้า (rectifier substation) หรือเรียกว่าสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) โดยจากนั้นจะแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับรางตัวนำที่สามหรือสายตัวนำแคนทีนารี (กุลรรวานิชพงษ์, 2561)

ตารางที่ 3.1 แรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟตามมาตรฐาน EN50163 หรือ IEC60850

Electrification system	Lowest non-permanent voltage U_{min2} (V)	Lowest non-permanent voltage U_{min1} (V)	Nominal voltage U_n (V)	Highest permanent voltage U_{max1} (V)	Highest non-permanent voltage U_{max2} (V)
d.c. (mean value)	400 500 ^c 1 000 2 000	400 500 1 000 2 000	600 ^a 750 1 500 3 000	720 900 ^c 1 800 ^c 3600	800 1 000 1 950 3 900 ^b
a.c. (r.m.s values)	11 000 17 500 ^c	12 000 19 000 ^c	15 000 25 000	17 250 27 500	18 000 29 000
Special national conditions for France, see Annex B.					
a	Future d.c. traction system for tramways and local railways should conform with system nominal voltage of 750 V, 1 500V, 3 000 V.				
b	Special national conditions for Belgium see Annex B.				
c	Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.				

ข้อกำหนดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850 โดยระดับแรงดันในการทำงานปกติของระบบจ่ายไฟฟ้าจะมีแรงดันอยู่ในช่วงแรงดัน U_{min1} ถึง U_{max2}

เป็นไปตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.1 โดยระดับแรงดันในช่วง $U_{\max 1}$ ถึง $U_{\max 2}$ ต้องมีค่าไม่เกิน 5 นาทีในช่วงการทำงาน และระดับแรงดันช่วง $U_{\min 1}$ ถึง $U_{\min 2}$ จะต้องมีค่าไม่เกิน 2 นาที ณ สถานีจ่ายไฟฟ้า และพิกัดแรงดันไฟฟ้าไรโพลดของสถานีเรียงกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟต้องมีค่าไม่เกิน $U_{\max 2}$ โดยมีข้อยกเว้นสำหรับระบบรถไฟกระแสตรงที่มีการเบรกจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) สามารถมีค่าพิกัดแรงดันได้ถึง 1000 V ในกรณีของระบบจ่ายไฟฟ้า 750 V และ 800 V และกรณีของระบบจ่ายไฟฟ้า 600 V ที่ใช้สำหรับระบบรถรางไฟฟ้าหรือรถโดยสารไฟฟ้าโทรลลี (กุลรวานิชพงษ์, 2561)

ข้อแตกต่างในการเลือกระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟรางเบา ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมที่เลือกพิจารณา โดยการแก้ปัญหาการวางระบบจ่ายไฟแบบรางที่สามตามพื้นดิน สามารถช่วยแก้ไขผลกระทบของแบบตัวนำแคทีนารีที่มีต่อภูมิทัศน์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ แต่อุปกรณ์ที่ฝังไว้อาจได้รับผลกระทบอย่างมากจากสิ่งแวดล้อมเช่นกัน ระบบจ่ายไฟแบบรางที่สามจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกและการระบายน้ำตามแนวท่อ โดยมีค่าใช้จ่ายที่สูง นอกจากนี้ ระบบจ่ายไฟแบบรางที่สามยังเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่มีความอ่อนไหวต่อสิ่งสกปรก ฝุ่น และอื่น ๆ ซึ่งอาจทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพในการเบรกจ่ายคืนพลังงาน และมีต้นทุนสูงในการติดตั้งและบำรุงรักษา (Zhixin, 2013) แต่ในทางตรงกันข้าม ระบบที่มีแหล่งจ่ายพลังงานบนขบวนรถ มีโครงสร้างพื้นฐานที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบอื่น เนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าเพียงไม่กี่แห่ง เช่น ในสถานีผู้โดยสาร เป็นต้น ขบวนรถระบบนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับระบบจ่ายไฟแบบอื่นได้ และยังทำให้การจัดเก็บพลังงานจากการเบรกมีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจากมีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ และข้อดีอีกประการหนึ่งคือ โดยระบบนี้สามารถใช้รถไฟรางเบาใกล้กับสถานที่ที่อ่อนไหวต่อการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น โรงพยาบาลหรือศูนย์วิจัยที่ใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อน แต่มีข้อเสีย คือ ต้นทุนรถที่สูงขึ้นและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน นอกจากนี้ยังมีค่าบำรุงรักษาเพิ่มเติมเนื่องจากอายุการใช้งานที่จำกัดของการจัดเก็บพลังงาน (Klohr et al., 2013)

3.3 แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับระบบรถไฟรางเบาแบบบนขบวนรถ

3.3.1 แบตเตอรี่ (Battery)

รถไฟหรือรถไฟรางเบาที่ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่นำมาซึ่งทางเลือกใหม่ที่ผู้ประกอบการรถไฟบางรายเลือกใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง British Rail ได้ให้บริการรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจากปี พ.ศ. 2501 ถึง 2505 และ Deutsche Bahn ผู้ประกอบการรถไฟในเยอรมนี ได้ดำเนินการให้บริการรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเช่นกัน ในปี พ.ศ. 2498 ถึง 2538 เทคโนโลยีแบตเตอรี่ได้รับการปรับปรุงอย่างมากจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่นิกเกิล และจากแบตเตอรี่นิกเกิลเป็นลิเทียมไอออน ซึ่งแบตเตอรี่มีความหนาแน่นของพลังงานที่ดี แต่มีความ

หนาแน่นของกำลังที่ต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการชาร์จและการคายประจุอย่างรวดเร็ว แต่ในเทคโนโลยีแบตเตอรี่ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ที่มีประสิทธิภาพที่ดี อายุการใช้งานยาวนานและความเสถียรทางเคมี ต่อมาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนท (LTO) ได้กลายเป็นตัวเลือกสำหรับการชาร์จอย่างรวดเร็วและการใช้งานด้านการกักเก็บพลังงานในภาคอุตสาหกรรมรถไฟฟ้ โดยเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียมไททาเนท ถูกใช้ในรถราง ForCity Classic (28T) ของผู้ประกอบการ Skoda ในเมืองคอนยา ประเทศตุรกี และ tramlink v4 ของผู้ประกอบการ Vossloh ในเมืองซานโตส ประเทศบราซิล เพื่อใช้จ่ายไฟฟ้าระหว่างเส้นทางในช่วงที่ไม่มีตัวนำแคทีนารี หรือใช้ในกรณีฉุกเฉิน เช่น ไฟฟ้าดับ เป็นต้น (Mwambelele et al., 2017) เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ มีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd) เป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานยาวนาน เชื่อถือได้ และมีการคายประจุเองของแบตเตอรี่ต่ำ มีความหนาแน่นสูง สามารถทนต่อช่วงการทำงานที่อุณหภูมิกว้าง แต่มีหนึ่งในข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ผลกระทบจากหน่วยความจำและแคดเมียมเป็นวัสดุที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการกำจัดแคดเมียมถือว่าเป็นปัญหาที่ใหญ่

นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) เป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ใช้อิเล็กโทรดขั้วบวกและอิเล็กโทรไลต์แบบเดียวกับนิกเกิลแคดเมียม แต่ไฮโดรเจนถูกใช้ในขั้วลบแทนแคดเมียม ด้วยเหตุนี้แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ จึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม นอกจากนี้ แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ มีความหนาแน่นของพลังงานและพลังงานจำเพาะที่สูงกว่าและที่สำคัญที่สุด แบตเตอรี่เหล่านี้ไม่ได้รับผลกระทบจากหน่วยความจำในระดับเดียวกับแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม ข้อจำกัดหลักสำหรับแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ ได้แก่ การชาร์จพลังงานมากเกินไปอาจทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิที่ร้อนเกินไป และสามารถปล่อยไฮโดรเจนได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายจากไฟไหม้ร้ายแรง ดังนั้น จึงต้องใช้วงจรการชาร์จที่มีความซับซ้อน นอกจากนี้ เมื่อจ่ายพลังงานที่ระดับกระแสสูง เช่น การขนส่งขนาดใหญ่ เป็นต้น จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงอย่างมาก 200 ถึง 300 รอบ

ลิเธียมไอออน (Li-Ion) ปัจจุบันนี้เป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา ด้วยการลดต้นทุนการผลิตและมีแรงจูงใจสูงในการสร้างการขนส่งที่ไร้มลพิษ เทคโนโลยีแบตเตอรี่นี้จึงกลายเป็นที่นิยมอย่างมากในหมู่ผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สูง ความหนาแน่นของพลังงานสูง อายุการใช้งาน (life cycle) ที่ยาวนาน โดยไม่มีผลกระทบต่อหน่วยความจำและปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วยเทคโนโลยี ลักษณะการคายประจุที่อุณหภูมิต่ำดีเยี่ยม และแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนชนิดลิเธียมไททาเนทออกไซด์ เป็นที่นิยมเนื่องจากความสามารถในการชาร์จอย่างรวดเร็วและช่วงอุณหภูมิกว้าง และเป็นแบตเตอรี่ในบรรดาแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่ปลอดภัยที่สุด (Meyers et al., 2012)

3.3.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่สามารถประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ได้เร็วเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ โดยมีความหนาแน่นของกำลังงานสูง แต่มีความหนาแน่นพลังงานที่น้อย และตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังมีประสิทธิภาพสูงถึง 84% ถึง 97% และมีอายุการใช้งานสูง โดยมีอายุการใช้งานสูงถึง 100000 รอบ (Luo et al., 2015) ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่สามารถประจุและคายประจุได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้รับความนิยม โดยนำมาใช้สำหรับกักเก็บพลังงานจากการเบรกในระบบขนส่ง (Ratniyomchai et al., 2013) สำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ต้องการการประจุและคายประจุที่ตอบสนองระยะสั้นในช่วง 10 วินาที ถึง 1 นาที ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีคุณลักษณะการตอบสนองที่รวดเร็วมีความสำคัญมากกว่าความหนาแน่นของพลังงาน (Okui, et al., 2010) นอกจากนี้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ แต่มีข้อเสียเปรียบหลัก ได้แก่ ค่าบำรุงรักษา น้ำหนัก และต้นทุนสำหรับการขนส่งประเภทความเร็วสูง โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะเก็บพลังงานไว้ในชั้นไฟฟ้าเคมีสองชั้น และเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีกำลังงานจำเพาะจะสูงกว่ามากถึง 500–10000 W/kg แต่พลังงานจำเพาะนั้นต่ำกว่ามาก 0.2–5 Wh/kg ในการใช้งานด้านการขนส่ง ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับระบบช่วยส่งกำลังในระหว่างการเร่งความเร็วและการขึ้นเขา และการกักเก็บพลังงานจากการเบรก และในระบบขนส่งแบบไฮบริด ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะใช้ร่วมกับอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานอื่น ๆ เช่น แบตเตอรี่เป็นต้น (Ghaviha et al., 2017)

3.3.3 ล้อตุ้มกำลัง (flywheel)

ล้อตุ้มกำลังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อขจัดเซาระดับแรงดันไฟฟ้าตกในระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้า และกักเก็บพลังงานจากการเบรกเพื่อนำกลับมาจ่ายพลังงานให้รถไฟฟ้า หรือเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากรณีที่ไม่ได้มีแหล่งจ่ายจากภายนอก โดยล้อตุ้มกำลังจะสะสมพลังงานในรูปของพลังงานจลน์ นอกจากนี้ ล้อตุ้มกำลังเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ เนื่องจากล้อตุ้มกำลังมีความถี่ในการสะสมและจ่ายพลังงานสูง และในกรณีที่ล้อตุ้มกำลังทำงานในโหมดเก็บสะสมพลังงาน ล้อตุ้มกำลังจะทำงานเป็นมอเตอร์และโรเตอร์ของล้อตุ้มกำลังจะมีความเร็วเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีที่ล้อตุ้มกำลังทำงานในโหมดจ่ายพลังงาน ล้อตุ้มกำลังจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโรเตอร์มีความเร็วลดลง (Dutta et al., 2018) นอกจากนี้ ความเร็วการหมุนและความถี่ของล้อตุ้มกำลังจะส่งผลถึงปริมาณพลังงานที่เก็บสะสมในล้อตุ้มกำลัง ชนิดของล้อตุ้มกำลังแบ่งออกได้เป็นล้อตุ้มกำลังชนิดความเร็วต่ำ โดยมีความเร็วต่ำกว่า 6000 rpm และล้อตุ้มกำลังชนิดความเร็วสูง โดยมีความเร็วสูงถึง 100000 rpm (Luo et al., 2015)

3.4 การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน

การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (regenerative braking) เป็นการเปลี่ยนการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่รถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีขับเคลื่อนในรถไฟฟ้ายุคใหม่ และจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าสู่รางตัวนำที่สาม สายตัวนำแคทีนารี หรืออุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ โดยเมื่อเกิดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้า สำหรับระบบจ่ายไฟรางตัวนำที่สามและสายตัวนำแคทีนารี กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายให้กับรถไฟฟ้าขบวนใกล้เคียงที่ทำงานในโหมดขับเคลื่อนขณะนั้นได้ สามารถช่วยป้องกันระบบไฟฟ้าล้มเหลวเนื่องจากกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานกรณีไหลดไฟฟ้ามีค่าน้อยเมื่อเกิดการเบรก และสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ เมื่อเกิดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน กระแสไฟฟ้าจะไหลกลับไปสู่อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งเป็นการชาร์จพลังงานให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ ทำให้สามารถรองรับสำหรับโหลดผู้โดยสารในกรณีฉุกเฉิน โดยการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานจะทำงานร่วมกับการเบรกแบบพลาวัต ซึ่งเป็นการนำกำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกจ่ายให้กับตัวต้านทานการเบรก เพื่อกำจัดพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินมานั้นให้หายไปในรูปแบบของพลังงานความร้อน (กุลววานิชพงษ์, 2561)

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีต่าง ๆ ของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบาในปัจจุบัน เทคโนโลยีแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้ารางเบาแบบบนขบวนรถ และการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และเป็นรายละเอียดที่สำคัญสำหรับการทำความเข้าใจการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ ในบทถัดไป

บทที่ 4

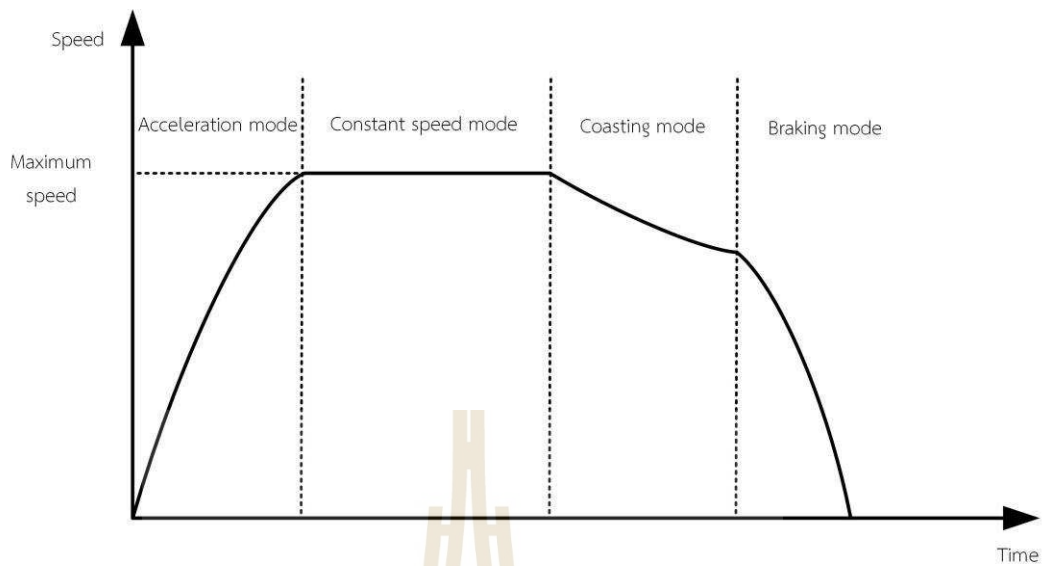
การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ บนขบวนรถ

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถของระบบขนส่งรางเบาโครงการ Korat LRT สายสีเขียว โดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และแบบจำลองของแบตเตอรี่อย่างง่ายในการแทนที่พฤติกรรมของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ ยังมี การนำเสนอผลกระทบจากตำแหน่งในการชาร์จที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเป็น 6 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 คือ การชาร์จทุก ๆ 1 สถานี กรณีที่ 2 คือ การชาร์จทุก ๆ 2 สถานี กรณีที่ 3 คือ การชาร์จทุก ๆ 3 สถานี กรณีที่ 4 คือ การชาร์จทุก ๆ 5 สถานี กรณีที่ 5 คือ การชาร์จที่สถานีปลายทาง และกรณีที่ 6 คือ การชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ โดยมีการพิจารณาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ และค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จ เพื่อหากรณีที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีอยู่ และมีการพิจารณาการประหยัดพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน และได้เสนอการเคลื่อนที่ในโหมดแล่น โดยจะได้ผลลัพธ์เป็นลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อใช้อ้างอิงในการหา ลักษณะความเร็วที่เหมาะสมเพื่อลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดในบทถัดไป

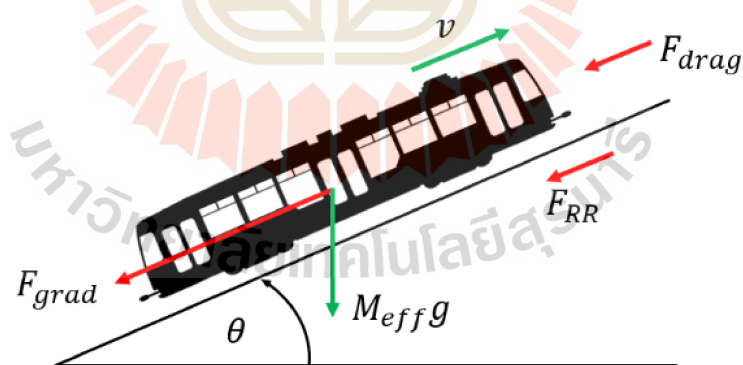
4.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา

บทความนี้ได้ศึกษาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา โดยโหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา มี 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (Acceleration mode) คือ การที่รถไฟฟ้ารางเบา มีการเพิ่มความเร็วจากภาวะหยุดนิ่งด้วยความเร่งเพื่อเพิ่มความเร็วของรถไฟฟ้ารางเบาให้เคลื่อนที่ตามลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า โดยค่าความเร่งจะมีค่ามากกว่าศูนย์ โหมดความเร็วคงที่ (Constant speed mode) คือ การที่รถไฟฟ้ารางเบา มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยความเร่งมีค่าเป็นศูนย์ โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย (Coasting mode) คือ การที่รถไฟฟ้ารางเบา มีความเร็วลดลงเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและมีแรงฉุดของรถไฟฟ้าเป็นศูนย์ และ ความเร่งมีค่าเป็นลบ และสุดท้าย ได้แก่ โหมดเบรก (Braking mode) คือ การที่รถไฟฟ้ารางเบา ลดความเร็วลงด้วยความหน่วงหรือความเร่งที่มีค่าเป็นลบ เพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร โดยลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา พิจารณาโดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งได้พิจารณาแรง F_{RR} คือ แรงเสียดทานที่ต้านการเคลื่อนที่ F_{grad} คือ แรงโน้มถ่วง และ F_{drag} คือ แรงต้านอากาศ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา

โดยสามารถคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่และระยะทางที่รถเคลื่อนที่ได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าและแรงฉุดที่รถไฟฟ้ารางเบาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ได้จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ โดยแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา มีหลักการทำงานดังรูปที่ 4.3

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a \times \Delta t \quad (4.1)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) \times \Delta t + 0.5 \times a \times (\Delta t)^2 \quad (4.2)$$

$$P_{train} = \begin{cases} \frac{F_T v(t + \Delta t)}{\eta_g \eta_m \eta_i} + P_{aux} & , F_T \geq 0 \\ \eta_g \eta_m \eta_i F_T v(t + \Delta t) + P_{aux} & , F_T < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.1) ถึง (4.3)

v	คือ ความเร็วของรถไฟฟ้ารางเบา (km/h)
s	คือ ระยะทางที่รถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ได้ (m)
t	คือ เวลารวมที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้เคลื่อนที่ทั้งหมด (s)
Δt	คือ เวลาที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้เคลื่อนที่ (s)
a	คือ ความเร่งของรถไฟฟ้ารางเบา (m/s ²)
P_{train}	คือ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา (kW)
F_T	คือ แรงจุดหัวรถจักร (N)
η_g	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเกียร์
η_m	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมอเตอร์
η_i	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอินเวอเตอร์
P_{aux}	คือ กำลังไฟฟ้าอื่น ๆ (Auxiliary power) (kW)

$$F_T = M_{eff} a + F_R \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4)

M_{eff}	คือ น้ำหนักของรถไฟฟ้ารางเบา (kg)
F_R	คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ (N)

$$F_R = F_{RR} + F_{grad} + F_{drag} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5)

F_{RR}	คือ แรงเสียดทานที่ต้านการเคลื่อนที่ (N)
----------	---

F_{grad} คือ แรงโน้มถ่วง (N)

F_{drag} คือ แรงต้านอากาศ (N)

$$F_{RR} = f_{RR} W \quad (4.6)$$

$$F_{grad} = \pm M_{eff} g \sin \theta \quad (4.7)$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} c_d A_F v_{air}^2 \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.6) ถึง (4.8)

f_{RR} คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

W คือ น้ำหนักโหลตของแกนขับเคลื่อน (kg)

g คือ ความเร่งแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

θ คือ ค่ามุมของความชันของพื้น (degree)

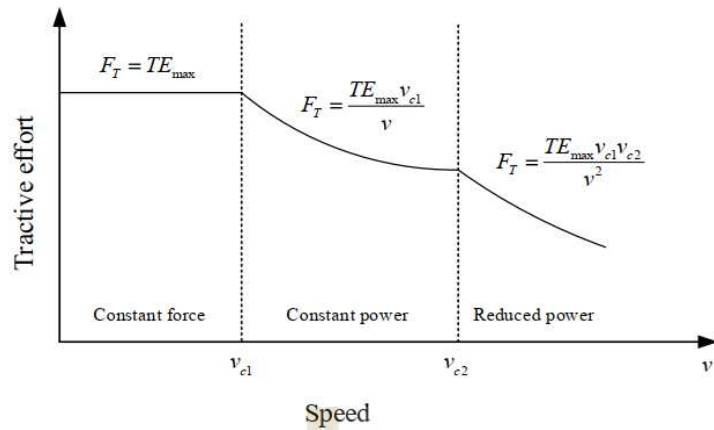
ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

c_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (N/m^3)

A_F คือ พื้นที่ด้านหน้าของรถไฟฟารางเบาที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ (m^2)

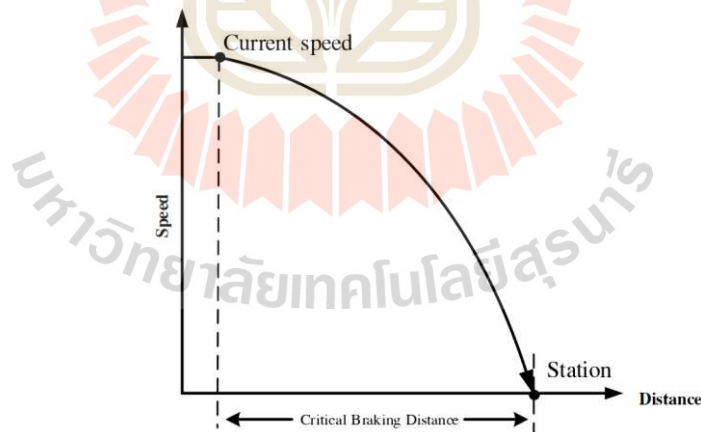
v_{air} คือ ความเร็วสัมพัทธ์การไหลของอากาศเทียบกับความเร็วรถไฟฟารางเบา (m/s)

ลักษณะคุณสมบัติของหัวรถจักรไฟฟ้านิยมนิยมหรือแรงฉุดหัวรถจักรไฟฟ้า (Tractive force: F_T) เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ส่งผ่านเฟืองทด โดยแรงฉุดหัวรถจักรไฟฟ้าจะแปรผันตามความเร็วเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทำงาน ได้แก่ ช่วงแรงฉุดคงที่ (Constant force) ช่วงกำลังงานคงที่ (Constant power) และช่วงกำลังงานลดทอน (Reduced power) ในช่วงกำลังงานคงที่ แรงบิดของมอเตอร์จะลดลงโดยยังสามารถจ่ายกำลังคงที่ให้โหลตได้ และช่วงกำลังงานลดทอน คือ ช่วงที่แรงบิดลดลงโดยผกผันกับความเร็วกำลังสอง สำหรับการเปลี่ยนโหมดการทำงานในช่วงต่าง ๆ จะขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อรถไฟฟารางเบาที่มีความเร็วมากกว่าความเร็วฐาน (v_{c1} หรือ v_{c2}) ดังรูปที่ 4.3 (กุลวรรวานิชพงษ์, 2561)



รูปที่ 4.3 ลักษณะคุณสมบัติของแรงฉุดหัวรถจักรไฟฟ้ากับความเร็วจึงเส้น
ที่มาภาพ: (Sutphrom, 2019)

รถไฟฟารางเบาจะเริ่มเข้าสู่การทำงานในโหมดเบรกเมื่อระยะห่างตำแหน่งของรถรางน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะวิกฤติการเบรก (Critical Braking Distance: *CBD*) เพื่อการเข้าจอดที่สถานี ผู้โดยสารได้อย่างแม่นยำ โดยแผนภาพระยะวิกฤติการเบรกแสดงดังรูปที่ 4.4 และสามารถคำนวณระยะเริ่มเบรกได้จากสมการที่ (4.9) (สัมภาวะคุปต์, 2560)



รูปที่ 4.4 แผนภาพระยะวิกฤติการเบรก
ที่มาภาพ: (สัมภาวะคุปต์, 2560)

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{a_{dec}} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.9)

v คือ ความเร็วของรถรางขณะนั้น (m/s)

a_{dec} คือ ความหน่วงมีค่าเป็นลบ (m/s²)

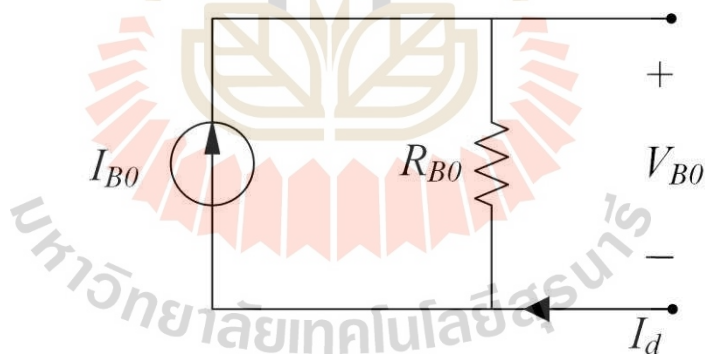
$$E = \int_0^t P_{train} dt \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10)

E คือ พลังงานที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh)

4.3 แบบจำลองของแบตเตอรี่

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะใช้แหล่งจ่ายที่เป็นแบตเตอรี่โดยมองเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่เป็นแบบจำลองอย่างง่าย (กุลวรรานิชพงษ์, 2561) ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่จะมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (4.11) (4.12) และ (4.13) และสามารถหาค่าระดับการเก็บประจุหรือชาร์จไฟของแบตเตอรี่ ดังสมการที่ (4.15)



รูปที่ 4.5 แบบจำลองของแบตเตอรี่

$$I_{B0} = \frac{kWh}{3600 \times V_{B0}} \quad (4.11)$$

$$R_{B0} = \frac{V_{B0}}{I_{B0}} \quad (4.12)$$

$$V_{B0} = R_{B0} \times (I_{B0} - I_d) \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.11) ถึง (4.13)

I_{B0} คือ ความจุกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแบตเตอรี่ (Ah)

kWh คือ ความจุของแบตเตอรี่ (kWh)

R_{B0} คือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Ω)

V_{B0} คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)

I_d คือ กระแสไฟฟ้าโหลด (A) คำนวณได้จากสมการที่ (4.14)

$$I_d = \frac{P_{train}}{V_{B0}} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14)

P_{train} คือ กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่ (kW)

$$\%SOC(t + \Delta t) = \%SOC(t) + \int_t^{t+\Delta t} \frac{I_d}{C_{bat}} dt \times 100 \quad (4.15)$$

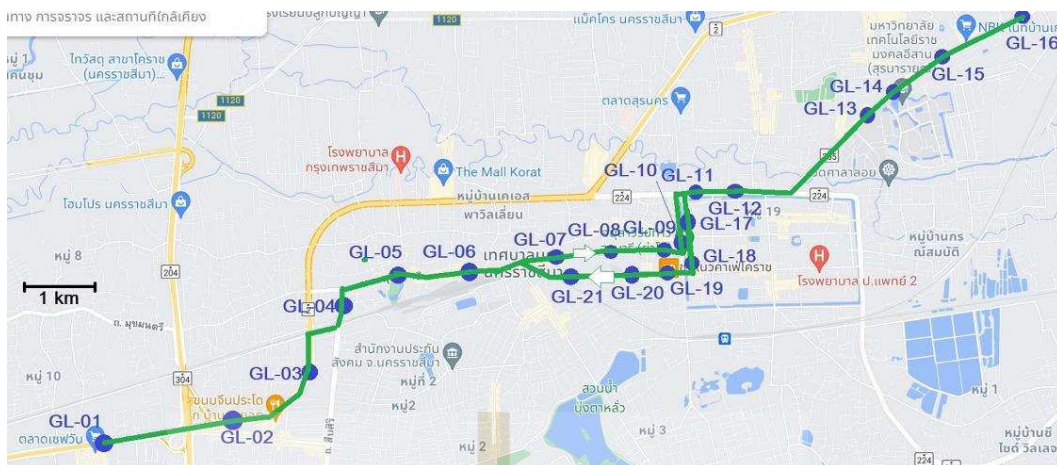
จากสมการที่ (4.15)

$\%SOC$ คือ ระดับการเก็บประจุหรือการชาร์จไฟของแบตเตอรี่ (%)

C_{bat} คือ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Ah)

4.4 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา

ศึกษาการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา โดยใช้เส้นทางของโครงการ Korat LRT สายสีเขียว เป็นข้อมูลในการจำลอง ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 21 สถานี โดยให้บริการตั้งแต่สถานีที่ 1 ตลาดเซฟวัน ถึงสถานีที่ 16 บ้านนารีสวัสดิ์ ในการจำลองนี้ได้จำลองการเดินทางทั้งขาไปและขากลับ ระยะทางรวมทั้งหมดประมาณ 22 km โดยจะมีช่วงที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ทางร่วมกับถนนสาธารณะ และใช้ทางเฉพาะ ซึ่งจะมีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่แต่ละสถานีแตกต่างกัน และเส้นทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เส้นทางรถโดยสารของโครงการ Korat LRT สายสีเขียว
ที่มาภาพ: (Jobsoongnern et al., 2012)

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละสถานีนั้น จะมีความเร็วในการให้บริการแต่ละสถานี คือ 50 km/h 35 km/h และ 30 km/h โดยแต่ละสถานีมีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ที่ต่างกัน เนื่องจากบางเส้นทางระหว่างสถานีรถไฟฟ้างบฯใช้ทางร่วมกับถนนสาธารณะจึงไม่สามารถใช้ระบุความเร็วที่แน่นอนได้ โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ในแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งการเคลื่อนที่ขาไปเคลื่อนที่จากสถานีตลาดเซฟวัน (GL-01) ไปยังสถานีบ้านนารีสวรรค์ (GL-16) และการเคลื่อนที่ขากลับ จากสถานีบ้านนารีสวรรค์ (GL-16) ไปยังสถานีตลาดเซฟวัน (GL-01) และค่าพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้างบฯที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ขาไปของแต่ละสถานี

สถานี	ชื่อสถานี	ความเร็ว (km/h)
GL-01	ตลาดเซฟวัน	-
GL-02	ตลาดมิตรภาพ	50
GL-03	อู่เข็ดชัย	50
GL-04	สำนักงานคุมประพฤติ	30
GL-05	สวนภูมิรักษ์	30
GL-06	ห้วยรถไฟ	30
GL-07	เทศบาลนครราชสีมา	30
GL-08	ศาลเจ้าวัดแดง	-

ตารางที่ 4.1 ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ขาไปของแต่ละสถานี (ต่อ)

สถานี	ชื่อสถานี	ความเร็ว (km/h)
GL-09	ตลาดใหม่แม่กิมเฮง	-
GL-10	สวนรัก	-
GL-11	แยกประปา	-
GL-12	โรงเรียนสุนารี	35
GL-13	ราชภัฏ	35
GL-14	ราชมงคล	35
GL-15	บ้านเมตตา	35
GL-16	บ้านนารีสวรรค์	35

ตารางที่ 4.2 ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ขากลับของแต่ละสถานี

