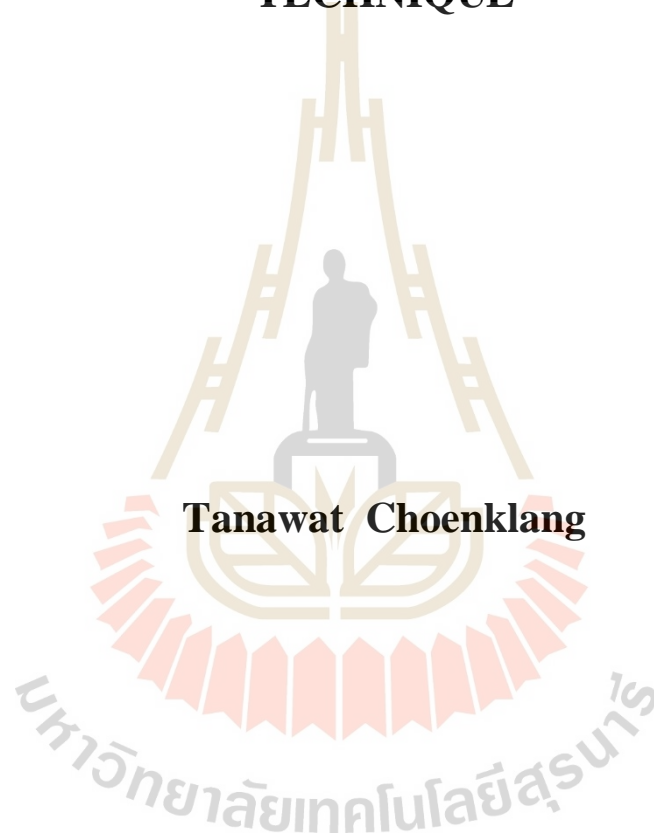


การจำลองของวิธีการควบคุมความเร็วสำหรับรถไฟเพื่อลดการใช้พลังงาน
ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

**SIMULATION OF SPEED CONTROL STRATEGY FOR
ELECTRIC RAILWAY TO REDUCE ENERGY
CONSUMPTION USING OPTIMIZATION
TECHNIQUE**



Tanawat Choenklang

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การจำลองของวิธีการควบคุมความเร็วสำหรับรถไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงาน
ด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีวงผล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อุเทน ลีตน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.กานท์ เกิดขึ้น)

กรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติษฐียงกูร)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ
ประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธนวัฒน์ เชิญกลาง : การจำลองของวิธีการควบคุมความเร็วสำหรับรถไฟเพื่อลดการใช้พลังงานด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (SIMULATION OF SPEED CONTROL STRATEGY FOR ELECTRIC RAILWAY TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION USING OPTIMIZATION TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตน, 112 หน้า.

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยศึกษาการรถไฟขบวนส่งมวลชนสายสุขุมวิทในช่วงเส้นทางสถานีห้าแยกลาดพร้าวจนถึงสถานีคูคตเป็นกลุ่มตัวอย่าง จำลองการ โดยการเขียนอัลกอริทึมบน โปรแกรม MATLAB เป็นวัตถุประสงค์หลักเพื่อคำนวณสมรรถนะในการเคลื่อนที่

การจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟในแบบพลวัตจะต้องศึกษารูปแบบการทำงานในแต่ละโหมดของการเคลื่อนที่ใน 1 วัฏจักร ได้แก่ โหมดความเร่ง โหมดรักษาความเร็ว โหมดการแล่น และโหมดการเบรก เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟหนึ่งขบวนตลอดเส้นทางให้บริการ 16 สถานี ระยะทางรวม 16.4 กิโลเมตร ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีวิวัฒนาการ โดยผลต่าง โดยออกแบบใช้กลยุทธ์การควบคุมความเร่ง อัตราเบรกและอัตราการเริ่มโหมดการแล่นเพื่อช่วยในการหาพลังงานสะสมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ต่ำที่สุด จากการดำเนินการจำลองผลโดยเลือกสถานีที่มีระยะห่างมากกว่า 1 กิโลเมตรและความเร็วสูงสุดที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้แก่ สถานีบางบัวถึงสถานีกรมทหารราบที่ 11 สถานีสะพานใหม่ถึงสถานีโรงพยาบาลภูมิพล และสถานีแยก คปอ.ถึงสถานีคูคต

จากผลการทดสอบการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการกำหนดตัวแปรควบคุมค่าอัตราการเบรกพร้อมกับระยะเริ่มต้นการแล่น เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลักคือการใช้พลังงานให้ต่ำที่สุดในการเคลื่อนที่ ผลปรากฏว่าการควบคุมอัตราเบรกและระยะเริ่มต้นการ โหมดการแล่นให้ผลการใช้พลังงานต่ำที่สุดตลอดการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีเป็นมากที่สุด 21.82% เมื่อเทียบกับกรณีฐานและเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาค่าที่ดีที่สุดกับวิธีเชิงพันธุกรรม พบว่าวิธีวิวัฒนาการผลต่างหาค่าได้น้อยกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมอยู่ที่ 1.67%

สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา ธนวัฒน์ เชิญกลาง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อุเทน ลีตน

TANAWAT CHOENKLANG : SIMULATION OF SPEED CONTROL
STRATEGY FOR ELECTRIC RAILWAY TO REDUCE ENERGY
CONSUMPTION USING OPTIMIZATION TECHNIQUE. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. UTHEN LEETON, Ph.D., 112 PP.

ENERGY SAVING/SINGLE TRAIN SIMULATION/DYNAMIC PROGRAMING/
OPTIMIZATION TECHNIQUE/DIFFERENTIAL EVOLUTION

The objective of thesis is study develop and design of train movement algorithm the case study on the Metro railways of Bangkok Transit System (BTS) Thailand select route 5th extension – Sukhumvit Line north 5 Yeak-Lad-Phrao to Khu-Kho station the simulation by implemented in MATLAB/M-file for dynamic single train movement calculation

The dynamic simulation of train movement in cycle has four modes: acceleration, cruising, coasting, and braking, which are used to calculate location, speed, tractive effort, power consumption, and energy consumption while traveling. 16 station passenger distance 16.4 km, although this has used the optimization approach using Differential evolution method to determine the objective function on Minimize energy consumption by controlling acceleration rate, deceleration rate, and coating point by choosing a distance between station passengers more than 1 km and a speed limit of 80 km/hr. Such as Bang bua to the 11th Infantry regiment, Saphanmai to Bhumibol hospital and Yaek Kor Por Aor to Khu khot Station passenger.

The best technique was found based on the application test findings by calculating the braking rate control variable in conjunction with the initial cruising distance. The objective function to minimization Energy consumption in

single train movement, the result the controlling deceleration and coating point parameter in travelling maximum 21.82 percent respectively, as compared to the base case and performance optimization compared Differential Evolution with Genetic Algorithm method result show Differential Evolution better to minimum energy consumption as 1.67%



School of Mechatronic Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature ศรวิวัฒน์ พิษณุทอง.

Advisor's Signature UJG.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินการวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ อัน ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยังต่องานวิจัยตลอดเวลาที่ได้ศึกษา รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลรวรานิชพงษ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและแนะนำ พร้อมทั้งถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระบบรางอย่างดียิ่ง

รองศาสตราจารย์ ดร. จิระพล ศรีเสริฐผล ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ช่วยเหลือคำปรึกษาและแนะนำด้านชีวิตและวิชาการ พร้อมทั้งให้กำลังใจมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพงษ์ ศรีวิชัย รวมถึง พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษา เพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่เป็นกัลยาณมิตร ร่วมทุกข์ ร่วมสุข ในการทำงานวิจัยอย่างทุ่มเท เสียสละช่วยเหลือ และเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการและคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยเสมอมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และคอยกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคอย่างไม่ย่อท้อ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ธนวัฒน์ เชิญกลาง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ข้อมูลเบื้องต้นในส่วนของงานขนส่งระบบราง.....	4
2.3 ประเภทรถไฟฟ้า.....	8
2.4 ระบบจ่ายไฟสำหรับรถไฟฟ้า.....	9
2.4.1 ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ.....	9
2.4.2 ระบบไฟฟ้ากระแสตรง.....	11
2.5 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า.....	11
2.6 โครงสร้างของระบบลากจูงขบวนรถไฟฟ้า.....	14
2.7 ประวัติรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8	ความเป็นมาของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ ถูกด	17
2.9	ข้อมูลจำเพาะของขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอสที่ให้บริการ	20
2.10	การป้อนไฟกระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้าบีทีเอส	23
2.11	ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ.....	24
2.12	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	26
2.13	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการผลต่าง	27
2.14	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.14.1	การพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนที่	32
2.14.2	การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	34
2.15	สรุป	35
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1	บทนำ.....	36
3.2	ออกแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	38
3.2.1	แรงดูดลากรถไฟฟ้า (Tractive effort force, F_{TE}).....	40
3.2.2	แรงต้านเกรเดียนต์ (Gradient force, F_{grad}).....	40
3.2.3	ค่าประสิทธิผลของน้ำหนัก	42
3.2.4	แรงเสียดทานของรถไฟฟ้า (Train Resistance, F_R)	42
3.2.5	แรงต้านทานความโค้ง (Curve resistance, F_{curve}).....	43
3.3	การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	43
3.4	การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่.....	45
3.5	เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากลุ่มตัวอย่าง	47
3.6	การแปลงข้อมูล NMEA ที่ได้จากการวัด	51
3.7	สรุป	52
4	ผลการดำเนินงาน.....	53
4.1	บทนำ.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ทดสอบแบบจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวน	53
4.3	เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากลุ่มตัวอย่าง	57
4.4	การทดสอบระหว่างข้อมูลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากลุ่มตัวอย่างกับระบบ จำลองผล	65
4.5	การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการผลต่าง	69
4.5.1	ตัวแปรควบคุม	70
4.6	ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	71
4.7	สรุป	78
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	79
5.1	สรุปผล	79
5.2	ข้อเสนอแนะ	80
	รายการอ้างอิง	81
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. สมการและชุดคำสั่งที่ใช้ในการจำลอง	84
	ภาคผนวก ข. ค่าที่ได้รับจากการเก็บข้อมูล	97
	ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่เผยแพร่ระหว่างการศึกษา	101
	ประวัติผู้เขียน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ระดับแรงดันทำงานที่จ่ายให้กับรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850..... 10
2.2	ระดับแรงดันทำงานที่จ่ายให้กับรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850..... 11
2.3	สรุปข้อมูลจำเพาะของรถไฟฟ้าบีทีเอส 22
3.1	แสดงข้อมูลจำเพาะของ GPS Module รุ่น SKE55 51
4.1	ข้อมูลด้านแบบจำลองรถไฟฟ้า 54
4.2	ข้อมูลด้านกำลังขับเคลื่อนรถไฟฟ้า..... 55
4.3	ชื่อ รหัส และระยะทางระหว่างสถานีของรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต 57
4.4	รัศมีความโค้งของเส้นทางรถไฟฟ้าบีทีเอส..... 61
4.5	ค่าแรงเฉื่อยที่ได้จากการวัด 63
4.6	ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง 68
4.7	ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการเก็บข้อมูลจริง..... 69
4.8	กรณีศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 71
4.9	ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีวิวัฒนาการผลต่าง 72
4.10	สรุปความแตกต่างจากการหาค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกรณีฐาน 73
4.11	เปรียบเทียบวิธีวิวัฒนาการผลต่างเมื่อเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรมภายใต้ เงื่อนไขเดียวกัน..... 74
4.12	สรุปผลการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อลดทอนพลังงานในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 78
ก.1	สมการที่ใช้ในการจำลองข้อมูลพื้นฐาน 85
ข.1	ค่าระดับแรงเฉื่อยที่ได้รับจากการเก็บข้อมูล..... 98

สารบัญรูป

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างรถไฟกับยานพาหนะชนิดอื่น ๆ.....	5
2.2	ขนาดความกว้างของระบบรางในประเทศภูมิภาคอาเซียน	6
2.3	ขนาดความกว้างของราง	6
2.4	รถไฟที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง	7
2.5	รถไฟที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้า	8
2.6	รถไฟไฟฟ้าที่มีระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ	9
2.7	ตัวรับและตัวส่งไฟฟ้ากระแสสลับ	10
2.8	ตัวรับไฟฟ้าจากรางที่สาม.....	12
2.9	รางที่สามในระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ	13
2.10	ระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ	13
2.11	ระบบจ่ายไฟรางเดี่ยว	14
2.12	ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์และระบบลากจูงแบบแยกส่วน	15
2.13	การต่อขบวนแบบ Push pull	15
2.14	การให้บริการของรถไฟฟ้ายานสายสีเขียว.....	16
2.15	แนวเส้นทางการให้บริการของรถไฟฟ้ายาน	18
2.16	เส้นทางการให้บริการและรหัสสถานีของรถไฟฟ้ายานสายสุขุมวิท.....	19
2.17	แนวเส้นทางการให้บริการในส่วนต่อขยายรถไฟฟ้ายานหมอชิต-คูคต สายสุขุมวิท	20
2.18	ลักษณะของรถไฟฟ้ายานบีทีเอสในแต่ละรุ่น	23
2.19	ระบบการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง.....	24
2.20	ภาพรวมระบบการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง	24
2.21	ตารางเวลาและความถี่ในการเดินรถไฟฟ้ายานบีทีเอสสายสุขุมวิท	26
2.22	แสดงการค้นหา Mutant vector	28
2.23	การ Crossover ของ Target Vector และ Mutant Vector	29
2.24	แผนผังขั้นตอนการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี DE	30

สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.25	การเข้าสู่จุดที่เหมาะสมด้วยวิธี DE 31
3.1	แผนผังการดำเนินงาน 36
3.2	แผนภาพวัตถุอิสระของรถไฟฟ้าบีทีเอส 39
3.3	ลักษณะสมบัติแรงกุดหัวรถจักร 40
3.4	การคิดความชันแบบ homogeneous strip..... 41
3.5	โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า 45
3.6	ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมคำนวณการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า 46
3.7	แสดงการวัดระยะทางโดยใช้เว็บไซต์ Google Map 47
3.8	การตีวงรัศมีความโค้งบนเว็บไซต์ Google Map 48
3.9	การตีวงรัศมีวงกลมบนเว็บไซต์ Freemaptool.com 49
3.10	อุปกรณ์ Skylab GPS module รุ่น SKM55 50
3.11	หน้าต่างโปรแกรม VisualGPS..... 50
4.1	กราฟแรงกุดลากขบวนรถไฟและแรงต้านรถไฟสายสุขุมวิท 56
4.2	กราฟโครงสร้างความเร็วขบวนรถไฟในหนึ่งวัฏจักร 56
4.3	แสดงการวัดระยะทางโดยใช้เว็บไซต์ Google Map 58
4.4	โครงสร้างความเร็วที่ได้จากการวัด 59
4.5	รัศมีความโค้งที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Google Earth..... 60
4.6	รัศมีความโค้งที่ 2 โดยใช้โปรแกรม Google Earth..... 61
4.7	แรงต้านหนีศูนย์กลางการโค้งของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต) 62
4.8	ระดับเกรดเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต) 64
4.9	แรงต้านเกรดเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต) 64
4.10	แบบจำลองโครงสร้างความเร็วของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต) 65
4.11	เปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลองโครงสร้างความเร็ว..... 66
4.12	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทางที่ได้จากการคำนวณ..... 66
4.13	เปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลองของกำลังไฟฟ้า 67

สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทางที่ได้จากการคำนวณ..... 67
4.15	เปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลองของกำลังไฟฟ้า 68
4.16	เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 1 73
4.17	เปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วของเส้นทางที่ 1 75
4.18	เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 1 75
4.19	เปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วของเส้นทางที่ 2 76
4.20	เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 2 76
4.21	เปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วของเส้นทางที่ 3 77
4.22	เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 3 77
ก.1	โครงสร้างความเร็วที่ได้จากการจำลองผลของสถานีบางบัวถึงสถานี กรมทหารราบ 11 89
ก.2	เปรียบเทียบข้อมูลจริง แบบจำลองผล และหลังการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผลของ สถานีบางบัวถึงสถานีกรมทหารราบ 11 90
ก.3	เปรียบเทียบข้อมูลจริง แบบจำลองผล และหลังการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผลของ สถานีสะพานใหม่ถึงสถานีโรงพยาบาลภูมิพล 91
ก.4	เปรียบเทียบข้อมูลจริง แบบจำลองผล และหลังการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผลของ สถานีสะพานแยก กล้วย ถึง สถานีคูคต..... 92
ก.5	เปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วของสถานีที่ทำการหาค่าที่ดีที่สุด 93
ก.6	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองและการเก็บข้อมูล 93
ก.7	แรงดูดลากและแรงเบรกรถไฟฟ้า..... 94
ก.8	แรงดันรางวิ่ง..... 94
ก.9	กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า..... 95
ก.10	พลังงานในการเคลื่อนที่ในแต่ละโหนดน้ำหนักผู้โดยสาร 95
ก.11	พลังงานในการเคลื่อนที่เปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี 96
ก.12	กราฟแรงดูดลากขบวนรถไฟและแรงต้านรถไฟสายสุขุมวิท 96
ข.1	ค่าระดับเกรดเดียนต์ของเส้นทางสถานีห้าแยกลาดพร้าวถึงสถานีคูคต 99

สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2	แรงต้านเกรเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต) 99
ข.3	โครงสร้างความเร็วของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)..... 100
ข.4	กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)..... 100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบการคมนาคมขนส่งทางรางมีความสำคัญต่อประเทศ ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ในประเทศมีระบบการคมนาคมขนส่งที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย มีความน่าเชื่อถือ และมีต้นทุนที่ประหยัดจะมีส่วนสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจของประเทศให้สูงขึ้น สามารถเชื่อมโยงฐานการผลิตภายในภูมิภาคได้โดยสะดวก ส่งผลทำให้เกิดการจ้างงาน เป็นแรงขับเคลื่อนที่สำคัญต่อการเติบโตทางเศรษฐกิจภายในประเทศ นอกจากนี้ยังทำให้มีการเดินทางเชื่อมโยงกันระหว่างพื้นที่ เกิดการพัฒนาเมืองและทางสังคมอย่างเป็นระบบ

โครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ตามแผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (2561 - 2580) และยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งของไทยระยะ 20 ปี ในช่วงระหว่าง (2560 - 2579) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยมีบทบาทในการดำเนินงานโครงการรถไฟฟ้าหลายสายในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล นอกจากนี้ยังทำงานบูรณาการกันกับหลาย ๆ หน่วยงานในการพัฒนาระบบเชื่อมต่อการเดินทางให้ระบบส่งผลให้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการเดินทางที่สะดวก เดินทางได้อย่างไร้รอยต่อ สามารถกำหนดเวลาในการเดินทางได้ รถไฟฟ้าถือเป็นระบบขนส่งมวลชนหลักที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบขนส่งมวลชนแบบอื่น ซึ่งมุ่งเน้นการให้ความสำคัญกับการลงทุนที่จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงาน และการลดต้นทุนการขนส่ง ทั้งในแง่ของการเดินทางที่สะดวก รวดเร็ว ขนส่งผู้โดยสารเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีเส้นทางที่แน่นอนและแยกทางระบบขนส่งประเภทอื่น ๆ อย่างชัดเจน มีทั้งแบบยกเส้นทางเหนือพื้นดิน รางบนพื้นดิน จึงทำให้มีความสะดวกในการเดินทางพร้อมทั้งมีความน่าเชื่อถือด้านความปลอดภัย

รถไฟฟ้าบีทีเอส เป็นระบบขนส่งมวลชนหลักภายในกรุงเทพมหานคร ซึ่งครอบคลุมย่านธุรกิจกลางเมือง พื้นที่การค้า พื้นที่อยู่อาศัย และสถานที่ท่องเที่ยวหลักจำนวนมาก ในปัจจุบันมีรถไฟฟ้าเปิดให้บริการทั้งหมดสองสาย ได้แก่ สายสุขุมวิทหรือสายสีเขียวอ่อน เริ่มต้นตั้งแต่คูคต (เขตปทุมธานี) วิ่งไปตามถนนสุขุมวิทจนถึงสถานีเคหะ จังหวัดสมุทรปราการ และสายสีลมหรือสายสีเขียวเข้ม เริ่มต้นตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ วิ่งไปยังฝั่งธนบุรีจนถึงสถานีบางหว้า โดยมีสถานีสยามเป็นสถานีเชื่อมต่อระหว่างรถไฟฟ้าบีทีเอสทั้งสองสาย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการลดใช้พลังงานของรถไฟฟ้าในการเคลื่อนที่โดยการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในแบบพลวัตเพื่อหาค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทาง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีวิวัฒนาการ โดยผลต่างเพื่อช่วยในการออกแบบโครงสร้างความเร็วเพื่อลดการใช้กำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างรูปแบบโครงสร้างความเร็วการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 จำลองผลการระบบการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จำนวน 1 ขบวน

1.3.2 นำเสนอเทคนิคการประยุกต์การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดการใช้พลังงาน

1.3.3 ทดสอบและประเมินผลกับรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย ได้แก่ รถไฟฟ้าบีทีเอสช่วงต่อขยาย สถานีห้าแยกลาดพร้าวถึงสถานีคูคต เท่านั้น

1.3.4 พัฒนาอัลกอริทึมการจำลองระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติด้วยโปรแกรมเมทแลป

1.3.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบกลยุทธ์ในการใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเทียบกับกรณีฐาน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ศึกษาการควบคุมความเร็วของระบบการเดินรถไฟฟ้าอัตโนมัติ

1.4.2 จำลองผลการประยุกต์ใช้เทคนิคหาค่าเหมาะสมที่สุดกับระบบการเดินรถไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยโปรแกรมเมทแลป

1.4.3 พิจารณาการหาความเร็วที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถไฟฟ้าเทียบกับกรณีฐานเท่านั้น

1.4.4 การจำลองจะพิจารณาในกรณีโหลดและการจ่ายไฟฟ้าคงที่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการจำลองออกแบบระบบการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า

1.5.2 ได้พัฒนาอัลกอริทึมที่ประยุกต์การนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้กับระบบการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า

1.5.3 ได้ค้นแบบจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 ขบวน

1.5.4 ได้นำเสนอหลักการและแนวทางการวิจัยสำหรับเป็นแนวทางเลือกในการพิจารณาลดการใช้พลังงานรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทและข้อมูลระบบรถไฟฟ้าระบบจ่ายไฟฟ้า ระบบขนส่งทาง ข้อมูลจำเพาะของรถไฟฟ้าบีทีเอสและการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และท้ายสุดการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยผลจากการสำรวจสืบค้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วยความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสมการที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองผลการเคลื่อนที่ การสร้างเส้นโครงร่างความเร็วการหาแรงต้านการเคลื่อนที่และจำลองการเดินรถไฟฟ้าแบบขบวนเดียว สุดท้ายการเก็บข้อมูลและการแปลงข้อมูล NMEA เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การจำลองกรณีฐาน การจำลองการออกแบบเส้นโค้งความเร็ว การใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมกลยุทธ์เพื่อลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของการทดลองและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. ชุดคำสั่งที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า

ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่ได้จากการเก็บจากการวัดจริง

ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เกริ่นนำถึงการให้บริการในการเดินทางรูปแบบรถไฟฟ้า ซึ่งเป็นถือเป็นปัจจัยหลักในการเดินทางของประชากรในยุคปัจจุบัน ดังนั้น ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมา และข้อมูลต่าง ๆ ของรถไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยเฉพาะข้อมูลของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทที่ผู้วิจัยนำมาเป็นกลุ่มตัวอย่างในการทดลอง รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการสืบค้นที่เป็นแหล่งสะสมงานวิจัยวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากฐานข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ได้แก่ Science direct, IEEE, IET เป็นต้น และรวมถึงแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานที่ผู้วิจัยมีความสนใจเพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในออกแบบรวมถึงการดำเนินการวิจัย

2.2 ข้อมูลเบื้องต้นในส่วนของการขนส่งระบบราง

การคมนาคมขนส่งถือเป็นหัวใจหลักในการเดินทางของประชากรในทุกภาคส่วน ซึ่งมีทั้งทางอากาศ ทางเรือและทางบก โดยเนื้อหานี้จะกล่าวถึงการเดินทางในทางบกโดยรูปแบบการเดินทางที่สำคัญไม่น้อยไปกว่าการเดินทางโดยรถยนต์ทั่วไปซึ่งคงจะหนีไม่พ้นการเดินทางด้วยระบบขนส่งทางรางหรือรถไฟ ถือเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักสำคัญที่ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันด้านการขนส่งของประเทศ เป็นรากฐานของความมั่นคงทางเศรษฐกิจ เพิ่มความปลอดภัยในการเดินทางและการขนส่ง รวมทั้งมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบรางเพื่อการขนส่งคมนาคมระหว่างประชาคมอาเซียนถือเป็นประโยชน์สูงสุดในการพัฒนาเศรษฐกิจให้กับประเทศได้ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการขนส่งทางรางประหยัดพลังงานได้มากกว่าการขนส่งในรูปแบบอื่นในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานกว่าการขนส่งแบบรถบรรทุก 3.5-4.0 เท่า และรถไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารประหยัดกว่ารถโดยสารสาธารณะ 1.7-2.0 เท่า และประหยัดกว่ารถโดยสารส่วนบุคคล 5.0 เท่า (นคร, 2555)

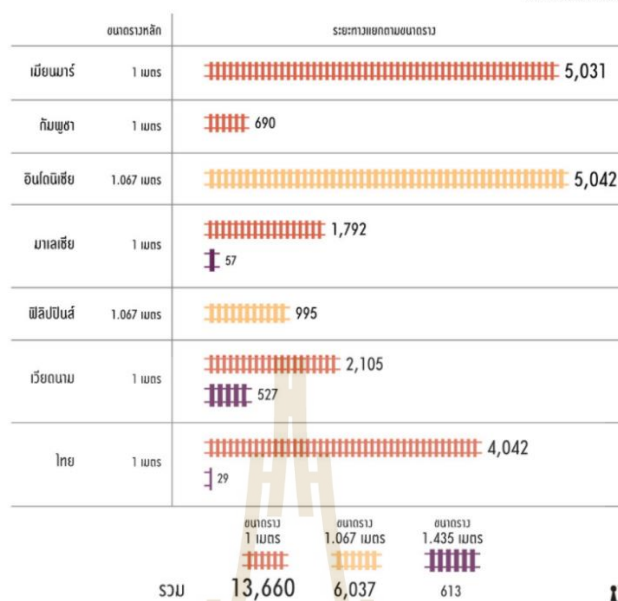
รถไฟประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม				
	รถไฟ	รถเมล์	เครื่องบิน	รถยนต์ส่วนบุคคล
ดัชนีการใช้พลังงานเปรียบเทียบ ¹⁾	100	176	409	587
การปลดปล่อย CO ₂ เปรียบเทียบ ²⁾	100	413	643	949

รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างรถไฟกับยานพาหนะชนิดอื่น ๆ (นคร, 2555)

การขนส่งระบบรางในประเทศไทยปัจจุบันมี 2 ประเภท หลัก ๆ คือการขนส่งทางไกล และ รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งการรถไฟแห่งประเทศไทยเปิดให้บริการรถไฟฟ้าทางไกลซึ่งมีเส้นทางรวมประมาณ 4042 กิโลเมตร กระจายไปตามภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศ ประเภทรถที่ให้บริการจะเป็นรถไฟที่ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเป็นหลักใช้ขนาดราง 1 เมตรให้บริการรูปแบบโดยสารและบริการขนส่งสินค้า ส่วนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีเฉพาะเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเท่านั้นซึ่งมีหน่วยงานการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย รับผิดชอบในส่วนของการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน และส่วนกรุงเทพมหานครดูแลในส่วนของการรถไฟฟ้าบีทีเอส ใช้ขนาดความกว้างของรางตาม Standard gauge อยู่ที่ 1.435 เมตร

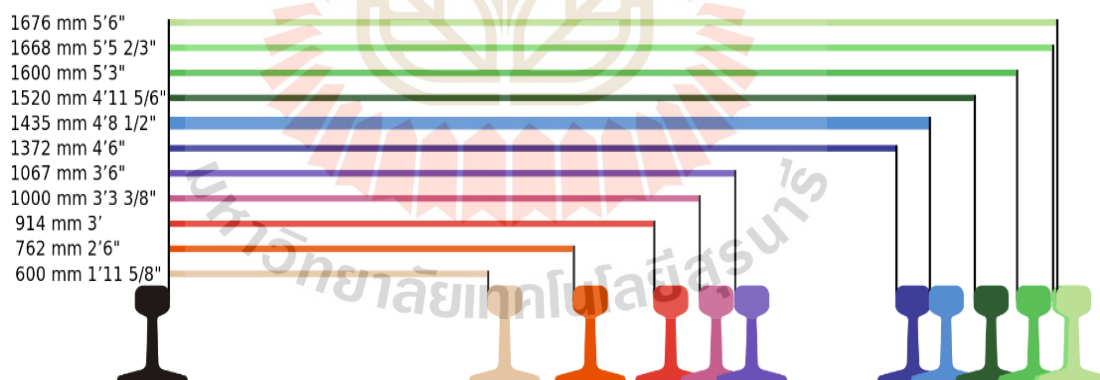
ระบบขนส่งทางรถไฟในภูมิภาคอาเซียน

ระยะทาง หน่วย : กิโลเมตร



รูปที่ 2.2 ขนาดความกว้างของระบบรางในประเทศภูมิภาคอาเซียน

ที่มา <https://thaipublica.org/2014/08/the-truth-of-thailand-rail-system-1/> (เข้าถึงเมื่อ 14/06/2564)



รูปที่ 2.3 ขนาดความกว้างของราง

ที่มา <https://pantip.com/topic/32673034> (เข้าถึงเมื่อ 14/06/2564)



รูปที่ 2.4 รถไฟที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง

ที่มา https://www.matichonacademy.com/content/article_55096 (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)

รถไฟฟ้านั้น เป็นระบบขนส่งประเภทหนึ่งให้บริการ เช่นเดียวกับรถไฟทั่วไป ซึ่งจะมีข้อแตกต่างในเรื่องการสร้างต้นกำลังในการขับเคลื่อน โดยรถไฟทั่วไปจะใช้เครื่องยนต์ประเภทสันดาปภายในที่มีฟอสซิลประเภทน้ำมันหรือแก๊สเป็นพลังงานที่ใช้ในการสร้างการขับเคลื่อน ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นชนิดดีเซลราง (Diesel Multiple Unit: DMU) ส่วนรถไฟฟ้านั้นจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนซึ่งใช้แหล่งพลังงานจากโรงไฟฟ้า ดังนั้น การเดินรถไฟฟ้านั้นจึงต้องมีการสร้างสถานีจ่ายกระแสไฟฟ้าย่อย (Sub-Station) เพื่อลดแรงดันแล้วจึงจะถูกนำมาส่งเข้าระบบการป้อนกระแสไฟฟ้า (Feeding System) เพื่อนำไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟ โดยระบบไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟมีอยู่สองระบบคือ ระบบกระแสตรง (Direct Current: DC) และระบบกระแสสลับ (Alternating Current: AC) จะเรียกรถไฟชนิดนี้ว่า รถไฟฟ้าราง (Electric Multiple Unit: EMU) รถไฟฟ้ามีข้อดีเหนือกว่ารถไฟดีเซลทั้งในด้านวิศวกรรมและประโยชน์ใช้สอยโดยรถไฟฟ้านั้นมีสมรรถนะสูงกว่ารถไฟดีเซลมาก ซึ่งรถไฟฟ้านั้นมีพลังงานที่ป้อนไว้ในสายส่งแล้วสามารถมาใช้ขับเคลื่อนได้ตามต้องการ ซึ่งแตกต่างจากไฟฟ้าดีเซลที่กักเก็บพลังงานไว้ที่เครื่องยนต์สามารถจ่ายออกมาได้ (นคร, 2555)



รูปที่ 2.5 รถไฟที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้า
ที่มา <https://siamrath.co.th/n/202012> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)

2.3 ประเภทรถไฟฟ้า

รถไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามการใช้งาน มีดังนี้

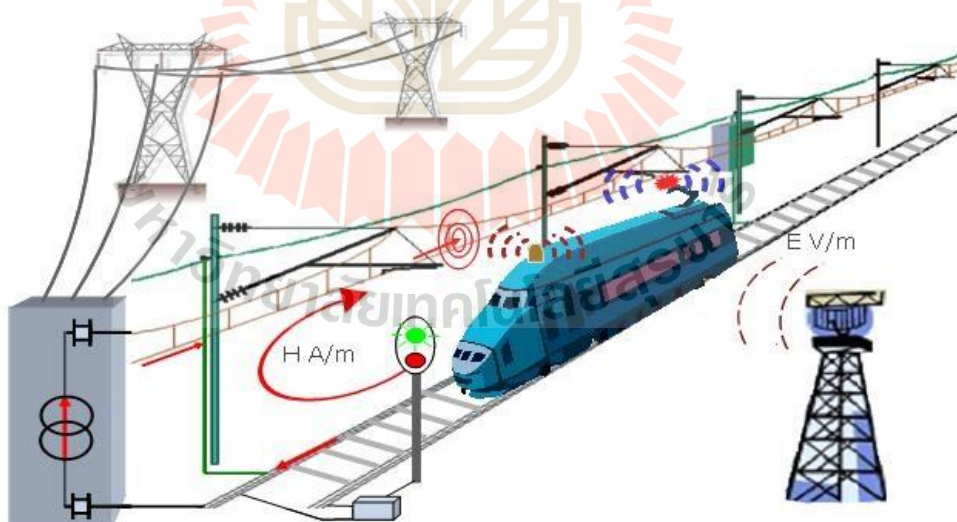
1. รถไฟฟ้าความเร็วสูง เป็นรถไฟที่มีความเร็วในการวิ่งที่สูงตั้งแต่ 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป ใช้ในการเดินทางระยะไกล (มีในต่างประเทศ)
2. รถไฟทางไกล เป็นรถไฟที่ใช้ในการเดินทางระยะไกลแต่ต่างกันที่มีความเร็วตั้งแต่ 80-160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีจำนวนของสถานีที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับรถไฟความเร็วสูง มีหน้าที่สำหรับเชื่อมต่อการเดินทางให้กับผู้คนระหว่างภูมิภาคกับจังหวัดใหญ่ ๆ
3. รถไฟชานเมืองหรือรถไฟท้องถิ่น มีความเร็วตั้งแต่ 80-160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีหน้าที่สำหรับเชื่อมต่อการเดินทางให้กับผู้คนคนชนเมืองกับเมืองใหญ่ แต่ละสถานีจะมีระยะห่างประมาณ 3-5 กิโลเมตร เช่น Airport Rail Link หรือ รถไฟฟ้าสายสีแดง (อยู่ระหว่างการดำเนินการ)
4. รถไฟในเมือง มีความเร็วสูงสุดที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีหน้าที่กระจายการเดินทางของประชากรเข้าสู่เมืองชั้นใน แต่ละสถานีจะห่างไม่เกิน 1-2 กม.ต่อหนึ่งสถานี รอบเวลาการให้บริการ 1-5 นาทีต่อขบวน ตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนบีทีเอส (BTS), เอ็มอาร์ที (MRT)

2.4 ระบบจ่ายไฟสำหรับรถไฟ

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้าโดยทั่วไปมีทั้งหมด 2 ระบบ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งระบบทั้งสองนี้จะแยกไปอีกตามที่ระดับแรงดันทำงาน และสิ่งสุดท้ายคือการรูปแบบตัวนำในการส่งกำลัง ซึ่งในแต่ละรูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบ ลักษณะการทำงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบ ที่แต่ละภูมิภาคได้ดำเนินการออกแบบไว้

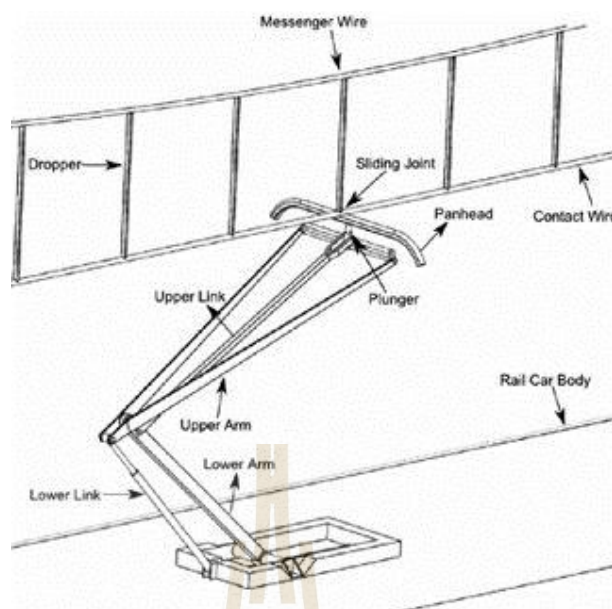
2.4.1 ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบไฟฟ้ากระแสสลับนี้เป็นการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้กับรถไฟไฟฟ้าที่มีการแปลงแรงดันจากแหล่งต้นกำเนิดไฟฟ้า อาทิ โรงไฟฟ้า เขื่อน ฯลฯ แล้วทำการแปลงให้อยู่ในระดับทำงาน เพื่อจ่ายให้กับระบบรถไฟ โดยระบบนี้จะส่งผ่านไฟฟ้าในรูปแบบสายตัวนำพาดอากาศเหนือศีรษะ (Catenary) มาสู่ขบวนรถไฟที่มีแหวนรับไฟฟ้าหรือสายลี้ (Pantograph) เพื่อรับไฟฟ้ามาจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กำลัง และระบบไฟเลี้ยงของสิ่งอำนวยความสะดวกในขบวนรถไฟ (Auxiliary) และไฟฟ้ากระแสสลับจะไหลกลับโดยลงรางรถไฟ (Return Rail) เป็นการครบวงจรการทำงานของระบบ ซึ่งในต่างประเทศมีการใช้ระดับแรงดันทำงานที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 2.1 มีการกำหนดมาตรฐานการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าระดับแรงดันทำงานที่จ่ายให้กับรถไฟไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850



รูปที่ 2.6 รถไฟฟ้าที่มีระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ที่มา <https://siamrath.co.th/n/202012> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



รูปที่ 2.7 ตัวรับและตัวส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

ที่มาภาพ : (M. Carmine, 2015)

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันทำงานที่จ่ายให้กับรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850

ระบบไฟฟ้า	แรงดันต่ำสุด ไม่ถาวร	แรงดันต่ำสุด ถาวร	แรงดันใช้ งาน	แรงดันสูงสุด ถาวร	แรงดัน สูงสุด ไม่ถาวร
15 kV AC, 16.7 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17.25 kV	18 kV
25 kV AC, 50 Hz	17.5 kV	19 kV	25 kV	27.5 kV	29 kV

(ที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบจ่ายไฟฟ้าแก่ทางรถไฟ> เข้าถึงเมื่อ 26/06/2563)

เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าแบบกระแสสลับมีระดับแรงดันทำงานที่สูง จึงสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ไกลกว่ากระแสตรง ดังนั้น จึงสามารถตั้งสถานีจ่ายไฟฟ้าห่างกันได้จึงเป็นที่นิยมในการออกแบบรถไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเส้นทางที่มีการเดินทางระยะไกล โดยระดับแรงดันที่ใช้กันส่วนมาก จะอยู่ที่ 25 kV.

2.4.2 ระบบไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่ในรูปกระแสตรง ซึ่งรูปแบบกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งจากแหล่งผลิตเป็นกระแสสลับเช่นเดียวกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ แต่มีส่วนต่างตรงที่ระบบไฟฟ้ากระแสตรงต้องทำการลดแรงดันไฟฟ้าลงมาให้เหมาะสมกับระดับพิกัดการแปลงก่อนด้วยหม้อแปลงแรงดัน แล้วจึงการเปลี่ยนกระแสสลับมาเป็นกระแสตรงด้วยหม้อแปลงเรียงกระแสที่สถานีจ่ายกระแสร้อยกระแสไฟฟ้าที่ได้รับการแปลงจะถูกจ่ายให้กับขบวนรถไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่นิยมใช้กับรถไฟฟ้ามักที่ระดับแรงดัน 750 V_{DC} ซึ่งต้องที่สถานีย่อยเพื่อทำแปลงกระแสทุก 3-5 กิโลเมตร (นคร,2555) ส่วนพิกัดกำลังไฟฟ้าของสถานีอาจจะสูงถึง 10-20 MW สำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและรถไฟฟ้าที่มีระยะไกล (ชนิดชัช, 2556) ซึ่งในประเทศไทย รถไฟฟ้าสายสุขุมวิทใช้แรงดันทำงานที่ 750 V_{DC} การส่งไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐานสากลอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850

ตารางที่ 2.2 ระดับแรงดันทำงานที่จ่ายให้กับรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163 และ IEC 60850

ระบบไฟฟ้า	แรงดันต่ำสุด ไม่ถาวร	แรงดัน ต่ำสุดถาวร	แรงดันใช้งาน	แรงดัน สูงสุดถาวร	แรงดันสูงสุด ไม่ถาวร
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1,000 V
1,500 VDC	1,000 V	1,000 V	1,500 V	1,800 V	1,950 V
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3.6 kV	3.9 kV

(ที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบจ่ายไฟฟ้าแก่ทางรถไฟ> เข้าถึงเมื่อ 26/06/2563)

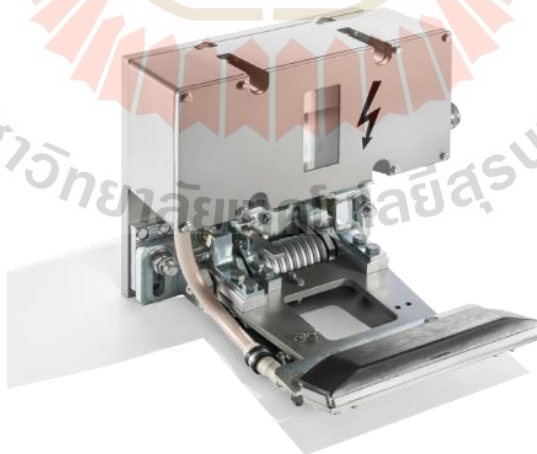
2.5 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะเป็นการส่งพลังงานไปสู่ขบวนรถไฟโดยอาศัยรูปแบบดังต่อไปนี้

ระบบรางที่สาม หรือรางตัวนำซึ่งใช้ในการจ่ายกระแสให้กับรถไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจุลลาค โดยจะวางขนานกับรางวิ่งรถไฟ บางครั้งวางอยู่ระหว่างรางวิ่งรถไฟ ซึ่งรถไฟจะมีตัวรับไปจากรางนี้ที่เรียกว่า หน้าสัมผัสหรือรองเท้ารับไฟ รางนี้จะถูกปิดมิดชิดเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดแก่มนุษย์โดยส่วนมากจะตั้งอยู่ไกลจากชานชาลา อย่างเช่นในกรณีของรถไฟฟ้ามหานคร จะตั้งรางที่สามไว้ที่ตรงกลางระหว่างรางวิ่งขาขึ้นและรางวิ่งขาล่อง ดังรูปที่ 2.9

ระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ การส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันทำงานระดับสูงเป็นส่วน ใหญ่ เช่น $1500V_{DC}$ หรือ $25kV_{AC}$ ความถี่ขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้าของแต่ละประเทศ การที่นำสาย ส่งไฟฟ้าเอาไว้สูงจากพื้นดินเนื่องจากมีความเป็นอันตรายสูงจึงต้องอยู่ในที่สูงห่างไกลจาก การสัมผัส นิยมใช้สำหรับการจ่ายไฟให้ระบบรถไฟฟ้ายานเมือง โดยทั่วไป สายส่งจะเป็นลักษณะลวดเปลือย แขนงลอยอยู่กับเสา โดยรถไฟจะใช้ตัวรับไฟฟ้าที่เรียกว่า แหนบรับไฟฟ้าหรือสาลี (pantograph) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพื่อนำมาใช้ในการขับเคลื่อน รถไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.10 ระบบส่งจ่ายไฟแบบเหนือศีรษะ

ระบบจ่ายไฟรางเดี่ยว หรือที่เรียกว่า Monorail เป็นระบบขนส่งมวลชนทางรางที่ตัวรถ วิ่งด้วยล้อยางบนเขตทางเฉพาะ (Private Right of Way: PROW) มีรางจ่ายไฟ 750 Vdc และราง ที่นำกระแสกลับ (Return Current) ไปครบวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้นจะติดตั้งอยู่ ข้าง ๆ Guide Beam โดยถือเป็นรถไฟฟ้ายานส่งมวลชนระบบรางเบาแบบหนึ่ง (Light Rail Transit) มีความสามารถในการรองรับผู้โดยสารได้ประมาณ 10,000-40,000 คนต่อชั่วโมงต่อ ทิศทาง โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถรองรับผู้โดยสารได้สูงสุดประมาณ 48,000 คน ต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ลักษณะตัวรถและโครงสร้างรางเดี่ยวที่เป็นทางวิ่งมีขนาดเล็กและเบา ทำ ให้ก่อสร้างได้ง่าย รวดเร็ว และราคาถูกลงกว่าโครงสร้างทางวิ่งยกระดับของระบบขนส่งมวลชน แบบรางชนิดอื่น ๆ และใช้ล้อยางทำให้มีเสียงดังน้อยกว่าระบบขนส่งมวลชนที่ใช้รางเหล็ก และล้อเหล็ก



รูปที่ 2.8 ตัวรับไฟฟ้าจากรางที่สาม

ที่มา : <https://www.schunk-carbontechnology.com/th/ผลิตภัณฑ์/produkte-detail>

(เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



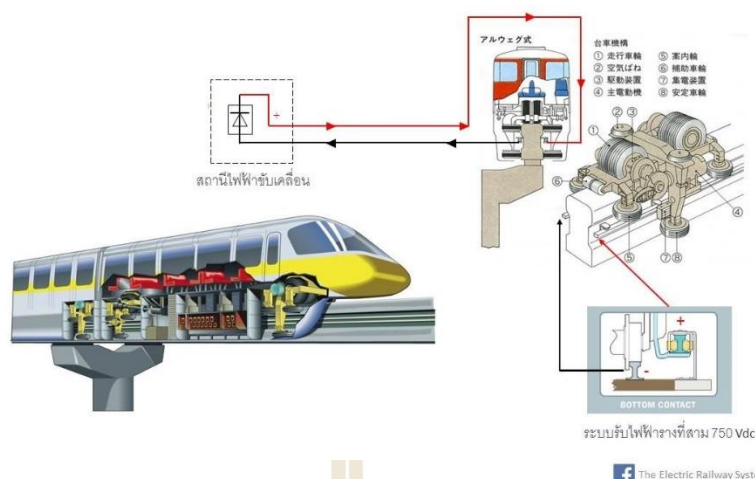
รูปที่ 2.9 รางที่สามในระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ

ที่มา : <https://www.it24hrs.com/2020/check-in-thaichana-btsskytrain> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



รูปที่ 2.10 ระบบจ่ายไฟเหนือศีรษะ

ที่มา : <https://www.condotiddoi.com/readarticle.php?articleid=4933> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



รูปที่ 2.11 ระบบจ่ายไฟรางเดี่ยว

ที่มา : เพจ The Electric Railway System - เรียนรู้ระบบรถไฟไฟฟ้า (เข้าถึงเมื่อ 15/06/2564)

2.6 โครงสร้างของระบบลากจูงขบวนรถไฟไฟฟ้า

โครงสร้างของขบวนรถไฟไฟฟ้าจำแนกออกเป็นสองรูปแบบตามการออกแบบของระบบลากจูง (traction system) ได้แก่ ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (centralized traction system) และ ระบบลากจูงแยกส่วน (decentralized traction system) (ชัยยุทธ์, 2560)

1. ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (centralized traction system) หรือที่เรียกว่า หัวจักรลากจูง (locomotive-hauled train) จะมีต้นกำลังอย่างน้อยหนึ่งชุดติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับลากจูงขบวนรถไฟ โดยส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่ด้านหน้าขบวน ส่วนตู้กลางจะไม่มีติดตั้งระบบขับเคลื่อนไว้ ซึ่งการลากจูงแบบนี้มักจะใช้ในขบวนรถไฟขนส่งสินค้า

2. ระบบลากจูงแยกส่วน (decentralized traction system) รูปแบบนี้ เป็นรูปแบบที่ใช้กันส่วนมากในรถไฟไฟฟ้าซึ่งมีการติดตั้งระบบขับเคลื่อนนอกจากที่หัวขบวนท้ายขบวน แล้วจะมีการติดตั้งไว้ที่ตู้โดยสารเพื่อช่วยในการสร้างแรงขับเคลื่อนของขบวนรถไฟ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต

ในระบบรถไฟไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้การต่อพ่วงแบบต่อ (push-pull) คือการติดตั้งหัวรถจักรไว้ที่ทั้งหัวขบวนและท้ายขบวนช่วยขับเคลื่อนรถไฟและช่วยในการประหยัดเวลาในการตั้งขบวนใหม่ ในทางเทคนิครูปแบบนี้จะกระจายกำลังเพื่อขับเคลื่อนขบวนแทนที่จะอยู่ที่หัวรถจักรเพียงอย่างเดียว



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 ก. ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์และ ข. ระบบลากจูงแบบแยกส่วน

ที่มา : https://kids.kiddle.co/Image:HXD1_with_wagen.jpg และ

<https://www.railwaypro.com/wp/rzd-orders-14-emus-from-tmh/> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



รูปที่ 2.13 การต่อขบวนแบบ Push pull

ที่มา ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ (นคร, 2555)

2.7 ประวัติรถไฟฟ้ายานสุขุมวิท

รถไฟฟ้าสายพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา สาย 1 โดยทั่วไปเรียกว่า สายสุขุมวิท หรือสายสีเขียว เป็นแนวทางตามหลักแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล คือส่งเสริมจัดการระบบขนส่งมวลชนให้เชื่อมโยงเป็นโครงข่าย พัฒนาการให้คุณภาพในการบริการประชาชนของระบบขนส่งมวลชนและดำเนินการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานให้สอดคล้องอย่างมีระบบกับทิศทางการพัฒนาเมืองและการผังเมือง โดยผ่านการอนุมัติสัมปทานการก่อสร้างและจัดการเดินรถในช่วงที่พลตรีจำลอง ศรีเมือง ดำรงตำแหน่งผู้ว่าราชการจังหวัดกรุงเทพมหานคร ให้กับ บริษัท ธนาถ จำกัด (ปัจจุบันคือ บริษัท บีทีเอส กรุ๊ป โฮลดิ้งส์ จำกัด (มหาชน)) ซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจของกรุงเทพมหานครดำเนินการ ช่วงระยะแรกก่อน

เปิดบริการนั้น รถไฟฟ้าสายนี้ใช้ชื่อว่า รถไฟฟ้าธนายง ตามชื่อบริษัทที่ได้รับสัมปทานโดยเป็นรถไฟฟ้าที่มีเส้นทางดำเนินการยกสูงจากพื้นดินสายแรกของประเทศไทย

ต่อมาเมื่อเปิดให้บริการโดยมีพิธีเปิดเป็นทางการในวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ.2542 รถไฟฟ้าธนายงได้รับพระราชทานนามรถไฟฟ้าอย่างเป็นทางการว่า "เฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา" ซึ่งเป็นนามของ พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้พระราชทานเพื่อเป็นชื่ออย่างเป็นทางการรถไฟฟ้าสายนี้โดยมีเส้นทางให้บริการ ได้แก่ ช่วงอ่อนนุช-หมอชิต และช่วงสะพานตากสิน-สนามกีฬาแห่งชาติ



รูปที่ 2.14 การให้บริการของรถไฟฟ้าสายสีเขียว

ที่มา <https://mgronline.com> (เข้าถึงเมื่อ 01/06/2564)

ในปัจจุบันได้มีการต่อขยายออกไปเพื่อให้ครอบคลุมและเชื่อมโยงการเดินทาง 3 จังหวัด อันได้แก่ กรุงเทพมหานคร ปทุมธานี และสมุทรปราการในการให้บริการและรองรับการเดินทางของประชากรที่เพิ่มมากขึ้น รถไฟฟ้าบีทีเอสได้รับการอนุมัติการก่อสร้างส่วนต่อขยายออกไปอีก 5 ระยะ โดยสายระยะแรกนั้น กรุงเทพมหานคร ได้ดำเนินการ ส่วนสองระยะหลังนั้น ดำเนินการโดยการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยหรือ รฟม.

2.8 ความเป็นมาของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่

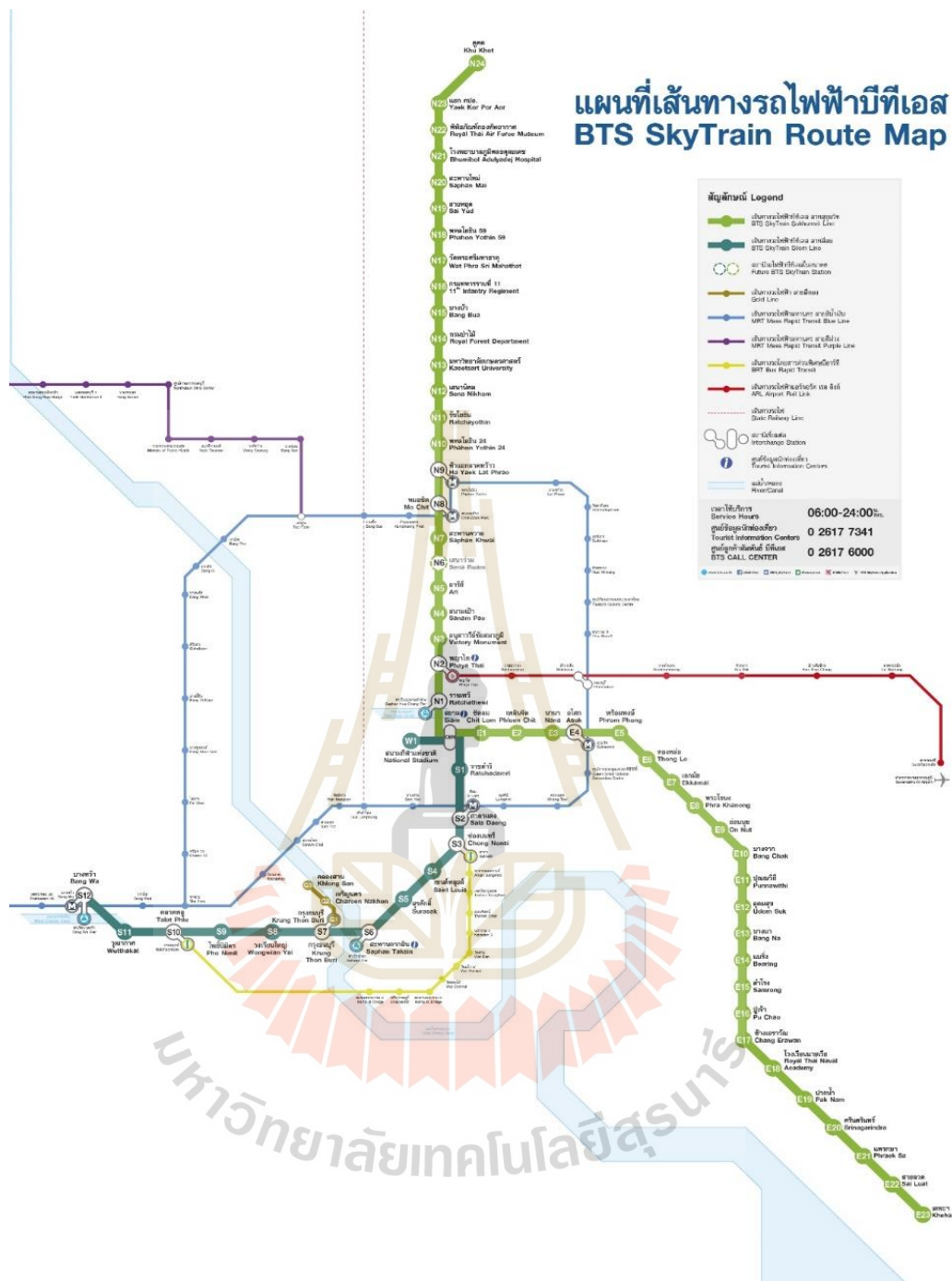
คูคต

คณะรัฐมนตรีในคราวประชุมเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2551 ได้มีมติเห็นชอบให้ รฟม. ดำเนินการก่อสร้างงานโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วงหมอชิต - สะพานใหม่ และช่วงแบร์ริง - สมุทรปราการ รวมเป็นระยะทางประมาณ 25 กิโลเมตร และอนุมัติให้กระทรวงการคลังจัดหาแหล่งเงินกู้ที่เหมาะสม และค้ำประกันเงินกู้ดังกล่าว โดยให้สำนักงบประมาณจัดหางบประมาณตามความจำเป็นและเหมาะสมตามแผนการใช้จ่ายจริง ซึ่งรัฐบาลรับภาระด้านการลงทุนงานโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ต่อมาคณะรัฐมนตรีในคราวประชุมเมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2553 ได้รับทราบผลการประชุมคณะกรรมการจัดระบบการจราจรทางบก (คจร.) ในคราวประชุมครั้งที่ 1/2553 เมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 ที่มีมติเห็นชอบในหลักการของการต่อขยายโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว จากช่วงหมอชิต - สะพานใหม่ เป็น หมอชิต - สะพานใหม่ - คูคต และยกเลิกศูนย์ซ่อมบำรุง บริเวณด้านทิศใต้ของสนามบินดอนเมือง โดยให้มีศูนย์ซ่อมบำรุงบริเวณตำบลคูคตแทน และมอบหมายให้ รฟม. รับผิดชอบดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป แผนที่การให้บริการของรถไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยมีเส้นทางต่อขยายในส่วนของสถานีหมอชิตถึงคูคต ดังรูปที่ 2.17

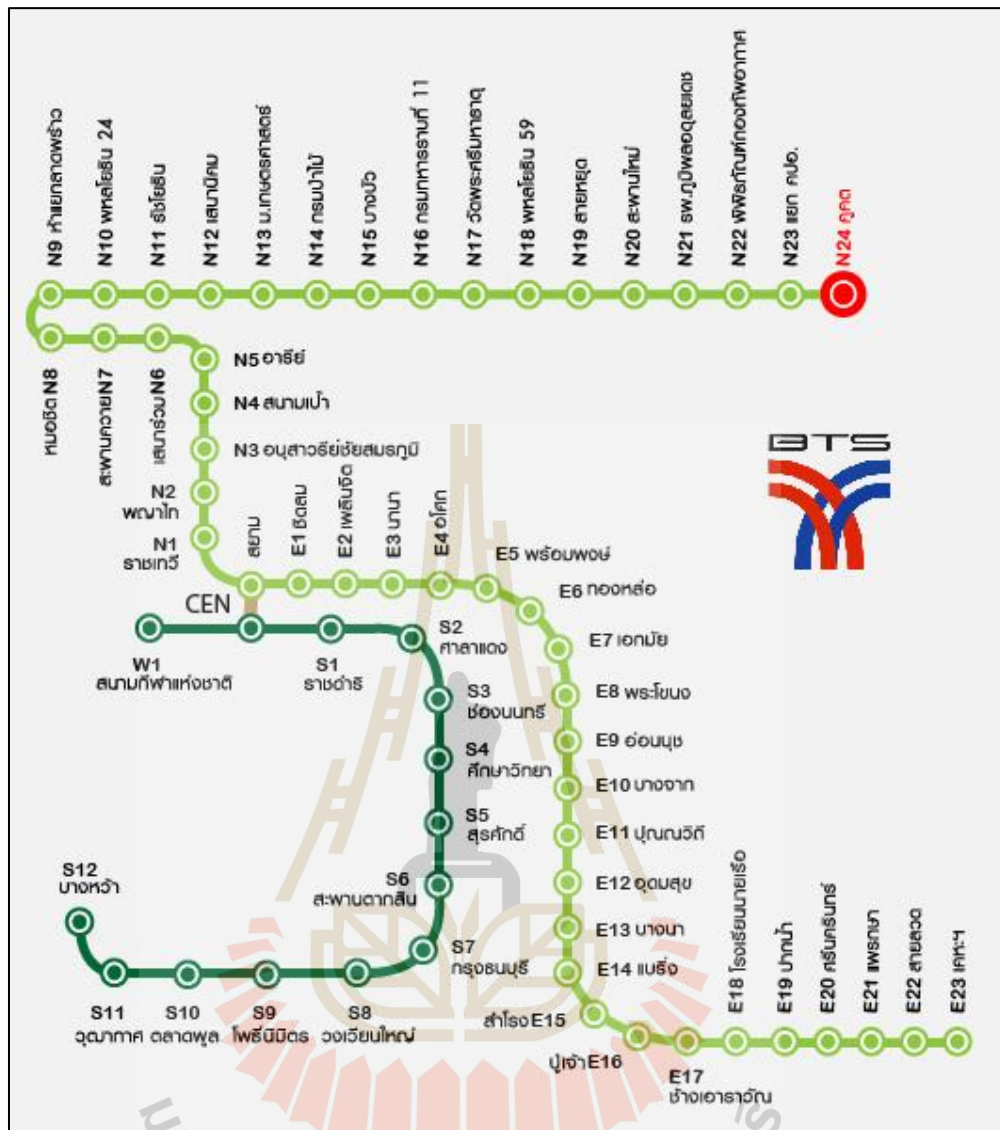
รถไฟฟ้าสายสุขุมวิทเป็นรถไฟฟ้าเส้นทางหลักที่มีการให้บริการจากประชาชนอย่างหนาแน่น ซึ่งทำให้รถไฟฟ้าสายนี้ได้มีการพัฒนา ปรับปรุง เพิ่มเติมเส้นทางให้บริการแก่ประชาชนโดยมีการศึกษาโครงการแปลงแผนแม่บทการขนส่งมวลชนระบบรางในเขตจังหวัดกรุงเทพมหานครและพื้นที่ต่อเนื่องไปสู่การปฏิบัติอย่างมีประสิทธิภาพ สำนักงานนโยบายแผนการขนส่งและจราจรเสนอให้มีการต่อขยายระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครจากเดิม 43.5 กิโลเมตร เป็น 291 กิโลเมตร ภายในระยะเวลา 6 ปี โดยมีหน่วยงานรับผิดชอบดังนี้

- กรุงเทพมหานคร รับผิดชอบ 2 เส้นทางสายสีเขียวอ่อน เส้นทางแนวตะวันตก 33 กิโลเมตร และเส้นทางสายสีเขียวเข้ม 33 กิโลเมตร
- การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย หรือ รฟม. รับผิดชอบ ส่วนต่อขยาย สถานีแบร์ริงถึงสถานีการเคหะฯ และส่วนต่อขยายสถานีหมอชิตถึงสถานีคูคต

ซึ่งแผนแม่บทการขนส่งมวลชนระบบรางในเขตกรุงเทพมหานครและพื้นที่เชื่อมโยงมีความสามารถในการให้บริการและรองรับการขนส่งของประชากรสูงสุดประมาณ 50000 คน/ทิศทางต่อชั่วโมง (โครงการศึกษาแนวทางการพัฒนาโครงการระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพมหานครส่วนต่อขยายโดยรวม) รวมทั้งสิ้น 48 สถานี รวมระยะทาง 53.58 กิโลเมตรเฉพาะสายสุขุมวิท ในกรณีรวมรถไฟฟ้าสายสีลมจะมีทั้งสิ้น 61 สถานี ระยะทางรวม 68.5 กิโลเมตร



รูปที่ 2.15 แนวเส้นทางกาให้บริการของรถไฟฟ้า
ที่มา <https://www.bts.co.th/routemap.html> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



รูปที่ 2.16 เส้นทางให้บริการและรหัสสถานีของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท
ที่มา <https://www.thaihometown.com/home/bts/> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)



รูปที่ 2.17 แนวเส้นทางการให้บริการในส่วนต่อขยายรถไฟฟ้าหมอชิต-สุกคต สายสุขุมวิท
ที่มา <https://www.thaihometown.com/article/showme/map/11912> (เข้าถึงเมื่อ 10/06/2564)

2.9 ข้อมูลจำเพาะของขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอสที่ให้บริการ

SIEMENS Model รถไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นแบบต่อเชื่อมกัน 4 ตู้ต่อขบวน ซึ่งประกอบด้วยตู้ที่มีระบบขับเคลื่อน (motor cars) ที่ด้านหน้าและท้ายของขบวนและตู้แบบไม่มีระบบขับเคลื่อน (trailer cars) 2 ตู้อยู่ระหว่างกลางของขบวนรถไฟฟ้า ตามชนิดดังนี้

- ตู้ชนิด เอ-คาร์ (A-Car) มีระบบขับเคลื่อนและมีห้องคนขับ
- ตู้ชนิด ซี-คาร์ (C-Car) ไม่มีทั้งระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ มีระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่าง

รถไฟฟ้ารุ่นนี้ใช้แรงดันขนาด 750 V_{DC} ชนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยรับไฟฟ้าจากรางที่สาม สำหรับใช้ในการขับเคลื่อนขบวน โดยมีชุดแปลงเป็นกระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งไว้ที่ตู้ชนิด A-Car ทั้งสองตู้ตรงกลางได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 V_{DC} จากรางที่สาม (Third Rail Traction Power) แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 V_{AC} และไฟฟ้ากระแสตรง 110 V_{DC} เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศและชาร์จแบตเตอรี่ โดยเมื่อต่อกันทั้งขบวนจะมีชนิด A-Car 2 ตู้และ C-Car 2 ตู้มีความยาวทั้งหมดของขบวน 86.6 เมตร กว้าง 3.12 เมตร โดยมีจำนวนที่นั่ง 42 ที่นั่งต่อตู้ และ 168 ที่นั่งต่อขบวน สามารถรองรับจำนวนผู้โดยสารสูงสุดได้ 1490 คน

CNR Model รถไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นแบบต่อเชื่อมกัน 4 ตู้ต่อขบวน ซึ่งประกอบด้วยตู้รถไฟฟ้าไม่มีระบบขับเคลื่อนมีห้องขับเคลื่อนเรียกว่า TC-Car หรือ Trailer Car จำนวนสองตู้ที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังขบวน และตู้รถไฟฟ้าแบบมีระบบขับเคลื่อนแต่ไม่มีห้องขับเคลื่อนเรียกว่า M-Car หรือ Motor Car จำนวนสองตู้อยู่ตรงกลางขบวน ตู้รถไฟฟ้า TC-car แต่ละตู้ติดตั้งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า ACM ขนาด 140 kVA ชนิด 3-เฟส 400 V_{AC} ACM แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 V_{DC} จากรางที่สาม (Third Rail Traction Power) ไปเป็นแรงดันชนิด 3-เฟส 400 V_{AC} เพื่อจ่ายให้กับระบบปรับอากาศ ระบบลมอัด ระบบแสงสว่างภายในและภายนอก และโหลดต่าง ๆ นอกจากนั้นแล้ว ACM ยังติดตั้งเครื่องประจุไฟขนาด $22\text{ kW } 110\text{ V}_{\text{DC}}$ สำหรับแบตเตอรี่ของตู้รถไฟฟ้า TC-car สำหรับตู้รถไฟฟ้า M-car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน และไม่มีห้องขับเคลื่อน แต่ตู้ติดตั้งระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า MCM เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน ตู้รถไฟฟ้า M-car ที่ได้รับไฟฟ้า 750 V_{DC} จากรางจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สาม ลักษณะต่อพ่วงของรถไฟฟ้า 4 ตู้คือ TC1-M1-M2-TC2 ความยาวตลอดทั้งขบวน 87.25 เมตร และกว้าง 3.12 เมตร ตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car มีที่นั่ง 42 ที่นั่ง จำนวนรองรับผู้โดยสารได้สูงสุดที่น้ำหนักบรรทุก (Load Condition) 8 คนต่อตารางเมตร จำนวนผู้โดยสารสูงสุดของแต่ละตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car จำนวน 361 คน และ 384 คน รองรับจำนวนผู้โดยสารทั้งขบวนสูงสุด 1490 คน ตัวรถทำจากเหล็กปลอดสนิมมีน้ำหนักเบาโครงสร้างเป็นแบบขึ้นรูปเชื่อมประกอบแต่ละตู้รถไฟฟ้าติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบติดตั้งบนหลังคาจำนวนสองเครื่องใช้น้ำยาทำความเย็น R407C ที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยสารใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (TCMS) ประตูดโดยสารติดตั้งแต่ละด้านของตู้รถไฟฟ้า 4 บาน ควบคุมและสั่งการด้วยระบบไฟฟ้า แบบเลื่อนปิดเปิดด้านนอกตัวรถ มีความกว้างเมื่อประตูเปิดสุด 1.4 เมตร ระบบไฟแจ้งเส้นทางและสถานี (DRM) ติดตั้งอยู่ด้านบนทุก ๆ ประตูโดยสารเพื่อแสดงตำแหน่งรถไฟฟ้าว่าอยู่สถานีและทิศทางใด พื้นที่สำหรับรถเข็นผู้พิการ พร้อมเข็มขัดนิรภัยสำหรับจับยึดรถเข็นผู้พิการและราวจับที่ด้านท้ายแต่ละตู้

การออกแบบภายในเน้นให้มีความสะดวก ปลอดภัย สำหรับการให้บริการ (บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด, 2561)

ขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในเส้นทางสายสุขุมวิท มีทั้งหมด 98 ขบวน 4 ตู้ต่อขบวน แบ่งออกเป็น 5 รุ่น

- Siemens Modular Metro (EMU-A1) 35 ขบวน ขบวนที่ 1 - 35 (2542)
- CNR (EMU-B1) 12 ขบวน ขบวนที่ 36 - 47 (2554)
- CNR (EMU-B2) 5 ขบวน ขบวนที่ 48 - 52 (2558)
- Siemens (EMU-A2) 22 ขบวน ขบวนที่ 53 - 74 (2561)
- CRRC (EMU-B3) 24 ขบวน ขบวนที่ 75 - 98 (2562)

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อมูลจำเพาะของรถไฟฟ้าบีทีเอส

รุ่น	Siemens Model	CNR Model
วัสดุตัวรถ	Stainless steel	Stainless steel
จำนวนตู้/ขบวน	4	4
ขนาดของรถไฟฟ้า (m)	กว้าง 3.2 ยาว 65.30	กว้าง 3.2 ยาว 65.30
จำนวนที่นั่งต่อขบวน	168	168
ลักษณะตู้โดยสาร	A-Car C-Car	Tc-Car M-Car
ลักษณะการจัดขบวน	A-C-C-A	Tc-M-M-Tc
ความเร็วสูงสุด (km/hr)	80	80
แรงดันทำงาน (V _{DC})	750	750
ระบบจ่ายไฟ	ระบบรางที่สาม	ระบบรางที่สาม

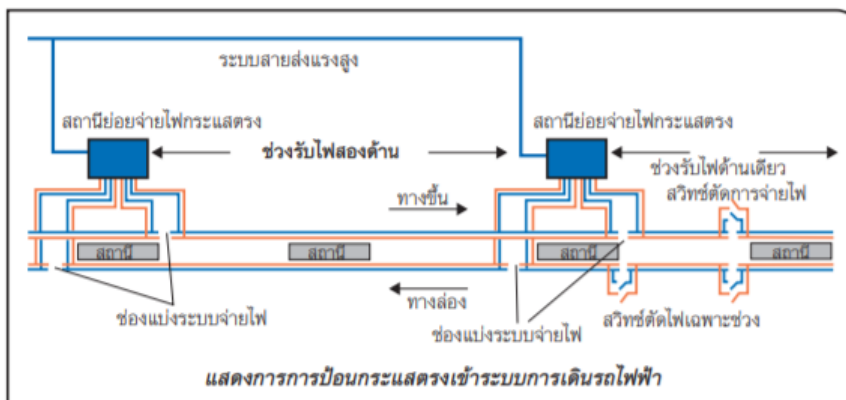


รูปที่ 2.18 ลักษณะของรถไฟฟ้าบีทีเอสในแต่ละรุ่น

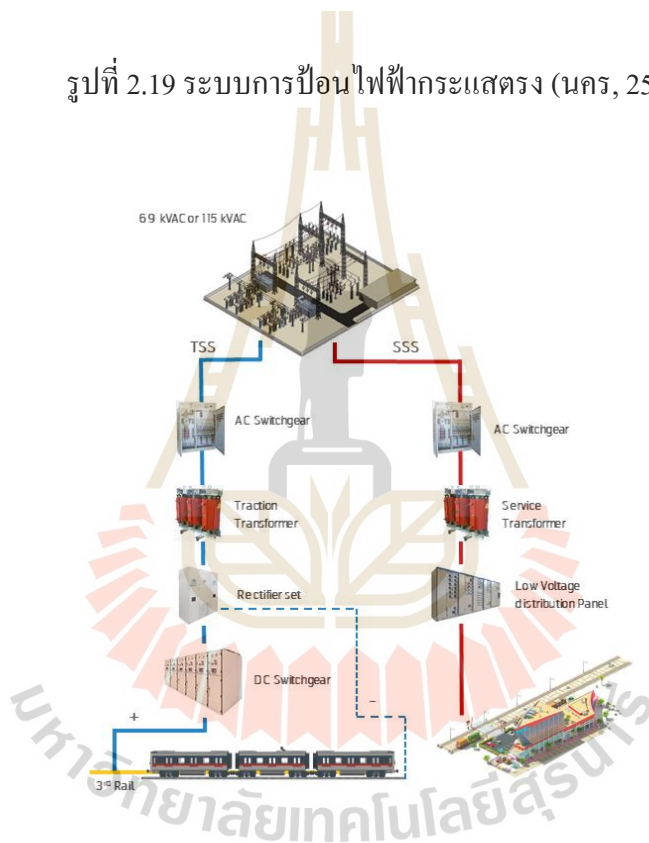
ที่มา : <https://www.thailandplus.tv/archives/214590> (เข้าถึงเมื่อ 23/06/2564)

2.10 การป้อนไฟกระแสตรงสำหรับรถไฟฟ้าบีทีเอส

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าบีทีเอส รับไฟฟ้าจากสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง จำนวน 2 สายส่ง โดยโหลดทั้งหมดของระบบรถไฟฟ้าใช้ไฟจากสายส่งเพียงเส้นเดียว สายส่งอีกเส้นทำหน้าที่เป็นสายส่งสำรองเพื่อจ่ายไฟในกรณีที่สายส่งหลักเกิดขัดข้อง เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ (Reliability) สายดังกล่าวจ่ายเข้าไปให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ส่วนสถานีจะแปลงแรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายให้รางที่สามในระดับแรงดันทำงานที่ 750 V_{DC}



รูปที่ 2.19 ระบบการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง (นคร, 2555)



รูปที่ 2.20 ภาพรวมระบบการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา : เพจ The Electric Railway System – เรียนรู้ระบบรถไฟ (เข้าถึงเมื่อ 15/06/2564)

2.11 ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ

ระบบอัตโนมัติสัญญาณรถไฟ (Railways Signaling System) เป็นกลไก สัญญาณไฟ หรือระบบคอมพิวเตอร์ที่มีไว้สำหรับควบคุมการเดินขบวนรถไฟให้มีความปลอดภัย และแจ้งให้พนักงานขับรถได้ทราบสภาพเส้นทางข้างหน้า และตัดสินใจที่จะหยุดรถ ชะลอความเร็วรถหรือ

บังคับทิศทาง ให้รถดำเนินได้อย่างปลอดภัย รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการควบคุมการเดินรถไฟให้และระยะเวลาเดินขบวนเป็นไปตามที่กำหนด

ระบบในการเดินรถไฟ จะนำระบบอัตโนมัติสัญญาณที่เป็นระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมการเดินรถไฟโดยอัตโนมัติ เพื่อให้การบริการมีประสิทธิภาพ สะดวกรวดเร็ว และปลอดภัยสูงสุด แบ่งเป็น 3 ระบบย่อย คือ

1. ระบบควบคุมการเดินรถไฟอัตโนมัติ เรียกว่า ATO (Automatic Train Operation) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานต่าง ๆ ของขบวนรถไฟ เช่น การขับเคลื่อนรถไฟ การควบคุมความเร็วของรถไฟ การควบคุมการห้ามล้อ การจอดรถไฟ และการรายงานสถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในตัวรถไฟไปยังศูนย์ควบคุม

2. ระบบป้องกันอัตโนมัติ เรียกว่า ATP (Automatic Train Protection) เป็นระบบที่คอยควบคุมไม่ให้รถไฟใช้ความเร็วเกินกำหนด ควบคุมความเร็วรถไฟให้อยู่ในพิกัดความเร็วที่สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างรถไฟข้างหน้า หากเกิดเหตุผิดปกติ ระบบ ATP จะสั่งการห้ามล้ออัตโนมัติ นอกจากนี้ยังควบคุมการเคลื่อนตัวของรถไฟจากสถานีรถไฟ โดยหากประตูรถไฟและประตูกันชนชลาวยังปิดไม่เรียบร้อย ระบบ ATP จะไม่อนุญาตให้รถไฟเคลื่อนตัวออกจากสถานี ต่างจากระบบ ATO ตรงที่มีความอิสระต่างกัน กรณีที่ระบบ ATO ขัดข้อง ต้องใช้คนควบคุมการเดินรถไฟ ระบบ ATP จะยังคอยควบคุมการเดินรถไฟต่อไป

3. ระบบกำกับการเดินรถไฟอัตโนมัติ เรียกว่า ATS (Automatic Train Supervision) เป็นระบบที่คอยควบคุมการเดินรถไฟทั้งระบบให้เป็นไปตามตารางการเดินรถไฟ โดยจะส่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ความเร็วของรถไฟแต่ละขบวน ติดตามและแสดงตำแหน่งของรถไฟทุกขบวนที่อยู่ในระบบ และจัดเตรียมขั้นตอนต่าง ๆ ในการควบคุมการเดินรถไฟ เมื่อระบบการเดินรถไฟมีเหตุขัดข้อง

โดยทั้ง 3 ระบบ จะควบคุมด้วยระบบ Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) และในแต่ละระบบจะมีระบบสำรองกรณีที่เครื่องคอมพิวเตอร์ขัดข้อง ระบบสำรองจะทำงานแทนเพื่อมิให้เกิดปัญหาในการเดินรถไฟ และหากระบบสำรองขัดข้องก็สามารถให้พนักงานควบคุมด้วยตนเองได้

2.11.1 ตารางเวลาเดินรถไฟ

นำมาใช้เป็นตารางกำหนดเวลาการรับส่งผู้โดยสารในแต่ละสถานี เพื่อให้ผู้ให้บริการสามารถวางแผนการเดินทางได้อย่างสะดวกและตรงเวลา ซึ่งการกำหนดตารางเดินรถไฟจะต้องพิจารณาในรูปแบบการเดินรถไฟหลายขบวน เพื่อสอดคล้องกับระบบการเดินรถไฟอัตโนมัติ โดยตารางเดินรถไฟจะแสดงเวลาความถี่การปล่อยรถแต่ละขบวน และช่วงเวลาการให้บริการ

เวลาให้บริการของรถไฟฟ้าบีทีเอส¹ BTS SkyTrain Service Information¹

สายสุขุมวิท Sukhumvit Line						
จากสถานี From station	สุขุมวิท → สถานี Khu Khot → Kha Kha			สถานี → สุขุมวิท Kha Kha → Khu Khot		
	ขบวนรถ รถด่วนพิเศษ (พิเศษ) Special Express (พิเศษ) Service Interval (พิเศษ)	ขบวนรถ รถด่วนพิเศษ (พิเศษ) Special Express (พิเศษ) Service Interval (พิเศษ)	ขบวนรถ รถด่วนพิเศษ (พิเศษ) Special Express (พิเศษ) Service Interval (พิเศษ)	ขบวนรถ รถด่วนพิเศษ (พิเศษ) Special Express (พิเศษ) Service Interval (พิเศษ)	ขบวนรถ รถด่วนพิเศษ (พิเศษ) Special Express (พิเศษ) Service Interval (พิเศษ)	ขบวนรถ รถด่วนพิเศษ (พิเศษ) Special Express (พิเศษ) Service Interval (พิเศษ)
ท่าอากาศยาน	05:15	23:23	23:45	00:00	สถานีสุดท้าย	สถานีสุดท้าย
ท่าอากาศยาน	05:17	23:26	23:48	00:02	05:39	00:49
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:19	23:27	23:49	00:04	05:37	00:47
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:21	23:29	23:51	00:06	05:35	00:46
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:23	23:31	23:53	00:08	05:33	00:43
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:25	23:33	23:55	00:10	05:31	00:41
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:26	23:34	23:56	00:11	05:30	00:40
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:28	23:36	23:58	00:13	05:28	00:38
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:30	23:38	00:00	00:15	05:26	00:36
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:32	23:40	00:02	00:17	05:24	00:34
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:33	23:41	00:03	00:18	05:23	00:33
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:35	23:43	00:05	00:20	05:21	00:31
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:36	23:44	00:06	00:21	05:19	00:30
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:38	23:46	00:08	00:23	05:18	00:28
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:39	23:47	00:09	00:24	05:16	00:27
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:41	23:49	00:11	สถานีสุดท้าย	05:15	00:25
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:15	23:53	00:15	05:57	00:22	00:44
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:16	23:54	00:16	05:55	00:20	00:42
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:19	23:57	00:19	05:53	00:17	00:39
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:20	23:58	00:20	05:51	00:16	00:38
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:23	00:01	00:23	05:49	00:13	00:35
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:25	00:03	00:25	05:47	00:11	00:33
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:27	00:05	00:27	05:46	00:10	00:32
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:29	00:06	00:30	05:43	00:08	00:30
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:31	00:09	00:31	05:41	00:05	00:27
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:33	00:11	00:33	05:39	00:04	00:26
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:35	00:13	00:35	05:38	00:02	00:24
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:36	00:14	00:36	05:36	00:00	00:22
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:38	00:17	00:39	05:34	23:58	00:20
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:40	00:18	00:40	05:32	23:56	00:18
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:42	00:20	00:42	05:30	23:54	00:16
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:44	00:22	00:44	05:28	23:53	00:15
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:46	00:24	00:46	05:26	23:51	00:13
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:48	00:26	00:48	05:24	23:49	00:11
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:49	00:27	00:49	05:23	23:47	00:09
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:51	00:29	00:51	05:21	23:45	00:07
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:53	00:32	00:54	05:19	23:43	00:05
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:55	00:33	00:55	05:17	23:41	00:03
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:15	00:36	สถานีสุดท้าย	05:15	23:39	00:01
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:16	00:38	สถานีสุดท้าย	05:30	23:37	23:59
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:19	00:41	05:27	23:34	23:56	00:12
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:22	00:43	05:24	23:32	23:54	00:09
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:23	00:44	05:23	23:30	23:52	00:08
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:26	00:47	05:20	23:27	23:49	00:05
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:28	00:49	05:18	23:25	23:47	00:03
สถานีวิทยุกระจายเสียง	05:29	00:51	05:17	23:24	23:46	00:02
สถานีวิทยุกระจายเสียง	สถานีสุดท้าย	05:15	23:22	23:44	00:00	

ความถี่ของ การเดินรถไฟฟ้าบีทีเอส² BTS SkyTrain Service Intervals²

วันจันทร์-วันศุกร์
Monday to Friday

ช่วงเวลา (น.) Service Hours (hrs.)	ระยะเวลาห่างขบวนรถโดยประมาณ Approximate service interval between trains (น.) (ประมาณ)	
	สายสุขุมวิท Sukhumvit Line	สายสีลม Silom Line
06:00 - 07:00	5.00	6.00
07:00 - 09:00	2.40 * / 5.20 **	3.45
09:00 - 09:30	3.35	6.00
09:30 - 16:00	6.30	6.00
16:00 - 16:30	4.25	6.00
16:30 - 17:00	2.40 * / 5.20 **	6.00
17:00 - 20:00	2.40 * / 5.20 **	3.45
20:00 - 21:00	4.25	6.00
21:00 - 22:00	6.00	6.00
22:00 - 24:00	8.00	8.00

วันเสาร์-อาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์
Saturday to Sunday and Public Holiday

ช่วงเวลา (น.) Service Hours (hrs.)	ระยะเวลาห่างขบวนรถโดยประมาณ Approximate service interval between trains (น.) (ประมาณ)	
	สายสุขุมวิท Sukhumvit Line	สายสีลม Silom Line
06:00 - 08:00	7.00	7.00
08:00 - 09:00	5.55	7.00
09:00 - 11:00	5.55	5.40
11:00 - 21:00	4.30 * / 6.00 **	5.40
21:00 - 22:00	7.00	7.00
22:00 - 24:00	8.00	8.00

* เวลาที่ความถี่ขบวนรถโดยประมาณระหว่างสายสีลม-สุขุมวิท BTS SkyTrain Service Intervals, between Silom and Sukhumvit
** เวลาที่ความถี่ขบวนรถโดยประมาณระหว่างสายสีลม-สุขุมวิท BTS SkyTrain Service Intervals, between Silom and Kha Kha, and between Kha Kha and Khu Khot.

รูปที่ 2.21 ตารางเวลาและความถี่ในการเดินรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท
ที่มา : <https://www.bts.co.th/service/timetable.html> (เข้าถึงเมื่อ 15/06/2564)

2.12 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นหัวข้อหนึ่งในการหาคำตอบระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง ซึ่งเป็นการปัญหาที่กล่าวว่าเป็นการหาค่าผลเฉลยที่ดีที่สุดจากผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในกรณีเฉพาะอย่างง่ายสำหรับปัญหาที่เรารู้จักกันเป็นอย่างดีก็คือ การหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันเชิงจำนวนจริงบนโดเมนเซตเงื่อนไขกำหนด สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นที่นิยมในการนำไปแก้ปัญหาในทางต่าง ๆ ทั้งในทาง คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ และอื่น ๆ โดยในปัจจุบันได้เทคโนโลยีได้มีการพัฒนาไปมากและได้มีคิดค้นการใช้เทคนิคที่

เรียกว่าปัญหาประคิษฐ์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณที่สามารถหาค่าที่มีโอกาสเป็นได้ดียิ่งขึ้น

การศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่สามารถดำเนินการได้โดยตรง จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา (ธนดชัย, 2550) ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดก็คือการหา “ค่าที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุด” สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ที่นิยามบนโดเมน (Domain) หรือเซตเงื่อนไข (Constraint set) ของฟังก์ชันจุดประสงค์และเซตเงื่อนไขที่หลากหลาย (อักพล, 2559) เมื่อได้ครบทุกองค์ประกอบจากที่กล่าวมาแล้วจึงสามารถดำเนินการแก้ปัญหา ฉะนั้นการหาค่าจึงเป็นหัวข้อที่สำคัญหัวข้อหนึ่งในการแก้ปัญหาและควรพัฒนาต่อเพื่อให้เกิดแนวคิดและเทคนิคใหม่ ๆ ก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น

2.13 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการผลต่าง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ถูกคิดค้นและนำเสนอ โดย Storn, R. and Price, K. (1997) โดยอธิบายหลักการและกรอบแนวคิดว่า ทฤษฎีของวิธีที่เป็นรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีเวลาในการคำนวณผลลัพธ์ที่น้อยลง หลังจากที่มีการนำเสนอหลักการนี้ออกไปแนวคิดการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างถูกประยุกต์ใช้ผลต่างถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายโดยการแสดงข้อได้เปรียบในพื้นที่ที่มีการประยุกต์ใช้ในวิธีค้นหาที่ยึดตามหลักประชากร (ภาณุภักดิ์, 2556) ซึ่งวิธีดังกล่าว (ดลยา, 2560) ได้อธิบายกระบวนการโดย vector จำนวน NP ตัวเป็นประชากรของรุ่น G โดย Vector ชุดแรกสามารถสร้างได้โดยการสุ่มให้ครอบคลุมทั้ง Parameter space หรือถ้าเป็นกรณีที่มี Preliminary solution อยู่แล้ว ก็อาจจะใช้คำตอบดังกล่าวเป็นตัวตั้งต้น แล้วสร้างรุ่นแรกจากการเพิ่มสมาชิกที่ค่าเบี่ยงเบนจากคำตอบนั้นกระจายแบบปกติเข้าไปให้ได้ NP ตัว จากนั้น DE จะสร้าง Parameter vector ชุดใหม่ เรียกว่า Trial vector จากขั้นตอน Mutation กับ Crossover แล้วเปรียบเทียบ Trial vector กับ Target vector (ซึ่งเป็นประชากรรุ่น G) หาก Trial vector มี Cost function ต่ำกว่า Target vector ต่อไป Trial vector จะไปอยู่ในรุ่น G+1 ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า Selection แล้วทำซ้ำ Mutation, Crossover, Selection ไปจนถึงจำนวนรุ่นที่กำหนดแล้วเอาประชากรตัวที่ดีที่สุดจากรุ่นสุดท้ายเป็นคำตอบ โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

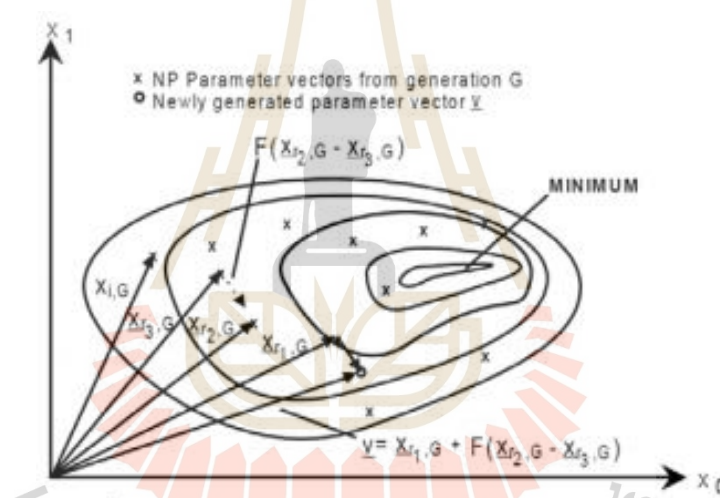
- 1) Initialization กำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวแปรการตัดสินใจแต่ละตัว โดยต้องแน่ใจว่าขอบเขตนี้จะครอบคลุมจุดที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดจากนั้น ให้สุ่มหาคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้น (Initial population) โดยกำหนดให้โอกาสที่จะถูกเลือกของคำตอบมีค่าสม่ำเสมอ (Uniform probability distribution) โดยแต่ละคำตอบซึ่ง เรียกว่า Decision vector มีมิติเท่ากับ D และ

จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้นเท่ากับ NP จากนั้นคำนวณหา Function value ของแต่ละคำตอบเริ่มต้น ที่เป็นไปได้

2) Mutation กำหนด Target vector ($X_{p,G}$) โดย $i = 1, 2, 3, \dots, NP$ จากนั้นสุ่มเลือก 3 Vector ($X_{r1,G}, X_{r2,G}, X_{r3,G}$) จากคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้น (Initial population) โดยต้องไม่ซ้ำกับ Target vector แล้วคำนวณหา Mutant vector ($v_{i,G+1}$) จากความสัมพันธ์

$$v_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (2.1)$$

เมื่อ F คือ Weighing factor มีค่าระหว่าง 0 ถึง 2 ซึ่งลักษณะการค้นหา Mutant vector ของฟังก์ชัน 2 ตัวแปรสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงการค้นหา Mutant vector

3) Crossover หรือ Recombination เป็นกระบวนการเพิ่มความหลากหลายของคำตอบ ผลลัพธ์จะได้ Trial vector ($u_{i,G+1}$) ซึ่งเกิดจาก Non-uniform crossover ของ Target vector กับ Mutant vector โดย

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1}) \quad (2.2)$$

และสมการ (2.3) แสดงกระบวนการ Crossover

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } (\text{randb}(j) \leq CR) \text{ or } j = \text{rnbr}(i) \\ X_{ji,G+1} & \text{if } (\text{randb}(j) > CR \text{ and } j \neq \text{rnbr}(i)) \end{cases} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$u_{ji,G+1}$ = Trial vector

$v_{ji,G+1}$ = Mutant vector

$X_{ji,G}$ = Target vector

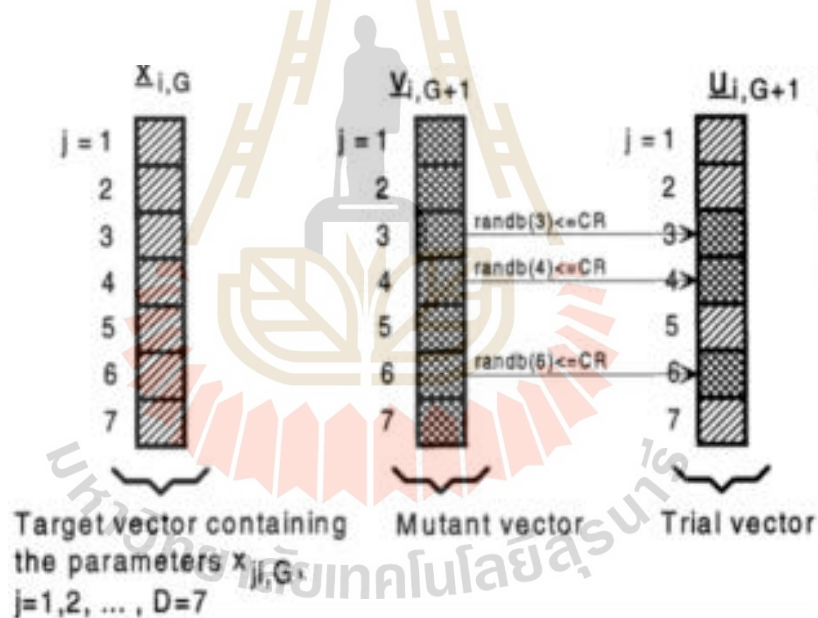
$\text{randb}(j)$ = การสุ่มตัวเลขจำนวนจริงที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ครั้งที่ j

CR = Crossover constant มีค่าเป็นเลขจำนวนจริงระหว่าง 0 ถึง 2

$\text{rnbr}(i)$ = ค่า Index จากการสุ่มเลือกมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มระหว่าง $0, 1, \dots, D-1$

D = Decision vector

j = $0, 1, \dots, D-1$

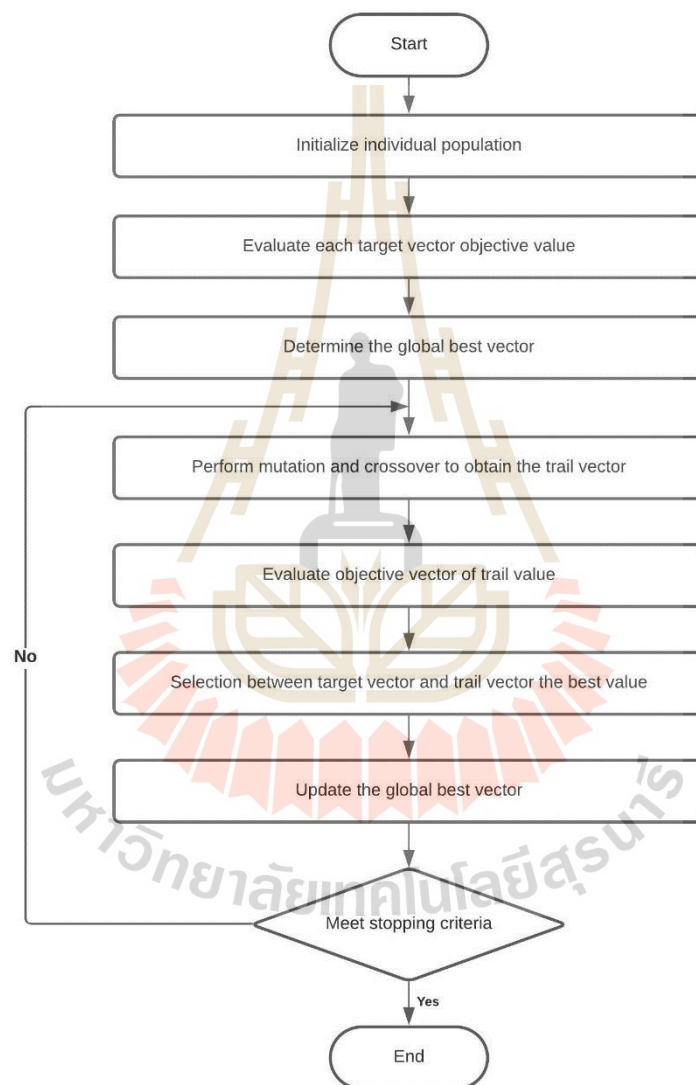


รูปที่ 2.23 การ Crossover ของ Target Vector และ Mutant Vector

4) Selection เป็นขั้นตอนการคัดเลือกประชากร ในรุ่นต่อไป ($G+1$) โดยคัดเลือกเอาแต่เฉพาะคำตอบที่ดีกว่า โดยการเปรียบเทียบ Cost function value ของ Trial vector $U_{i,G+1}$ กับ Target vector $x_{i,G}$ ถ้า Vector $U_{i,G+1}$ มีค่า Cost function ดีกว่า $x_{i,G}$ จะทำให้ $x_{i,G+1}$ ถูกแทนที่ด้วย $U_{i,G+1}$ หรือถ้าไม่ดีกว่าค่าเดิมคือ $x_{i,G}$ จะยังคงอยู่ต่อไป

5) Evaluation & Re-generation การดำเนินการ ซ้ำจาก 2) ถึง 4) โดยเปลี่ยน Target vector จนถึง $i = NP$

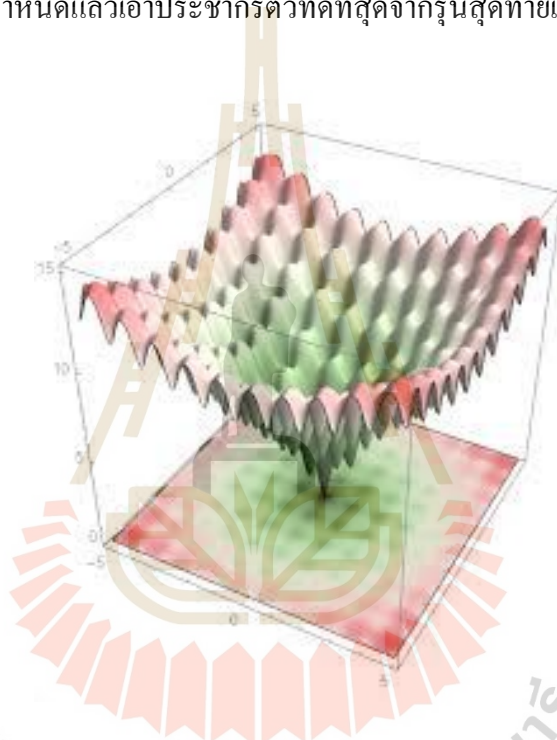
6) Reach convergence tolerance การนำ Target vector ที่ได้จากข้อ 4) มาทำซ้ำในขั้นตอนทั้งหมดจนครบแล้วเลือกค่าที่ดีที่สุดในรอบสุดท้ายเป็นคำตอบ โดยภาพที่ 2.24 แสดงขั้นตอนการหาค่าเหมาะที่มีวัตถุประสงค์เดียว ด้วย DE แบบทั่วไป



รูปที่ 2.24 แผนผังขั้นตอนการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี DE (ดลยา, 2560)

จากการศึกษาขั้นตอนกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีวิวัฒนาการผลต่าง Storm, R. and Price, K. (1997) ได้ให้คำจำกัดความว่าทฤษฎีของวิธีที่เป็นรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีเวลาใน

การคำนวณผลลัพธ์ที่น้อยลง (ณัฐณพัชร, 2557) กล่าวว่าเป็นเครื่องมือหาค่าฟังก์ชันเหมาะสมที่ง่ายต่อการใช้งานสำหรับหาคำตอบที่ซับซ้อน ซึ่งสอดคล้องกับ (ภาณุภักดิ์, 2556) ในการทำงานสำหรับปัญหาขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ก็พบว่าความเร็วของวิธีการวิวัฒนาการผลต่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีวิธีการ (คณา, 2560) อธิบายไว้ว่า DE จะสร้าง Parameter vector ชุดใหม่ เรียกว่า Trial vector จากขั้นตอน Mutation กับ Crossover แล้วเปรียบเทียบ Trial vector กับ Target vector (ซึ่งเป็นประชากรรุ่น G) หาก Trial vector มี Cost function ต่ำกว่า Target vector ต่อไป Trial vector จะไปอยู่ในรุ่น $G+1$ ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า Selection แล้วทำซ้ำ Mutation, Crossover, Selection ไปจนถึงจำนวนรุ่นที่กำหนดแล้วเอาประชากรตัวที่ดีที่สุดจากรุ่นสุดท้ายเป็นคำตอบ



รูปที่ 2.25 การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธี DE

ที่มา : <https://mathematica.stackexchange.com/questions/193009/minimizing-with-differential-evolution> (เข้าถึงเมื่อ 15/07/2564)

2.14 ปรัชมนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจำลองการเคลื่อนที่ของการเดินรถไฟและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นแนวทางการเรียนรู้ที่ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมมาจากงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้สำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนา เพื่อต่อยอดและพัฒนาในงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

2.14.1 การพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนที่

Y.V. Bocharnikov (2010) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของรถไฟความเร็วที่ใช้พลังงานขึ้นต่ำพร้อมกับสร้างพลังงานใหม่ให้ได้มากที่สุด ซึ่งพิจารณาการลดการใช้พลังงานของรถไฟระหว่างสองสถานีไฟฟ้ากระแสตรงที่อยู่ใกล้กัน โดยใช้วิธีการทางพันธุกรรมหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเส้นทางโดยคิดการใช้พลังงานและเวลาในการเดินทาง ผลจากการจำลองด้วยอัลกอริทึมดังกล่าวสามารถลดการใช้พลังงาน 19%

Panetch and Wanchai (2011) นำเสนอบทความรถไฟฟ้าดันแบบไร้คนขับ ซึ่งประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าไร้คนขับ โดยการติดตั้งระบบควบคุมให้กับรถไฟฟ้าแบบไร้คนขับต้นแบบ 4 ล้อ ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์อินดักชันกับชุดเกียร์ที่ต่อเข้ากับเพลาโดยตรง โดยส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยรางที่สามเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยงานวิจัยนี้พบว่ารถไฟฟ้าดันแบบสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งจากผู้โดยสาร และจากศูนย์ควบคุม การควบคุมส่งถ่ายข้อมูลด้วยระบบจีพีอาร์เอส (GPRS)

Morris B. (2016) ศึกษาเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติในรถไฟฟ้าประกอบไปด้วยระบบ (ATC, ATO และ ATP) เป้าหมายอยู่ที่การใช้เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุดของพลังงานในการเคลื่อนที่โดยใช้อัลกอริทึม ซึ่งได้นำวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดเชิงพันธุกรรมมาใช้กับระบบ โดยใช้เมืองมิลานในการทดสอบ ซึ่งการอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมสามารถหาค่าที่ดีที่สุดในการเคลื่อนที่ตามเวลาเดินรถและลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า

ณัฐพงษ์ (2016) ศึกษาความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูเลชัน โดยการประเมินความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าเมื่อพิจารณารูปแบบการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสสลับที่แตกต่างกัน ซึ่งทำพร้อมกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาเดินรถไฟฟ้าโดยใช้รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงก์ เป็นกลุ่มตัวอย่างจากผลการจำลองพบว่า ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุดเมื่อเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์

ชัยยุทธ์ (2017) นำเสนอกลยุทธ์ใหม่สำหรับการจัดการคืนพลังงานร่วมกับการเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยการพลังงานแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นบนขบวนรถและพัฒนากลยุทธ์การตัดค่าความต้องการไฟฟ้าคายอด ผลการทดสอบพบว่าการใช้กลยุทธ์การตัดค่าคายอดของรถไฟฟ้าในช่วงเร่งได้ดีกว่ากลยุทธ์อื่นซึ่งลดการใช้พลังงานโดยรวมถึง 63.49% รวมถึงการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาหาจุดที่เริ่มโหมดการแล่น ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 15.56%

จิระพงศ์ (2018) ทำการศึกษาและจำลองผลด้วยการออกแบบอัลกอริทึมบน ซิมูเลชันของโปรแกรมเมทแลป เพื่อศึกษาระบบจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า (APM) ที่วิ่งบนทางในแนว ระดับองศาต่าง ๆ โดยใช้เส้นทางหน้าโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นที่ทดสอบ ซึ่ง แบบผลการจำลองสามารถแสดงการใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กำลังสูญเสีย และค่าแรงดัน ในขณะรถไฟฟ้า (APM) เคลื่อนที่

วัยอาจ (2018) นำเสนอการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ การจำลองกับรถยนต์ ไฟฟ้าเทียบกับรถยนต์ที่ใช้ปกติ พร้อมทั้งปรับรูปแบบความเร็วให้เหมาะสมกับการประหยัด พลังงาน รวมถึงการจำลองการเก็บพลังงานสะสมในการเดินทางโดยการประจุแบบไร้สายและปรับ รูปแบบความเร็ว ซึ่งเป็นการบูรณาการใช้พลังงานพบว่าใช้พลังงานในการขับเคลื่อนลดลง 21.487% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน

กันตินันท์ (2018) อธิบายถึงการปรับเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลหรือสายสีม่วงเป็นกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งได้ทดลองการปรับเส้นโค้งความเร็วร่วมกับการใช้อุปกรณ์ กักเก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าพร้อมทั้งนำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีฝูงอนุภาค เพื่อช่วยในการหาค่าแห่งการชะลอความเร็ว จากการแก้ปัญหาเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่ พบว่าลดการใช้พลังงานได้ถึง 22.71% นอกจากนี้ การประยุกต์อุปกรณ์การเก็บพลังงานไฟฟ้า โดยเบรกแบบนำพลังงานกลับคืน พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 49.54%

บันริ (2019) นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประหยัดพลังงานที่สุดของระบบ จ่ายไฟรถไฟฟ้าตัวอย่าง (APM) โดยการใช้วิธีเชิงพันธุกรรม(GA) และวิธีแบบกลุ่มอนุภาคเพื่อค้นหา ความเร็วที่เหมาะสมที่สุดในระบบโดยควบคุมความเร่ง จำลองการเคลื่อนที่สองสถานีในรูปแบบ ต่างๆ ระยะทาง 1 กิโลเมตร จากผลการจำลองพบว่าความเร็วที่ 40 km/h คือความเร็วที่เหมาะสม ที่สุดของระบบที่ใช้พลังงานของรถไฟฟ้า

Shunying Xia (2019) ศึกษาารูปแบบการสูญเสียพลังงานของรางจ่ายไฟให้กับ ระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งสาธารณะแบบไร้คนขับ (APM) ที่ใช้ในสนามบิน ซึ่งได้ทำการ ออกแบบ Parameter ให้กับรถ จุดมุ่งหมายเพื่อให้ต้องการลดการใช้พลังงานในระบบรถ (APM) เสนอจากแง่มุมของการตอบสนองต่อพลังงานเบรกประสิทธิภาพการส่งผ่านเชิงกลการสูญเสีย อุปกรณ์เสริมและการสูญเสียไฟฟ้าในระบบ ศึกษาวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของระบบ (APM) และทำการจำลองและวิเคราะห์ไปยังระบบจ่ายไฟ 400V_{AC} สามเฟส ค้นคว้าเกี่ยวกับโหมดควบคุม ความเร็วของระบบ (APM) ใช้การคำนวณผ่าน Algorithm (APSO) และ Dynamically changing inertia weight (DCW) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและควบคุมความเร็วให้เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสีย พลังงานเชิงกล

2.14.2 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

อุเทน (2012) นำเสนอวิธี Key cutting Algorithm (KCA) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า ในบัสจำนวนต่าง ๆ ตามมาตรฐาน IEEE โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรม วิธี Sequential quadratic programming (SQP) วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ผลปรากฏว่าวิธี Key cutting Algorithm(KCA) แม่นยำ การกระจายตัวน้อย และมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

A. Khuptawatin (2013) วัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสรรวัตถุดิบ ในการขนส่งมันสำปะหลัง แบบหลายระดับชั้น ระหว่างการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์แล้วแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo V.11 และการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิวัฒนาการคำตอบ(Differential Evolution: DE) โดยขั้นตอนการวิจัยมีสองขั้นตอนคือ 1) การเปรียบเทียบผลคำตอบในด้านเศรษฐศาสตร์ และ 2) ระยะเวลาในการคำนวณหาคำตอบที่น้อยที่สุด ในการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอ จะทำการทดสอบกับปัญหาที่ผู้วิจัยทำการจำลองสถานการณ์ขึ้น เพื่อใช้ในการวิจัยทั้งสิ้น 5 กรณีศึกษา จากผลการทดลองพบว่า วิธีการหาคำตอบของ DE น้อยกว่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo V.11 เฉลี่ย 0.281% ต่อการใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบที่เร็วกว่าเฉลี่ย 85.4 นาที เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo V.11

คลยา (2017) นำเสนอวิธีการการหาขนาดท่อในระบบการจ่ายน้ำที่เหมาะสมด้วยวิธีวิวัฒนาการผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยสามารถแก้ปัญหากรณีศึกษาจริงในการหาขนาดท่อของระบบจ่ายน้ำที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของงบประมาณที่จำกัด โดยวิธีวิวัฒนาการ โดยผลต่างสามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน

ธนวัฒน์ (2017) นำเสนอการใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการโดยผลต่างกับแบบจำลองเพื่อทำการหารูปแบบการวางแผนจัดระเบียบตู้คอนเทนเนอร์เข้าไปในพื้นที่ของเรือสินค้าอย่างเหมาะสม ซึ่งมีข้อกำหนดด้วยระยะทางในการเคลื่อนที่ของเครน สำหรับลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลโดยทำการคำนวณระยะทางจากแผนโครงสร้างของเรือบรรทุกสินค้าและทำการแปลงผลกลับมาเป็นระยะเวลาในการทำงาน ซึ่งคำตอบสามารถหาจุดที่ดีที่สุดในการจัดการวางตู้คอนเทนเนอร์และระยะเวลาในการหาคำตอบที่มีความรวดเร็วกว่าการหาคำตอบโดยตรง 9.21%

ศรัยรัตน์ (2017) ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบผสมสองด้าน โดยพัฒนาแบบการจำลองผลที่เรียกว่า AMOEA/DE มาเทียบกับ MODE ผลการทดสอบ AMOEA/DE มีสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ มากกว่าแบบอื่น ๆ อย่างชัดเจน

2.15 สรุป

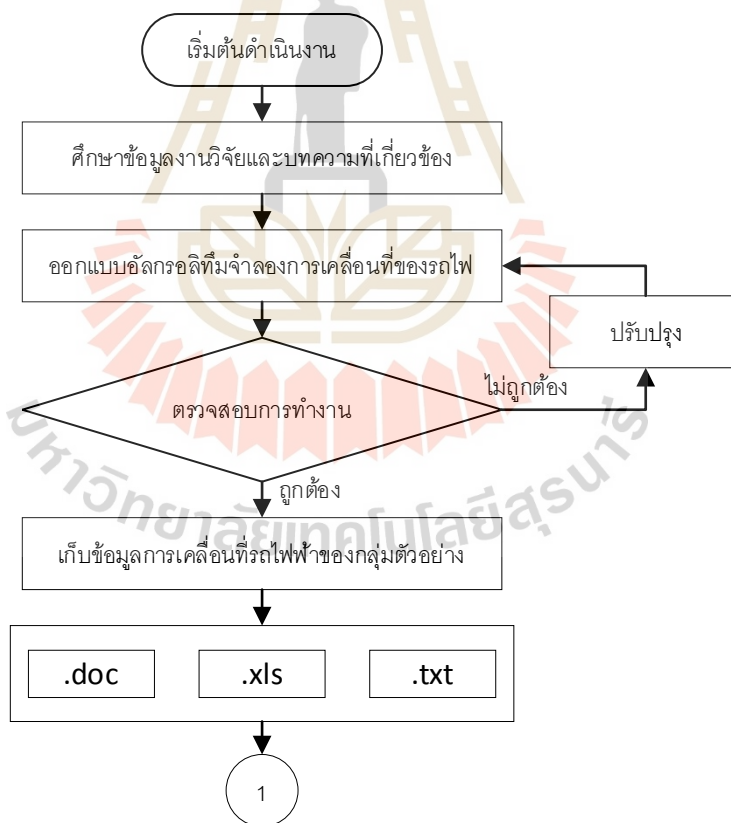
จากข้อมูลและวรรณกรรมที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 ทำให้ทราบข้อมูลที่สำคัญของรถไฟฟ้าในงานที่จะวิจัย รวมถึงวรรณกรรมที่ผ่านมาในอดีตถือเป็นแนวทางที่สำคัญ ทำให้ผู้วิจัยเกิดแนวคิดและแนวทางที่จะสามารถนำมาใช้ดำเนินงานวิจัยต่อไป



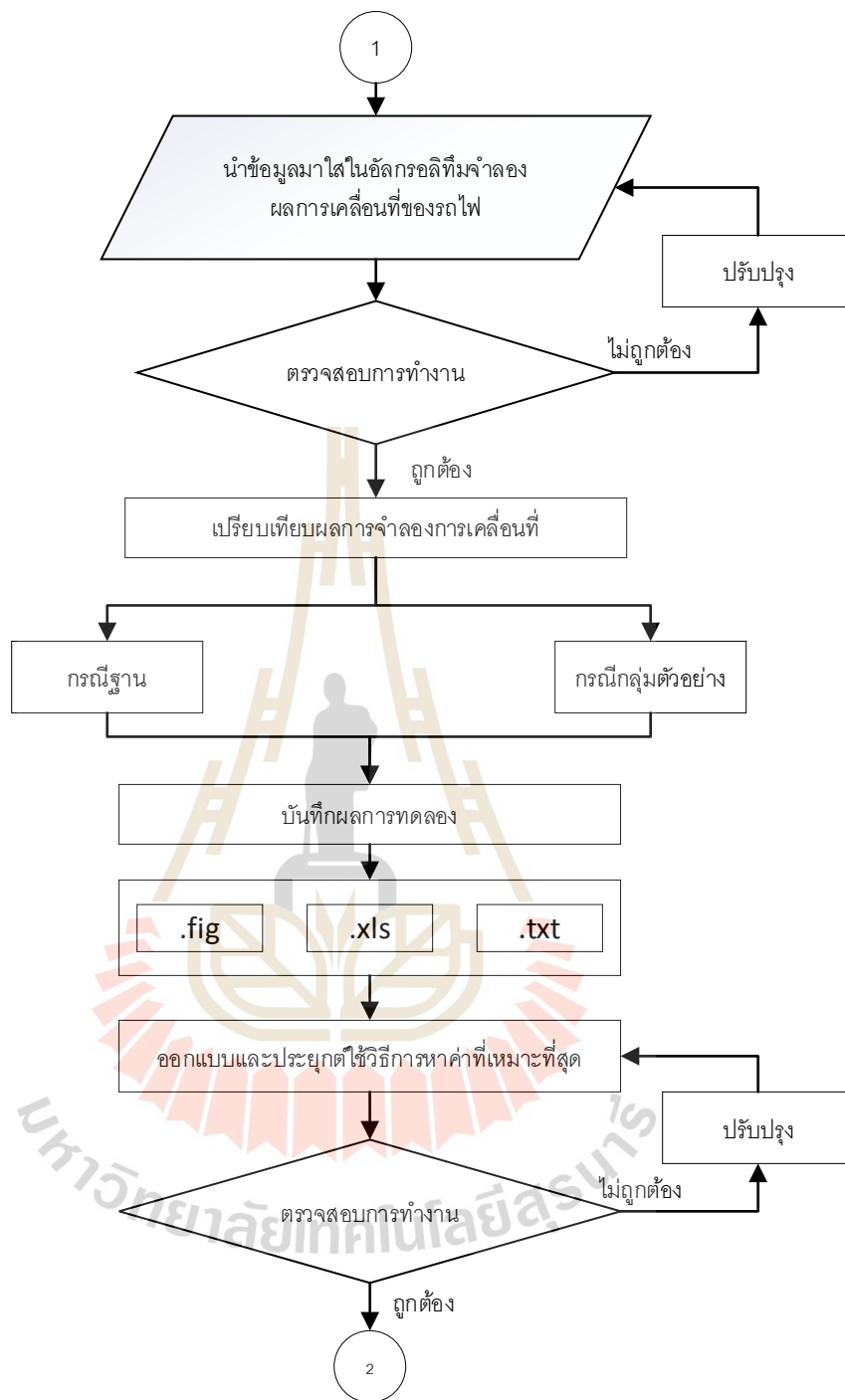
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

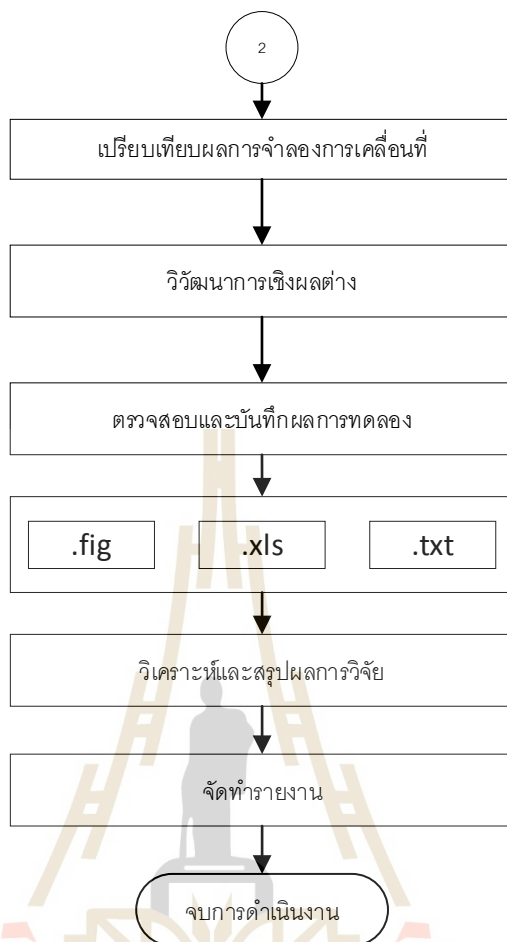
งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นออกแบบแนวทางการวิจัยเพื่อศึกษาการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีแนวทางในการลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทในช่วงต่อขยายทางเหนือ ตั้งแต่สถานีห้าแยกลาดพร้าวจนถึงสถานีคูคต ในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายดังกล่าวและการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในรูปแบบพลวัต โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน



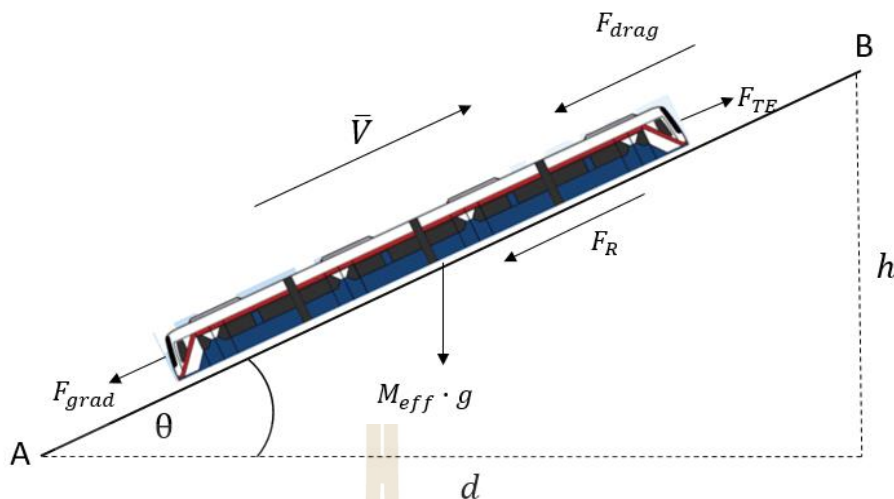
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน (ต่อ)



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน (ต่อ)

3.2 ออกแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองผลของรถไฟฟ้าจะพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้คำนวณหาค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อสร้างแรงจล (Tractive Effort) มากพอที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจนกระทั่งขบวนรถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว จากสมการการคำนวณจะอาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งเปลี่ยนไปตามเวลาหรือที่เรียกว่าการคำนวณทางพลวัต ซึ่งจะมีแรงต้านที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ได้แก่ แรงลากจูง แรงโน้มถ่วง และแรงเสียดทาน จากรูปที่ 3.2 จะแสดงแผนภาพวัตถุอิสระ (Free-Body Diagram)



รูปที่ 3.2 แผนภาพวัตถุอิสระของรถไฟฟ้ายูเอช

จากแผนภาพวัตถุอิสระแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายูเอชจากจุด A ไปยังจุด B ตามรางเส้นทางโค้งจะมีมุม θ ทำกับแนวระนาบด้วยความเร่ง a มวลน้ำหนัก M_{eff} ในแนวทิศทางแนวตั้งซึ่งจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่ ได้แก่ แรงต้านการเคลื่อนที่ (rolling resistance: F_R) แรงต้านโน้มถ่วงหรือแรงต้านเกรเดียนต์ (gradient force: F_{grad}) และแรงต้านทางอากาศ (aerodynamic drag force: F_{drag}) จากแรงต้านทั้งหมดนี้ สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบกฎข้อที่สองของนิวตัน วัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเมื่อออกแรงกระทำมากกว่าแรงต้านวัตถุนั้น ดังสมการที่ 3.1 – 3.3

$$\text{จาก } \Sigma F = ma \quad (3.1)$$

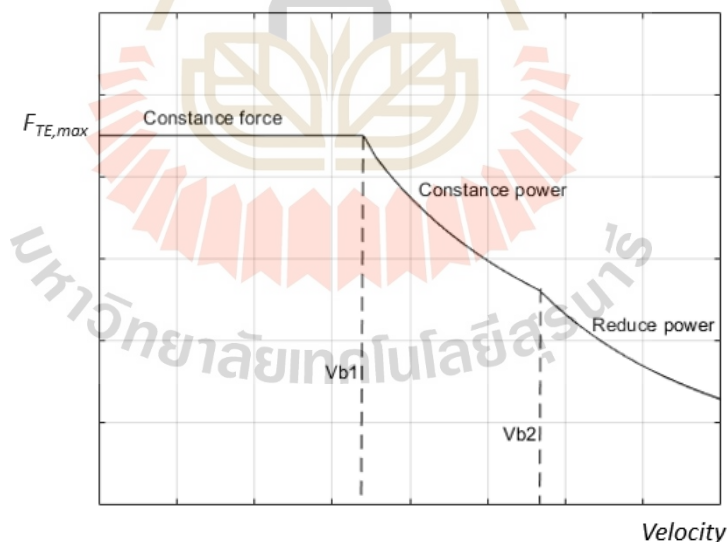
$$F = F_{TE} - F_R = M_{eff}a \quad (3.2)$$

$$F_R = F_{rr} + F_{drag} + F_{grad} + F_{curve} \quad (3.3)$$

เมื่อ	F_{TE}	คือ แรงจุดหัวรถจักร (N)
	M_{eff}	คือ มวลประสิทธิภาพ
	A	คือ ความเร่งของรถไฟฟ้ายูเอช (m/s^2)
	F_{grad}	คือ แรงต้านแรงโน้มถ่วง (N)

3.2.1 แรงดูดลากรถไฟฟ้า (Tractive Effort Force, F_{TE})

ลักษณะแรงดูดของรถไฟฟ้าที่ต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ลากจูงเพื่อสร้างแรงในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้านั้น ก่อนการขับเคลื่อนจำเป็นต้องใช้แรงดูดขนาดสูงในการทำให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ (ณัฐพงษ์, 2559) เช่นเดียวกับ (วเรศรา, 2560) ที่กล่าวว่า การจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ของจากจุดที่อยู่หนึ่งจำเป็นต้องออกแรงกระทำกับวัตถุนั้น ให้มากกว่า รถไฟฟ้าก็ต้องใช้กำลังขับให้มากกว่าแรงต้านทานทั้งจากรางและจากตัวรถเอง เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ออกจากจุดจอดหนึ่งได้ ดังนั้น การจำลองลักษณะสมบัติของแรงดูดขบวนรถไฟฟ้าใช้สมบัติเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ (Torque Speed Curve) ของมอเตอร์มาใช้งาน แรงดูดเกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ส่งกำลังผ่านระบบเฟืองทดเพื่อไปขับล้อของรถไฟฟ้า ทำให้ง่ายที่จะนำไปใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า จึงได้ผลลัพธ์ของแรงดูดเป็นดังกราฟแรงดูดขบวนรถไฟฟ้าหน่วยเป็นนิวตัน (N) ในรูปที่ 3.3 สอดคล้องกับ (ชัยยุทธ์, 2560) กล่าวว่า เส้นกราฟแรงดูดหัวรถจักรมาตรฐานของ UIC จะแปรผันตามความเร็วในการเคลื่อนที่ที่หัวรถจักรที่ความเร็วสุดท้ายจะให้แรงดูดคงที่ที่ค่าสูงสุด เมื่อความเร็วของหัวรถจักรมากกว่าค่าความเร็วฐานแรงดูดจะลดลง แต่การทำงานจะเปลี่ยนจากแรงดูดคงที่ (constant force region) เป็นกำลังงานคงที่ (constant power region)

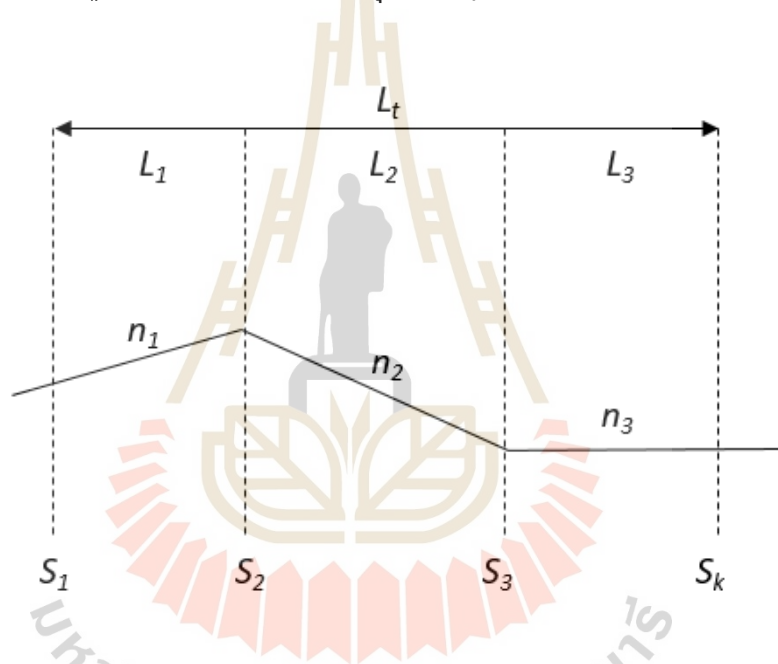


รูปที่ 3.3 ลักษณะสมบัติแรงดูดหัวรถจักร

3.2.2 แรงต้านเกรเดียนต์ (Gradient Force, F_{grad})

วัตถุทุกอย่างนั้นมีมวลน้ำหนักที่กระทำต่อแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งในรถไฟฟ้าก็เช่นเดียวกันที่มีน้ำหนักตัวรถกระทำต่อแรงโน้มถ่วง แต่เนื่องจากโน้มถ่วงเอียงทำมุมกับแนว

ระนาบดังภาพที่ 3.2 ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำกับรถไฟในการเคลื่อนที่ไต่ทางชัน ในการรักษา ระดับความเร็วของรถไฟพ้านั้นจะต้องสร้างแรงที่สามารถเอาชนะแรงต้านเกรเดียนต์ในการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 (ชัยยุทธ์, 2560) ใช้วิธี Homogeneous strip ในการหาค่าความชัน ดังรูปที่ 3.4 กำหนดให้รถไฟมีความยาวครอบคลุมจำนวน k ช่วง ระยะของแต่ละช่วง แทนด้วย S_1, \dots, S_k ซึ่งแต่ละช่วงมีความชันเป็น n_k มวลของรถไฟกระจายเท่าๆ กันตลอดช่วงระยะ S_k ความยาวของขบวนรถไฟแทนด้วย L_t ความยาวของส่วนของรถไฟเทียบกับช่วง S_k แทนด้วย L_k โดยผลรวมของ $L_1 + \dots + L_k$ มีค่าเท่ากับ L_t แรงต้านทานเกรเดียนต์หรือแรงต้านเนื่องจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้ตั้งสมการที่ (3.4 - 3.5) โดยที่ m_k เป็นมวลส่วนของขบวนรถไฟที่ครอบคลุมระยะทาง S_k สำหรับทางลาดชันที่ทำมุมน้อย ๆ นั้นค่า $\sin\theta$ สามารถแทนได้ด้วยค่า $\tan\theta$



รูปที่ 3.4 การคิดความชันแบบ homogeneous strip

$$F_{grad} = \pm M_{eff} g \sin\theta = \frac{M_{eff} g \Delta n}{L_t} \quad (3.4)$$

$$F_{grad} = F_{grad,1} + F_{grad,2} + F_{grad,3} \quad (3.5)$$

- เมื่อ M_{eff} คือ มวลประสิทธิภาพของรถไฟ
 g คือ แรงโน้มถ่วงโลก (มีค่า = 9.81 m/s^2)
 n_k คือ ระดับความชันในแต่ละช่วง

3.2.3 ค่าประสิทธิผลของน้ำหนัก

ตัวแปรอีกตัวที่สำคัญในการออกแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้ายกตัวซึ่งก็คือมวล สอดคล้องกับ (ธนัชชัย, 2560) กล่าวไว้ มวลน้ำหนักของรถไฟ M_t (tare mass) และมวลน้ำหนักที่บรรทุก มวลนี้คือมวลที่แปลงมาจากโมเมนต์ความเฉื่อยนำมารวมกันจะเป็นตัวประกอบมวลประสิทธิผลเป็นตัวแทนผลรวมน้ำหนักบรรทุก λ_{eff} ดังสมการที่ 3.6 - 3.7

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_{eff}) \quad (3.6)$$

$$\lambda_{eff} = \frac{M_{psg} + M_{fgrt} + M_{rot}}{M_t} \quad (3.7)$$

โดยที่

λ_{eff}	คือ	ผลรวมมวลบรรทุก
M_t	คือ	มวลน้ำหนักบรรทุก
M_{psg}	คือ	มวลผู้โดยสาร
M_{fgrt}	คือ	มวลของสินค้า
M_{rot}	คือ	มวลสมมูลจากโมเมนต์ความเฉื่อยทางการหมุน

3.2.4 แรงเสียดทานของรถไฟไฟฟ้า (Train Resistance, F_R)

การเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้ายกตัวจะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับราง และแรงต้านอากาศพลศาสตร์ เรียกโดยรวมว่า แรงต้านทาน (Resistive Force) โดย (กันตินันท์, 2561) แรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์แปรผันตามน้ำหนักและความเร็ว ส่งผลให้เป็นเรื่องที่ยากมากในการคำนวณแรงต้านทานการวิ่งด้วยทฤษฎี ดังนั้น การคำนวณหาค่าแรงต้านทานการวิ่งจึงต้องนำรถไฟไฟฟ้าไปวิ่งทดสอบบนสถานที่จริงและเก็บข้อมูลต่างๆ น้ำหนัก แรงเบรก แรงต้านจากลม สภาพภูมิประเทศที่รถไฟวิ่งผ่านมา ฉะนั้น แรงเสียดทานทั้งหมดจึงจัดอยู่ในรูปสมการของ Davis equation ตามสมการที่ (3.8) เพื่อประมาณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟ

$$F_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3.8)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h) และสัมประสิทธิ์ของ Davis (ค่าคงที่) ประกอบด้วย A , B และ C

3.2.5 แรงต้านทานความโค้ง (Curve Resistance, F_{curve})

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่บนรางเข้าสู่ช่วงการโค้ง จะทำให้เกิดแรงต้านทานระหว่างล้อ ทำกับรางอันเกิดจากแรงสู่ศูนย์กลาง (ชนิดซ้าย, 2560) ซึ่งแรงต้านทานขึ้นอยู่กับรัศมีความโค้งมีหน่วยเป็นเมตร แรงต้านทานมีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน ซึ่งงานวิจัยนี้จะอ้างอิงแรงต้านความโค้ง ดังสมการที่ 3.9 - 3.10

$$F_{curve} = \begin{cases} \frac{6.3}{r(s) - 55} M_{eff}, r(s) \geq 300m & (3.9) \\ \frac{4.91}{r(s) - 30} M_{eff}, r(s) < 300m & (3.10) \end{cases}$$

โดยที่ F_{curve} คือ แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง (kN), $r(s)$ คือ รัศมีความโค้งของรางรถไฟ (m)

3.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การทำงานพื้นฐานของรถไฟจะเคลื่อนที่ภายใต้การทำงาน 4 โหมด ได้แก่ โหมดการเร่ง (Acceleration Mode) โหมดการรักษาความเร็วคงที่ (Constant Speed Or Cruising Mode) การแล่นด้วยความเฉื่อย (Coasting Mode) และ โหมดการเบรก (Braking Mode) (Kulworawanichpong, 2003) ซึ่งในแต่ละช่วงนี้มีวิธีการคำนวณตำแหน่งของรถไฟที่แตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างทางลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) และหลักเหตุผลด้านความปลอดภัย (Safety) จึงมีการกำหนดความเร็วสูงสุดที่รถไฟสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้แตกต่างกันในแต่ละช่วงทาง เช่น ทางโค้ง (Curve หรือ Radius) ทางลาดชัน (Gradient) (วเรศรา, 2560) อย่างไรก็ตามการทำงานของรถไฟอาจจะมีการสลับโหมดทำงานไปมาได้ตามวัตถุประสงค์บางทีอาจจะกำหนดโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ของการเดินทางเป็นหลัก โดยปกติการเคลื่อนที่ของรถไฟจะเริ่มด้วยโหมดการเร่งในการเคลื่อนที่จากสถานี เมื่อเร่งจนถึงค่าความเร็วที่กำหนดก็จะเป็นเป็นโหมดการรักษาความเร็วคงที่ จนถึงจุดที่ตั้งไว้จะทำการแล่นด้วยความเฉื่อย และสุดท้ายเมื่อถึงระยะที่กำหนดก่อนเข้าสถานีรถไฟจะเข้าสู่โหมดเบรกเพื่อรับผู้โดยสารเป็นวัฏจักรการเคลื่อนที่ของรถไฟ ดังแสดงในรูป 3.5

1) โหมดการเร่ง

จะทำงานที่ระยะการออกตัวของรถไฟ และการรักษาความเร็วของรถไฟที่กรณีอยู่ต่ำกว่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้มอเตอร์รถลากจะดึงกระแสไฟฟ้าเพื่อที่จะสร้างแรงบิดทางกลเพื่อเอาชนะแรงบิดโหลดของรถไฟ

2) โหมดความเร็วคงที่

เมื่อรถไฟเร่งความเร็วจนถึงความเร็วที่ต้องการหรือที่ความเร็วสูงสุดแล้ว รถไฟจะเปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดเร่งความเร็วเป็นโหมดความเร็วคงที่ ในโหมดนี้อัตราเร่งของรถไฟจะมีค่าเป็นศูนย์ แรงบิดของรถไฟที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงต้านทานการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในโหมดนี้มีค่าน้อย

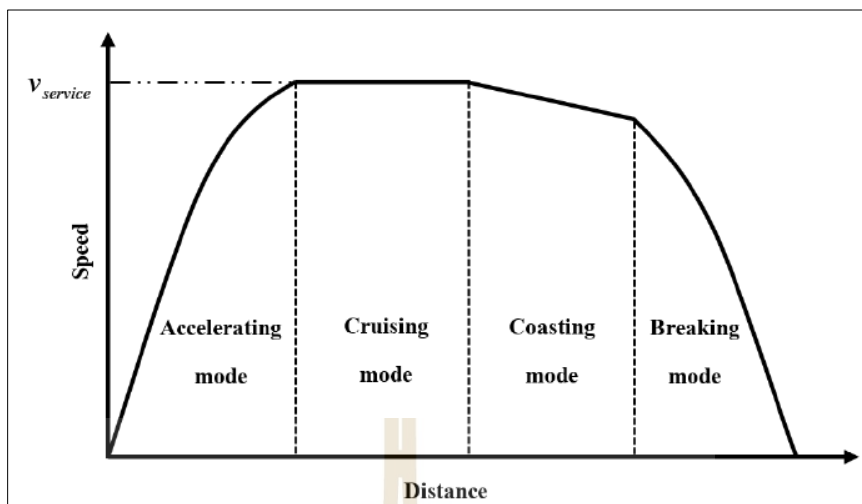
3) โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย

ในโหมดนี้จะไม่ใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าโดยมอเตอร์รถลากจะหมุนตามแรงเฉื่อยของรถไฟจึงส่งผลให้ความเร็วของรถไฟลดลง เนื่องจากผลรวมของแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟ

4) โหมดเบรก

โหมดที่ทำหน้าที่ชะลอความเร็วแบบจับปล้น ซึ่งมอเตอร์จะไม่ดึงพลังงานจากสถานีไฟฟ้าเช่นเดียวกับโหมดแล่น โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการเบรกจะต้องไม่เกินค่าแรงบิดสูงสุดของรถไฟ เพื่อป้องกันการลื่นไถลของล้อรถไฟ ในส่วนของโหมดการเบรก นั้น (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560) กล่าวเพิ่มเติมว่าการจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกก็ต่อเมื่อถึงความเร็วที่ต้องเบรกด้วยความเร่งเป็นลบ (α_{dec}) หรือถึงระยะที่จะต้องเบรก เรียกว่า ระยะวิกฤตการเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อจะเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยค่า CBD สามารถหาได้จากสมการที่ (3.11) แต่เพื่อให้การจอดที่สถานีผู้โดยสารมีความแม่นยำเมื่อพิจารณาผลของความชันและความโค้งของเส้นทางวิ่งก่อนถึงสถานีผู้โดยสาร จำเป็นต้องตรวจสอบระยะเบรกอีกครั้งก่อนจะเข้าสู่โหมดเบรกโดยการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟไปข้างหน้าเพื่อหาระยะเริ่มเบรกที่แม่นยำ

$$CBD = -0.5x \frac{v^2}{\alpha_{dec}} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.5 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

3.4 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่

จากที่กล่าวมาแล้วในการสร้างแรงจุดในแต่การทำงานต่าง ๆ ของโหมดการทำงานแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในจ่ายให้ต้นกำลังการสร้างแรงจุดเพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าซึ่งก็คือมอเตอร์ไฟฟ้า โดยจะแปรผันตามระดับความเร็วของรถไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า แอร์และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในขบวนรถไฟฟ้า จะคำนวณจากสมการ (3.12) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนก็เป็นหนึ่งในเงื่อนไขหลักที่ต้องนำมาคิดกำลังไฟฟ้าในการเคลื่อนที่

$$P_t = \frac{F_{TE} \times v}{\eta_t} + P_{aux} \quad (3.12)$$

โดยที่ P_t คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (kW)

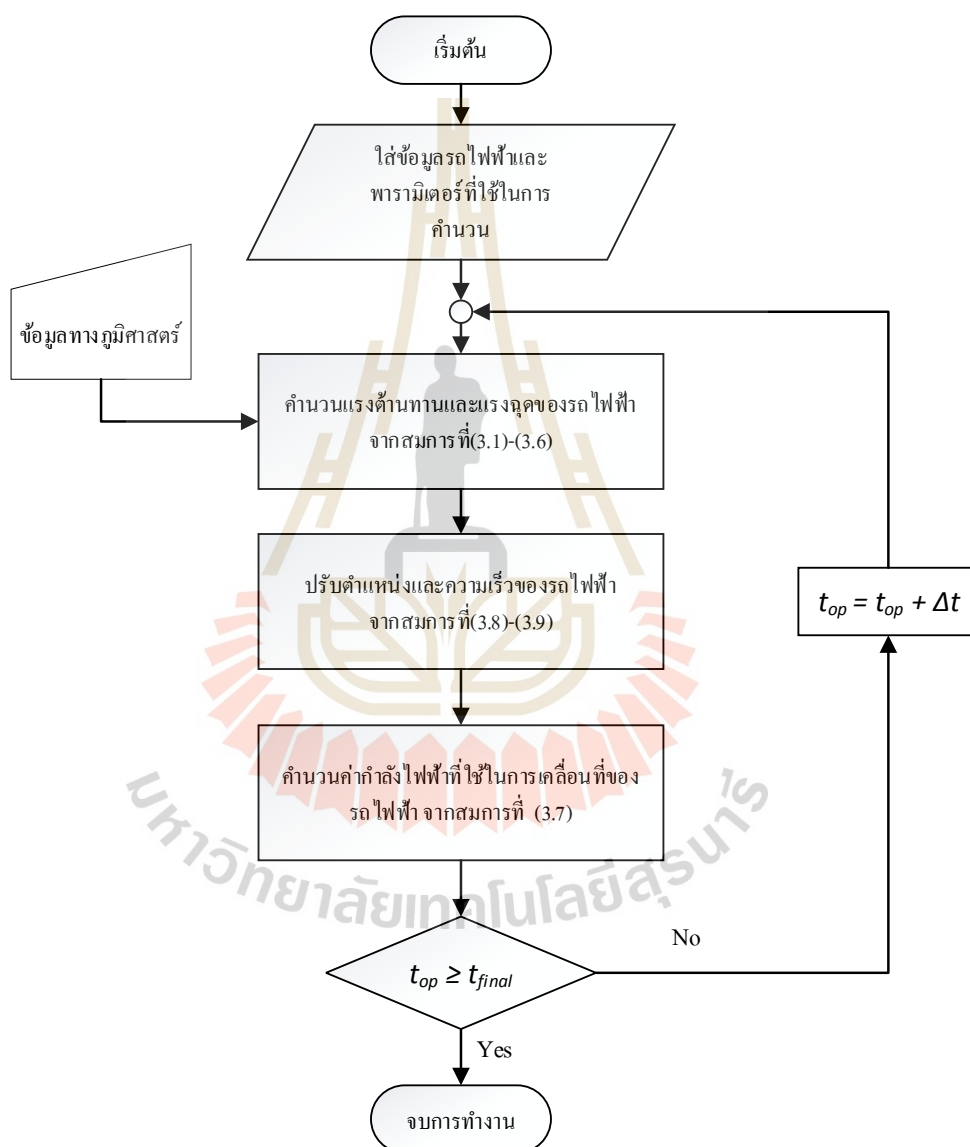
v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)

η_t คือ ประสิทธิภาพการส่งกำลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อน

รถไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาทั้งตำแหน่งและความเร็วในการหาค่าความเร็วและกำลังไฟฟ้าที่ใช้จึงจำเป็นนำมาคิดเทียบระหว่างก่อนและหลังการการปรับปรุง ตามสมการที่ (3.12 – 3.14)

$$v_i = v_i + at \quad (3.13)$$

$$s_i = s_i + v_i + \frac{1}{2} a\Delta t^2 \quad (3.14)$$

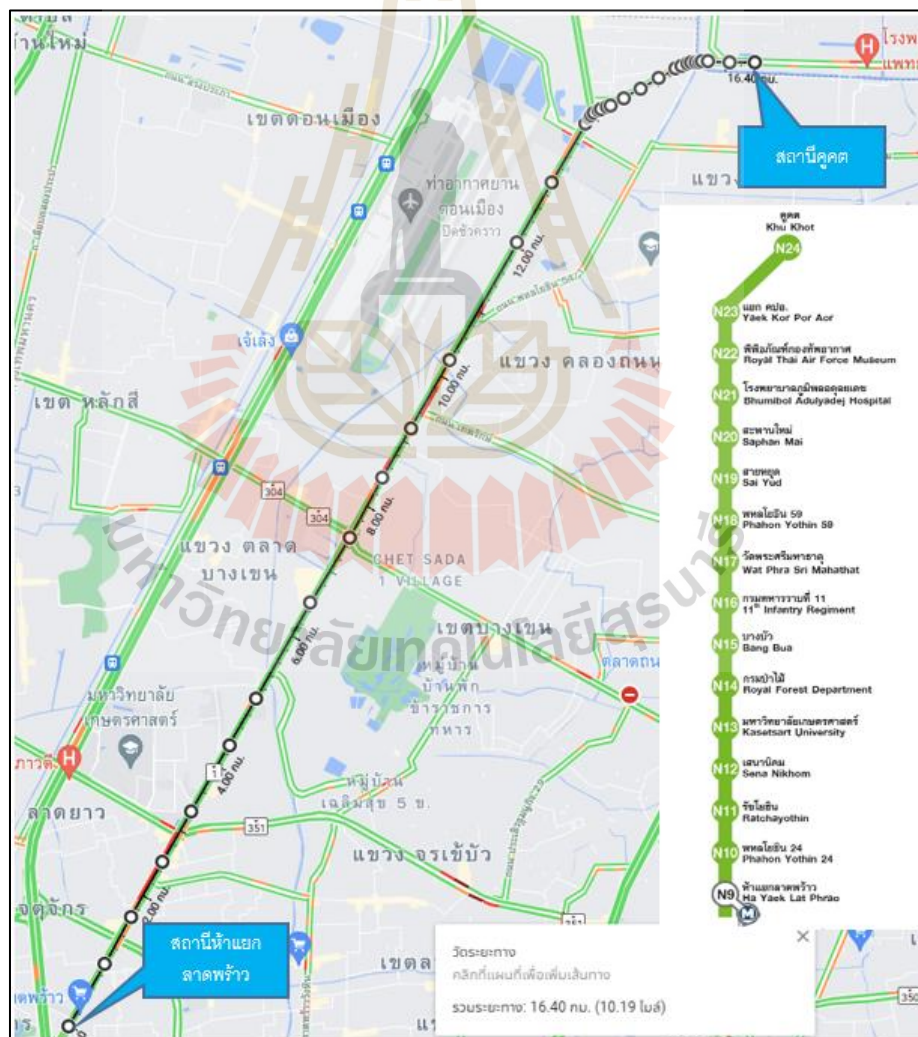


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมคำนวณการเคลื่อนที่รถไฟฟ้า

3.5 เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากลุ่มตัวอย่าง

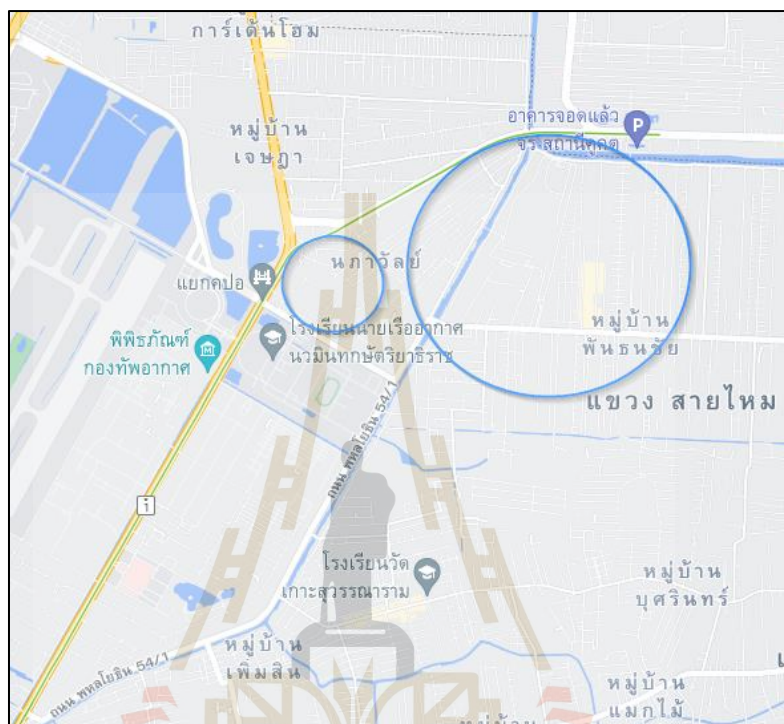
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต เป็นเส้นทางที่เพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการเดินทางของประชากรในเขตกรุงเทพมหานครต่อจากสถานีหมอชิตถึงปทุมธานีเขตคูคต แสดงเส้นทางการเดินรถไฟฟ้า และตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดชื่อ รหัส และระยะทางในแต่ละสถานี

1. รถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต ในช่วงส่วนต่อขยายมีสถานีรับส่งผู้โดยสาร 16 สถานี เนื่องจากผู้วิจัยนั้นไม่มีข้อมูลเชิงเทคนิคของแผนผังการสร้างและระยะทางที่แน่นอนจึงใช้วิธีการวัดระยะทางอย่างง่ายจากการใช้เว็บไซต์ Google map เพื่ออ้างอิงตำแหน่งสถานี ดังรูปที่ 3.7



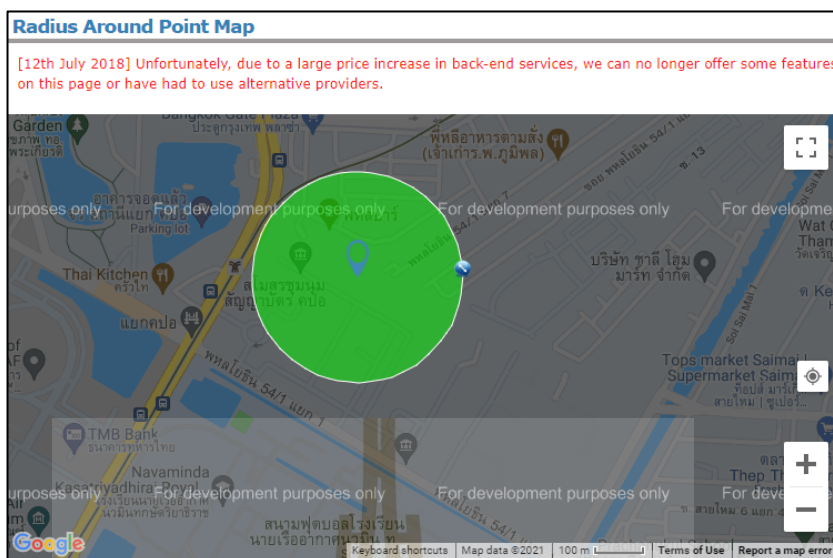
รูปที่ 3.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้เว็บไซต์ Google Map

2. รัศมีความโค้งเพื่อหาแรงต้านทางในขณะที่รถไฟเดินทางผ่านเส้นโค้งจะใช้ Google Map ในการวัดระยะทางร่วมกับเว็บไซต์ Freemaptools.com เพื่อสร้างไฟล์ KML เลเยอร์แสดงพิกัด Latitude และ Longitude ของรัศมีความโค้งบนโปรแกรม Google Earth แสดงในรูปที่ 3.8 – 3.9



รูปที่ 3.8 การตีวงรัศมีความโค้งบนเว็บไซต์ Google Map

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

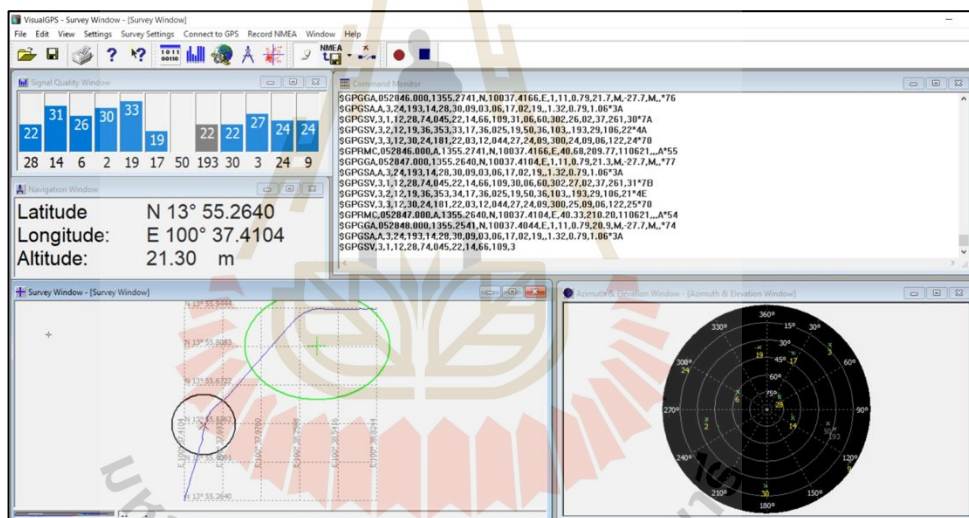


รูปที่ 3.9 การตีวงรัศมีวงกลมบนเว็บไซต์ Freemaptool.com

3. การเก็บข้อมูลจากการวัด เก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจริงโดยการนั่งรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต ในการวัดโดยเริ่มต้นจากสถานีห้าแยกลาดพร้าวไปจนถึงสถานีคูคต ตลอดช่วงส่วนต่อขยายมีสถานีรับส่งผู้โดยสาร 16 สถานี โดยใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Skylab GPS module รุ่น SKM55 รูปที่ 3.10 ข้อมูลจำเพาะตามตารางที่ 3.6 และใช้งานกับโปรแกรม VisualGPS ดังรูปที่ 3.11 พร้อมด้วย Notebook Lenovo รุ่น Touch PAD ซึ่งการเก็บข้อมูลนี้จะเป็นข้อมูลที่รับจากอุปกรณ์ผ่านพอร์ตอนุกรมชนิดรูปแบบโปรโตคอลของ (Nation Maritime Electronics Association: NMEA) เป็นมาตรฐานโดยรูปแบบของข้อมูลที่รับจากเครื่องรับคือ NMEA 0183 ที่บอกตำแหน่งในทางละติจูด ลองจิจูด ความสูง (3 เมตร) และความเร็วของอากาศยาน



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ Skylab GPS module รุ่น SKM55



รูปที่ 3.11 หน้าต่างโปรแกรม VisualGPS

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของ GPS Module รุ่น SKE55

Parameter	Specification	
	GPS receiver	
Receive type	L1 frequency band, C/A code, 22 Tracking/ 66 Acquisition-Channel	
Sensitivity	Tracking	-165 dBm
	Acquisition	-148 dBm
Acquisition Time	Cold Star	32s
	Warm Star	23s
	Hot Star	1s
	Re-Acquisition	< 1s
Power Consumption	Tracking	30 mA @3.3 Typical
	Acquisition	35 mA @3.3V
Navigator Data Update Rate	1 Hz	
Operational Limit	Altitude	Max 18,000m
	Velocity	Max 515m/s
	Acceleration	Less than 4g

ที่มา: (SKYLAB M&C Technology Co., Ltd)

3.6 การแปลงข้อมูล NMEA ที่ได้จากการวัด

ระบบบอกพิกัดด้วยดาวเทียม GPS (Global Positioning System) เป็นระบบบอกตำแหน่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในงานด้านการสำรวจ การนำร่องอากาศยาน (Navigation System) การกู้ภัย และงานด้านอื่น ๆ อีกมากมาย ข้อดีของระบบนี้ คือ มีความแม่นยำสูง ใช้ได้ครอบคลุมทั่วโลก เครื่องรับมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีราคาถูกลง (ปภัสสร, 2558)

การอ่านค่าข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ จีพีเอสผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port) เราจะใช้มาตรฐานของ NMEA (The National Marine Electronics Association) เป็นมาตรฐานในการอ่านข้อมูล ซึ่ง NMEA เป็นมาตรฐานที่ยอมรับในการส่งข้อมูล Marine Electronics ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ข้อมูลที่เครื่องรับสัญญาณ จีพีเอสส่งมาจะประกอบด้วย PVT (Position, Velocity, Time) ซึ่งข้อมูลที่ส่งมาจะมีลักษณะเป็นไลน์เรียกว่า ประโยคมาตรฐาน แต่ละประโยคจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์แต่ละรุ่นหรือบริษัท แต่จะมีลักษณะที่เป็นมาตรฐานของ NMEA และ

ทุก ๆ ประโยค NMEA จะต้องมีอักษรขึ้นต้นเป็นการกำหนดชนิดของประโยค NMEA สำหรับเครื่องรับจีพีเอสจะมีอักษรขึ้นต้นด้วย GP อื่น

NMEA Sentence คำขึ้นต้นของประโยค NMEA คือชนิดของข้อมูลเพื่อกำหนดส่วนอื่นของประโยค NMEA โดยแต่ละชนิดของข้อมูลจะถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ NMEA เช่นประโยค GGA จะใช้ในการ เจาะจงข้อมูลที่สำคัญเช่นพิกัดของจีพีเอสโมดูล ในประโยคอื่น ๆ อาจจะมีการบอกข้อมูลในลักษณะคล้าย ๆ กัน ชนิดข้อมูลของประโยค NMEA ในจีพีเอสโมดูลที่สำคัญในส่วนที่นำไปใช้กับการวิจัยมีดังนี้

GGA = ข้อมูลเหนือระดับน้ำทะเล

RMC = ข้อมูลความเร็ว

การแปลง NMEA0183 จะใช้ข้อมูลที่จำเป็นต่องานวิจัยนี้คือ GGA ข้อมูลเวลาและระดับความสูงจากน้ำทะเลเพื่อเอาไปคำนวณหาค่าความชันหรือเกรเดียนต์ (Gradient) กับข้อมูลเวลา ข้อมูล RMC จะใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ เพื่อนำมาเปรียบกับการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

3.7 สรุป

ในบทนี้นำเสนอแผนผังการดำเนินงาน ทฤษฎีที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองของรถไฟฟ้าจำนวนหนึ่งขบวน และรูปแบบการเก็บข้อมูลที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากการวัดจริงโดยการนั่งรถไฟฟ้า วิธีการแปลงข้อมูล GPS ด้วย NMEA โปรโตคอลออกมาเพื่อตีความค่าที่ได้รับมาจากการเก็บข้อมูลรวมถึงการใช้เว็บไซต์ Google map ที่พัฒนาได้อย่างทันสมัยมีฟังก์ชันการวัดระยะทางและการหาค่ารัศมีความโค้งบนเว็บไซต์ Freemaptool.com ในเส้นทางการเดินทางของรถไฟฟ้า เพื่อหาแรงต้านทานความโค้ง สุดท้ายนี้จากการดำเนินงานสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้กับแบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าได้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 บทนำ

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้องใช้ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของรถไฟฟ้าชนิดนั้นมาเป็นพารามิเตอร์ในการคำนวณแรงการเคลื่อนที่ ส่วนแรงต้านทานนั้นจะอาศัยข้อมูลจากลักษณะความชันเส้นทางของรางวิ่งที่เปลี่ยนไปตามภูมิประเทศบริเวณนั้นรวมถึงรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนไปตามเส้นทางการเดินทางรวมถึงนำทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 3 มาประกอบการจำลองผล ในบทนี้ผู้ทำวิจัยนำเสนอชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาจำลองผล ซึ่งมีข้อมูลที่ได้ไปเก็บจากกลุ่มตัวอย่าง อาทิเช่น ข้อมูลความชันของเส้นทางราง ข้อมูลความเร็วสูงสุดของการใช้บริการในช่วงเส้นทางกลุ่มตัวอย่าง ตำแหน่งของรถไฟฟ้า และเทคนิคการหาข้อมูลรัศมีความโค้ง รวมถึงข้อมูลอื่น ๆ เพื่อนำมาประกอบการทดสอบโปรแกรมจำลองผลเปรียบเทียบระหว่างค่าที่เก็บจากกลุ่มตัวอย่างกับค่าจากการจำลองผลกรณีฐาน

4.2 ทดสอบแบบจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่นั้นต้องทำการใส่ค่าที่จำเป็นโดยอ้างอิงตามตารางที่ 4.1 ในเรื่องของน้ำหนักและแรงต้านทางของรถไฟฟ้ายังมีพารามิเตอร์ข้อมูลจำเพาะ และข้อกำหนดทางรถไฟฟ้าอ้างอิงตามตารางที่ 4.2 เพื่อนำมาใช้ประกอบการคำนวณแรงจุดลาก ความเร็ว และข้อมูลอื่น ๆ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลด้านแบบจำลองรถไฟ

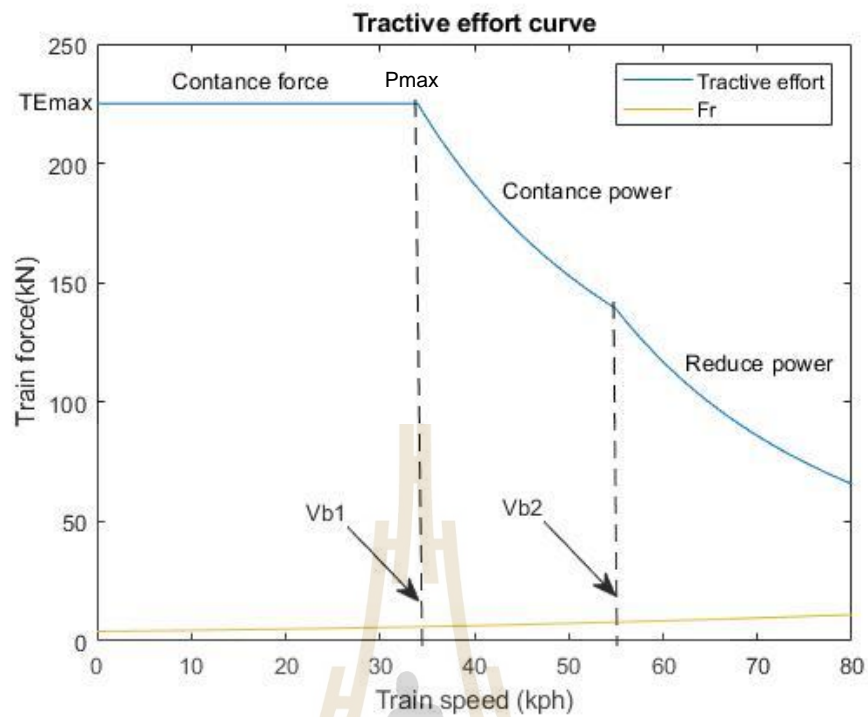
List	Unit	Value
Weight		
Tare weight	ton	153
Pay load		
AW1	ton	10
AW2	ton	50
AW3	ton	75
AW4	ton	85
Resistance Equation		
Rolling	kN	David formula $F= A+Bv+Cv^2$
A		4025
B		1.1867
C		0.8710

ที่มา (ชนัดชัย, 2561; ชัยยุทธ, 2560; Kampeerawat, 2017)

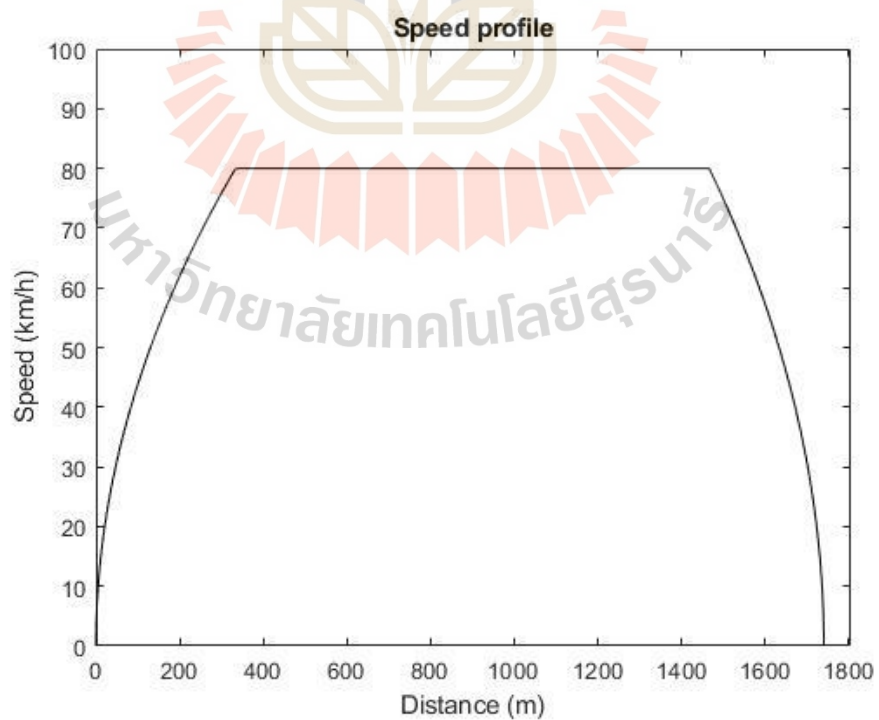
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลด้านกำลังขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

List	Unit	Value
Movement feature		
Max. Velocity	kph	80
Base. speed 1	kph	34
Base. speed 2	kph	56
Max. Acceleration	m/s ²	0.87
Max. Deceleration	m/s ²	-1.0
Efficiency		
Gear		0.98%
Motor		0.88%
Inverter		0.98%
Power. auxiliary	kW	270
Tractive Effort		
A	kN	225
B	kN	131
C	kN	64.5

ที่มา (ธนัชชัย, 2561; ชัยยุทธ์, 2560; Kampeerawat, 2017)



รูปที่ 4.1 กราฟแรงกดลากขบวนรถไฟและแรงต้านรถไฟสายสุขุมวิท



รูปที่ 4.2 กราฟโครงร่างความเร็วขบวนรถไฟในหนึ่งวัฏจักร

จากรูปที่ 4.1 กล่าวถึงกราฟคุณลักษณะแรงฉุดลากของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนบีทีเอสสาย สุขุมวิท โดยอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากตาราง 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงฉุดลากรถไฟฟ้าจะแปรผันตามค่าความเร็ว การฉุดกำลังสูงสุดจะเกิดขึ้นที่การเริ่มการเคลื่อนที่จนเข้าสู่ความเร็วฐาน แรงฉุดจะลดระดับลงมาเข้าสู่ย่านกำลังงานคงที่และเมื่อเข้าสู่ความเร็วสูงสุดจะเข้าสู่ย่านลดระดับกับกำลังงาน ส่วนรูปที่ 4.2 เป็นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าในหนึ่งวัฏจักรการเดินทางโดยแสดงการทำงานที่สอดคล้องกับรูปที่ 4.1 โดยเริ่มต้นการเดินทางจะเริ่มด้วยโหมดความเร่งจนถึงความเร็วสูงสุด จะเข้าสู่โหมดรักษาความเร็วคงที่จนกระทั่งเข้าสู่ระยะสุดท้ายคือโหมดการเบรกลักษณะกราฟความเร็วจะลดลงจนถึงค่าศูนย์เมื่อเข้าสู่จุดหมายการเดินทาง

4.3 เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากลุ่มตัวอย่าง

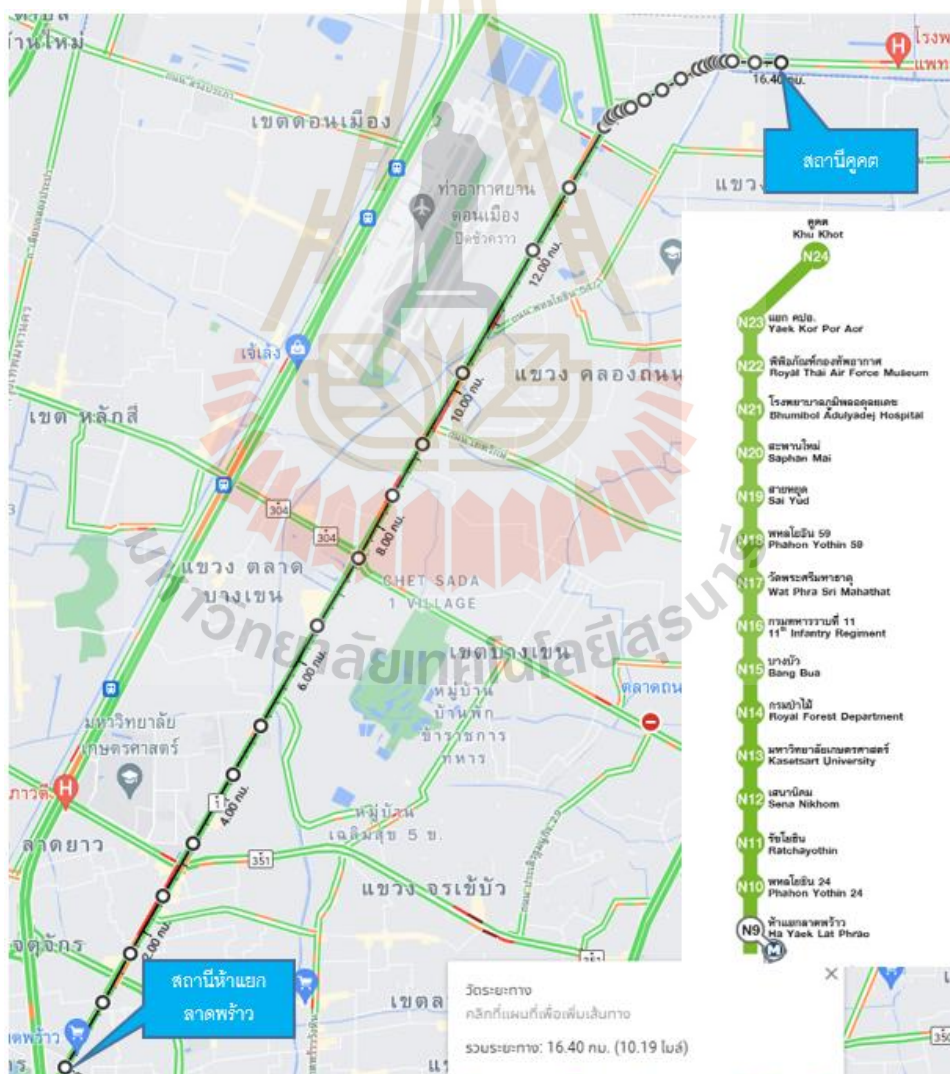
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต เป็นเส้นทางที่เพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการเดินทางของประชากรในเขตกรุงเทพมหานครต่อจากสถานีห้าแยกลาดพร้าวถึงเขตปทุมธานี คูคต ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยนำมาเป็นแนวทางการวิจัย ซึ่งแสดงเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าแต่ละสถานีทั้ง 16 สถานี ตามตารางที่ 4.1 รายละเอียดของชื่อ รหัสและระยะห่างระหว่างสถานีในแต่ละสถานี ระยะทางรวมที่ใช้เครื่องมือวัดระยะความยาวของเว็บไซต์ Google Map วัดผลดังกล่าวได้รวม 16.4 กิโลเมตร

ตารางที่ 4.3 ชื่อ รหัส และระยะทางระหว่างสถานีของรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต

Station code	Station name	Position
N9	Ha Yaek Lat Phrao	0
N10	Phahon Yothin 24	0.97
N11	Ratchayothin	1.68
N12	Sena Nikhom	2.55
N13	Kasetsart University	3.3
N14	Royal Forest Department	4.3
N15	Bang Bua	5
N16	11 th Infantry Regiment	6.52
N17	Wat Phra Sri Mahathat	7.54
N18	Phahon Yothin 59	8.45

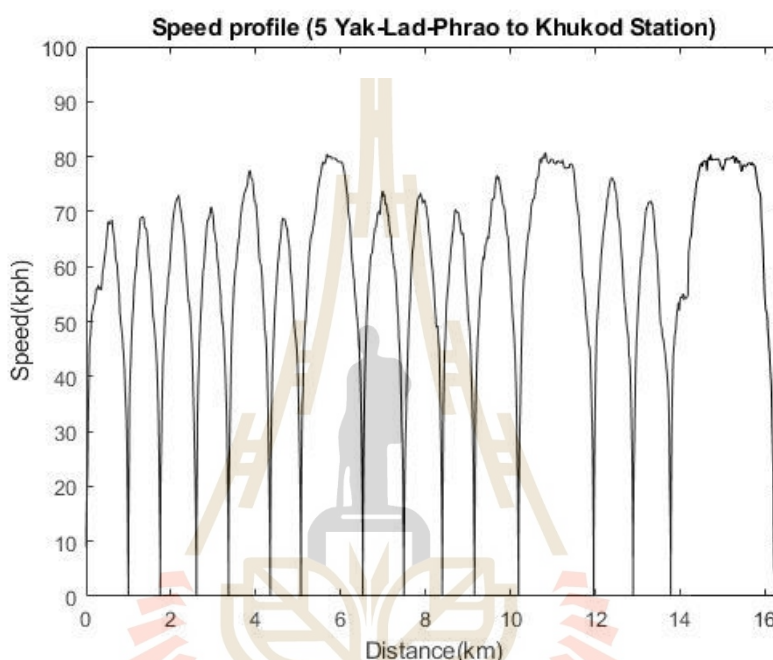
ตารางที่ 4.3 ชื่อ รหัส และระยะทางระหว่างสถานีของรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ)
ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ กู้ด (ต่อ)

Station code	Station name	Position
N19	Sai Yud	9.2
N20	Saphan Mai	10.26
N21	BhumibolAdulyadej Hospital	12
N22	Royal Thai Air Force Museum	13
N23	Yaek Kor Por Aor	13.9
N24	Khu khot	16.4



รูปที่ 4.3 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้เว็บไซต์ Google Map

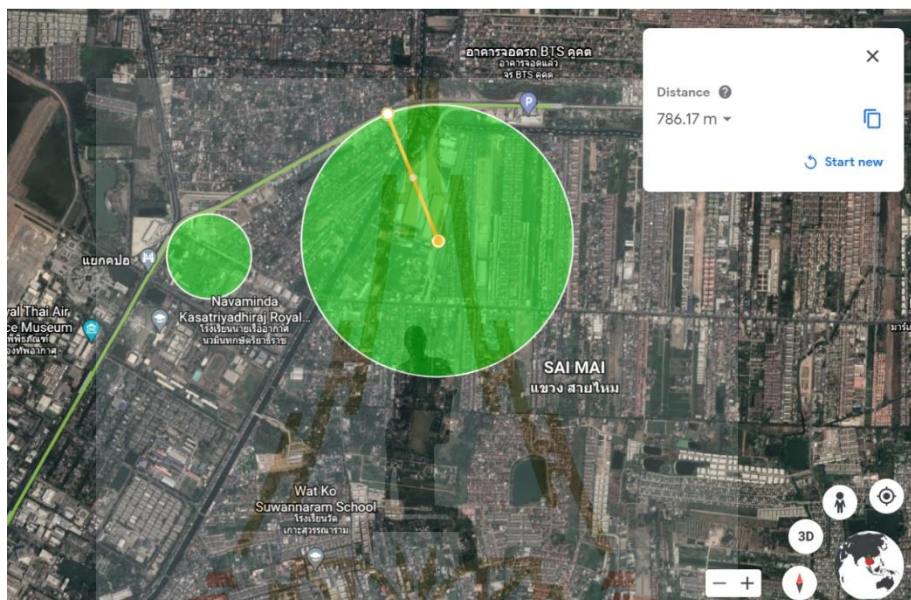
รถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิท (เหนือ) ช่วงหมอชิต สะพานใหม่ คูคต ในช่วงส่วนต่อขยายมีสถานีรับส่งผู้โดยสาร 16 สถานี รวมเป็นระยะทาง 16.4 กิโลเมตร เนื่องจากผู้วิจัยนั้นไม่มีข้อมูลเชิงเทคนิคของแผนผังการสร้างและระยะทางที่แน่นอนจึงใช้วิธีการวัดระยะทาง โดยใช้เครื่องมือจากการใช้เว็บไซต์ Google map เพื่ออ้างอิงตำแหน่งสถานี ดังรูปที่ 4.3 สำหรับนำข้อมูลระยะทางมาใช้ในการวิจัย



รูปที่ 4.4 โครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัด

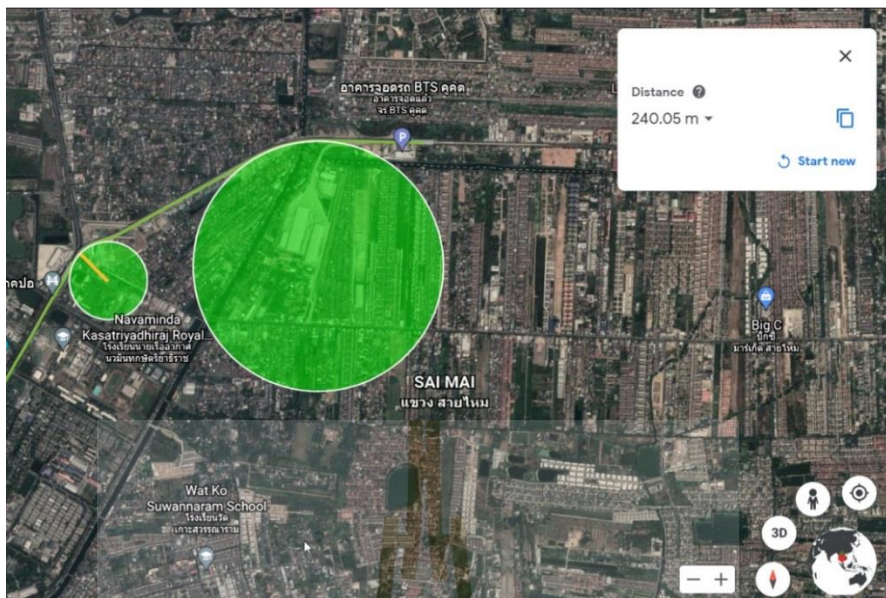
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงเส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทที่วิ่งออกจากสถานีห้าแยกลาดพร้าวจนถึงสถานีคูคต โดยใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Skylab GPS module รุ่น SKM55 ในการเก็บข้อมูลนี้จะเป็นข้อมูลที่รับจากอุปกรณ์ผ่านพอร์ตอนุกรมชนิดรูปแบบโปรโตคอลของ (Nation Maritime Electronics Association: NMEA) เป็นมาตรฐาน โดยรูปแบบของข้อมูลที่รับจากเครื่องรับ คือ NMEA 0183 ที่บอกตำแหน่งในทางละติจูด ลองติจูด ความสูง (3 มิติ) และความเร็วของอากาศยาน ซึ่งทำการแปลงออกมาแล้วจะเห็นได้ว่าจะมีย่านความเร็วอยู่สองย่านคือที่ความเร็วสูงสุด 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ระยะทางระหว่างสถานีไม่เกิน 1 กิโลเมตร กับย่านความเร็วสูงสุดที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเมื่อระยะห่างระหว่างสถานีมากกว่า 1 กิโลเมตร ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเป็นการจัดการระบบการเดินรถของรถไฟฟ้าสายดังกล่าวไว้

การหารัศมีความโค้งเพื่อหาแรงต้านทางในขณะที่รถไฟเดินทางผ่านเส้นโค้งดำเนินการโดยใช้ Google Map ในการวัดระยะทางร่วมกับเว็บไซต์ Freemaptools.com เพื่อสร้างไฟล์ KML เกลเซอร์แสดงพิกัด Latitude และ Longitude ของรัศมีความโค้งบนโปรแกรม Google Earth free software แสดงในรูปแบบที่ 4.3 - 4.4 จากการวัดระยะได้รัศมีความโค้งแสดงดังตารางที่ 4.2 แรงต้านหนีศูนย์กลางระหว่างการเดินทางที่แสดงในรูปแบบที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รัศมีความโค้งที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Google Earth

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

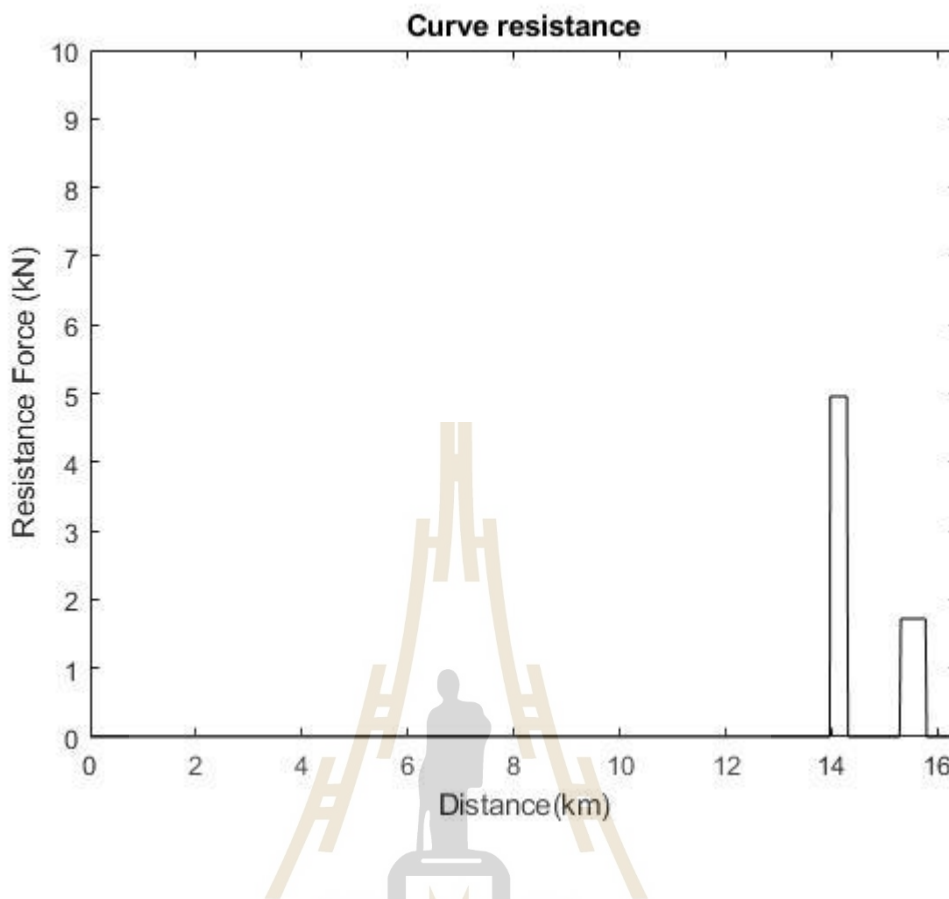


รูปที่ 4.6 รัศมีความโค้งที่ 2 โดยใช้โปรแกรม Google Earth

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นถึงรัศมีของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท ซึ่งเส้นทางโค้งดังกล่าวจะอยู่ระหว่างสถานีคูคตกับสถานีแยก คปอ. ข้อมูลระยะเริ่มต้นจนถึงระยะสิ้นสุดและรัศมีความโค้งแสดงในตารางที่ 4.4 สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.9 - 3.10 ได้แรงต้านหนีศูนย์กลางดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 รัศมีความโค้งของเส้นทางรถไฟฟ้าบีทีเอส

ระยะทางเริ่มต้น (m)	ระยะสิ้นสุด (m)	รัศมี (m)
0	13985.1	0
13986.2	14282.3	240.05
14283.4	15261.4	0
15262.5	15775.1	786.17
15776.2	16401	0



รูปที่ 4.7 แรงต้านหนีสุนัขกลางการ โค้งของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)

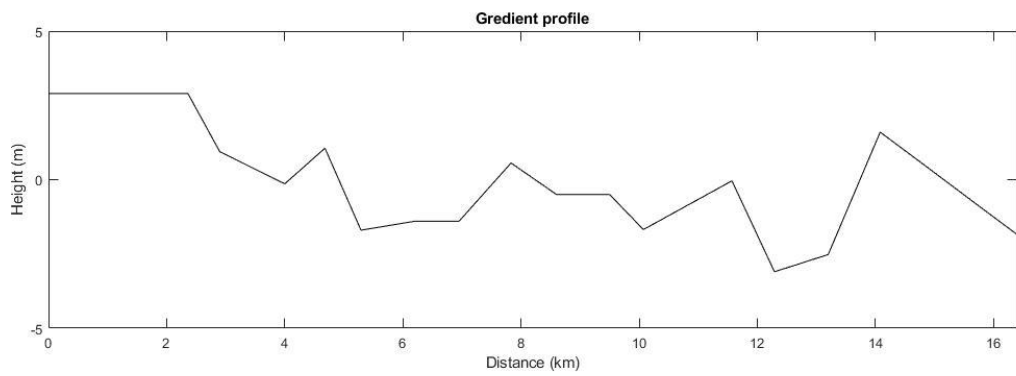
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงค่าแรงต้านการหนีสุนัขการของขบวนรถไฟฟ้าที่กระทำ ณ จุดดังกล่าวในขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่คำนวณจากสมการของ Roeckl's formula ที่ 3.9-3.10 ซึ่งสองจุดดังกล่าวที่แรงกระทำที่เพิ่มเข้ามาขนาดจุดแรกขนาด 4.95 กิโลนิวตัน ที่รัศมีความโค้งที่ 240.5 เมตร กับแรงกระทำที่จุดที่สองขนาด 1.76 กิโลนิวตัน ที่รัศมีความโค้ง 786.17 เมตร

การหาระดับความชันหรือเกรเดียนต์ของเส้นทางโดยทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจริงจากการนั่งรถไฟฟ้าบีทีเอสเริ่มต้นจากสถานีห้าแยกลาดพร้าวไปจนถึงสถานีคูคต ตลอดช่วงส่วนต่อขยายมีสถานีรับส่งผู้โดยสาร สถานี โดยใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Skylab GPS module รุ่น SKM55 ใช้งานร่วมกับโปรแกรม VisualGPS ได้ข้อมูลแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5

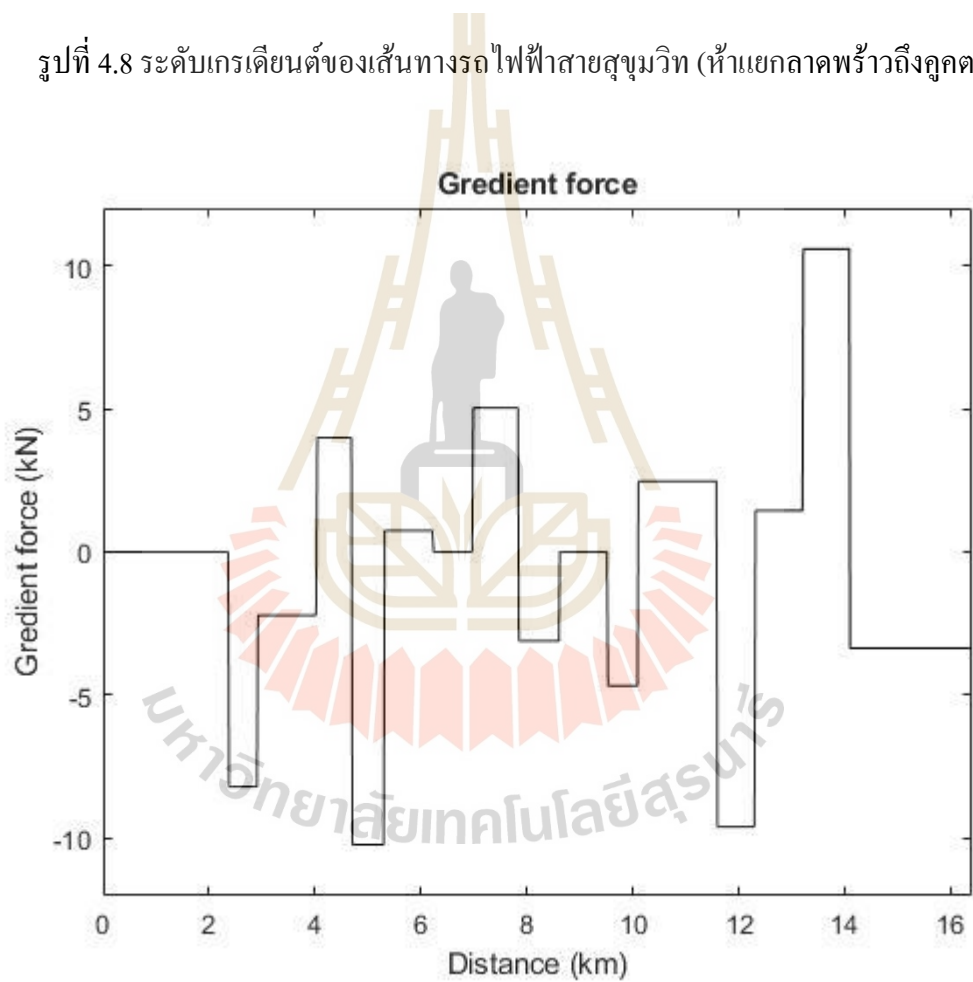
ตารางที่ 4.5 ค่าเกรเดียนต์ที่ได้จากการวัด

Gradient	ระยะทาง
-2	0
1.6	2442
-2.52	3300
-3.1	4210
-0.04	4930
-1.68	6430
-0.5	7000
-0.5	7900
-0.56	8670
-1.4	9550
-1.4	9660
-1.4	10300
-1.7	11210
1.06	11820
-0.14	12500
0.94	13600
2.9	14170
2.9	16500

จากตารางที่ 4.5 เมื่อได้ค่าเกรเดียนต์ของเส้นทางดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อนำมาคำนวณเพื่อหาแรงที่กระทำระหว่างการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ซึ่งแรงต้านดังกล่าวเมื่อกำหนดแรงต้านช่วงความชันดังกล่าวที่กระทำต่อขบวนรถไฟฟ้า จะได้ตามรูปที่ 4.9



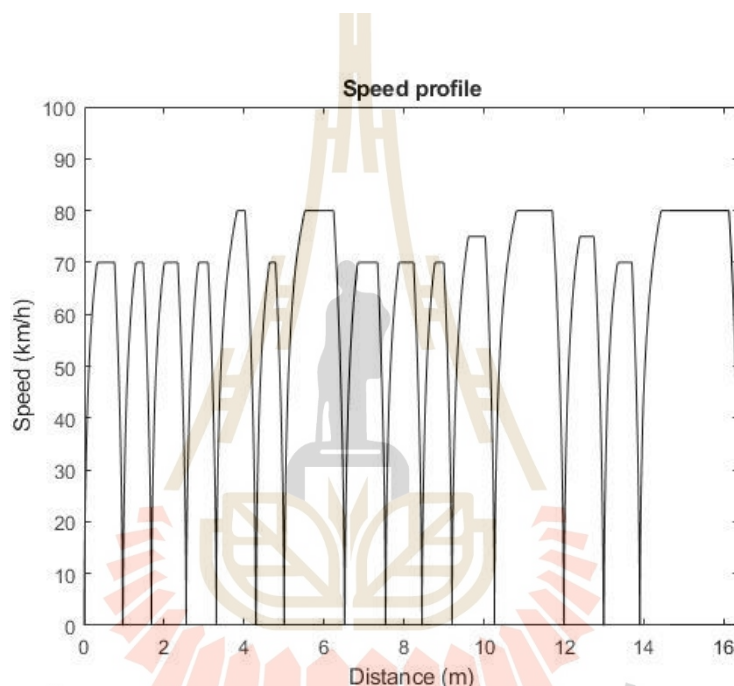
รูปที่ 4.8 ระดับกระเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)



รูปที่ 4.9 แรงต้านกระเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)

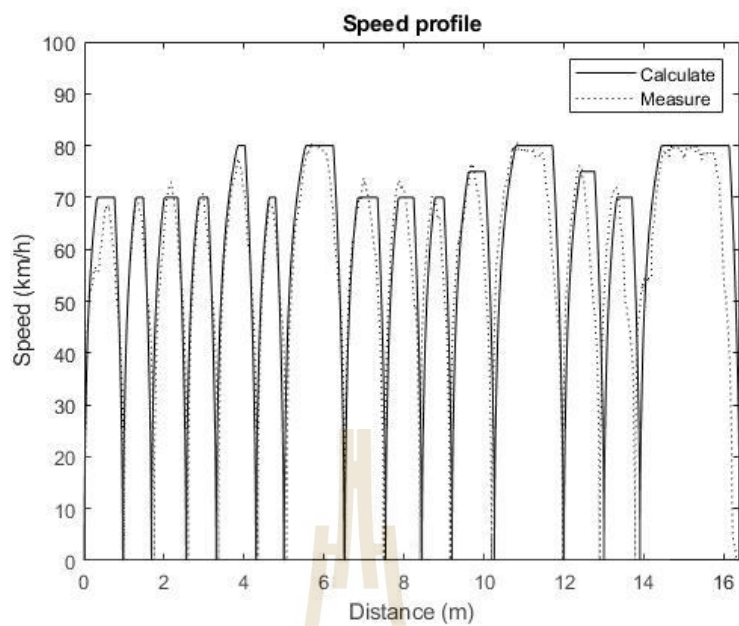
4.4 การทดสอบระหว่างข้อมูลการเคลื่อนที่รถไฟฟ้ากลุ่มตัวอย่างกับระบบจำลองผล

การทดสอบนี้วัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลการทำงานว่าผลที่ได้มาสอดคล้องกันกับผลที่เก็บมาจากกลุ่มตัวอย่างกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นการทดสอบ ในรูปที่ 4.6 แสดงถึงผลการทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น โดยนำมาเปรียบเทียบกับโครงร่างความเร็วที่เก็บข้อมูลมาได้ ในรูปที่ 4.4 จะนำมาเปรียบเทียบโครงร่างในส่วนของความเร็วกรณีฐานกับรูปที่ 4.10 ในส่วนของกรณีกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดนั้น จะนำมาคำนวณเพื่อให้ได้ค่ามาเปรียบดูการผลการทดสอบอัลกอริทึมของการจำลองผลการเคลื่อนที่ แสดงในรูปที่ 4.12

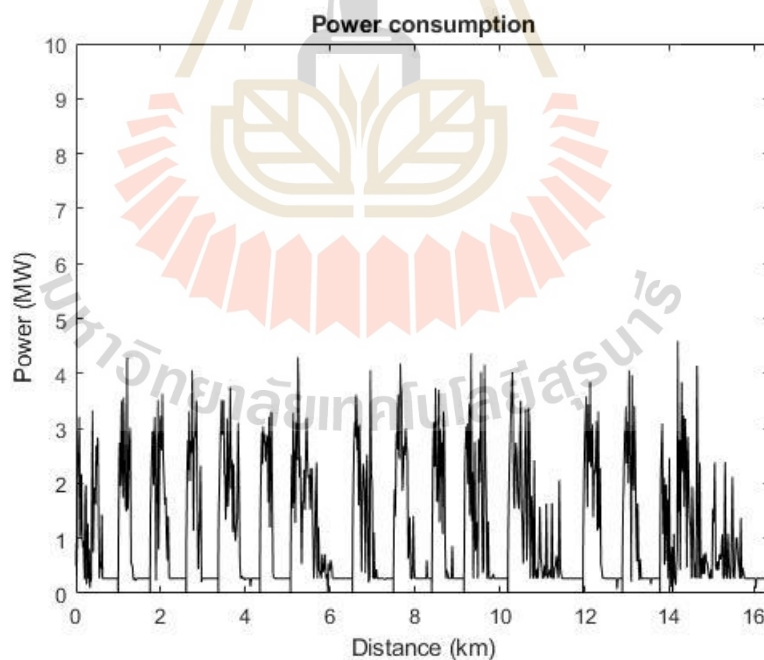


รูปที่ 4.10 แบบจำลอง โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)

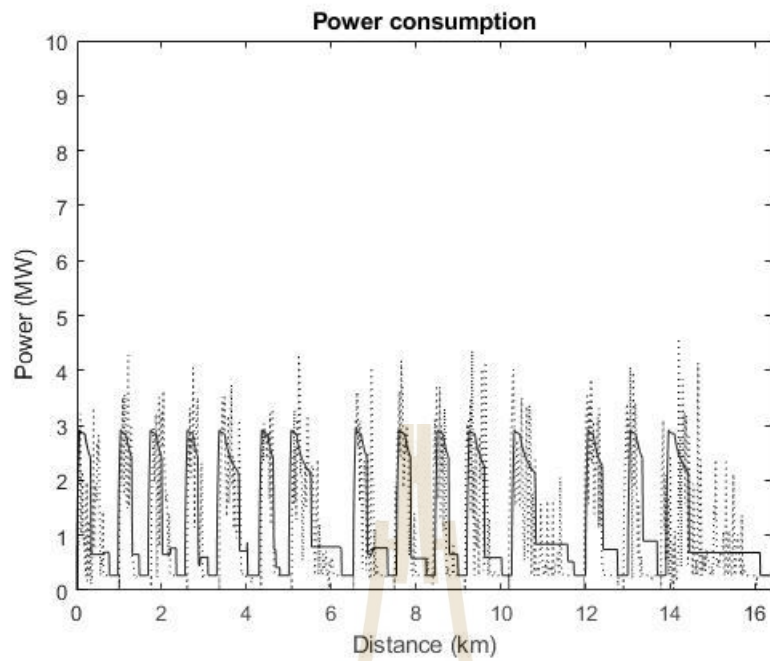
จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทที่เคลื่อนที่ในแต่ละสถานีทั้งหมด 16 สถานี ซึ่งสถานีที่มีระยะห่างระหว่างสถานีอยู่ที่ 1 กิโลเมตร หรือต่ำกว่าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 70 - 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนสถานีที่มีระยะห่างระหว่างสถานีมากกว่า 1 กิโลเมตรรถไฟฟ้าจะวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งความเร็วดังกล่าวนี้เป็นกลยุทธ์การเดินทางที่ทางรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนวางแผนไว้ ซึ่งทางผู้วิจัยได้นำเอาผลการเก็บค่าความเร็วมาจำลองจากอัลกอริทึมและทดสอบได้ผลออกมา ดังรูปที่ 4.10 ส่วนรูปที่ 4.11 แสดงถึงการเปรียบเทียบผลการเก็บข้อมูลเทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น



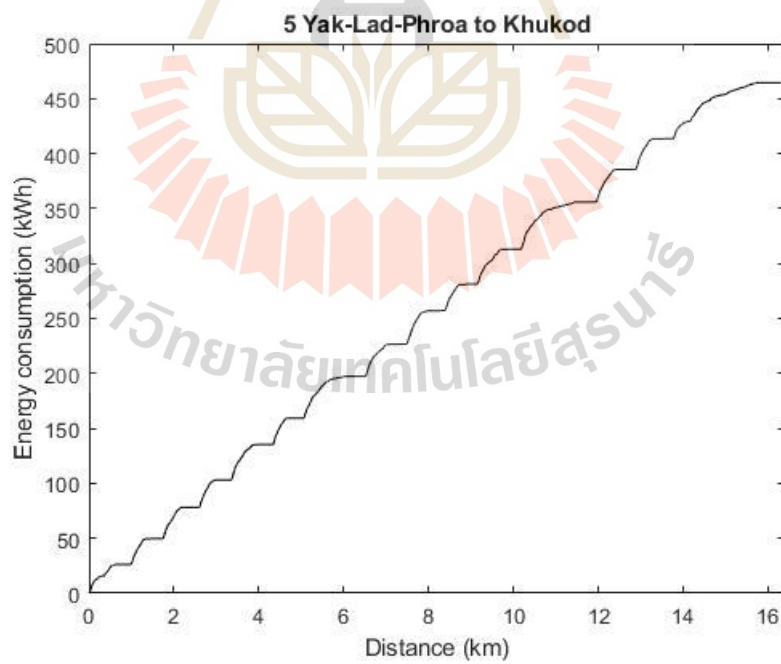
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลอง โครงร่างความเร็ว



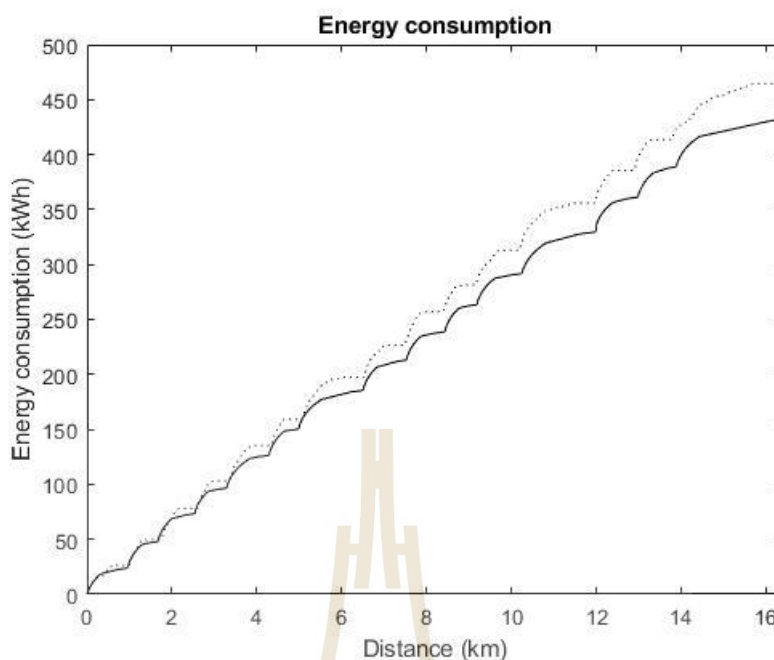
รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทางที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลองของกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.14 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทางที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบผลการวัดกับแบบจำลองของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

พารามิเตอร์	จำนวนจากการวัด	แบบจำลองที่พัฒนา	ความคลาดเคลื่อน (%)
พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh)	464.5	432.4	6.9%

จากการผลการเปรียบเทียบระหว่างการรันด้วยอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัด พบว่า เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดและทดสอบอัลกอริทึมยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ซึ่งเป็นผลจากอุปกรณ์การเก็บข้อมูล GPS Module รับส่งข้อมูลเกิดความไม่เสถียรระหว่างขณะเก็บข้อมูลการเดินทางของรถไฟฟ้าบีทีเอส ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีส่วนสำคัญในการหาคำตอบ โดยเฉพาะข้อมูลเกรเดียนต์และข้อมูลค่าความเร็ว ข้อมูลด้านเกรเดียนต์จะนำมาหาแรงต้านในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเนื่องจากผู้วิจัยไม่มีข้อมูลโครงสร้างของเส้นทางเดินรถไฟฟ้าส่วนดังกล่าวจึงต้องใช้การวัดเพื่อนำมาประกอบการจำลองผลการเคลื่อนที่ ในส่วนข้อมูลค่าความเร็ว นั้น ทางผู้วิจัยจะต้องนำมาขยายความเพื่อหาค่าความเร่ง แล้วนำไปใช้คำนวณค่าแรงจุดลากรถไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟารวมถึงค่าพลังงานสะสม ซึ่งค่าต่าง ๆ นั้น มีผลอย่างมากต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

ทั้งหมด ดังแสดงการเปรียบเทียบผลความคลาดเคลื่อนของโครงร่างความเร็ว รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบของกำลังไฟฟ้าที่ใช้และส่วนสุดท้ายจะเป็นผลของค่าพลังงานรวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ตามรูปที่ 4.13 และ 4.15 ตามลำดับ

การประเมินผลความถูกต้องของการแบบจำลองทางผู้วิจัยจะใช้ค่าพลังงานที่ได้จากการทดสอบการจำลองผลจากอัลกอริทึมเทียบกับการคำนวณผลที่ได้มากจากการเก็บข้อมูล ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนพลังงานสะสมที่ใช้ในการเดินทางอยู่ที่ 6.9% จากข้อมูลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความใกล้เคียงกันระหว่างแบบการจำลองผลที่พัฒนา กับผลของการเก็บข้อมูลจากการวัดจริง ดังนั้น ผู้วิจัยจะใช้แบบจำลองดังกล่าวเพื่อทำการวิจัยต่อไป

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการการเก็บข้อมูลจริง

พารามิเตอร์	พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh) เส้นทางที่ 1	พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh) เส้นทางที่ 2	พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh) เส้นทางที่ 3
กรณีฐาน (จากการจำลองผล)	27.72	29.75	34.56
กรณีเก็บข้อมูลจริง	26.51	27.92	32.71
ความคลาดเคลื่อน (%)	4.4%	6.15%	5.35%

ข้อมูลในตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างแบบจำลองผลที่พัฒนาขึ้นมา กับค่าที่เก็บจากการวัดจริงแล้วนำมาคำนวณผลของพลังงาน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดอยู่ที่ 4.4% ในเส้นทางที่ 1 ช่วงระหว่างสถานีบางบัวถึงสถานีกรมทหารราบที่ 11 จึงได้ใช้อัลกอริทึมการจำลองผลการเคลื่อนที่ดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบและจำลองผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าพลังงานในการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีที่ต่ำที่สุด

4.5 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการผลต่าง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิวัฒนาการ โดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ถูกคิดค้นและนำเสนอ โดย Storn, R. and Price, K. (1997) โดยอธิบายหลักการและกรอบแนวคิดว่า ทฤษฎีของวิธีที่เป็นรูปแบบที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนและมีเวลาในการคำนวณผลลัพธ์ที่น้อยลง ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงร่างความเร็วเพื่อหาจุดการเริ่มการแล่นด้วยความเฉื่อย

เป้าหมายคือการใช้พลังงานในการเดินทาง ซึ่งต้องมีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ถูกกำหนดใน สมการที่ 4.1 ซึ่งอ้างอิงข้อจำกัดของเวลาการเดินทางไฟฟ้าตามตารางที่ 3.4 – 3.5

โดยวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำอัลกอริทึมการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เนื่องจากโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่นำไปสู่การคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการเดินทางได้ และเป็นโปรแกรมพื้นฐานที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าในกรณีฐาน

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

Minimize

$$E = \sum_{i=1}^N P_i x \Delta t \quad (4.1)$$

Subject to

$$\alpha_{acc}^{\min} \leq \alpha_{acc} \leq \alpha_{acc}^{\max}$$

$$\alpha_{dec}^{\min} \leq \alpha_{dec} \leq \alpha_{dec}^{\max}$$

$$L_{coast}^{\min} \leq L_{coast} \leq L_{coast}^{\max}$$

โดยที่	α_{acc}^{\min}	และ	α_{acc}^{\max}	คือ	ขีดจำกัดของอัตราเร่ง
	α_{dec}^{\min}	และ	α_{dec}^{\max}	คือ	ขีดจำกัดของอัตราเบรก
	L_{coast}^{\max}	และ	L_{coast}^{\max}	คือ	ขีดจำกัดจุดเริ่มโหมดการแล่น
	$T \leq T_{trip}$			คือ	เงื่อนไขภายใต้เวลาที่กำหนด

4.5.1 ตัวแปรควบคุม

ตัวแปรควบคุมที่ผู้วิจัยนำเสนอสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้พลังงานต่ำที่สุดในการเดินทางสำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้ได้แก่ ตัวแปรอัตราเร่ง (Acceleration) ตัวแปรอัตราเบรก (Deceleration) และตัวแปรระยะการแล่นของรถไฟฟ้า (Coasting Distance)

จากการจำลองผลกรณีฐานซึ่งทำให้ได้ทราบว่าค่าพลังงานสะสมต่อการเดินทางตลอดเส้นทางระหว่างสถานีห้าแยกลาดพร้าวจนถึงสถานีคูคต มีค่า 432.4 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ดังนั้นใน

หัวข้อนี้จะทำการประยุกต์นำเอาเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีวิวัฒนาการเชิงผลต่างมาใช้ โดยมีเป้าหมายคือลดการใช้พลังงานในการเดินทางของรถไฟฟ้าในเส้นทางดังกล่าว

4.6 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

กรณีศึกษา การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการลดใช้พลังงาน โดยจะทดสอบที่ระยะห่างระหว่างสถานีรถไฟฟ้าที่มากกว่า 1 กิโลเมตรขึ้นไปและความเร็วสูงสุดที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้แก่

- (N15) สถานีบางบัว – (N16) สถานีกรมทหารราบที่ 11
- (N20) สถานีสะพานใหม่ – (N21) สถานีโรงพยาบาลภูมิพล
- (N23) สถานีแยก คปอ. – (N24) สถานีคูคต

กรณีศึกษาที่ 1 การปรับอัตราการเบรกเพื่อให้การใช้พลังงานต่ำที่สุด

กรณีศึกษาที่ 2 ทหาระยะการเริ่มโหมดการเล่นเพื่อให้การใช้พลังงานต่ำที่สุด

กรณีศึกษาที่ 3 การปรับอัตราเร่ง อัตราเบรก และระยะเริ่ม โหมดการเล่นเพื่อให้การใช้พลังงานต่ำที่สุด

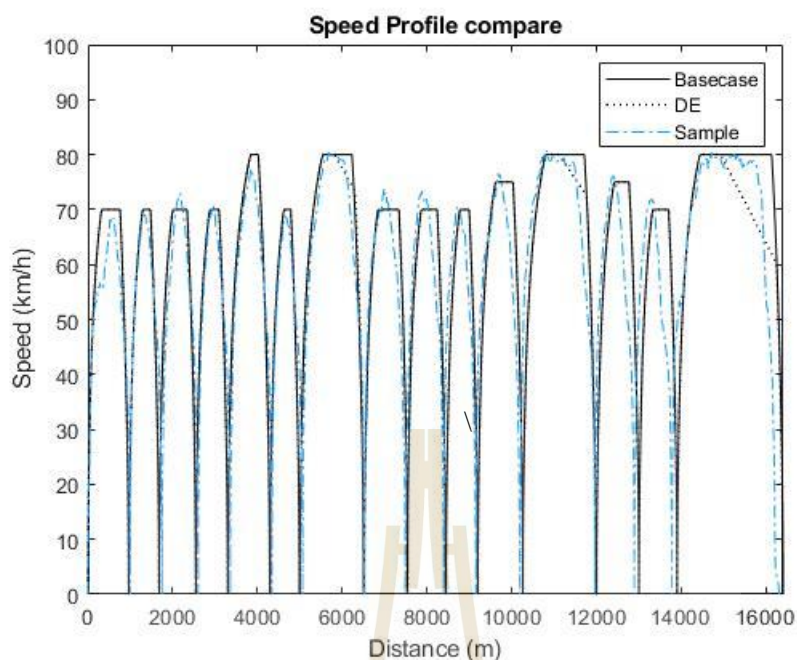
ตารางที่ 4.8 กรณีศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

กรณี	ตัวแปรควบคุม
ฐาน	ไม่มีตัวแปรควบคุม
1	α_{dec}
2	L_{coast}
3	$\alpha_{acc} + \alpha_{dec} + L_{coast}$

ตารางที่ 4.9 ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีวิวัฒนาการผลต่าง

ตัวแปร	กรณีฐาน	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3
อัตราเร่ง				
N15-N16	1	-	-	1
N20-N21	1			1
N23-N24	1			1
อัตราเบรก				
N15-N16	1	0.8168	-	0.979
N20-N21	1	0.8193		0.982
N23-N24	1	0.8085		0.983
จุดเริ่มการแล่น(เมตร)				
N15-N16	-	-	301.236	300.192
N20-N21			300.814	300.151
N23-N24			958.782	951.332
ค่าพลังงานที่ใช้ (kWh) (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์)				
N15-N16	27.72	27.24	23.269	23.191
N20-N21	29.75	29.56	24.553	24.268
N23-N24	34.56	34.36	30.75	28.37

จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นกลยุทธ์การควบคุมค่า อัตราเร่ง อัตราเบรก และระยะเริ่มโหมดการแล่นที่แบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาค่าดังกล่าวได้มาจากการประยุกต์การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีวิวัฒนาการโดยผลต่างเพื่อลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินทาง โดยสรุปพบว่ากรณีศึกษาที่ 2, 3 ที่ อัตราการเบรก และระยะเริ่ม โหมดการแล่นใช้ค่าพลังงานในการเดินทางต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 1 เนื่องจากจากระยะการแล่นที่มากขึ้นหรือน้อยลงนั้นส่งผลอย่างมากในการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการเดินทางเมื่อไม่ได้มีการเร่งเข้าไปอยู่ในช่วงดังกล่าว ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีฐานกับกรณีที่ 1 จะมีการรักษาระดับความเร็วให้อยู่ที่ระดับสูงสุดทำให้มีการใช้พลังงานในช่วงดังกล่าวมากกว่ากรณี ที่ 2 และ 3



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบโครงร่างความเร็วของสถานีที่ทำการหาค่าที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.10 สรุปความแตกต่างจากการหาค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกรณีฐาน

กรณีที่	N15-N16	N20-N21	N23-N24
ฐาน	27.72	29.75	34.56
1	27.24 [1.08%]	29.56 [0.63%]	34.36 [0.57%]
2	23.269 [16.05%]	24.553 [17.4%]	30.75 [11.02%]
3	23.191 [16.4%]	24.268 [18.42%]	28.37 [21.82%]

หมายเหตุ [x%] คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับกรณีฐาน

จากตารางที่ 4.10 พบว่ากรณีที่ควบคุมค่าอัตราการเบรก ระยะเริ่มต้นการแล่น ให้ผลการลดใช้พลังงานมากที่สุดตลอดทุกเส้นทาง 16.4% 18.42% และ 21.82% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับการควบคุมกรณีที่ศึกษาที่ 2 ที่ควบคุมเฉพาะระยะเริ่มต้นการแล่น จึงสามารถกล่าวได้ว่าการควบคุมระยะเริ่มโหมดการแล่นมีผลต่อการลดการใช้พลังงานมากที่สุด ส่วนการควบคุมอัตราการเบรกมีผลเป็น

ส่วนน้อยจากการทดลองพบว่าลดพลังงานที่ใช้ในการเดินทางมากที่สุดเพียง 0.73% ตลอดทุกเส้นทาง ฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า การประยุกต์ให้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้กำหนดระยะเวลาเริ่มโหมคแล่นเพื่อหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีต่ำที่สุดได้มากที่สุดถึง 21.82% ในเส้นทาง N23 – N24 ถึง 21.82%

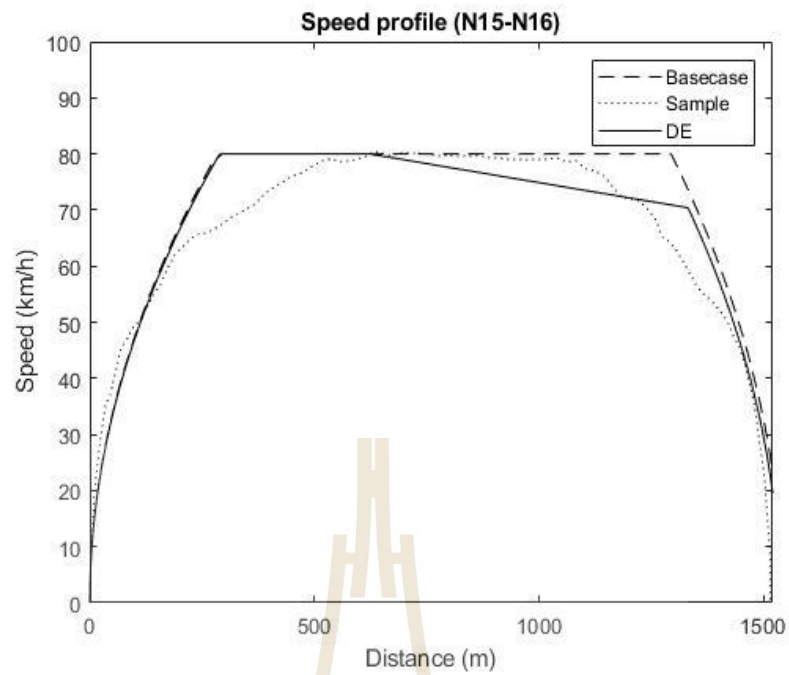
จากข้อมูลของตารางที่ 4.10 การหาค่าที่ดีที่สุดจากวิธีวิวัฒนาการพบว่ากรณีที่ 3 ที่ทำการหาค่าทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรอัตราเร่ง (Acceleration) ตัวแปรอัตราเบรก (Deceleration) และตัวแปรระยะการแล่นของรถไฟฟ้า (Coasting Distance) ได้ผลการหาพลังงานที่ใช้ในการเดินทางต่ำที่สุด ดังนั้น จึงได้เลือกใช้วิธีเชิงพันธุกรรมที่เป็นที่นิยมที่ใช้สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาพลังงานที่ต่ำที่สุดในเส้นทางดังแสดงผลในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบวิธีวิวัฒนาการผลต่างเมื่อเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรมภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

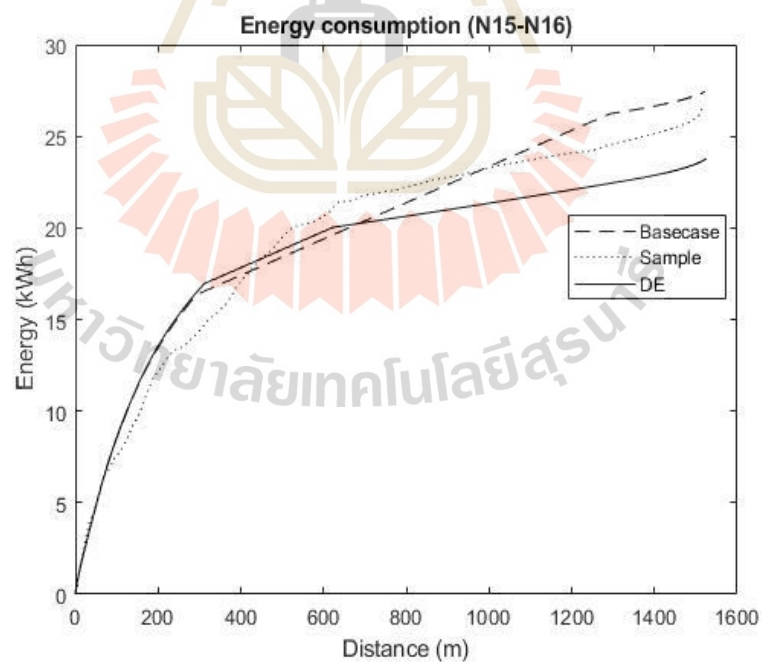
กรณีที่	N15-N16	N20-N21	N23-N24
ฐาน	27.72	29.75	34.56
วิวัฒนาการผลต่าง (DE)	23.191 [16.4%]	24.268 [18.42%]	28.37 [21.82%]
วิธีเชิงพันธุกรรม (GA)	23.281 [16.0%]	24.642 [17.17%]	28.37 [20.21%]
% ความแตกต่าง ระหว่าง DE และ GA	0.4%	1.25%	1.67%

หมายเหตุ [x%] คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับกรณีฐาน

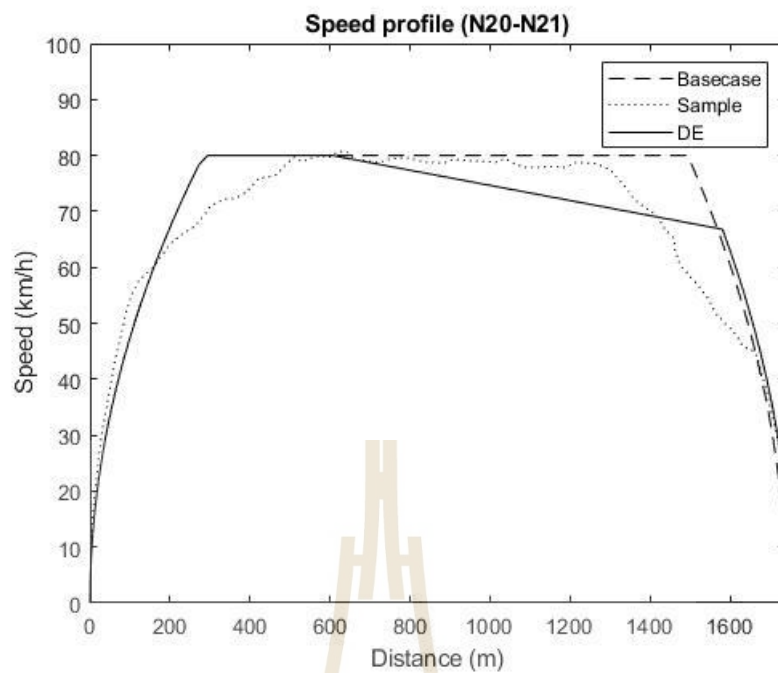
จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการหาค่าที่ต่ำที่สุดในการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีของวิธีวิวัฒนาการผลต่างที่ผู้วิจัยเลือกกับวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งเลือกทำการปรับค่าตัวแปรควบคุมทั้ง 3 ตัวแปร อันได้แก่ ตัวแปรอัตราเร่ง (Acceleration) ตัวแปรอัตราเบรก (Deceleration) และตัวแปรระยะการแล่นของรถไฟฟ้า (Coasting Distance) ที่ได้ผลจากตารางที่ 4.9 เมื่อเทียบกันแล้วพบว่าวิธีวิวัฒนาการผลต่างสามารถหาค่าการใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด โดยเส้นทางที่ 1 อยู่ที่ 0.4% เส้นทางที่ 2 อยู่ที่ 1.25% และเส้นทางที่ 3 อยู่ที่ 1.67% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีวิวัฒนาการผลต่างที่ดำเนินการค้นหาหาค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้การเดินทางทั้งสามเส้นทางได้ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งลักษณะโครงสร้างความเร็วรวมถึงพลังงานในการเคลื่อนที่ แสดงในรูปแบบที่ 4.17-4.22



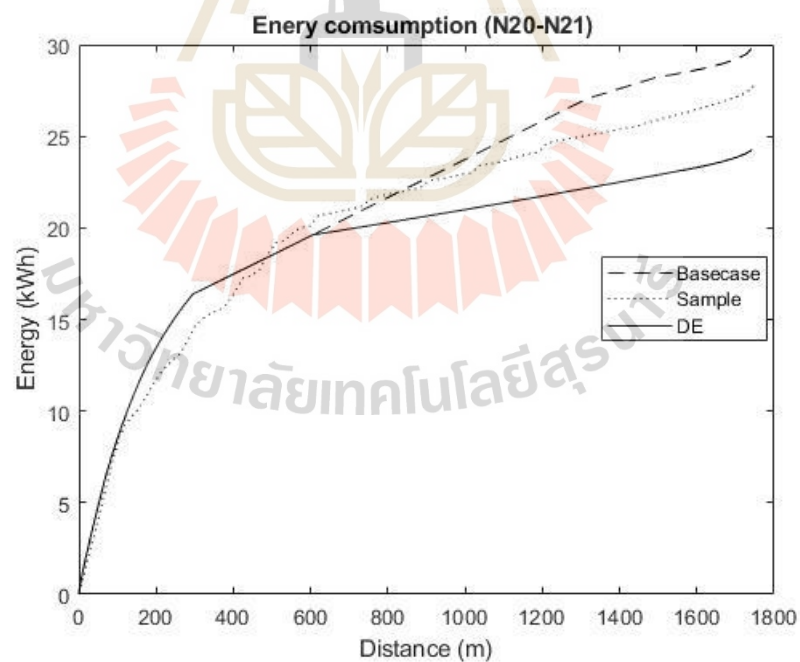
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบโครงร่างความเร็วของเส้นทางที่ 1



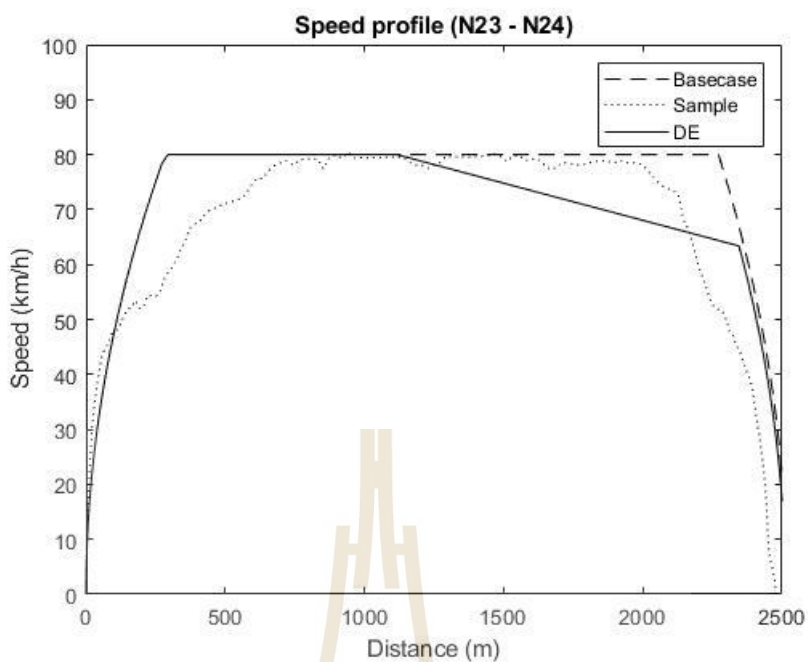
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 1



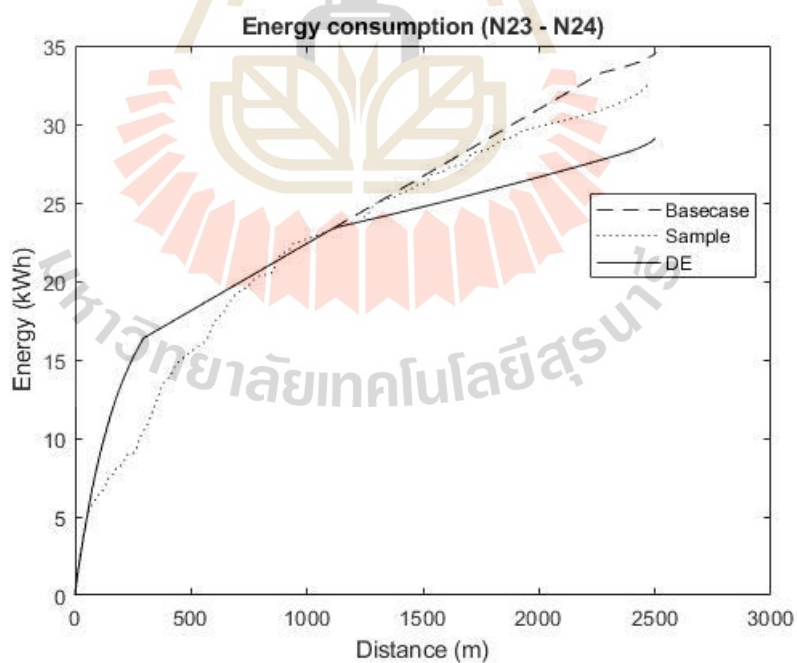
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบโครงร่างความเร็วของเส้นทางที่ 2



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 2



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบโครงร่างความเร็วของเส้นทางที่ 3



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นทางที่ 3

ตารางที่ 4.12 สรุปผลการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อลดทอนพลังงานในการเคลื่อนที่ทั้งหมด

กรณีศึกษา	ฐาน	วิธีเชิงพันธุกรรม (GA)	วิวัฒนาการผลต่าง (DE)
พลังงานรวมในการเคลื่อนที่ (kWh)	432.4	417.04	415.8
พลังงานรวมที่ใช้ลดลงเมื่อ เทียบกับกรณีฐาน (kWh)	-	15.36	16.6
[%] พลังงานรวมที่ใช้ลดลง เมื่อเทียบกับกรณีฐาน	-	3.55%	3.83%

4.7 สรุป

บทนี้นำเสนอการดำเนินงานในการเก็บข้อมูลที่นำมาใส่ค่าเพื่อจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทช่วงสถานี ห้าแยกลาดพร้าวถึงสถานีคูคต ซึ่งสามารถจำลองตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่พร้อมทั้งหาพลังงานสะสมที่ใช้ในการเดินทางได้ ซึ่งอยู่ที่ 432.4 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และรวมถึงการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองการลดใช้พลังงานในช่วง 3 สถานีที่มีระยะทางระหว่างสถานีมากกว่า 1.2 กิโลเมตรที่มีการรักษาความเร็วที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผลปรากฏว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ทั้ง 3 ตัวแปรในการหาค่าอื่น ได้แก่ อัตราการเร่ง อัตราการเบรก และระยะเวลาแล่นด้วยความเฉื่อย ที่ใช้วิวัฒนาการผลต่างสามารถลดการใช้พลังงานในการเดินทางมากที่สุด 21.82% ที่สถานีแยก คปอ. ถึง สถานีคูคต และเมื่อรวมทั้งสามสถานีพบว่าวิธีวิวัฒนาการเชิงผลต่างสามารถลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ 16.6 kWh โดยพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่หลังจากวิธีดังกล่าวโดยรวมอยู่ที่ 415.8 kWh คิดเป็น 3.83% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน

กรณีศึกษาที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับวิธีเชิงพันธุกรรม จากการทดสอบ พบว่า วิธีวิวัฒนาการผลต่างสามารถหาค่าการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ได้ต่ำกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมมากที่สุดอยู่ 1.61% ที่สถานีแยก คปอ. ถึง สถานีคูคต และซึ่งจากผลการทดสอบนี้ ทดสอบภายใต้เวลาที่กำหนดในตารางการเดินทางของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนบีทีเอส สายสุขุมวิทและท้ายนี้สรุปเทียบประสิทธิภาพโดยรวมทั้ง 16 สถานีพบว่าวิธีวิวัฒนาการเชิงผลต่างสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ช่วยลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมที่ 1.24 kWh คิดเป็น 0.27%

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าที่ใช้ดำเนินงานในสายสุขุมวิท โดยพิจารณาในช่วงสถานีห้าแยกลาดพร้าวถึงสถานีคูคต โดยได้เริ่มจากการหาแนวทางที่สนใจ ดังกล่าวในบทที่ 1 ต่อมาได้ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตเพื่อมาเป็นแนวทางในการดำเนินงาน พร้อมทั้งความเป็นมาข้อมูลจำเพาะต่าง ๆ และระบบของรถไฟฟ้าซึ่งเป็นประโยชน์ต่อองค์ความรู้ผู้วิจัยเป็นอย่างมากดังที่กล่าวมาในของบทที่ 2 ในส่วนของบทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าดังกล่าวซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในการจัดการเขียนอัลกอริทึมช่วยคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการหาค่ากำลังงานไฟฟ้าและพลังงานในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวนในแบบกรณีฐาน ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงดำเนินการจำลองการเคลื่อนที่ทั้ง 16 สถานีของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิทช่วงสถานีห้าแยกลาดพร้าวถึงสถานีคูคต พร้อมทั้งแสดงการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการหาแรงต้านสำหรับนำมาเป็นตัวแปรในการคำนวณหาค่าพลังงานในการเดินทางใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุดรวมถึงการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการเข้ามาช่วยในการหาค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดในการเดินทาง ซึ่งการจำลองผลตลอดเส้นทางเคลื่อนที่พร้อมทั้งหาพลังงานสะสมที่ใช้ในการเดินทางได้ ซึ่งอยู่ที่ 432.4 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และได้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองเพื่อเสนอเป็นแนวทางหนึ่งในการลดใช้พลังงาน ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ทดลองในช่วง 3 สถานีที่มีระยะทางระหว่างสถานีมากกว่า 1 กิโลเมตร ผลปรากฏว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการสามารถลดการใช้พลังงานในการเดินทางมากที่สุด 21.82% ที่สถานีแยก คปอ. ถึง สถานีคูคต และยังสามารถเปรียบเทียบระหว่างวิธีวิวัฒนาการผลต่างที่ผู้วิจัยเลือกกับวิธีเชิงพันธุกรรมที่เป็นที่นิยมสำหรับใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุด จากการทดสอบพบว่าวิธีวิวัฒนาการผลต่างสามารถหาค่าการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ได้ต่ำกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมมากที่สุดอยู่ 1.61% ที่สถานีแยก คปอ. ถึง สถานีคูคต เช่นกัน โดยผลรวมของวิธีวิวัฒนาการสามารถช่วยลดพลังงานในการเคลื่อนที่ได้ถึง 16.6 kWh โดยรวมอยู่ที่ 415.8 kWh และคิดเป็น 3.83% ที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน และสุดท้ายเมื่อเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีเชิงพันธุกรรมกับวิธีวิวัฒนาการผลต่างที่ผู้วิจัยเลือกใช้พบว่าวิธีดังกล่าวสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมถึง 0.27% ดังนั้น

งานวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำไปใช้งานและประยุกต์แนวทางในการจำลองการเคลื่อนที่กับยานพาหนะประเภทอื่น ๆ ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านี้ ได้พบปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการมากมาย และเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยรุ่นใหม่ได้พัฒนาต่อยอดจึงได้แสดงข้อเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์ดังนี้

1. การจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าค่าพารามิเตอร์และข้อมูลจำเพาะของรถไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่ง และมีส่วนสำคัญยิ่งในการสร้างแบบจำลองผล
2. การหาค่าแรงต้านเกรเดียนต์จำเป็นต้องมีข้อมูลระดับความชันของเส้นทางรางที่ถูกต้อง เนื่องจากผู้วิจัยไม่มีข้อมูลดังกล่าวจึงต้องทำการวัดโดยใช้อุปกรณ์ GPS Module ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ผล ดังนั้น ถ้าได้รับข้อมูลดังกล่าวจะสามารถจำลองการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงสภาพจริงมากยิ่งขึ้น
3. การพัฒนาการจำลองด้วยอัลกอริทึมบนโปรแกรม MATLAB ควรมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อเข้าถึงความเป็นพลวัตในระบบการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น
4. การประยุกต์การลดใช้พลังงานสามารถนำวิธีปัญญาประดิษฐ์ในรูปแบบอื่นสำหรับต่อยอดและพัฒนาแนวทางการจำลองระบบการเคลื่อนที่ดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์. (2554). การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์. (2561). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 3.
- ธัญชัย สีกักดีปรีดา. (2561). การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลักการพื้นฐานและขั้นตอนวิธีการ. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- นคร จันทกร. (2555). ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2.
- สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2559). การศึกษาแผนพัฒนามาตรฐานด้านระบบรางของประเทศไทย
- กันดินันท์ สกุลไพศาล, (2561). การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดใช้พลังงานรวมของรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลโดยใช้เส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดติดตั้งบนรถ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จิระพงษ์ ศรีวิชัย, (2563). การวิเคราะห์ การจำลองผลและการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับรถไฟฟ้าอัตโนมัติไร้คนขับ. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์, (2560). กลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้ามหานคร. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธวัช ชูจิต, (2561). การศึกษาและการประเมินกระแสรั่วไหลในระบบรถไฟฟ้ามหานคร กระแสตรง. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ดลยา บัวคำ, (2560). การหาขนาดท่อในระบบการจ่ายน้ำที่เหมาะสมด้วยวิธีวิวัฒนาการผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ศรัยรัตน์ เกิด โภคทรัพย์, (2560). การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์

- วศพร เตชะพีรพานิช, วรศรา วีระวัฒน์, (2560). **โครงการวิจัยและพัฒนาระบบรถไฟฟ้าโครงการย่อยที่ 2 การศึกษาการเดินทางรถไฟฟ้าด้วยแบบจำลองสถานการณ์**. โครงการวิจัย มหาวิทยาลัยมหิดล
- วัยอาจ สายคง, (2561). **ระบบการจัดการพลังงานแบบบูรณาการสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น**. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Flavio Ciccirelli (2014). **Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems**. PhD Thesis University of Naples
- Kulworawanichpong T., (2003). **Optimising AC electric railway power flow with power electronic control** PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- Kerim C., (2012). Energy Minimization for Catenary-free Mass Transit Systems Using Particle Swarm Optimization, **2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion**, INSPEC Accession Number: 13193105, Oct. 2012.
- Khemkladmuk B., Kulworawanichpong T., (2018). A Study Control Speed Profile Optimization for Automate People Mover, **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering**, ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X Volume-6, Issue-6, Jun.-2018, <http://ijiee.org.in>.
- Kulworawanichpong T., (2015). Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method **Journal of Modern Transportation**. pp 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, September 2015.
- Leeton U., (2014). Optimal Regenerative Braking for DC Electric Railways with On-board Energy Storage System, **The Institute of Electrical Engineers of Japan**.
- Martinis, V. D., and Gallo, M., (2013). Models and Methods to Optimise Train Speed Profiles with and without Energy Recovery Systems: A Suburban Test Case. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**,87, 222-233.
- Miyatake M. and Haga H., (2010). Optimization of speed profile and quick charging of a catenary free train with on-board energy storage In: **Proc. Int. Con! Elect. Syst. for Aircraft, Railway ad Ship Propulsion ESARS'JO**, Bologna, Italy, pp. 1-6, October 19-21, 2010.

- Mongkoldee K., Leeton U., And Kulworawanishpong T., (2016). Single Train Movement Modelling and Simulation with Rail Potential Consideration **IEEE/SICE International Symposium on System Integration**, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, 13-15 December 2016.
- Sumpavakup, C., Suwannakijborihan, S., Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T., (2018). Peak Demand Cutting Strategy with an On-Board Energy Storage System in Mass RapidTransit. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering**,
- Sinsuphan N., Ratniyomchai T., (2010). Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Swarm Intelligences **ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications**, **9(1)**, 212-222. Retrieved from <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ECTI-EEC/article/view/172490>, Jul 31, 2010
- Srivichai J, Kulworawanishpong T., (2018). APM Traction Power Supply Study: A case study of SUT Hospital Shuttle Service, **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering**, ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X Volume-6, Issue-6, Jun.-2018, <http://ijiee.org.in>.
- Wang W., Cheng M., and Chen W., (2014). A novel energy management strategy of onboard super capacitor for subway applications with permanent-magnet traction system. **IEEE Trans Veh Technol** **63(6):2578–2588**.



ภาคผนวก ก

สมการและชุดคำสั่งที่ใช้ในการจำลอง

ก.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

สมการที่ใช้ในการคำนวณผลในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เช่น แรงต้านทานการเคลื่อนที่ แรงต้านทานเนื่องจากความโค้งของรางและแรงต้านทานเนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงเนิน โปรแกรมจำลองแรงจุดสูงสุดและโปรแกรมจำลองความเร็วสูงสุดของระบบ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณถูกแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 สมการที่ใช้ในการจำลองข้อมูลพื้นฐาน

สมการ	วัตถุประสงค์
$F = F_{TE} - F_R = M_{eff}a$	คำนวณแรงจุดลาก
$FR = A + Bv + Cv^2$	คำนวณแรงต้านทาน
$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_{eff})$	คำนวณน้ำหนักประสิทธิผล
$F_{grad} = \pm M_{eff}g \sin \theta = \frac{M_{eff}g \Delta n}{Lt}$	คำนวณแรงต้านทานเกรเดียนต์
$F_{curve} = \begin{cases} \frac{6.3}{r(s) - 55} M_{eff}, r(s) \geq 300m \\ \frac{4.91}{r(s) - 30} M_{eff}, r(s) < 300m \end{cases}$	คำนวณแรงต้านทานการหนีศูนย์กลาง
$P_i = \frac{F_{TE} \times v}{\eta_t} + P_{aux}$	คำนวณกำลังไฟฟ้า
$E = \frac{P_i \times \Delta t}{hr}$	คำนวณพลังงานไฟฟ้า
$v_t = v_i + at$	การปรับปรุงความเร็ว
$s_t = s_i + v_i t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$	การปรับปรุงตำแหน่ง

ก.2 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองผล

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า นั้นประกอบด้วย 2 โปรแกรมหลัก ซึ่งได้แก่ โปรแกรมจำลองข้อมูลพื้นฐานของรถไฟฟ้า โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่

ชุดคำสั่งพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท

```
TEmax = 225e3;
BEmax = -225e3;
Mtare = 153e3;           % kg
Ml = 75e3;              % Payload
MF = (Mtare+Ml)/Mtare;  % Mass factor
Meff = MF*Mtare;       % Effective mass

A = 4.025e3; B = 0.11867e3; C = 0.000871e3; % resistance force

eff_gear = 0.98; eff_motor = 0.88; eff_inv = 0.98; %Efficient
transfer
eff = eff_gear*eff_motor*eff_inv;

ka = 1.0;               % gain of acceleration rate
kd = 1.0;               % gain of decelerating rate

ACC = 0.87*ka;          % maximum acceleration rate
DEC = -1.0*kd;          % Max braking rate

vbase1 = 34/3.6;        % Base speed1
vbase2 = 56/3.6;        % Base speed2
v_m = 80/3.6;           % Max speed

paux = 270e3;           % Power auxiliary
```

ชุดคำสั่งดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการจำลองผล เพื่อให้โปรแกรมคำนวณระยะการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนไปตามพลวัตของรถไฟฟ้า

ชุดคำสั่งการควบคุมโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

```

    if mode == -1                                %Break
        if (s(k) - D2NS) > 0                    %D2NS End
Station
            mode = 0;
            a(k+1) = 0;
            TE(k+1) = 0;
            s(k+1) = D2NS; %s(k)
            Tcount = 0;
            pe(k+1) = 0;
        else
            a(k+1) = DEC;
            TE(k+1) = 0;
            v(k+1) = v(k) + a(k+1)*dT;
            pe(k+1) = TE(k+1)*v(k+1)/eff + paux;
            s(k+1) = s(k) + v(k)*dT + 0.5*a(k+1)*dT^2;
        end
    elseif mode == 0                            %Stop point
        Tcount = Tcount+1;
        a(k+1) = 0;
        TE(k+1) = 0;
        v(k+1) = 0;
        pe(k+1) = 0;
        s(k+1) = D2NS; %s(k)
        E(k+1) = E(k) + pe(k+1)*dT;

        if Tcount >= Tdwell
            mode = 1;
            s(k+1) = s(k);
        else
            s(k+1) = D2NS;
        end

    elseif mode == 1                            % ACC Mode
        a(k+1) = ACC;
        TE(k+1) = TEmax;
        if v(k) < vb1                            % Constance
force
            if TE(k+1) > TEmax
                TE(k+1) = TEmax;
            end
            elseif v(k) > vb1 && v(k) <= vb2
                if TE(k+1) > TEmax*vb1/v(k)
                    TE(k+1) = TEmax*vb1/v(k);
                end
            else
                if TE(k+1) > TEmax*vb1*vb2/v(k)^2

```



```

v(k+1) = v(k) + a(k+1)*dT;
pe(k+1) = TE(k+1)*v(k+1)/eff + paux;
s(k+1) = s(k) + v(k)*dT + 0.5*a(k+1)*dT^2;

if v(k+1) >= v_m % Check velocity
    v(k+1) = v_m;
    mode = 2;
    s_a = s(k+1)+s_a;
end

elseif mode == 2 % Constant speed
    a(k+1) = 0;
    TE(k+1) = Meff*a(k+1)+Fr(k+1)+Fgrad(k+1);

    v(k+1) = v(k) + a(k+1)*dT;
    pe(k+1) = TE(k+1)*v(k+1)/eff + paux;
    s(k+1) = s(k) + v(k)*dT + 0.5*a(k+1)*dT^2;

    if s(k+1)-s_a >= s_cc % Coasting start
        point%%%
        mode = 3
    end

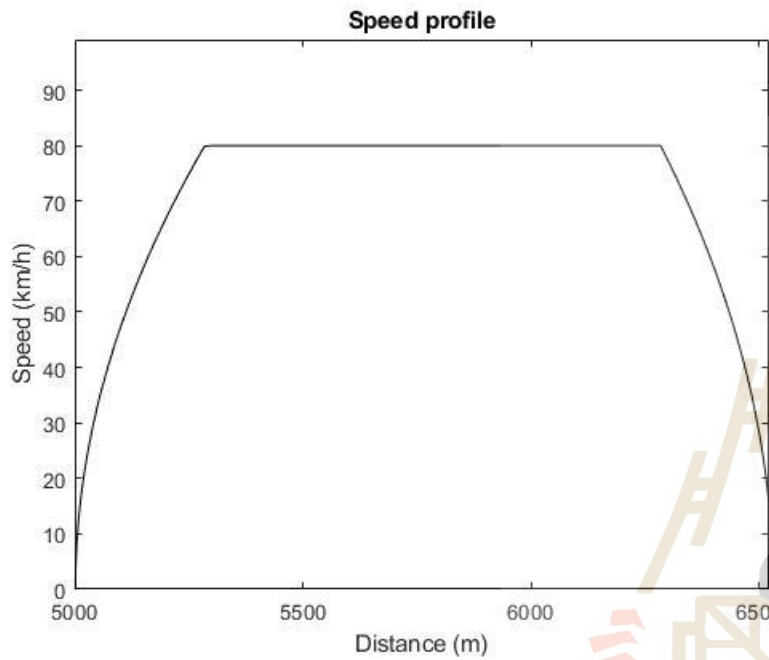
elseif mode == 3 % Coasting mode
    TE(k+1) = 0;
    a(k+1) = TE(k+1)-Fr(k+1)-Fgrad(k+1)/Meff;
    ds(k) = 0;

    v(k+1) = v(k) + a(k+1)*dT;
    pe(k+1) = TE(k+1)*v(k+1)/eff + paux;
    s(k+1) = s(k) + v(k)*dT + 0.5*a(k+1)*dT^2;
    ds(k+1) = ds(k) + s(k+1);

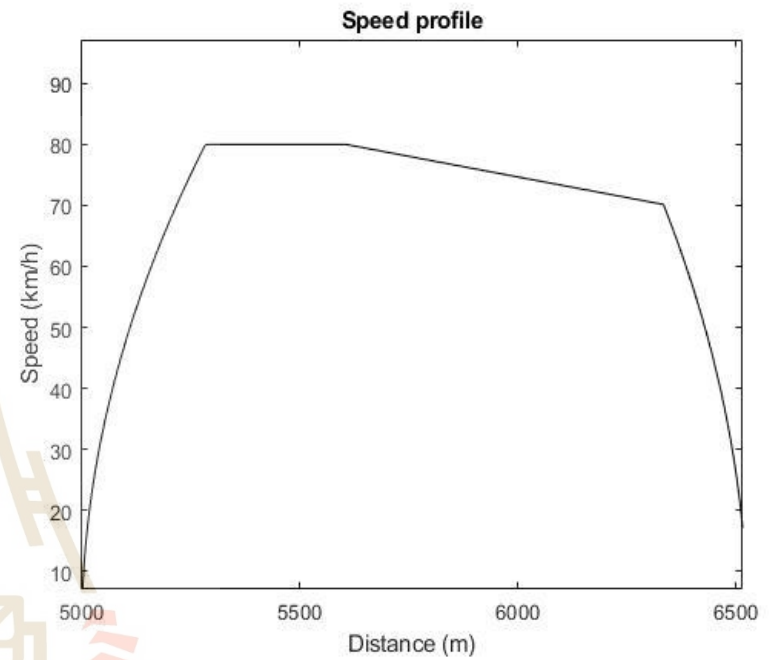
    if D2NS+(v(k).^2/(2*DEC)) < s(k+1) % Check distance
break
        mode = 4;
    end

elseif mode == 4 % distance of braking
    a(k+1) = DEC;
    v(k+1) = v(k) + a(k+1)*dT;
    TE(k+1) = BEmaxe;
    pe(k+1) = paux;
    s(k+1) = s(k) + v(k)*dT + 0.5*a(k+1)*dT^2;

```

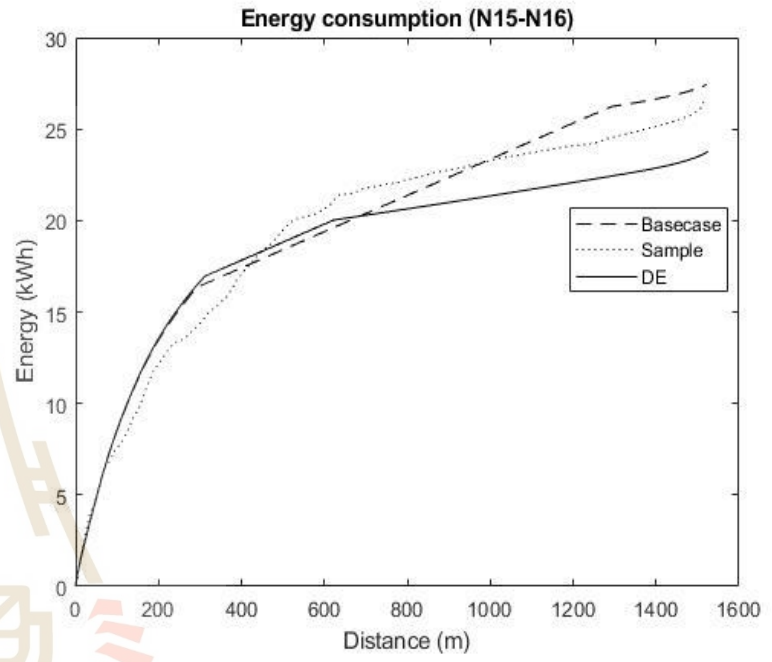
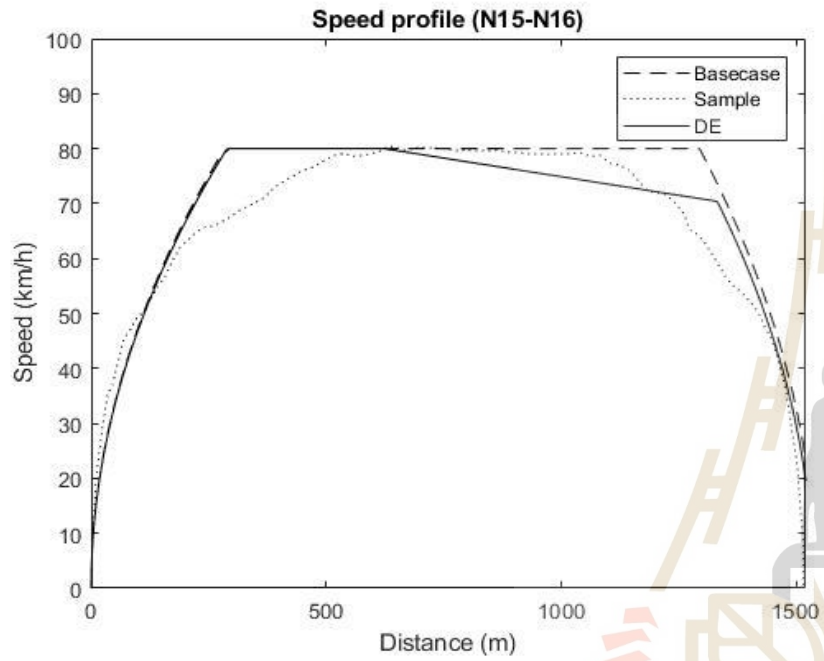


โครงร่างความเร็วกรณีฐาน



โครงร่างความเร็วที่ออกแบบ

รูปที่ ก.1 โครงร่างความเร็วที่ได้จากการจำลองผลของสถานีบางบัวถึงกรมทหาราบ 11

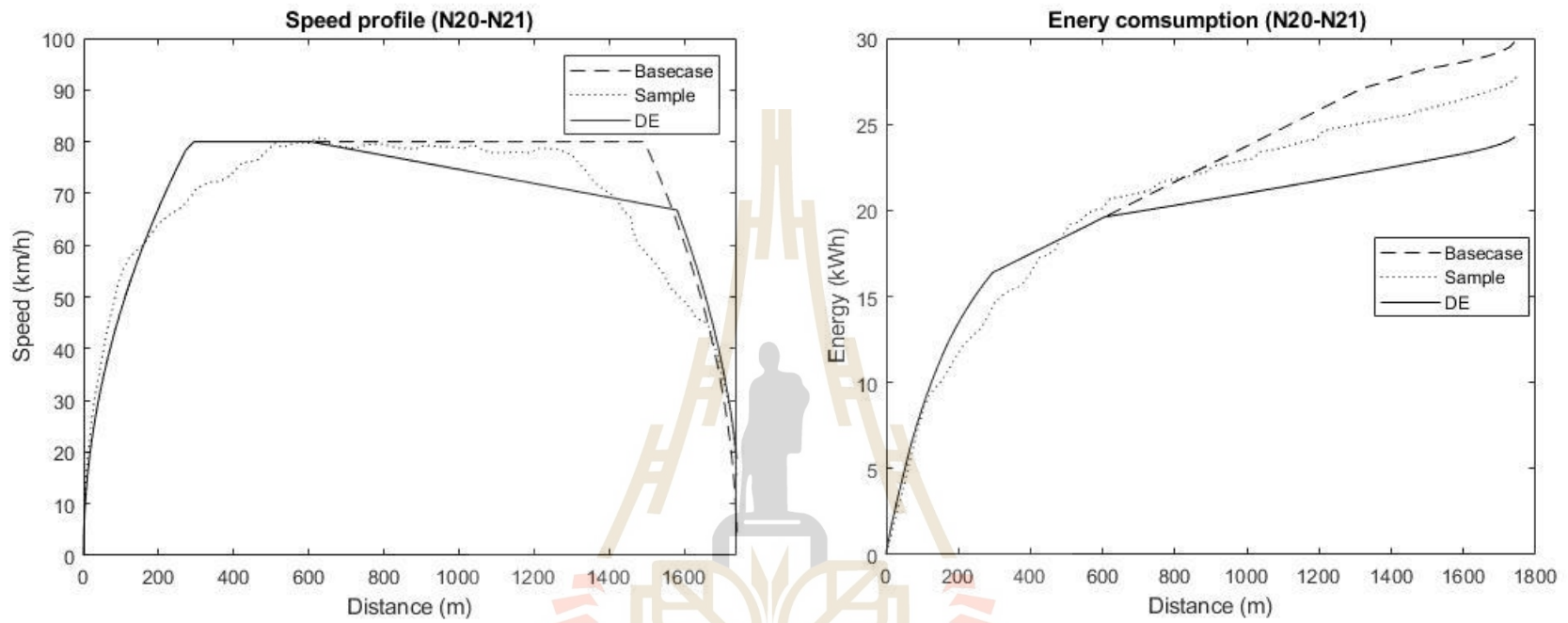


โครงสร้างความเร็วกรณีฐาน

ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่

รูปที่ ก.2 เปรียบเทียบข้อมูลจริง แบบจำลองผล และหลังการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผลของสถานีบางบัวถึงกรมทหาราบ 11

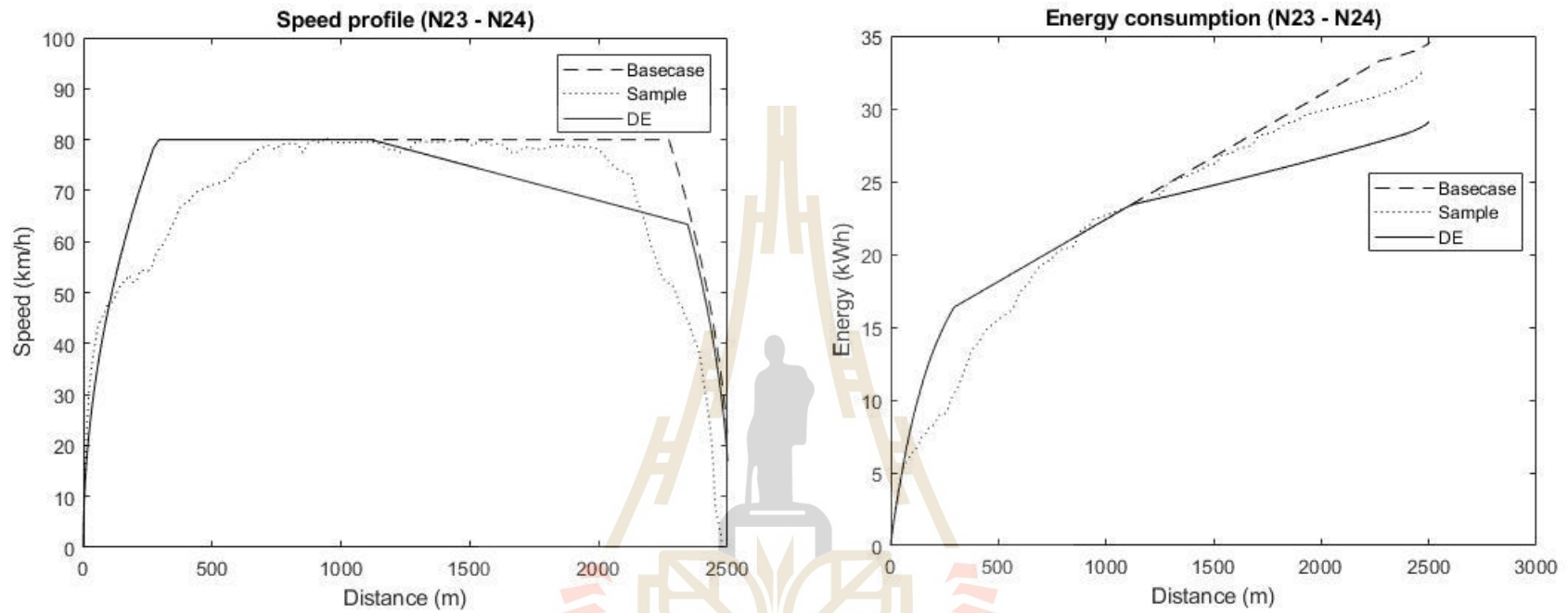




โครงสร้างความเร็วกรณีฐาน

ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่

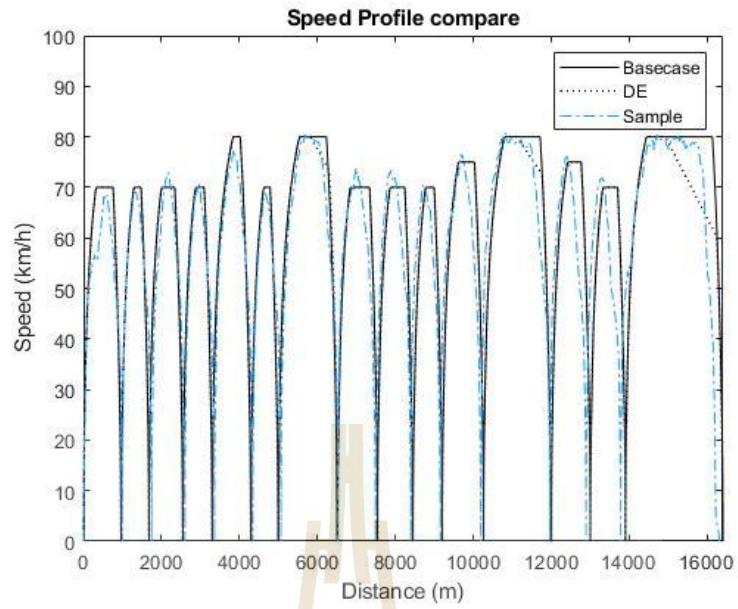
รูปที่ ก.3 เปรียบเทียบข้อมูลจริง แบบจำลองผล และหลังการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผลของสถานีสะพานใหม่ถึงโรงพยาบาลภูมิพล



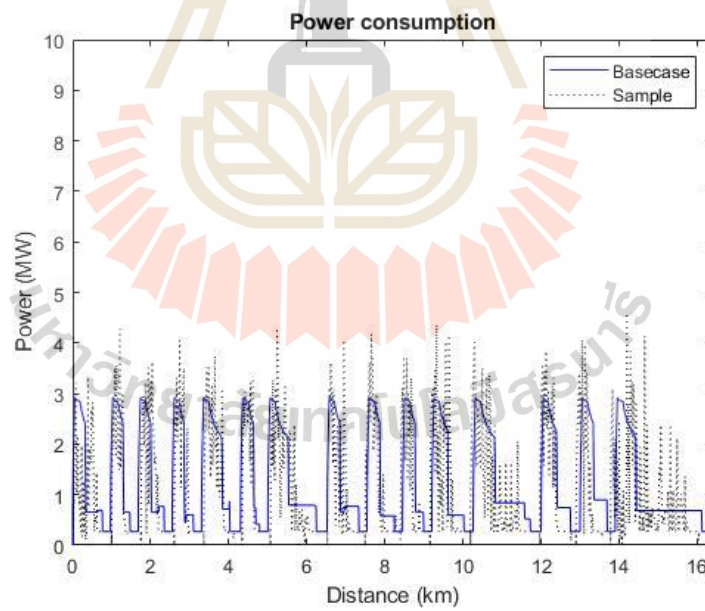
โครงสร้างความเร็วกรณีฐาน

ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่

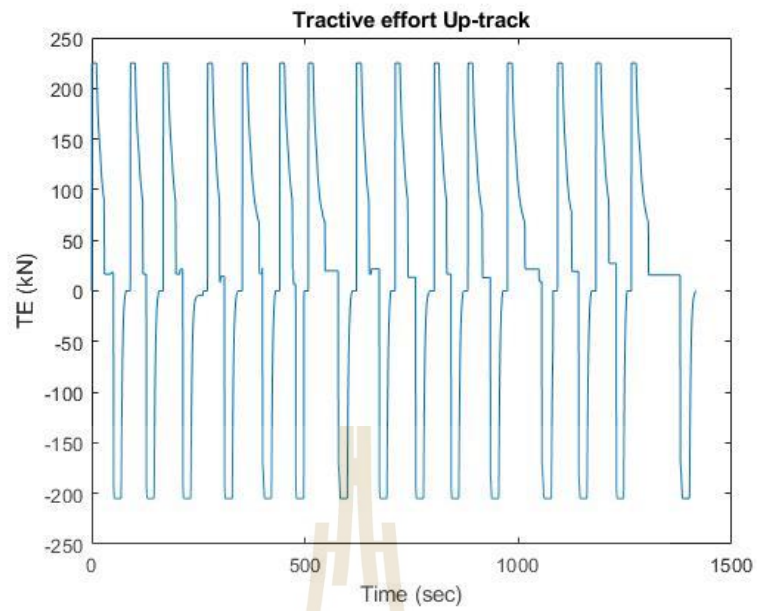
รูปที่ ก.4 เปรียบเทียบข้อมูลจริง แบบจำลองผล และหลังการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผลของสถานีสะพานแยก คปอ. ถึง สถานีคูคต



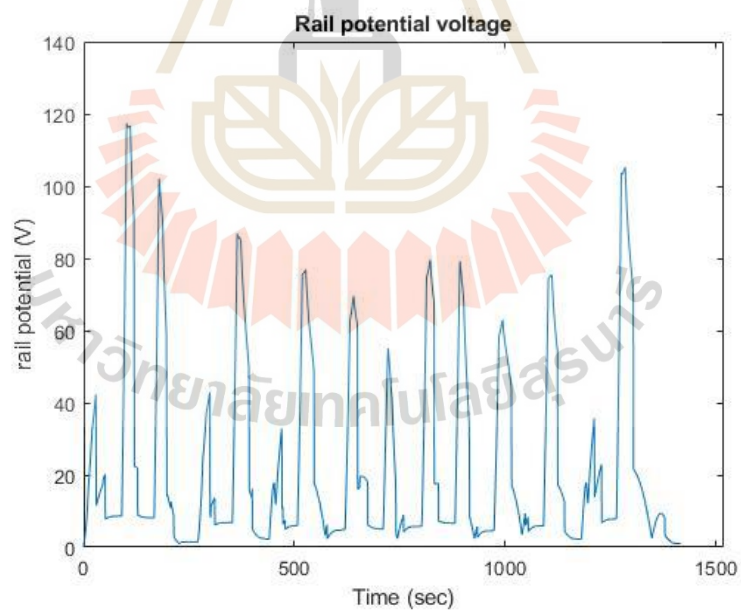
รูปที่ ก.5 เปรียบเทียบ โครงร่างความเร็วของสถานีที่ทำการหาค่าที่ดีที่สุด



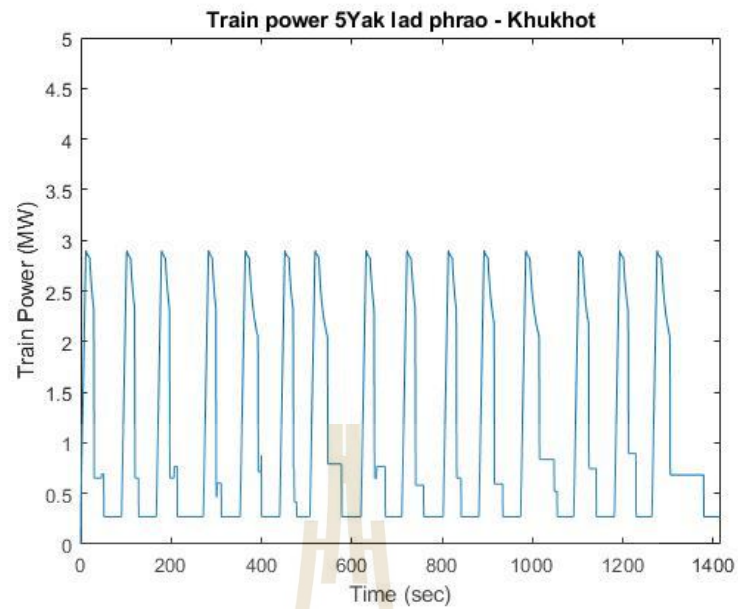
รูปที่ ก.6 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองและการเก็บข้อมูล



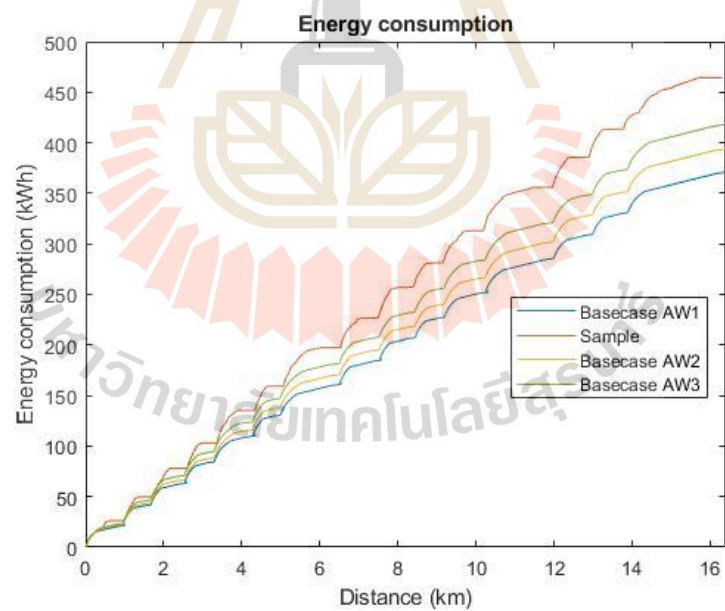
รูปที่ ก.7 แรงจุดลากและแรงเบรกรถไฟฟ้า



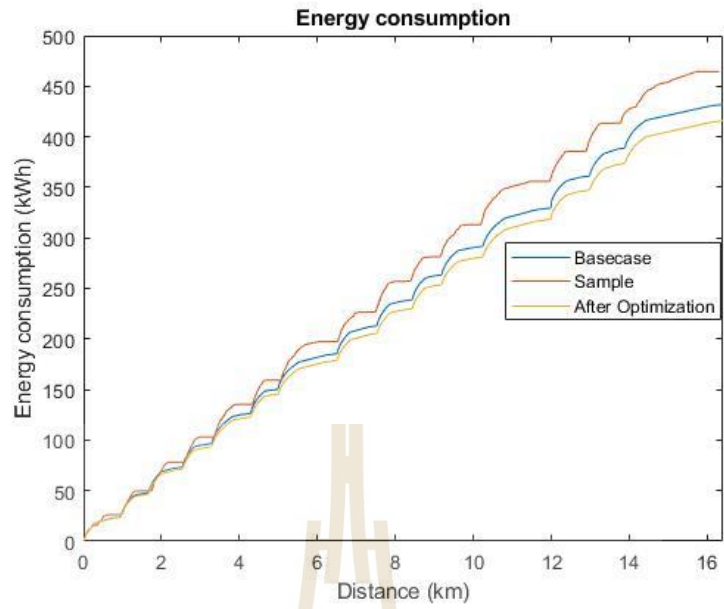
รูปที่ ก.8 แรงดันรางวิ่ง



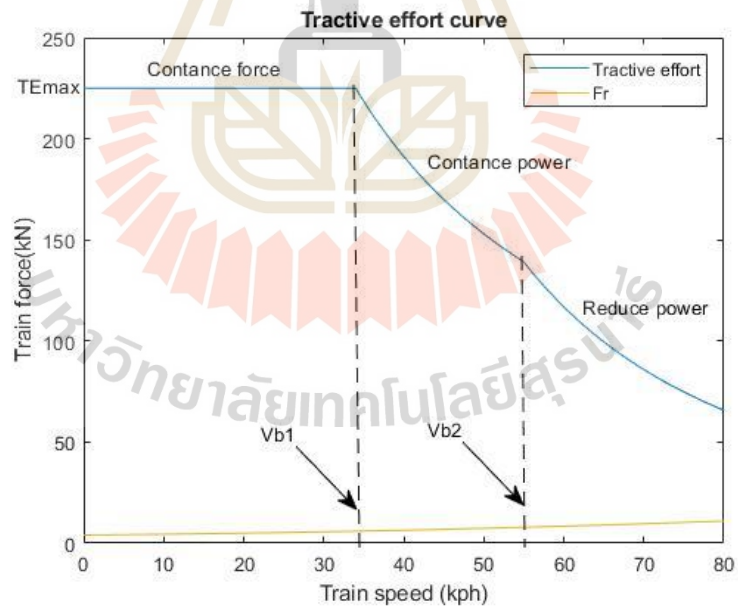
รูปที่ ก.9 กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า



รูปที่ ก.10 พลังงานในการเคลื่อนที่ในแต่ละโหนดน้ำหนักรถโดยสาร



รูปที่ ก.11 พลังงานในการเคลื่อนที่เปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี



รูปที่ ก.12 กราฟแรงจุดลากขบวนรถไฟและแรงต้านรถไฟสายสุพรรณวิท

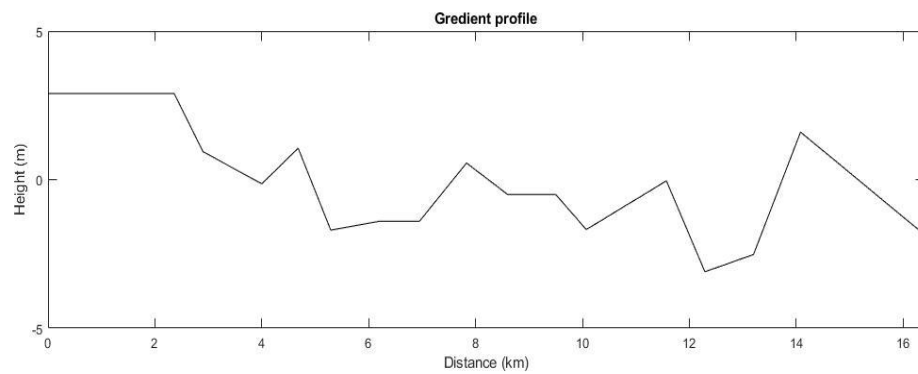


ภาคผนวก ข.

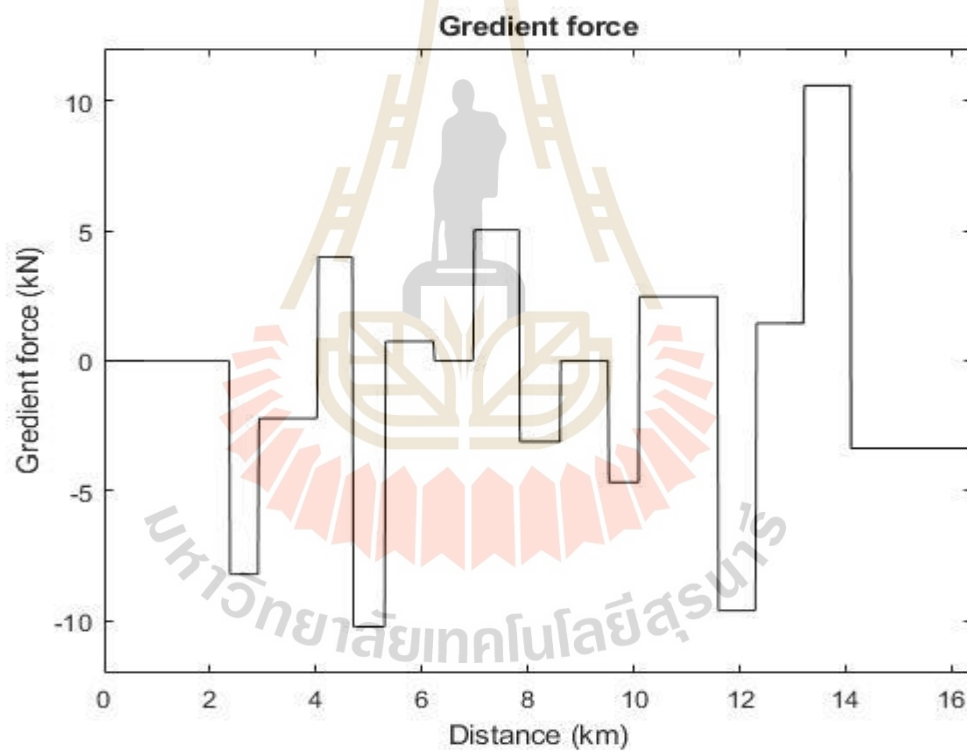
ค่าที่ได้รับจากการเก็บข้อมูล

ตารางที่ ข.1 ค่าระดับเกรดเฉลี่ยที่ได้รับจากการเก็บข้อมูล

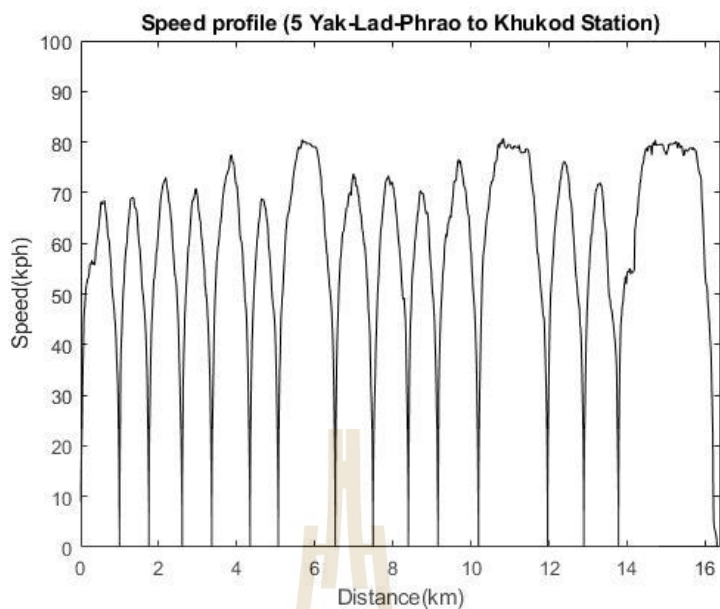
Distance	Height
0	2.9
2420	2.9
3300	0.94
4210	-0.14
4930	1.06
6430	-1.7
7000	-1.4
7900	-1.4
8670	-1.4
9550	0.56
9660	-0.5
10300	-0.5
11210	-1.68
11820	-0.04
12500	-3.1
13600	-2.52
14140	1.6
16700	-2



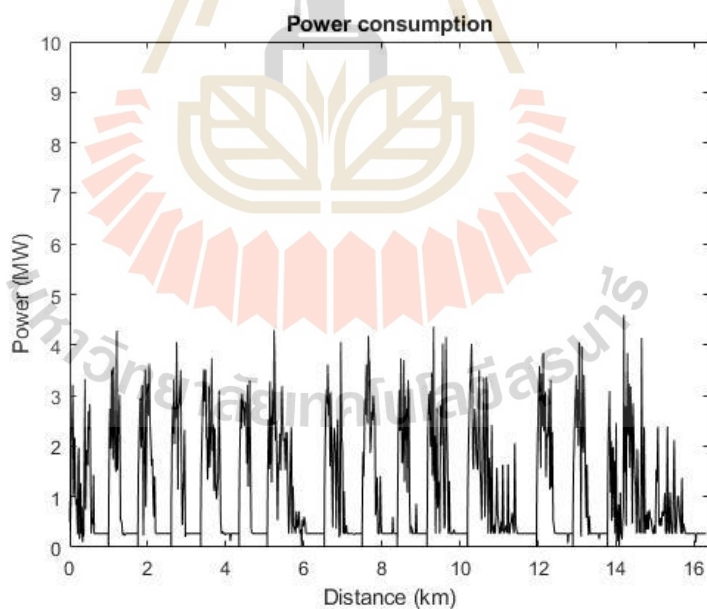
รูปที่ ข.1 ค่าระดับเกรเดียนต์ของเส้นทางสถานีห้าแยกลาดพร้าวถึงสถานีคูคต



รูปที่ ข.2 แรงต้านเกรเดียนต์ของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)



รูปที่ ข.3 โครงร่างความเร็วของเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)



รูปที่ ข.4 กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเส้นทางรถไฟฟ้าสายสุขุมวิท (ห้าแยกลาดพร้าวถึงคูคต)



ภาคผนวก ค.

บทความวิชาการที่เผยแพร่ระหว่างการศึกษา

AECXXX

(this number will be assigned after full manuscript is accepted)

Study optimal control speed mode for Electric Railway to Reduce Energy Consumption

T Choenklang¹, U Leeton², T Kulworawanichpong²

¹School of Mechatronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

²School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

* Corresponding Author: E-mail: Uthenleeton@sut.ac.th

Abstract This paper describes the modeling and simulation of a DC electric railway movement strategy during train operation aims to reduce total energy consumption are discussed. The proposed three case studies of train movement strategies to be simulated with controlling of three parameter such as 1) acceleration 2) deceleration 3) coasting point by Intelligent control for optimization the energy consumption of DC electric railway to determine which mode of transportation uses the least of energy consumed. This paper presents a DE method applied to algorithm MATLAB/M-file implementation for calculating the train movement profile of a single train that used the Bangkok Transit System (BTS) of Thailand to case study select route 5th extension – Sukhumvit north line to Khu Khot 2-station passenger and a service range of 1.74 km. The simulated event was determined by the algorithm's which demonstrated the DE method to minimize energy usage while running between stations on DC electric railway in comparison to other cases. Thus, the DE methods as present can be used to validate the effectiveness of minimum energy consumption on DC electric railways trajectory.

Keywords: Single-Train Simulation, Differential Evolution, Energy Saving

1. Introduction

At present, public transport is rapidly increasing in demand all over the world. In particular, over the years many Asian countries are planning to expand way of the mass transit system. Themselves were covered all capital areas [1] mass rapid transit system has been developed which present various systems in order to support rapid transit system. It has a wide range of services to attract passengers to use the service [2]. The object of simulation is creating a single-train movement calculate modeling. in the paper approach train movement performance of single train compute by algorithm MATLAB/M-file implementation for calculating the train movement profile of a single train that used the Bangkok Transit System (BTS) of Thailand was applied to evaluate for case study. The case study considers 2-station passenger 5th extension – Sukhumvit Line north to Khu Khot. Because simple analyses. It has service distance of 1.74 km for this case study. The energy consumption for operating the train is determined

Calculations make it hard to estimate aerodynamic drag, however based on data from run-down testing in which the natural deceleration of a train on a straight, level track is measure windless day the drag force may be calculated. The Davis equation in equation (5) [7].

$$F_{rr} = a + bv + cv^2 \quad (5)$$

Where a , b and c are Drag coefficients, where v is the train speed Different values are commonly used for open or tunnel surroundings.

2.2. Performance Calculate

Essentially, the train's immediate distance and speed must be determined and updated at each simulation iteration. program as following equation (5) to (6) [6].

$$v = v_i + a \Delta t \quad (5)$$

$$s = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (6)$$

Where v_i and v are the velocity after and before updated, Δt is the time of movement, s_i and s are the position the object after and before updated.

The electric power consumption (P) is considered with the efficiency physical parameter would be expressed in (7). Thus, the total electric power (P_t) which is provided to the train movement was illustrated in (8) to add auxiliary power for load on the train [2] [6] and Energy consume the equation in (7) to (9).

$$P_e = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (7)$$

$$P_t = P_e + P_{aux} \quad (8)$$

$$E = P_t \times t \quad (9)$$

where: P_e is Power for the movement train (W)
 P_t is Total Power for the movement train (W)
 v is Speed train (m/s)
 P_{aux} is Auxiliary Power (W)
 and E is Energy for the train movement (kJ)

Where η describes the efficiency with which electrical input power is converted to mechanical output power at the wheels.

3. Strategy of train movement control

The modes of operation are determined by the speed control model. The train typically has three operational modes include 1) accelerating mode, 2) braking mode, 3) coasting mode and 4) braking mode. The tractive effort is determined by the speed control strategy.

Proportional speed control

This research aimed to study the speed control on proportional techniques model and speed mode operation in Figure 2

The train movement of the vehicle begins in the accelerating mode with full tractive effort ($TE=max$), until the speed reaches the speed limit, at which point it switches to the cruising speed mode with reduced acceleration and tractive effort ($TE=0$), until the train reaches a determined point, then the train will move by its own momentum with no tractive effort (a, $TE=0$). Finally, the train will move into the braking mode when approaching to the destination with an acceleration rate ($a<0$) as show in Table 1.

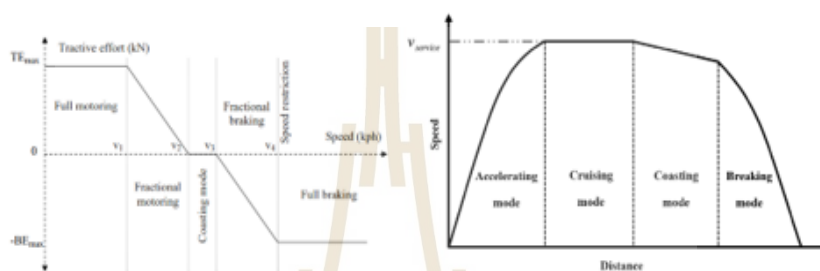


Figure 2. Proportional speed control model and Speed mode operation [9].

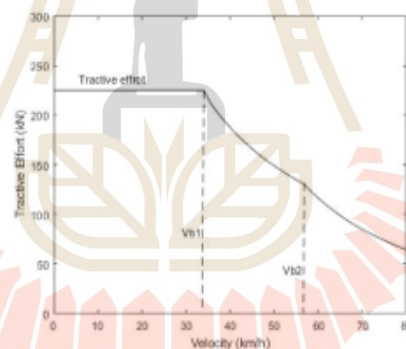


Figure 3. Tractive effort characteristic.

Table 1. Proportional speed control mode

Mode	Position	Tractive Effort	Braking Effort	Acceleration
Acceleration	Begin to V_1	max	0	max
Cruise	V_1 to V_2	0	0	Decrease
Coast	V_3 to V_4	0	Increase	0
Brake	V_4 to Destination	0	max	< 0

4. Optimization Methods

Genetic Algorithm

The Genetic Algorithm (GA) is a technique that depends on gene-level evolution replication. There are several methods for adjusting the motor settings. The GA method is used to detect system parameters in a variety of formats. The GA is a stochastic search strategy that guides a population through optimal solution using genetic evolution and natural selection theories, considered classified as genetic operators e.g. crossover, mutation, etc. With each subsequent generation's update, a collection of updated solutions eventually converges to the true solution. GA is frequently utilized in various research fields where an intelligent search approach is required. The following flowchart in Fig. 4 shows GA procedure [7].

In this paper, The GA is chosen to create an algorithm that will solve for optimal energy usage. To simplify programming, the Genetic Algorithm (TOOLBOX in MATLAB) is used to create a set of initial random values. With the searching process, the parameters are adjusted to provide the best possible result.

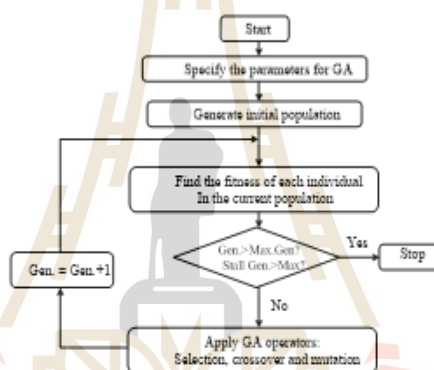


Figure 4. Flow chart of the GA procedure [7].

Differential Evolution

Differential Evolution (DE) is a recently developed evolutionary computation methods. DE is a very effective yet basic evolutionary technique. An algorithm that improves a population of individuals over multiple generations using mutation operators, crossover and selection for global optimization Price and Storn introduced. Differential evolution exhibits good convergence characteristics and involves few control parameters that remain constant during the optimization process and require minimal tuning. In the mutation and recombination phases, DE varies from other EA. Unlike stochastic approaches such as the genetic algorithm and evolutionary strategy, which utilize a random quantity to disturb the population, DE uses weighted differences between solution vectors to disrupt the population. It has a minimum number of EA control parameters, which can be efficiently tuned.[11] The following flowchart in Fig. 5 shows DE procedure

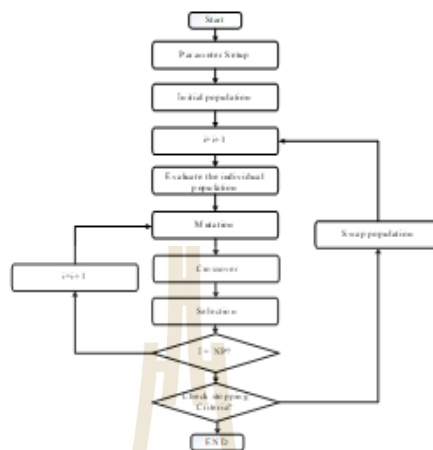


Figure 5. Flow chart of the DE procedure [11].

5. Simulation Result and Discussion

The propose method to compute train movement profile of single train by algorithm implemented in MATLAB/M-file and applied the Genetic Algorithm toolbox function versus Differential Evolution method to optimal parameter of acceleration, deceleration and coasting distance value for objective function of the Energy minimization (10) between 2 stations distance.

Minimize

$$E = \sum_{t=0}^N P_t \times \Delta t \quad (10)$$

Subject to

$$a_{acc}^{min} \leq a_{acc} \leq a_{acc}^{max}$$

$$a_{dec}^{min} \leq a_{dec} \leq a_{dec}^{max}$$

$$L_{coast}^{min} \leq a_{coast} \leq a_{coast}^{max}$$

The programmed sequence running in Figure 6. and variable of the optimization refer in Table

Table 2 Variable of the DE Methods optimization

Specific data	Value
Number of Population	50
Maximum generation	100
Mutation	1
Cross over	0.8
Number of Variable	3

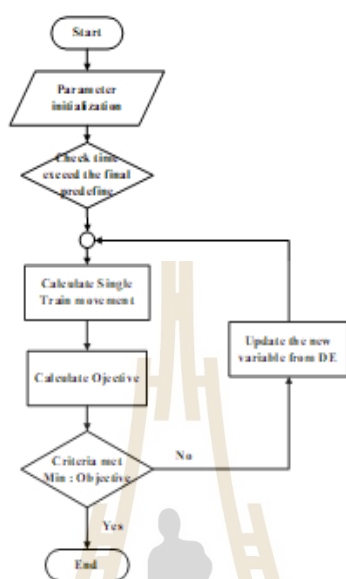


Figure 6. The flowchart of the program sequence with DE search

Table 3. The parameters for simulation

Specific data	Information	
Number of Vehicle		1 vehicle
Voltage	Nominal voltage	750V
Weight	Tare weight	153 ton
	Payload	75 ton
Movement feature	Max acceleration	0.87 m/s ²
	Max deceleration	1.0 m/s ²
	Max speed	80 km/h
Efficiency	Gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
Auxiliary power	Constant load	270kw
Train resistance		A = 4025, B = 118.67, C = 0.871

Station code	Station name	Position
N9	Ha Yaek Lat Phrao	0
N10	Phahon Yothin 24	0.97
N11	Ratchayothin	1.68
N12	Sena Nikhom	2.55
N13	Kasetsart University	3.3
N14	Royal Forest Department	4.35
N15	Bang Bua	5.05
N16	๑ th Infantry Regiment	6.52
N17	Wat Phra Sri Mahathat	7.54
N18	Phahon Yothin 59	8.45
N19	Sai Yud	9.2
N20	Saphan Mai	10.26
N21	Bhumibol Adulyadej Hospital	12
N22	Royal Thai Air Force Museum	13
N23	Yaek Kor Por Aor	13.9
N24	Khu khot	16.4



Figure 8. 5th extension – Sukhumvit Line north to Khu Khot Route, Thailand

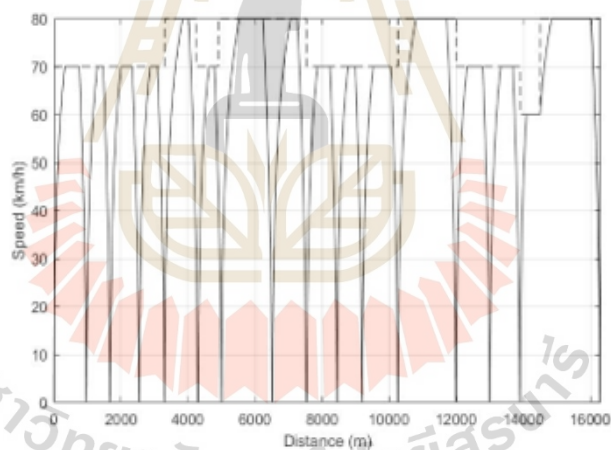


Figure 9. 5th extension Sukhumvit Line Electric Railway Speed Profile Trajectory.

The simulation with variable value in Table 3, a case study of a test algorithm with optimization. The DE and GA method calculates to optimal acceleration in acceleration mode, coasting distance of the mode and deceleration in breaking mode to finding the least energy consumption each strategy compared with basecase, Bangkok Trains Railways each station refer Figure 8. Simulation 2 station as between Sai-yud to Saphan-Mai station distance 1.74km This article was prepared by simulating it with the

MATLAB software. As a result the distance for the best coasting mode is 898 m (distance from the last station), the total movement time is 103.88 s and the total amount of energy utilized for movement is 24.26 kWh. (11.5% Reduce from Base case) by simulating train speed and distance. That calculates energy consumption was conducted, and each case was compared follow.

Base on the simulation result of DC electric railways 2 station range 1.74 km, are different show the DE method least energy consumption when compared to GA methods about 1.53% and 11.5% compared Base case, Because there is no cruising mode to maintain speed, no tractive effort in period affects energy consumption less than other case the cumulative energy according motion mode show in Fig. 10 and the speed profile all method show in Figure 11. And can see the result in table 4.

Table 4. The result of each Optimization methods

Speed limit	Method	E(kWh)			
		Min	Average	Max	SD
80 km/h	DE	24.26	24.603	24.65	0.006
	GA	24.63	24.72	24.88	0.08
60 km/h	DE	20.773	20.774	20.781	0.001
	GA	20.84	20.85	21.14	0.04

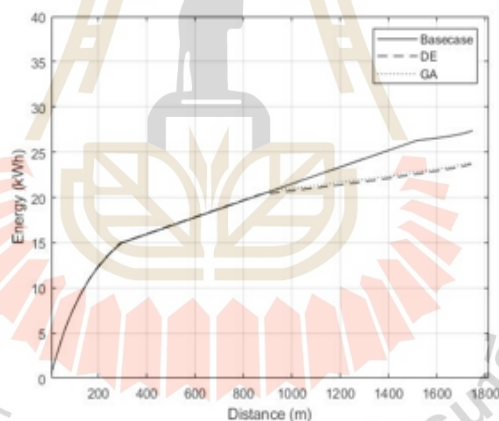


Figure 10. Total Energy consumption in the train movement 3 cases.

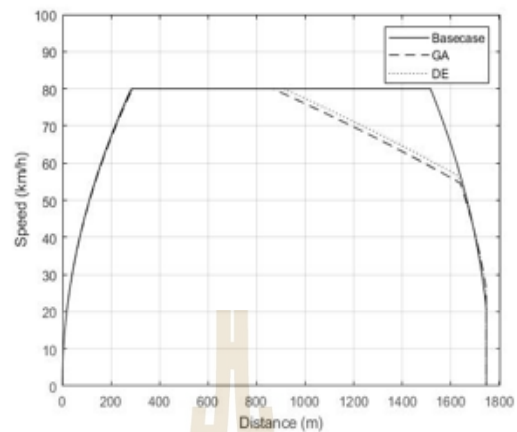
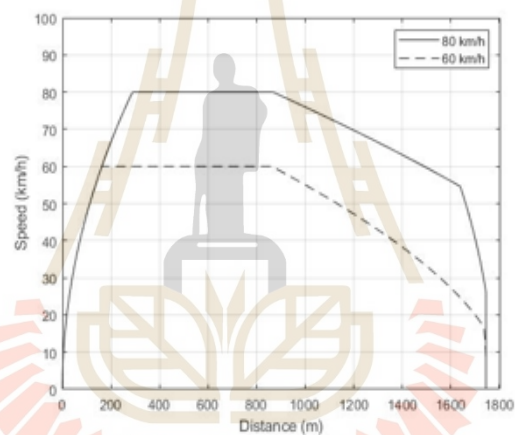


Figure 11. Speed profile compared 3 cases study.



6. Conclusion

This paper presents the algorithm for DC electric railway study energy saving by control mode of the train speed operation distance 1.74 km 2-station the result shows the Differential Evolution (DE Method) calculation at least energy total 24.26 kWh are less than compared GA method. Thus, modelling and simulation by algorithm MATLAB/M-file with Differential Evolution Optimization methods are successfully to evaluate the motion train operate.

Acknowledgements

This work was supported by Suranaree University of Technology.

References

- [1] Kulworawanichpong T 2015 Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method *Journal of Modern Transportation*. pp 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, September 2015.
- [2] Srivichai J 2018 APM Traction Power Supply Study: A case study of SUT Hospital Shuttle Service, *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X Volume-6, Issue-6, Jun.-2018, <http://ijieee.org.in>.
- [3] Kerim C 2012 Energy Minimization for Catenary-free Mass Transit Systems Using Particle Swarm Optimization, *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, INSPEC Accession Number: 13193105, Oct. 2012.
- [4] Miyatake M and Haga H 2010 Optimization of speed profile and quick charging of a catenary free train with on-board energy storage In: *Proc. Int. Conf. Elect. Syst. for Aircraft, Railway and Ship Propulsion ESARS'10*, Bologna, Italy, pp. 1-6, October 19-21, 2010.
- [5] Wang W, Cheng M, Wang Y, Zhang B, Zhu Y, Ding S and Chen W 2014 A novel energy management strategy of onboard super capacitor for subway applications with permanent-magnet traction system. *IEEE Trans Veh Technol* 63(6):2578–2588.
- [6] Mongkoldee K 2016 Single Train Movement Modelling and Simulation with Rail Potential Consideration *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, 13-15 December 2016.
- [7] Leeton U 2014 Optimal Regenerative Braking for DC Electric Railways With On-board Energy Storage System, The Institute of Electrical Engineers of Japan.
- [8] Khemkladmuk B 2018 A Study Control Speed Profile Optimization for Automate People Mover, *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X Volume-6, Issue-6, Jun.-2018, <http://ijieee.org.in>.
- [9] Kulworawanichpong T 2003 Optimising AC electric railway power flow with power electronic control *PhD Thesis, University of Birmingham, UK*, November 2003.
- [10] Sumpavakup C Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy *Journal of Modern Transportation* volume 25, pages223–235 (2017). DOI 10.1007/s40534-017-0146-6, September 2017.
- [11] Sinsuphan N. Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Swarm Intelligences *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 9(1), 212-222. Retrieved from <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ECTI-EEC/article/view/172490>, Jul 31, 2010



ประวัติผู้เขียน

นายธนวัฒน์ เชิญกลาง เกิดเมื่อวันที่ 25 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิมายวิทยา สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2555 และได้เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2562

หลังจากจบการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าทำงานในบริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน) สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ในตำแหน่ง เป็นเวลา 2 ปี และในปี พ.ศ. 2559 ได้เข้าทำงานในบริษัท ซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) สาขานครราชสีมา จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกรกระบวนการผลิต จนถึงปัจจุบันเป็นเวลา 5 ปี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี