บทความวิจัย

ผลกระทบในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าแบบด่วนพิเศษต่อการปรับปรุงคุณภาพในการให้บริการระบบรถไฟฟ้า: กรณีศึกษารถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล ช่วงหัวลำโพง–บางซื่อ

ชนิสรา ศรีประสงค์ และ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2797 0999 ต่อ 1302-1304,1342,1395 อีเมล: fengacs@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.01.006
รับเมื่อ 15 มิถุนายน 2563 แก้ไขเมื่อ 2 ตุลาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 13 พฤศจิกายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 19 มกราคม 2565
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองการเดินรถไฟฟ้าแบบด่วนพิเศษ (Express Operation) เพื่อแก้ไขปัญหาความจุในการให้บริการที่ไม่เพียงพอต่ออุปสงค์การเดินทางของผู้โดยสาร ในระบบรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคลช่วง หัวลำโพง–บางซื่อ ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. และชั่วโมงเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ของวันทำงานจันทร์ถึงศุกร์ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีจำนวนผู้โดยสารเข้ามาใช้บริการมากที่สุด โดยอาศัยจำนวนขบวนรถเท่าเดิมคือ 19 และ 18 ขบวน ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนการเดินรถให้เป็นแบบผสม คือจัดการเดินรถในรูปแบบด่วนพิเศษประกอบไปด้วยขบวนรถปกติ (Local Line) และขบวนรถพิเศษ (Express Line) ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ทิศทางมุ่งใต้ เริ่มต้นจากสถานีบางซื่อไปสิ้นสุดที่สถานีหัวลำโพง และในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ทิศทางมุ่งเหนือ เริ่มต้นจากสถานีหัวลำโพงไปสิ้นสุดที่สถานีบางซื่อ ผสมกับการจัดการเดินรถในรูปแบบปกติ (Normal Operation) ในส่วนของทิศทางขากลับของทั้งชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในปรับปรุงแผนการเดินรถไฟฟ้า เพื่อเพิ่มระดับการให้บริการของระบบรถไฟฟ้า โดยการลดความแออัดของผู้โดยสาร และลดระยะเวลาในการเดินทางของผู้โดยสารในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น ผลการทดลองพบว่า การเดินรถไฟฟ้าแบบด่วนพิเศษสามารถลดความแออัดของผู้โดยสารลงจากเดิม โดยในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง ในทิศทางมุ่งใต้ ขบวนรถปกติและขบวนรถพิเศษ ความหนาแน่นของผู้โดยสารลดลงร้อยละ 23 และ 15 ตามลำดับ และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ในทิศทางมุ่งเหนือ ขบวนรถปกติความหนาแน่นของผู้โดยสารเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 แต่ไม่เกินความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้ และขบวนรถพิเศษความหนาแน่นของผู้โดยสารลดลงร้อยละ 31 นอกจากนี้ การเดินรถไฟฟ้าแบบด่วนพิเศษยังสามารถย่นระยะเวลาในการเดินทางเมื่อเทียบกับการเดินรถในรูปแบบปกติ ซึ่งจะช่วยให้ผู้โดยสารสามารถประหยัดเวลาในการเดินทางลงได้ 11 นาที หรือร้อยละ 32 ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง ในทิศทางมุ่งใต้ และ 9 นาที หรือร้อยละ 26 ในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ในทิศทางมุ่งเหนือ แต่จะส่งผลให้ผู้โดยสารบางกลุ่มจะต้องเสียเวลาในการรอคอยรถไฟฟ้าในบางสถานีนานขึ้น

คำสำคัญ: รถไฟฟ้า การเดินรถ ขบวนรถด่วนพิเศษ ความจุ

การอ้างอิงบทความ: ชนิสรา ศรีประสงค์ และ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล, "ผลกระทบในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าแบบด่วนพิเศษต่อการปรับปรุงคุณภาพในการให้บริการระบบรถไฟฟ้า: กรณีศึกษารถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล ช่วงหัวลำโพง–บางซื่อ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 673–686, ก.ค.–ก.ย. 2565.

Research Article

Impacts of Experimental Express Operation on Level of Service Improvement: A Case Study of MRT Blue Line between Hualamphong and Bang Sue Junctions

Chanisara Sripasong and Ackchai Sirikijpanichkul*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2797 0999 Ext. 1302-1304,1342,1395, E–mail: fengacs@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.01.006
Received 15 June 2020; Revised 2 October 2020; Accepted 13 November 2020; Published online: 19 January 2022
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research is aimed at investigating the impacts of experimental express operation on level of service improvement of MRT Blue Line between Hua Lamphong and Bang Sue Junctions during the morning rush hour (7:00 to 8:00 am) and the evening rush hour (6:00 to 7:00 pm) on working days, Monday through Friday when the MRT system typically works in conjunction with crush loading conditions. The simulation of hybrid operation, i.e. the express operation in the peak direction and normal operation in the other direction, is investigated on the study route using the same number of transit units as normal operation, precisely 19 and 18 trains in the morning and evening peak hours respectively. The study explores the feasibility of operation plan improvement to enhance service levels through reducing passenger density inside the trains and lessening operating time during the peak hours. It is found that the express operation not only diminishes the passenger density but also reduces the operating time between the terminals in the morning and evening peak hours. In the morning peak, the passenger density on local and express line reduces by 23 and 15 percent respectively, in comparison with those of the normal operation. In the evening peak, the passenger density on local line increases by 11 percent but does not exceed the line capacity whereas the passenger density on express line decreases by 31 percent. In addition, the express line can save passenger travel time by 11 minutes (32%) and 9 minutes (26%) in the morning and evening peaks. However, some passengers on the local line of the express operation will experience a longer waiting time at the local stations due to longer headway operation.

Keywords: Railway, Operation System, Express Operation, Line Capacity

Please cite this article as: C. Sripasong and A. Sirikijpanichkul, "Impacts of experimental express operation on level of service improvement: A case study of MRT blue line between Hualamphong and Bang Sue junctions," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 673–686, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นหนึ่งในรูปแบบการเดินทางที่มีบทบาทสำคัญในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีส่วนช่วยลดปัญหาการจราจรติดขัด ช่วยให้การเคลื่อนย้ายผู้โดยสารระหว่างคู่การเดินทางภายในเขตเมืองเป็นไปอย่างสะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รถไฟฟ้าจึงเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ได้รับความนิยมสำหรับการเดินทางในเขตเมือง โดยเฉพาะในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็นของวันทำงานจันทร์ถึงศุกร์ ซึ่งจะมีผู้โดยสารเข้ามาใช้บริการเป็นจำนวนมาก จนกระทั่งระดับการให้บริการไม่เป็นไปตามที่ผู้ให้บริการหรือผู้ใช้บริการคาดหวังไว้ เช่น การรอคอยขบวนรถที่นาน เกิดความล่าช้า รวมไปถึงความหนาแน่นของผู้โดยสารที่มีมากจนเป็นเหตุให้เกิดการตกค้างของผู้โดยสารบริเวณสถานี จึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ ที่จะดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในปรับปรุงรูปแบบของแผนการเดินรถไฟฟ้า เพื่อลดความหนาแน่นของผู้โดยสาร และลดระยะเวลาในการเดินทางของผู้โดยสารในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น โดยการศึกษาผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง พบว่า

Zhujun และคณะ [1] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพรถไฟฟ้าใต้ดินด้วยการจัดการเดินรถไฟฟ้าแบบด่วนพิเศษ โดยนำเอาวิธี Guided Branch and Cut Algorithm มาใช้ในการปรับตารางเวลาให้เหมาะสมเพื่อลดเวลาในการเดินทางของผู้โดยสาร และอนุญาตให้มีการแซงกันในบางสถานีที่มีการเข้าสถานีทับซ้อนกันระหว่างขบวนรถด่วนพิเศษ และขบวนรถปกติ โดยมีการติดตั้งรางพิเศษเพื่อการหลีกรถ การจัดการเดินรถแบบใหม่มีผลทำให้เวลาในการเดินทางของผู้โดยสารลดลงร้อยละ 11.31 แต่จะมีผู้โดยสารบางส่วนที่ใช้บริการในขบวนรถแบบปกติที่จะต้องเสียเวลาในการรอคอยที่สถานีเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะห่างของเวลาระหว่างขบวนรถนานขึ้น