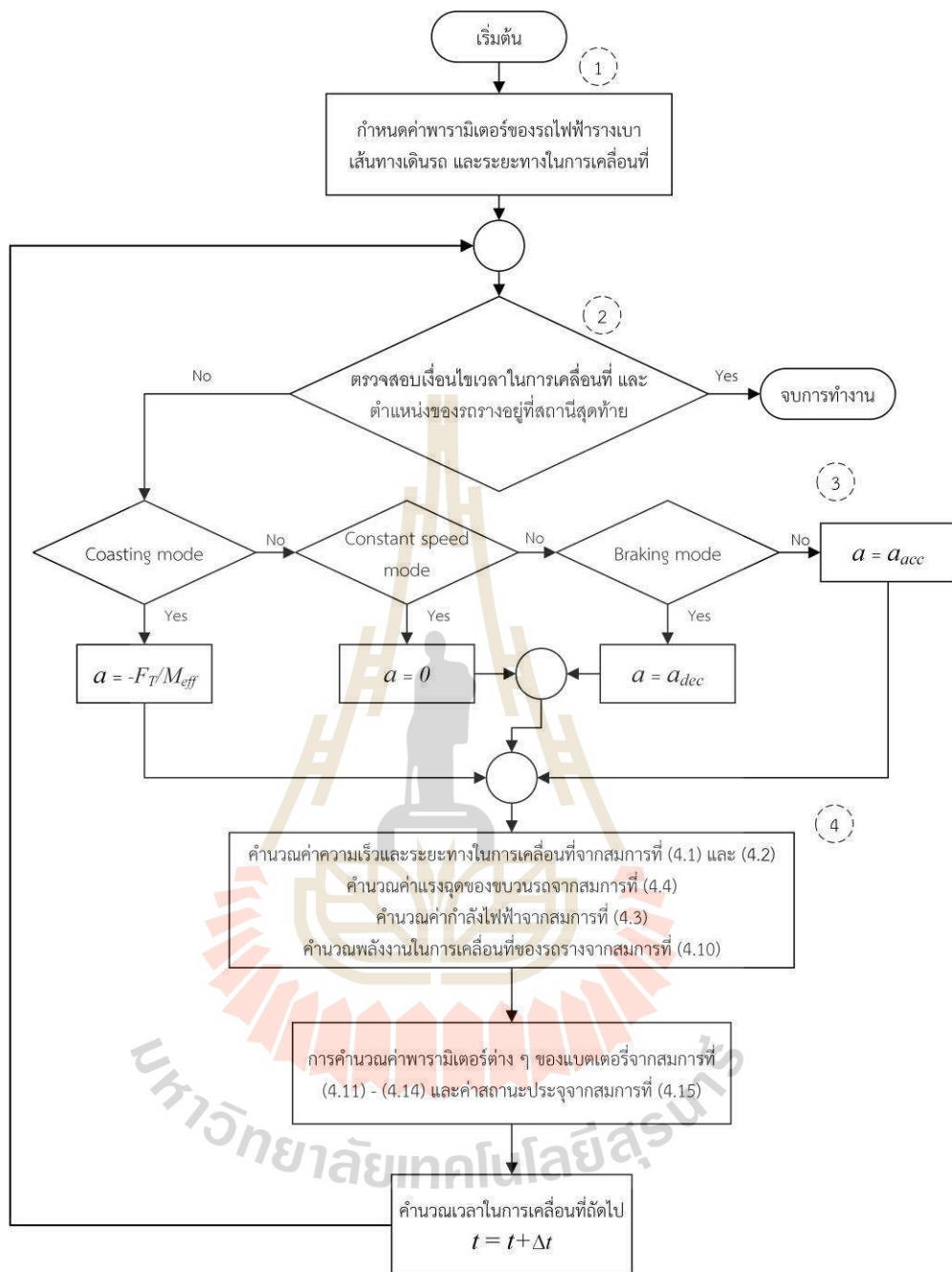
สถานี	ชื่อสถานี	ความเร็ว (km/h)
GL-16	บ้านนารีสวรรค์	-
GL-15	บ้านเมตตา	35
GL-14	ราชมงคล	35
GL-13	ราชภัฏ	35
GL-12	โรงเรียนสุนารี	35
GL-17	แยกประปา	35
GL-18	สวนรัก	-
GL-19	ศาลากลางจังหวัด	-
GL-20	ตลาดใหม่แม่กิมเฮง	-
GL-21	ศาลเจ้าวัดแดง	-
GL-07	เทศบาลนครราชสีมา	30
GL-06	ห้วยรถไฟ	30
GL-05	สวนภูมิรักษ์	30
GL-04	สำนักงานคุมประพฤติ	30
GL-03	อุ้เข็ดชัย	50
GL-02	ตลาดมิตรภาพ	50
GL-01	ตลาดเซฟวัน	50

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้ารางเบาที่ใช้ในการจำลอง

Parameters	Value
Acceleration (a_{acc})	0.7 km/s ²
Deceleration (a_{dec})	-0.7 km/s ²
Effective mass (M_{eff})	44000 kg
Rolling resistance coefficient (f_{RR})	0.006
Aerodynamic drag coefficient (c_d)	0.6
Air density (ρ_{air})	1.225 kg/m ³
Frontal area (A_F)	8.4 m ²
Gearbox efficiency (η_g)	0.93
Motors efficiency (η_m)	0.9
Inverter efficiency (η_i)	0.9
Auxiliary power (P_{aux})	20 kW
Maximum tractive effort (TE_{max})	50 kN
Maximum braking effort (BE_{max})	50 kN

การทำงานของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถแสดงดังรูปที่ 4.7 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

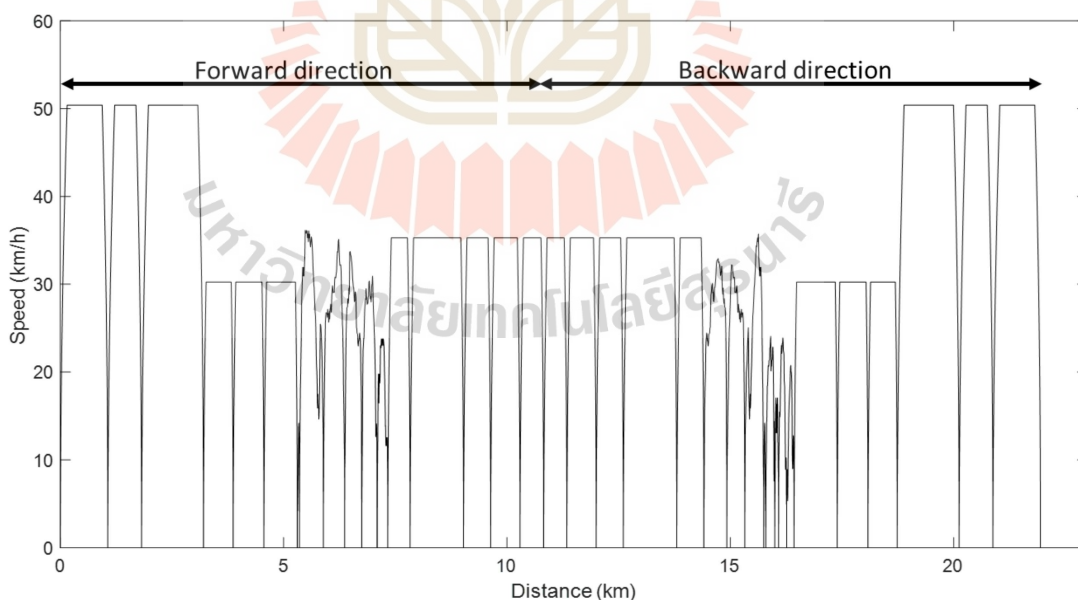
- (1) กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของรถไฟฟ้ารางเบา เส้นทางเดินรถและระยะทางในการเคลื่อนที่
- (2) ตรวจสอบเงื่อนไขหากเวลาในการคำนวณหรือตำแหน่งของรถไฟฟ้ารางเบายังไม่ใช้ค่าสุดท้าย ให้ดำเนินการคำนวณต่อไป หากไม่ใช่ให้จบการทำงาน
- (3) ตรวจสอบเงื่อนไขโหมดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ เพื่อกำหนดค่าความเร่ง โดยหากใช้โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยหรือ Coasting ความเร่งจะมีค่าดังนี้ $a = -F_T/M_{eff}$ หากใช้โหมดความเร็วคงที่ $a = 0$ หากใช้โหมดเบรก $a = a_{dec}$ หากไม่ใช่โหมดที่กล่าวมา คือ โหมดเร่งความเร็ว $a = a_{acc}$
- (4) เริ่มจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของรถไฟฟ้ารางเบา โดยคำนวณแรงจุดกำลังไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ จำนวนความเร็ว ระยะทางในการเคลื่อนที่ และจำนวนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ จากนั้นวนซ้ำการคำนวณในขั้นตอนที่ (2)



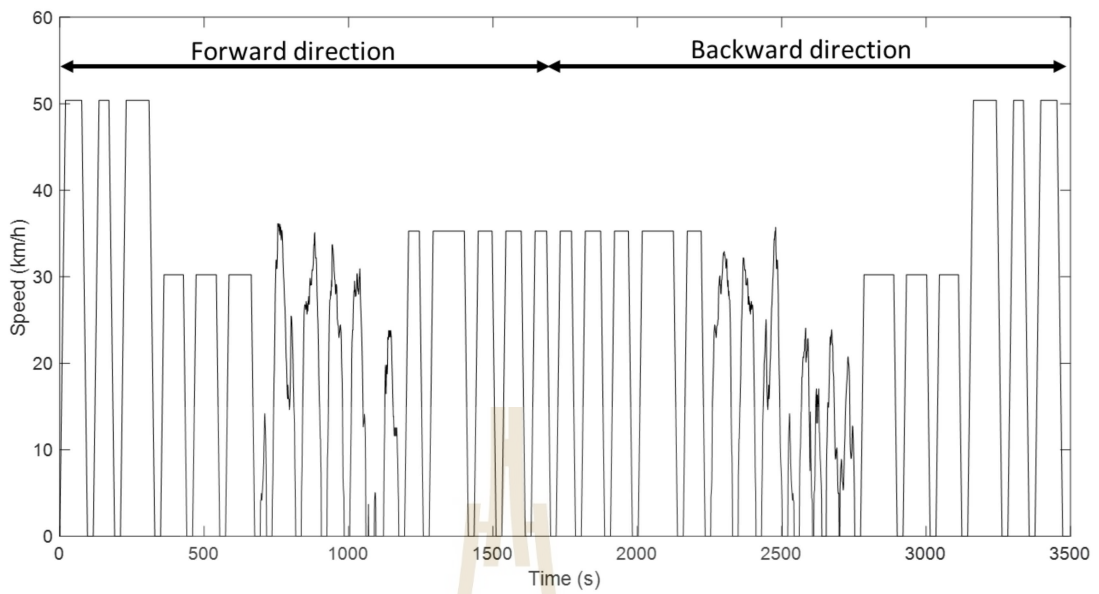
รูปที่ 4.7 หลักการทำงานของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ

4.5 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา

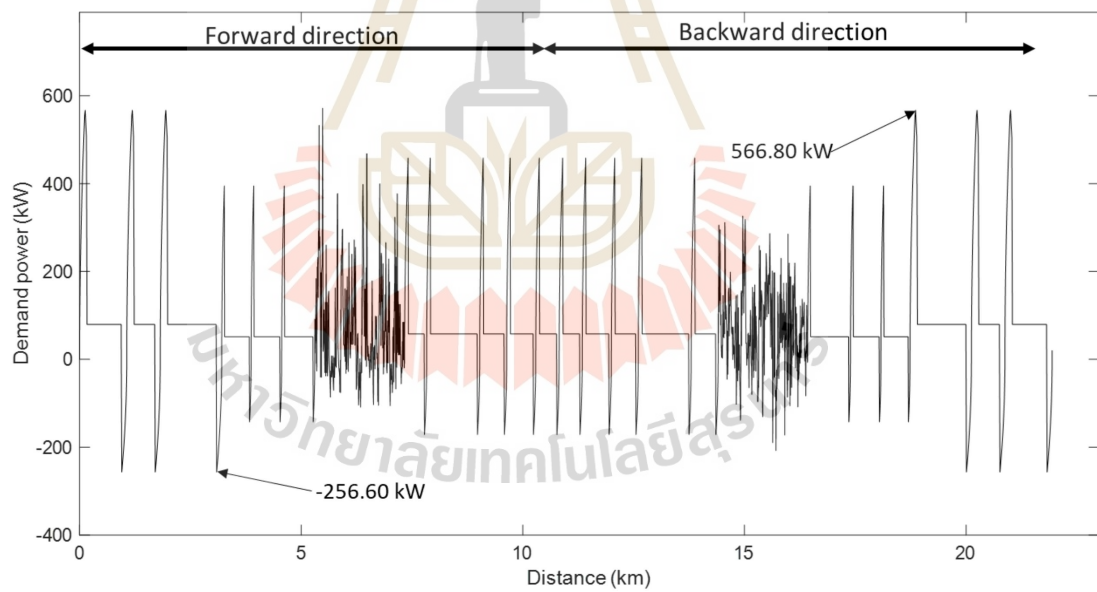
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา มีลักษณะของความเร็วในการเคลื่อนที่ขาไป (Forward direction) และขากลับ (Backward direction) ในแต่ละสถานี ดังรูปที่ 4.8 เทียบกับระยะทางโดยมีความเร็วสูงสุด คือ 50 km/h และระยะทางรวมทั้งหมดประมาณ 22 km ลักษณะของความเร็วเมื่อเทียบกับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อให้ขบวนรถจอดรับผู้โดยสารแต่ละสถานีเป็นเวลา 20 วินาที ทำให้ระยะเวลาในการเดินทางทั้งหมดเป็น 3494 วินาที และจากรูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา จะเห็นว่าช่วงเวลาที่รถไฟฟ้ารางเบาเร่งความเร็วจาก 0 km/h จนถึงความเร็วคงที่ ค่าของกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลานั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุด คือ 566.80 kW และในช่วงเวลาที่รถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ค่ากำลังไฟฟ้าก็จะลดลงเหลือน้อยกว่าช่วงที่เร่งความเร็วมาก เมื่อถึงช่วงที่รถไฟฟ้ารางเบาชะลอความเร็วค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าติดลบโดยมีค่าน้อยที่สุด คือ -256.60 kW และจากรูปที่ 4.11 แสดงถึงแรงฉุดของขบวนรถโดยในการเคลื่อนที่ในช่วงที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ทางเฉพาะ ค่าของแรงฉุดจะมีค่าไม่ถึงค่าแรงฉุดสูงสุดที่ 50 kN และในช่วงที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ร่วมกับถนนสาธารณะจะมีค่าแรงฉุดสูงสุด เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความเร่งให้มีค่าตามที่กำหนดได้ และจากรูปที่ 4.12 แสดงถึงพลังงานในการเคลื่อนที่สะสมของรถไฟฟ้ารางเบาเมื่อเคลื่อนที่มาถึงสถานีสุดท้าย มีค่าเท่ากับ 70.60 kWh



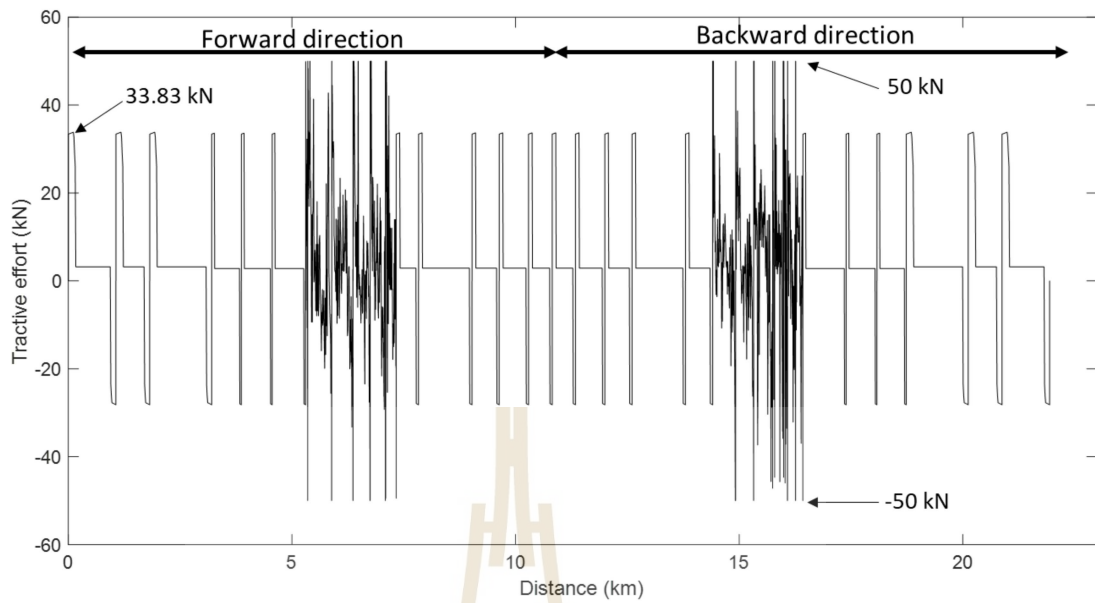
รูปที่ 4.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาเทียบกับระยะทาง



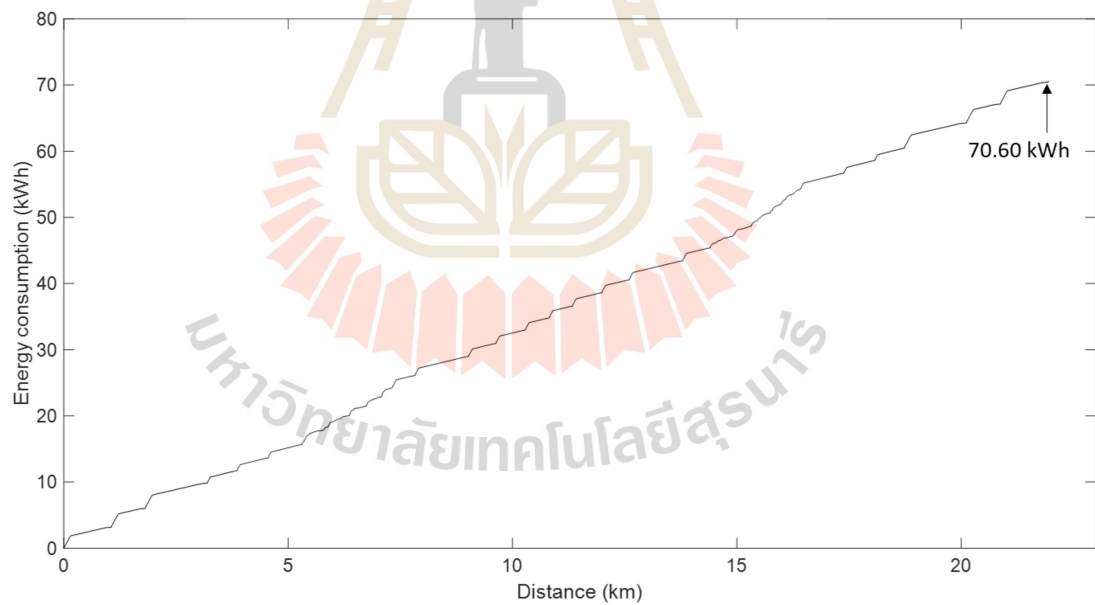
รูปที่ 4.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าของรางเบาเทียบกับระยะทาง



รูปที่ 4.11 แรงจุดของรถไฟฟ้ารางเบาเทียบกับระยะทาง



รูปที่ 4.12 พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาเทียบกับระยะทาง

4.5.1 ขนาดของแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีและผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่

การจำลองนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 6 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ชาร์จทุก ๆ สถานี กรณีที่ 2 ชาร์จทุก ๆ 2 สถานี กรณีที่ 3 ชาร์จทุก ๆ 3 สถานี กรณีที่ 4 ชาร์จทุก ๆ 5 สถานี กรณีที่ 5 ชาร์จที่สถานีปลายทาง และกรณีที่ 6 ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งแต่ละกรณีจะจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาโดยการใช้แบตเตอรี่โมดูล 24 V, 70 Ah ที่ผลิตโดยบริษัท Altairnano ดังรูปที่ 4.13 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่โมดูล ดังตารางที่ 4.5 ใช้ในการจำลองเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับรถไฟฟ้ารางเบา ซึ่งขนาดของแบตเตอรี่แพคที่ใช้ในการจำลองจะแตกต่างกัน ขนาดของแบตเตอรี่แพคจะแปรผันตามระยะห่างของจุดชาร์จในแต่ละกรณี



รูปที่ 4.13 แบตเตอรี่โมดูลที่ใช้ในการจำลอง ผลิตโดย Altairnano
ที่มาภาพ: <https://altairnano.com/products/battery-module/>
[เข้าถึงเมื่อ 25 สิงหาคม 2563]

ตารางที่ 4.4 กรณีศึกษาของตำแหน่งในการชาร์จ

กรณี	ตำแหน่งการชาร์จ
1	ชาร์จทุก ๆ สถานี
2	ชาร์จทุก ๆ 2 สถานี
3	ชาร์จทุก ๆ 3 สถานี
4	ชาร์จทุก ๆ 5 สถานี
5	ชาร์จที่สถานีปลายทาง
6	ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป - กลับ

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ของโมดูลแบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลอง

Parameter	Battery module value
Nominal Voltage	24 V
Nominal capacity	70 Ah
Nominal energy capacity	1.68 kWh
Maximum continuous charge/discharge	500 A
Maximum pulse charge/discharge (10 s)	900 A
Weight	28.4 kg

การคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานของรถไฟฟ้ารางเบา ในงานวิจัยนี้พิจารณาจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดในขณะที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้เร่งความเร็ว และพลังงานที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่จากสถานีแรกถึงสถานีที่มีจุดชาร์จถัดไปของแต่ละกรณี ซึ่งแต่ละกรณีจะใช้พลังงานไม่เท่ากันเนื่องจาก เมื่อจุดชาร์จอยู่ห่างออกไปมากขึ้น ก็จำเป็นต้องใช้พลังงานในการเดินทางจนกว่าจะถึงจุดชาร์จมากขึ้นเช่นกัน ในการจำลองนี้ต้องการให้ค่าระดับประจุของแบตเตอรี่เริ่มต้นที่ 100% เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ไปถึงสถานีสุดท้ายแล้วยังมีค่าสถานะของประจุเหลืออยู่ประมาณ 30% ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้ออกแบบโดยใช้ค่าจากตารางที่ 4.5 ด้วยการอนุกรมโมดูลแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า และขนานโมดูลแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณค่าของแบตเตอรี่เบื้องต้นได้จากสมการที่ (4.16) (Jobsoongnern et al., 2022) ซึ่งขนาดของแบตเตอรี่แพคที่ใช้ในการจำลองจะแตกต่างกัน ขนาดของแบตเตอรี่แพคจะแปรผันตามระยะห่างของจุดชาร์จในแต่ละกรณี

$$E_{OB} = k_I \times \max_{i=1:n-1} E_{i,i+1} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.16)

E_{OB} คือ ค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่ (kWh)

$E_{i,i+1}$ คือ พลังงานในการเคลื่อนที่แต่ละสถานีที่มีจุดชาร์จ (kWh) โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$

k_I คือ ค่าสัมประสิทธิ์การออกแบบ

n คือ จำนวนสถานีผู้โดยสารที่มีจุดชาร์จ

k_I จะได้จากการประมาณค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่จากสมการที่ (4.16) เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 โดยทำการปรับลดหรือเพิ่ม k_I เพื่อให้ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่เมื่อให้บริการทั้งขาไปและขากลับของแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียง 30% มากที่สุด แต่เนื่องจากค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่ที่คำนวณจากสมการที่ (4.16) ของกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 4 เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาจอดชาร์จที่สถานีผู้โดยสารด้วยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่จากการคำนวณไม่สามารถประจุพลังงานให้เต็มได้ในแต่ละจุดชาร์จ จึงใช้ค่าความจุพลังงานของแบตเตอรี่เริ่มต้นเดียวกันกับกรณีที่ 6 คือ 70.60 kWh และมีการปรับด้วย k_I ให้มีความเหมาะสมในแต่ละกรณี ในส่วนของกรณีที่ 5 พลังงานในการเคลื่อนที่ระหว่างจุดชาร์จที่มากที่สุด คือ 35.80 kWh และปรับให้เหมาะสมด้วย k_I ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีต่างแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แพคในกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี

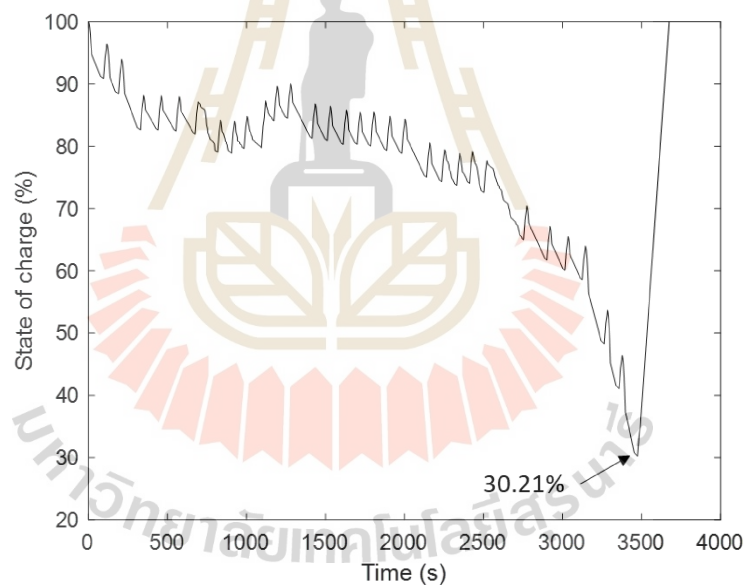
Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
k_I	0.5	0.9	1.1	1.4	3.8	2.1
Nominal Voltage (V)	528	456	552	696	648	696
Nominal capacity (Ah)	70	140	140	140	210	210
Nominal energy capacity (kWh)	36.96	63.84	77.28	97.44	136.08	146.16
Maximum continuous charge/discharge (A)	500	1000	1000	1000	1500	1500
Maximum pulse charge/discharge (10 s) (A)	900	1800	1800	1800	2700	2700
Weight (kg)	616	1064	1288	1624	2268	2436

4.5.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยมีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่

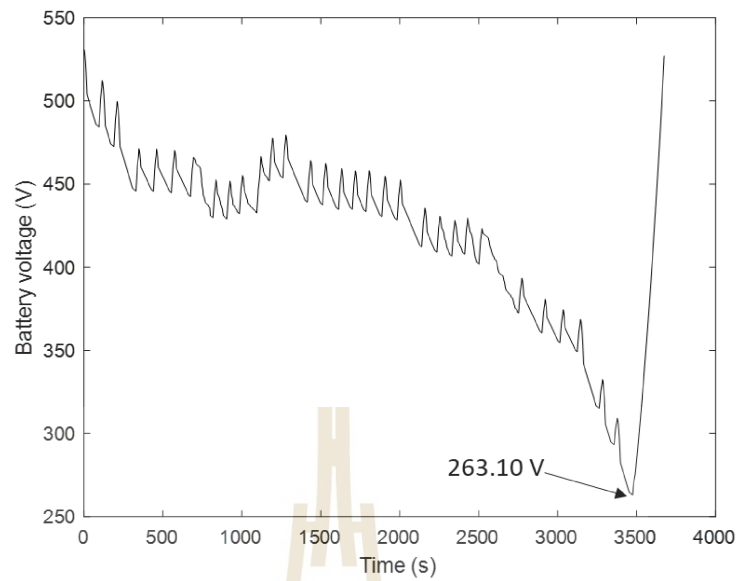
การจำลองนี้ได้พิจารณาเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้จากแบตเตอรี่เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก และเมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ที่สถานี ขณะจอดรับผู้โดยสารเป็นเวลา 20 วินาที งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ค่ากระแสสูงสุดในการชาร์จ โดยค่ากระแสแต่ละกรณีจะแตกต่างกันตามขนาดพิกัดของแบตเตอรี่ในกรณีนั้น ๆ เมื่อสิ้นสุดการเดินทางไป-กลับ การชาร์จจะดำเนินการต่อไป จนกระทั่งแบตเตอรี่มีค่าระดับประจุเท่ากับ 100% และเมื่อมีการพิจารณาพลังงานจากการเบรก จะเกิดการชาร์จพลังงานกลับเข้าแบตเตอรี่ มีผลการจำลองดังนี้

- กรณีที่ 1 ชาร์จทุก ๆ สถานี เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟพารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.14 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 30.21% และจากรูปที่ 4.15 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 263.10 V

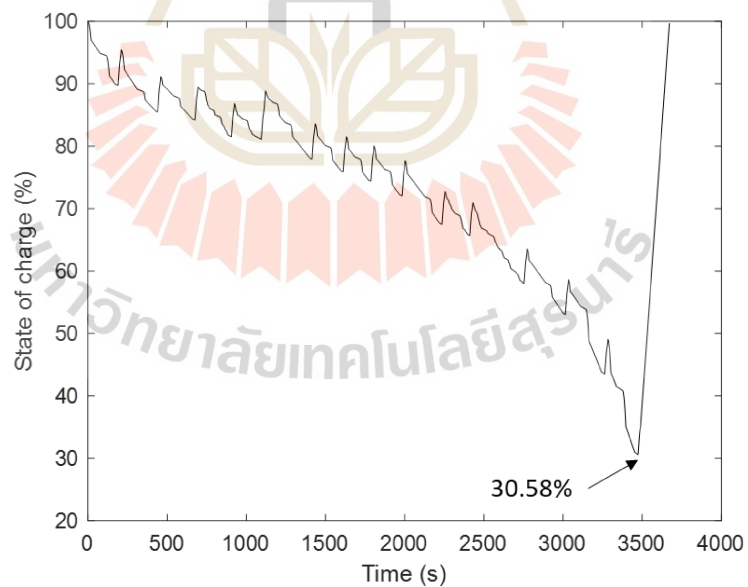


รูปที่ 4.14 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 1 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

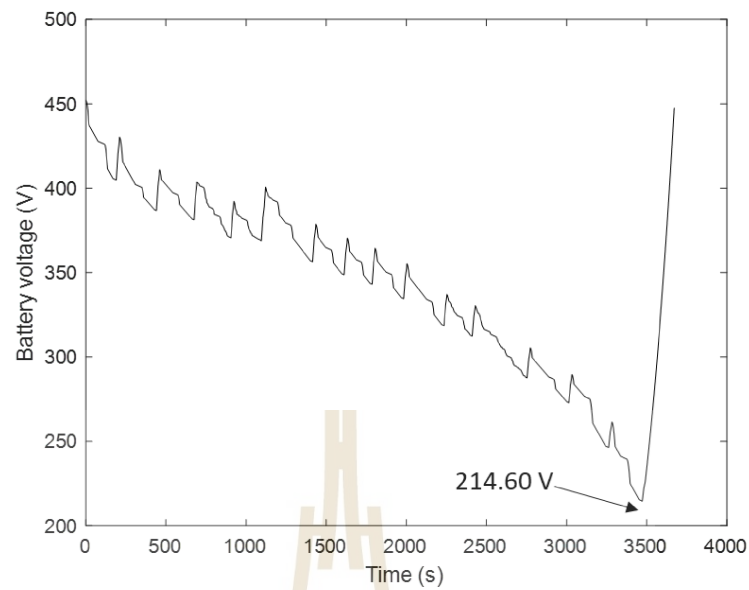


รูปที่ 4.15 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 1 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

- กรณีที่ 2 ชาร์จทุก ๆ 2 สถานี เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



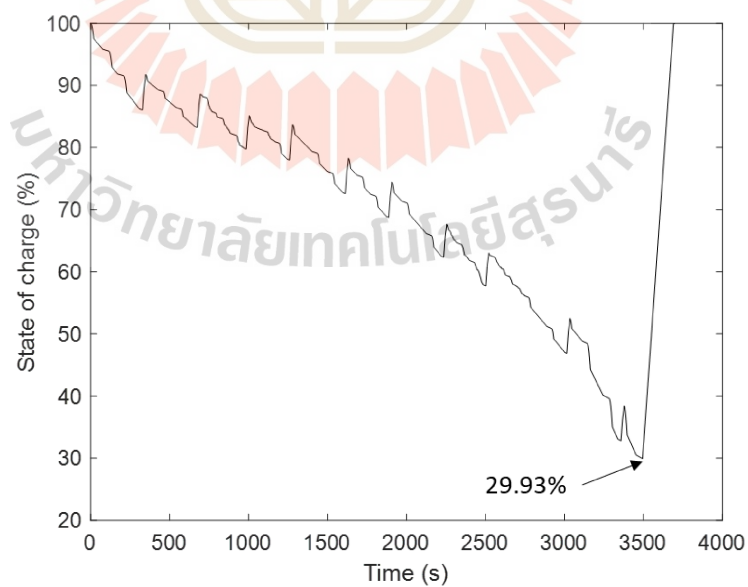
รูปที่ 4.16 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 2 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



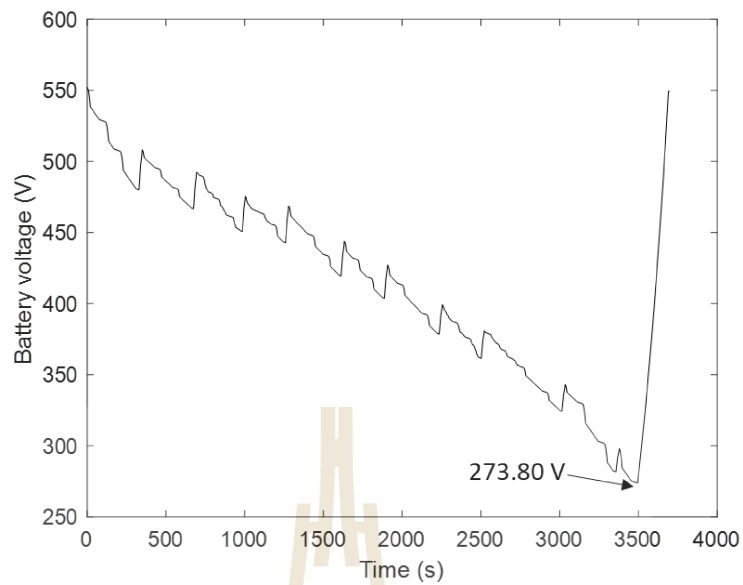
รูปที่ 4.17 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 2 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟ้าวิ่งเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.16 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 30.58% และจากรูปที่ 4.17 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 214.60 V

- กรณีที่ 3 ชาร์จทุก ๆ 3 สถานี เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



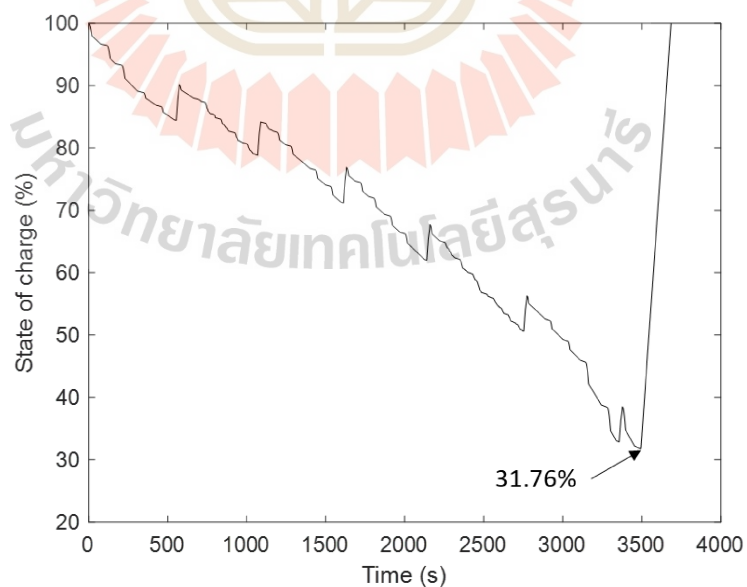
รูปที่ 4.18 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



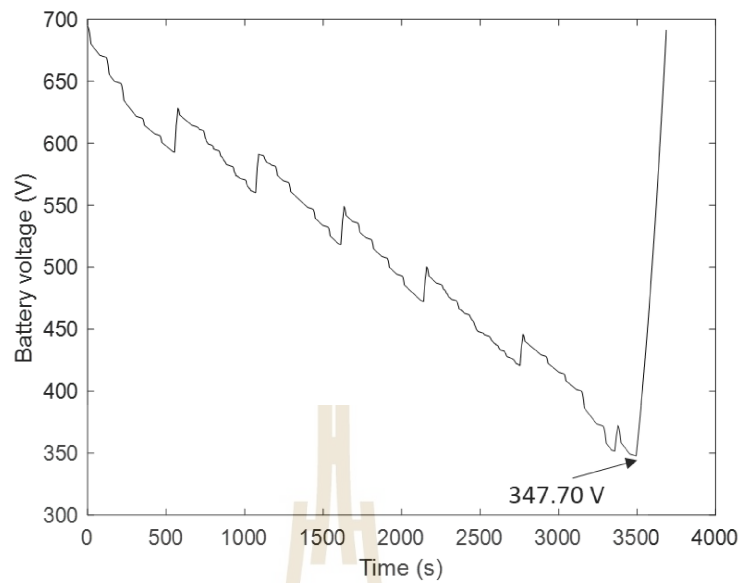
รูปที่ 4.19 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.18 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 29.93% และจากรูปที่ 4.19 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 273.80 V

