บทความวิจัย

วิธีการกำหนดจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับใช้ให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุง

ยุวรัตน์ ศรีประพฤทธิ์ชัย* และ วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-5108-7471 อีเมล: yuwarat.sri@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.020
รับเมื่อ 6 ธันวาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 2 พฤษภาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 17 มกราคม 2561
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เนื่องจากรถไฟฟ้าซึ่งเป็นหัวใจหลักในธุรกิจการให้บริการเดินรถไฟฟ้ามีราคาแพงมาก จึงต้องมีการบริหารจัดการการใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้ในการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนด จากผลการคำนวณจะต้องการรถไฟฟ้าอย่างน้อยจำนวน 240 ขบวน สำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลซึ่งมีระยะทางการให้บริการรวม 509 กิโลเมตร โดยพบว่าระยะทางและเฮดเวย์ในการให้บริการเดินรถจะส่งผลต่อจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการ ทั้งนี้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมักจะมีรถไฟฟ้าที่ว่างจากการให้บริการในชั่วโมงปกติระหว่างช่วงเวลาเร่งด่วน วิธีการฮิวริสติกจึงถูกนำมาใช้เพื่อจัดตารางเดินรถและจัดตารางงานซ่อมบำรุงในเวลาว่างจากการใช้บริการของรถไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถระบุจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ต้องการสำหรับให้บริการและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

คำสำคัญ: รถไฟฟ้า, การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ฮิวริสติก

การอ้างอิงบทความ: ยุวรัตน์ ศรีประพฤทธิ์ชัย และ วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, "วิธีการกำหนดจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับใช้ให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุง," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,* ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 123–133, ม.ค.–มี.ค. 2561.

-17-0000(123-134)P5.indd 123 4/10/61 BE 2:14 PM

Research Article

A Methodology to Determine the Number of Rolling Stock for Transportation Services and Preventive Maintenance

Yuwarat Sripraprutchai* and Wipawee Tharmmaphornphilas
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author: Tel. 08-5108-7471, E-mail: yuwarat.sri@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.020
Received 6 December 2016; Accepted 2 May 2017; Published online: 17 January 2018
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Since rolling stock which is the key equipment in a railway business is very expensive, it must be used the most efficiently. The objective of this paper is to determine the minimum number of the rolling stock that is sufficient for services in a given timetable and the preventive maintenance. A mathematical model was used to determine the minimum number of the rolling stock for a given timetable. As the results, at least 240 trains are needed for the future railway projects of Bangkok Metropolitan Region with the total service distance of 509 kilometers. It was found that the minimum number of the rolling stock depends on the service distance and headway of services in the peak hour period. Moreover, there may be some trains those are available from services during off-peak hour. A heuristic approach was used to schedule services and preventive maintenance tasks and determine the minimum number of the rolling stock for transportation services and preventive maintenance.

Keywords: Rolling Stock, Preventive Maintenance, Mathematical Model, Heuristic

Please cite this article as: Y. Sripraprutchai and W. Tharmmaphornphilas, "A methodology to determine the number of rolling stock for transportation services and preventive maintenance," *The Journal of KMUTNB,* vol. 28, no. 1, pp. 123–133, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).

-17-0000(123-134)P5.indd 124 4/10/61 BE 2:14 PM

1. บทนำ

การเดินทางโดยรถไฟฟ้ามีบทบาทอย่างมากในปัจจุบันและจะมากยิ่งขึ้นในอนาคต เพราะนอกจากระบบรถไฟฟ้าจะช่วยแก้ปัญหาการจราจรภายในเมืองแล้ว ยังจะช่วยขยายความเจริญออกสู่ชุมชนรอบข้างได้อย่างเป็นวงกว้างอีกด้วย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) จึงได้มีการวางโครงข่ายเส้นทางการให้บริการรถไฟฟ้าให้คลอบคลุมทั่วกรุงเทพฯ และปริมณฑลกว่า 509 กม. จำนวน 12 เส้นทาง [1] ซึ่งในปัจจุบันมีการเปิดให้บริการแล้วกว่า 107.8 กม. ใน 5 สายทาง ได้แก่ รถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน สายสีน้ำเงิน สายแอร์พอร์ตลิงค์ และสายสีม่วง

การให้บริการเดินรถไฟฟ้าเป็นธุรกิจการให้บริการอย่างหนึ่งที่ต้องตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสาร เพื่อให้ผู้โดยสารมาใช้บริการอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้การให้บริการเดินรถไฟฟ้าเป็นการให้บริการแก่ผู้โดยสารจำนวนมาก เพราะฉะนั้นจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นสำคัญด้วย ในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าจึงจะต้องมีอย่างเพียงพอ สม่ำเสมอ และปลอดภัย

การทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจะช่วยทำให้รถไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือ มีความพร้อมใช้งาน มีความสามารถที่จะซ่อมบำรุงได้เมื่อต้องการ และมีความปลอดภัยในการใช้งาน [2] อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของรถไฟฟ้าได้อีกด้วย และที่สำคัญที่สุดคือช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดการเสียหายที่ไม่คาดคิดซึ่งอาจจะนำไปสู่การให้บริการหยุดชะงัก หรืออาจจะรุนแรงถึงขั้นเกิดอุบัติเหตุ ดังนั้นการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจึงจัดเป็นหนึ่งในงานที่ต้องทำของรถไฟฟ้าทุกขบวนด้วย

เนื่องจากรถไฟฟ้าจะไม่สามารถใช้งานได้ในขณะทำงานซ่อมบำรุง ดังนั้นการทำงานซ่อมบำรุงจะต้องไม่กระทบต่อการให้บริการรถไฟฟ้า แต่เนื่องจากรถไฟฟ้ามีราคาสูงมาก จึงไม่สามารถมีรถไฟฟ้าในจำนวนที่มากเกินไปได้ ทำให้ต้องมีการบริหารจัดการการใช้งานรถไฟฟ้าที่มีอยู่ในจำนวนที่เหมาะสมให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับใช้งานให้บริการและการซ่อมบำรุง เพื่อให้สามารถใช้รถไฟฟ้าได้ในจำนวนน้อยที่สุด

การให้บริการเดินรถไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการกำหนดตารางการให้บริการรถไฟฟ้าไว้ล่วงหน้า โดยตารางการเดินรถนี้จะกำหนดรอบการให้บริการต่างๆ ซึ่งวางแผนจากความต้องการของผู้โดยสารในแต่ละช่วงเวลาของวัน ผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้ามีหน้าที่ให้บริการเดินรถให้ได้ตามตารางการเดินรถที่ได้กำหนดไว้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการเดินรถตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการหาคำตอบ [3], [4]

ส่วนงานซ่อมบำรุงมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้รถไฟฟ้าอยู่ในสภาพที่ดีสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยหลักการบริหารการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ซ่อมเมื่อเสียและซ่อมก่อนเสีย [5] แต่สำหรับรถไฟฟ้าที่ต้องถูกใช้งานตลอดเวลาไม่ควรจะปล่อยให้เสียก่อนแล้วค่อยซ่อม เพราะนอกจากจะทำให้เสียโอกาสในการให้บริการแล้วยังจะเกี่ยวข้องกับชีวิตคนจำนวนมากอีกด้วย ดังนั้นหลักการซ่อมก่อนเสียจึงเป็นแผนการซ่อมบำรุงหลักของรถไฟฟ้า

เนื่องจากรถไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทำให้มีงานซ่อมบำรุงที่จะต้องทำจำนวนมาก จึงได้มีการรวมกลุ่มงานที่สามารถทำได้ในเวลาเดียวกันไว้ด้วยกันเพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเข้าซ่อมบำรุงแต่ละครั้ง ดังนั้นงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าจึงถูกพิจาณาเป็นกลุ่มงานที่สามารถทำพร้อมกันได้ [6]

งานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) งานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่ (Overhaul) เป็นการปรับปรุงสภาพรถไฟฟ้าให้ดีขึ้น 2) งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance; PM) เป็นการรักษาสภาพรถไฟฟ้าให้ดีอยู่เสมอ และ 3) งานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance; CM) เป็นการซ่อมรถไฟฟ้าในกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้น [7] จะเห็นว่างานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่และงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเป็นการซ่อมบำรุงก่อนที่รถไฟฟ้าจะเสีย โดยจะมีการกำหนดแผนการซ่อมบำรุงไว้ล่วงหน้า มีวัตถุประสงค์เพื่อดูแลรักษารถไฟฟ้าให้มีสภาพดีอยู่เสมอ และลดความเสี่ยงที่จะเกิดการเสียหายที่ไม่คาดคิดจนต้องทำงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขซึ่งไม่สามารถวางแผนการทำงานได้ และมีโอกาสสูงที่จะกระทบต่อแผนการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการ ดังนั้นงานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่และงานซ่อมบำรุง

-17-0000(123-134)P5.indd 125 4/10/61 BE 2:14 PM

เชิงป้องกันจึงจะต้องอยู่ในแผนการดำเนินงานของรถไฟฟ้าควบคู่ไปกับแผนการใช้รถในการให้บริการ [8]

มีการศึกษาการหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับการใช้งานตามตารางการเดินรถที่กำหนดไว้พร้อมทั้งมีการพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุงด้วย โดยการสำรองรถไฟฟ้าไว้สำหรับทำงานซ่อมบำรุงโดยเฉพาะ โดยรถไฟฟ้าจะถูกจองสำหรับการทำงานซ่อมบำรุงทั้งวัน [4] ซึ่งจะเหมาะกับการทำงานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่ที่ต้องใช้เวลาการทำงานมาก เพราะต้องทำการถอดประกอบชิ้นส่วนรถไฟฟ้า แต่สำหรับงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่ส่วนใหญ่จะเป็นกิจกรรมตรวจสอบสภาพและเปลี่ยนอะไหล่สิ้นเปลืองทั่วไปจะใช้เวลาในการทำงานไม่มาก การสำรองรถไฟฟ้าทั้งวันจึงจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานรถไฟฟ้าลดลง จึงได้มีการพิจารณาจัดการทำงานซ่อมบำรุงในเวลาว่างระหว่างที่รถไฟฟ้ารอให้บริการในรอบการเดินรถถัดไปของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง ซึ่งรถไฟฟ้าประเภทนี้จะมีเวลาหยุดพักในสถานีระหว่างรอให้บริการในรอบถัดไปมาก [9], [10]

สำหรับรถไฟฟ้าประเภทขนส่งมวลชนจะมีเวลาหยุดพักที่สถานีไม่มากนัก ไม่เพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง แต่ตารางการเดินรถส่วนใหญ่จะแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงปกติ โดยในช่วงชั่วโมงปกติอาจจะมีรถไฟฟ้าว่างจากการให้บริการ และสามารถทำงานซ่อมบำรุงได้

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนรถไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการให้บริการเดินรถไฟฟ้าและซ่อมบำรุงเชิงป้องกันสำหรับโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ

ในส่วนของลักษณะปัญหานั้น การให้บริการเดินรถไฟฟ้าจะมีการกำหนดตารางการเดินรถไว้ล่วงหน้า โดยผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้าจะต้องให้บริการเดินรถให้ได้ตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ สำหรับโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีลักษณะการให้บริการคือจะมีเส้นทางการเดินรถที่ไม่ยาวมาก แต่มีรอบการให้บริการต่อวันมากเพราะเน้นให้บริการภายในเมือง โดยรถไฟฟ้าจะให้บริการตั้งแต่สถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางซึ่งจะมีสถานีระหว่างทางเพื่อจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ซึ่งใช้เวลาไม่มาก เช่น โครงการรถไฟฟ้าหนึ่งมีระยะทางการให้บริการ 28.5 กม. มีรอบการให้บริการ 161 รอบต่อวัน นอกจากนี้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีความต้องการโดยสารมากกว่าปกติในช่วงเวลาเช้าก่อนเวลาทำงานและช่วงเวลาเย็นหลังเลิกงาน โดยในช่วงชั่วโมงปกติที่นอกเหนือชั่วโมงเร่งด่วนจะมีความต้องการโดยสารน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด

เนื่องจากรถไฟฟ้าเป็นทรัพยากรสำคัญที่มีราคาแพง ดังนั้นจะต้องใช้งานรถไฟฟ้าอย่างคุ้มค่ามากที่สุด เพื่อให้สามารถใช้รถไฟฟ้าได้จำนวนน้อยที่สุด บทความนี้พัฒนาวิธีการในการจัดรถไฟฟ้าเพื่อให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดและให้เหลือเวลาในช่วงเวลาปกติระหว่างชั่วโมงเร่งด่วนมากเพียงพอในการทำงานซ่อมบำรุง รวมทั้งจัดงานซ่อมบำรุงลงในช่วงเวลาต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้ใช้รถไฟฟ้าจำนวนน้อยที่สุดได้ โดยจะพิจารณาตัวอย่างงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

กลุ่มงาน	กำหนดระยะทางการซ่อมบำรุง (กม.)	เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุง (นาที)
M1	15,000	120
M2	45,000	240
M3	90,000	480

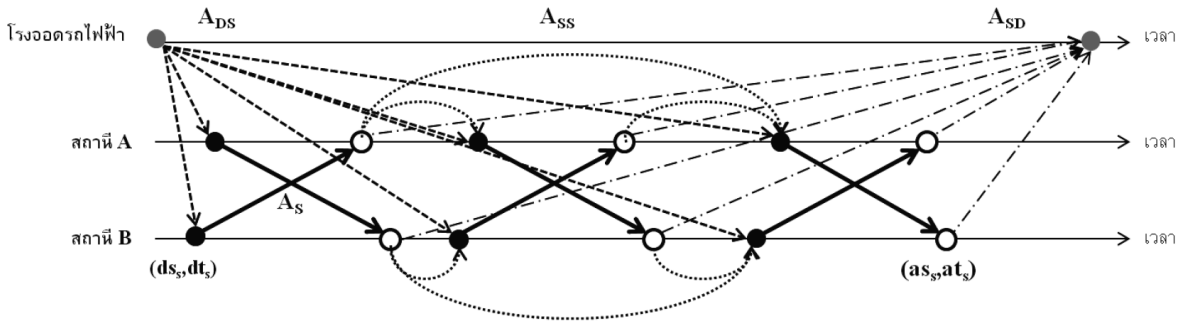
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกำหนดจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดในการให้บริการ

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากรถไฟฟ้ามีราคาแพงมาก ดังนั้นต้องทำการบริหารจัดการการใช้งานให้สามารถให้บริการได้ตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ด้วยรถไฟฟ้าจำนวนที่น้อยที่สุด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโครงข่าย (Network Model) ถูกนำมาใช้หาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายใดๆ โดยรูปที่ 1 จะแสดงถึงความเป็นไปได้ต่างๆ ในการเดินทางของรถไฟฟ้า คือ รถไฟฟ้าขบวนหนึ่งๆ จะสามารถออกจากโรงจอดรถไปยังสถานีต้นทางทั้งสองเพื่อนำไปให้บริการเดินรถในแต่ละรอบการให้บริการเดินรถในตารางการเดินรถที่กำหนดไว้ ดังนั้นเส้นที่ออกจากโรงจอดรถไปยังสถานีต้นทางก็คือจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการให้บริการนั่นเอง แต่รถไฟฟ้าที่ให้บริการในรอบการ

-17-0000(123-134)P5.indd 126 4/10/61 BE 2:14 PM



รูปที่ 1 โครงข่ายของจุดและเส้นสำหรับการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางเดินรถที่กำหนด

เดินรถใดๆ เสร็จแล้วจะสามารถถูกนำไปใช้งานต่อในรอบการเดินรถถัดไปที่มีสถานีต้นทางเดียวกับสถานีปลายทางของรอบการเดินรถที่เพิ่งไปถึงได้ด้วย ดังนั้นรถไฟฟ้าที่จะนำมาใช้ให้บริการจะสามารถนำมาจากโรงจอดรถหรือมาจากการให้บริการรอบก่อนหน้าก็ได้ เมื่อไม่มีรอบการเดินรถที่สามารถให้บริการได้แล้ว รถไฟฟ้าจึงจะกลับไปที่โรงจอดรถเพื่อรอให้บริการในตารางการเดินรถรอบถัดไปหรือในวันถัดไปนั่นเอง

กำหนด *S* คือ เซตของรอบการเดินรถ *s* ต่างๆ ซึ่งมีข้อมูลประกอบด้วยสถานีต้นทาง (ds_s) เวลาออกจากสถานีต้นทาง (dt_s) สถานีปลายทาง (as_s) และเวลาถึงสถานีปลายทาง (at_s)

2.2 จุด (Node)

จุดหรือ Node จะบ่งบอกเหตุการณ์การเข้าและออกของรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ เวลา *(t)* และสถานที่ *(p)* ต่างๆ โดยสถานที่ในแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยโรงจอดรถไฟฟ้า สถานี A และสถานี B ซึ่งเป็นสถานีต้นทางและปลายทางของเส้นทางการเดินรถ โดยเซตของจุดจะประกอบไปด้วย

D_D = {(depot, open)} เป็นเซตของจุดที่รถออกจากโรงจอดรถไฟฟ้า เมื่อเวลาเปิดให้บริการ open = 0 นาที

A_D = {(depot, close)} เป็นเซตของจุดที่รถกลับมาโรงจอดรถเมื่อเวลาปิดให้บริการตอนสิ้นวัน close = (24*60) - 1 = 1439 นาที

D_S = $\{(ds_s, dt_s)$; "$\forall$ s $\in$ S"$\}$ เป็นเซตของจุดที่รถออกจากสถานีต้นทางของรอบบริการ *s*

A_S = $\{(as_s, at_s)$; "$\forall$ s $\in$ S"$\}$ เป็นเซตของจุดที่รถมาถึงสถานีปลายทางของรอบบริการ *s*

2.3 เส้น (Arc)

เส้นหรือ Arc คือ การแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยชุดของเส้นที่เป็นไปได้ในแบบจำลองนี้คือ