Sunduck และคณะ [2] ได้ศึกษาเส้นทางรถไฟความเร็วสูง Korean Train Express (KTX) ระหว่างโซลกับปูซาน ที่มีผู้โดยสารใช้บริการเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาจำนวนผู้โดยสารหนาแน่น และเกิดความล่าช้า โดยศึกษาถึงการเดินรถในลักษณะ Express Operation ระหว่างสถานีต้นทางกับปลายทาง โดยทำการทดสอบการเดินรถด้วยวิธี Train Control System/Comprehensive System Integration Test ซึ่งเป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ระบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับ แสดงผล และโปรแกรมการควบคุมที่ถูกออกแบบพัฒนา เพื่อให้สอดคล้องกับระบบอาณัติสัญญาณการควบคุมการเดินรถยุคใหม่ ซึ่งรวมถึงระบบป้องกันรถไฟขั้นสูง และการเดินรถไฟฟ้าในเส้นทางนี้ไม่ติดตั้งรางหลีก เนื่องจากเป็นการใช้รางรถไฟเฉพาะขบวนรถด่วนพิเศษเท่านั้น การจัดการเดินรถแบบใหม่สามารถลดระยะเวลาในการเดินทางด้วยรถไฟระหว่างเมืองใหญ่ลงได้ถึงร้อยละ 50

Xueqiao และคณะ [3] ศึกษาเส้นทางรถไฟความเร็วสูงระหว่างกรุงปักกิ่งกับเซี่ยงไฮ้ โดยงานวิจัยนี้พิจารณาการออกแบบเส้นทางรถไฟฟ้าด่วนพิเศษ โดยไม่ติดตั้งรางหลีก และมีการใช้วิธีสร้างแบบจำลอง Simplex กับข้อมูลคู่การเดินทาง (Origin-destination) เพื่อออกแบบการให้บริการที่สอดคล้องกับความต้องการในการขนส่งสินค้าระหว่างเมือง และการเดินทางของผู้โดยสารรถไฟฟ้า โดยจะแบ่งรถไฟฟ้าออกเป็น 2 สาย สายที่ 1 จะจอดรถไฟฟ้าทุกสถานี สายที่ 2 จะจอดตามสถานีที่มีจำนวนผู้ใช้บริการสูง งานวิจัยดังกล่าวสามารถลดจำนวนรถไฟฟ้าลงได้ เนื่องจากไม่ต้องจอดรถไฟฟ้าทุกสถานีทำให้ใช้เวลาการเดินรถได้รวดเร็วขึ้นส่งผลให้ใช้จำนวนรถไฟฟ้าลดลง

ปารเมษฐ์ และเอกชัย [4] ได้ศึกษาความล่าช้าในการเดินรถของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ จนส่งผลกระทบต่อความจุ และเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาด้วยการเดินรถแบบด่วนพิเศษในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า โดยสามารถที่จะจัดการเดินรถโดยใช้ขบวนรถเท่าเดิม แต่แบ่งการให้บริการออกเป็นขบวนรถแบบปกติ และขบวนรถแบบด่วนพิเศษ ผลจากการเดินรถรูปแบบใหม่ช่วยลดความแออัดในการให้บริการลงได้ถึงร้อยละ 20 แต่จำเป็นที่จะต้องมีการก่อสร้างรางหลีกเพิ่มเติมบริเวณช่วงกิโลเมตรที่ 27 เพื่อที่จะให้ขบวนรถแบบพิเศษสามารถแซงขบวนรถปกติได้

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาทดลองรูปแบบการเดินรถไฟฟ้า

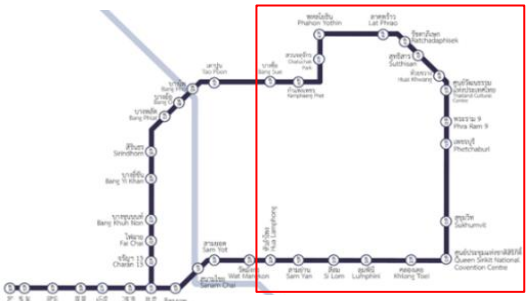
มหานคร สายเฉลิมรัชมงคล เส้นทางหัวลำโพง–บางซื่อ เพื่อแก้ไขปัญหาการเดินรถในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเย็น ซึ่งเป็นช่วงที่มีผู้โดยสารเข้ามาใช้บริการมากที่สุด โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองจัดการเดินรถรูปแบบใหม่ในลักษณะของการเดินรถแบบด่วนพิเศษ โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณผู้โดยสารที่เข้า–ออกในแต่ละสถานี เพื่อกำหนดสถานีหลักในเส้นทางการเดินรถแบบด่วนพิเศษ ปรับเปลี่ยนระยะห่างเชิงเวลาระหว่างขบวนรถ จำนวนขบวนรถ ความจุ และกำหนดจุดแซง เพื่อก่อสร้างทางหลีกเพิ่มเติมเนื่องจากมีการใช้รางร่วมกันระหว่างขบวนรถแบบปกติกับขบวนรถแบบด่วนพิเศษ และสุดท้ายการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงแผนการเดินรถไฟฟ้า เพื่อลดความแออัดของผู้โดยสาร และระยะเวลาในการเดินทางของผู้โดยสารลงในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. และชั่วโมงเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. โดยมีระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

2.1 การศึกษาระบบรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล เส้นทางหัวลำโพง–บางซื่อ

รถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล (สีน้ำเงิน) ในปัจจุบัน เมื่อรวมส่วนต่อขยายมีระยะทางรวม 47 กิโลเมตร 38 สถานี ประกอบไปด้วยโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล สถานีหัวลำโพง–สถานีบางซื่อ ระยะทาง 20 กิโลเมตร 18 สถานี โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย สถานีหัวลำโพง–สถานีหลักสอง ระยะทาง 14 กิโลเมตร สถานีใต้ดิน 4 สถานี และสถานียกระดับ 7 สถานี รวม 11 สถานี และ สถานีบางซื่อ–สถานีท่าพระ ระยะทาง 13 กิโลเมตร เป็นสถานียกระดับ 9 สถานี [5]

เส้นทางรถไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เส้นทางในการเดินรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคลช่วงหัวลำโพง–บางซื่อ มีระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ผ่าน 18 สถานี ได้แก่ สถานีหัวลำโพง สามย่าน สีลม ลุมพินี คลองเตย ศูนย์ประชุมสิริกิติ์ สุขุมวิท เพชรบุรี พระราม 9 ศูนย์วัฒนธรรม ห้วยขวาง สุทธิสาร รัชดาภิเษก ลาดพร้าว พหลโยธิน สวนจตุจักร กำแพงเพชร และบางซื่อ ดังรูปที่ 1

บริเวณก่อนถึงสถานีปลายทางทั้ง 2 สถานี คือ หัวลำโพง และบางซื่อ จะมีประแจและทางตัดสำหรับให้รถไฟสามารถเข้าจอดหรือกลับรถได้ทั้ง 2 ชานชาลา ในส่วนทางหลีกจะอยู่บริเวณสถานีจตุจักร และสถานีพระราม 9 [5]



เส้นทางหัวลำโพง–บางซื่อ

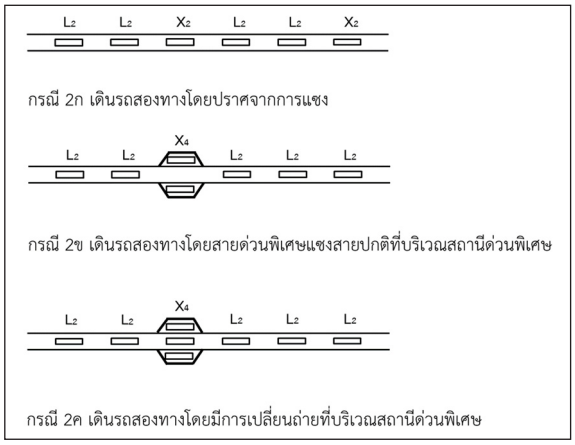
รูปที่ 1 เส้นทางการเดินรถโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล [5]

2.2 การศึกษาข้อมูลการเดินรถและปริมาณผู้โดยสาร

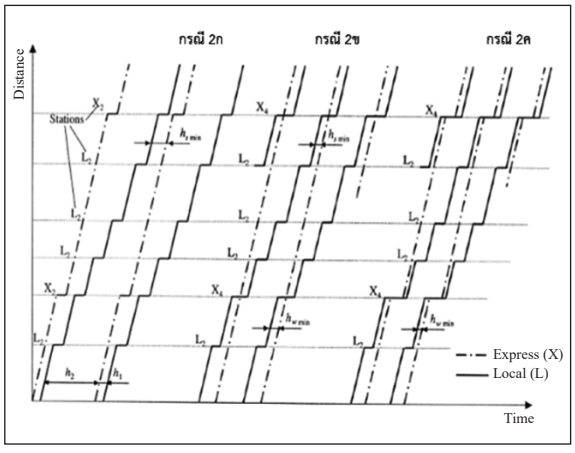
การเก็บข้อมูลการเดินรถของรถไฟฟ้าเส้นทางหัวลำโพง–บางซื่อ พบว่า มีจำนวนรถไฟฟ้าที่วิ่งให้บริการในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าจำนวน 19 ขบวน ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นจำนวน 18 ขบวน ขบวนละ 3 ตู้ สามารถบรรจุผู้โดยสารได้ประมาณ 886 ที่ต่อขบวน รถไฟฟ้ามีอัตราความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีช่วงเวลาการให้บริการทุกวันโดยไม่มีวันหยุดระหว่าง 06.00–24.00 น. โดยช่วงเวลาระหว่างวันที่มีการให้บริการขนส่งผู้โดยสารสูงสุด อยู่ในช่วงระหว่าง 06.00–09.00 น. และ 16.30–19.30 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์ โดยมีระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟ (Headway) ไม่เกิน 5 นาทีต่อขบวน และนอกช่วงเร่งด่วน ไม่เกิน 10 นาทีต่อขบวน ในแต่ละสถานีจะใช้เวลาในการหยุดจอดรับส่งผู้โดยสารประมาณ 42 วินาทีต่อสถานี [5]

โดยทั่วไปการจัดการเดินรถไฟฟ้าแบบพิเศษสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งได้ดังต่อไปนี้ [6]

- การเดินรถแบบเจาะจงสถานี (Skip-stop Operation)
- การเดินรถแบบด่วนพิเศษ (Express Operation)
- การเดินรถแบบด่วนพิเศษระหว่างพื้นที่ย่อย (Zonal Operation)



รูปที่ 2 รูปแบบของผังการจัดวางทางและสถานี



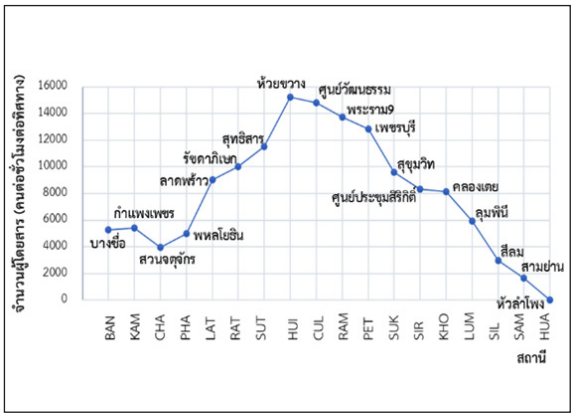
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา [6]

การวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนผู้โดยสารที่เข้า–ออกระบบโดยเฉลี่ย และจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อวันที่เดินทางระหว่างคู่สถานีต้นทาง–สถานีปลายทางของการเดินทาง พบว่า การจัดการเดินรถในรูปแบบด่วนพิเศษสอดคล้องกับพฤติกรรมการเดินทางของผู้โดยสารที่เข้ามาใช้บริการ ผู้วิจัยจึงจัดการเดินรถใหม่ในรูปแบบด่วนพิเศษ ซึ่งการเดินรถแบบด่วนพิเศษนั้น สามารถจำแนกตามรูปแบบของลักษณะราง ดังรูปที่ 2 โดยในงานวิจัยนี้ รูปแบบของผังทางรถไฟจะสอดคล้องใกล้เคียงกับกรณี 2ค และมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา เป็นดังแสดงดังรูปที่ 3

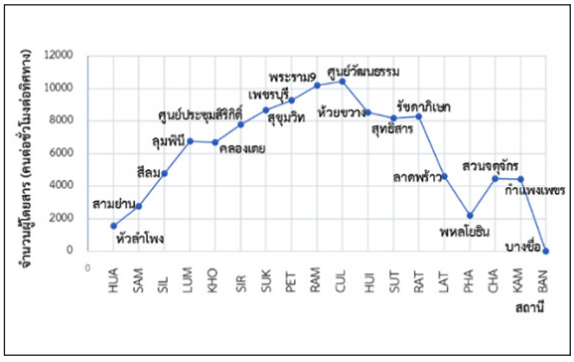
ในการจัดการเดินรถแบบด่วนพิเศษเส้นทางรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า–เย็น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลผู้โดยสารที่ทันสมัยที่สุดที่มีอยู่ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 โดยทำการแปลงชุดข้อมูลทั้งหมดให้เป็นปีฐานคือ พ.ศ. 2562 จากอัตราการเติบโตของผู้โดยสารรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.21 ต่อปี [7] ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกทำการวิเคราะห์ข้อมูลผู้โดยสารในช่วงเวลา 7.00–8.00 น. และ 18.00–19.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีผู้โดยสารใช้บริการมากที่สุด โดยในช่วงเวลา 7.00–8.00 น. ผู้วิจัยเลือกทำการวิเคราะห์การเดินรถในทิศทางเข้าเมืองหรือทิศมุ่งใต้ คือจากชุมทางบางซื่อไปชุมทางหัวลำโพง เพราะจากข้อมูลในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าผู้โดยสารส่วนใหญ่จะเดินทางจากทิศทางนอกเมืองเข้าไปยังในเมือง ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ผู้วิจัยเลือกทำการวิเคราะห์การเดินรถในทิศทางกลับกัน

ข้อมูลปริมาณผู้โดยสารที่เข้า–ออกแต่ละสถานีของเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น ทำให้ทราบถึงจำนวนผู้โดยสารสะสมสูงสุดตลอดเส้นทางการเดินรถ โดยในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ตอนเดินรถที่มีจำนวนผู้โดยสารสะสมสูงสุด คือตอนห้วยขวาง–ศูนย์วัฒนธรรม มีจำนวนผู้โดยสารสะสม 15,231 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง [7] ดังแสดงในรูปที่ 4 และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ตอนเดินรถที่มีจำนวนผู้โดยสารสะสมสูงสุด คือตอนศูนย์วัฒนธรรม–ห้วยขวาง มีจำนวนผู้โดยสารสะสม 10,458 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง [7] ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจำนวนผู้โดยสารสะสมสูงสุดดังกล่าว สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุในการเดินรถแบบปกติในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า–เย็น [6] โดยอักษรย่อ HUA SAM SIL LUM KHO SIR SUK PET RAM CUL HUI SUT RAT LAT PHA CHA KAM BAN แทนสถานีหัวลำโพง สามย่าน สีลม ลุมพินี คลองเตย ศูนย์ประชุมสิริกิติ์ สุขุมวิท เพชรบุรี พระราม 9 ศูนย์วัฒนธรรม ห้วยขวาง สุทธิสาร รัชดาภิเษก ลาดพร้าว พหลโยธิน สวนจตุจักร กำแพงเพชร และบางซื่อ ตามลำดับ

โดยสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้คือต้องไม่เกิน 1 (100%) และถ้าค่าต่ำกว่า 1 (100 %) มากเท่าใดจะแสดงให้เห็นว่าความแออัด



รูปที่ 4 ปริมาณผู้โดยสารสูงสุดในแต่ละตอนเดินรถในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. ทิศทางมุ่งใต้ (Southbound) เข้าเมือง จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง



รูปที่ 5 ปริมาณผู้โดยสารสูงสุดในแต่ละตอนเดินรถในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ทิศทางมุ่งเหนือ (Northbound) ออกนอกเมือง จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ

ของผู้โดยสารก็จะน้อยลงตาม ค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุการเดินรถแบบปกติ ในปัจจุบันช่วงชั่วโมงเช้าเร่งด่วนเช้ามีค่าสูงถึง 111% (α = 15,231/13,712 = 1.11) ดังสมการที่ (9) ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นมีค่าถึง 81% (α = 10,458/12,990 = 0.81) ดังสมการที่ (9) และมีระยะเวลาในการเดินรถจากสถานีต้นทางไปถึงสถานีปลายทางประมาณ 35 นาที แสดงให้เห็นได้ว่าความจุของการเดินรถในชั่วโมงเร่งด่วนในเช้าไม่สามารถรองรับอุปสงค์ในการเดินทางของผู้โดยสารในปัจจุบันได้ และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นยังสามารถรองรับอุปสงค์ในการเดินทางของผู้โดยสารในปัจจุบันได้ แต่ความจุของระบบรถไฟฟ้าดังกล่าวอาจไม่สามารถรองรับอุปสงค์การเดินทางที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตได้

จากข้อมูลในตารางที่ 1 โดยครึ่งตารางด้านบนเหนือเส้นทแยงมุม แสดงปริมาณการเดินทางในทิศทางเข้าเมือง ช่วงเส้นทางระหว่างสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง ส่วนครึ่งตารางด้านล่างใต้เส้นทแยงมุม แสดงปริมาณการเดินทางในทิศทางออกนอกเมือง ช่วงเส้นทางระหว่างสถานีหัวลำโพงกลับไปยังสถานีบางซื่อ

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อวันที่เดินทางระหว่างสถานีต้นทางและสถานีปลายทางของการเดินทาง (OD) สำหรับวันทำงานธรรมดา และได้ทำการแปลงตารางข้อมูลจากจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อวันให้เป็นจำนวนผู้โดยสารต่อชั่วโมงในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น โดยการหาจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อวันที่สูงที่สุดในช่วงเช้าได้จากครึ่งตารางด้านบนเหนือเส้นทแยงมุม ส่วนในช่วงเย็นได้จากครึ่งตารางด้านล่างใต้เส้นทแยงมุม และทำการหารเวลาการให้บริการของรถไฟฟ้าคือ 18 ชั่วโมง เพื่อที่จะได้จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อชั่วโมง และทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปแบบของจำนวนผู้โดยสารต่อชั่วโมงในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น ได้จากการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างจำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อชั่วโมง กับจำนวนผู้โดยสารสะสมสูงสุดที่สุด จากข้อมูลปริมาณผู้โดยสารที่เข้า–ออกแต่ละสถานีของเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น โดยในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นจากค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นประมาณร้อยละ 20 และนำอัตราการเปลี่ยนแปลงในช่วงเช้าทำการคูณเข้าในครึ่งตารางด้านบนเหนือเส้นทแยงมุม ส่วนในช่วงเย็นนำอัตราการเปลี่ยนแปลงในช่วงเย็นคูณเข้าในครึ่งตารางด้านล่างใต้เส้นทแยงมุม จะได้ผลลัพธ์จำนวนผู้โดยสารต่อชั่วโมงในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น ที่เดินทางระหว่างสถานีต้นทางและสถานีปลายทางของการเดินทาง (OD) สำหรับวันทำงานธรรมดา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนผู้โดยสารต่อชั่วโมงในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น ที่เดินทางระหว่างสถานีต้นทางและสถานีปลายทางของการเดินทาง (OD) สำหรับวันทำงานธรรมดา [7]

D / O	BAN (X,X)	KAM (L)	CHA (X,X)	PHA (X,X)	LAT (X,X)	RAT (L)	SUT (L)	HUI (L)	CUL (L)	RAM (L,X)	PET (L,X)	SUK (X,X)	SIR (L)	KHO (L)	LUM (L)	SIL (X,X)	SAM (X,X)	HUA (X,X)
BAN(X,X)		609	9307	2975	2133	686	1897	1363	2904	3072	3254	4363	1371	328	1647	2559	1203	611
KAM(L)	420		484	639	619	115	377	385	457	455	389	416	178	53	205	219	139	244
CHA(X,X)	6513	373		8082	7703	1320	3133	2543	3221	3473	2789	1426	1244	305	1268	809	1055	1492
PHA(X,X)	2114	334	3868		2674	1043	2229	2639	2473	2859	2867	3465	1129	219	1209	1930	1174	1305
LAT(X,X)	1237	311	3707	1381		295	779	953	2002	2428	2859	6916	1641	260	2211	4805	1891	1879
RAT(L)	524	115	1074	882	305		795	844	1172	1611	1490	3399	664	125	740	1711	639	721
SUT(L)	1132	245	2204	1666	638	517		941	2219	3326	2922	7477	1203	213	1498	3563	1141	1352
HUI(L)	857	275	1773	1663	703	470	702		2291	4098	4240	11670	1734	303	1951	4967	1555	1775
CUL(L)	1761	293	2051	1730	1494	510	1377	1675		3029	4500	10758	1787	285	1559	4338	1227	1822
RAM(L,X)	1847	297	2053	1954	1953	745	2237	3154	2003		6707	15231	2613	428	2250	5756	1637	2690
PET(L,X)	1845	315	1670	2241	1936	655	1881	2448	3387	5187		9440	2686	449	3106	5008	2193	2877
SUK(X,X)	2251	275	799	2447	4576	1445	4339	6910	7516	10458	5290		4012	916	4709	3010	3127	5276
SIR(L)	879	165	825	965	1240	279	807	1128	1332	2051	1802	2947		170	732	2168	836	1492
KHO(L)	193	49	189	161	187	60	144	190	223	356	309	695	85		229	861	324	652
LUM(L)	881	148	785	949	1326	266	760	1006	1060	1651	1675	3308	441	144		3533	1037	1826
SIL(X,X)	1673	179	494	1624	3609	773	2244	3097	3119	4468	2838	2178	1408	583	2492		2912	4461
SAM(X,X)	843	105	724	978	1429	287	682	992	910	1291	1258	2194	522	205	724	2051		1916
HUA(X,X)	433	176	871	1008	1383	348	954	1176	1340	1939	1662	3663	988	476	1413	2897	1244	

หมายเหตุ: O แทน Origin หรือสถานีต้นทาง, D แทน Destination หรือสถานีปลายทาง, (X,X) หมายถึง เข้าและเย็นเป็นสถานี Express, (L) หมายถึง สถานี Local, (L,X) เข้าเป็นสถานี Local และเย็นเป็นสถานี Express

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะสามารถทราบถึงจำนวนผู้โดยสารที่เดินทางจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางของเส้นทางที่จัดการเดินรถในรูปแบบใหม่ในลักษณะขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ โดยจากข้อมูล OD ของสายการเดินรถขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ ที่ต่างกันจะสามารถแยกได้ว่าการเดินรถขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ จอดที่สถานีใด ได้จากหัวข้อของตารางที่ระบุ (X,X), (L), (L,X) โดยตอนเดินรถที่มีจำนวนผู้โดยสารสูงสุดในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าของขบวนรถปกติ มีปริมาณเท่ากับ 15,231 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ส่วนตอนเดินรถที่มีจำนวนผู้โดยสารสูงสุดในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าของขบวนรถพิเศษ มีปริมาณเท่ากับ 9,307 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง และตอนเดินรถที่มีจำนวนผู้โดยสารสูงสุดในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นของขบวนรถปกติ มีปริมาณเท่ากับ 7,516 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ส่วนตอนเดินรถที่มีจำนวนผู้โดยสารสูงสุดในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นของขบวนรถพิเศษ มีปริมาณเท่ากับ 10,458 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง จากข้อมูลที่กล่าวในข้างต้นจะสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุในการเดินแบบใหม่ขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า–เย็น เป็นดังแสดงในสมการที่ (9)

