วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 มีนาคม – เมษายน 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 2 March – April 2026

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อจำนวนผู้โดยสารของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ของรถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000

ทวีทรัพย์ ตุ้มทอง[1,*], วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1], วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์[1] และ สรวิศ ลิ้มทองกุล[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thaweesup.t@ku.th โทรศัพท์: 098-8260341
(รับบทความ: 15 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 9 กุมภาพันธ์ 2569; ตอบรับบทความ: 17 กุมภาพันธ์ 2569)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) และต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km) ของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ระหว่าง Hitachi Series 1000 (6 Car) และ Hitachi Series 2000 (4 Car) โดยใช้ข้อมูลจากระบบ SCADA และ OD Matrix ของระบบ AFC ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2566 ผลการวิเคราะห์พบว่า Series 1000 มีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรสูงกว่า (0.2179–0.2411) เมื่อเทียบกับ Series 2000 (0.1547–0.1749) และมีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานต่อตู้-กิโลเมตรมากกว่า (4.5933 เทียบกับ 3.3335) ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างด้านประสิทธิภาพพลังงานของทั้งสองชนิดรถไฟฟ้า ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อการเลือกใช้ขบวนรถตามปริมาณผู้โดยสาร การวางแผนเดินรถแบบยืดหยุ่นตามช่วงเวลา การประเมินต้นทุนพลังงานในระยะยาว และการสนับสนุนการจัดซื้อหรือปรับปรุงขบวนรถในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบรถไฟฟ้าโดยรวม

คำสำคัญ: ระบบรวมศูนย์เพื่อการกำกับ-ควบคุม-และจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ ระบบจัดเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ หน่วยไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรเฉลี่ยของรถไฟฟ้า หน่วยไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรเฉลี่ยของรถไฟฟ้า

การอ้างอิงบทความ: ทวีทรัพย์ ตุ้มทอง, วิชัย ศิวะโกศิษฐ, วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์ และ สรวิศ ลิ้มทองกุล, "การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อจำนวนผู้โดยสารของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ของรถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000," *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 53-71, 2569.

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 มีนาคม – เมษายน 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 2 March – April 2026

บทความวิจัย (Research Article)

A Comparative Study of Energy Consumptions per Passenger between Hitachi Series 1000 EMU and Hitachi Series 2000 EMU for the State Railway of Thailand Northern Red Line

Thaweesup Toomtong[1,*], Wichai Siwakosit[1], Wiroonsak Santipach[1] and Sorawit Limthongkul[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

*Corresponding Author: thaweesup.t@ku.th, Tel: 098-8260341
(Received: October 15, 2025; Revised: February 9, 2026; Accepted: February 17, 2026)

Abstract

This study compares the electrical energy consumption per passenger-kilometer (kWh/pass-km) and per car-kilometer (kWh/car-km) of the Northern Red Line electric train service between Krungthep Apiwat Central Station (KTW) and Rangsit Station (RST), focusing on two train types: the Hitachi Series 1000 (6 car) and the Hitachi Series 2000 (4 car). Energy consumption data were obtained from the SCADA system, while passenger volume data were collected from the OD Matrix of the AFC system during October 2023. The analysis revealed that the Series 1000 consumed more energy per passenger-kilometer (0.2179–0.2411 kWh/pass-km) compared to the Series 2000 (0.1547–0.1749 kWh/pass-km), and also exhibited higher energy consumption per car-kilometer (4.5933 versus 3.3335 kWh/car-km), reflecting differences in energy efficiency between the two train types. The findings have significant implications for railway operations: train selection should be aligned with passenger demand, with Series 2000 offering greater efficiency during low-demand periods; flexible scheduling that deploys Series 2000 during off-peak hours and Series 1000 during peak hours can balance energy efficiency with passenger capacity; long-term energy cost assessments can benefit from the observed differences in energy consumption per passenger-kilometer, particularly in scenarios of route expansion or increased service frequency; and empirical evidence from this study can support future procurement or retrofitting decisions to enhance energy efficiency, especially when expanding the system or increasing fleet size.

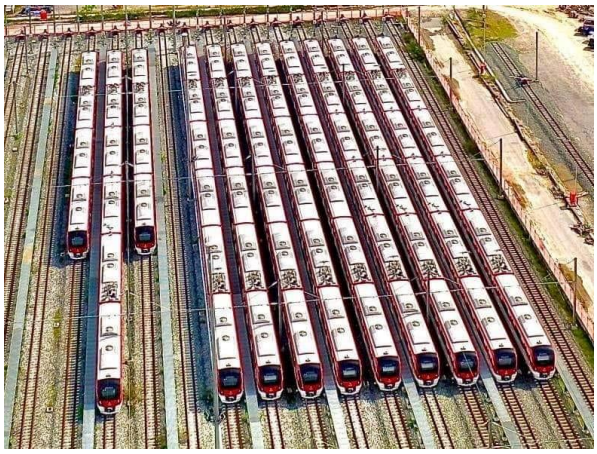
Keywords: SCADA, AFC, Kilowatt-Hours per Passenger-Kilometer, Kilowatt-Hours per Car-Kilometer

Please cite this article as: T. Toomtong, W. Siwakosit, W. Santipach and S. Limthongkul, "A Comparative Study of Energy Consumptions per Passenger between Hitachi Series 1000 EMU and Hitachi Series 2000 EMU for the State Railway of Thailand Northern Red Line," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 53-71, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดง เป็นโครงการที่สร้างเพื่อเชื่อมต่อการเดินทางระหว่างชานเมืองและในตัวเมืองกรุงเทพมหานคร ซึ่งการเดินทางด้วยรถไฟฟ้านั้นจะช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการจราจรติดขัดและสามารถควบคุมเวลาการเดินทางได้ดี กระทรวงคมนาคมและการรถไฟแห่งประเทศไทยจึงได้จัดการเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดงจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต (สายสีแดงเข้ม North Line) และจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีตลิ่งชัน (สายสีแดงอ่อน West Line) โดยให้บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด เป็นผู้ดูแลการเดินรถ โดยเริ่มเดินรถเต็มรูปแบบวันแรกเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน พ.ศ.2564 โดยปัจจุบันโครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดงมีรถไฟฟ้า 2 ชนิด คือ Hitachi Series 1000 (รถไฟฟ้า 6 Car) และ Hitachi Series 2000 (รถไฟฟ้า 4 Car) โดยรูปแบบรถไฟฟ้ามีระบบรับไฟฟ้าจากเหนือหัว (Overhead Catenary System) 25kV 1 เฟส ซึ่งรถแต่ละชนิดจะมีการใช้ไฟฟ้าที่ต่างกัน