1) A_s = $\{((ds_s, dt_s), (as_s, at_s))$; "$\forall$ s $\in$ S"$\}$ เป็นเซตของเส้นที่แสดงถึงรอบการให้บริการ *s* ในตารางการเดินรถที่กำหนด

2) A_{DS} = {(i,j); "$\forall$ i $\in$ D_D" ," $\forall$ j $\in$ D_S"} เป็นเซตของเส้นที่รถไฟฟ้าออกจากโรงจอดรถไปสถานีต้นทางทั้งสองฝั่งเพื่อให้บริการตอนเริ่มวัน

3) A_{SD} = {(i,j); "$\forall$ i $\in$ A_S" ," $\forall$ j $\in$ A_D"} เป็นเซตของเส้นที่รถไฟฟ้าออกจากสถานีปลายทางทั้งสองกลับโรงจอดรถเมื่อให้บริการเสร็จตอนสิ้นวัน

4) A_{SS} = {(i,j); "$\forall$ i $\in$ A_S" ," $\forall$ j $\in$ D_S" : $t_i \le t_j$, $p_i = p_j$ } เมื่อ p_i , t_i , p_j และ t_j หมายถึง สถานที่และเวลาของจุด *i* และ *j* ตามลำดับ เป็นเซตของเส้นที่แสดงถึงการนำรถไฟฟ้าที่เพิ่งให้บริการในรอบการเดินรถหนึ่งเสร็จแล้วไปให้บริการใหม่ในรอบการเดินรถถัดไปที่สามารถให้บริการต่อได้ ซึ่งก็คือรอบการเดินรถที่มีสถานีต้นทางเดียวกันกับสถานีปลายทางของรอบการเดินรถก่อนหน้า ($p_i = p_j$) และมีเวลาออกเดินทางหลังจากเวลาถึงของรอบการเดินรถก่อนหน้า ($t_i \le t_j$)

-17-0000(123-134)P5.indd 127 4/10/61 BE 2:14 PM

ดังนั้นเส้นทั้งหมดสำหรับแบบจำลองนี้คือ $A = A_S \cup A_{DS} \cup A_{SD} \cup A_{SS}$

ตัวแปรตัดสินใจ

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้ามีรถไฟฟ้าเดินทางจากจุด } i \text{ ไปจุด } j \\ 0 \text{ ถ้าไม่มีรถไฟฟ้าเดินทางจากจุด } i \text{ ไปจุด } j \end{cases}$$

แบบจำลอง

$$\min \quad z = \sum_{(i,j)\in A_{DS}} X_{ij} \qquad (0)$$

st.

$$X_{ij} = 1 \qquad \forall (i,j) \in A_s \qquad (1)$$

$$\sum_{i:(i,j)\in A} X_{ij} = \sum_{k:(j,k)\in A} X_{jk} \qquad \forall j \in D_S \cup A_S \quad (2)$$

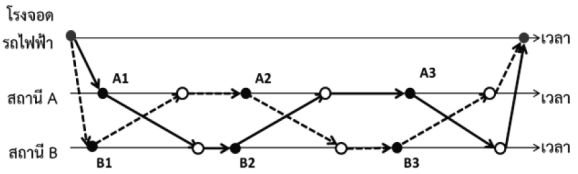
$$\sum_{(i,j)\in A_{DS}} X_{ij} = \sum_{(i,j)\in A_{SD}} X_{ij} \qquad (3)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in A \qquad (4)$$

เมื่อสมการที่ (0) แสดงถึงสมการวัตถุประสงค์ คือ การที่มีรถไฟฟ้าออกจากโรงจอดรถไปให้บริการน้อยที่สุด หมายถึงจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางเดินรถที่กำลังพิจารณาอยู่ โดยจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ คือ จะต้องมีรถไฟฟ้าไปให้บริการทุกรอบการให้บริการดังสมการที่ (1) ส่วนสมการที่ (2) คือถ้ามีรถไฟฟ้าไปยังจุดใดจะต้องมีรถไฟฟ้าออกจากจุดนั้นเท่ากัน สมการที่ (3) คือรถไฟฟ้าที่ออกจากโรงจอดรถจะต้องมีจำนวนเท่ากับรถไฟฟ้าที่กลับมายังโรงจอดรถเมื่อให้บริการเสร็จสิ้นแล้ว และสุดท้ายสมการที่ (4) คือการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นศูนย์และหนึ่งเท่านั้น

2.4 ตัวอย่างคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาคำตอบจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางการเดินรถที่กำหนดให้นั้น จะได้คำตอบเป็นจำนวนรถที่น้อยที่สุดที่ออกจากโรงจอดรถไฟฟ้าไปยังสถานีต้นทางของรอบการให้บริการต่างๆ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2 จะต้องการรถไฟฟ้า 2 ขบวน โดยรถไฟฟ้าขบวนที่ 1 จะออกจากโรงจอดรถแล้วถูกใช้ให้บริการในรอบการเดินรถ A1, B2 และ A3 จากนั้นจึงกลับไปเก็บยังโรงจอดรถเมื่อถูกใช้งานเสร็จ ในทำนองเดียวกันรถไฟฟ้าขบวนที่ 2 จะถูกใช้ให้บริการในรอบการเดินรถ B1, A2 และ B3