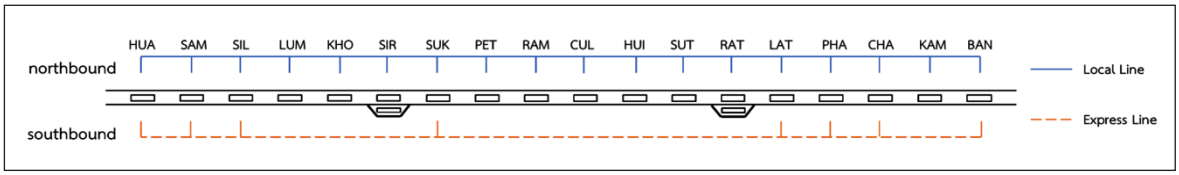
2.3 การทดลองจัดการเดินรถ

การกำหนดสถานีสำหรับการจอดรถไฟฟ้าแต่ละประเภทพิจารณาจากข้อมูลจำนวนผู้โดยสารที่ขึ้น–ลงรถไฟฟ้ารายสถานี ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า–เย็น [7] โดยรถไฟฟ้าขบวนด่วนพิเศษจะไม่หยุดจอดในบางสถานีที่มีจำนวนผู้โดยสารต้องการที่จะขึ้น–ลงรถไฟฟ้าที่บริเวณสถานีน้อยกว่าผู้โดยสารที่ต้องการจะนั่งรถไฟฟ้าไปต่อ เพื่อลดการสูญเสียเวลาในการการเดินทางลง [6] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1), (2) และ (3) ดังต่อไปนี้

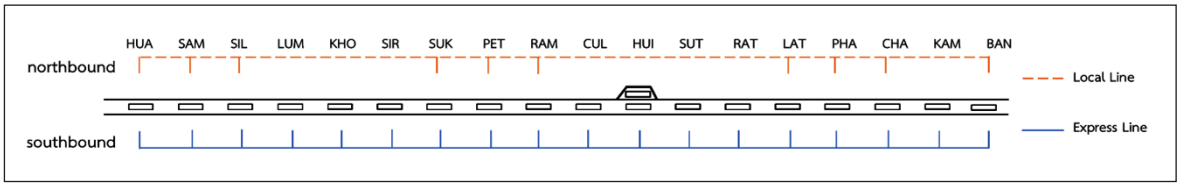
$$P_i - a_i = go_i \tag{1}$$

$$b_i + a_i = stop_i \tag{2}$$

$$\Delta_i = stop_i - go_i \tag{3}$$



รูปที่ 6 การเดินรถแบบ Express – Normal Operation ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. ทิศทางมุ่งใต้เข้าเมือง จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง สถานีที่ต้องเพิ่มรางหลีกได้แก่สถานีศูนย์ประชุมสิริกิติ์ และสถานีรัชดาภิเษก



รูปที่ 7 การเดินรถแบบ Express – Normal Operation ในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ทิศทางมุ่งเหนือออกนอกเมือง จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ สถานีที่ต้องเพิ่มรางหลีกได้แก่สถานีห้วยขวาง

โดย P_i คือ ปริมาณผู้โดยสารที่อยู่บนรถไฟเมื่อรถไฟถึงสถานี i (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

a_i คือ จำนวนผู้โดยสารลงจากรถไฟฟ้าที่บริเวณสถานี i (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

b_i คือ จำนวนผู้โดยสารขึ้นรถไฟฟ้าที่บริเวณสถานี i (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

go_i คือ ผู้โดยสารที่ต้องการจะนั่งรถต่อไปโดยไม่ต้องการที่จะจอดที่สถานี i (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

$stop_i$ คือ ผู้โดยสารที่ต้องการจะขึ้นและลงที่สถานี i (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

Δ_i คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง $stop_i$ และ go_i ที่สถานี i

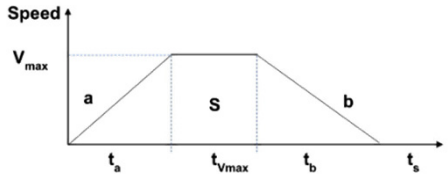
เมื่อแทนค่าในสมการที่ (1) และ (2) จะได้จำนวนผู้โดยสารที่ต้องการจะนั่งรถต่อไปโดย ไม่ ต้องการที่จะจอดที่สถานี และจำนวนผู้โดยสารที่ต้องการจะขึ้น–ลงที่สถานีในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า–เย็น ในวันทำงานจันทร์–ศุกร์ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (1) และ (2) ลงในสมการที่ (3) จะได้ค่าผลต่าง Δ_i ซึ่งมีข้อพิจารณาในการเลือกสถานีที่กำหนดเป็นสถานีจอดรถไฟฟ้าขบวนด่วนพิเศษ คือ หากค่า $stop_i$ มีค่ามากกว่าค่า go_i ในปริมาณมาก จะคัดเลือกสถานีนั้นๆ เป็นสถานีจอด เนื่องจากมีจำนวนผู้โดยสารที่ต้องการจะขึ้น–ลงที่สถานีมากกว่าจำนวนผู้โดยสารที่ต้องการจะนั่งรถไปต่อ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้ามีสถานีจอดรถไฟฟ้าขบวนด่วนพิเศษ 8 สถานี ได้แก่ บางซื่อ จตุจักร พหลโยธิน ลาดพร้าว สุขุมวิท สีลม สามย่าน และหัวลำโพง และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นมีสถานีจอดรถไฟฟ้าขบวนด่วนพิเศษ 10 สถานี ได้แก่ บางซื่อ จตุจักร พหลโยธิน ลาดพร้าว พระราม 9 เพชรบุรี สุขุมวิท สีลม สามย่าน และหัวลำโพง

ผู้วิจัยทำการทดลองจำแนกการเดินรถออกเป็น 2 แบบ ในช่วงเร่งด่วนเช้าและเย็น ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 การจัดการเดินรถแบบใหม่จะจัดในลักษณะใช้ทางร่วมกันระหว่างการเดินรถแบบปกติ และการเดินรถแบบพิเศษ โดยจะใช้ขบวนรถไฟฟ้าเท่าเดิมคือ ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าใช้ 19 ขบวน และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นใช้ 18 ขบวน ทั้งการเดินรถแบบปกติและแบบพิเศษจะใช้ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีเวลาจอดที่สถานีเฉลี่ยสถานีละ 42 วินาที โดยการจัดการเดินรถแบบใหม่จะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4)–(9) [6]

1) แสดงตัวอย่างการคำนวณการหาระยะเวลาในการเดินรถระหว่างสถานีของการเดินรถแบบด่วนพิเศษที่ช่วงสถานีหัวลำโพง–สามย่าน ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นดังสมการที่ (4) [6]



$$T_a = \frac{V_{\max}}{3.6a}$$

$$T_b = \frac{V_{\max}}{3.6b}$$

$$t_{v\max} = \frac{3.6s}{v_{\max}} - \frac{v_{\max}}{7.2}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right)$$

$$T_s = t_{v\max} + (t_a + t_b) + t_s$$

$$T_s = \left(\frac{3.6S}{V_{\max}} - \frac{V_{\max}}{7.2}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right)\right) + \frac{V_{\max}}{3.6}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right) + t_s \qquad (4)$$

$$T_s = \left(\frac{3.6\times 1,600}{80} - \frac{80}{7.2}\left(\frac{1}{0.9}+\frac{1}{0.9}\right)\right) + \frac{80}{3.6}\left(\frac{1}{0.9}+\frac{1}{0.9}\right) + 42$$

$= 139.29$ วินาที

เมื่อ T_S คือ ระยะเวลาในการเดินรถระหว่างสถานี (วินาที)

s คือ ระยะห่างระหว่างสถานี (เมตร)

$V_{\max}$ คือ ความเร็วสูงสุดของขบวนรถ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

a คือ อัตราเร่ง (เมตรต่อวินาที^{2})

b คือ อัตราหน่วง (เมตรต่อวินาที^{2})

t_s คือ ระยะเวลาหยุดจอดที่สถานี (วินาที)

t_a คือ เวลาที่ใช้ในการเร่ง (วินาที)

t_b คือ เวลาที่ใช้ในการหน่วง (วินาที)

$t_{v\max}$ คือ เวลาที่ใช้ในช่วงความเร็วสูงสุด (วินาที)

2) แสดงตัวอย่างการคำนวณการหาระยะเวลาการเดินรถ 1 รอบ ของการเดินรถแบบด่วนพิเศษ ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นดังสมการที่ (5) [6]

$$T = T_0^{'} + T_0^{''} + t_t^{'} + t_t^{''} \qquad (5)$$

$T = 25.86 + 34.83 + 2 + 2 = 64.69$ นาทีต่อรอบ

เมื่อ T คือ ระยะเวลาการเดินรถ 1 รอบ (นาทีต่อรอบ)

$T_0^{'}$ คือ ระยะเวลาในการเดินรถจากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง (นาที)

$T_0^{''}$ คือ ระยะเวลาในการเดินรถจากสถานีปลายทางถึงสถานีต้นทาง (นาที)

$t_t^{'}$ คือ ระยะเวลาหยุดพักรถที่สถานีต้นทาง (นาที)

$t_t^{''}$ คือ ระยะเวลาหยุดพักรถที่สถานีปลายทาง (นาที)

3) แสดงตัวอย่างการคำนวณการหาระยะห่างเชิงเวลาระหว่างขบวนรถไฟฟ้า ของการเดินรถของการเดินรถแบบด่วนพิเศษในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ซึ่งความจุของสายการเดินรถขบวนรถพิเศษนำข้อมูลมาจากตารางที่ 1 ดังสมการที่ (6) [6]

$$h = \frac{n \times C_v \times 60}{P}$$

$$h = \frac{3\times 296\times 60}{10,458} = 5.1 \text{ นาทีต่อขบวน} \qquad (6)$$

เมื่อ h คือ ระยะห่างเชิงเวลาระหว่างขบวนรถไฟฟ้า (นาทีต่อขบวน)

n คือ จำนวนตู้โดยสารต่อขบวน (ตู้ต่อขบวน)

C_v คือ ความจุของตู้โดยสาร (ที่ต่อตู้)

P คือ ปริมาณผู้โดยสาร (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

4) แสดงตัวอย่างการคำนวณจำนวนขบวนรถที่ใช้ในการเดินรถ ของการเดินรถแบบด่วนพิเศษในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นดังสมการที่ (7) [6]

$$N_{TU} = \frac{T}{h}$$

$$N_{TU} = \frac{64.69}{5.1} = 12.73 \text{ ขบวนต่อรอบ} \qquad (7)$$

เมื่อ N_{TU} คือ จำนวนขบวนรถ (ขบวนต่อรอบ)

T คือ ระยะเวลาในการเดินรถ 1 รอบ (นาทีต่อรอบ)

h คือ ระยะห่างเชิงเวลาระหว่างขบวน (นาทีต่อขบวน)

เนื่องจากจำนวนขบวนรถที่คำนวณได้ทั้งปกติ และด่วนพิเศษมีผลรวมมากกว่าจำนวนขบวนรถที่มีอยู่ ทำให้ต้องตั้งสมมติฐานจำนวนขบวนรถดังตารางที่ 2 และ 3 และทำให้ระยะห่างระหว่างขบวนเปลี่ยนตามไปด้วย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8) [6]

5) แสดงตัวอย่างการคำนวณระยะห่างเชิงเวลา เมื่อเปลี่ยนจำนวนขบวนรถ ของการเดินรถของการเดินรถแบบด่วนพิเศษในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ดังสมการที่ (8) [6]

$$h = \frac{T}{N_{TU}}$$
$$h = \frac{64.69}{10} = 6.5 \text{ นาทีต่อขบวน} \quad (8)$$

เมื่อ h คือ ระยะห่างเชิงเวลาระหว่างขบวน (นาทีต่อขบวน)

T คือ ระยะเวลาการเดินรถ 1 รอบ (นาทีต่อรอบ)

N_{TU} คือ จำนวนขบวนรถ (ขบวนต่อรอบ)

6) แสดงตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุในการเดินรถแบบด่วนพิเศษในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ดังสมการที่ (9) [6]

$$\alpha = \frac{P}{C}$$
$$\alpha = \frac{10,458}{16,435} = 0.64 = 64\% \quad (9)$$

เมื่อ α คือ ค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุในการเดินรถ (คนต่อที่)

P คือ ปริมาณผู้โดยสารสูงสุดที่เดินทางระหว่างสถานีที่ให้บริการ (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

C คือ ความจุของสายการเดินรถ (ที่ต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)

3. ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. ทิศทางมุ่งใต้ จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง และเวลาเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ทิศทางมุ่งเหนือ จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ในแต่ละวันจะมีผู้โดยสารใช้บริการมากที่สุด จึงทำการศึกษาการจัดการเดินรถแบบใหม่โดยจะใช้จำนวนขบวนรถเท่าเดิมคือในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าจะใช้รถจำนวน 19 ขบวน และในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นจะใช้รถจำนวน 18 ขบวน แต่จะปรับเปลี่ยนการเดินรถให้เป็นแบบผสม ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าเริ่มต้นจากสถานีบางซื่อไปสิ้นสุดที่สถานีหัวลำโพงในทิศทางมุ่งใต้ และในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นเริ่มต้นจากสถานีหัวลำโพงไปสิ้นสุดที่สถานีบางซื่อในทิศทางมุ่งเหนือ จะเป็นการเดินรถ ขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษในส่วนของขากลับรถของทั้งชั่วโมงเร่งด่วนเช้า และเย็นจะเป็นการเดินรถแบบปกติ (Normal Operation)

3.1 ผลการจัดการเดินรถแบบใหม่

จากการจัดการเดินรถแบบใหม่ ผู้วิจัยใช้ค่าความจุผู้โดยสารตามเดิมของรถไฟฟ้าโดยจะมีความจุ 886 ที่ต่อขบวน [5] จะได้ผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการที่ (4)–(9) ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ผลการจัดการเดินรถขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าทิศทางมุ่งใต้ จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง

เวลาเร่งด่วนเช้า	Local	Express
จำนวนผู้โดยสารสูงสุด (คน/ชม./ทิศทาง)	15,231	9,307
ระยะเวลาในการเดินรถ*ขาเข้า (นาที)	35	24
ระยะเวลาในการเดินรถ1รอบ (นาที)	74	63
ระยะห่างระหว่างขบวน (นาที/ขบวน)	6.1	8.9
จำนวนขบวนรถที่ตั้งสมมติฐาน (ขบวน)	12	7
ความจุสายการเดินรถ (ที่/ชม./ทิศทาง)	17,320	11,918
สัดส่วนผู้โดยสารต่อความจุ	88%	78%

หมายเหตุ: *ขาเข้า คือ เริ่มต้นจากสถานีบางซื่อไปสิ้นสุดที่สถานีหัวลำโพงในทิศทางมุ่งใต้ (Southbound)

ตารางที่ 3 ผลการจัดการเดินรถขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นทิศทางมุ่งเหนือ จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ

เวลาเร่งด่วนเย็น	Local	Express
จำนวนผู้โดยสารสูงสุด (คน/ชม./ทิศทาง)	7,516	10,458
ระยะเวลาในการเดินรถ*ขาออก (นาที)	35	26
ระยะเวลาในการเดินรถ1รอบ (นาที)	74	65
ระยะห่างระหว่างขบวน (นาที/ขบวน)	9.2	6.5
จำนวนขบวนรถที่ตั้งสมมติฐาน (ขบวน)	8	10
ความจุสายการเดินรถ (ที่/ชม./ทิศทาง)	11,547	16,435
สัดส่วนผู้โดยสารต่อความจุ	65%	64%

หมายเหตุ: *ขาออก คือ เริ่มต้นจากสถานีหัวลำโพงไปสิ้นสุดที่สถานีบางซื่อในทิศทางมุ่งเหนือ (Northbound)

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาในการเดินรถ

การจัดการเดินรถในรูปแบบใหม่ในสมการที่ (4)–(9) ที่ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 2 และ 3 เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาในการเดินรถ รถไฟฟ้าขบวนขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษมีเส้นกราฟที่ซ้อนทับกันในช่วงเวลากลับรถทำให้ไม่สามารถกลับรถได้ทันตามระยะห่างระหว่างขบวนที่คำนวณไว้ได้ จึงได้ทดลองปรับค่าระยะห่างระหว่างขบวนรถของสายการเดินรถในชั่วโมงเร่งด่วนช่วงเช้าและเย็นได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อนการจัดการเดินรถ และหลังการจัดการเดินรถที่ปรับค่าระยะห่างระหว่างขบวนรถด่วนพิเศษใหม่ในเวลาเร่งด่วนเช้า ทิศทางมุ่งใต้จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง

เวลาเร่งด่วนเช้า	Normal	Local	Express
ระยะห่างระหว่างขบวน (นาที/ขบวน)	3.9	6.1	11
ระยะเวลาในการเดินรถ (นาที)	35	35	24
จำนวนขบวนรถ (ขบวน)	19	12	7
ความจุสายการเดินรถ (ที่/ชม./ทิศทาง)	13,712	17,320	9,665
สัดส่วนผู้โดยสารต่อความจุ	111%	88%	96%

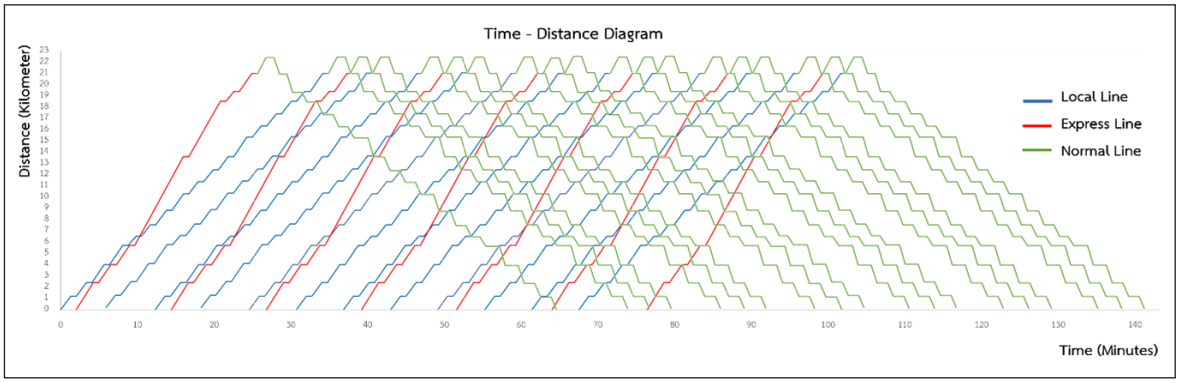
ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อนการจัดการเดินรถ และหลังการจัดการเดินรถที่ปรับค่าระยะห่างระหว่างขบวนรถปกติใหม่ในเวลาเร่งด่วนเย็น ทิศทางมุ่งเหนือจากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ

เวลาเร่งด่วนเย็น	Normal	Local	Express
ระยะห่างระหว่างขบวน (นาที/ขบวน)	4.1	13	6.5
ระยะเวลาในการเดินรถ (นาที)	35	35	26
จำนวนขบวนรถ (ขบวน)	18	8	10
ความจุสายการเดินรถ (ที่/ชม./ทิศทาง)	12,990	8,178	16,435
สัดส่วนผู้โดยสารต่อความจุ	81%	92%	64%

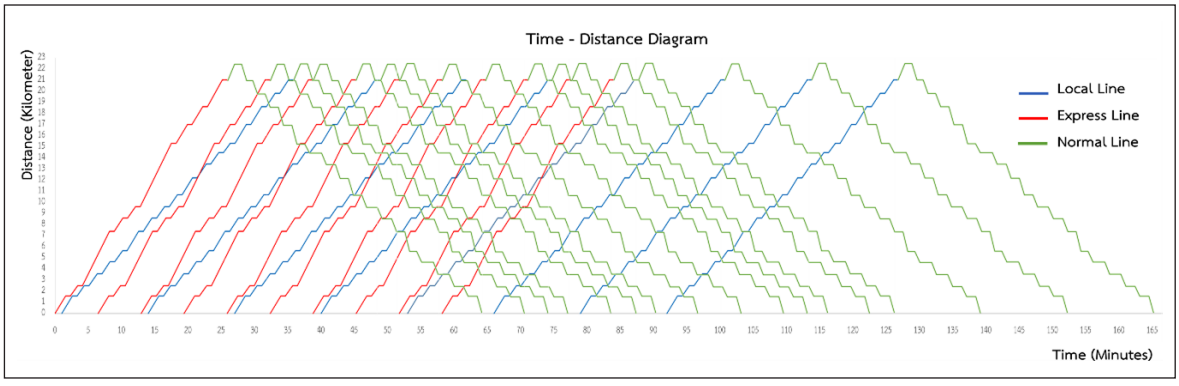
จากตารางที่ 4 หลังการจัดการเดินรถที่ปรับค่าระยะห่างระหว่างขบวนรถด่วนพิเศษ เป็น 11 นาที พบว่า ระยะห่างระหว่างขบวนของการเดินรถในรูปแบบใหม่ใช้เวลามากกว่าการเดินรถในรูปแบบเดิม ส่วนระยะเวลาในการเดินรถจากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง ทิศทางมุ่งใต้ ขบวนรถแบบพิเศษ (Express Line) จะสามารถประหยัดเวลาการเดินทางได้ 11 นาที หรือลดลงร้อยละ 32 และสัดส่วนผู้โดยสารต่อความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้คือต้องไม่เกินความจุที่ 100% จะเห็นได้ว่าการเดินรถในรูปแบบใหม่สัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุน้อยลงจากการเดินรถในรูปแบบเดิม กล่าวคือขบวนรถปกติลดลงร้อยละ 23 และขบวนรถพิเศษลดลงร้อยละ 15

จากตารางที่ 5 หลังการจัดการเดินรถที่ปรับค่าระยะห่างระหว่างขบวนรถปกติ เป็น 13 นาที พบว่า ระยะห่างระหว่างขบวนของการเดินรถในรูปแบบใหม่ใช้เวลามากกว่าการเดินรถในรูปแบบเดิม ส่วนระยะเวลาในการเดินรถจากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ทิศทางมุ่งเหนือ ขบวนรถแบบพิเศษขบวนรถพิเศษจะสามารถประหยัดเวลาการเดินทางได้ 9 นาที หรือลดลงร้อยละ 26 และสัดส่วนผู้โดยสารต่อความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้คือต้องไม่เกินความจุที่ 100% จะเห็นได้ว่าการเดินรถในรูปแบบใหม่สัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุขบวนรถพิเศษลดลงร้อยละ 17 และขบวนรถปกติเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 แต่ไม่เกินความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้

จากการปรับค่าระยะห่างระหว่างขบวนรถของสายการเดินรถในชั่วโมงเร่งด่วนช่วงเช้าและเย็น ตามตารางที่ 4 และ 5 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาในการเดินรถซึ่งในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าจะศึกษาจากสถานีบางซื่อไปสิ้นสุดที่สถานีหัวลำโพงในทิศทางมุ่งใต้จะเป็นการเดินรถขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษใช้รถจำนวน 19 ขบวน ในส่วนของชั่วโมงเร่งด่วนเย็นจะศึกษาจากสถานีหัวลำโพงไปสิ้นสุดที่สถานีบางซื่อในทิศทางมุ่งเหนือ ใช้รถจำนวน 18 ขบวน และในส่วนของขากลับรถของทั้งชั่วโมงเร่งด่วนเช้า และเย็นจะเป็นการเดินรถแบบปกติ (Normal Line) สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าทิศทางมุ่งใต้เข้าเมืองจากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง



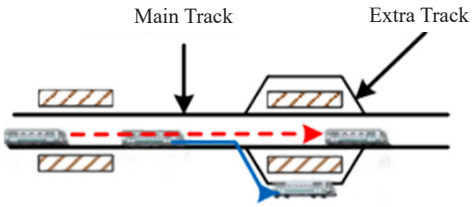
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นทิศทางมุ่งเหนือออกนอกเมืองจากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ

กับเวลาในการเดินรถได้ดังรูปที่ 8 และ 9

จากรูปที่ 8 ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าการเดินรถทิศทางจากสถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง ขบวนรถแบบปกติจะใช้ขบวนรถ 12 ขบวน ระยะห่างระหว่างขบวนอยู่ที่ 6.1 นาที และขบวนรถแบบพิเศษจะใช้ขบวนรถ 7 ขบวน ระยะห่างระหว่างขบวนอยู่ที่ 11 นาที และขบวนรถแบบพิเศษจะสามารถแซงขบวนรถแบบปกติ จุดที่ 1 ระยะทางประมาณ 6.52 กิโลเมตร จากสถานีต้นทาง หรือที่บริเวณสถานีรัชดาภิเษก และจุดที่ 2 ระยะทางประมาณ 15.4 กิโลเมตร จากสถานีต้นทาง หรือที่บริเวณสถานีศูนย์ประชุมสิริกิติ์

จากรูปที่ 9 ในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นทิศทางจากสถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ ขบวนรถแบบปกติจะใช้ขบวนรถ 8 ขบวน ระยะห่างระหว่างขบวนอยู่ที่ 13 นาที และขบวนรถแบบพิเศษจะใช้ขบวนรถ 10 ขบวน ระยะห่างระหว่างขบวนอยู่ที่ 6.5 นาที และขบวนรถแบบพิเศษจะสามารถแซงขบวนรถแบบปกติที่ระยะทางประมาณ 12.2 กิโลเมตรจากสถานีต้นทาง หรือที่บริเวณสถานีห้วยขวาง

ซึ่งทางหลีกของรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล ช่วงสถานีหัวลำโพง–สถานีบางซื่อ ในบริเวณก่อนถึงสถานีปลายทางทั้ง 2 สถานี หัวลำโพง และบางซื่อ จะมีประแจและทางตัดสำหรับให้รถไฟสามารถเข้าจอดหรือกลับรถได้



รูปที่ 10 ผังการจัดวางทางสำหรับการเดินรถไฟฟ้าระหว่างรถแบบพิเศษและรถแบบปกติ บนทางหลีก [1]

ทั้ง 2 ชานชาลา ในส่วนทางหลีกจะอยู่ที่ช่วงสถานีจตุจักร พระราม 9 [5]

ดังนั้นจุดแซงของรถไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจะแซงกันที่สถานีรัชดาภิเษก สถานีศูนย์ประชุมสิริกิติ์ สถานีห้วยขวาง ซึ่งไม่มีทางหลีกจึงจำเป็นที่จะต้องก่อสร้างทางหลีกเพิ่มเติมที่สถานีรัชดาภิเษก และสถานีศูนย์ประชุมสิริกิติ์ ในทิศทางมุ่งใต้เข้าเมือง จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง ดังแสดงในรูปที่ 6 และสถานีห้วยขวางทิศทางมุ่งเหนือออกนอกเมือง จากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อให้รถไฟฟ้าทำการแซงกันที่บริเวณสถานีดังกล่าวได้

การออกแบบผังการจัดวางทางสำหรับการเดินรถแบบพิเศษ และการเดินรถแบบปกติให้สามารถแซงกันได้จะต้องทำทางหลีกในจุดที่รถ 2 ขบวน วิ่งซ้อนทับกันเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้รถไฟฟ้าวิ่งชนกัน ดังแสดงในรูปที่ 10

4. อภิปรายผลและสรุป

การศึกษาและทดสอบการเดินรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล เส้นทางหัวลำโพง–บางซื่อ พบว่า การจัดการเดินรถแบบใหม่โดยใช้ขบวนรถจำนวนเท่าเดิม ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. ทิศทางมุ่งใต้เข้าเมือง จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพงของการเดินรถขบวนปกติใช้ขบวนรถจำนวน 12 ขบวน ส่วนการเดินรถขบวนพิเศษใช้ขบวนรถจำนวน 7 ขบวน และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ทิศทางมุ่งเหนือออกนอกเมืองจากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อของการเดินรถขบวนปกติใช้ขบวนรถจำนวน 8 ขบวน ส่วนการเดินรถขบวนพิเศษจะใช้ขบวนรถจำนวน 10 ขบวน

การเดินรถขบวนพิเศษเดินรถจากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง ทิศทางมุ่งใต้ ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า 7.00–8.00 น. ขบวนรถแบบพิเศษจะสามารถประหยัดเวลาการเดินทางได้ 11 นาที หรือลดลงร้อยละ 32 และสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้คือต้องไม่เกินความจุของรถไฟฟ้าที่ 100% ในการเดินรถในรูปแบบใหม่ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้า สัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุลดลงจากการเดินรถในรูปแบบเดิม โดยสายขบวนรถปกติลดลงร้อยละ 23 และสายการเดินรถแบบพิเศษลดลงร้อยละ 15 และการเดินรถจากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ทิศทางมุ่งเหนือในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น 18.00–19.00 น. ขบวนรถแบบพิเศษจะสามารถประหยัดเวลาการเดินทางได้ 9 นาที หรือลดลงร้อยละ 26 และสัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้คือต้องไม่เกินความจุของรถไฟฟ้าที่ 100% ในการเดินรถในรูปแบบใหม่ในชั่วโมงเร่งด่วนเย็น สัดส่วนระหว่างปริมาณผู้โดยสารต่อความจุของผู้โดยสารขบวนรถพิเศษลดลงร้อยละ 17 และขบวนรถปกติเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 แต่ไม่เกินความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้

ผลการวิจัยนี้การเดินรถในรูปแบบใหม่สามารถลดระยะเวลาในการเดินทาง แต่จะส่งผลให้ผู้โดยสารจะต้องเสียเวลาในการรอคอยรถไฟฟ้าที่บางสถานีนานขึ้น ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าการเดินรถขบวนรถปกติ และขบวนรถพิเศษ และในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นการเดินรถขบวนรถพิเศษจะสามารถช่วยลดความแออัดของผู้โดยสารลงได้ ส่วนในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นการเดินรถขบวนรถปกติไม่สามารถลดความแออัดของผู้โดยสารลงได้ แต่ไม่เกินความจุที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้ และจำเป็นต้องลงทุนก่อสร้างทางหลีกเพื่อให้รถขบวนพิเศษสามารถแซงรถขบวนปกติได้ที่สถานีรัชดาภิเษก สถานีศูนย์ประชุมสิริกิติ์ ในทิศทางมุ่งใต้จากสถานีบางซื่อไปยังสถานีหัวลำโพง และที่สถานีห้วยขวางในทิศทางมุ่งเหนือจากสถานีหัวลำโพงไปยังสถานีบางซื่อ ผลจากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้ในการพิจารณาถึงความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในลำดับต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อข้อมูล และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยเรื่องนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] L. Zhujun, M. Baohua, B. Yun, and C. Yao, "Integrated optimization of train stop planning and scheduling on metro lines with express/local mode," *IEEE Translations and Content Mining are Permitted for Academic Research*, vol. 7, pp. 88534–88546, 2019.

[2] D. Sunduck, Y. Keun-Yul, L. Jae-Hoon, A. Byung-Min, and K. Jeong Hyun, "Effects of Korean Train Express (KTX) operation on the national transport system," in *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, pp. 175–189.

[3] Y. Xueqiao, L. Maoxiang, G. Yang, W. Kai, S. Ching-Hsia, T. Sang-Bing, H. Mingkun, Y. Xiao, and L. Shiqi, "An empirical study on the design of China high-speed rail express train operation plan-from a sustainable transport perspective," *Sustainability*, vol. 10, no. 7, pp. 1–19, 2018.

[4] P. Chograthin and A. Sirikijpanichkul, "Delays in railway operations and suggested remedies for Airport Rail Link system," presented at the 24th National Convention on Civil Engineering, Udonthani, Thailand, July 10–12, 2019 (in Thai).

[5] Bangkok Expressway and Metro. (2018, Jan.). *M.R.T Chaloem Ratchamongkhon Line*. [Online] (in Thai). Available: http://metro.bemplc.co.th/MRT-System-Line?pid=3&lang=th

[6] V. R. Vuchic, *Urban Transit Operations Planning and Economics*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.

[7] Mass Rapid Transit Authority of Thailand, "MRTA Report," Bangkok, Thailand, 2019 (in Thai).