- กรณีที่ 4 ชาร์จทุก ๆ 5 สถานี เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



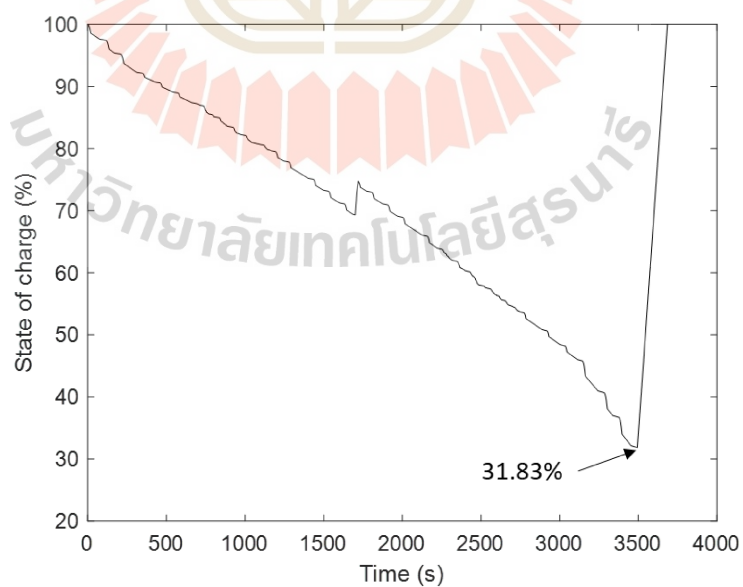
รูปที่ 4.20 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 4 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



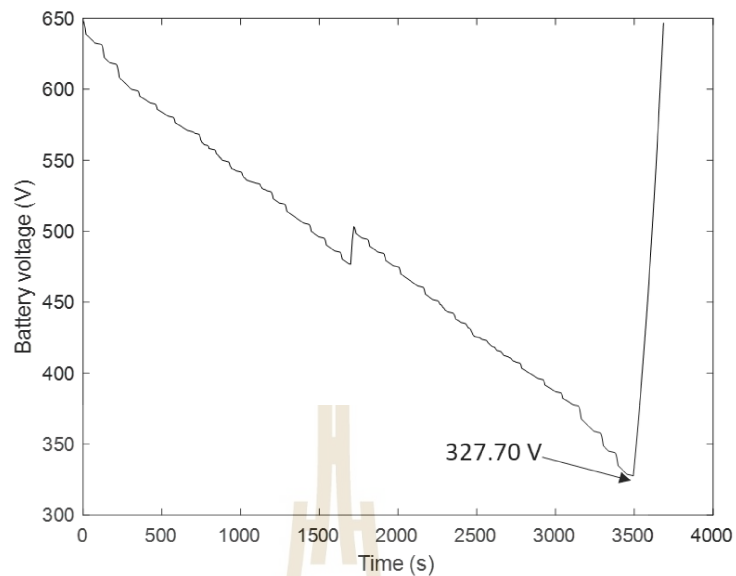
รูปที่ 4.21 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 4 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟ้าวิ่งเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.20 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 31.76% และจากรูปที่ 4.21 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 347.70 V

- กรณีที่ 5 ชาร์จทุกที่สถานีปลายทาง เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



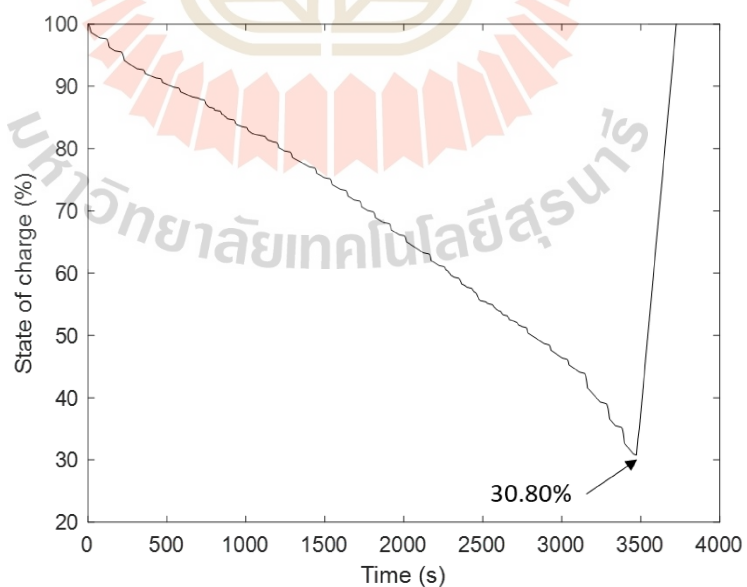
รูปที่ 4.22 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 5 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



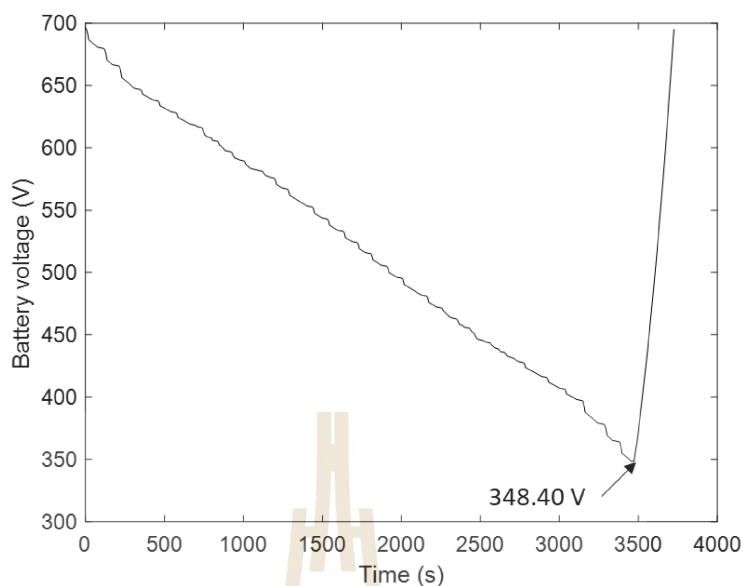
รูปที่ 4.23 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 5 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.22 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 31.83% และจากรูปที่ 4.23 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 327.70 V

- กรณีที่ 6 ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



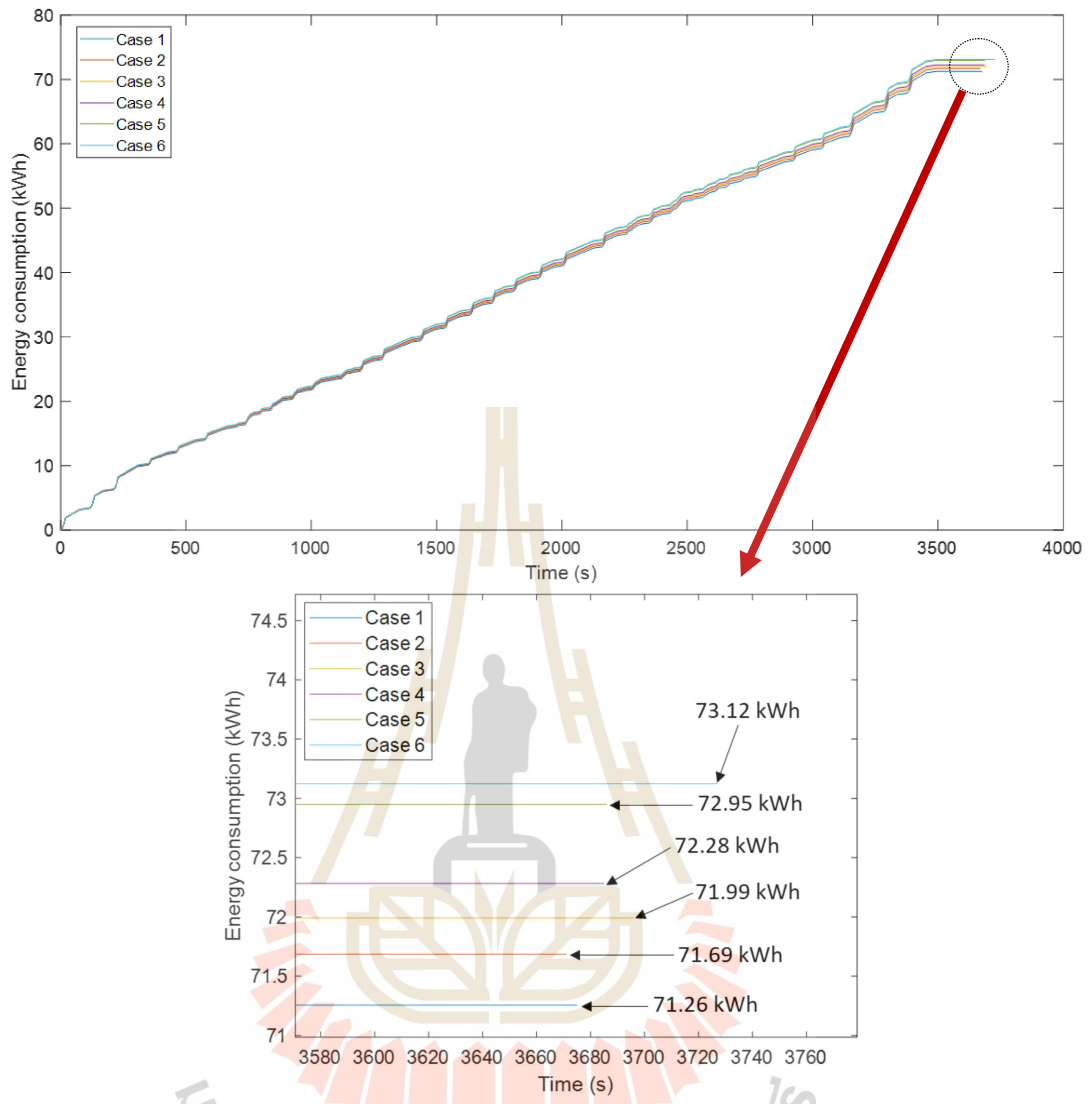
รูปที่ 4.24 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 6 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



รูปที่ 4.25 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 6 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

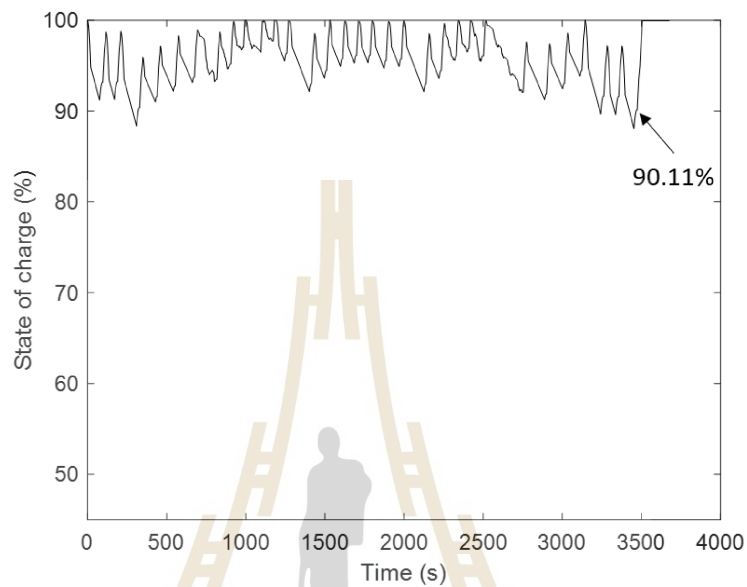
เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.24 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 30.80% และจากรูปที่ 4.25 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 348.40 V

จากรูปที่ 4.26 แสดงพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาในแต่ละกรณี พบว่า จากกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 6 พลังงานในการเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ กรณี เนื่องจากเมื่อตำแหน่งในการชาร์จมีระยะทางที่ไกลขึ้น ส่งผลให้รถไฟฟ้ารางเบาต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดพิกัดที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้ระดับประจุมีค่าใกล้เคียง 30% ในทุก ๆ กรณี เมื่อขนาดพิกัดของแบตเตอรี่ใหญ่ขึ้น ทำให้รถไฟฟ้ารางเบาต้องบรรทุกแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักมากขึ้น จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยแต่ละกรณีมีค่าพลังงาน ดังนี้ กรณีที่ 1 พลังงานในการเคลื่อนที่เท่ากับ 71.26 kWh กรณีที่ 2 พลังงานในการเคลื่อนที่เท่ากับ 71.69 kWh กรณีที่ 3 พลังงานในการเคลื่อนที่เท่ากับ 71.99 kWh กรณีที่ 4 พลังงานในการเคลื่อนที่เท่ากับ 71.99 kWh กรณีที่ 5 พลังงานในการเคลื่อนที่เท่ากับ 72.95 kWh ในการเคลื่อนที่สูงสุด คือ กรณีที่ 6 มีพลังงานในการเคลื่อนที่เท่ากับ 73.12 kWh และต่อไปจะแสดงผลการจำลอง เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

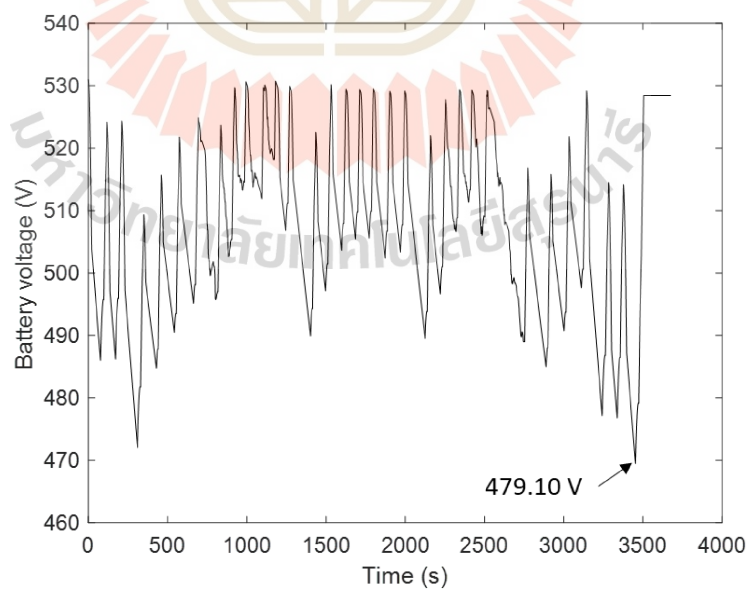


รูปที่ 4.26 พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแต่ละกรณีเทียบกับเวลา

- กรณีที่ 1 ชาร์จทุก ๆ สถานี เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.27 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 90.11% และจากรูปที่ 4.28 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 479.10 V

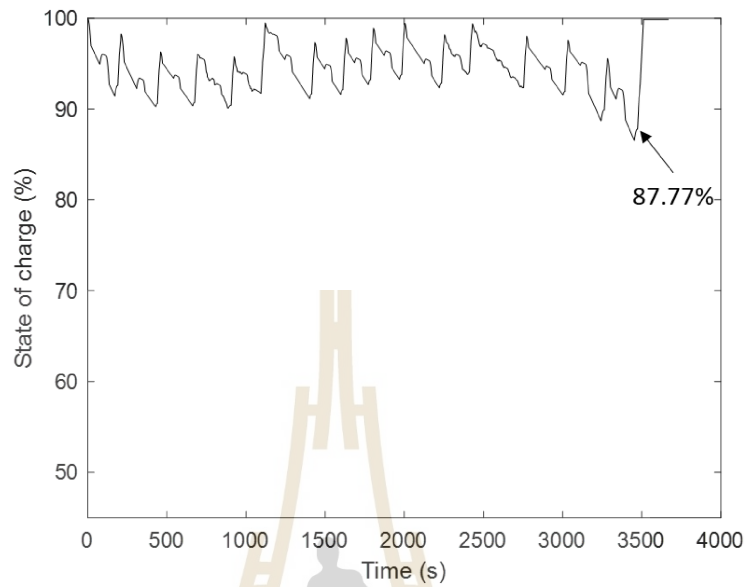


รูปที่ 4.27 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลาของกรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

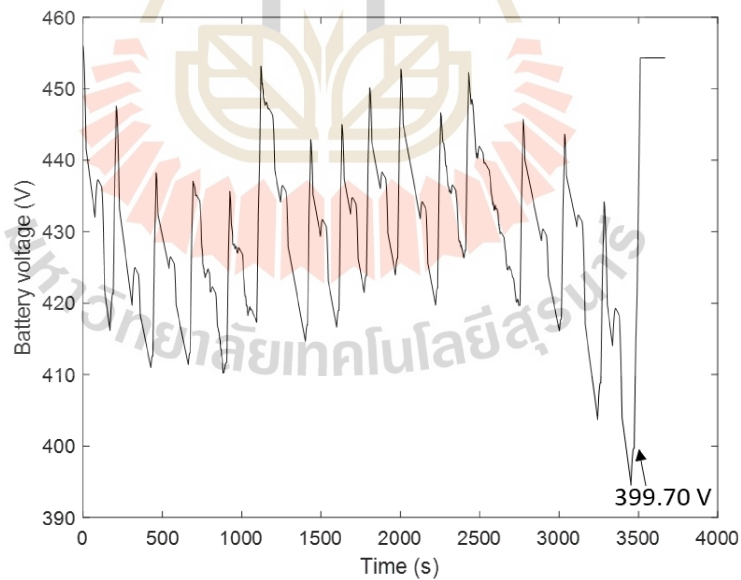


รูปที่ 4.28 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลาของกรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

- กรณีที่ 2 ชาร์จทุก ๆ 2 สถานี เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



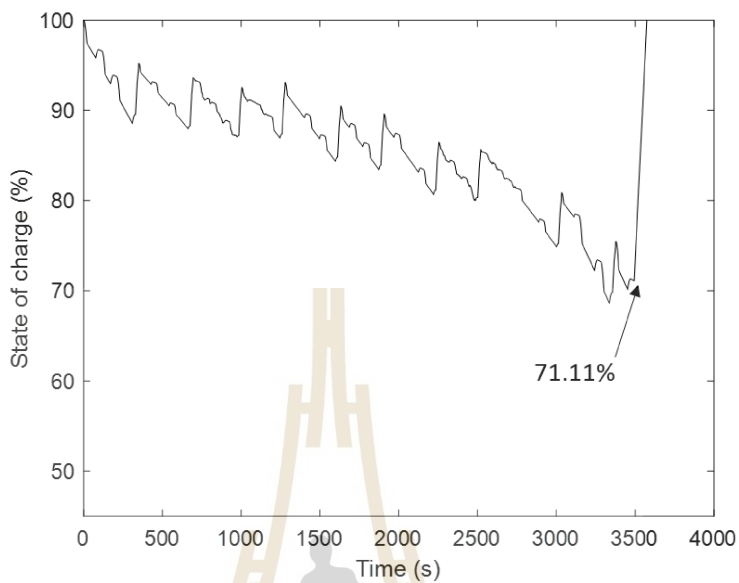
รูปที่ 4.29 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



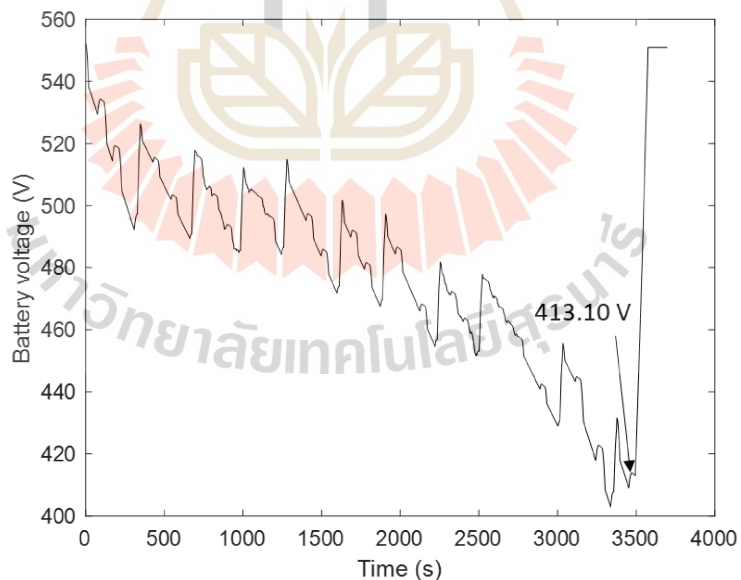
รูปที่ 4.30 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.29 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 87.77% และจากรูปที่ 4.30 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 399.70 V

- กรณีที่ 3 ชาร์จทุก ๆ 3 สถานี เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



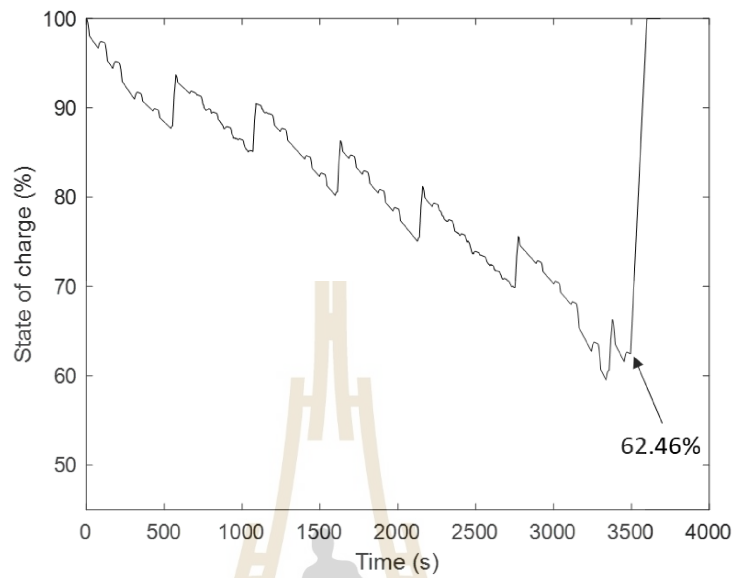
รูปที่ 4.31 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 3 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



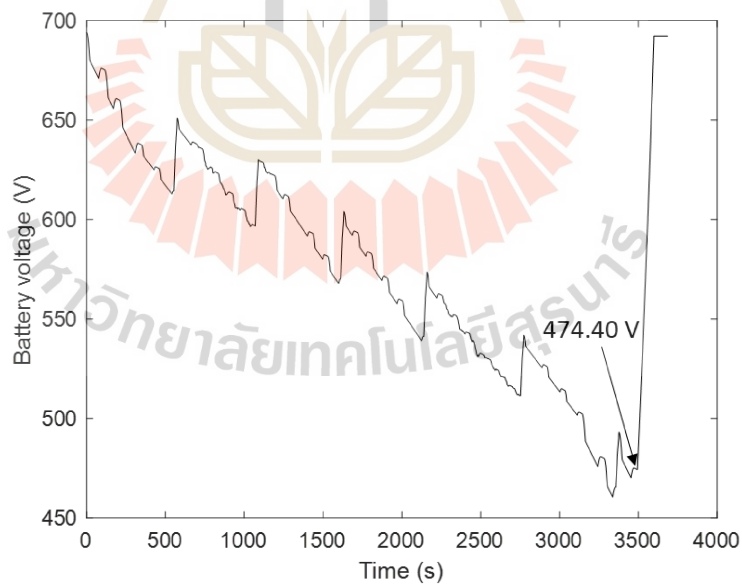
รูปที่ 4.32 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 3 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.31 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 71.11% และจากรูปที่ 4.32 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 413.10 V

- กรณีที่ 4 ชาร์จทุก ๆ 5 สถานี เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



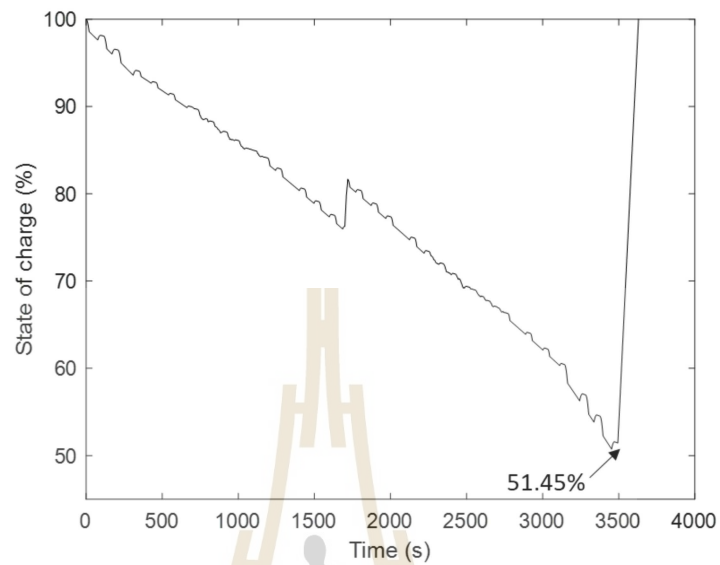
รูปที่ 4.33 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 4 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



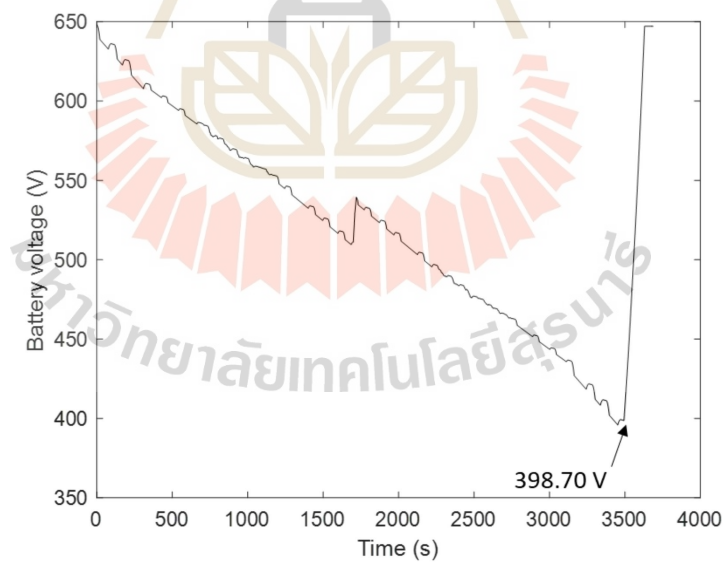
รูปที่ 4.34 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 4 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.33 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 62.46% และจากรูปที่ 4.34 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 474.40 V

- กรณีที่ 5 ชาร์จทุกที่สถานีปลายทาง เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



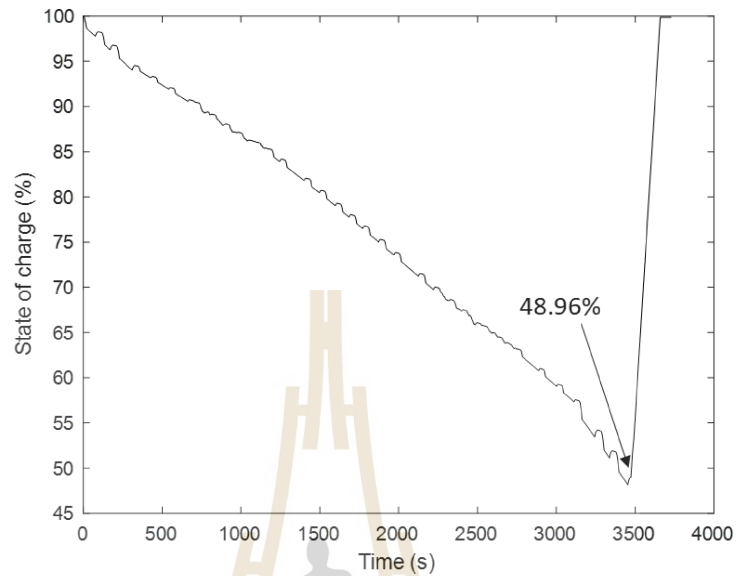
รูปที่ 4.35 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 5 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



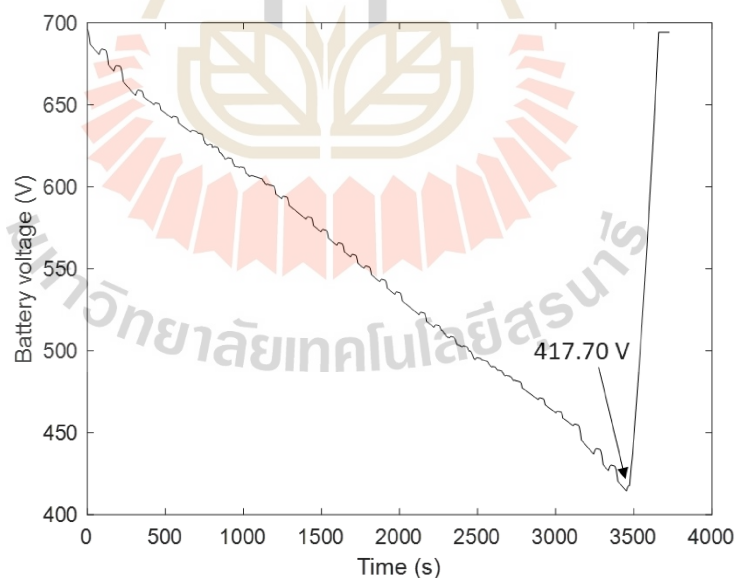
รูปที่ 4.36 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 5 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.35 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 51.45% และจากรูปที่ 4.36 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 398.70 V

- กรณีที่ 6 ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



รูปที่ 4.37 ระดับประจุของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 6 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



รูปที่ 4.38 แรงดันของแบตเตอรี่เทียบกับเวลา กรณีที่ 6 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

เมื่อรถไฟฟารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย จากรูปที่ 4.37 ระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 48.96% และจากรูปที่ 4.38 แรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 417.70 V

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน

Case	Recharge energy (kWh)		Regenerative braking Energy (kWh)	Recharge energy saving (%)	State of charge (%)
	Without regenerative braking	With regenerative braking			
1	71.26	57.26	13.99	19.63	90.11
2	71.69	57.56	14.12	19.70	87.77
3	71.99	57.77	14.22	19.75	71.11
4	72.28	57.98	14.31	19.80	62.46
5	72.95	58.44	14.51	19.89	51.45
6	73.12	58.56	14.57	19.93	48.96

จากตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบพลังงานที่ประหยัดได้จากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานพบว่า แต่ละกรณีมีพลังงานจากการเบรกที่แตกต่างกัน โดยกรณีที่ 1 มีพลังงานในการชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่ลดลงจาก 71.26 kWh เหลือ 57.26 kWh เนื่องจากมีพลังงานจากการเบรก 13.99 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ 19.63% และมีระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเป็น 90.11% กรณีที่ 2 มีพลังงานในการชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่ลดลงจาก 71.69 kWh เหลือ 57.56 kWh โดยมีพลังงานจากการเบรก 14.12 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ 19.70% และมีระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเป็น 87.77% กรณีที่ 3 มีพลังงานในการชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่ลดลงจาก 71.99 kWh เหลือ 57.77 kWh โดยมีพลังงานจากการเบรก 14.22 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ 19.75% และมีระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเป็น 62.46% กรณีที่ 4 มีพลังงานในการชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่ลดลงจาก 72.28 kWh เหลือ 57.98 kWh โดยมีพลังงานจากการเบรก 14.31 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ 19.80% และมีระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเป็น 62.46% กรณีที่ 5 มีพลังงานในการชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่ลดลงจาก 72.95 kWh เหลือ 58.44 kWh โดยมีพลังงานจากการเบรก 14.51 kWh คิดเป็นการประหยัดพลังงานในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ 19.89% และมีระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเป็น 51.45% และกรณีที่ 6 มีพลังงานในการชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่ลดลงจาก 73.12 kWh เหลือ 58.56 kWh โดยมีพลังงานจากการเบรก 14.57 kWh คิดเป็นการประหยัด

พลังงานในการชาร์จแบตเตอรี่ได้ 19.93% ซึ่งประหยัดได้สูงสุดเมื่อเทียบกับทุกกรณี และมีระดับประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเป็น 48.96%

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่และต้นทุนเบื้องต้นในแต่ละกรณี

Case	Energy consumption (kWh)	Battery capacity (kWh)	Battery price (\$)	Charger power (kW)	Chargers price (\$)
1	71.26	36.96	37,144	496.8 (*21)	4,530,556
2	71.69	63.84	64,159	820.8 (*11)	4,099,075
3	71.99	77.28	77,666	1036.8 (*7)	3,294,950
4	72.28	97.44	97,927	1252.8 (*4)	2,275,085
5	72.95	136.08	136,760	1749.6 (*2)	1,235,606
6	73.12	146.16	146,891	1879.2 (*1)	663,566
*จำนวนเครื่องชาร์จรวมทั้งเส้นทาง					

การออกแบบตำแหน่งในการชาร์จโดยการคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่และขนาดของแบตเตอรี่ที่เพียงพอต่อการใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับต้นทุนการก่อสร้างทั้งหมดเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องมีการพิจารณาในการออกแบบเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมในการชาร์จเช่นกัน วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณต้นทุนเบื้องต้นของแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละกรณี โดยราคาของแบตเตอรี่ประเภท LTO ที่ใช้ในการจำลอง ราคา 1005 \$/kWh และราคาเครื่องชาร์จ 454 \$/kW โดยคิดจากค่าพิกัดสูงสุดของแบตเตอรี่ที่สามารถรองรับกำลังชาร์จได้ (Battery university, 2021) โดยการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ราคาของแบตเตอรี่ และราคาเครื่องชาร์จแสดงดังตารางที่ 4.8

เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา กับต้นทุนของราคาแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จ จะเห็นชัดเจนว่า พลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาในแต่ละกรณี มีนัยสำคัญน้อยมาก โดยทุก ๆ กรณีมีค่าประมาณ 71-73 kWh เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนของราคาแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จของแต่ละกรณี จึงสรุปได้ว่ากรณีที่มีความเหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจาก

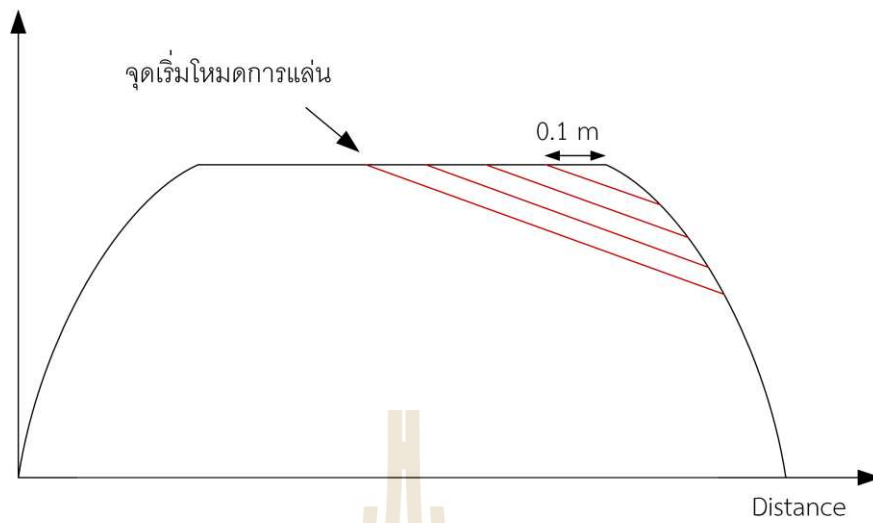
พลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา ราคาแบตเตอรี่ และราคาของเครื่องชาร์จ คือ กรณีที่ 6 ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ

- วิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง

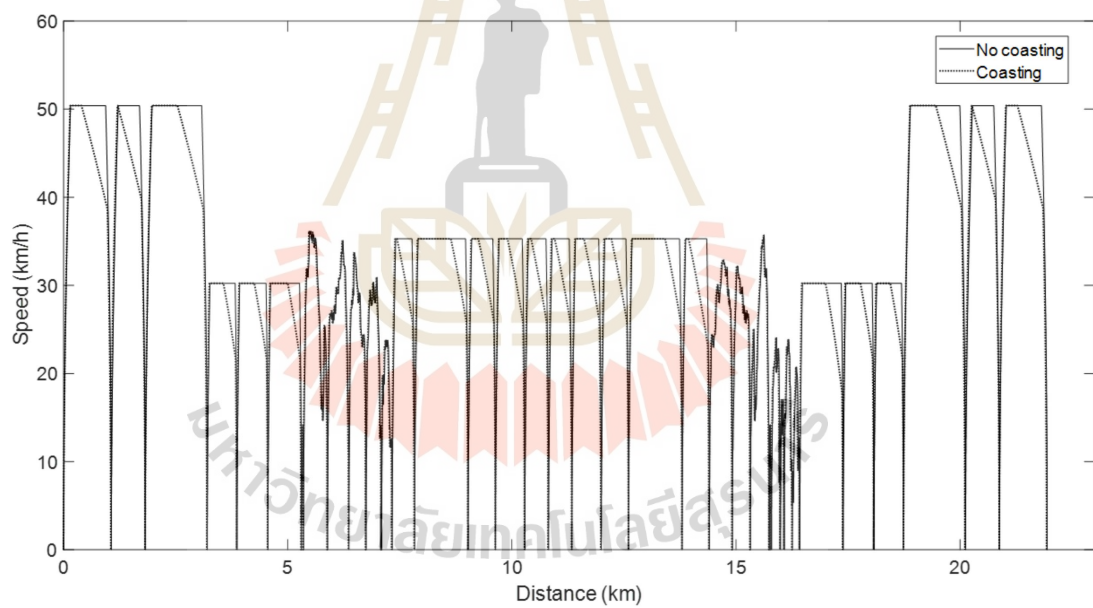
จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา โดยใช้เส้นทางจากโครงการ Korat LRT สายสีเขียวทั้ง 6 กรณี พบว่าพลังงานที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่ทั้ง 6 กรณีนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีค่าประมาณ 71-73 kWh และตำแหน่งในการชาร์จที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดต่างกัน โดยยิ่งตำแหน่งชาร์จมีระยะทางที่ไกลมากขึ้น ทำให้ต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และราคาของแบตเตอรี่นั้นขนาดที่ใหญ่ขึ้น ราคา ก็ยิ่งสูงมากขึ้น แต่ในทางกลับกันราคาของเครื่องชาร์จแบตเตอรี่มีราคาที่ถูกลง เนื่องจากความถี่ในการติดตั้งเครื่องชาร์จลดลง โดยจะเห็นว่าราคาของเครื่องชาร์จและราคาของแบตเตอรี่นั้นมีราคาที่แตกต่างกันมาก ทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่ต่างกันในแต่ละกรณีนั้น ส่งผลน้อยมากต่อพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ แต่เมื่อพิจารณาราคาของแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จจะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลในแง่ของการลงทุนสร้างระบบขนส่งรางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก พบว่าการเบรกช่วยให้ประหยัดพลังงานได้ประมาณ 19-20% สรุปได้ว่า กรณีที่เหมาะสมที่สุด คือ กรณีที่ 6 ชาร์จ ทุก ๆ การเดินทางไป-กลับ ซึ่งจะใช้ในการจำลองผลอื่น ๆ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

4.5.3 การพิจารณาค่าแห่งของโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

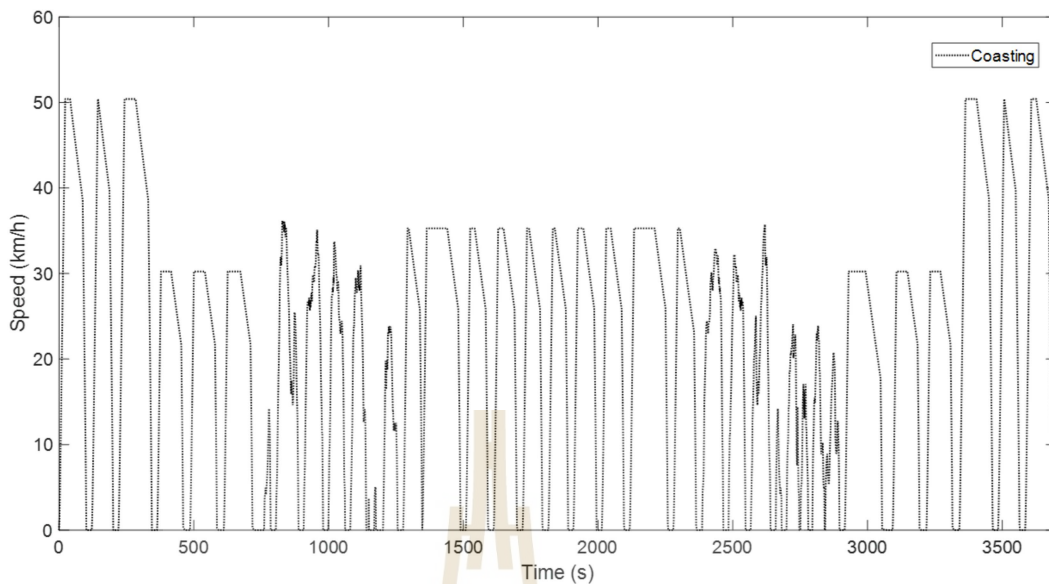
โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเป็นหนึ่งในโหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา ซึ่งการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยสามารถช่วยลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ โดยสามารถพิจารณาเลือกจุดที่รถไฟฟ้ารางเบาเริ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยได้จากจุดที่เริ่มโหมดแล้วมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด โดยขอบเขต คือ ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาถูกจำกัดที่ 10% โดยเลื่อนระยะในการเริ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยที่ละ 0.1 เมตร ดังรูปที่ 4.39 โดยผลการจำลองโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับระยะทางแสดงดังรูปที่ 4.40 และผลการจำลองโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.41 โดยมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่ 3704 วินาที



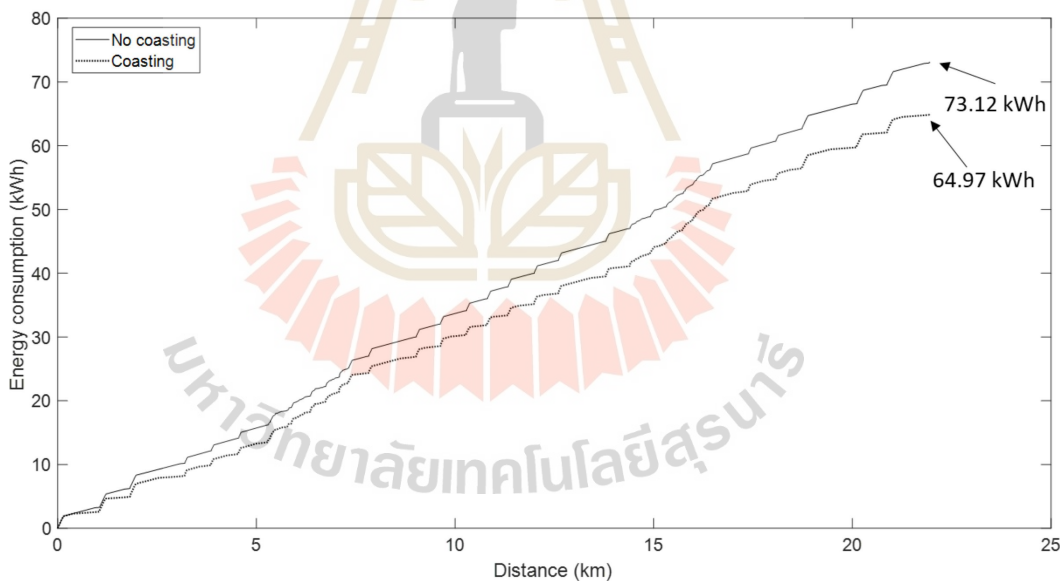
รูปที่ 4.39 ระยะในการเริ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย



รูปที่ 4.40 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย



รูปที่ 4.41 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.42 พลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อมีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับระยะทาง

จากรูปที่ 4.42 พลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อมีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเทียบกับระยะทาง จะเห็นได้ชัดเลยว่าพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีค่าลดลงเมื่อมีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย โดยลดลงจากกรณีที่ไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย 73.12 kWh เหลือ 64.97 kWh

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อมีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

Case	Energy consumption (kWh)	Saving energy (%)	running time (s)	Delay time (%)	State of charge (%)	Regenerative braking energy (kWh)
No coasting	73.12	-	3494	-	48.96	14.57
Coasting	64.97	11.15	3704	6.01	56.37	13.30

เมื่อเพิ่มโหมดการแล่นโดยคำนึงถึงจุดเริ่มต้นของโหมดการแล่นที่ทำให้ได้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของแต่ละสถานี จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.9 โดยโหมดการแล่นสามารถลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้จาก 73.12 kWh เหลือ 64.97 kWh ซึ่งคิดเป็นการประหยัดพลังงาน 11.34% ซึ่งมีเวลาการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจาก 3494 วินาที เป็น 3704 วินาที โดยคิดเป็น 6.01% ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ และระดับประจุของแบตเตอรี่เมื่อรถไฟฟ้ารางเบาเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้ายเพิ่มขึ้นจาก 48.96% เป็น 56.37% แต่พลังงานจากการเบรกลดลงจาก 14.57 kWh เหลือ 13.30 kWh ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่จะใช้เป็นความเร็วอ้างอิงในการหาการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดโดยหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่สุดในบทถัดไป

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาและแบบจำลองของแบตเตอรี่ และได้เปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อมีตำแหน่งในการชาร์จที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อตำแหน่งในการชาร์จไกลออกไปทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากรถไฟฟ้ารางเบาต้องการแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้พลังงานที่เพียงพอต่อการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งการชาร์จถัดไป และนอกจากนี้ การพิจารณาพลังงานจากการเบรก ทำให้พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยรวมลดลงอีกด้วย แต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนของแบตเตอรี่ เครื่องชาร์จ และพลังงานงานในการเคลื่อนที่ของแต่ละกรณี สรุปได้ว่า กรณีที่เหมาะสมที่สุด คือ กรณีที่ 6 ชาร์จทุก ๆ การเคลื่อนที่ไฟ-กลับ และสุดท้ายโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยสามารถช่วยลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ที่เหมาะสมสำหรับลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อใช้เป็นความเร็วอ้างอิง หรือกรณีฐาน เพื่อหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่ทำให้การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาที่น้อยที่สุด โดยจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 5

การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดด้วยการหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยใช้กำหนดการพลวัต

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของกำหนดการพลวัตหรือ Dynamic programming ที่ใช้ในการหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ของเส้นทาง Korat LRT สายสีเขียว ที่มีลักษณะความเร็วอ้างอิงที่ได้จำลองผลในบทที่ 4 มาหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม ที่ทำให้การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด โดยอยู่ภายใต้ขอบเขตความเร็วอ้างอิง และเวลาในการเคลื่อนที่ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบขนส่ง โดยจะเริ่มจากการกำหนดขอบเขตความเร็วสูงสุดและความเร็วต่ำสุดในการเคลื่อนที่ จากนั้นจะเป็นการสร้างตัวเลือกความเร็วเพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วที่เหมาะสม และสุดท้ายเป็นวิธีการดำเนินการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยวิธีกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้าและแบบย้อนกลับ

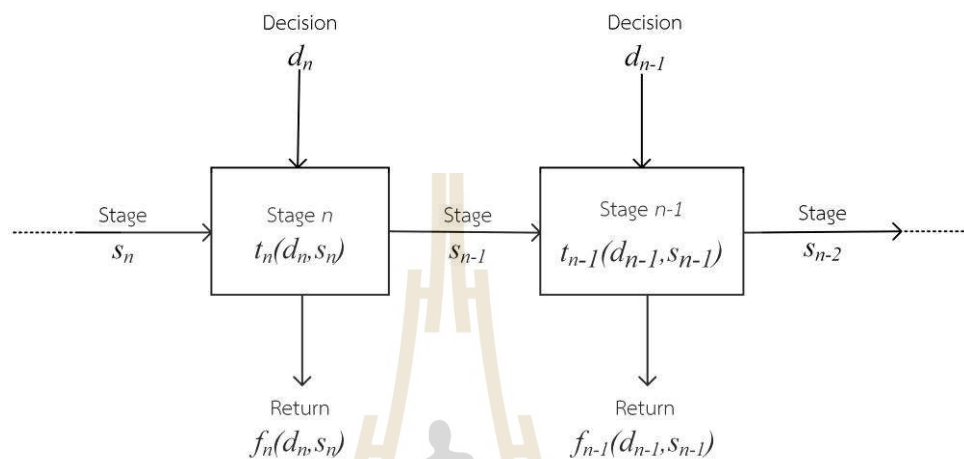
5.2 กำหนดการพลวัต (Dynamic programming)

กำหนดการพลวัตเป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพตามหลักการของความเหมาะสมที่สุดที่กำหนดโดย Bellman ในปี 1950 (Réveillac, 2015) โดยเป็นการแบ่งปัญหาที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยแยกเป็นปัญหาย่อย หรือเป็นขั้นตอน (stage) โดยแต่ละขั้นตอนมีจำนวนขั้นตอนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกัน และจำเป็นต้องมีการตัดสินใจเชิงนโยบายที่มีประสิทธิภาพเพื่อเชื่อมโยงกับขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนการแก้ปัญหาเป็นกระบวนการที่นำไปสู่การค้นหานโยบายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาโดยรวม (กุลรรวาณิชพงษ์, 2562)

การเพิ่มประสิทธิภาพแบบเรียกซ้ำ (Recursive Optimization)

ลักษณะทั่วไปในขั้นตอนสุดท้ายของวิธีกำหนดการพลวัต คือ การพัฒนากระบวนการปรับให้เหมาะสมแบบเรียกซ้ำ ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาในทุก ๆ ขั้นตอน โดยรวมการแก้ปัญหาแบบทีละขั้นตอนตามลำดับ และรวมแต่ละขั้นตอนนั้น จนพบความเหมาะสมโดยรวม ขั้นตอนนี้อาจขึ้นอยู่กับกระบวนการคำนวณแบบย้อนกลับ โดยขั้นตอนแรกที่จะวิเคราะห์ คือ ขั้นตอนสุดท้ายของปัญหา และปัญหาจะได้รับการแก้ไขทีละขั้นทีละขั้นจนกว่าจะรวมขั้นตอนทั้งหมด อีกวิธีหนึ่ง กระบวนการแบบเรียกซ้ำอาจใช้การคำนวณแบบไปข้างหน้า โดยขั้นตอนแรกที่จะแก้ไข คือ ขั้นตอนเริ่มต้นของปัญหา

และปัญหาจะได้รับการแก้ไขทีละชั้น จนกว่าจะรวมขั้นตอนทั้งหมด พื้นฐานของขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพแบบเรียกซ้ำ คือ หลักการที่เรียกว่าความเหมาะสมซึ่งได้รับการระบุไว้แล้ว การตัดสินใจที่เหมาะสมก่อนหน้าจะส่งผลต่อการตัดสินใจที่เหมาะสมในปัจจุบัน



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการคำนวณกำหนดการพลวัต

จากรูปที่ 5.1 สมมติว่ามีกระบวนการตัดสินใจแบบหลายขั้นตอนโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (5.1)

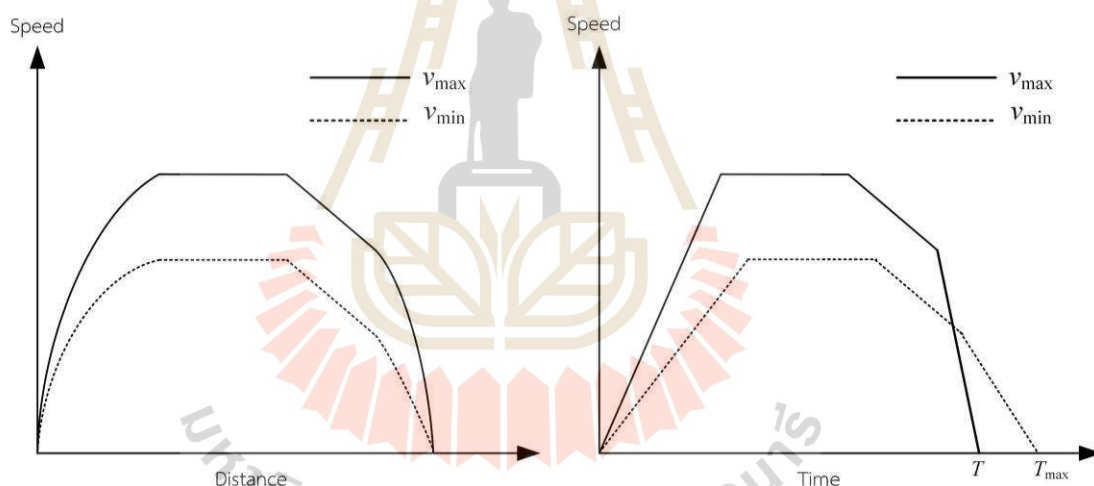
$$f_n(d_n, s_n) \quad (5.1)$$

เมื่อ d_n คือ การตัดสินใจที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าที่ดีที่สุด สามารถเลือกได้จากเซต D_n ที่เป็นไปได้ ณ ขั้นตอน s_n หรือสามารถเขียนได้ว่า $D_n(s_n)$ สมมติว่าจำนวนขั้นตอนมีทั้งหมด N ขั้นตอน โดยขั้นตอนของกระบวนการมีขั้นตอนที่ต้องดำเนินการอีก n ขั้นตอน ขั้นตอนที่จะตัดสินใจที่ทำให้ส่งผลกับค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมถัดไปของกระบวนการขึ้นอยู่กับขั้นตอนการตัดสินใจในปัจจุบัน โดยกำหนดให้ s_n ขั้นตอนของกระบวนการที่มี n ขั้นตอนที่เป็นไปได้ และขั้นตอนถัดไปของกระบวนการ คือ ขั้นตอนที่ $(n - 1)$ ดังนั้น สถานะของขั้นตอนที่เป็นจุดเริ่มต้นในการตัดสินใจของขั้นตอนถัดไปสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (5.2) (Bertsekas, 2015)

$$s_{n-1} = t_n(d_n, s_n) \quad (5.2)$$

5.3 การสร้างขอบเขตความเร็วในการเคลื่อนที่

เพื่อให้เวลาในการเคลื่อนที่ไม่เกินขอบเขตตามที่กำหนด จึงทำการลดความเร็วและความเร่งตามระดับให้อยู่ที่ค่าต่ำสุดที่เวลาในการเคลื่อนที่จะไม่เกินค่าที่กำหนด ในการจำลองนี้ได้ใช้ขอบเขตความเร็วต่ำสุด โดยกำหนดเวลาในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 10% ของเวลาสูงสุดในแต่ละสถานี จะได้ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับเวลาและเทียบกับระยะทาง ดังรูปที่ 5.2 โดย v_{\max} และ v_{\min} คือ ความเร็วสูงสุดและความเร็วต่ำสุด ตามลำดับ โดยใช้ลักษณะความเร็วอ้างอิงจากกรณีที่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย T คือ เวลาที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อมีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย และ T_{\max} คือ เวลาที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่โดยช้ากว่าเวลาปกติ 10% ของการเคลื่อนที่ปกติก่อนมีการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของแต่ละสถานี และผลการสร้างขอบเขตความเร็วในการเคลื่อนที่ของขาไปแสดงดังตารางที่ 5.1 และสำหรับการเคลื่อนที่ขากลับดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การสร้างขอบเขตความเร็วในการเคลื่อนที่

ตารางที่ 5.1 ขอบเขตของความเร็วในการเคลื่อนที่ขาไป

สถานี	v_{\max} (km/h)	v_{\min} (km/h)
GL-01	-	-
GL-02	50	47
GL-03	50	47
GL-04	30	28
GL-05	30	28

ตารางที่ 5.1 ขอบเขตของความเร็วในการเคลื่อนที่ขาไป (ต่อ)

สถานี	v_{\max} (km/h)	v_{\min} (km/h)
GL-06	30	28
GL-07	30	28
GL-08	-	-
GL-09	-	-
GL-10	-	-
GL-11	-	-
GL-12	35	34
GL-13	35	34
GL-14	35	34
GL-15	35	34
GL-16	35	34

ตารางที่ 5.2 ขอบเขตของความเร็วในการเคลื่อนที่ขากลับ

สถานี	v_{\max} (km/h)	v_{\min} (km/h)
GL-16	-	-
GL-15	35	34
GL-14	35	34
GL-13	35	34
GL-12	35	34
GL-17	35	34
GL-18	-	-
GL-19	-	-
GL-20	-	-
GL-21	-	-
GL-07	30	28
GL-06	30	28
GL-05	30	28

ตารางที่ 5.2 ขอบเขตของความเร็วในการเคลื่อนที่ขากลับ (ต่อ)

สถานี	v_{\max} (km/h)	v_{\min} (km/h)
GL-04	30	28
GL-03	50	47
GL-02	50	47
GL-01	50	47

5.4 การสร้างระดับความเร็วในขอบเขตความเร็วที่กำหนด

การสร้างตัวเลือกความเร็ว (candidate speed) เพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจในการคำนวณของกำหนดการพลวัต ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบ่งระดับความเร็วเริ่มต้นที่ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 ระดับ ตามลำดับ เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพลักษณะของความเร็ว โดยมีการแบ่งเป็นการคำนวณโหมดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ คือ โหมดเร่งความเร็ว โหมดความเร็วคงที่ โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย และโหมดเบรก ดังนี้

โหมดเร่งความเร็วและโหมดความเร็วคงที่ที่มีความเร็วมากกว่าศูนย์สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v^k = \max \{v_{\max}(s_{i+1}) - \Delta v_d \times (k-1), 0\} \quad (5.3)$$

โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยและโหมดเบรกที่มีความเร่งเป็นลบสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$v^k = \max \{v_{\min}(s_{i+1}) + \Delta v_d \times (K-k), 0\} \quad (5.4)$$

โดยที่ $k = 1, 2, \dots, K$

v^k คือ ความเร็วที่ระดับ k (km/h)

ค่าช่วงระดับของความเร็วจาก v_{\max} ถึง v_{\min} จากรูปที่ 5.2 สามารถแบ่งช่วงความเร็วได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta v_d = \frac{v_{\max}(s_{i+1}) - v_{\min}(s_{i+1})}{K-1} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.3) ถึง (5.5)

- Δv_d คือ ค่าช่วงของระดับความเร็ว (km/h)
 K คือ จำนวนระดับของความเร็ว โดย $K = 6, 10, 15, 20, 25, 30$
 s_{i+1} คือ ตำแหน่งถัดไปในการเคลื่อนที่ (m) โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$
 v_{\max} คือ ความเร็วสูงสุด (km/h) จากรูปที่ 5.2
 v_{\min} คือ ความเร็วต่ำ (km/h) จากรูปที่ 5.2
 n คือ ตำแหน่งสุดท้ายในสถานีนั้น ๆ

การคำนวณเวลาในการจำลอง ความเร่ง และพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ สำหรับการคำนวณแบบไปข้างหน้าโดยเริ่มจากการคำนวณในตำแหน่งแรกของสถานีสามารถคำนวณได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$T[v^k(s_{i+1})] = T[v^k(s_i)] + dT[v^k(s_{i+1})] \quad (5.6)$$

$$dT[v^k(s_{i+1})] = \begin{cases} \frac{v^k(s_{i+1}) - v^k(s_i)}{a(s_{i+1})}, & 0 < a < 0 \\ \frac{(s_{i+1}) - (s_i)}{v^k(s_{i+1})}, & a = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

$$a(s_{i+1}) = \frac{(v^k(s_{i+1}))^2 - (v^k(s_i))^2}{2 \times ((s_{i+1}) - (s_i))} \quad (5.8)$$

$$E^n[v^k(s_{i+1})] = E^n[v^k(s_i)] + E^n[v^k(s_{i+1})] \quad (5.9)$$

การคำนวณเวลาในการจำลอง ความเร่ง และพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ สำหรับการคำนวณแบบย้อนกลับโดยเริ่มจากการคำนวณในตำแหน่งสุดท้ายของสถานีสามารถคำนวณได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$T[v^k(s_{n-1})] = T[v^k(s_n)] + dT[v^k(s_{n-1})] \quad (5.10)$$

$$dT[v^k(s_{n-1})] = \begin{cases} \frac{v^k(s_{n-1}) - v^k(s_n)}{a(s_{n-1})}, & 0 < a < 0 \\ \frac{(s_{n-1}) - (s_i)}{v^k(s_{n-1})}, & a = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

$$a(s_{n-1}) = \frac{(v^k(s_{n-1}))^2 - (v^k(s_n))^2}{2 \times ((s_{n-1}) - (s_n))} \quad (5.12)$$

$$E^n[v^k(s_{n-1})] = E^n[v^k(s_n)] + E^n[v^k(s_{n-1})] \quad (5.13)$$

จากสมการที่ (5.6) ถึง (5.13)

T คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่สะสมทั้งหมด (s)

dT คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (s)

a คือ ความเร่ง (m/s^2)

E คือ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh) โดยคำนวณจากสมการที่ (4.10)

5.5 การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต

การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัตมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และขอบเขตดังสมการที่ (5.4) และมีขอบเขตเงื่อนไขในการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัตดังสมการที่ (5.15), (5.16) และ (5.17) โดยลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณจะต้องอยู่ในขอบเขตความเร่งและความหน่วงไม่เกิน $1 m/s^2$ และมีเวลาในการเคลื่อนที่แต่ละสถานีไม่เกิน 10% ของเวลาการเคลื่อนที่ปกติ

$$\min J = \sum_{p=1}^M E_{total}^n \quad (5.14)$$

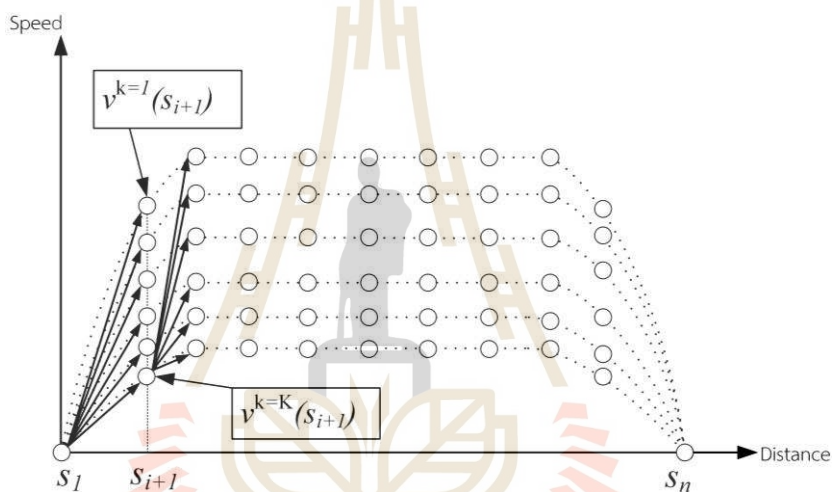
$$|a(s_i)| \leq a_{max}, \forall i \quad (5.15)$$

$$s_i \in [S^p], p = 1, \dots, M, \forall i \quad (5.16)$$

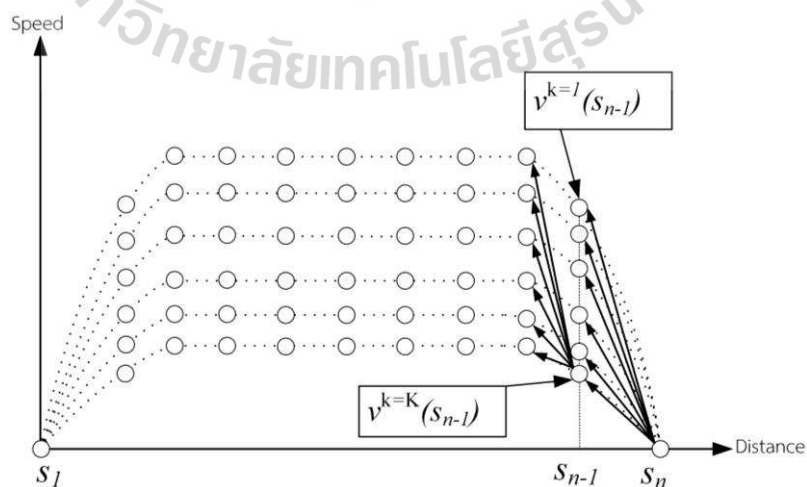
$$T \in T_{max} \quad (5.17)$$

จากสมการที่ (5.10) ถึง (5.13)

- J คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 a_{\max} คือ ความเร่งสูงสุด (m/s^2) 1 m/s^2
 T_{\max} คือ เวลาในการเคลื่อนที่สูงสุด (s)
 s คือ ตำแหน่งในสถานีนั้น ๆ
 S คือ ตำแหน่งในสถานีผู้โดยสารที่ p
 p คือ ตำแหน่งสถานีผู้โดยสาร
 M คือ จำนวนสถานีผู้โดยสารทั้งหมดในการเคลื่อนที่

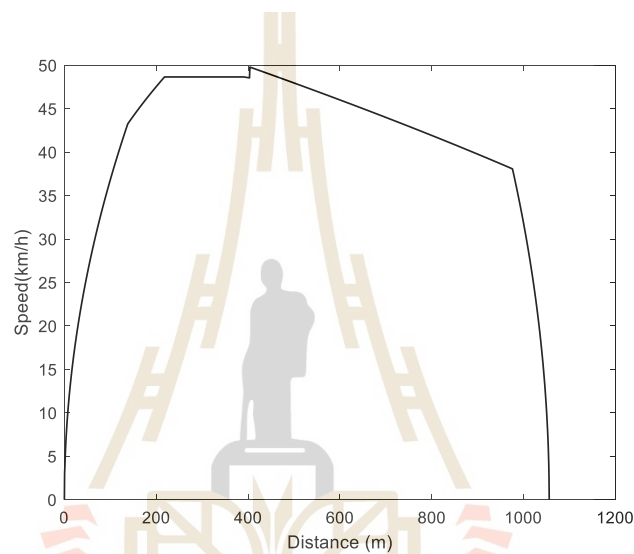


รูปที่ 5.3 การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า

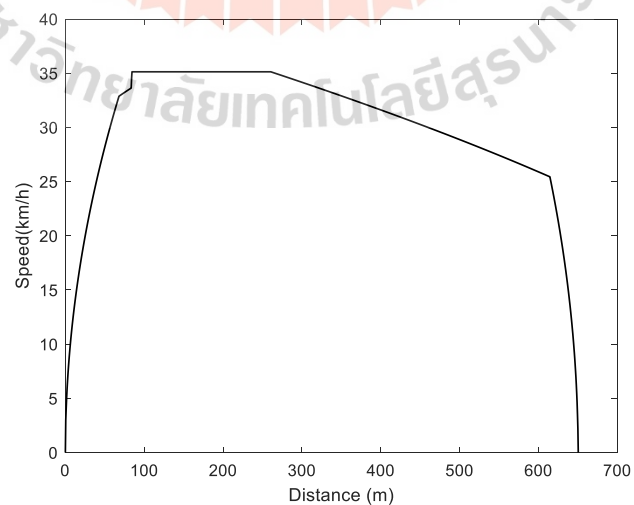


รูปที่ 5.4 การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบย้อนกลับ

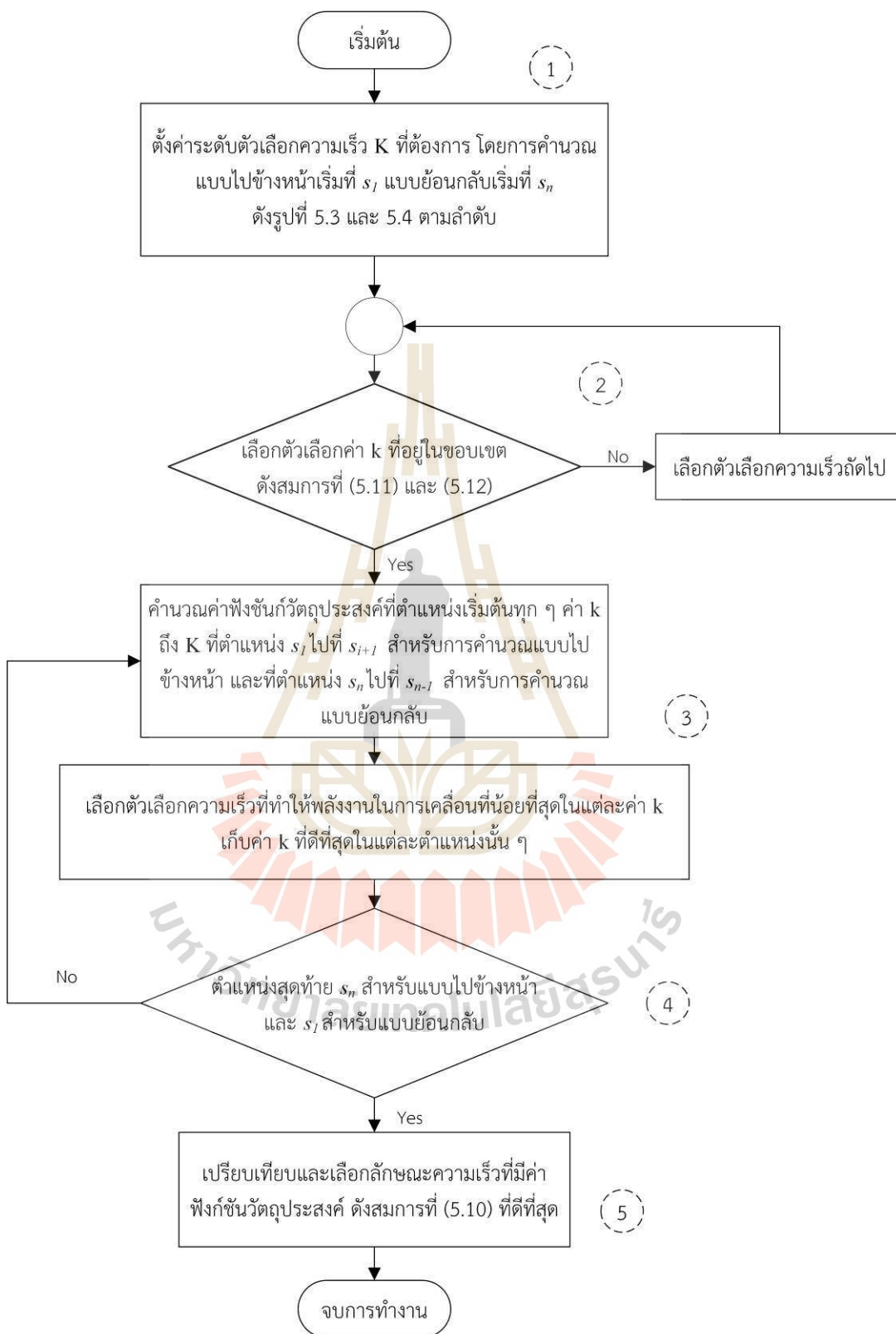
จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 การหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้าจะเริ่มคำนวณจากตำแหน่งของรถไฟฟารางเบาที่ s_i และถัดไปที่ s_{i+1} และการคำนวณแบบย้อนกลับโดยจะเริ่มคำนวณจากตำแหน่งปลายทางที่สถานีที่ s_n และถัดไปที่ s_{n-1} โดยระดับความเร็วจะขึ้นอยู่กับค่า k ตั้งแต่ 6 จนถึง K ซึ่งจะเลือกค่าความเร็วในแต่ละตำแหน่งที่ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด โดยคำนวณจนกระทั่งถึงตำแหน่งสุดท้าย และเลือกลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด โดยตัวอย่างลักษณะความเร็วที่สามารถเป็นไปได้จากการเลือกตัวเลือกความเร็วแสดงดังรูปที่ 5.5 และ 5.6