รูปที่ 2 ตัวอย่างคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

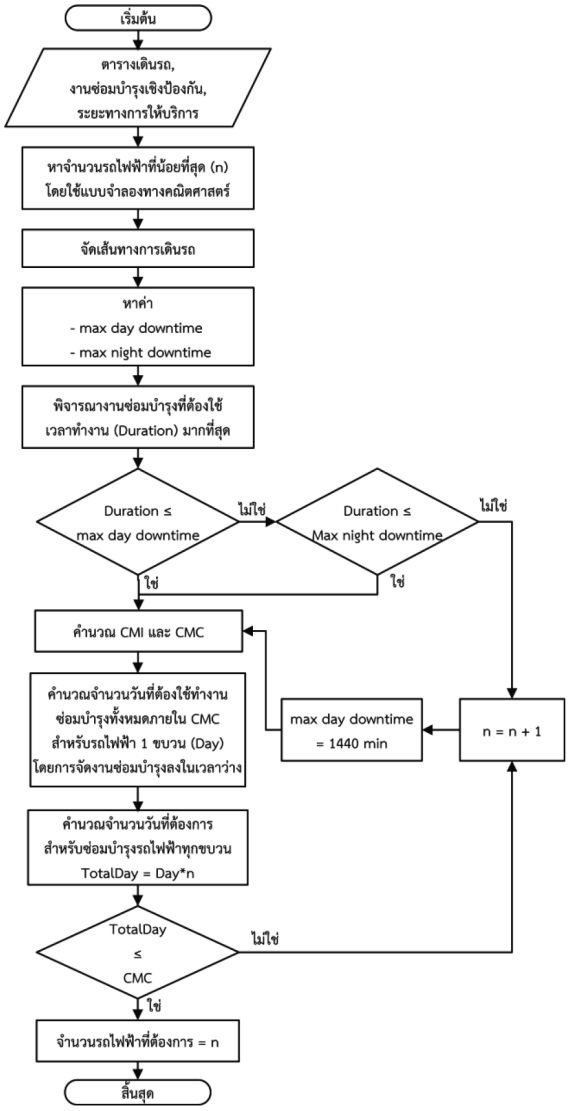
3. ฮิวริสติกสำหรับกำหนดจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับการให้บริการและซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

3.1 วิธีการของฮิวริสติก

จำนวนรถไฟฟ้าที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นจำนวนรถไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการให้บริการตามตารางการเดินรถที่กำหนดไว้ เมื่อจะจัดตารางการซ่อมบำรุงในเวลาว่างระหว่างรอบบริการเดินรถนั้น จะต้องตรวจสอบว่ามีเวลาว่างเพียงพอสำหรับการทำงานซ่อมบำรุงหรือไม่ ถ้ามีเวลาว่างเพียงพอก็ไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าสำหรับซ่อมบำรุง

ในการตรวจสอบว่ารถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับการให้บริการจะสามารถทำงานซ่อมบำรุงภายในเวลาว่างระหว่างรอบการให้บริการเดินรถได้หรือไม่ จากรูปที่ 3 หลังจากทราบจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการแล้ว จะต้องทำการจัดเส้นทางการเดินรถสำหรับรถไฟฟ้าแต่ละขบวนสำหรับไปใช้ในการให้บริการ เพื่อตรวจสอบว่ามีเส้นทางที่มีเวลาว่างเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงหรือไม่ (วิธีการจัดเส้นทางจะกล่าวถึงภายหลัง) เนื่องจากมีชั่วโมงเร่งด่วน 2 ช่วงคือช่วงเช้าและเย็น จะทำให้มีช่วงเวลาว่างที่อาจจะทำงานซ่อมบำรุงได้ 2 ช่วงคือ ช่วงกลางวัน (Day Downtime) ระหว่างชั่วโมงเร่งด่วนทั้งสอง และช่วงกลางคืน (Night Downtime) หลังหยุดให้บริการเดินรถ ถ้าช่วงเวลาว่างมีเวลาสั้นกว่าเวลาการทำงานซ่อมบำรุงที่นานที่สุด แสดงว่าไม่สามารถทำงานซ่อมบำรุงนั้นได้ในเวลาว่างที่มี จะต้องสำรองรถไฟฟ้าสำหรับทำงานซ่อมบำรุง

-17-0000(123-134)P5.indd 128 4/10/61 BE 2:14 PM



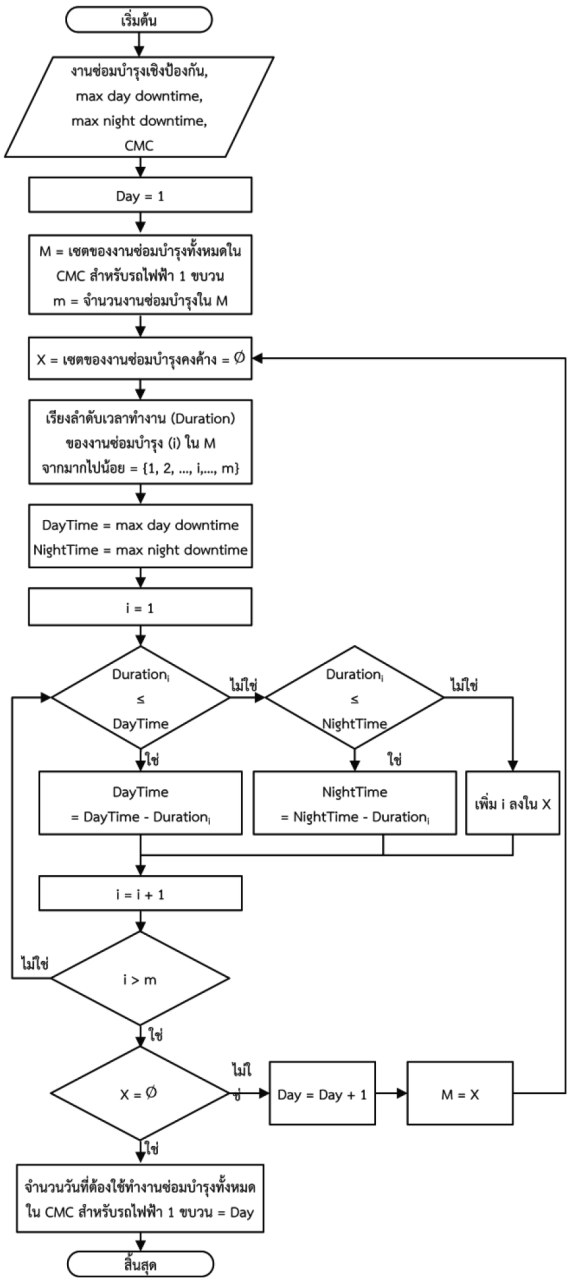
รูปที่ 3 ขั้นตอนการหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการและทำงานซ่อมบำรุง

หลังจากพิจารณาว่าระยะเวลาซ่อมบำรุงทุกงานสามารถทำได้ในช่วงเวลาว่างที่มีแล้ว ต่อมาจะต้องตรวจสอบว่าในช่วงเวลาหนึ่ง จะมีเวลาว่างเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทุกขบวนหรือไม่ โดยฮิวริสติกจะกำหนดรอบเวลาโดยพิจารณาจากระยะทางการซ่อมบำรุงร่วม (Common Maintenance Interval; CMI) จากกลุ่มงานซ่อมบำรุงตัวอย่าง CMI เท่ากับ 90,000 กม. ซึ่งก็คือระยะทางที่รถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุง M1, M2 และ M3 ครบ 6, 2 และ 1 รอบพอดี เพราะฉะนั้นโครงการรถไฟฟ้าที่มีรถไฟฟ้า 5 ขบวน สำหรับให้บริการ 161 รอบการเดินรถต่อวัน รอบละ 28.5 กม. จะมีรอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม (Common Maintenance Cycle; CMC) เท่ากับ $\frac{90,000}{(161 \times 28.5)/5}$ = 98 วัน ดังนั้นจะมีเวลา 98 วัน ในการทำงานซ่อมบำรุง M1, M2 และ M3 จำนวน 6, 2 และ 1 ครั้ง ของรถไฟฟ้า 5 ขบวน

ต่อมาต้องทำการตรวจสอบว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนต้องใช้เวลากี่วันในการทำงานซ่อมบำรุง M1, M2 และ M3 จำนวน 6, 2 และ 1 ครั้ง จากรูปที่ 4 จะทำการจัดงานซ่อมบำรุงทีละงานลงในเวลาว่างช่วงกลางวันและกลางคืนที่มีโดยจะทำการจัดงานที่มีเวลาการทำงานมากก่อน เพราะงานซ่อมบำรุงที่ใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่าจะมีความยืดหยุ่นในการจัดการทำงานมากกว่า เมื่อทราบจำนวนวันที่ต้องใช้ทำงานสำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวนแล้ว จำนวนวันรวมที่ต้องการสำหรับรถไฟฟ้าทุกขบวนคือผลคูณของจำนวนรถไฟฟ้ากับจำนวนวันที่ต้องการของรถไฟฟ้า 1 ขบวน เมื่อจำนวนวันรวมที่ต้องใช้ทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทุกขบวนน้อยกว่าจำนวนวันในรอบการซ่อมบำรุงร่วม แสดงว่ามีวันเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง ไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าสำหรับทำงานซ่อมบำรุงเพิ่ม

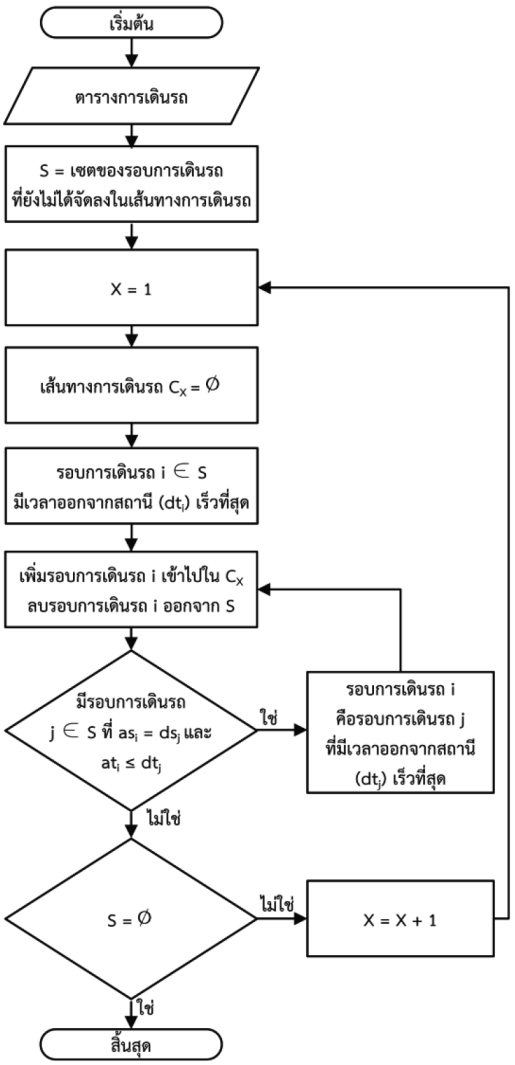
ในส่วนของการจัดเส้นทางการเดินรถจากแนวความคิดในการทำงานซ่อมบำรุงในช่วงกลางวันระหว่างที่รถไฟฟ้าหยุดพักเพื่อรอให้บริการในรอบการเดินรถถัดไป ในรูปที่ 5 จะทำการจัดเส้นทางการเดินรถทีละเส้นทาง (C_x) เริ่มจากการจัดเส้นทางเดินรถที่ 1 (C_1) ให้เลือกรอบการเดินรถ *i* ที่มีเวลาออกจากสถานี *(dt_i)* เร็วที่สุดเป็นรอบการให้บริการรอบแรกของเส้นทางเดินรถ C_1 เนื่องจากรถไฟฟ้าสามารถถูกนำไปใช้ให้บริการต่อได้ถ้าหากมีรอบการเดินรถถัดไป (รอบการเดินรถ *j*) ที่มีสถานีออกเดียวกับสถานีที่รถไฟฟ้าเพิ่งไปถึง ($as_i = ds_j$) และจะต้องมีเวลาออกมากกว่าเวลาที่รถไฟฟ้าเพิ่งไปถึง ($at_i \leq dt_j$) ถ้ามีรอบการเดินรถถัดไปที่รถไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ให้บริการได้ ให้พิจารณาเพิ่มรอบการเดินรถที่สามารถให้บริการต่อได้เข้าไปในเส้นทางการเดินรถเดิมจนกว่าจะไม่มีรอบการเดินรถที่รถไฟฟ้าสามารถ

-17-0000(123-134)P5.indd 129 4/10/61 BE 2:14 PM



รูปที่ 4 ขั้นตอนการหาจำนวนวันในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

ถูกนำไปใช้ให้บริการต่อได้ให้สิ้นสุดการจัดเส้นทางเดินรถเส้นทางนั้น จากนั้นให้เริ่มจัดเส้นทางการเดินรถถัดไปในแบบเดียวกันจนกว่ารอบการเดินรถทุกรอบในตารางการเดินรถจะถูกจัดสรรเข้าไปในเส้นทางการเดินรถต่างๆ



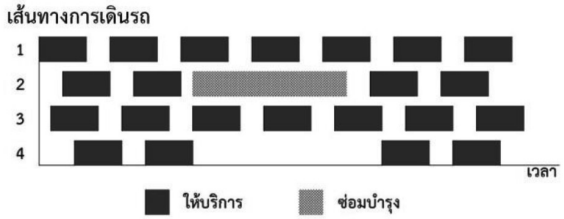
รูปที่ 5 ขั้นตอนการจัดเส้นทางการเดินรถ

ในการจัดเส้นทางการเดินรถทีละเส้นทางแบบนี้จะทำให้เส้นทางการเดินรถที่ถูกจัดก่อนมีจำนวนรอบการให้บริการมากกว่าเส้นทางการเดินรถที่ถูกจัดทีหลัง ส่งผลให้เส้นทางเดินรถที่ถูกจัดทีหลังมีรอบการให้บริการน้อย จึงทำให้มีเวลาว่างระหว่างรอบการให้บริการมากตามไปด้วย ซึ่งเวลาที่ว่างนี้สามารถนำมาจัดตารางการซ่อมบำรุงได้

3.2 ตัวอย่างคำตอบของฮิวริสติก

เมื่อทำการจัดเส้นทางการเดินรถสำหรับรถไฟฟ้า

-17-0000(123-134)P5.indd 130 4/10/61 BE 2:14 PM



รูปที่ 6 ตัวอย่างตารางการใช้งานรถไฟฟ้า

ทุกขบวนเสร็จแล้วจะทราบว่าแต่ละเส้นทางการเดินรถจะต้องให้บริการในรอบการเดินรถใดในตารางการเดินรถบ้าง ดังตัวอย่างในรูปที่ 6 มีเส้นทางการเดินรถสำหรับรถไฟฟ้า 4 ขบวน จะเห็นว่าเส้นทางการเดินรถที่ 2 มีเวลาว่างระหว่างวันมากเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง จึงจัดการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าลงไปในเวลาว่างระหว่างวันนั้น สำหรับเส้นทางการเดินรถที่ 2 นี้จะถูกจัดสรรให้แก่รถไฟฟ้าที่ต้องการให้เข้ารับการซ่อมบำรุง ส่วนเส้นทางการเดินรถอื่นๆ จะจัดสรรให้รถไฟฟ้าขบวนอื่นๆ ต่อไป

4. ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทยพบว่าโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ จะแยกการบริหารการเดินรถอิสระจากกันในแต่ละเส้นทางการเดินรถ กล่าวคือจะไม่มีการใช้รถไฟฟ้าร่วมกัน โรงจอดรถแยกจากกัน การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันก็อิสระจากกัน การพิจารณาจำนวนรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงจึงคำนึงจากความต้องการของโครงการรถไฟฟ้าแต่ละโครงการแยกกัน

เมื่อทำการหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ ในอนาคตของประเทศไทยจำนวน 8 เส้นทาง ซึ่งมีระยะทางและเฮดเวย์หรือระยะห่างระหว่างรถไฟในชั่วเร่งด่วนต่างกัน โดยพิจารณาโครงการรถไฟฟ้า A–C ซึ่งเป็นรถไฟฟ้าเชื่อมระหว่างใจกลางเมืองกรุงเทพฯ กับปริมณฑลจะมีระยะทางไกลกว่า โดยจะมีเฮดเวย์ประมาณ 12 นาที ส่วนโครงการรถไฟฟ้า D–H เป็นรถไฟฟ้าภายในเมืองกรุงเทพฯ จึงระยะทางสั้นกว่า โดยมีเฮดเวย์ 3.5 นาที พบว่าโครงการรถไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท จะต้องการรถไฟฟ้าในจำนวนต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2

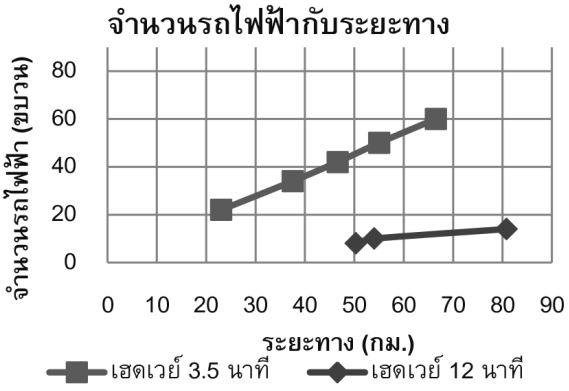
ตารางที่ 2 จำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ

โครงการรถไฟฟ้า	ระยะทาง (กม.)	จำนวนรถไฟฟ้า (ขบวน)
A	50.3	8
B	54	10
C	80.8	14
D	23	22
E	37.5	34
F	46.6	42
G	55	50
H	66.5	60

ตารางที่ 3 การพิจารณาความสามารถในการซ่อมบำรุงของโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ

โครงการรถไฟฟ้า	เวลาหยุดพัก (นาที)		จำนวนวันรวมในการทำงานซ่อมบำรุง (วัน)	รอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม (วัน)
	ช่วงกลางวัน	ช่วงกลางคืน		
A	387	525	16	87
B	505	654	20	101
C	540	665	28	95
D	526	664	44	232
E	543	700	68	220
F	528	670	84	219
G	513	735	100	221
H	494	713	120	219

-17-0000(123-134)P5.indd 131 4/10/61 BE 2:14 PM



รูปที่ 7 จำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการเมื่อมีระยะทางและเฮดเวย์ต่างๆ

จากผลการดำเนินงานดังแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นว่าโครงการรถไฟฟ้าตัวอย่างสายต่างๆ มีเวลาหยุดพักทั้งช่วงกลางวันและกลางคืนเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง M1, M2 หรือ M3 โดยจะมีเพียงรถไฟฟ้าสาย A ที่จะสามารถทำงานซ่อมบำรุง M3 ได้ในช่วงเวลาพักกลางคืนเท่านั้น ส่วนรถไฟฟ้าสายอื่นๆ สามารถทำได้ทั้งช่วงเวลาพักกลางวันและกลางคืน ซึ่งจากเวลาพักของรถไฟฟ้าแต่ละสายจะใช้เวลาทำงานซ่อมบำรุงทุกงานขบวนละ 2 วัน และรถไฟฟ้าแต่ละสายมีจำนวนวันรวมในการทำงานซ่อมบำรุงน้อยกว่ารอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วมซึ่งก็คือเวลาการทำงานซ่อมบำรุงที่มีดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าสำหรับทำงานซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นว่าเมื่อระยะทางการให้บริการมากขึ้นจะต้องการรถไฟฟ้าจำนวนมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อมีเฮดเวย์น้อยลงจะต้องการรถไฟฟ้าจำนวนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้นปัจจัยในการคำนวณหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ คือ ระยะทางและเฮดเวย์ในการให้บริการเดินรถ

5. สรุป

ปัจจุบันมีความนิยมใช้งานรถไฟฟ้ามากขึ้นทำให้เกิดโครงการรถไฟฟ้าขึ้นมากมาย โดยการให้บริการเดินรถไฟฟ้าเป็นธุรกิจการให้บริการอย่างหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญต่อความพึงพอใจของผู้โดยสารเป็นสำคัญ โดยผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้าจะต้องสามารถให้บริการเดินรถได้ตามตารางการเดินรถที่กำหนดไว้ และจะต้องทำงานซ่อมบำรุงเพื่อให้รถไฟฟ้ามีสภาพที่พร้อมใช้งานอยู่เสมอและป้องกันการเกิดความเสียหายที่ไม่คาดคิด

เนื่องจากรถไฟฟ้ามีราคาแพงมากจึงต้องมีการบริหารจัดการการใช้งานรถไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการตามตารางการเดินรถที่กำหนดของโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ สามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการคำนวณจะต้องการรถไฟฟ้าจำนวนน้อยที่สุดรวม 240 ขบวน สำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้า 8 เส้นทาง ซึ่งมีระยะทางรวม 509 กม. โดยปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนรถไฟฟ้าคือระยะทางและเฮดเวย์ในการให้บริการเดินรถ

จากข้อมูลตัวอย่าง ตารางการให้บริการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีช่วงเวลาเร่งด่วนที่มีรอบการเดินรถมากกว่าช่วงเวลาปกติ ดังนั้นจึงมีรถไฟฟ้าว่างจากการให้บริการในชั่วโมงปกติ จึงทำการจัดการทำงานซ่อมบำรุงให้แก่รถไฟฟ้าขบวนที่ว่างจากการให้บริการเดินรถในชั่วโมงปกติ ซึ่งมีเวลามากเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงสำหรับรถไฟฟ้าทุกขบวน จึงไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าไว้สำหรับทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันโดยเฉพาะ

แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองประเภทคงที่ (Deterministic) สามารถใช้ได้กับเหตุการณ์การเดินรถที่ปกติ แต่ในการเดินรถจริงอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนของเวลาการให้บริการหรือการทำงานซ่อมบำรุง เช่น ให้บริการเดินรถเสร็จล่าช้ากว่ากำหนด อาจจะทำให้ไม่สามารถทำงานซ่อมบำรุงเสร็จได้ทัน ทั้งนี้จากการจัดเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าจะเห็นว่ารถไฟฟ้ามีเวลาว่างให้ซ่อมบำรุงได้โดยไม่กระทบต่อแผนการเดินรถในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนนอกชั่วโมงเร่งด่วน จึงสามารถเลื่อนการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าได้เล็กน้อย โดยระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าจะต้องไม่เกินกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงที่ยอมรับได้เพื่อความปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีความเสี่ยงที่จะเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดขึ้นและอาจจะส่งผลกระทบต่อการให้บริการ

-17-0000(123-134)P5.indd 132 4/10/61 BE 2:14 PM

เดินรถได้ เช่น รถไฟฟ้าเสียหายฉุกเฉินและไม่สามารถใช้งานได้ในทางปฏิบัติสำหรับผู้ให้บริการเดินรถที่ไม่สามารถยอมรับความเสี่ยงที่จะเกิดการให้บริการเดินรถที่ล่าช้าได้ อาจจะต้องทำการสำรองรถไฟฟ้าในระบบเผื่อเกิดกรณีฉุกเฉินดังกล่าวขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] TEAM Consulting Engineering and Management Company Limited, TEAM Logistics and Transport Company Limited, and Daoreuk Communications Company Limited, "Mass Rapid Transit Master Plan in Bangkok Metropolitan Region: M-MAP," Bangkok: Transportation and Traffic Policy Plan Office, 2010.

[2] *Railway applications–The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 2: Guide to the application of EN 50126-1 for safety,* CENELEC - CLC/TR 50126-2, 2007.

[3] A. Schrijver, "Minimum circulation of railway stock," *Cwi Quarterly,* vol. 6, pp. 205–217, 1993.

[4] D. Canca, M. Sabido, and E. Barrena, "A rolling stock circulation model for railway rapid transit systems," *Transportation Research Procedia,* vol. 3, pp. 680–689, 2014.

[5] R. K. Mobley, In *Maintenance Fundamentals.* Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 1–10.

[6] G. Budai, D. Huisman, and R. Dekker, "Scheduling preventive railway maintenance activities," *Journal of the Operational Research Society,* vol. 57, pp. 1035–1044, 2006.

[7] W. Tharmmaphornphilas, "Study and comparison of operations system for EMU maintenance depot," Report NSTDA, Bangkok, Thailand, 2016.

[8] G. Maróti and L. Kroon, "Maintenance routing for train units: The interchange model," *Computers & Operations Research,* vol. 34, pp. 1121–1140, 2007.

[9] J.-F. Cordeau, G. Desaulniers, N. Lingaya, F. Soumis, and J. Desrosiers, "Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada," *Transportation Research Part B: Methodological,* vol. 35, pp. 767–787, 2001.

[10] G. L. Giacco, D. Carillo, A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and Á. G. Marín, "Short-term rail rolling stock rostering and maintenance scheduling," *Transportation Research Procedia,* vol. 3, pp. 651–659, 2014.

-17-0000(123-134)P5.indd 133 4/10/61 BE 2:14 PM