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของรถไฟฟ้าสายสีแดงที่จอดอยู่ Depot [1]

โดยการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างและความสมเหตุสมผลในการเลือกใช้ชนิดรถในการให้บริการ ทั้งนี้จะมีการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า 2 ชนิด คือที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km) และหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดย-กิโลเมตร (kWh/pass-km) จากรูปแบบการเดินรถต่าง ๆ ทั้งนี้การบันทึกผลค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดอยู่ช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 ซึ่งเดือนนี้มีการจัดการเดินรถให้บริการหลายรูปแบบ ซึ่งจะสามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบได้

2. การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

2.1 งานวิจัยด้านการใช้พลังงานของระบบขนส่งสาธารณะ

งานของ พงศธร เหล่าอัน และคณะ (2565) [2] ศึกษาดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรถโดยสารในเมือง พบว่าการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบสามารถสะท้อนความคุ้มค่าของการเลือกใช้รูปแบบขนส่งสาธารณะได้อย่างชัดเจน

ภาณุพงศ์ นันทสินธ์ และคณะ (2561) [3] วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการรถโดยสารพลังงานไฟฟ้า โดยชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานและความสะดวกสบายเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมผู้โดยสาร

2.2 งานวิจัยด้านการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและรถไฟความเร็วสูง

Zhang et al. (2022) [4] ศึกษาการใช้พลังงานของรถไฟความเร็วสูงภายใต้สภาพการทดสอบจริง พบว่าความเร็วและสภาพการเดินรถมีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงาน

Zhao et al. (2022) [5] เสนอการปรับตารางเดินรถและการจัดรูปแบบขบวนรถไฟให้เหมาะสมกับความต้องการผู้โดยสาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

Kondo (2012) [6] พัฒนาวิธีการคำนวณพลังงานที่ใช้โดยรถไฟฟ้าแบบง่าย ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินการใช้พลังงานได้รวดเร็วโดยไม่ต้องใช้ข้อมูลเชิงลึกมาก

R. Mu et al. [7] กล่าวถึงการประเมินการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าผ่านแนวคิดด้านวิศวกรรมระบบบนพื้นฐานของแบบจำลอง (Model-Based Systems Engineering) โดยใช้แพลตฟอร์มการจำลองร่วม (Co-Simulation) และไลบรารี ZEMT เพื่อจำลองโครงร่างการใช้พลังงานของรถไฟความเร็วสูงในประเทศจีน ผลการศึกษาพบว่าการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่รวมปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมและระบบย่อยของรถไฟเข้าด้วยกัน สามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลการเดินรถจริง ซึ่งเป็นแนวทางที่มีความสมเหตุสมผลในการนำมาใช้ศึกษาเพื่อพยากรณ์และวางแผนการจัดการพลังงานอัจฉริยะสำหรับรถไฟฟ้าในอนาคต

BTS (2025) [8] รายงานค่าความเข้มการใช้พลังงาน (Energy Intensity) ของรูปแบบการเดินทางต่าง ๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ารถไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่ารถโดยสารและรถยนต์ส่วนบุคคล

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า

H. B. Zhao (2016) [9] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถไฟฟ้า EMU และการใช้พลังงาน พบว่าความเร็วที่สูงขึ้นทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น

Ghaviha et al. (2014) [10] เสนออัลกอริทึมการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้า EMU เพื่อลดการใช้พลังงานโดยการปรับการเร่งและการเบรก

Jong & Chang (2005) [11] พัฒนาโมเดลการประมาณการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า โดยเน้นการเชื่อมโยงระหว่างปัจจัยทางเทคนิค เช่น น้ำหนักขบวน ความเร็ว และความหนาแน่นผู้โดยสาร

2.4 การเชื่อมโยงวรรณกรรม

จากการทบทวน พบว่า งานวิจัยในประเทศไทย [2], [3] มุ่งเน้นไปที่รถโดยสารและพฤติกรรมผู้โดยสาร แต่ยังไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์เชิงลึกของรถไฟฟ้าในระบบเมือง

งานวิจัยต่างประเทศ [4]–[11] ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและรถไฟความเร็วสูง โดยเน้นการวิเคราะห์เชิงเทคนิค เช่น ความเร็ว ตารางเดินรถ และการควบคุมพลังงาน

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานที่เปรียบเทียบการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าสองรุ่นที่ให้บริการจริงในระบบเดียวกัน ภายใต้บริบทของประเทศไทย

2.5 ช่องว่างงานวิจัย (Research Gap)

1) ขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบในบริบทจริงของประเทศไทย แม้งานวิจัยต่างประเทศจะมีการวิเคราะห์พลังงานของรถไฟฟ้า แต่ยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบรถไฟฟ้าต่างรุ่นที่ใช้งานจริงในระบบเดียวกัน เช่น Hitachi Series 1000 (6 Car) และ Hitachi Series 2000 (4 Car) บนเส้นทางโครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดง

2) ขาดการเชื่อมโยงระหว่างข้อมูลการใช้พลังงานและพฤติกรรมผู้โดยสาร งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นด้านเทคนิค (เช่น ความเร็ว ตารางเดินรถ) แต่ยังไม่ได้นำข้อมูลผู้โดยสารจริง (OD Matrix จาก AFC) มาวิเคราะห์ร่วมกับการใช้พลังงาน

3) ขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ในระดับท้องถิ่น งานวิจัยในไทยยังมุ่งไปที่รถโดยสารหรือการตัดสินใจ

เลือกใช้บริการ แต่ยังไม่มีข้อมูลเชิงประจักษ์เกี่ยวกับการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าในระบบเมือง

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 การวัดและขอบเขตการเก็บค่าพลังงานไฟฟ้า

ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าชนิด 6 Car และ 4 Car และบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าจาก ห้องศูนย์ควบคุมการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดง โดยใช้โปรแกรมที่มาพร้อมกับระบบ SCADA ที่ชื่อ Query ซึ่งระบบจะอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าจากอาคารจ่ายไฟฟ้าย่อย (Bulk Substation) ของโครงการรถไฟฟ้าสายสีแดงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1 ตามรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์และการเลือกการอ่านค่าพลังงานจะอ่านออกมาทุก ๆ 1 นาที แล้วนำมาคำนวณต่อเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าหรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) โดยจะเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าของเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 ซึ่งเดือนดังกล่าวมีการเดินรถที่มีเวลาระยะห่างระหว่างขบวนรถ (Headway) ที่เหมือนกันตลอดทั้งเดือนและช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) คือ 07.00 น. ถึง 09.30 น. และ 17.00 น. ถึง 19.30 น. ของทุกวัน โดยมีการปรับการเดินรถโดยนำรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car มาวิ่งร่วมกัน 3 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 7 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car 1 ขบวน ในช่วงวันที่ 1 ถึง 3 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลาให้บริการปกติ (Off Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car จำนวน 6 ขบวน และช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car เพิ่ม 1 ขบวน และจะใช้รถไฟฟ้า 4 Car เพิ่ม 1 ขบวน

รูปแบบที่ 2 ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 6 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car 2 ขบวน ในช่วงวันที่ 4 ถึง 17 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลาให้บริการปกติ (Off Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car จำนวน 6 ขบวน และช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 4 Car เพิ่ม 2 ขบวน

รูปแบบที่ 3 ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 4 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car 4 ขบวน ในช่วงวันที่ 18 ถึง 31 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลาให้บริการปกติ (Off Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car จำนวน 2 ขบวนและใช้รถไฟฟ้า 4 Car จำนวน 4 ขบวน และช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car เพิ่ม 2 ขบวน

ซึ่งเส้นทางการเก็บค่าพลังงานของการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต (สายสีแดงเข้ม North Line) โดย SCADA จะแบ่งการวัดคือ

- North Line UP Track คือการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTW) ถึงสถานีรังสิต (RST)

- North Line Down Track คือการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงจากสถานีรังสิต (RST) ถึงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTW)

โดยจะนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการบันทึกข้อมูลจากระบบ SCADA ของโครงการรถไฟฟ้าสายสีแดงช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTW) ถึงสถานีรังสิต (RST) ที่มีการจัดการเดินรถ 3 รูปแบบของเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 มาวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดและเปรียบเทียบการใช้พลังงานตามรูปแบบการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบ และวิเคราะห์เปรียบเทียบกับปริมาณผู้โดยสารต่อตู้ แบ่งเป็น 2 กรณีสมมติฐาน

1) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อขบวนเท่ากัน หน่วยเป็น ผู้โดยสารต่อขบวน

2) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารต่อตู้เท่ากัน และนำผลจากสมมติฐานมาเป็นข้อมูลสำหรับการเสนอแนะ

บทความวิจัย (Research Article)

และการจัดการเลือกใช้ชนิดรถไฟฟ้าในการให้บริการหรือการจัดแผนการเดินรถสำหรับการเตรียมการกรณีมีปริมาณผู้โดยสารเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

กำหนดสมการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าดังสมการที่ 1

$$E_{t_i} = n_{6_i} U_6 + n_{4_i} U_4 \quad (1)$$

E_{t_i} คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าหรือหน่วยพลังงานไฟฟ้ารวมของช่วงวันที่บันทึกข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากระบบ SCADA หรือ หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

n_{6_i} คือ จำนวนขบวนรถไฟฟ้า 6 Car เฉลี่ยต่อวัน หน่วยเป็นขบวน

U_6 คือ ค่าพลังงานรถไฟฟ้า 6 Car ต่อขบวนต่อวัน หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

n_{4_i} คือ จำนวนขบวนรถไฟฟ้า 4 Car เฉลี่ยต่อวัน หน่วยเป็นขบวน

U_4 คือ ค่าพลังงานรถไฟฟ้า 4 Car ต่อขบวนต่อวัน หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

กำหนดสมการหาค่าจำนวนเที่ยววิ่งเฉลี่ยของรถทั้ง 2 ชนิดในแต่ละรูปแบบของการเดินรถ ตามสมการที่ 2

$$n_x = \frac{(A_x T_{op}) + (B_x T_p)}{(T_{op} + T_p)} \quad (2)$$

โดย x จะเท่ากับ 4 และ 6

A_x เท่ากับจำนวนขบวนของรถไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ ที่ใช้ให้บริการในเวลาปกติ (Off Peak Time) หน่วยเป็นขบวน

B_x เท่ากับจำนวนขบวนของรถไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ ที่ใช้ให้บริการในเวลาเร่งด่วน (Peak Time) หน่วยเป็นขบวน

T_{op} เท่ากับระยะเวลาให้บริการช่วงเวลาปกติ (Off Peak Time) หน่วยเป็นชั่วโมง

T_p เท่ากับระยะเวลาให้บริการช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak Time) หน่วยเป็นชั่วโมง

การคำนวณค่า U_6 และ U_4 ใช้สมมติฐานให้ค่า U_6 และ U_4 ในสภาวะการเดินรถที่ใกล้เคียงกันจะมีค่าเท่ากัน โดยเปรียบเทียบระหว่างช่วงวันที่มีค่า n_6 และ n_4 แตกต่างกันจาก 2 รูปแบบการเดินรถ ตามสมการที่ 2 ดังนี้

$$E_{t_1} = n_{6_1} U_6 + n_{4_1} U_4$$

$$E_{t_2} = n_{6_2} U_6 + n_{4_2} U_4$$

จะได้ค่าสมการหาค่า U_6 และ U_4 ดังนี้

$$\begin{pmatrix} U_4 \\ U_6 \end{pmatrix} = \frac{1}{n_{6_1} n_{4_2} - n_{6_2} n_{4_1}} \begin{bmatrix} n_{4_2} & -n_{4_1} \\ -n_{6_2} & n_{6_1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{t_1} \\ E_{t_2} \end{pmatrix}$$

จะได้ค่า U_4 และ U_6 ดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4

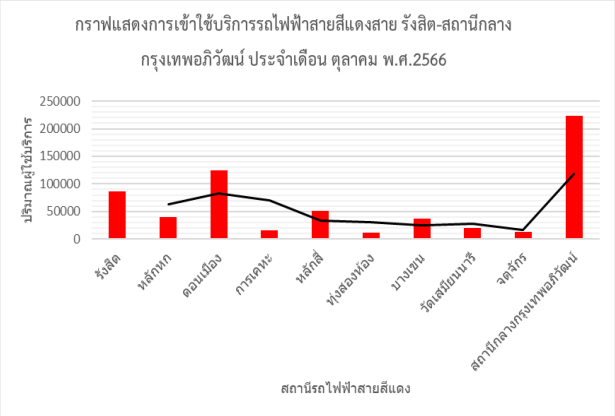
$$U_4 = \frac{E_{t_1} n_{4_2} - E_{t_2} n_{4_1}}{n_{6_1} n_{4_2} - n_{6_2} n_{4_1}} \quad (3)$$

$$U_6 = \frac{-E_{t_1} n_{6_2} + E_{t_2} n_{6_1}}{n_{6_1} n_{4_2} - n_{6_2} n_{4_1}} \quad (4)$$

โดย $n_{4_1} \neq n_{4_2}$ และ $n_{6_1} \neq n_{6_2}$

บทความวิจัย (Research Article)

ข้อมูลปริมาณผู้โดยสารที่มีการใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดงจากตาราง OD Matrix ซึ่งได้มาจากการบันทึกค่าของระบบจัดเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ (Automatic Fare Collection: AFC) ประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยจะใช้การอ่านค่าขาเข้าผู้โดยสารแทนการเข้าใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดง ตามรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงปริมาณผู้โดยสารใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดง ช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต ประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566

โดยกำหนดให้

C คือ จำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการใน 1 วัน จากข้อมูล OD Matrix โดยการเฉลี่ยจากข้อมูล OD Matrix ประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566

r_i เท่ากับจำนวนเที่ยววิ่งของแต่ละขบวนรถไฟฟ้าใน 1 วัน โดยสมมติให้รถแต่ละขบวนมีจำนวนเฉลี่ยเท่ากันใน 1 วันหน่วยเป็นเที่ยว-ขบวน ตามสมการที่ 5

$$r_i = \frac{\text{จำนวนเที่ยววิ่งของรถทุกขบวนใน 1 วัน}}{n_{4_i}+n_{6_i}} \quad (5)$$

S_{avg} คือระยะทางโดยสารเฉลี่ยของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด วิ่งให้บริการใน 1 วัน หน่วยเป็นกิโลเมตร (km) ตามสมการที่ 6

$$S_{avg} = 13.2r_i \quad (6)$$

การวิเคราะห์ปริมาณผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) แบ่งเป็น 2 กรณีสมมติฐานดังนี้

1) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อขบวนเท่ากัน หน่วยเป็น ผู้โดยสารต่อขบวน (pass/train)

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = \frac{C}{\text{จำนวนเที่ยววิ่งใน 1 วัน}} \quad (7)$$

จำนวนผู้โดยสารต่อตู้รถไฟฟ้าชนิด 6 Car

$$= \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน}}{6} \quad (8)$$

จำนวนผู้โดยสารต่อตู้รถไฟฟ้าชนิด 4 Car

$$= \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน}}{4} \quad (9)$$

วิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดที่หน่วยเป็น หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ดังสมการที่ 10 และ 11

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (10)$$

u_{e_6} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 6 Car

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (11)$$

u_{e_4} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 4 Car

2) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารต่อตู้เท่ากัน

กำหนดให้ p_i คือจำนวนผู้โดยสารต่อตู้ขอบรูปแบบการเดินรถที่ i หน่วยคือ ผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) ดังสมการที่ 12

$$p_i = \frac{C}{(4n_{4_i}r_i)+(6n_{6_i}r_i)} \quad (12)$$

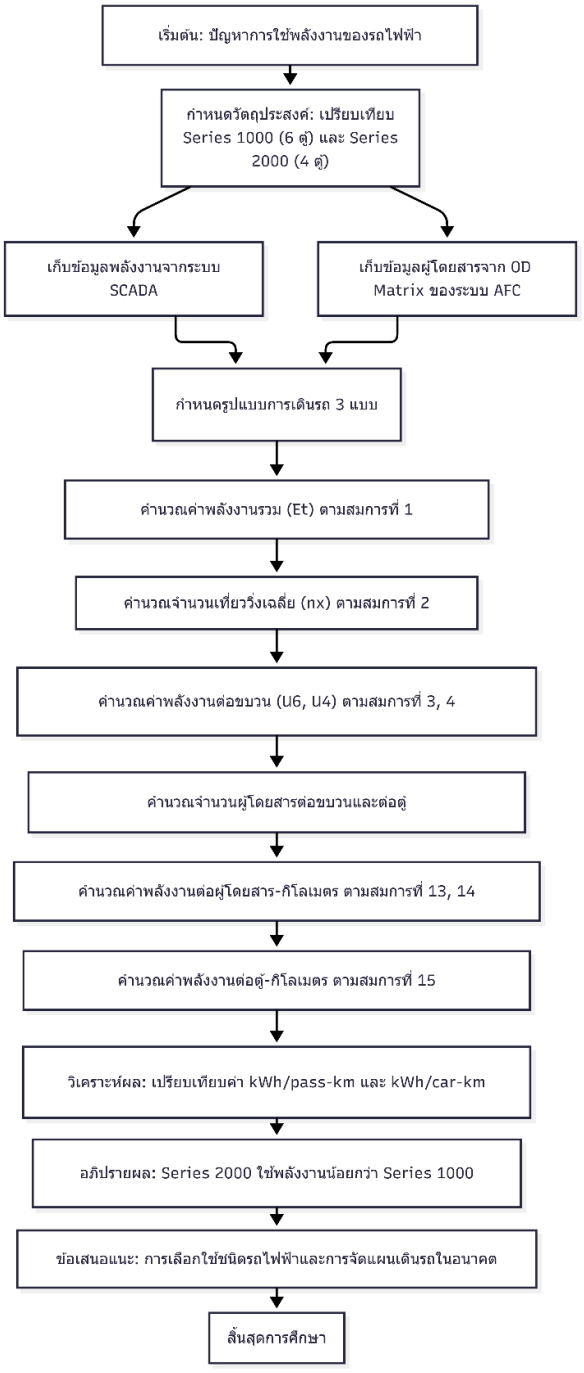
วิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดที่หน่วยคือ หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ดังสมการที่ 13 และ 14

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (13)$$

u_{e_6} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 6 Car

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (14)$$

u_{e_4} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 4 Car



รูปที่ 3 แสดง Flowchart วิธีการศึกษาและเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าของรถทั้ง 2 ชนิด

การวิเคราะห์หาค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด หน่วยคือ หน่วย

บทความวิจัย (Research Article)

พลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ดังสมการที่ 15

$$u'_{e_x} = (u_{e_x})(p_i) \quad (15)$$

u'_{e_x} ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการบันทึกค่าพลังงานในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2566 สามารถประมวลผลการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบในช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak Time) และช่วงเวลาปกติ (Off Peak) ได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบ	Off-Peak		Peak-Time	
	รถไฟฟ้า 6 Car	รถไฟฟ้า 4 Car	รถไฟฟ้า 6 Car	รถไฟฟ้า 4 Car
รูปแบบที่ 1	6 ขบวน	0 ขบวน	1 ขบวน	1 ขบวน
รูปแบบที่ 2	6 ขบวน	0 ขบวน	0 ขบวน	2 ขบวน
รูปแบบที่ 3	2 ขบวน	4 ขบวน	2 ขบวน	0 ขบวน

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้ารวมของช่วงวันที่บันทึกข้อมูลจากระบบ SCADA ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถของเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566

รูปแบบ	ค่าพลังงานรวมที่บันทึกได้จากระบบ SCADA (kWh)
รูปแบบที่ 1	71,664.44
รูปแบบที่ 2	54,406.96
รูปแบบที่ 3	47,898.82

ช่วงเวลา Peak และ Off Peak ในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ช่วงเวลาการให้บริการเดินรถของรถไฟฟ้าสายสีแดง [12]

จะได้ระยะเวลาให้บริการคือ 05.00 น. ถึง 00.00 น. ระยะเวลารวม 19 ชั่วโมง และจะได้ระยะเวลาให้บริการช่วง Off Peak 14 ชั่วโมง และระยะเวลาให้บริการช่วง Peak Time 5 ชั่วโมง

บทความวิจัย (Research Article)

รูปที่ 5 แสดงปริมาณเที่ยววิ่งในการให้บริการของรถไฟฟ้าสายสีแดงใน 1 วัน โดยในเส้นทางระหว่างสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต มีการให้บริการทั้งหมด 178 เที่ยว (รวมเที่ยววิ่งทั้งหมดของรถไฟฟ้าทุกขบวนจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิตและสถานีรังสิตถึงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์)



รูปที่ 5 แสดงข้อมูลจำนวนรถที่ให้บริการทั้งหมด 178 เที่ยวต่อวัน ของวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ.2566 [13]

จากการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าแล้วมาคำนวณหาหน่วยพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะคำนวณหาค่าจำนวนเที่ยววิ่งของรถไฟฟ้า 6 Car (n_6) และจำนวนรถไฟฟ้า 4 Car (n_4) จากการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบในช่วงเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 ข้อมูลจากการคำนวณของสมการที่ 2 สามารถคำนวณค่า n_{6_i} และ n_{4_i} ตามสมการที่ 2 ได้ตัวอย่างเช่น

สำหรับรูปแบบการเดินรถที่ 1 คือ ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 7 ขบวนและใช้รถไฟฟ้า 4 Car 1 ขบวน ในช่วงวันที่ 1 ถึง 3 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลา Off Peak ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 6 ขบวน และช่วงเวลา Peak Time จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car เพิ่ม 1 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car เพิ่ม 1 ขบวน

จากสมการที่ 2 คำนวณ n_6 จะใช้ A_6 เท่ากับ 6 ขบวนและ B_6 เท่ากับ 7 ขบวน และจากรูปที่ 4 ระยะเวลาให้บริการทั้งหมด 19 ชั่วโมง แบ่งเป็นช่วง Peak Time 5 ชั่วโมง และช่วง Off Peak Time 14 ชั่วโมง จะได้ T_p เท่ากับ 5 ชั่วโมง และ T_{op} เท่ากับ 14 ชั่วโมง

ดังนั้น

$$n_6 = \frac{(6\times14)+(7\times5)}{(14+5)} = 6.26$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณ n_6 และ n_4 ได้ตามตารางที่ 3 ของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ

ตารางที่ 3 สรุปจำนวนเที่ยววิ่งของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดสำหรับการเดินรถใน 3 รูปแบบของเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566

ลำดับ	A_x	B_x	T_p	T_{op}	n_x
รูปแบบ 1	6	7	5	14	n_6= 6.26
	0	1	5	14	n_4= 0.26
รูปแบบ 2	6	6	5	14	n_6= 6
	0	2	5	14	n_4= 0.52
รูปแบบ 3	2	4	5	14	n_6= 2.52
	4	4	5	14	n_4= 4

การคำนวณหาค่า U_6 และ U_4 เมื่อเปรียบเทียบการเดินรถรูปแบบที่ 2 และการเดินรถรูปแบบที่ 3 จากสมการที่ 3 และสมการที่ 4 จะได้ U_6 และ U_4 ดังนี้

บทความวิจัย (Research Article)

U_6=8484.0 kWh

U_4=6608.5 kWh

การคำนวณหาค่า U_6 และ U_4 เมื่อเปรียบเทียบการเดินรถรูปแบบที่ 1 และการเดินรถรูปแบบที่ 3 จากสมการที่ 3 และ สมการที่ 4 จะได้ U_6 และ U_4 ดังนี้

U_6=11246 kWh

U_4=4862 kWh

เพราะฉะนั้นจะได้ช่วงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อขบวนสูงสุดและต่ำสุดของการเลือกใช้รถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car ดังนี้

U_6=8484.0-11246 kWh

U_4=4862-6608.5 kWh

จากรูปที่ 2 สามารถคำนวณปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการต่อวันในเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 ได้ปริมาณผู้โดยสารใช้บริการต่อวันเฉลี่ยที่ 20,075 คน

จากสมการที่ 5 สามารถคำนวณ r_i ของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถได้ที่ 27.3 เที่ยว

จากสมการที่ 6 จะได้

$$S_{avg} = 13.2r_i$$

$$S_{avg} = (13.2)(27.30)$$

$$S_{avg} = 360.36 \text{ km}$$

การวิเคราะห์ปริมาณผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) แบ่งเป็น 2 กรณีสมมติฐานดังนี้

1) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อขบวนเท่ากัน หน่วยเป็น ผู้โดยสารต่อขบวน (pass/train)

จากสมการที่ 7

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = \frac{C}{\text{จำนวนเที่ยววิ่งใน 1 วัน}}$$

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = \frac{20{,}075}{178}$$

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = 112.78 \ \frac{\text{pass}}{\text{train}}$$

จากสมการที่ 8 จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ของรถไฟฟ้า 6 Car จะได้เท่ากับ

$$\frac{112.78}{6} = 18.79 \ \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 9 จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ของรถไฟฟ้า 4 Car จะได้เท่ากับ

$$\frac{112.78}{4} = 28.19 \ \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 10 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า 6 Car หน่วยเป็น หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_6} = \frac{8484.0\text{-}11246}{(6)(360.36)(18.79)} \ \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$u_{e_6} = 0.2088\text{-}0.2768 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จากสมการที่ 11 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า 4 Car หน่วยเป็น หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_4} = \frac{4862\text{-}6608.5}{(4)(360.36)(28.19)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1196\text{-}0.1626 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จะได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) เมื่อเปรียบเทียบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด จากสมมติฐานที่ 1 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดของทั้ง 3 รูปแบบจากสมมติฐานที่ 1

ลำดับรูปแบบ	หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)
1	u_{e_6}=0.2088-0.2768
	u_{e_4}=0.1196-0.1626
2	u_{e_6}=0.2088-0.2768
	u_{e_4}=0.1196-0.1626
3	u_{e_6}=0.2088-0.2768
	u_{e_4}=0.1196-0.1626

2) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารต่อตู้เท่ากัน

กำหนดให้ p คือจำนวนผู้โดยสารต่อตู้ หน่วยคือผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) โดยแบ่งตามรูปแบบการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบการเดินที่ 1 จะได้ค่า n_x จากตารางที่ 3 ดังนี้

n_6= 6.26 และ n_4= 0.26

จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ (p_i) จากสมการที่ 12 ของรูปแบบการเดินรถที่ 1 จะได้ p_1 ดังนี้

$$p_1 = \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารใน 1 วัน}}{(4n_{4_i}r_i)+(6n_{6_i}r_i)} \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

$$p_1 = \frac{20{,}075}{(4)(0.26)(27.3)+(6)(6.26)(27.3)}$$

$$p_1 = 19.05 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 13 จะได้ค่า u_{e_6} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 6 Car

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_6} = \frac{8484.0\text{-}11246}{(6)(360.36)(19.05)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_6} = 0.2059\text{-}0.2730 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

บทความวิจัย (Research Article)

จากสมการที่ 14 จะได้ค่า u_{e_4} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_4} = \frac{4862\text{-}6608.5}{(4)(360.36)(19.05)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1770\text{-}0.2406 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

รูปแบบการเดินที่ 2 จะได้ค่า n_x จากตารางที่ 3 ดังนี้

$n_6 = 6$ และ $n_4 = 0.52$

จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ (p_i) จากสมการที่ 12 ของรูปแบบการเดินรถที่ 2 จะได้ p_2 ดังนี้

$$p_2 = \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารใน 1 วัน}}{(4n_{4_i} r_i)+(6n_{6_i} r_i)} \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

$$p_2 = \frac{20{,}075}{(4)(0.52)(27.3)+(6)(6)(27.3)}$$

$$p_2 = 19.31 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 13 จะได้ค่า u_{e_6} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 6 Car

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_6} = \frac{8484.0\text{-}11246}{(6)(360.36)(19.31)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_6} = 0.2031\text{-}0.2693 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จากสมการที่ 14 จะได้ค่า u_{e_4} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_4} = \frac{4862\text{-}6608.5}{(4)(360.36)(19.31)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1746\text{-}0.2374 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

รูปแบบการเดินที่ 3 จะได้ค่า n_x จากตารางที่ 3 ดังนี้

$n_6 = 2.52$ และ $n_4 = 4$

จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ (p_i) จากสมการที่ 12 ของรูปแบบการเดินรถที่ 1 จะได้ p_3 ดังนี้

$$p_3 = \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารใน 1 วัน}}{(4n_{4_i} r_i)+(6n_{6_i} r_i)} \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

$$p_3 = \frac{20{,}075}{(4)(4)(27.3)+(6)(2.52)(27.3)}$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$p_3 = 23.63 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 13 จะได้ค่า u_{e_6} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 6 Car

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_6} = \frac{8484.0\text{-}11246}{(6)(360.36)(23.63)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_6} = 0.1660\text{-}0.2202 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จากสมการที่ 14 จะได้ค่า u_{e_4} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_4} = \frac{4862\text{-}6608.5}{(4)(360.36)(23.63)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1428\text{-}0.1940 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จะได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) เมื่อเปรียบเทียบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดจากสมมติฐานที่ 2 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถจากสมมติฐานที่ 2

ลำดับรูปแบบ	ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)
1	u_{e_6} =0.2059-0.2730
	u_{e_4} =0.1770-0.2406

ตารางที่ 5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถจากสมมติฐานที่ 2 (ต่อ)

ลำดับรูปแบบ	ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)
2	u_{e_6} =0.2031-0.2693
	u_{e_4} =0.1746-0.2374
3	u_{e_6} =0.1660-0.2202
	u_{e_4} =0.1428-0.1940

ดังนั้นจะได้ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยช่วงพลังงานไฟฟ้าของการเลือกใช้รถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car ที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ของสมมติฐานที่ 1 และ 2 ดังแสดงการเปรียบเทียบตามตารางที่ 6

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 6 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์จากทั้ง 2 สมมติฐาน

รูปแบบ		ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 1 (kWh/pass-km)	ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 2 (kWh/pass-km)	ค่าเฉลี่ยช่วงพลังงานไฟฟ้าของแต่ละรูปแบบ
1	u_{e_6}	0.2088-0.2768	0.2059-0.2730	0.2411
	u_{e_4}	0.1196-0.1626	0.1770-0.2406	0.1749
2	u_{e_6}	0.2088-0.2768	0.2031-0.2693	0.2395
	u_{e_4}	0.1196-0.1626	0.1746-0.2374	0.1735
3	u_{e_6}	0.2088-0.2768	0.1660-0.2202	0.2179
	u_{e_4}	0.1196-0.1626	0.1428-0.1940	0.1547

จากผลตารางที่ 6 ที่ค่าเฉลี่ยของหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ โดยจากการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าสูงสุดของรถไฟฟ้า 4 Car มีโอกาสที่จะมากกว่าของค่าต่ำสุดรถไฟฟ้า 6 Car ซึ่งจากค่าเฉลี่ยของช่วงพลังงานไฟฟ้าของการจัดรูปแบบการเดินรถที่มีการนำรถไฟฟ้ามาวิ่งร่วมกันนั้นยังสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้จริง

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km) จากตารางที่ 5 โดย u'_{e_x} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km) จากสมการที่ 15 จะได้

$$u'_{e_x} = (u_{e_x})(p_i)$$

ในตารางที่ 7 แสดงค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km) ของสมมติฐานทั้ง 2 กรณี ซึ่งจะได้ว่าค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ ซึ่งจะได้ค่าของรถไฟฟ้า 6 Car เท่ากับ 4.5933 (kWh/car-km) และของรถไฟฟ้า 4 Car เท่ากับ 3.3335 (kWh/car-km) เท่ากันทั้ง 3 รูปแบบ จะวิเคราะห์ได้ว่าในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรนั้นค่าของรถไฟฟ้า 6 Car มีค่ามากกว่าของรถไฟฟ้า 4 Car ทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ โดยผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า รถไฟฟ้า 4 Car มีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรและต่อตู้-กิโลเมตรต่ำกว่ารถไฟฟ้า 6 Car อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างด้านประสิทธิภาพพลังงานของขบวนรถที่มีจำนวนตู้ต่างกัน โดยผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับแนวคิดของงานวิจัยที่ชี้ว่าการจัดรูปแบบขบวนรถและการบริหารจัดการการเดินรถมีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบรถไฟฟ้า [5], [10]

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 7 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km)

รูปแบบ		ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 1	ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 2	ค่าเฉลี่ยช่วงพลังงานของแต่ละรูปแบบ
1	u'_{e_6}	3.9768-5.2714	3.9238-5.2012	4.5933
	u'_{e_4}	2.2790-3.0976	3.3730-4.5846	3.3335
2	u'_{e_6}	3.9768-5.2714	3.9238-5.2012	4.5933
	u'_{e_4}	2.2790-3.0976	3.3730-4.5846	3.3335
3	u'_{e_6}	3.9768-5.2714	3.9238-5.2012	4.5933
	u'_{e_4}	2.2790-3.0976	3.3730-4.5846	3.3335

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสนับสนุนข้อค้นพบของ Zhang et al. [4] ที่ระบุว่าปัจจัยด้านสภาพการเดินรถและความเร็วมีผลต่อการใช้พลังงานของรถไฟความเร็วสูง ซึ่งในกรณีของรถไฟฟ้าสายสีแดงนี้ การเลือกใช้ขบวนที่มีจำนวนตู้เหมาะสมกับปริมาณผู้โดยสารจึงสามารถลดการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และขณะเดียวกัน งานของ Zhao [9] ก็ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและการใช้พลังงานของ EMU ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ที่แสดงให้เห็นว่าการจัดแผนการเดินรถที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานต่อผู้โดยสารได้จริง ซึ่งผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับแนวทางการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบขนส่งสาธารณะของ เหล่าอัน และคณะ [2] ที่เสนอให้ใช้ตัวชี้วัดด้านพลังงานและการปล่อยก๊าซเป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้รูปแบบการเดินทาง ซึ่งในกรณีนี้ การใช้ค่า kWh/pass-km และ kWh/car-km เป็นตัวชี้วัดสามารถสะท้อนประสิทธิภาพของขบวนรถไฟฟ้าได้อย่างชัดเจนและสามารถนำไปวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ใช้การขนส่งด้วยวิธีอื่น ๆ ได้อีกด้วย

5. สรุป

การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ระหว่างรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด คือรถไฟฟ้าชนิด Hitachi Series 1000 (6 Car) และรถไฟฟ้าชนิด Hitachi Series 2000 (4 Car) จะได้จากการบันทึกข้อมูลและคำนวณหาค่าผลลัพธ์เฉลี่ยในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร และค่าผลลัพธ์เฉลี่ยในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร ที่ใช้วิ่งที่ช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTW) ถึงสถานีรังสิต (RST) ซึ่งจากข้อมูลที่บันทึกมามีการปรับแผนการเดินรถทั้งหมด 3 รูปแบบ ภายในเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 โดยจะมีร้อยละผลต่างดังนี้

5.1 รูปแบบที่ 1

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_6} = 0.2411 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$u_{e_4} = 0.1479 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

มีค่าแตกต่างที่ร้อยละ 27.42

5.2 รูปแบบที่ 2

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_6} = 0.2395 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1735 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

มีค่าแตกต่างที่ร้อยละ 27.52

5.3 รูปแบบที่ 3

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_6} = 0.2179 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1547 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

มีค่าแตกต่างที่ร้อยละ 28.98 และการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ใช้วิ่งช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTW) ถึงสถานีรังสิต (RST) โดยจากการบันทึกข้อมูลและคำนวณหาค่าผลลัพธ์เฉลี่ยของการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบในเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 ภายใต้ 2 สมมติฐาน ดังตารางที่ 7 นี้คือ

$$u'_{e_6} = 4.5933 \frac{\text{kWh}}{\text{car-km}}$$

$$u'_{e_4} = 3.3335 \frac{\text{kWh}}{\text{car-km}}$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้ของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร ต่างกันอยู่ที่ร้อยละ 27.42

สรุปได้ว่าจากการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบนี้ที่มีการนำรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมาวิ่งร่วมกันในพื้นที่เดียวกัน ระยะทางเดียวกัน เวลาระยะห่างระหว่างขบวนรถ (Headway) เท่ากัน จะได้ว่าความแตกต่างของค่าพลังงานที่ใช้ของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ในหน่วยเปรียบเทียบ 2 หน่วยคือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร และหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร มีความแตกต่างกันประมาณร้อยละ 27 ถึง 28 และเนื่องจากการใช้บริการของรถไฟฟ้าสายสีแดงยังไม่สูงมากและปริมาณผู้โดยสารขณะนั้นมีปริมาณยังไม่มาก เมื่อเทียบกับรถไฟฟ้าสายอื่น ดังนั้นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดเมื่อเทียบกับปริมาณผู้โดยสารจึงยังไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร แต่ก็สามารถนำข้อมูลนี้เป็นข้อมูลสำหรับจัดเตรียมแผนการเลือกใช้รถในการวิ่งให้บริการเมื่อปริมาณผู้โดยสารเพิ่มขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับต้นทุนการซ่อมบำรุงและค่าใช้จ่ายต้นทุนทางไฟฟ้าให้สอดคล้องกันในอนาคตต่อไป โดยจะมีผลลัพธ์เชิงนัยสำคัญ (Implications) ดังนี้

1) การเลือกใช้ขบวนรถตามปริมาณผู้โดยสาร สำหรับรุ่น Hitachi Series 2000 (4 Car) เหมาะสมสำหรับการให้บริการในช่วง Off-Peak เนื่องจากใช้

พลังงานต่อผู้โดยสารต่ำกว่า Hitachi Series 1000 (6 Car) อย่างชัดเจน [8]

2) การวางแผนการเดินรถแบบยืดหยุ่น การจัดรูปแบบการเดินรถที่ผสมผสาน Hitachi Series 1000 (6 Car) และ Hitachi Series 2000 (4 Car) ตามช่วงเวลา สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนการดำเนินงาน [5]

3) การสนับสนุนการจัดซื้อและปรับปรุงขบวนรถในอนาคต ข้อมูลเชิงประจักษ์จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นหลักฐานประกอบการตัดสินใจในการจัดซื้อหรือปรับปรุงขบวนรถใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน [7], [11]

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทางศูนย์วิศวกรรมระบบราง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และบริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสืบค้นข้อมูลและทำวิจัยสำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าเพื่อมาเปรียบเทียบได้ตามหัวข้อของงานวิจัยได้ และขอขอบคุณกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ที่ได้รับพิจารณาเพื่อเผยแพร่บทความวิชาการนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Sara-Rail (สาระ-รถไฟ), "รถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000," *Facebook*, 2023. [Online]. Available: https://www.facebook.com/SaraRail.TH/photos. [Accessed: Nov. 15, 2024].

[2] พงศธร เหล่าอัน, ธเนศ เสถียรนาม, วิชุดา เสถียรนาม, นุวงศ์ ชลคุป, พีรวัฒน์ สายสิริรัตน์, และ ณัฐพล พรสัตยวงศ์, "ดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรถโดยสารประจำทางในเมืองขอนแก่น," *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, หน้า 22-26, ก.ค.-ก.ย. 2565.

[3] ภาณุพงศ์ นันทสินธ์, ดนัย นิลสุวรรณ, พรอนันต์ กิจอมรชัย, สิปปภาส สิริเกษมสุข, ศุภชัย เหมือนโพธิ์, และ ดำรง ถาวร, "ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการรถโดยสารสาธารณะพลังงานไฟฟ้า," *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 2, หน้า 55-58, ก.ค.-ธ.ค. 2561.

[4] Q. Zhang, H. Yu, X. Su, and Y. Li, "Energy Consumption Analysis of High-Speed Trains under Real Vehicle Test Conditions," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, pp. 1-13, May 2022. DOI: 10.1155/2022/1876579.

[5] P. Zhao, Y. Li, B. Han, R. Yang, and Z. Liu, "Integrated Optimization of Rolling Stock Scheduling and Flexible Train Formation Based on Passenger Demand for an Intercity High-Speed Railway," *Sustainability*, vol. 14, no. 5650, pp. 1-22, May 2022. DOI: 10.3390/su14095650.

[6] M. Kondo, "A Simplified Method to Calculate the Energy Consumed by Rolling Stock," *Railway Technology Avalanche*, no. 38, pp. 226-229, Mar. 2012.

[7] R. Mu, F. Gao, H. Zhao, F. Xia, and Y. Fu, "Simulation of EMU: Vehicle Energy Consumption Evaluation," in *Proceedings of the 5th International Conference on*

Electrical Engineering and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2021, Singapore: Springer, 2022, pp. 107-117. DOI: 10.1007/978-981-16-9913-9_10.

[8] Bureau of Transportation Statistics (BTS), "Energy Intensity of Passenger Modes," [online]. Available: https://www.bts.gov/content/energy-intensity-passenger-modes. [Accessed: 2 Dec. 2025].

[9] H. B. Zhao, "Relationship between Energy Consumption and Speed of the EMU," in *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical & Electronics Engineering and Computer Science (ICEEECS 2016)*, Beijing, China: Atlantis Press, 2016, pp. 579-583. DOI: 10.2991/iceeecs-16.2016.116.

[10] N. Ghaviha, F. Wallin, E. Dahlquist, and M. Bohlin, "An Algorithm for Optimal Control of an Electric Multiple Unit," in *Proceedings of the 55th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 55)*, Aalborg, Denmark, 2014, pp. 300-307.

[11] J.-C. Jong and E.-F. Chang, "Models for estimating energy consumption of electric trains," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp. 278-291, 2005.

[12] บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด, "รถไฟฟ้าสายสีแดง เพิ่มความถี่เดินรถ 10-15 นาที เริ่ม 15 ส.ค.นี้," [ออนไลน์]. Available: https://www.prachachat.net/breaking-news/news-1370409. [เข้าถึงเมื่อ: 15 พ.ย. 2024].

[13] บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด, "สรุปรายงานประจำวัน (Daily Report)," เอกสารภายในองค์กร, บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด, 2024.