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างลักษณะความเร็วที่สามารถเป็นไปได้ของสถานีที่ 1



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างลักษณะความเร็วที่สามารถเป็นไปได้ของสถานีที่ 15



รูปที่ 5.7 แผนผังการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยกำหนดการพลวัต

จากแผนผังการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยกำหนดการพลวัต ดังรูปที่ 5.7 มีขั้นตอนในการทำงาน ดังนี้

- (1) เริ่มต้นด้วยการกำหนดระดับของตัวเลือกความเร็ว K ที่ต้องการ โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้าเริ่มการคำนวณที่ s_1 และการคำนวณแบบย้อนกลับเริ่มที่ s_n ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ
- (2) ตรวจสอบเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณ จากสมการที่ (5.11) และ (5.12) ถ้าใช่ไปขั้นตอนถัดไป ถ้าไม่ใช่ให้เลือกตัวเลือกความเร็วถัดไปและตรวจสอบเงื่อนไขอีกครั้ง
- (3) เริ่มการคำนวณค่าฟังก์ชันกวดูประสงค์หรือพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดที่ตำแหน่งเริ่มต้นในทุก ๆ ค่า k ถึง K ที่ตำแหน่ง s_1 ไปที่ s_{i+1} สำหรับการคำนวณแบบไปข้างหน้า และที่ตำแหน่ง s_n ไปที่ s_{n-1} สำหรับการคำนวณแบบย้อนกลับ และเลือกตัวเลือกความเร็วที่ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุดในแต่ละค่า k และเก็บค่า k ที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งนั้น ๆ
- (4) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดคำนวณ เมื่อตำแหน่งสุดท้ายของรถไฟฟารางเบาอยู่ที่ s_n สำหรับการคำนวณแบบไปข้างหน้า และ s_1 สำหรับการคำนวณแบบย้อนกลับ
- (5) เปรียบเทียบและเลือกลักษณะความเร็วที่ทำให้มีพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุด และจบการทำงาน

5.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีของการกำหนดพลวัตเบื้องต้น การสร้างขอบเขตความเร็วในการเคลื่อนที่ และการสร้างตัวเลือกความเร็วเพื่อใช้ในการคำนวณกำหนดการพลวัต โดยมีรายละเอียดขั้นตอนในการคำนวณ ซึ่งมีการคำนวณสองแบบ คือ การคำนวณแบบไปข้างหน้า และการคำนวณแบบย้อนกลับ โดยผลของการคำนวณแสดงในบทถัดไป

บทที่ 6

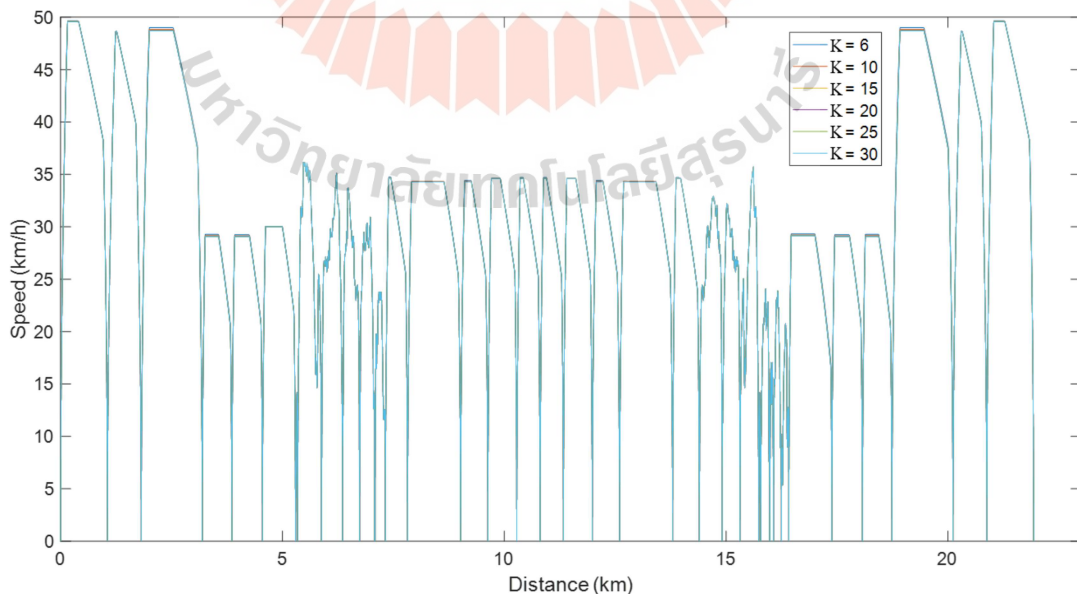
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

6.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการจำลองการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสม เพื่อให้รถไฟฟ้ารางเบามีการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัต โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า และการคำนวณแบบย้อนกลับ ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่กรณี 6 ชาร์จทุก ๆ การเดินทางไปกลับ และมีการแบ่งระดับตัวเลือกความเร็วในการเคลื่อนที่ที่มีความละเอียดจาก 6 ระดับ 10 ระดับ 15 ระดับ 20 ระดับ 25 ระดับ และ 30 ระดับ และเปรียบเทียบผลการคำนวณ

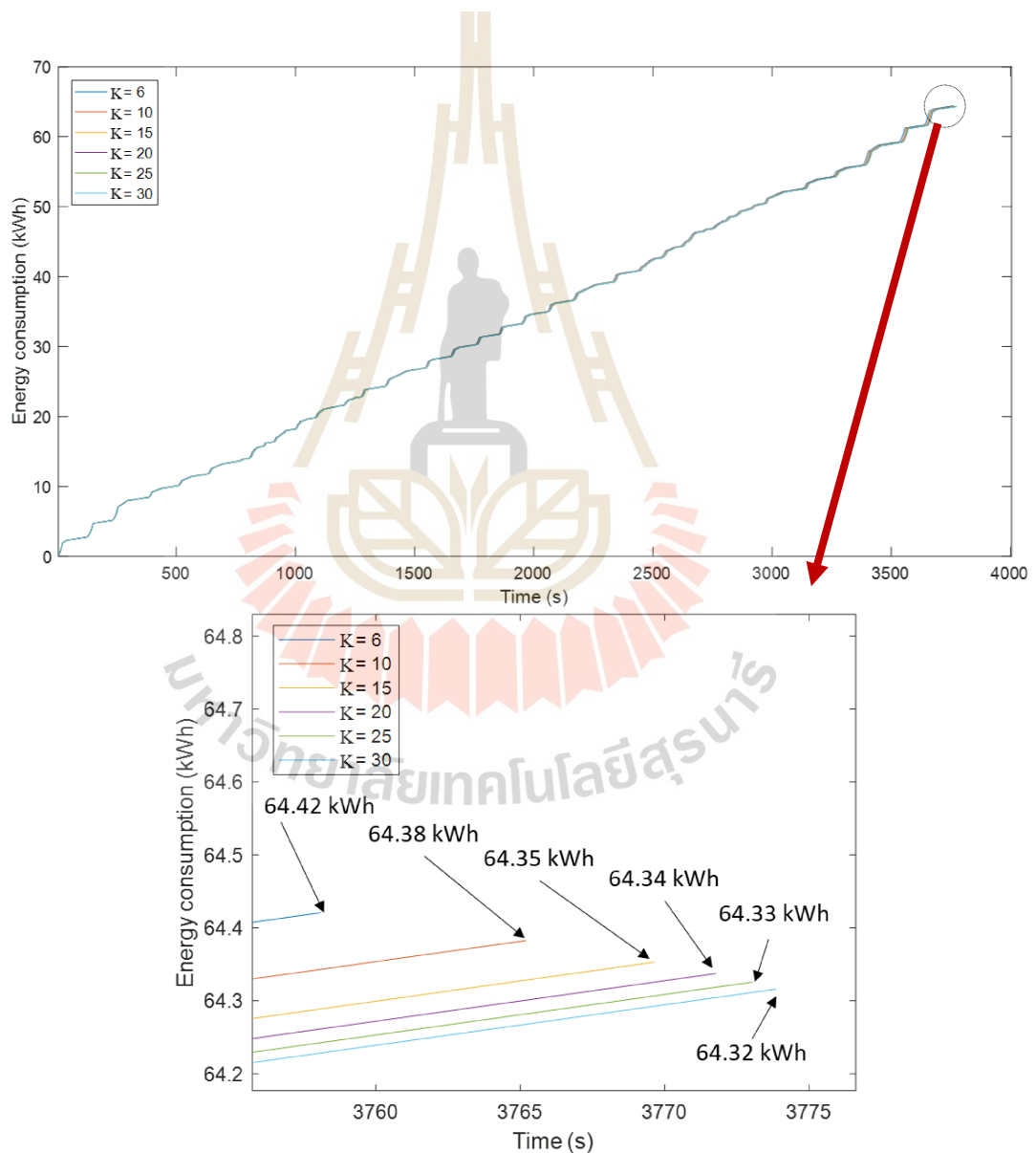
6.2 ผลการจำลองกำหนดการพลวัตโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า

ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 6.1 พบว่าลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า ลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณแสดงความแตกต่างที่น้อยมาก ในแต่ละระดับตัวเลือกความเร็ว K ที่ต่างกัน โดยลักษณะความเร็วมีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 47 km/h เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐานที่มีความเร็วสูงสุด 50 km/h



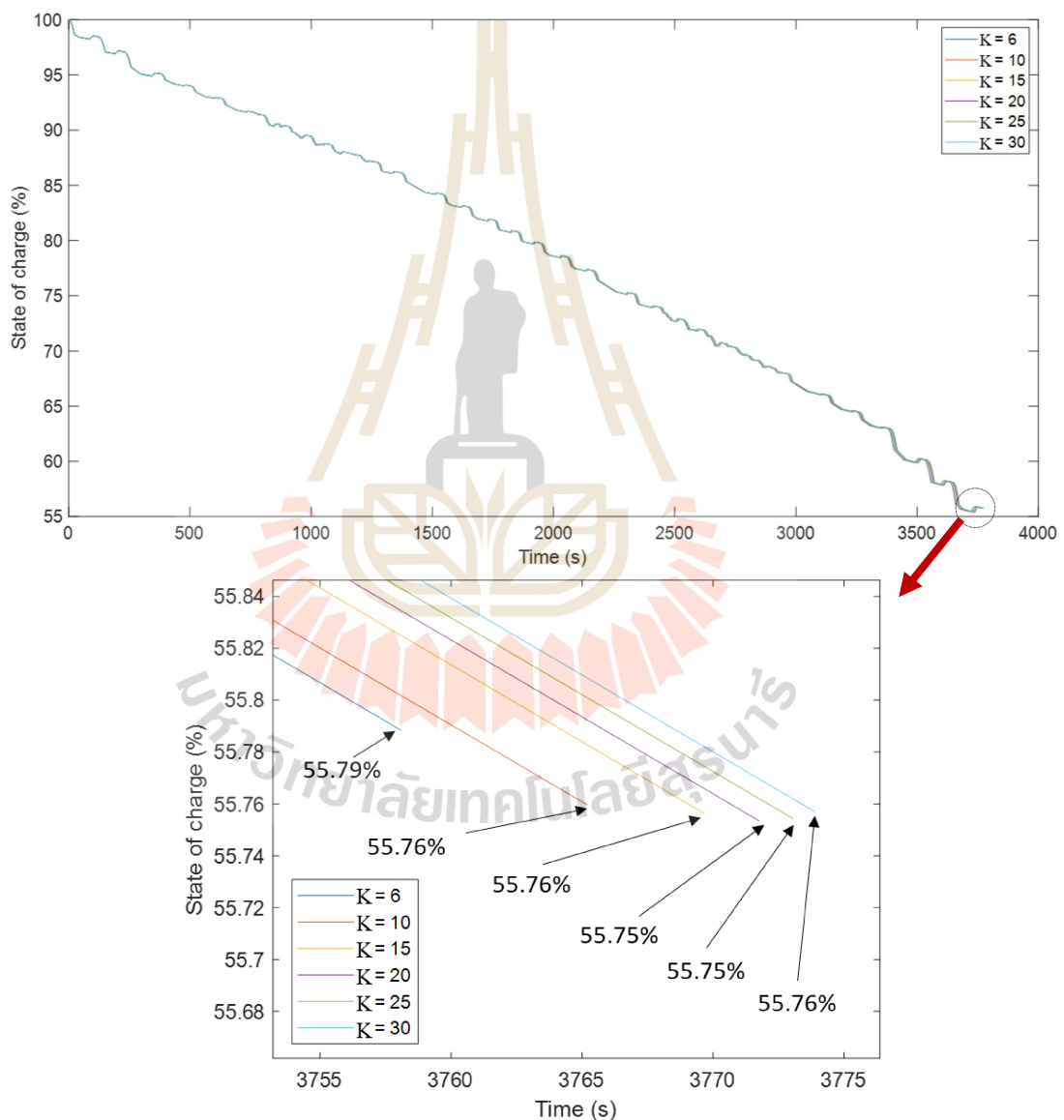
รูปที่ 6.1 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า

จากรูปที่ 6.2 พลังงานในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้าเทียบกับเวลาในการเคลื่อนที่ พบว่า เมื่อค่า K มีค่าเท่ากับ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 จะมีพลังงานในการเคลื่อนที่ 64.42 kWh, 64.38 kWh, 64.35 kWh, 64.34 kWh, 64.33 kWh และ 64.32 kWh ตามลำดับ โดยพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่มีค่าลดลงเมื่อค่า K ค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดคือ 64.32 kWh ที่ค่า $K = 30$ และพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่มากที่สุด คือ 64.42 kWh ที่ค่า $K = 6$ โดยพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละค่า K มีเวลาในการเคลื่อนที่ที่เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6.2 พลังงานในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า

จากพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทำให้ ระดับประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% ดังนี้ เมื่อ K มีค่าเท่ากับ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 จะมีระดับประจุของแบตเตอรี่เมื่อเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย 55.79%, 55.76%, 55.76%, 55.75%, 55.75% และ 55.76% โดยจะเห็นว่า ที่ค่า K เท่ากับ 10, 15 และ 30 และที่ค่า K เท่ากับ 20 และ 25 มีค่าระดับประจุที่เท่ากันตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของระดับประจุไม่สามารถแสดงความแตกต่างในทศนิยมที่มีนัยสำคัญสองตำแหน่งได้ เนื่องจากมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ระดับประจุแบตเตอรี่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า

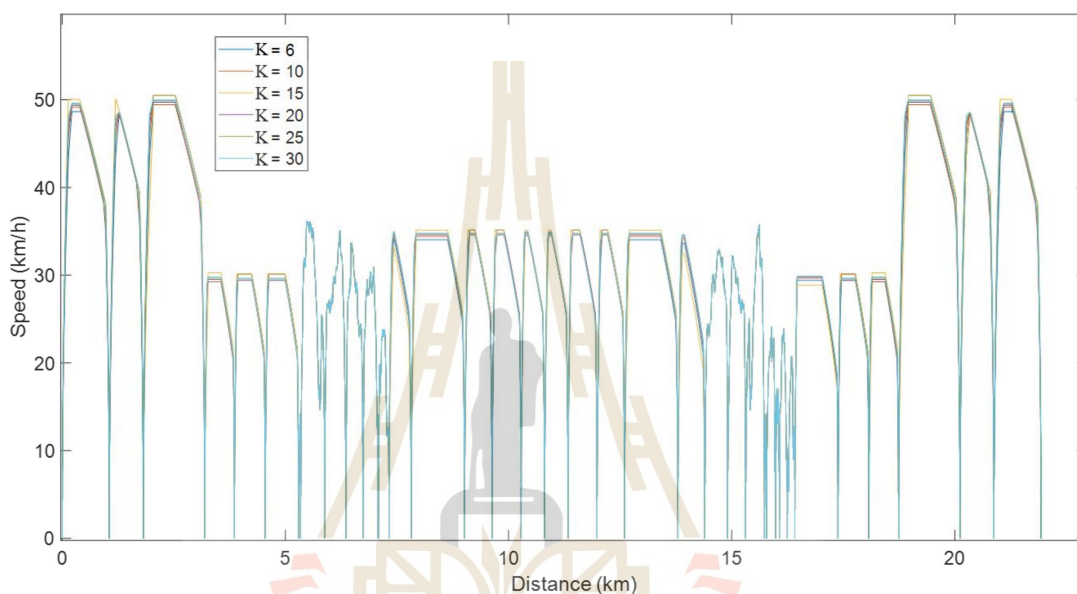
ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า

Case	Energy consumption (kWh)	Saving energy (%)	Time (s)	Delay time (%)	Regenerative braking energy (kWh)	State of charge (%)
No coasting	73.12	-	3494	-	14.57	48.96
Coasting	64.97	11.15	3685	6.01	13.30	56.37
K = 6	64.42	11.90	3758	7.56	12.29	55.79
K = 10	64.38	11.96	3765	7.76	12.22	55.76
K = 15	64.35	11.99	3770	7.90	12.19	55.76
K = 20	64.34	12.01	3772	7.96	12.17	55.75
K = 25	64.33	12.02	3773	7.99	12.16	55.75
K = 30	64.32	12.04	3774	8.01	12.15	55.76

จากตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดโดยการคำนวณแบบไปข้างหน้า เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับกรณีฐานที่เป็นการเคลื่อนที่ปกติที่ไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย พบว่าพลังงานในการเคลื่อนที่มีค่าลดลงหลังจากการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัตโดยเมื่อค่า K เท่ากับ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 พลังงานจะลดลง 11.90%, 11.96%, 11.99%, 12.01%, 12.02% และ 12.04% ตามลำดับ เวลาในการเคลื่อนที่ของทุก ๆ ลักษณะความเร็วมีค่าไม่เกินที่กำหนด คือ 10% แต่ในทางกลับกันพลังงานที่ได้จากการเบรกมีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง และมีการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยทำให้แรงในการเบรกลดลง จึงส่งผลให้พลังงานที่ไหลเข้ากลับไปชาร์จแบตเตอรี่ลดลงเช่นกัน ระดับประจุของแบตเตอรี่จึงมีค่าลดลงเมื่อขบวนรถเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย และค่า K ที่มีพลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด คือ 64.32 kWh เมื่อ K เท่ากับ 30

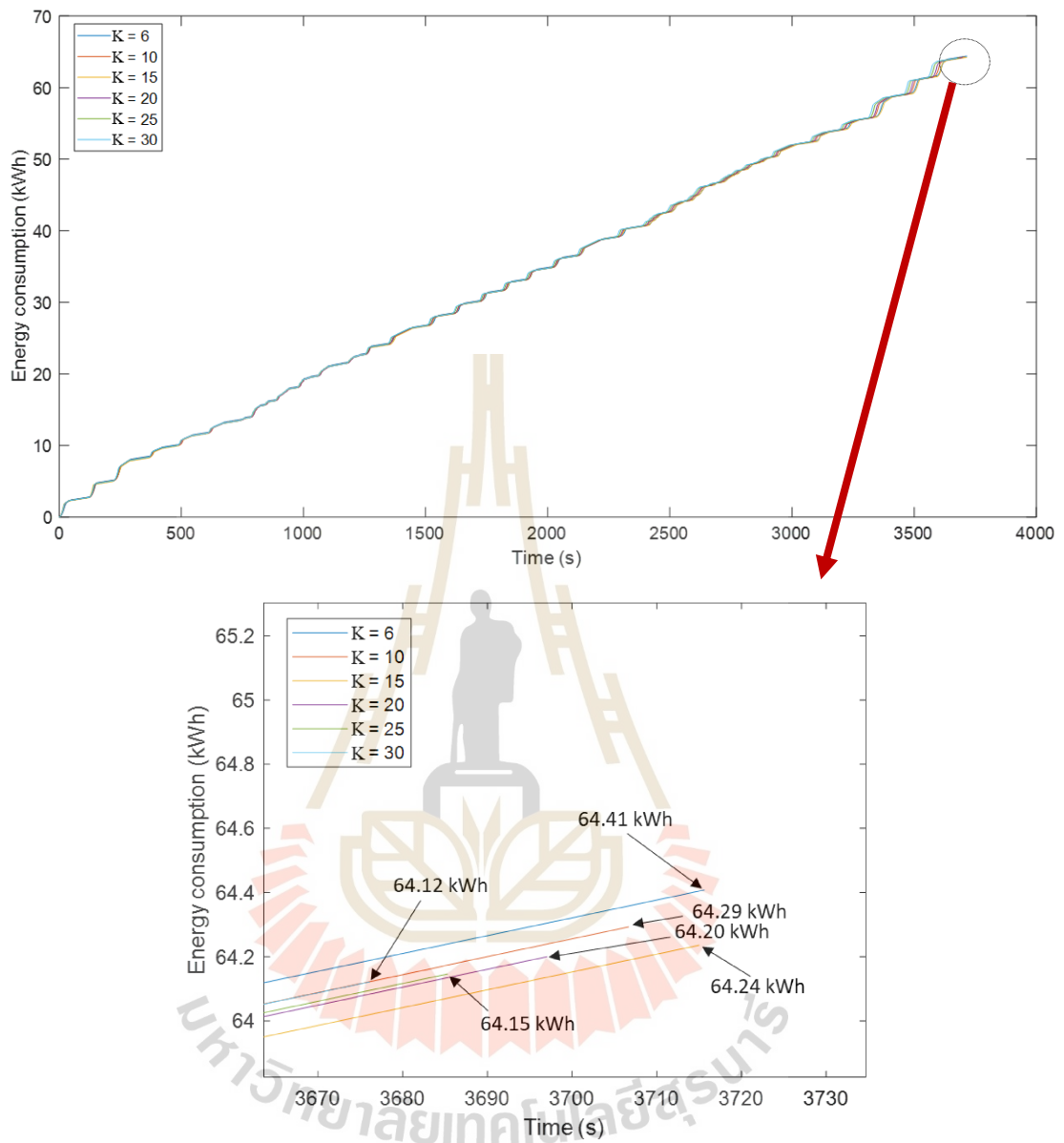
6.3 ผลการจำลองกำหนดการพลวัตโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ

ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 6.4 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับระยะทางโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ พบว่าลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณแสดง ความแตกต่างกันที่ชัดเจนมากกว่าการคำนวณแบบไปข้างหน้า ในแต่ละระดับตัวเลือกความเร็ว K ที่ต่างกัน โดยลักษณะความเร็วมีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 50 km/h

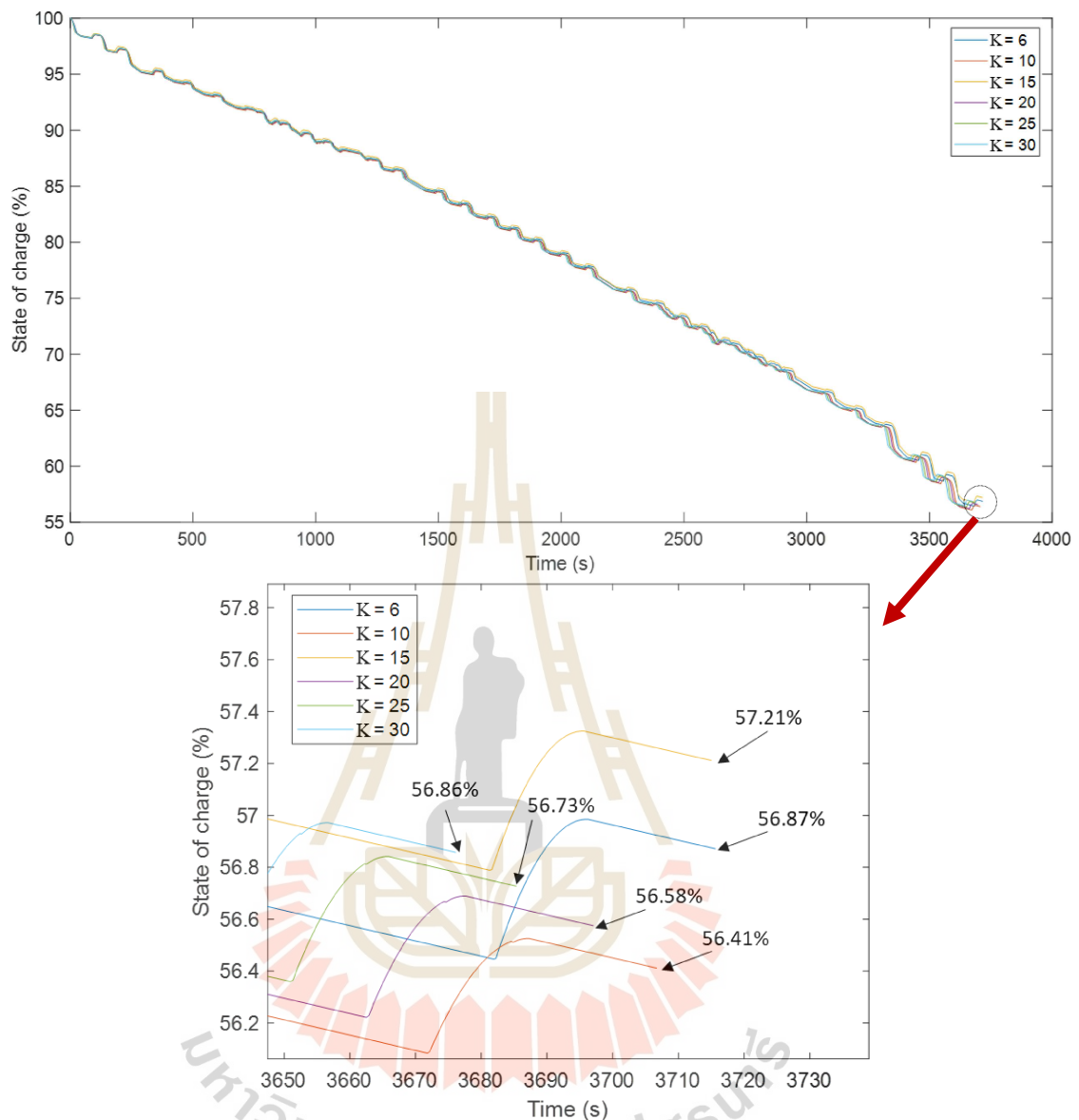


รูปที่ 6.4 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ

จากรูปที่ 6.5 พลังงานในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบย้อนกลับเทียบกับเวลาในการเคลื่อนที่ พบว่า เมื่อค่า K มีค่าเท่ากับ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 จะมีพลังงานในการเคลื่อนที่ 64.41 kWh, 64.29 kWh, 64.24 kWh, 64.20 kWh, 64.15 kWh และ 64.12 kWh ตามลำดับ โดยพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะมีค่าลดลงเมื่อค่า K มีค่าเท่ากับ 6, 10, 15, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดคือ 64.12 kWh ที่ค่า $K = 30$



รูปที่ 6.5 พลังงานในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ



รูปที่ 6.6 ระดับประจุแบตเตอรี่ของลักษณะความเร็วที่เหมาะสมโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ

จากรูปที่ 6.6 ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ระดับประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% ดังนี้ เมื่อ K มีค่าเท่ากับ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 จะมีระดับประจุของแบตเตอรี่เมื่อเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย 56.87%, 56.41%, 57.21%, 56.58%, 56.73% และ 56.86% โดยระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่ามากที่สุด คือ 56.87% เมื่อ K เท่ากับ 6 และระดับประจุของแบตเตอรี่มีค่าน้อยที่สุด คือ 56.21% เมื่อ K เท่ากับ 15

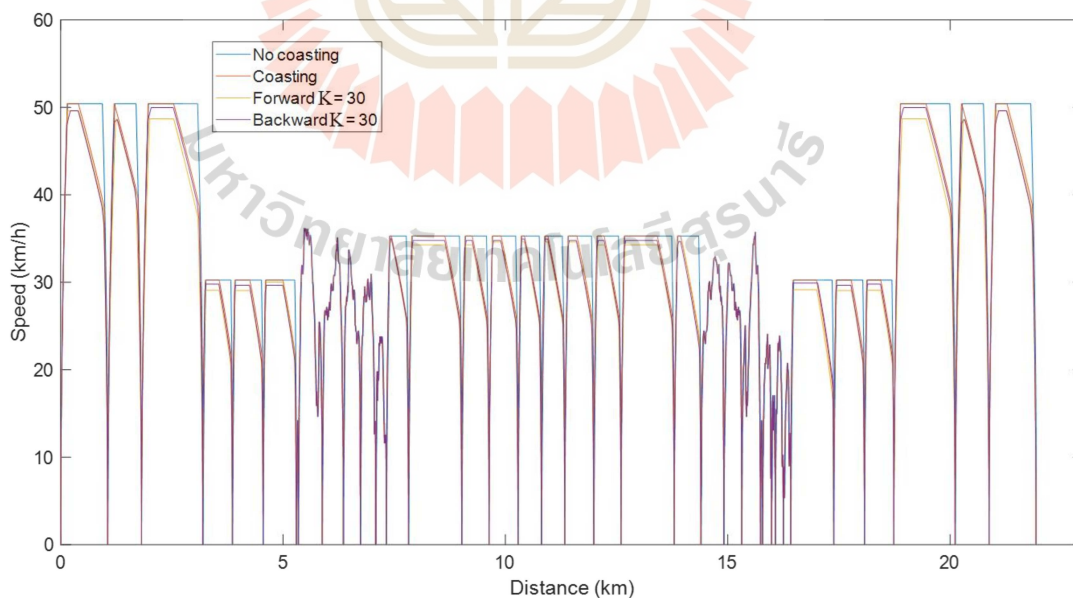
ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ

Case	Energy consumption (kWh)	Saving energy (%)	Time (s)	Delay time (%)	Regenerative braking energy (kWh)	State of charge (%)
No coasting	73.12	-	3494	-	14.57	48.96
Coasting	64.97	11.15	3685	6.01	13.30	56.37
K = 6	64.41	11.91	3716	6.35	13.26	56.87
K = 10	64.29	12.08	3707	6.10	12.73	56.41
K = 15	64.24	12.14	3750	7.33	13.38	57.21
K = 20	64.20	12.20	3697	5.81	12.81	56.58
K = 25	64.15	12.27	3685	5.47	12.90	56.73
K = 30	64.12	12.31	3676	5.21	13.01	56.86

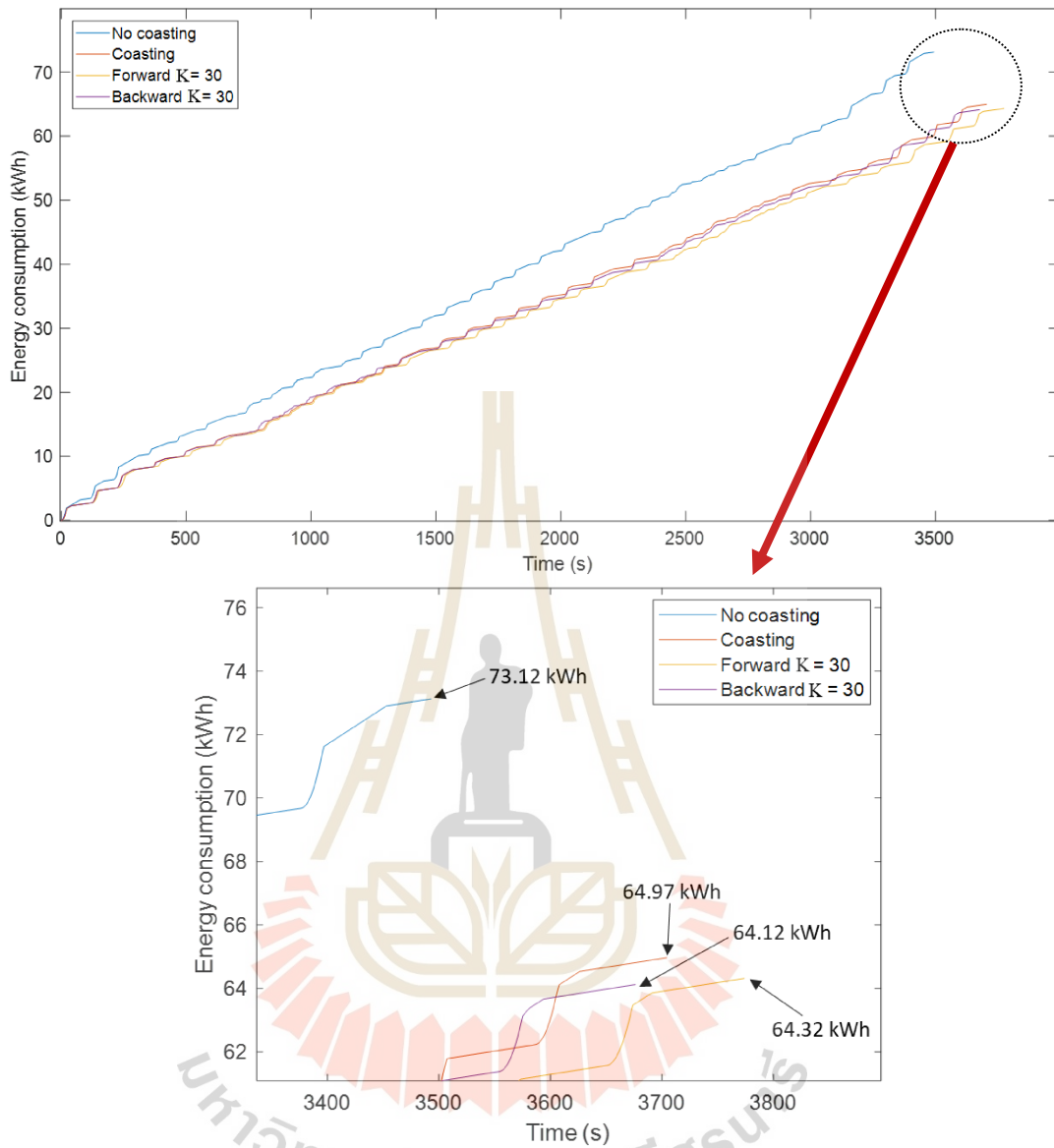
จากตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบพลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดโดยการคำนวณแบบย้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับกรณีฐานที่เป็นการเคลื่อนที่ปกติที่ไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย พบว่าพลังงานในการเคลื่อนที่มีค่าลดลงหลังจากการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยกำหนดการพลวัตโดยเมื่อค่า K เท่ากับ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 พลังงานจะลดลง 11.91%, 12.08%, 12.14%, 12.20%, 12.27% และ 12.31% ตามลำดับ เวลาในการเคลื่อนที่ของทุก ๆ ลักษณะความเร็วมีค่าไม่เกินที่กำหนด คือ 10% แต่ในทางกลับกันพลังงานที่ได้จากการเบรกมีค่าลดลงจากกรณีที่มีลักษณะความเร็วแบบปกติ เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง และมีการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยทำให้แรงในการเบรกลดลง จึงส่งผลให้พลังงานที่ไหลเข้ากลับไปยังชาร์จแบตเตอรี่ลดลงเช่นกัน ระดับประจุของแบตเตอรี่จึงมีค่าลดลงเมื่อขบวนรถเคลื่อนที่ถึงสถานีสุดท้าย โดยค่า K ที่ทำให้มีการประหยัดพลังงานมากที่สุด คือ K เท่ากับ 30

6.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณแบบย้อนกลับและแบบไปข้างหน้า

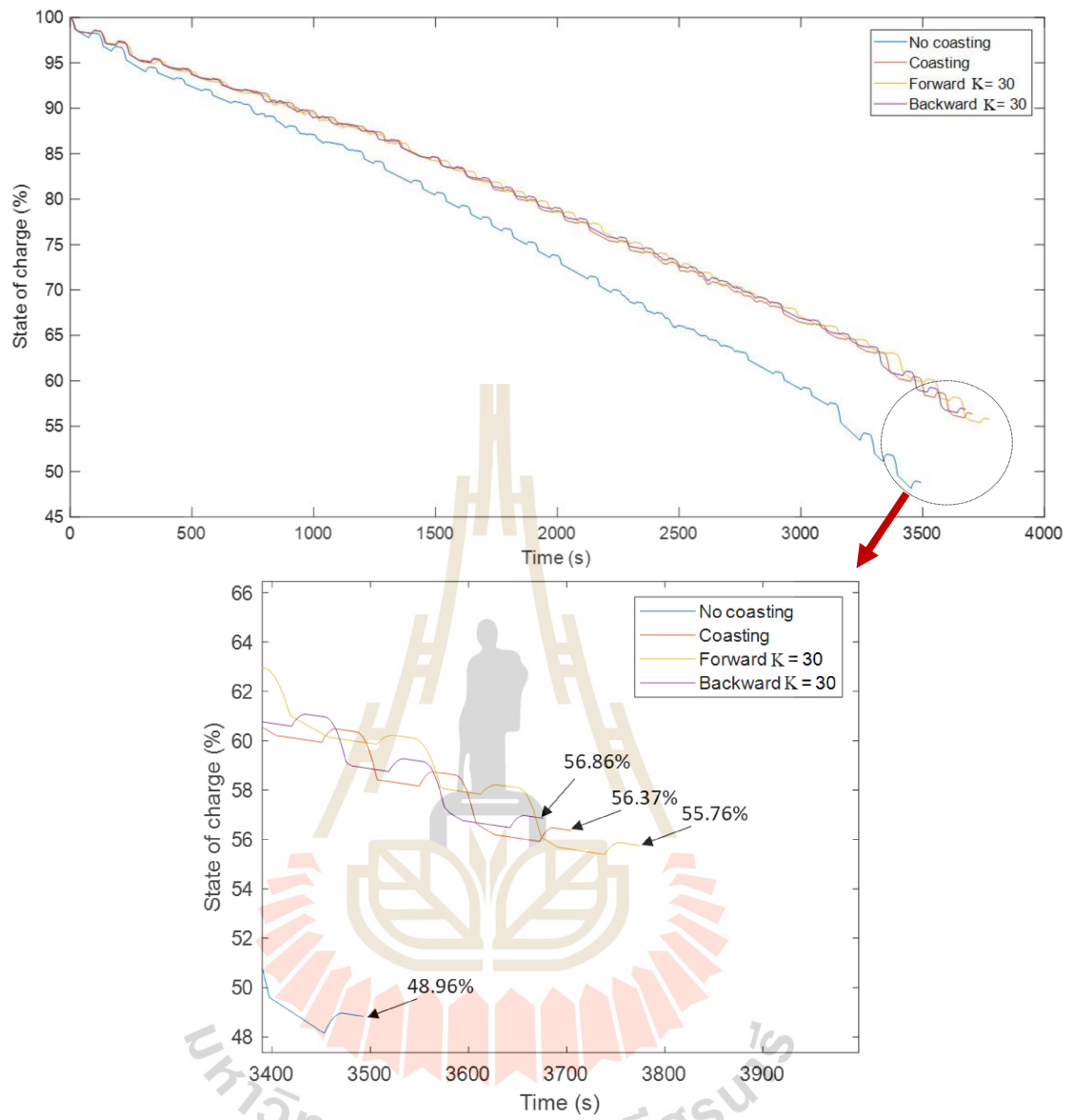
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมจากการคำนวณกำหนดการพลวัตแบบไปข้างหน้าโดยลักษณะความเร็วที่ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อ $K = 30$ และแบบย้อนกลับ เมื่อ $K = 30$ โดยเปรียบเทียบกับลักษณะความเร็วที่มีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย แสดงดังรูปที่ 6.7 โดยจากการคำนวณแบบไปข้างหน้า และแบบย้อนกลับ พบว่าการคำนวณทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งพลังงานหลังจากหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมลดลงจากลักษณะความเร็วที่ไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยที่มีพลังงานในการเคลื่อนที่ 73.12 kWh และที่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยมีพลังงานในการเคลื่อนที่ 64.97 kWh โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้าที่มีการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด K เท่ากับ 30 คือ 64.32 kWh และการคำนวณแบบย้อนกลับ มีการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด ที่ค่า K เท่ากับ 30 โดยมีพลังงานในการเคลื่อนที่ 64.12 kWh ดังรูปที่ 6.8 และระดับประจุของแบตเตอรี่จากการหาค่าลักษณะความเร็วที่เหมาะสมทั้งการคำนวณแบบไปข้างหน้า แบบย้อนกลับ และลักษณะความเร็วที่มีการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีระดับประจุของแบตเตอรี่อยู่ที่ 55.76%, 56.87% และ 56.37% ตามลำดับ โดยระดับประจุที่มีค่ามากที่สุด คือ ลักษณะความเร็วที่มีการคำนวณแบบย้อนกลับ คือ 56.87% มีค่าเพิ่มขึ้นจากลักษณะความเร็วที่ไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยจาก 48.96% เพิ่มขึ้น 7.91% ดังรูปที่ 6.9



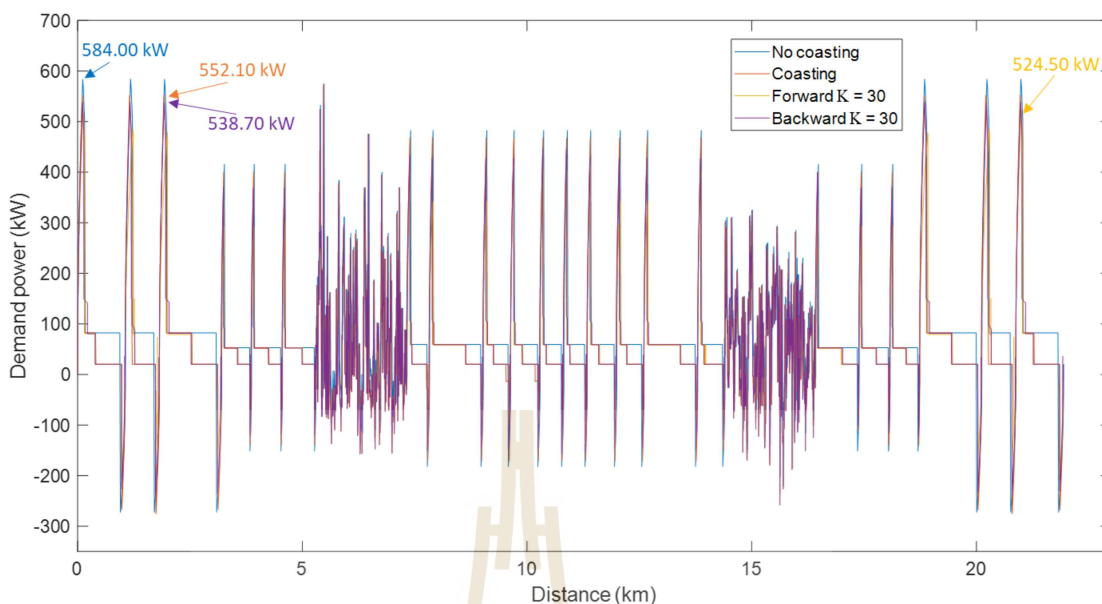
รูปที่ 6.7 ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่กรณีต่าง ๆ เทียบกับระยะทาง



รูปที่ 6.8 พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับเวลา



รูปที่ 6.9 ระดับประจุที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับเวลา



รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับระยะทาง

จากรูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วกรณีต่าง ๆ เทียบกับระยะทาง พบว่ามีลักษณะของกำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ไม่เท่ากัน โดยกำลังไฟฟ้าหลังจากการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมทั้งการคำนวณแบบไปข้างหน้าและการคำนวณแบบย้อนกลับมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่น้อยกว่าลักษณะการเคลื่อนที่ที่มีและไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย เนื่องจากมีความเร่งขณะอยู่ในโหมดเร่งความเร็วที่น้อยกว่า โดยการคำนวณแบบไปข้างหน้ามีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 524.50 kW และการคำนวณแบบย้อนกลับมาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 538.70 kW ซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเร่งความเร็วก่อนการเบรกในจากการเคลื่อนที่สถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 จากรูปที่ 6.7

6.5 สรุป

การลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ให้น้อยที่สุดของระบบขนส่งรถไฟฟ้ารางเบา เส้นทาง Korat LRT สายสีเขียว ด้วยการหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม โดยใช้กำหนดการพลวัตโดยมีการคำนวณสองแบบเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีกว่า คือ การคำนวณแบบไปข้างหน้า และการคำนวณแบบย้อนกลับ โดยมีการแบ่งระดับตัวเลือกความเร็วให้มีระดับที่แตกต่างกัน คือ 6, 10, 15, 20, 25 และ 30 ระดับ จากผลการคำนวณพบว่า ผลลัพธ์ของการคำนวณที่ดีที่สุด คือ การคำนวณแบบย้อนกลับ โดยสามารถประหยัดได้ 12.31% และเวลาในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 10% เมื่อเทียบกับกรณีของลักษณะการเคลื่อนที่ก่อนการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย

บทที่ 7

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

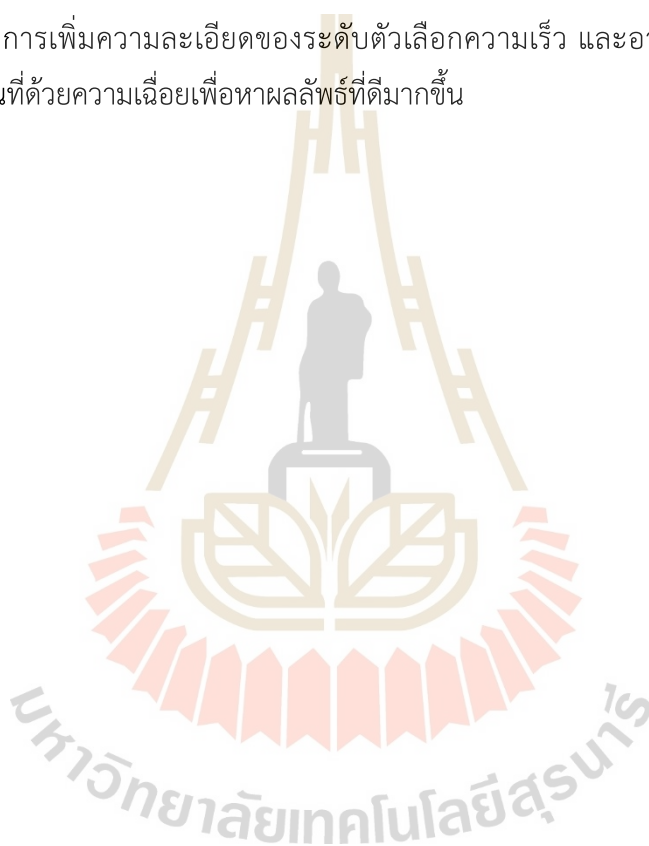
7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุดของระบบรถไฟฟ้ารางเบาที่มีแหล่งพลังงานเป็นแบตเตอรี่บนขบวนรถ ด้วยการหาลักษณะความเร็วที่เหมาะสมที่สุด คำนวณโดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองผล ได้เริ่มต้นด้วยการหากรณีฐาน ซึ่งใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบา เส้นทาง Korat LRT สายสีเขียวในการจำลอง ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งในการชาร์จที่มีผลต่อการใช้พลังงานที่รถไฟฟ้ารางเบาใช้ในการเคลื่อนที่โดยแบ่งเป็น 6 กรณี ได้แก่ การชาร์จทุก ๆ 1 สถานี การชาร์จทุก ๆ 2 สถานี การชาร์จทุก ๆ 3 สถานี การชาร์จทุก ๆ 5 สถานี การชาร์จที่สถานีปลายทาง และการชาร์จทุก ๆ การเคลื่อนที่ไป-กลับ และได้เปรียบเทียบพลังงานที่ชาร์จแบตเตอรี่ด้วยพลังงานจากการเบรก โดยจากผลการจำลองพบว่า เมื่อตำแหน่งในการชาร์จไกลออกไป ทำให้พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น โดยการชาร์จกรณีที่ 6 หรือการชาร์จที่สถานีต้นทางเมื่อเคลื่อนที่เดินทางไป-กลับ มีพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่และพลังงานจากการเบรกมากที่สุด เนื่องจากการที่ตำแหน่งในการชาร์จห่างไกลออกไป ทำให้ต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถไฟฟ้ารางเบาเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนของแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จในแต่ละสถานีทั้งเส้นทางขาไปและขากลับ กรณีที่ 6 มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยด้านต้นทุนและด้านพลังงานในการเคลื่อนที่ พบว่า กรณีที่ 6 เป็นกรณีที่มีความคุ้มค่ามากที่สุด เมื่อพิจารณาเพียงสองปัจจัยนี้ และได้เลือกกรณีที่ 6 เป็นกรณีฐานสำหรับการหาการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ที่น้อยที่สุด และได้มีการเพิ่มโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยที่ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของขบวนรถลดลง

การหาลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม โดยใช้วิธีกำหนดการพลวัต โดยคำนวณทั้งสองกรณี คือ การคำนวณแบบไปข้างหน้า และการคำนวณแบบย้อนกลับ มีการสร้างตัวเลือกความเร็วที่ใช้ในการตัดสินใจในขั้นตอนของกำหนดการพลวัตที่สร้างจากขอบเขตความเร็วโดยใช้ลักษณะการเคลื่อนที่ที่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเป็นลักษณะความเร็วอ้างอิง และใช้ขอบเขตเวลาในการเคลื่อนที่ของลักษณะความเร็วที่ไม่มีโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย จากผลการคำนวณพบว่า ลักษณะความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่ทำให้การใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด คือ การคำนวณแบบย้อนกลับ โดยสามารถประหยัดพลังงานได้ 12.31%

7.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาเพียง 1 ขบวน ซึ่งในความเป็นจริง ระบบขนส่งมวลชนมีการให้บริการของรถไฟฟ้ารางเบาที่มากกว่า 1 ขบวน และอาจมีช่วงเวลาที่ขบวนรถจอดที่สถานีเดียวกันเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ จึงอาจต้องคำนึงถึงจำนวนของเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ในการคำนวณเรื่องต้นทุน และอาจต้องพิจารณาผลกระทบของเวลาในการให้บริการเมื่อหาประสิทธิภาพที่เร็วที่เหมาะสม ดังนั้น การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเบาให้เหมือนกับระบบจริงต้องมีการจำลองรถไฟฟ้ารางเบาหลายขบวน และการหาประสิทธิภาพที่เร็วที่เหมาะสมอาจมีการเพิ่มความละเอียดของระดับตัวเลือกความเร็ว และอาจเพิ่มการปรับระยะของโหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น



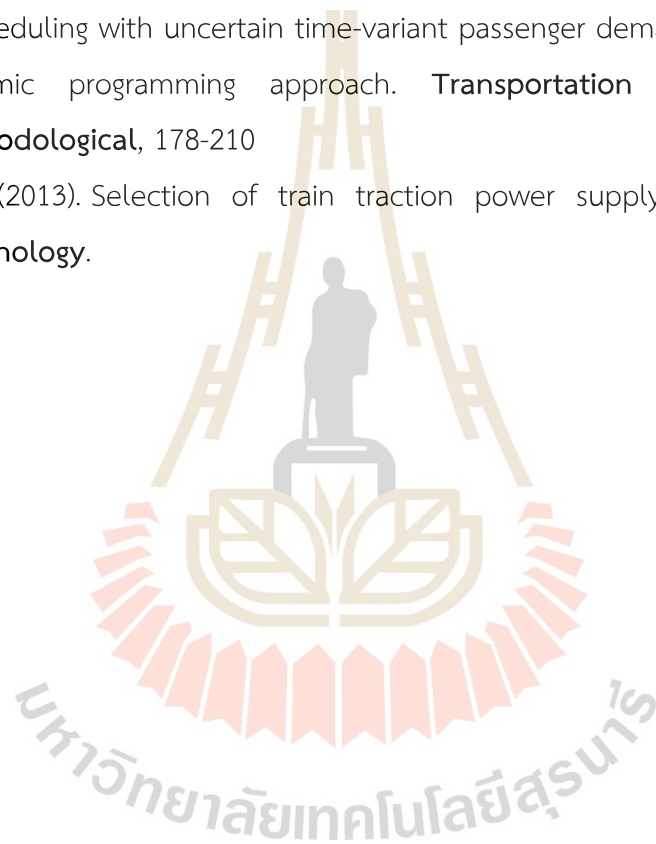
รายการอ้างอิง

- ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์. (2560). กลยุทธ์การตัดค้ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- ชนิดชัย กุลรวรานิชพงษ์. (2561). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Railway Electrification). ตีพิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชนิดชัย กุลรวรานิชพงษ์. (2562). **Dynamic programming**. เอกสารประกอบการสอนวิชา Power System Optimization สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Alfieri, L., Iannuzzi, D., Mottola, F., Pagano, M., & Roscia, M. (2018). Battery-Based Energy Storage Systems for Catenary-Free Electric Trains. **2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)**.
- Arikan, Y., & Cam, E. (2019). Optimizing of Speed Profile in Electrical Trains for Energy Saving with Dynamic Programming. **2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)**.
- Becker, F., & Dammig, A. (2016). Catenary free operation of light rail vehicles — Topology and operational concept. **2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)**.
- Bertsekas, D. (2015). **Dynamic programming and stochastic control**. Massachusetts Institute of Technology.
- Colak, K., Czarkowski, D., & Leon, F. de. (2012) Energy minimization for catenary-free masstransit systems using Particle Swarm Optimization. **2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion**.
- Dutta, O., Khodaparastan, M., & Mohamed, A. (2018). Wayside Energy Storage System for Peak Demand Reduction in Electric Rail Systems. **2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)**.

- Einhorn, M., Conte, F. V., Kral, C., & Fleig, J. (2010). A method for online capacity estimation of lithium-ion battery cells using the state of charge and the transferred charge. **2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)**.
- Ezee, H. A., Tennakoon, S. B., Taylor, I., & Scheidecker, D. (2015). Aspects of catenary free operation of DC traction systems. **2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**.
- Ghaviha, N., Bohlin M., Wallin, F., & Dahlquist, E. (2015). Optimal Control of an EMU Using Dynamic Programming. **Energy Procedia**.
- Ghaviha, N., Bohlin M., Holmberg, C., & Dahlquist, E. (2019). Speed profile optimization of catenary-free electric trains with lithium-ion batteries. **Journal of Modern Transportation**.
- Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M. & Dahlquist, E. (2017). Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. **Energy Procedia**.
- Gil, G. A., Palacin, R., & Batty, P. (2013). Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. **Energy Conversion and Management**, 374-388.
- Haahr, J. T., Pisinger, D., & Sabbaghian, M. (2017). A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points. **Transportation Research Part B: Methodological**.
- Hirose, H., Yoshida, K., & Shibanuma, K. (2012) "Development of catenary and storage battery hybrid train system. **2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion**.
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., Cao, F., & Li, K. (2018). Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: A dynamic programming-based approach. **Computers & Industrial Engineering**, 149–164.
- Jin, S. (2021). Research on New Rail Transit Power Supply System Scheme. **Journal of Physics: Conference Series**.
- Jobsoongnern, C., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2022). Electrical power supply system planning for a modern catenary-free rapid charging. **Energy Reports**, 958-965.

- Klohr, M., & Frohlich, M. (2008). Onboard Energy Storage System with UltraCaps of Railway Vehicles. **2008 American Public Transportation Association (APTA) Rail Conference.**
- Lu, S., Hillmansen, S., & Ho, T. K. (2013). Single-Train Trajectory Optimization. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.**
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, 511-536.
- Mwambeleko, J. J., & Kulworawanichpong, T. (2017). Battery and accelerating-catenary hybrid system for light rail vehicles and trams. **2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON).**
- Miyatake, M., & Ko, H. (2010). Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, 263–269.
- Miyatake, M., Hiroto, H., & Satoshi, S. (2009). Optimal speed control of a train with On-board energy storage for minimum energy consumption in catenary free operation. **Power Electronics and Applications.**
- Noda, Y., & Miyatake, M. (2016). Methodology to apply dynamic programming to the energy-efficient driving technique of lithium-ion battery trains. **2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC).**
- Okui, A., Hase, S., Shigeeda, H., Konishi, T., & Yoshi, T. (2010). Application of energy storage system for railway transportation in Japan. **The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA** (pp. 3117-3123). Sapporo, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Ratniyomchai, T., Hillmansen, S., & Tricoli, P. (2013). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. **IET Electrical Systems in Transportation**, 9-20.

- Sutphrom N. (2019) Optimal positions and capacities of wayside energy storage systems for mass rapid transit: Silomline. **Master Thesis Suranaree University of Technology.**
- Wang, Y., Yang, Z., & Li, F. (2018). Optimization of Energy Management Strategy and Sizing in Hybrid Storage System for Tram. **Energies.**
Selection of train traction power supply modes. *Journal of Technology*
- Yin, J., Tao, T., Yang, L., Gao, Z., Ran, B. (2016). Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: An approximate dynamic programming approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, 178-210
- Zhixin, He. (2013). Selection of train traction power supply modes. **Journal of Technology.**

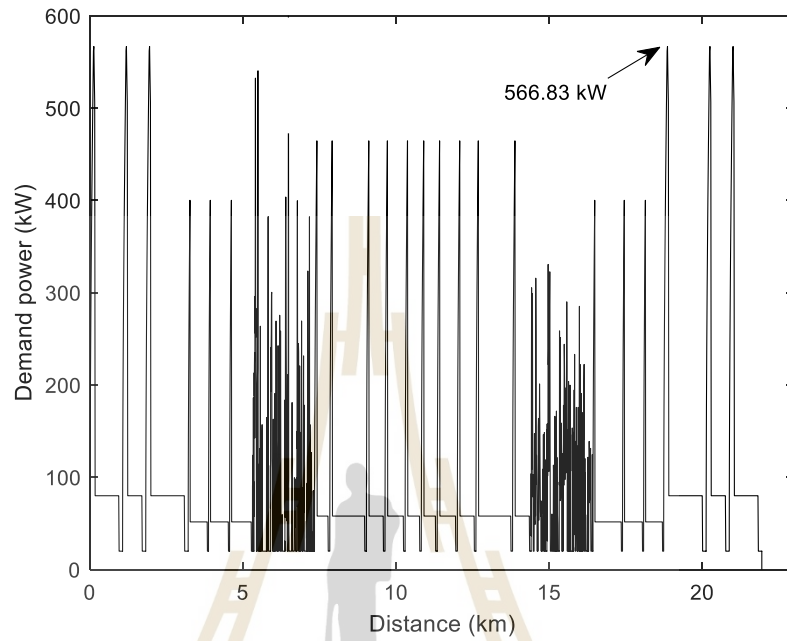




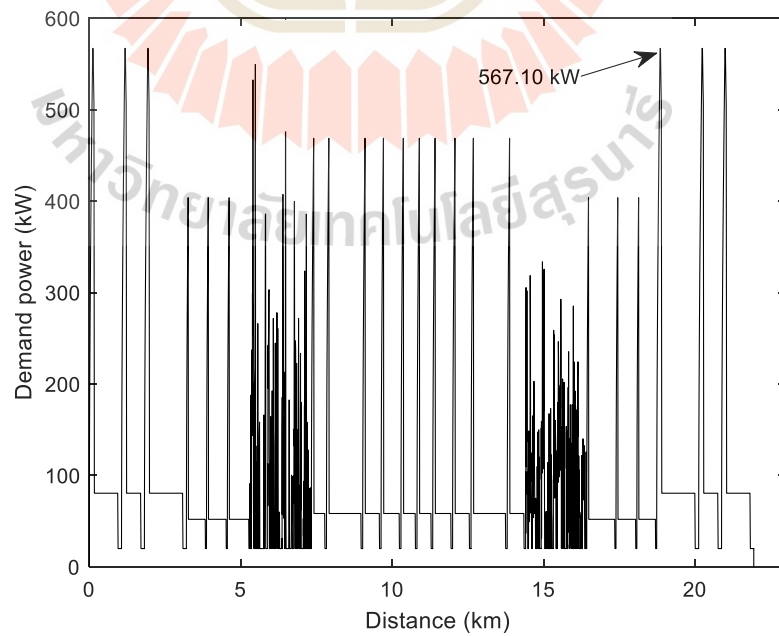
ภาคผนวก ก

ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารางเบากรณีต่าง ๆ

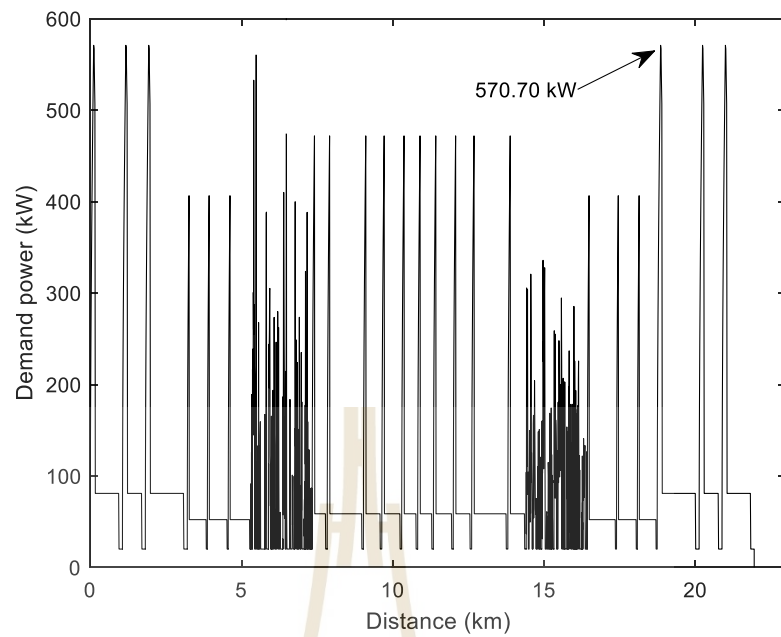
ก.1 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารางเบากรณีไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



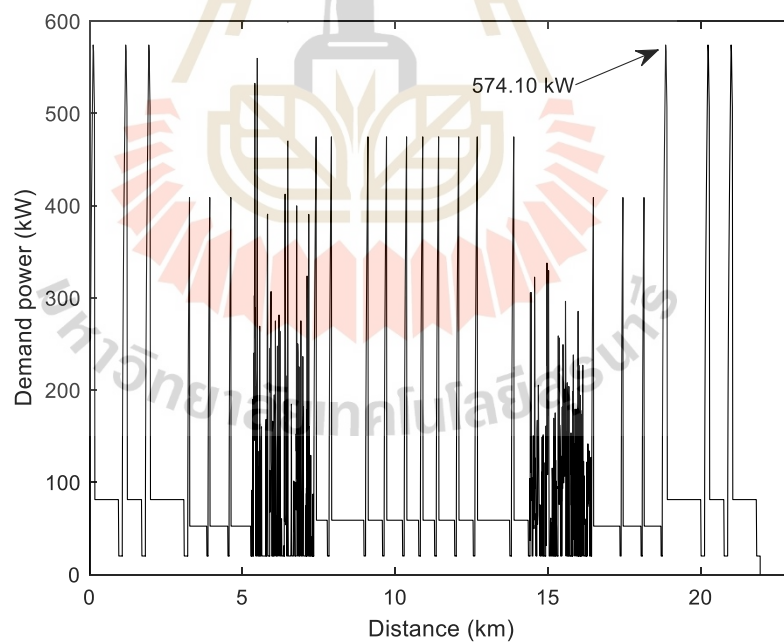
รูปที่ ก.1 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 1 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



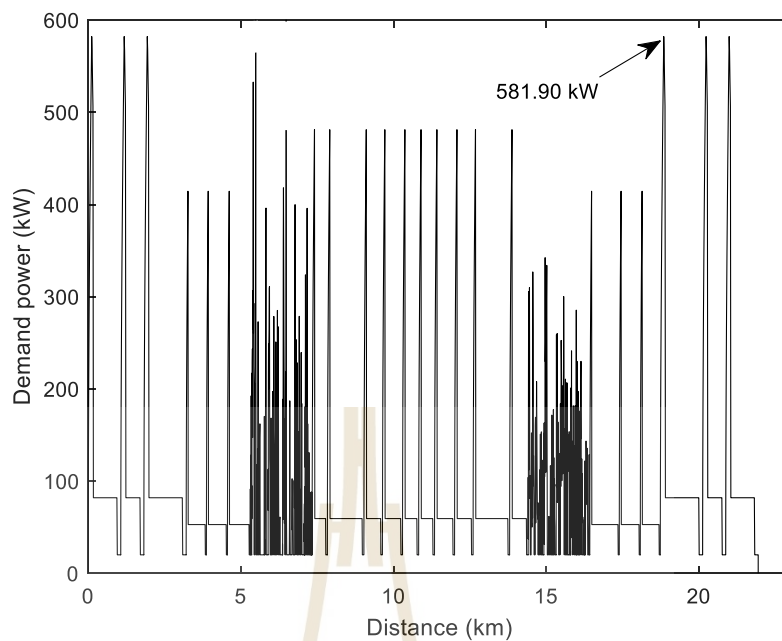
รูปที่ ก.2 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 2 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



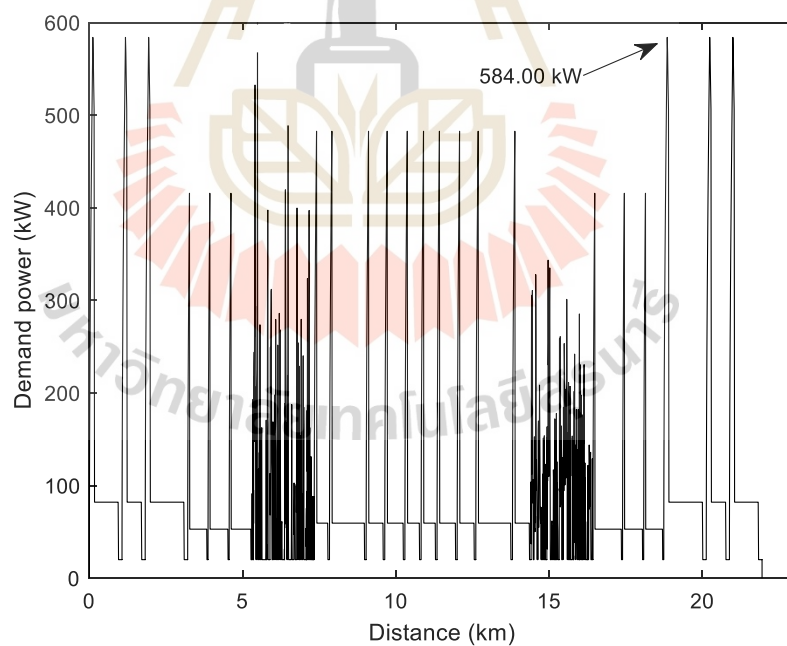
รูปที่ ก.3 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 3 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก



รูปที่ ก.4 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 4 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

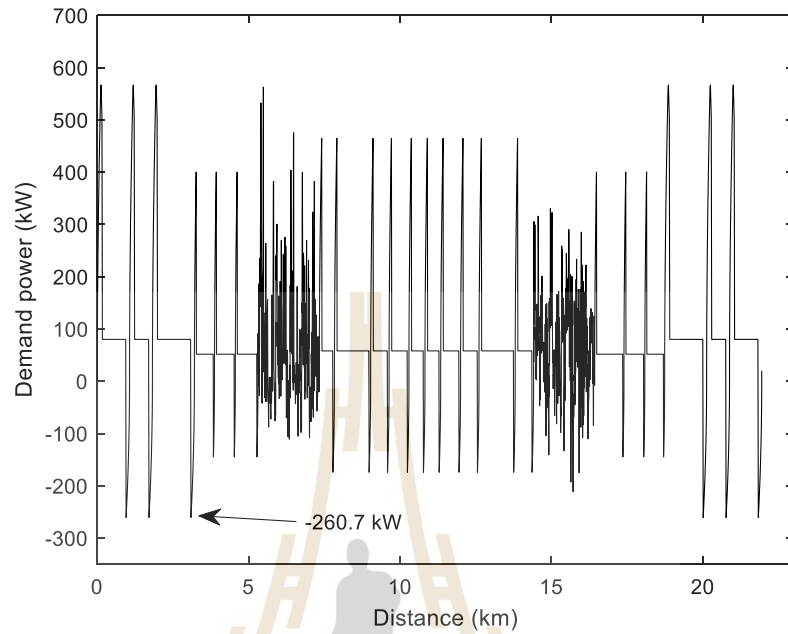


รูปที่ ก.5 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 5 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

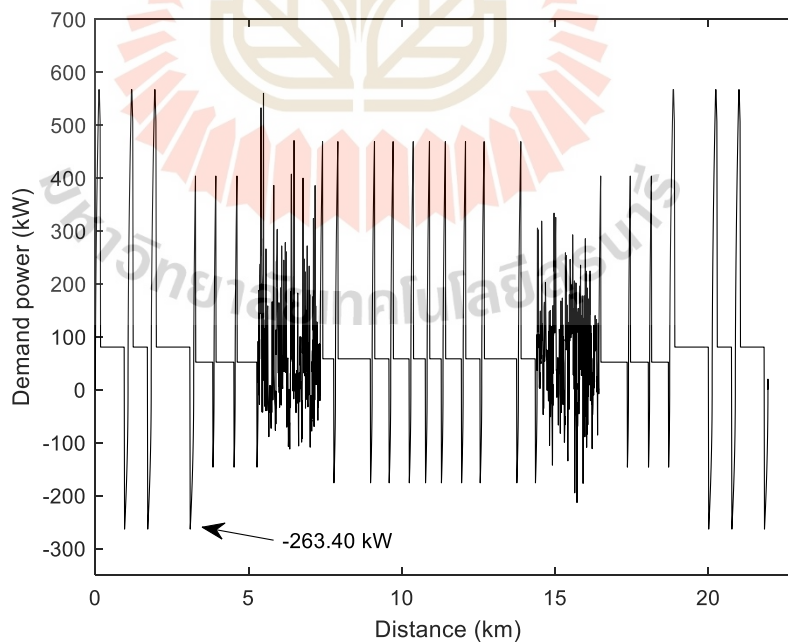


รูปที่ ก.6 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 6 เมื่อไม่พิจารณาพลังงานจากการเบรก

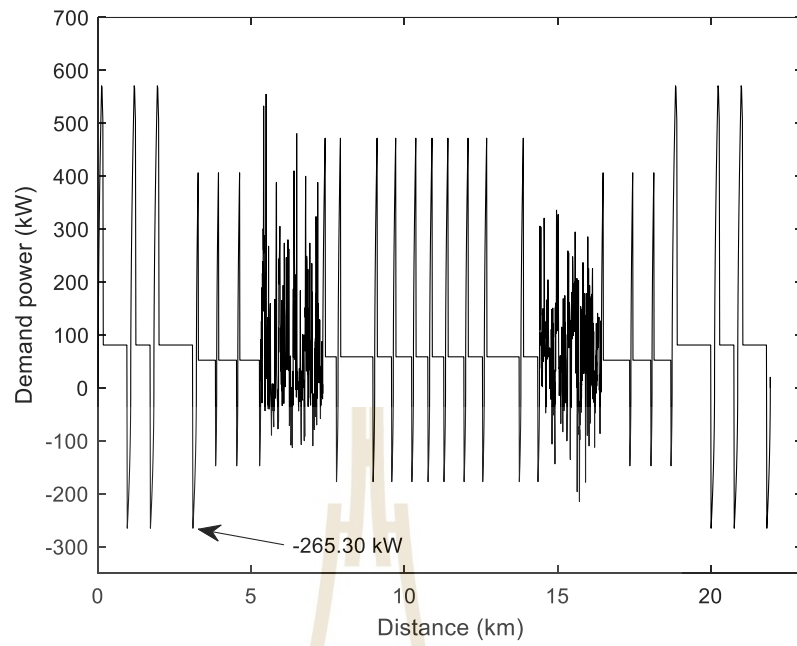
ก.2 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารางเบากรณีพิจารณาพลังงานจากการเบรก



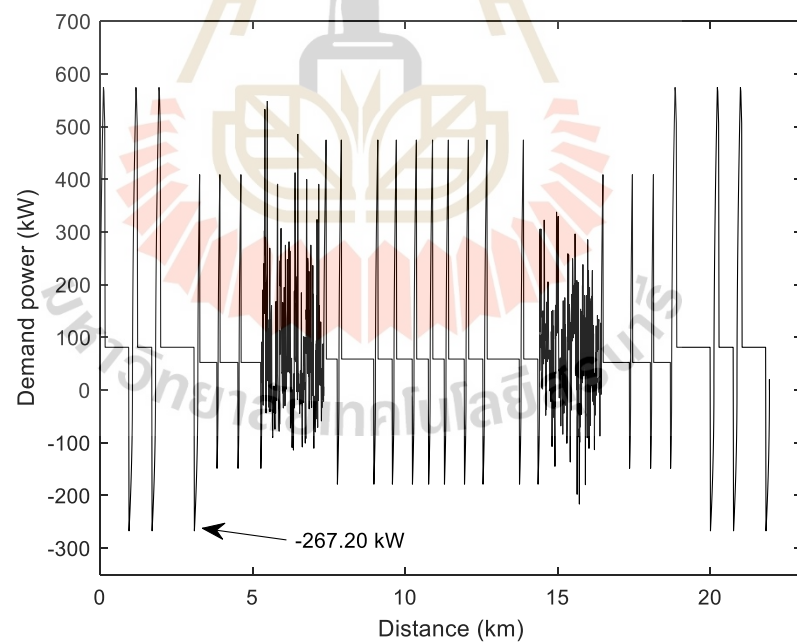
รูปที่ ก.7 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



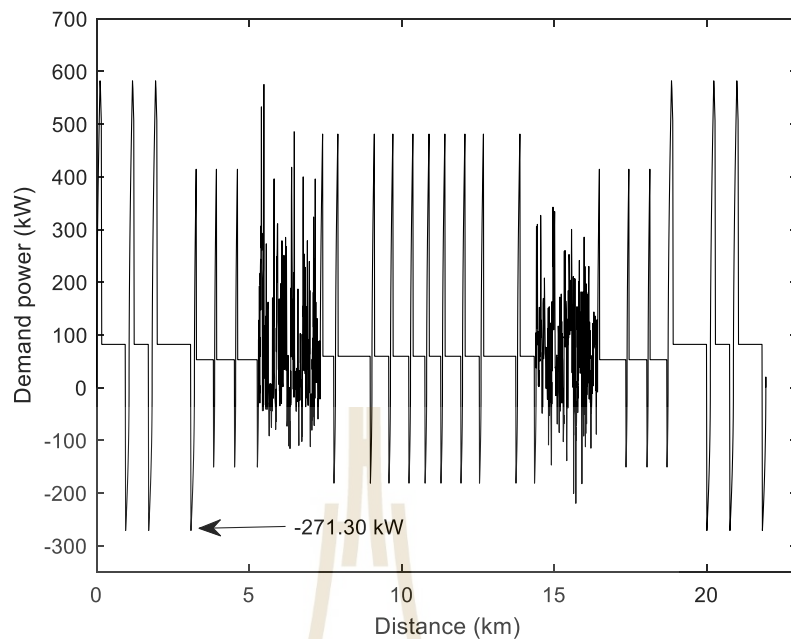
รูปที่ ก.8 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



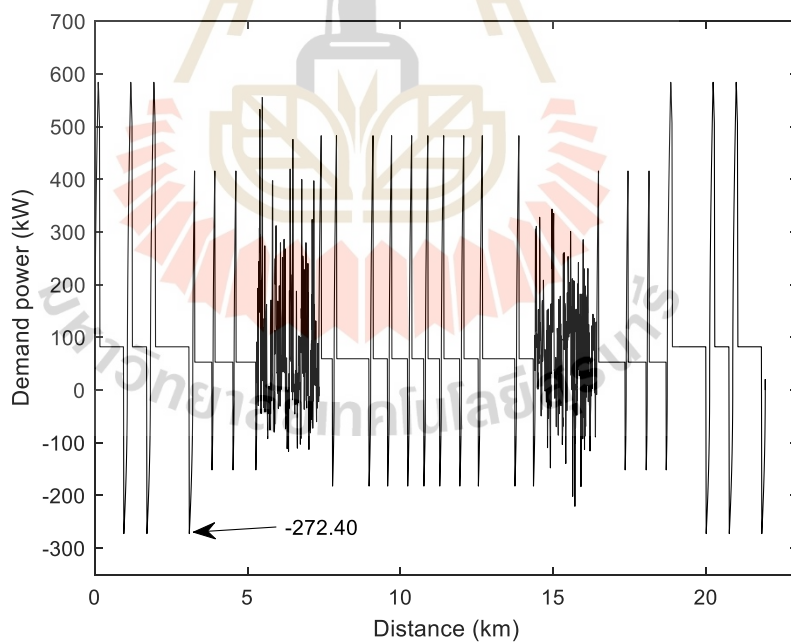
รูปที่ ก.9 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 3 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก



รูปที่ ก.10 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 4 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

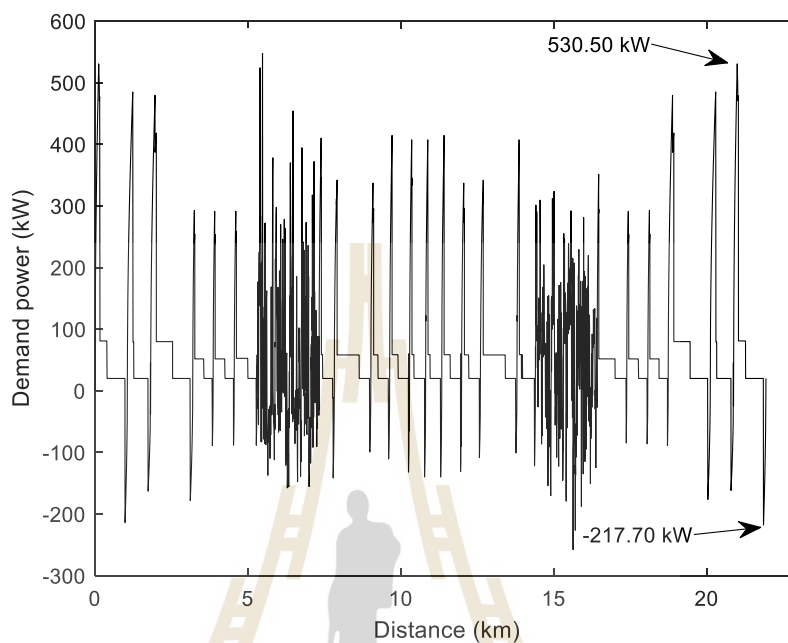


รูปที่ ก.11 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 5 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

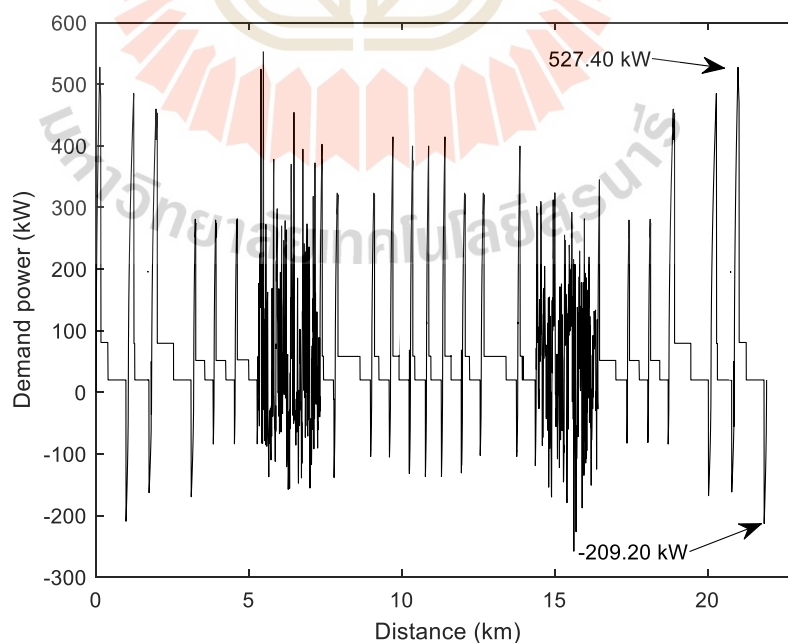


รูปที่ ก.12 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีที่ 6 เมื่อพิจารณาพลังงานจากการเบรก

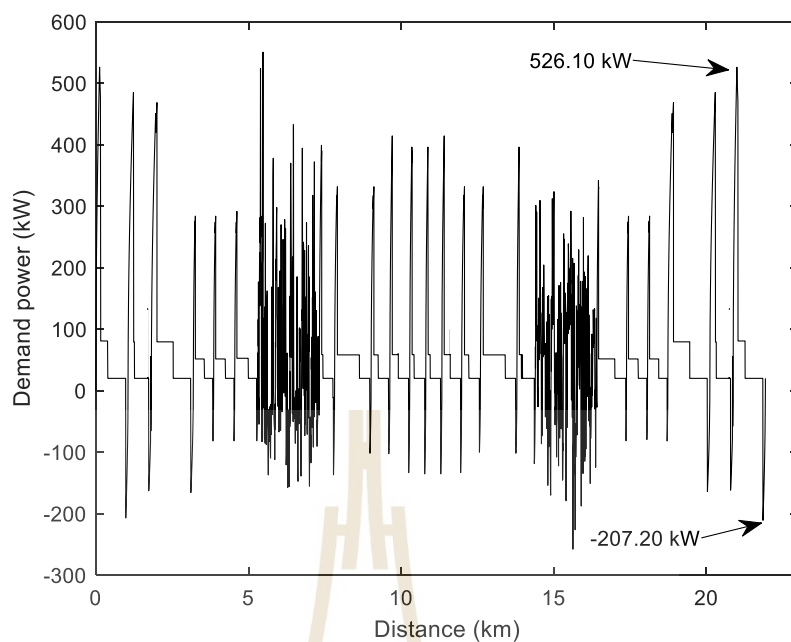
ก.3 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารางเบากรณีลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยวิธีกำหนดการพลวัตคำนวณแบบไปข้างหน้า



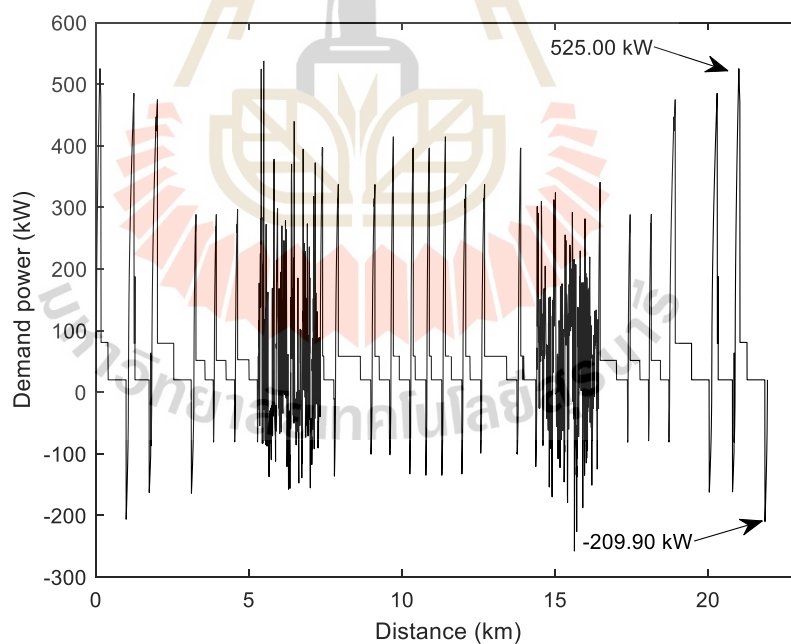
รูปที่ ก.13 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้าที่ $K = 6$



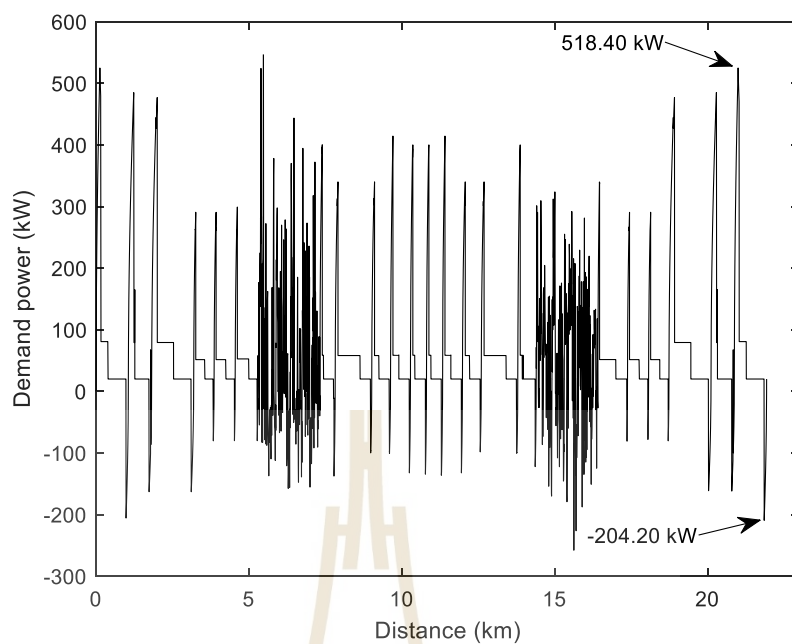
รูปที่ ก.14 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้าที่ $K = 10$



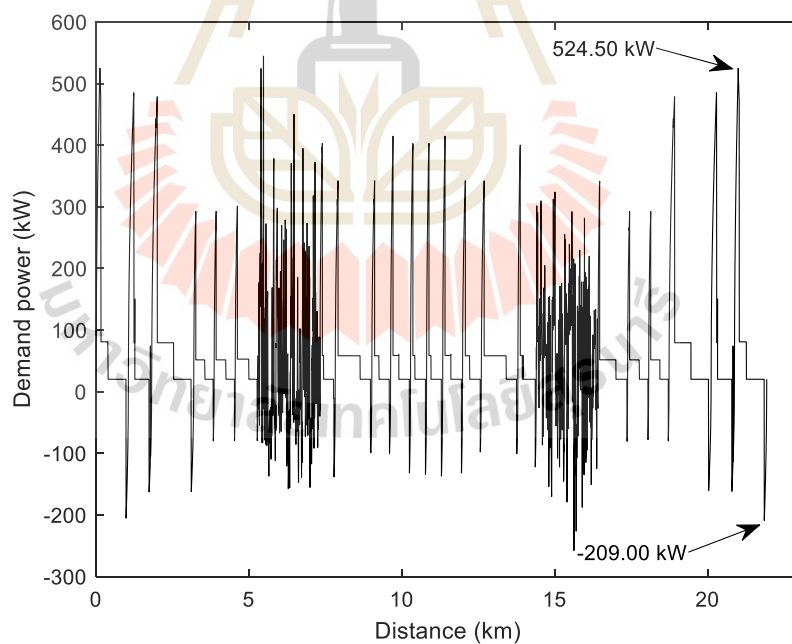
รูปที่ ก.15 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้าที $K = 15$



รูปที่ ก.16 กำลังไฟฟ้ารางเบาเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้าที $K = 20$

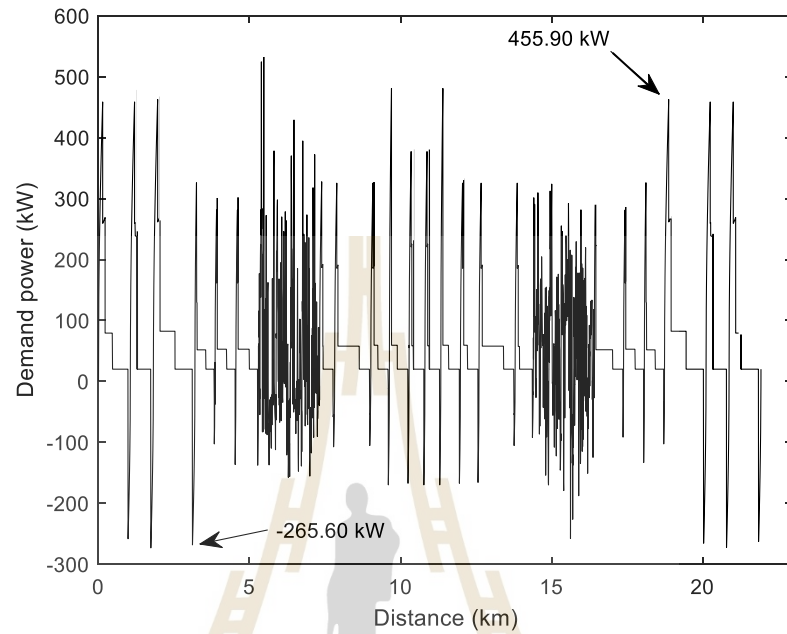


รูปที่ ก.17 กำลังไฟฟ้าเบาเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้าที $K = 25$

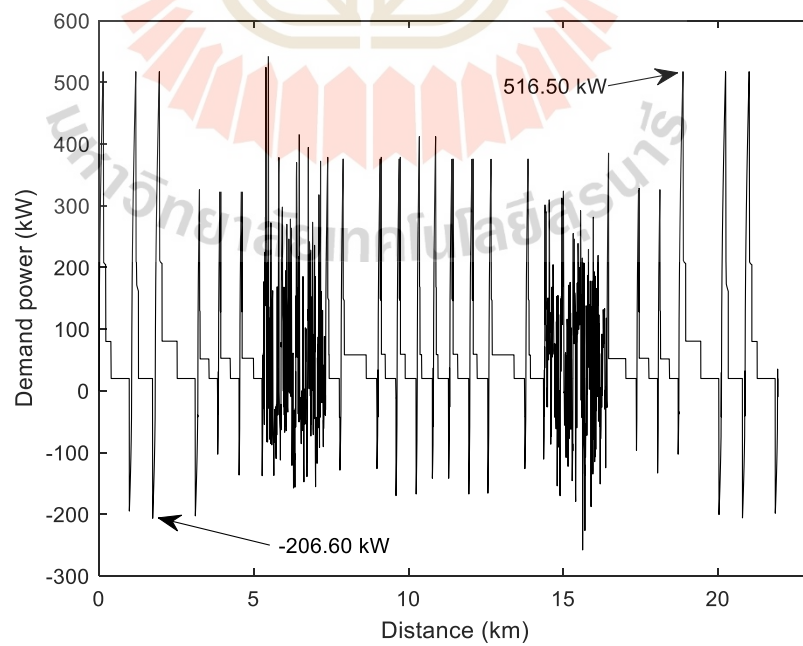


รูปที่ ก.18 กำลังไฟฟ้าเบาเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปข้างหน้าที $K = 30$

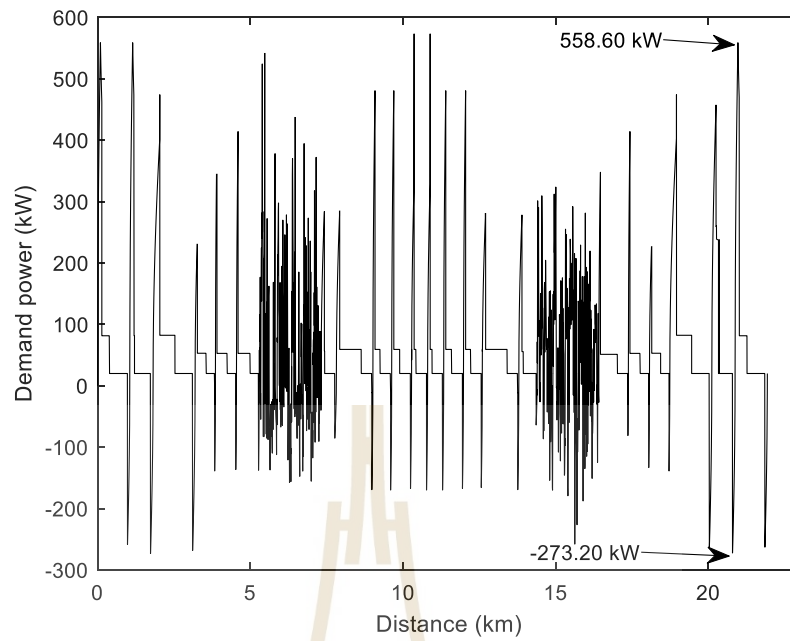
ก.4 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารางเบากรณีลักษณะความเร็วที่เหมาะสมด้วยวิธีกำหนดการพลวัตคำนวณแบบย้อนกลับ



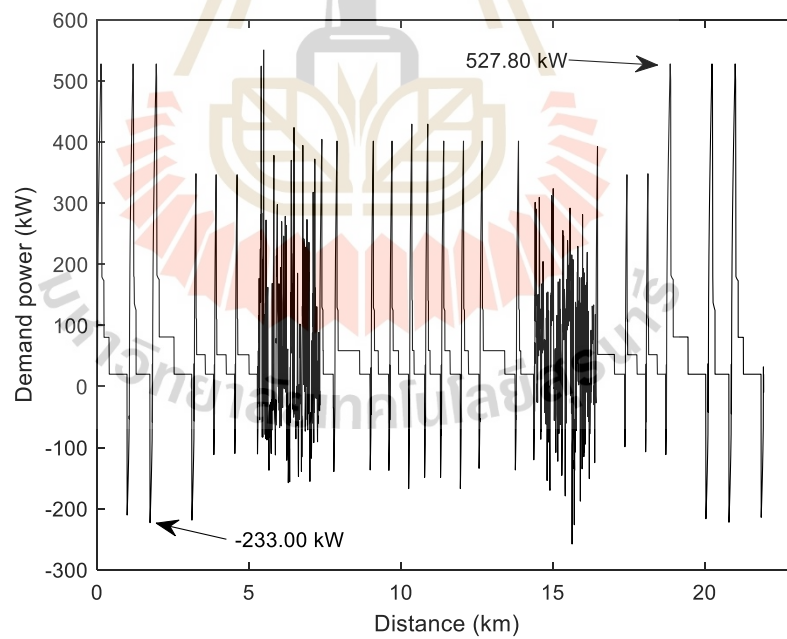
รูปที่ ก.19 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปย้อนกลับที่ $K = 6$



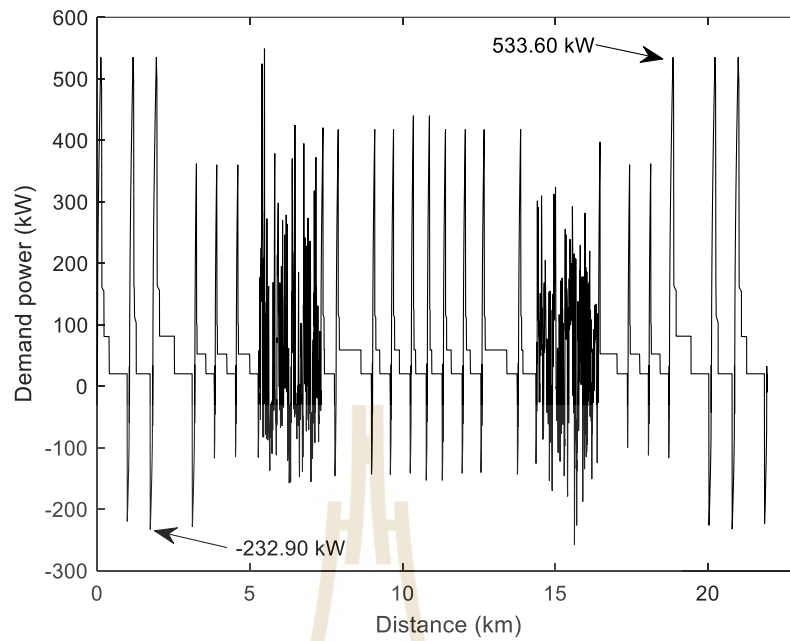
รูปที่ ก.20 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปย้อนกลับที่ $K = 10$



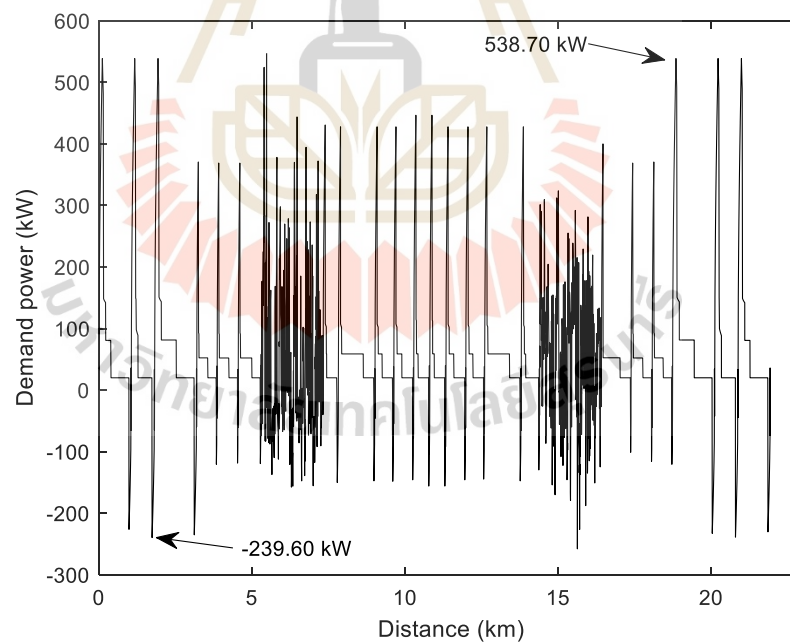
รูปที่ ก.21 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปย้อนกลับที่ $K = 15$



รูปที่ ก.22 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปย้อนกลับที่ $K = 20$



รูปที่ ก.23 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปย้อนกลับที่ $K = 25$



รูปที่ ก.24 กำลังไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง กรณีคำนวณแบบไปย้อนกลับที่ $K = 30$

ภาคผนวก ข
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- C. Jobsoongnern, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong. (2020). Energy Consumption Study of Rapid Charging of Catenary Free Light Rail Transit. **2020 International Conference on Power, Energy, and Innovations (ICPEI 2020)**. 14-16 October 2020, Chiangmai, Thailand.
- C. Jobsoongnern, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong. (2022). Electrical power supply system planning for a modern catenary-free rapid charging. **2022 The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES 2022)**. 2-4 April 2022, Tokyo, Japan.
- C. Jobsoongnern, and T. Ratniyomchai. (2023). Minimizing Energy Consumption of Onboard Battery Light Rail Transit Using Dynamic Programming. **GMSARN International Journal**. (Unpublished)

2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2020)
October 14-16, 2020, Chiangmai, THAILAND

Energy Consumption Study of Rapid Charging of Catenary Free Light Rail Transit

Chalita Jobsoongern
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: chalita.jobs@gmail.com

Tosaphol Ratniyomchai
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: tosaphol@sut.ac.th

Thanatchai Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: thanatch@sut.ac.th

Abstract— This paper presents the energy consumption study of catenary free light rail transit system using an on-board battery system as a main motive power source. This paper proposes a case study of energy consumption which has 3 sub-cases of charging points: i) charging at every stop, ii) charging at every 5 stops and charging once after one round trip. The charge is conducted by a rapid charge at the charging stop with dwell time of 20 seconds. By using the route of Korat Light Rail Transit Green Line project in Nakhon Ratchasima, Thailand that are 20 passenger stops and a total round-trip distance of 22 km. The total energy consumption for one round trip of the route is 136.866 kWh. For the different 3 cases, the different charging point effect to energy consumption, battery size and the cost of the battery. The longer the distance between the two consecutive charging points, the larger the kWh capacity of the on-board battery for the vehicle.

Keywords— Rapid charge, Catenary free, Energy consumption, On-board battery

I. INTRODUCTION

Nowadays, electric train is one of the best solutions for public transportation. In such a case, the transportation of long-distance between the acceleration to the maximum speed, electric trains need to use very high power from a battery. To reduce the power used from battery, therefore, if it is hybrid energy sources that accelerate to the maximum speed using power from a catenary, then the constant speed uses battery power. This will be recommended for long-distance high-speed trains with few stations [1]. When talking about traffic within the city, the interesting thing is the low-floor light rail transport (LRT) which has low running speed and can be seen in many cities. The LRT has energy sources technology both catenary and catenary free in some sections of the route. In the catenary free section, the LRT should have on-board energy storage. Which the LRT scheduling and charging time while catenary free operation can save energy [2]. Moreover, the LRT having on-board energy storage source, there are no overhead electrical installations (catenaries) that will not hide the beautiful view of the city, also reduce the complexity of construction and zero-emission. For energy storage systems that must be stored whether braking energy or charging during stop [3]. The important thing for the catenary free LRT is the size of energy storage that has to design by realizing performance and function requirements, identically,

the charging system such as a converter, a power conversion system, and a charge/discharge energy management [4]-[5].

The construction of electric rail transit with catenary cables is difficult. Both must obtain consent from the citizen and town planners because that can change the original lifestyle and the catenary cables might also decrease the value of the cityscape. Therefore, building a catenary free train is more likely. This happened in Nanjing, China since 2014 that demonstrates the sustainability of the catenary free operation, using Li-ion batteries as energy storage sources, with the concept of having a catenary free operation part between stations. The catenary operation part is throughout the station's platform to recharge energy. The changes during these 2 operations are all automatic [6].

Electric light rail transit is another option for traveling by public transport in the city with heavy traffic. In most cases, there are many stations or service points and have a slower speed than intercity electric trains. Currently, electric rail cars are available in many countries. There are both external energy source and internal energy storage source. This article demonstrates the simulation of the light rail vehicle (LRV) movement with an on-board battery energy storage. In which this simulation considered braking energy.

The remainder of this article will address the problem formulations in II, consisting of a light rail vehicle movement model and a battery model, III routes in simulation and case study, the simulation results is in IV and Conclusion is in V.

II. PROBLEM FORMULATIONS

A. Light Rail Vehicle Movement Model

The movement model of a light rail vehicle (LRV) from Newton's law of motion considers F_{RR} is the friction resistance to move, F_{grad} is the force of gravity and F_{drag} is the air resistance as in Fig. 1.

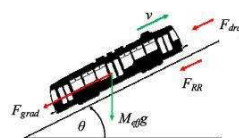


Fig. 1. Model of the movement of light rail vehicle

978-1-7281-7240-8/20/\$31.00 ©2020 IEEE

The power of the LRV movement is given by:

$$P_{train} = \frac{F_T v}{\eta_g \eta_m \eta_i} + P_{aux} \quad (1)$$

From (1), P_{train} is the LRV power used in the movement, F_T is the locomotive traction, v is the speed of light rail, η_g is gearbox efficiency, η_m is motor efficiency, η_i is inverter efficiency and P_{aux} is the auxiliary power.

$$F_T = M_{eff} a + F_R \quad (2)$$

From (2), M_{eff} is the effective mass of LRV, a is the acceleration and F_R is the tractive resistance.

$$F_R = F_{RR} + F_{grad} + F_{drag} \quad (3)$$

From (3), F_{RR} is friction resistance, F_{grad} is gradient force, F_{drag} is air resistance, which all parameter are calculated as follows:

$$F_{RR} = f_{RR} W \quad (4)$$

From (4), f_{RR} is the rolling resistance coefficient, W is the load of the driven axis.

$$F_{grad} = \pm M_{ff} g \sin \theta \quad (5)$$

From (5), g is the force of gravity, θ is the slope angle of a floor, shown in figure 1.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} c_d A_F v_{air}^2 \quad (6)$$

From (6), ρ_{air} is the air density, c_d is the air resistance coefficient, A_F is the area in front of the LRV that is projected perpendicular to the direction of the airflow, v_{air} is the airflow speed relative to the speed of the LRV.

B. Battery Model

In this simulation of the LRV movement using an on-board battery source as a simple model [7], as in Fig. 2, where the battery parameters have relationship as follows:

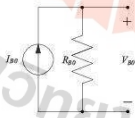


Fig. 2. Battery model

$$I_{B0} = \frac{kWh}{3600 \times V_{B0}} \quad (7)$$

$$R_{B0} = \frac{V_{B0}}{I_{B0}} \quad (8)$$

$$V_{B0} = R_{B0} \times (I_{B0} - I_d) \quad (9)$$

From (7) to (9), I_{B0} is the battery current, kWh is the battery capacity, R_{B0} is the internal resistance of the battery, V_{B0} is the battery voltage, I_d is the load current that is given by:

$$I_d = \frac{P_{train}}{V_{B0}} \quad (10)$$

From (10), P_{train} is the LRV power used in the movement from (1).

III. ROUTE AND CASE STUDY

A. Route

The simulation used the route of the green line Korat LRT, Nakhon Ratchasima, Thailand as shown in Fig. 3 with round trip distance of 22 kilometers, there are 20 stations to pick up passengers and charge the battery for 20 seconds, considering the route is a flat road without gradient.

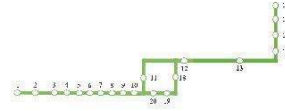


Fig. 3. Korat LRT green line route

B. Case Study

In this article, the case study is divided into 3 cases which are i) charging at every stop, ii) charging at every 5 stops, and charging once after round-trip. In which each case simulates the movement of the LRV by using a 24 V, 70 Ah lithium titanate oxide (LTO) battery manufactured by Altairmano [8]. The size of the battery pack used in the simulation varied by the distance of the charging point in each case. With different parameters of the batteries are shown in TABLE I.

TABLE I. BATTERY PARAMETERS

Parameter	Battery value	Battery Pack Value		
		Case I	Case II	Case III
Nominal Voltage (V)	24	528	696	648
Nominal capacity (Ah)	70	140	210	280
Maximum continuous charge	500	1000	1500	2000
Maximum continuous discharge (A)	500	1000	1500	2000
Maximum pulse charge 10 s (A)	900	1800	2700	3600
Maximum pulse discharge 10 s (A)	900	1800	2700	3600
Weight (kg.)	28	1232	2436	3024

IV. SIMULATION RESULTS

The LRV movement was simulated in MATLAB, the speed profile of the LRV compared with the distance as in Fig. 4 shows that the maximum speed is 40 km/h. and stop when arriving at station for 20 second. Some sections of the route, the LRV shares the rail with public roads which have inconstant

speed and some stop because of crown traffic. The section of shared rail for the outbound is from station 8 to 14 and the return is 14 to 20. The parameters of the LRV use in this simulation for each case are shown in TABLE II.

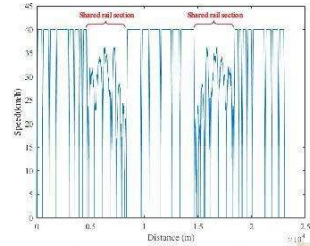


Fig. 4. round-trip speed profile

TABLE II. LRV PARAMETERS

Parameters	Value
Maximum speed (v)	40 km/h
Maximum Acceleration (a)	0.7 m/s ²
Effective mass (M_{eff})	44000 kg
Rolling resistance coefficient (f_{rr})	0.006
Aerodynamic drag coefficient (c_d)	0.6
Air density (ρ_{air})	1.225 km/m ³
Frontal area (A_f)	8.4 m ²
Gearbox eff. (η_g)	0.93
Motors eff. (η_m)	0.9
Inverter eff. (η_i)	0.9
Auxiliary power (P_{aux})	20 kW

A. Case I: Recharge at every stop

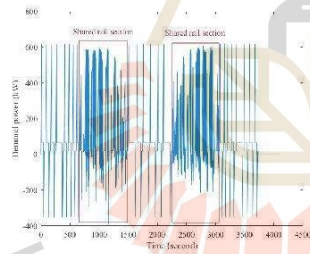


Fig. 5. LRV demand power

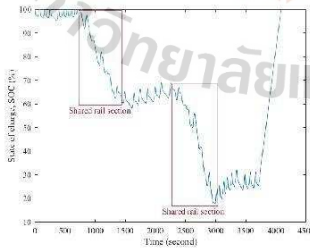


Fig. 6. State of charge of case I

B. Case II: Recharge at every 5 stops

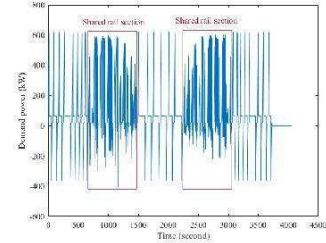


Fig. 7. LRV demand power

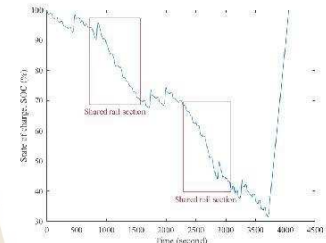


Fig. 8. State of charge of case II

C. Case III: Recharge once after round-trip

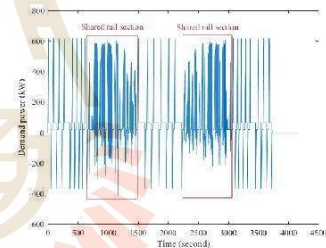


Fig. 9. LRV demand power

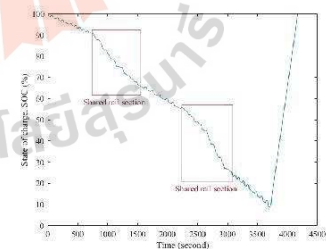


Fig. 10. State of charge of case III

From all three cases, in Fig. 5, 7, 9, can be seen that the demand power of the LRV is compared with the time, which is combined with the traveling speed

in Fig. 4. The maximum power of all three cases is around 619 kW, but there are a few differences by the effect of battery weight. The LRV reaches the maximum power when the LRV accelerating to a maximum speed of 40 km/h. The power decrease to around 67 kW when the LRV using a constant speed. In some sections of the route, there will be a period of inconstant speed during the shared rail with a public road. The LRV consumes a lot of energy to travel, as can be seen from state of charge (SOC) in Fig. 6, 8, 10 that reduced because there is heavy traffic then the LRV has to accelerate, decelerate, and stop frequently. For the case I, II, the LRV will park at the station for recharge the battery for 20 seconds. For case III, the LRV will recharge once after traveling round trip. The charging will continue from the SOC of 10% until the battery is full at the end of round-trip. In additions, the case I and II also continue charging from the SOC of 25% and 32%, respectively until the battery is full at the final terminal. Additionally, the battery also by regenerative braking. To calculate the cost of battery size that considers by the size of the battery in kWh as 1,005\$/kWh [9].

TABLE III. TOTAL ENERGY CONSUMPTION

Case	Charging point	Total Energy Consumption (kWh)	The cost of battery (\$)
I	Recharge every stop	136.400	74,289
II	Recharge every 5 stops	136.713	146,890
III	Recharge round trip	136.866	182,347

TABLE III. shows comparing the total energy consumption used for powering of the LRV that can be seen when the charging points also have more distance from each point that affects the energy used to service. In case I Total energy consumption is 136.400 kWh is the less than the others case that case II is 136.713 kWh and case III is 136.866 kWh. This is a result of the larger battery size causing the weight of the LRV that affects more energy to be used in the movement. The total energy consumption compared to case I is charged at every stop, when the distance of the charging point changes to every 5 stops, the total energy consumption increases by 0.23% and compared to case III that the charging point changes to once round-trip charging, the total energy consumption increased by 0.34%. The cost of the battery Case I is less than case II and case III respectively. To consider only the total energy consumption and the cost of the battery, there can be seen that the frequency of charging gives a similar result, but the cost of the battery is very different then the first case is the worthiest.

The project of the Korat LRT green line route is now on the study of details on the suitability and feasibility of the system design and analysis. Therefore, the results of the analysis of energy consumption and battery cost that were used in different scenarios of charging battery of the LRV based on the Korat LRT green line route in this paper

are alternatively applied in the system of the Korat LRT green line route in the near future.

V. CONCLUSION

The light rail transit is an interesting alternative for public transport in cities with heavy traffic and ideally more if the light rail does not negatively affect the weather, both by air and scenery. This article presents the simulation of light rail vehicles with an on-board battery. The battery is recharged at the station when picking up a passenger. There are divided into 3 cases which are charging at every stop, charging at every 5 stops, and charging once after a round trip. From the simulation results, it can be concluded that the further charging point leads to larger battery size and higher battery cost. Resulting in increased energy used in the movement of light rail vehicles and the distance of the charging point also affects the charging time when the LRV having a full charge.

REFERENCES

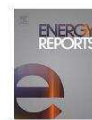
- [1] J. J. Mwambeleko and T. Kulworawanichpong, "Battery and Accelerating-Catenary Hybrid System for Light Rail Vehicles and Trams," 2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON), October 2017.
- [2] K. Ishino, K. Sakamoto and M. Miyatake, "Energy-saving Operating Strategy of a Catenary Free Light Rail Transit," 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, Japan, January 2013.
- [3] H. al-Ezee, S. B Tennakoon, I. Taylor and D. Scheidecker, "Aspects of Catenary Free Operation of DC Traction Systems," 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK, December 2015.
- [4] L. Alfieri, D. Iannuzzi, F. Mottola, M. Pagano and M. Roscia, "Battery-Based Energy Storage Systems for Catenary-Free Electric Trains," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK, January 2019.
- [5] H. M. Al-Ezee, S. Tennakoon, I. Taylor, D. Scheidecker and J. Schweickart, "An On-board Energy Storage System for Catenary Free Operation of a Tram," International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17), Malaga, Spain, April 2017.
- [6] N. Ghaviha, M. Bohlin, C. Holmberg and E. Dahlquist, "Speed profile optimization of catenary-free electric trains with lithium-ion batteries," Journal of Modern Transportation, January 2019.
- [7] M. F. Robbins, "Ultimate Electronics: Practical Circuit Design and Analysis," 2019. [Online]. Available: <https://ultimateelectronicsbook.com/> [Accessed 20 January 2020]
- [8] Altair Nanotechnologies, "24 V 70 Ah Battery Module," 22 September 2016. [Online]. Available: <https://altairnano.com/products/battery-module/> [Accessed 11 November 2019]
- [9] Battery university, "Types of Lithium-ion," 10 July 2019. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion [Accessed 24 August 2020]



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Energy Reports 8 (2022) 958–965



www.elsevier.com/locate/egy

2022 The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES 2022),
2–4 April, 2022, Tokyo, Japan

Electrical power supply system planning for a modern catenary-free rapid charging

Chalita Jobsoongnern, Tosaphol Ratniyomchai, Thanatchai Kulworawanichpong*

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Received 16 May 2022; accepted 26 May 2022

Available online xxx

Abstract

Electric power supply system planning is practically an important function of the modern light rail transit system with catenary free operation and rapid charging. Installing a modern dynamic load of the traction power supply system with the local electric distribution network needs to consider its capacity and feeder to support enough and efficiently. In this paper, the design of the electrical power supply system of the pilot project of Nakhon Ratchasima Green Line light rail system with 11.6-km line length and 21 passenger stations operated with catenary-free and powered with an on-board energy storage device has been proposed and planned to replace the old local transportation. The traction power supply of the light rail system drawn power from the MV distribution feeder practically consist of receiving power substation, MV power feeding system power feeder substation, charging power supply and service power supply have been designed provided the configuration circuit. A rapid charge system to delivery high power to fulfill the on-board energy storage is considered to recharge at passenger stations with an overhead conductor or wireless power transfer during a short dwell time. A number of charging station is determined accordingly the capacity of the power substation and its positions. The traction power drawn by a train service round-trip that related to the capacity of the power substation as a charging station has been calculated by the simulation of the train movement. The regenerative braking energy during train operated in braking mode is also considered as a partial charging energy the on-board energy storage device. From the proposed design, the motive energy consumption of each scenario charging formations obtains the maximum charging energy drawn by the train between charging points, the capacity of on-board energy storage devices, maximum charging power and the total charging points.

© 2022 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, CEES, 2022.

Keywords: Power supply system; Catenary-free; Rapid charging; Light Railway Transit; On-board energy storage; Traction substation

1. Introduction

In the recent decade, several cities across the world have their own public transport system planning to serve the population growth and to support some other policies such as tourism, solving traffic congestion problems, etc.

* Corresponding author.

E-mail address: thanatchai@gmail.com (T. Kulworawanichpong).

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.269>

2352-4847/© 2022 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, CEES, 2022.

Electric transportation is determined as a smart choice for moving people with zero emission impact. In tradition, electric tram cars or light rail vehicles have been constructed and served several cities in such a way that overhead contact lines cover every single street corner of the city. This old fashion approach to feed electric energy to any moving vehicles has its visual effect to discomfort people sight of view or to interfere historical sites of the city heritage.

To have both zero emission and no visual impact, a so-called wireless or catenary-free vehicle system has been introduced [1–3]. A high-capacity lithium-ion battery is installed on-boarded a moving vehicle. The on-board energy storage device can be recharged in various schemes. During dwell time at stops, battery recharging can be carried out incorporating with a rapid charging machine equipped at that stopping platform. Up to date, this electric energy re-filling can generate a peak charging power up to date up to several hundred kilo-Watts. It can lead to fully charging of a 20-kWh battery with 500-kW peak charging power within 0.04 h or just 2.4 min. However, the peak power and the charging time are adjustable due to the design.

In a recent decade, many catenary-free tram or light rail projects were planned and constructed. Trams, so-called *Acumulador de Carga Rápida (ACR)* [4], in Seville, Spain have fast charging batteries, therefore they are not needing catenaries along the track. This tram line gives a range of 6.4 km in North-South direction route. The battery is partially recharged between stops by regenerative braking and at stops (13 stops totally), it is completely recharged in around thirty seconds by current drawn via pantograph from a short section of overhead line. Newcastle light rail, Newcastle, Australia, runs from Newcastle interchange in Wickham to Newcastle beach in the east end of Newcastle [5]. The 2.7-km catenary-free light rail system without overhead wires was launched and recognized. In China's Zhejiang province, the 10.6-km line operates between Jiaxing South high-speed train station and the city center [6]. 20 light rail vehicles were built and equipped with on-board batteries having the capacity to store 48 kWh energy after a 30-second rapid charge at each stopping station platform. The wireless or catenary-free vehicle system is demanded increasingly and trending to be a transportation mean of a modern city in the near future.

Nakhon Ratchasima is considered as the second largest city of Thailand in population and now planned for its own brand-new public transport system to replace the old fashion bus public transport system. Among cities of Thailand, Nakhon Ratchasima or Korat for short has a population of approximately 2.7 million, and generates about 250 billion baht in GDP [7]. As Northeastern Thailand's main transportation hub and economic center, Nakhon Ratchasima can be reached by many means, including private car, public bus, and train. Once there, it may be easier to get around with a private car, but there are standard forms of local transport available for visitors: i.e. songtaew (pick-up truck), motorbike taxi, and tuk tuk. Local bus services in this city have been changed time by time. In 2018, twenty local bus routes are still existed in this city [8]. Regarding to the Land Traffic Management Committee's resolution on the first meeting on 21st February 2018, the committee agree with Master plan and its feasibility's results presented by the Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP) to precede Nakhon Ratchasima public transport system under Public Private Partnership scheme (PPP). The committee also assigned MRTA (Mass Rapid Transit Authority of Thailand) to implement the master plan one route at a time by selecting the green line as a first project. Unlike other cities in Thailand, the Nakhon Ratchasima Green Line Light Rail Transit is planned to employ a wireless or catenary-free vehicle system.

2. Nakhon Ratchasima green line light rail transit system

The Project alignment of Nakhon Ratchasima Green Line starts at Saveone Market (West-end terminal station), runs on Highway no.2, turns right to Mookmontri road, then runs pass Nakhon Ratchasima railway station, after that continues to Pho Klang road, turns left in front of Thao Suranaree monument on to Rajadamnern road, turns right on to Highway no. 224, turns left on Highway no. 205 through Rajamangala University of Technology Isan, and end of project at in front of Baan Naree Sawat Protection and Occupational Development Center (East-end terminal station). The return trip, alignment runs back on the same path except the operation around the area of Thao Suranaree monument. While running on Highway no. 224, the alignment turns left to Chumpol road, runs pass the Thao Suranaree monument, and turns right to Chomsurang Yat road. Alignment meets the same path at the Huai Rot Fai 5-Way intersection, continues running along the path, and the end of Project at Saveone Market as shown in Fig. 1. The total length of this route is 11.17 km.

Starting from Saveone market station GL-01 to Bann Naree Sawat GL-16, the LRT line moves toward east direction passing 16 stopping station platforms. In the backward direction, moving from GL-16 to GL-01 passes totally 17 stopping station platforms. The Nakhon Ratchasima Green Line is conceptually designed by using battery or supercapacitor rail vehicles incorporating with rapid recharging at stopping stations.

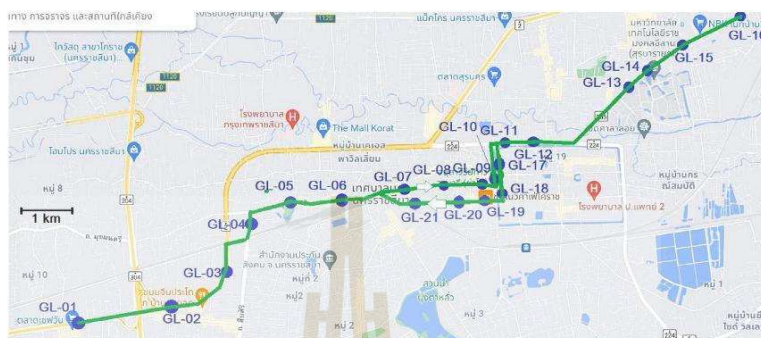


Fig. 1. Map of Nakhon Ratchasima Green Line Light Rail Transit.

3. Planning and design result

To obtain the electric power and energy drawn by the vehicle traveling on the running rail is related to the dynamic variables of position, speed, and acceleration of its movement. The train motion with these variables pertains all existing forces acting on its with unbalance according to the Newton’s second law of motion [9–12]. The train acceleration is directly depended on the net force making upon the train body and the mass of the train.

Electrical power supply can be divided into two separated systems. The power supply for rapid charging system is the first form to deliver electrical power to on-board energy storage device of vehicles by charging at four stopping platforms as previously mentioned. The second power supply is the power supply for electrical service power consumed at stopping platforms.

3.1. Power supply for rapid charging system

The Nakhon Ratchasima Green Line LRT Project uses on-board energy storage systems to supply the vehicles’ motive power. The electrical power supply system is designed to have four rapid charging stations located at GL-01, GL-06, GL-11 and GL-16. A total amount of energy consumption for a rail vehicle movement for the Nakhon Ratchasima LRT Green Line is calculated and shown in Fig. 2.



Fig. 2. Calculation of energy consumption for a rail vehicle movement for the Nakhon Ratchasima Green Line LRT.

A total amount of 53.2 kWh is spent for one rail vehicle traveled from Saveone market (GL-01) to Baan Naree Sawat (GL-16) or 4.86 Wh/m. This direction consists of 16 stopping platforms and the average per-unit stopping distance of 690 m. This implies that 3.35 kWh is used to travel for between two adjacent stops. There are 5 stops between GL-01 to GL-06, between GL-06 to GL-11 and between GL-11 to GL-16. Therefore, in this direction, a rail vehicle needs a total of 16.75 kWh to be consumed for traveling between any two adjacent rapid charging locations.

In the direction from Baan Naree Sawat (GL-16) to Saveone market (GL-01) a rail vehicle spends a total of 56.99 kWh for its motive power. This summarizes that a total consumption of 5.18 Wh/m is used for this travel between 16 stopping platforms of 650m/stop. This implies that 3.37 kWh/stop is consumed when traveled from GL-16 to GL-11 (5 stops), GL-11 to GL-06 (6 stops) and GL-06 to GL-01 (5 stops). Therefore, the maximum energy consumption between two adjacent charging location in this direction is 20.22 kWh.

As calculated previously, the minimum capacity of an on-board energy storage system should be sufficient to cover the travel between two adjacent charging stops that is 20.22 kWh or rounded up to 21 kWh. This calculation is based on the vehicle speed profile for both directions as shown in Fig. 3. This is a case of separate track that any street cars are not allowed to use this LRT lane. When Considering with the use of partial mixed traffic (a rail vehicle running on a street in the city) the speed profiles of this case are shown in Fig. 4.

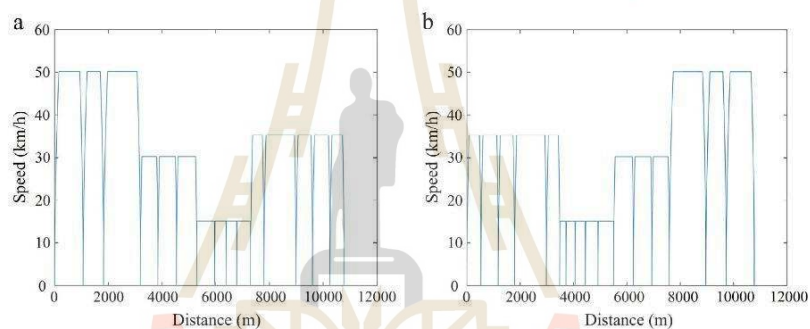


Fig. 3. Rail vehicle speed profiles for a separate track case. (a) Direction to Saveone market; (b) Direction to Baan Naree Sawat.

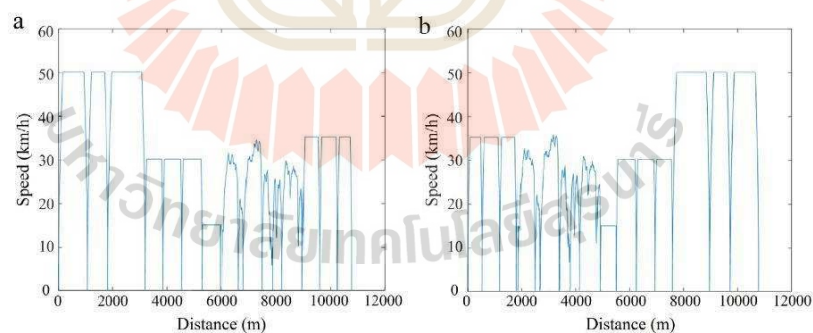


Fig. 4. Rail vehicle speed profiles for a mixed track case. (a) Direction to Saveone market; (b) Direction to Baan Naree Sawat.

Assuming that the dwell time is 40 s and the charger works in the constant power mode of operation. The rapid charging power to energize an on-board energy storage system during this dwell time can be computed as follows

$$P_{\text{charge}} = \frac{21 \text{ kWh}}{40 \text{ s}/3600 \text{ s/h}} = 1890 \text{ kW} \approx 2000 \text{ kW (2 MW)}$$

According to the distance between the two adjacent charging locations is 5 stops and each charging platform can deliver charging power to any vehicles in both directions, the maximum number of charging rail vehicles standing on the same charging location at the same time is two (in both directions). This leads to (2 × 2 MW) 4 MW of the maximum charging power per one charging location. The CTF rating is fairly 5 MVA (with 125% fairly designed) at each location as in Fig. 5.

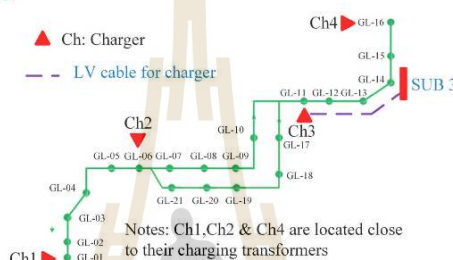


Fig. 5. Rapid charging locations on the Nakhon Ratchasima Green Line LRT.

As described in Fig. 5, the charging position is typically located at a stop equipped with the CTF except GL-11. The charging machine at GL-11 is connected to the CTF that installed in SUB3 which requires a 2300-m feeding cable for this connection. Voltage and current rating of the charging machine is dependent on specific requirements given on the detailed design. This is not included in the scope of this preliminary design. The charging formation is left to be selectable in the detailed design. This can be either a rooftop pantograph charging system or a wireless power transfer charging system. This preliminary design provides only 4 × 5 MVA charging transformers, one at each of four MV substations (SUB1, SUB2, SUB3 and SUB4).

Distribution circuits from each CTF installed in a feeder substation to a position that the charging machine installed can be shown in Fig. 6.

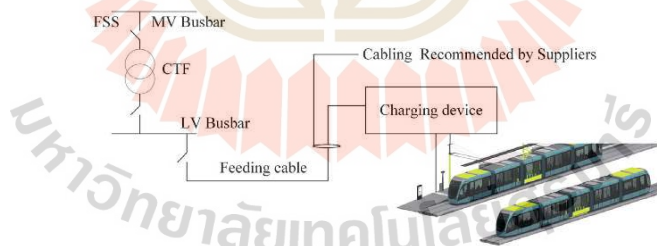


Fig. 6. Diagram for rapid charging machine of the Nakhon Ratchasima Green Line LRT.

3.2. Rapid charging power supply

An energy storage system on-boarding a vehicle is vital in a contemporary or modern rapid rail transit system. Catenary-free or wireless concept for power supply is new and still challenging. This can be simplified and split

into two sub-problems. The first one is to find optimal sizing of the on-board energy storage device. However, it is not the main focus of this study. The main focus of this study is the latter sub-problem. It is to design a charging system working incorporated with the pre-specified energy storage device sizing of rail vehicles. The charging system design is carried out with the concept of charge for moving. The main factor results in this design is how often a moving vehicle is charged during its journey. The longest distance between two consecutive charging points dominates the sizing of the energy storage device and therefore the charging machine rating.

Fig. 7 presents five charging formations (F1–F5) for Nakhon Ratchasima Green Line LRT. F1 is the first formation that a charging machine is installed at every stopping platform. This formation requires 18 charging locations. F2 is the formation that put the charging machine at every two stopping platforms. This formation requires 10 charging locations.

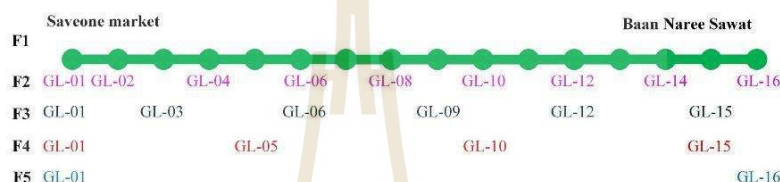


Fig. 7. Rapid charging formation.

Assume that a rapid rail transit line route has n charging location platforms. $D_{i,i+1}$ and $E_{i,i+1}$ denote the distance and motive energy required between two consecutive charging location platforms i and $i+1$, respectively. The required capacity E_{OB} of an on-board energy storage device in order to travel between any two consecutive charging location platforms can be determined by the following equation. According to this capacity and dwell time D_T at stopping platform, the power rating of the charging machine can be calculated by (1) and (2). It notes that k_1 and k_2 are arbitrarily design factors.

$$E_{OB} = k_1 \times \max_{i=1:n-1} E_{i,i+1} \tag{1}$$

$$P_{CH} = k_2 \times \frac{E_{OB}}{D_T} \tag{2}$$

The motive energy that each vehicle consumes during its journey between two charging stations can be calculated and presented as shown in Table 1 for cases F1–F4. Table 2 provides comparisons in some key aspects. The selection of charging formation is dependent on several factors. Obviously, overall cost determination is dominated in many design studies. Environmental impact and archaeological or ancient value are also important.

4. Conclusions

The electric power supply planning of the pilot project of Nakhon Ratchasima Green Line Light Rail System is an important role to support the traction power supply system especially the rapid charge to the on-board energy storage device of the catenary-free operation. The traction power supply system is designed to receive electrical power from the MV feeder line at both end railway lines to support four-traction substations connected by the underground feeding cable. The electrical power supply design results obtain the capacity of the power supply for the rapid charging system. The total energy consumption of a train running upward and downward directions are 53.52 kWh and 56.99 kWh, respectively, and the average of the energy used between stop stations are 3.35 kWh and 3.37 kWh, respectively. It found that the energy consumed by one train traveling between two adjacent rapid charging stations is about 21 kWh for the case study of four-rapid charging stations with rating of charging transformer of 5 MW. In addition, the rapid charging formation is also considered as five-scenarios according to the number and position of charging stations, including charging every 1-stop, 2-stops, 3-stops, 5-stops and only one stop at the terminal. Finally, the selected charging formation in terms of the total number of charging point and its capacity is dependent on the overall investment cost determination.

Table 1. Motive energy calculation for each charging formation.

Station code	From	To	F1	F2	F3	F4
GL-01	GL-01	GL-02	2.9135			
GL-02	GL-02	GL-03	4.3236	7.2371		
GL-03	GL-03	GL-04	1.9875		9.2246	
GL-04	GL-04	GL-05	2.5207	4.5082		13.4277
GL-05	GL-05	GL-06	1.6824			
GL-06	GL-06	GL-07	3.1294	4.8118	7.3325	
GL-07	GL-07	GL-08	4.2055			
GL-08	GL-08	GL-09	1.1178	5.3233		
GL-09	GL-09	GL-10	2.4935		7.8168	
GL-10	GL-10	GL-11	1.6905	4.1840		12.6367
GL-11	GL-11	GL-12	1.3392			
GL-12	GL-12	GL-13	1.9704	3.3096	5.0001	
GL-13	GL-13	GL-14	3.1095			
GL-14	GL-14	GL-15	2.9542	6.0637		
GL-15	GL-15	GL-16	2.1885			
GL-16	GL-16	GL-17	2.1328	4.3213	8.2522	11.5618

Table 2. Motive energy consumption for each charging formation.

Description	Charging formation				
	F1	F2	F3	F4	F5
	1 stop	2 stops	3 stops	4 stops	1-Ch/round
Max. kWh btw adjacent charging stop	4.3	7.2	9.2	13.4	82.96
Designed onboard ESS/vehicle (kWh)	9	15	18	27	160
Max. charging power (kW) in 20 s	788	1303	1660	2417	No
Total charging points	19	10	7	5	1

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work, Research ID: 2536975, was supported by (i) Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, (ii) Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and (iii) National Science, Research and Innovation Fund (NSRF), Thailand.

References

- [1] Becker F, Dämmig A. Catenary free operation of light rail vehicles —Topology and operational concept. In: European conference on power electronics and applications. 2016.
- [2] Mwambeloko JJ, Kulworawanichpong T. Battery and accelerating-catenary hybrid system for light rail vehicles and trams. In: 5th international electrical engineering congress. 2017.
- [3] Alfieri L, Iannuzzi D, Mottola F, Pagano M, M. Roscia M. Battery-based energy storage systems for catenary-free electric trains. In: IEEE international conference on electrical systems for aircraft, railway, ship propulsion and road vehicles and international transportation electrification conference. 2018.
- [4] Ameneiro AS. Adiós a las catenarias en la Catedral, Diario de Sevilla. 2011, [online]. Available: https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Adios-catenarias-Catedral_0_466453411.html [Accessed 16 July 2018].
- [5] Local News. Newcastle light rail down hunter street will be wireless. In: Newcastle herald. 2017, [online]. Available: <https://www.newcastleherald.com.au/story/4604384/light-rail-journey-set-to-be-wireless/> [Accessed 18 April 2017].
- [6] Clinkick R. First catenary-free light rail line opens in jiaxing. Int Railway J 2021. [online]. Available: <https://www.railjournal.com/passenger/light-rail/catenary-free-light-rail-line-opens-in-chinas-jiaxing-province/> [Accessed 4 July 2021].
- [7] Wikitravelorg. Nakhon Ratchasima – Wikitravel. 2019, [online]. Available: https://wikitravel.org/en/Nakhon_Ratchasima [Accessed 8 July 2019].

- [8] Wekorat by Wongnai. 2-Taew Korat map. 2016, [online]. Available: <https://wekorat.com/2016/04/07/2-taew-korat-map-download/> [Accessed 7 April 2016].
- [9] Goodman CJ. Overview of electric railway systems and the calculation of train performance. In: IET professional development course on electric traction systems. 2008.
- [10] Steimel A. Electric traction—motive power and energy supply: basic and practical experiences. Munich: Oldenbourg Industrieverlag; 2008.
- [11] Mashadi B, Crolla D. Vehicle powertrain systems: integration and optimization. Hoboken: Wiley; 2012.
- [12] Kulworawanichpong T. Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method. *J Modern Transp* 2015;23(4):241–51.



Greater Mekong Subregion Academic and Research Network (GMSARN)



Asian Institute of Technology

July 12, 2022

No. GMSARNJ 2022/14

Tosaphol Ratniyomchai
 School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
 Suranaree University of Technology
 Nakhon Ratchasima, Thailand

Dear Tosaphol Ratniyomchai,

Subject: Acceptance Letter (Paper ID. GMSARN-D-22-00049)

Title of the Journal: GMSARN International Journal
Paper Title: Minimizing Energy Consumption of Onboard Battery Light Rail Transit Using Dynamic Programming
Authors: Chalita Jobsoongnern and Tosaphol Ratniyomchai
Corresponding Author: Tosaphol Ratniyomchai

Thank you very much for your submission to our journal. We are pleased to inform you that your paper has been reviewed and accepted with revision for publication in Volume 17 Issue 4, 2023. In case you have not submitted copyright form; please send scanned copy shortly through e-mail: gmsarn@ait.ac.th. Thank you for making the journal a vehicle for your research interests.

Best wishes,

Prof. Weerakorn Ongsakul, PhD, CFA
 Editor-in-Chief
 GMSARN International Journal

GMSARN Office: Asian Institute of Technology

Postal Address:
 P.O. Box 4
 Klong Luang
 Pathumthani 12120
 Thailand

Street Address:
 Km. 42 Paholyothin Highway
 Klong Luang
 Pathumthani 12120
 Thailand

Tel: (66-2) 524-6537
 (for local calls, dial 02 before the tel no.)
 E-mail: gmsarn@ait.ac.th
 Internet: <http://www.gmsarn.com>



Hanoi University of Technology



Ho Chi Minh City University of Technology



Institute of Technology Cambodia



Khon Kaen University



Kunming University of Science and Technology



Chitralada Technology Institute



National University of Laos



Royal University of Phnom Penh



Thammasat University



Yangon Technological University



Yunnan University



Naresuan University



Suratthani Rajabhat University

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชลิตา จบสูงเนิน เกิดเมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2539 ที่อำเภอเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2561 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2562 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานตีพิมพ์ต่างปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี