

การใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ รูปแบบการให้บริการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง Simulation Modeling in Metro Operations Pattern Analysis

วเรศรา วีระวัฒน์* และฐานันดร บุญไชย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

Waessara Weerawat* and Thanandorn Boonchai

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University,

Salaya, Phutta Monthon, Nakhonpathom 73170

บทคัดย่อ

ในช่วงที่ผ่านมาระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐจำนวนมาก เห็นได้จากการพัฒนาโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต่าง ๆ ในพื้นที่โดยรอบกรุงเทพมหานคร นอกจากนี้เมืองขนาดใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นขอนแก่นหรือภูเก็ต ต่างให้ความสนใจในการบูรณาการระบบรถไฟฟ้าเข้ากับแผนพัฒนาเมือง สำหรับระบบรถไฟฟ้าที่บริหารจัดการเดินรถเป็นเรื่องสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการให้บริการ อย่างไรก็ตาม การจัดการเดินรถเป็นเรื่องที่ไม่ง่าย เนื่องจากความซับซ้อนของข้อมูลที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้แบบจำลองในการจัดการเดินรถไฟฟ้า โดยมีโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม เป็นกรณีศึกษา การศึกษาเริ่มจากการเก็บข้อมูลและทำความเข้าใจรูปแบบการเดินรถ จากนั้นกำหนดสถานการณ์ภายใต้เงื่อนไขการเดินรถตามแผนที่กำหนดไว้รวมถึงสถานะไม่ปกติร่วมกับการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย จากการศึกษาพบว่าการเตรียมข้อมูลและการจัดทำกรอบแนวคิดต่าง ๆ ช่วยให้เห็นถึงปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเดินรถ โดยเฉพาะข้อกำหนดเรื่องเวลาการปล่อยรถและระยะเวลาที่จอดกลับรถ การปรับรูปแบบการเดินรถ โดยไม่พิจารณาปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลให้เกิดความล่าช้าและการเปลี่ยนแปลงจำนวนรถที่ให้บริการ งานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการจัดการเดินรถสำหรับโครงการรถไฟฟ้าอื่น ๆ ในอนาคต

คำสำคัญ : การจำลองสถานการณ์, การจัดการการเดินรถไฟฟ้า, แบบจำลองการเดินรถไฟฟ้า

Abstract

Rail transportation has been rapidly developing in recent years in Thailand with a strong encouragement of the government. An outcome of this support is the establishment of plans for many new Metro line projects in Bangkok and beyond its boundaries. Furthermore, agencies of the other large cities in Thailand, such as Khon Kean or Phuket, also show interest in integration of Metro system

in their urban development plans. For any rail systems, a train schedule is an important part to effectively manage customer demands and resources. However, a proper train schedule is not easy to plan because of the complexity of required information. The research objective was to use simulation model for train timetabling with a case study of Metropolitan Rapid Transit Chalong Ratchadham Line in Bangkok in order to design a suitable timetable. First, gathering the data and understanding the rail operations took place. Next, setting scenarios together with Mass Rapid Transit Authority of Thailand for the current service as well as a feasibility plan and a degraded plan were designed. The results show that data preparing and conceptual layout can define the important factors in the operations, especially the time of dispatching and the dwell time of a turn back point. Therefore, changing train operations pattern without considering these factors can cause the delay in the network and influence the number of trains in use. Outcomes of this research can act as the guideline for systematic timetabling of the other rail projects planned in the near future.

Keywords: simulation; rail timetabling; rail simulation model

1. คำนำ

จากที่ภาครัฐมีการวางแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย เพิ่มศักยภาพการเชื่อมโยงภายในประเทศและระหว่างประเทศ (สนข., 2559) ที่มียุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งของประเทศไทยเป็นหนึ่งในนั้น (วสท., 2559) ได้มีการผลักดันการพัฒนาระบบขนส่งทางรางเป็นอย่างมากด้วยเป้าหมายที่ว่าความเข้มแข็งของระบบขนส่งทางรางจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการขนส่งภายในประเทศ โดยการผลักดันที่ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของระบบขนส่งทางรางอย่างรวดเร็วที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การอนุมัติโครงการรถไฟฟ้า 10 สาย (Metro) ที่เป็นการเชื่อมโยงเครือข่ายการขนส่งมวลชนโดยรอบพื้นที่กรุงเทพมหานครให้สมบูรณ์มากขึ้น เพื่อประสิทธิภาพในการเดินทางและการใช้บริการของประชาชน (รฟม., 2559) ซึ่งทางจังหวัดที่มีเมืองขนาดใหญ่ในประเทศก็เริ่มให้ความสนใจในการนำแนวทางการพัฒนาระบบขนส่งทางรางมาเป็นส่วนหนึ่งของแผนการพัฒนาเมือง ดังนั้นเพื่อเป็นการรองรับและสนับสนุนโครงการระบบขนส่ง

ทางรางต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตและนโยบายการเติบโตอย่างยั่งยืนของทางรัฐบาล การศึกษาวิจัยด้านระบบขนส่งทางรางจึงมีความสำคัญที่ควรดำเนินการควบคู่กันไป ทั้งนี้โครงการระบบขนส่งทางรางถือได้ว่ามีความซับซ้อนจากการบูรณาการความรู้หลายแขนง (มานะชัย, 2559; วเรศรา และคณะ, 2557) และข้อมูลต่าง ๆ มีความเชื่อมโยงซึ่งกันละกัน จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงการดำเนินงานในภาพรวมของแต่ละด้านเพื่อให้เกิดการทำงานที่ประสานกัน โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในส่วนของแนวทางการจัดตารางเดินรถไฟฟ้าที่เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการและทางผู้ให้บริการเดินรถสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการดำเนินงานได้

การจัดตารางเดินรถเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินงานด้านระบบขนส่งทางรางเนื่องจากการวางแผนการเดินรถให้เหมาะสมกับความต้องการและสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้ให้บริการ โดยการจัดตารางการเดินรถนั้นสามารถทำได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับพิจารณาจัดลำดับความสำคัญหรือการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขหรือปัจจัยที่

ผู้ให้บริการให้ความสนใจ (Yalçinkaya and Mirac Bayhan, 2012) และส่งผลต่อการจัดสรรทรัพยากรอื่น ๆ เช่น การจัดตารางการทำงานของพนักงานและตารางการใช้งานรถไฟฟ้ามอเตอร์ เป็นต้น ดังนั้น การจัดตารางเดินรถในระบบขนส่งทางรางจึงนับได้ว่ามีความซับซ้อนในระดับหนึ่ง ทำให้การประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์เป็นทางเลือกที่ดีในการจัดการเดินรถไฟฟ้าอย่างเป็นระบบเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยในแบบจำลองเพื่อดูผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้ รวมถึงสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการจัดตารางเดินรถที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบันได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อการจัดการเดินรถไฟฟ้าที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการใช้งานในสถานการณ์จริงและความถี่ในการให้บริการ (headway) ที่ไม่ทำให้เกิดความล่าช้า (delay) ซึ่งการจัดตารางเดินรถนั้นอาจต้องมีการปรับเปลี่ยนในกรณีที่ปริมาณผู้โดยสารต่างจากที่ศึกษาไว้มาก โดยแบบจำลองสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนอย่างเป็นระบบ ช่วยให้เข้าใจถึงจุดที่เป็นปัญหา (bottle neck) และเงื่อนไขหลักที่สำคัญสำหรับการเดินรถ เช่น เวลาที่ปล่อยรถ ระยะเวลาจอดรถ (dwell time) ความถี่ในการให้บริการ รวมถึงสามารถนำผลการจำลองสถานการณ์ไปใช้ในการจัดการตารางการเดินรถได้ เช่น ระยะเวลาเดินทางของขบวนรถ ระยะเวลาสูงสุดที่ใช้ในการกลับรถ และจำนวนรถที่ต้องใช้งานได้ โดยงานวิจัยนี้ใช้โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม เป็นกรณีศึกษา

2. ความสำคัญของการจัดตารางเดินรถไฟฟ้า

การจัดตารางเดินรถถือเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งในการจัดการระบบรถไฟฟ้า (Yalçinkaya and

Bayhan, 2012) ภาพรวมในการเดินรถไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ประกอบด้วย การระบุความต้องการ (demand identification) ของผู้ใช้บริการในเส้นทางเดินรถไฟฟ้า การจัดตารางเดินรถ (scheduling) เพื่อบริหารทรัพยากรต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการเดินรถไฟฟ้า และการเดินรถ (operation) ให้เป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้และไม่ส่งผลกระทบต่อตารางเดินรถไฟฟ้าของขบวนรถถัดไป (Wen *et al.*, 2009) โดยการจัดตารางการเดินรถไฟฟ้านั้นนับว่ามีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับการบริหารทรัพยากรจำนวนมาก ได้แก่ จำนวนรถ ความจุของราง เส้นทางเดินรถ การใช้สถานี เป็นต้น (Canca, Barrena, and Algabaa, 2014) และทรัพยากรต่าง ๆ เหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับการตอบสนองความต้องการและการยกระดับการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการ ซึ่งสอดคล้องกับกรอบงานวิจัยการคมนาคมขนส่งทางรางด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการเดินรถไฟฟ้าของประเทศไทย

จากการศึกษาปัญหาการจัดการตารางเดินรถไฟฟ้าพบว่า มีงานวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการปรับปรุงตารางเดินรถไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และมีความสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การลดความล่าช้าของระยะเวลาการรอคอยของผู้โดยสาร และยังคงนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อหาตารางเวลาที่เหมาะสมที่สุด จึงเป็นเหตุผลได้ว่าตารางการเดินรถไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากสำหรับการบริหารจัดการการเดินรถไฟฟ้า (Cordeau *et al.*, 1998; Fang *et al.*, 2015)

การจำลองสถานการณ์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลภายใต้ปัจจัยที่มีความแปรปรวน เช่น ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของเส้นทาง และรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (fixed block และ moving block) ด้วยการสร้างแบบจำลองภายใต้

เงื่อนไขที่กำหนดเพื่อประมวลผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อการใช้งานจริง โดยระบบการจัดตารางเวลาเดินรถไฟนั้นประกอบด้วยระบบย่อยอื่น ๆ (sub system) ซึ่งครอบคลุมปัจจัยที่ควรพิจารณาถึง จึงทำให้ตารางเดินรถไฟที่เป็นผลจากการจำลองสถานการณ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อการดำเนินงานได้อย่างแท้จริง (Hasannayebi *et al.*, 2012)

การให้บริการเดินรถไฟที่สอดคล้องกับตารางเดินรถไฟที่กำหนดไว้ ไม่เกิดความล่าช้า และมีจำนวนรถเพียงพอต่อการเดินรถไฟให้เป็นไปตามแผนการเดินรถไฟ ถือเป็นประเด็นหลักที่สำคัญในการจัดตารางเดินรถไฟ สำหรับกรณีที่สถานการณ์จริงมีการปรับเปลี่ยน เช่น มีการเพิ่มสถานีให้บริการในเส้นทางที่ต่อขยาย หรือจำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการมีความแตกต่างจากแผนการเดินรถไฟเดิม จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนตารางเดินรถไฟให้สอดคล้องกับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ถ้าไม่มีการศึกษาและทำความเข้าใจในการจัดตารางเดินรถไฟ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเดินรถไฟลดลงได้

3. ข้อมูลโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม และสถานการณ์ที่ศึกษา

โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (Metropolitan Rapid Transit Chalong Ratchadham Line) หรือโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง (MRT Purple Line) (วิกิพีเดีย, 2560) อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ให้บริการเดินรถไฟโดยบริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (BEM) ระยะทางเดินรถประมาณ 23 กิโลเมตร ประกอบด้วย 16 สถานี เริ่มจากสถานีคลองบางไผ่ สถานีตลาดบางใหญ่ สถานีสามแยกบางใหญ่ สถานีบางพลู สถานีบางรักใหญ่ สถานีบางรักน้อยท่าอิฐ สถานีไทรม้า สถานีสะพานพระนั่งเกล้า สถานีแยกราชประสงค์ 1 สถานีแยกราชประสงค์ สถานีศูนย์ราชการนนทบุรี สถานีกระทรวงสาธารณสุข สถานีแยกติวานนท์ สถานีวงศ์สว่าง สถานีบางซื่อ และสถานีเตาปูน ดังรูปที่ 1 ให้บริการวันจันทร์-ศุกร์ ตั้งแต่เวลา 05:30-24:00 น. และวันเสาร์-อาทิตย์-วันหยุดนักขัตฤกษ์ ตั้งแต่เวลา 06:00-24:00 น. (BEM, 2560)



รูปที่ 1 แนวเส้นทางโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (ที่มา : BEM, 2560)

โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงเป็นระบบรถไฟฟ้าขนาดใหญ่ (heavy rail transit system) ทางวิ่งตลอดเส้นทางในขณะนี้ (พ.ศ. 2560) เป็นโครงสร้างยกระดับทั้งหมด มีความสามารถในการรับ-ส่งผู้โดยสารได้ประมาณ 50,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง (รฟม., 2560) ลักษณะขบวนรถในขณะนี้ เป็นแบบ 3 ตู้ขบวนต่อเชื่อมกันแบบกึ่งถาวร ความยาวประมาณ 65 เมตร โดยมีระบบขับเคลื่อนอยู่ที่ตู้ส่วนปลายของแต่ละด้านและตู้กลางเป็นตู้โดยสารที่ไม่มีระบบขับเคลื่อน มีความจุรวม 126 ที่นั่ง ผู้โดยสารยืน 6 คนต่อตารางเมตร (900 คนต่อขบวน) และสามารถเพิ่มจำนวนตู้โดยสารได้สูงสุดที่ 6 ตู้ขบวน มีความเร็วสูงสุดที่เป็นไปได้ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วในการให้บริการเฉลี่ย 32 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (BEM, 2560) มีระบบควบคุมการเดินรถแบบ communication based train control (CBTC) คือ รถไฟฟ้าสื่อสารด้วยคลื่นความถี่กับระบบควบคุมในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและแจ้งตำแหน่งของรถไฟเพื่อการควบคุมการเดินรถให้เป็นไปอย่างปลอดภัย

ข้อมูลหลักที่ใช้ในการจำลองการเดินรถไฟฟ้าของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยข้อมูลด้านโครงสร้างพื้นฐานทางรางและสถานี กำลังขับเคลื่อนของตัวรถ ความต้านทานในการเดินรถ และรูปแบบการเดินรถและเส้นทาง โดยข้อมูลสำคัญที่ต้องกำหนดให้ชัดเจนเนื่องจากส่งผลต่อการจำลองการเดินรถมีดังนี้

ในส่วนโครงสร้างพื้นฐานทางรางและสถานี ประกอบด้วย ตำแหน่งของช่วงรัศมีมีความโค้ง (radius) และความชันของราง ตำแหน่งของช่วงจำกัดความเร็ว (line speed restriction) ตำแหน่งของทางประแจ (turnout) ตำแหน่งของรูปแบบทางอาณัติสัญญาณและเครื่องนับเพลาล้อ (wayside signal and axle counter) และตำแหน่งของขอบเขตของสถานี (station area)

ในส่วนเครื่องยนต์ขับเคลื่อนและขบวนรถไฟฟ้าอ้างอิงตามข้อมูลน้ำหนักกรดแบบความหนาแน่นผู้โดยสาร 6 คนต่อตารางเมตร (passenger load ที่ W3: seating + standee 6/m²) โดยขบวนรถเป็นแบบ 3 ตู้ ที่มีตู้ที่ 1 และตู้ที่ 3 เป็นตู้ที่มีเครื่องยนต์ขับเคลื่อนส่งกำลัง ซึ่งมีข้อมูลที่สำคัญประกอบด้วย น้ำหนักและความยาวของตู้ส่งกำลังและตู้โดยสาร ค่ามวลสารหมุนรอบตัวเอง (rotary masses) เส้นกราฟระหว่างแรงฉุดลาก (tractive effort) กับความเร็ว สมการแรงต้านทาน ค่าแรงต้านจากสภาพหยุดนิ่ง (starting resistance) รูปแบบแรงต้านที่เกิดจากรัศมีมีความโค้งและความชันของราง อัตราเร่งสูงสุด (maximum acceleration) และอัตราหน่วงเมื่อเบรก (deceleration)

ในส่วนรูปแบบการเดินรถปกติแบ่งเป็นเส้นทางสายใต้ (southbound, SB) เริ่มจากสถานีคลองบางไผ่ชานชาลาบน (PP01_Up) เดินทางไปยังสถานีเตาปูนชานชาลาล่าง (PP16_Down) และเส้นทางสายเหนือ (northbound, NB) เริ่มจากสถานีเตาปูนชานชาลาล่าง (PP16_Down) เดินทางกลับมาสถานีคลองบางไผ่ชานชาลาบน (PP01_Down) โดยตารางที่ 1 แสดงข้อมูลอย่างง่ายของโครงสร้างเส้นทางที่ใช้ในการเดินรถและการกำหนดรหัสสถานีในงานวิจัยนี้ และรูปที่ 1 แสดงเส้นทางสายใต้และสายเหนือ

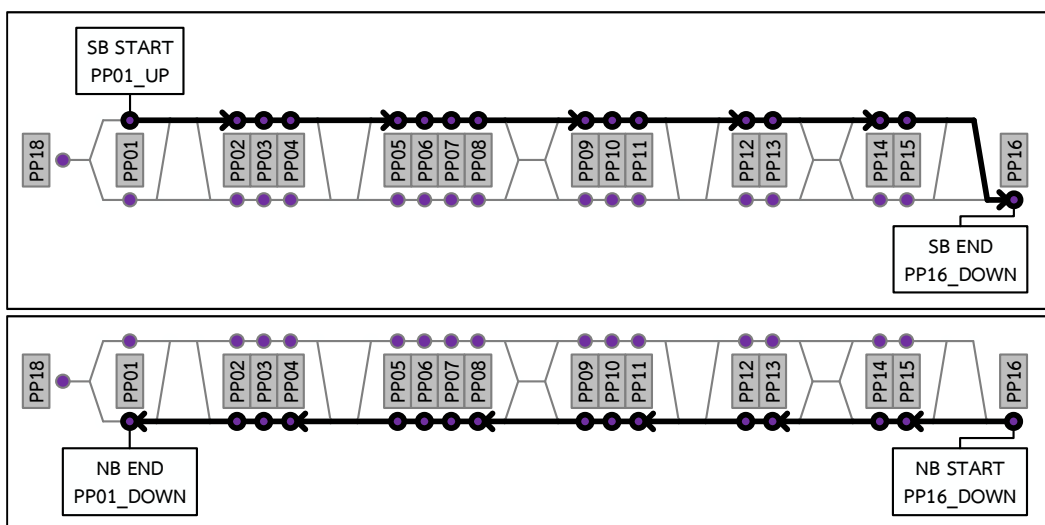
การดำเนินงานของงานวิจัยนี้เริ่มจากศึกษาข้อมูลส่วนงานการจัดตารางเดินรถเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการทำงานและแนวคิดการปฏิบัติงานจริง กำหนดกรอบแนวคิดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการเดินรถและสถานการณ์ที่จะศึกษาร่วมกับ รฟม. เก็บข้อมูลและทำความเข้าใจรูปแบบเส้นทางเดินรถที่เลือกศึกษา จัดทำแบบแนวคิดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเส้นทาง สร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน ขบวนรถ และรูปแบบการเดินรถเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและสถานการณ์

ปัจจุบันเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลวิเคราะห์และประมวลผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และปรับเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหาความล่าช้า และสรุปผลรูปแบบการเดินทางที่เหมาะสมของแต่ละสถานการณ์ที่ศึกษา โดยงานวิจัยนี้กำหนดการจำลองสถานการณ์ไว้ 3 สถานการณ์ ประกอบด้วย

สถานการณ์ที่ 1 การศึกษาการเดินทางลดช่วงเวลาเร่งด่วนในปัจจุบัน ด้วยความถี่ในการให้บริการ (headway) 6 นาทีระยะเวลาจอดรถ (dwell time) ที่สถานีคลองบางไผ่ถึงสถานีบางซื่อ และจุดกลับรถคลองบางไผ่ (PP18) เป็น 22 วินาที ส่วนระยะเวลาจอดรถที่สถานีเตาปูน (PP16_Down) เป็น 2 นาที

ตารางที่ 1 รูปแบบเส้นทางและสถานีของโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง

ID	NAME	ชื่อสถานี	ID	NAME	ชื่อสถานี
PP01	KLONG BANG PAI	คลองบางไผ่	PP09	YAEK NONTABURI 1	แยกกนนทบุรี 1
PP02	TALAD BANG YAI	ตลาดบางใหญ่	PP10	BANG KRASOR	บางกระสอ
PP03	SAM YAEK BANG YAI	สามแยกบางใหญ่	PP11	NONTABURI CIVIC CENTER	ศูนย์ราชการนนทบุรี
PP04	BANG PHLU	บางพลู	PP12	MINISTRY OF PUBLIC HEALTH	กระทรวงสาธารณสุข
PP05	BANG RAK YAI	บางรักใหญ่	PP13	YAEK TIWANON	แยกติวานนท์
PP06	BANG RAK NOI THA IT	บางรักน้อยท่าอิฐ	PP14	WONG SAWANG	วงศ์สว่าง
PP07	SAI MA	ไทรมา	PP15	BANG SON	บางซื่อ
PP08	PHRA NANG KLAO BRIDGE	สะพานพระนั่งเกล้า	PP16	TAO POON	เตาปูน
			PP18	F0158 REVERSE	จุดกลับรถคลองบางไผ่

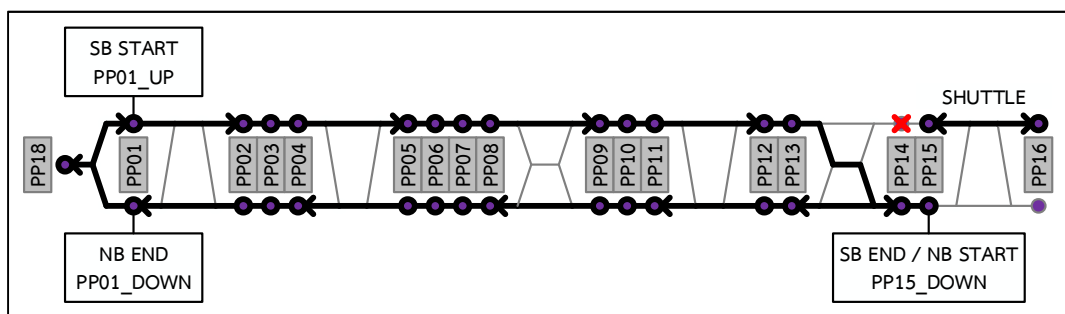


รูปที่ 1 เส้นทางรถเดินรถไฟฟ้าสายสีม่วงแบบปกติ

สถานการณ์ที่ 2 การศึกษาการเดินทางต่อเนื่องด้วยความถี่ในการให้บริการที่ 1 นาที 56 วินาที ที่เป็นความถี่ในการให้บริการสูงสุดสำหรับขบวนรถไฟฟ้าแบบ 3 ตู้ ที่ทาง รฟม. ได้ศึกษาไว้ ซึ่งการศึกษาในสถานการณ์นี้แบ่งเป็นการเดินรถรูปแบบปัจจุบันที่เปิดใช้ชานชาลาล่างของสถานีเตาปูนที่เดียว (PP16_Down: 1 platform) และการเดินรถรูปแบบที่เปิดใช้ทั้ง 2 ชานชาลาของสถานีเตาปูน (PP16: 2 platforms) สลับกัน (สถานการณ์ 2n)

สถานการณ์ที่ 3 การศึกษาการเดินทางในสภาวะไม่ปกติ (degraded mode) ที่สมมติให้ไม่สามารถเดินรถผ่านสถานีวงศ์สว่างชานชาลาบนได้

(PP14_Up) จึงแบ่งการเดินทางเป็นแบบระยะสั้น (Short Loop) ในช่วงสถานีคลองบางไฟ (PP01) ถึงสถานีบางซ่อนชานชาลาล่าง (PP15_Down) และการเดินรถแบบไปกลับ (shuttle) ในช่วงสถานีบางซ่อนชานชาลาบน (PP15_Up) ถึงสถานีเตาปูนชานชาลาบน (PP16_Up) โดยจำลองการเดินทางเพื่อหาความถี่ในการให้บริการที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ และระยะเวลาจอดที่สถานีเตาปูนที่สามารถวนขบวนรถแบบไปกลับมารับผู้โดยสารได้ในช่วงเวลาเดียวกับที่ขบวนรถแบบระยะสั้นเดินทางมาถึงที่สถานีบางซ่อนภายใต้เงื่อนไขอื่น ๆ เช่นเดียวกับการเดินรถปกติ ซึ่งรูปแบบการเดินทางเป็นดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบการเดินทางไฟฟ้าสภาวะไม่ปกติในสถานการณ์ที่ 3

4. ผลการวิจัยและการวิจารณ์

การรวบรวมข้อมูลเพื่อประยุกต์ในการจำลองสถานการณ์การเดินทางไฟฟ้าของงานวิจัยนี้ พบว่าข้อมูลทางโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้มีการกระจายตัวอยู่ในแบบแผนผังที่ได้รับมา 3 ประเภท ประกอบด้วยแบบงานทาง (trackworks) แผนผังระบบอาณัติสัญญาณ (signalling scheme plan) และแบบแผนผังทางเดินรถไฟฟ้า (track plan) ซึ่งอาจยังไม่เป็นข้อมูลในขั้นสุดท้ายที่ใช้ในการดำเนินโครงการ ดังนั้น เพื่อความถูกต้องและชัดเจนในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ จึงควรถอดข้อมูลจากแบบนั้น ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถเข้าใจและตรวจสอบได้ง่าย โดยงานวิจัยนี้นำเสนอเป็นรูปแบบ

ตารางข้อมูลที่ประกอบด้วยตำแหน่งช่วงรัศมีความโค้งราง ช่วงความชันราง ประแจ ช่วงจำกัดความเร็ว และเครื่องนับเพลาล้อ ขอบเขตสถานี และอุปกรณ์และรูปแบบอาณัติสัญญาณ ดังตารางที่ 2 ถึง 7 ตามลำดับ

นอกจากนี้ ในการแสดงข้อมูลอย่างง่ายทางโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลองสถานการณ์ของงานวิจัยนี้ สามารถสร้างเป็นแบบแนวคิดแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน (conceptual layout) ที่แสดงตำแหน่งของจุดจอดรถ ช่วงรัศมีความโค้ง ความชัน รูปแบบอาณัติสัญญาณ เครื่องนับเพลาล้อในระบบอาณัติสัญญาณ ทางประแจ และช่วงจำกัดความเร็ว ที่อยู่ในขอบเขตของเส้นทาง

เดินรถได้ดังตัวอย่างใน

รูปที่ 3 ทั้งนี้ สำหรับตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 8 ซึ่งเป็นการนำตารางการเตรียมข้อมูล

ทางโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ มารวมกันไว้ในตารางเดียวเพื่อการมองภาพรวมและตรวจสอบความถูกต้องของส่วนสำคัญต่าง ๆ ตามลำดับตำแหน่ง

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลช่วงตำแหน่งรัศมีความโค้งของราง

Route	Start Position [km]	End Position [km]	Radius [m]	Distance [km]	Route	Start Position [km]	End Position [km]	Radius [m]	Distance [km]
NB	9.0490	9.112	1504.4	0.063	SB	9.048	9.111	1500	0.063
NB	9.112	9.145	0	0.033	SB	9.111	9.144	0	0.033
NB	9.145	9.210	1500	0.065	SB	9.144	9.209	1504.4	0.065

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลช่วงตำแหน่งความชันของราง

Route	Start Position [km]	End Position [km]	Gradient [%]	Distance [km]	Route	Start Position [km]	End Position [km]	Gradient [%]	Distance [km]
NB	11.954	12.054	-0.2	0.100	SB	11.945	12.044	-0.202	0.099
NB	12.054	13.217	0	1.163	SB	12.044	13.205	0	1.161
NB	13.217	13.717	0.2	0.500	SB	13.205	13.705	0.2	0.500

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลตำแหน่งประแจ

Route	Position [km]	Turnout Point	Route	Position [km]	Switch Point
NB	8.949	T0101	SB	8.997	T0102
NB	9.457	T0105	SB	9.011	T0106
NB	9.761	T0109	SB	9.422	T0110

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลตำแหน่งช่วงจำกัดความเร็วและเครื่องนับเพลาล้อ

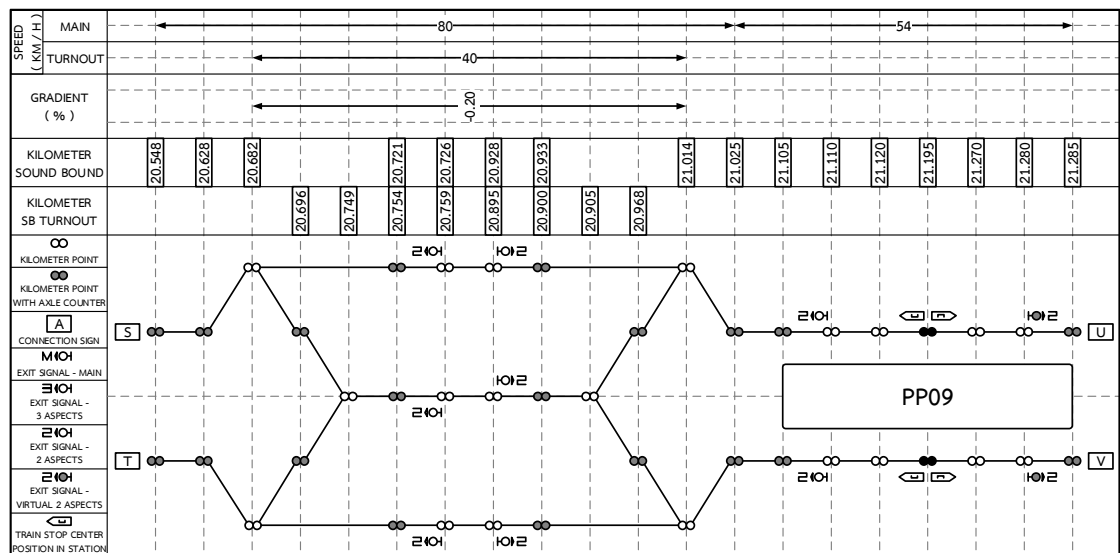
Route	Positon [km]	Before [km/h]	After [km/h]	Axle Counter ID	Route	Positon [km]	Before [km/h]	After [km/h]	Axle Counter ID
NB	9.910	54	54	X0133	SB	9.830	80	80	X0134
NB	10.091	60	54	X0137	SB	9.910	54	80	X0138
NB	10.160	80	60		SB	10.090	60	54	X0142

ตารางที่ 6 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลตำแหน่งขอบเขตสถานี

ID	Station Name	SB Position [km]			NB Position [km]		
		Start	Middle	End	Start	Middle	End
PP01	KLONG BANG PAI	9.925	10.000	10.075	9.925	10.000	10.075
PP02	TALAD BANG YAI	11.195	11.268	11.340	11.196	11.268	11.341
PP03	SAM YAEK BANG YAI	12.759	12.834	12.909	12.772	12.847	12.922

ตารางที่ 7 ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลตำแหน่งอุปกรณ์และรูปแบบอาณัติสัญญาณ

Route	Signal Name	Position [km]	Signal Direction Forward	Signal Direction Backward	Note
NB	V0105	10.085	✓		Virtual
NB	H0205	11.183		✓	
NB	V0205	11.353	✓		Virtual
SB	V0106	10.085	✓		Virtual
SB	H0202	10.565	✓		
SB	H0206	11.183		✓	



รูปที่ 3 ตัวอย่างแบบแนวคิดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานการเดินรถไฟ

ตารางที่ 8 ตัวอย่างตารางรวมข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานการเดินรถไฟ

Position [m]	Point Name	KM Point [km]	Speed Forward [km/h]	Speed Backward [km/h]	Gradient [%]	Radius [m]	Signal Forward	Signal Backward	Station Area
1068	X0129	9.830	80	80	0	0			
1148	X0133	9.910	54	80	0	0			
1153	H0125	9.915	54	54	0	0		✓	
1163		9.925	54	54	0	0			KLONG BANG PAI
1238		10.000	54	54	0	0	Stop Center	Stop Center	KLONG BANG PAI
1313		10.075	54	54	0	0			KLONG BANG PAI
1323	V0105	10.085	54	54	0	0	✓		
1329	X0137	10.091	60	54	0	1000			
1398		10.160	80	60	0	0			

ผลการจำลองการเดินรถที่เป็นไปได้ที่สำคัญของแต่ละสถานการณ์ที่ศึกษาสรุปได้ดังตารางที่ 9 ประกอบด้วย ความถี่ในการให้บริการ ระยะเวลาดำเนินทางครบรอบ (round trip) ที่นับตั้งแต่ขบวนรถออกจากชานชาลาบนของสถานีคลองบางไผ่ (PP01_Up) เดินทางไปกลับรถที่สถานีเตาปูน (PP16) เดินทางกลับมาที่ชานชาลาล่างของสถานีคลองบางไผ่ (PP01_Down) เดินทางไปกลับรถที่จุดกลับรถคลองบางไผ่ (PP18) เดินทางกลับมาถึง

ที่ชานชาลาบนของสถานีคลองบางไผ่ (PP01_Up) และเริ่มเดินรถรอบใหม่อีกครั้ง จำนวนขบวนรถที่ใช้จำนวนเที่ยว (trip) ที่ขบวนรถสามารถเดินรถได้ตลอดเส้นทางตั้งแต่สถานีต้นทางจนถึงสถานีปลายทาง ซึ่งนับรวมกันทั้งเส้นทางสายใต้และสายเหนือ ในระยะเวลาจำลองสถานการณ์ 2 ชั่วโมง โดยนับรวมกันทั้งเส้นทางสายใต้และสายเหนือ และระยะเวลาจอดรถเพื่อเปลี่ยนทิศทางการวิ่งที่จุดกลับรถคลองบางไผ่ (PP18) และสถานีเตาปูน (PP16)

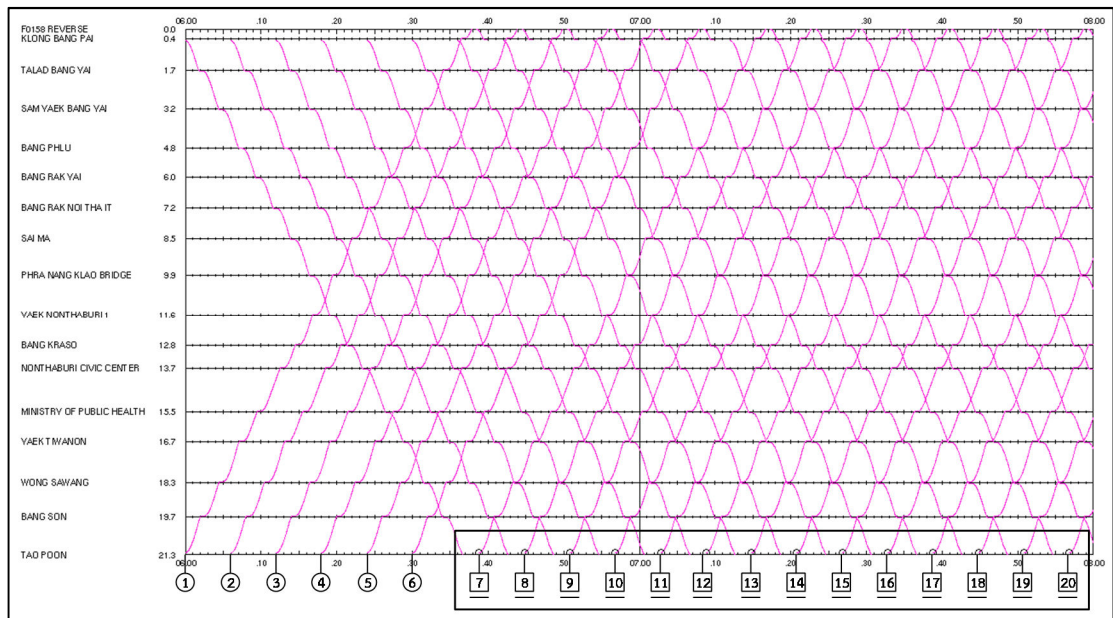
ตารางที่ 9 ผลการจำลองสถานการณ์

รายการ	Scenario 1 AS-IS	Scenario 2 1 platform ปรับ Headway	Scenario 2n 2 platforms ปรับ Dwell time	Scenario 3 Degraded Mode Short Loop + Shuttle
Headway ที่ใช้	6 นาที	4 นาที 1 วินาที	1 นาที 56 วินาที	8 นาที 16 วินาที
ระยะเวลาเดินทางครบรอบ (Round Trip) และพร้อมออกรถในรอบถัดไป	1 ชั่วโมง 23 นาที 59 วินาที	1 ชั่วโมง 20 นาที 19 วินาที	1 ชั่วโมง 19 นาที 16 วินาที	1 ชั่วโมง 14 นาที 24 วินาที (Short Loop)
จำนวนรถที่ใช้ (ขบวน)	14	20	41	10
จำนวนเที่ยว (Trip) ที่ทำได้ใน 2 ชั่วโมง ทั้งเส้นทางสายใต้ (SB) และสายเหนือ (NB)	27	41	88	22
ระยะเวลาจอดรถ (Dwell time) ที่จุดกลับรถ				
- จุดกลับรถคลองบางไผ่ PP18	22 วินาที	22 วินาที	12 วินาที	22 วินาที
- สถานีเตาปูน PP16	2 นาที	2 นาที	1 นาที 53 วินาที	1 นาที 51 วินาที

สำหรับสถานการณ์ที่ 1 พบว่าสามารถเดินรถด้วยความถี่ 6 นาที ได้โดยไม่เกิดความล่าช้า โดยจำนวนขบวนรถที่ใช้เป็น 14 ขบวน จำนวนเที่ยวที่เดินรถได้ตลอดเส้นทางเป็น 27 เที่ยว และต้องปรับกำหนดเวลาออกรถที่สถานีต้นทางของเส้นทางสายใต้และสายเหนือให้เหลื่อมกันที่ 2 นาที 53 วินาที เพื่อป้องกันการออกรถล่าช้าที่เกิดจากการกลับรถและการปล่อยรถขบวนถัดไปที่สถานีเตาปูน (PP16_Down) ซึ่งรูปที่ 4 เป็นตัวอย่างผังการเดินรถ (train diagram) ที่แสดงการออกรถช้ากว่ากำหนดของขบวนรถเส้นทางสายเหนือที่สถานีเตาปูน (TAO POON) ในกรณีที่กำหนดเวลาปล่อยรถ

พร้อมกันทั้งเส้นทางสายใต้และสายเหนือ โดยความล่าช้าในการออกรถดังกล่าวเริ่มตั้งแต่เที่ยวที่ 7 เป็นต้นไป

สำหรับสถานการณ์ที่ 2 พบว่าการเดินรถรูปแบบปัจจุบันที่เปิดใช้ชานชาลาล่างที่สถานีเตาปูนที่เดียวนั้น จะเกิดความล่าช้าเมื่อใช้ความถี่ที่ 1 นาที 56 วินาที ซึ่งความถี่ที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ของการเดินรถรูปแบบปัจจุบันนี้คือ 4 นาที 1 วินาที โดยจำนวนขบวนรถที่ใช้เป็น 20 ขบวน จำนวนเที่ยวที่ทำได้เป็น 41 เที่ยว ร่วมกับการปรับกำหนดเวลาออกรถที่สถานีต้นทางของเส้นทาง SB และ NB ให้เหลื่อมกันที่ 2 นาที 44 วินาที



รูปที่ 4 ผังการเดินทางแสดงความล่าช้าในการออกรถจากสถานีเตาปูนกรณีปล่อยรถพร้อมกัน

ส่วนสถานการณ์ที่ 2n พบว่าด้วยการปรับรูปแบบการเดินทางเป็นการใช้ทั้ง 2 ชานชาลาที่สถานีเตาปูน และการลดระยะเวลาการลงรถจากแผนที่กำหนดไว้ โดยที่จุดกลับรถคลองบางไผ่ปรับจาก 22 วินาที เป็น 12 วินาที และที่สถานีเตาปูนปรับจาก 2 นาที เป็น 1 นาที 53 วินาที จะทำให้สามารถเดินทางโดยไม่เกิดความล่าช้าด้วยความถี่ที่ต่ำที่สุดที่วางแผนไว้ที่ 1 นาที 56 วินาทีได้ โดยมีจำนวนขบวนรถที่ใช้เป็น 41 ขบวน และจำนวนเที่ยวที่ทำได้เป็น 88 เที่ยว

สำหรับสถานการณ์ที่ 3 การเดินทางในสภาวะไม่ปกติ จำเป็นต้องลดระยะเวลาจอดที่สถานีเตาปูนจาก 2 นาที เป็น 1 นาที 51 วินาที เพื่อให้สามารถวนขบวนรถแบบไปกลับไปรับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีบางซื่อ (PP15) ได้ทันพอดีกับที่ขบวนรถแบบระยะสั้นเดินทางมาถึง เพื่อความต่อเนื่องในการเดินทางของผู้โดยสารที่สามารถเปลี่ยนขบวนรถไฟฟ้ามหานครได้ทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลารอคอยที่สถานีบางซื่อเพิ่มขึ้นอีก โดยความถี่ของขบวนรถที่

เป็นไปได้ที่ไม่ทำให้เกิดความล่าช้าอยู่ที่ 8 นาที 16 วินาที และมีจำนวนขบวนรถที่ใช้เป็น 10 ขบวน แบ่งเป็นขบวนรถแบบระยะสั้น 9 ขบวน และขบวนรถแบบไปกลับ 1 ขบวน สำหรับจำนวนเที่ยวที่ทำได้เป็น 22 เที่ยว

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์ในการจัดการการเดินรถไฟฟ้ามหานครให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้โดยสารที่แตกต่างไปจากแผนที่ไว้ศึกษาไว้ โดยการจัดการเดินรถไฟฟ้ามหานครนั้นมีความซับซ้อนจากการใช้ข้อมูลที่ส่งผลกระทบซึ่งกันและกัน อาทิ ความโค้งและความลาดชันของทางรถไฟ ระยะทางระหว่างสถานี กำลังขับเคลื่อนของรถไฟ การกำหนดความเร็วของช่วงทางเพื่อความปลอดภัย ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อความเร็วของขบวนรถ โดยการศึกษาด้วยการจำลองสถานการณ์นั้น จะช่วยให้สามารถคาดการณ์ผลกระทบจากการ

ปรับเปลี่ยนแผนการเดินทางที่ใกล้เคียงกับสภาพงานจริง ทั้งในส่วนของความถี่ในการให้บริการที่เป็นไปได้ ระยะเวลาเดินรถครบรอบ จำนวนขบวนรถที่ต้องใช้ จำนวนเที่ยวการเดินรถ ระยะเวลาจอดรถ และการปล่อยรถจากสถานีต้นทาง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะต่อโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการใหม่ที่มีการเดินรถจริงต่างจากแผนที่ได้ศึกษาไว้แล้วมาก

จากการใช้แบบจำลองการเดินรถดังแสดงในกรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม ที่ทาง รฟม. เป็นผู้รับผิดชอบนั้น สามารถแสดงจุดที่เป็นปัญหาและแนวทางการปรับเปลี่ยนภายใต้โครงสร้างพื้นฐานและระบบอาณัติสัญญาณ ปัจจุบันได้ โดยผลการจำลองการเดินรถในสถานการณ์ต่าง ๆ ที่สนใจนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเดินรถให้ไม่เกิดความล่าช้าเมื่อความถี่ในการให้บริการเพิ่มสูงขึ้น จำเป็นต้องลดระยะเวลาจอดที่สถานีปลายทางและจุดกลับรถ สำหรับสถานการณ์การเดินรถสภาวะไม่ปกตินั้น สามารถเดินรถได้สอดคล้องกับความถี่การให้บริการตามแผนที่วางไว้ แต่จำเป็นต้องลดระยะเวลาจอดรถที่สถานีปลายทางเพื่อให้ขบวนรถแบบไปกลับสามารถเดินทางมาถึงสถานีรอยต่อได้พอดีกับที่ขบวนรถแบบระยะสั้นเดินทางมาถึง เพื่อให้ผู้โดยสารสามารถเปลี่ยนขบวนรถได้ทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลารอคอย

จากการศึกษาและผลการจำลองสถานการณ์ของงานวิจัยนี้ พบว่าการเตรียมข้อมูลและแบบแนวคิดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์สามารถช่วยให้เห็นถึงปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเดินรถไฟฟ้า โดยการกำหนดเวลาการปล่อยรถและระยะเวลาจอดรถสามารถส่งผลต่อการเดินรถได้ ซึ่งการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเดินรถในภาพรวมโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว อาจทำให้เกิดความล่าช้าในระบบได้ นอกจากนี้จะเห็นว่าปริมาณขบวนรถที่สามารถเดินรถได้ภายใต้โครงสร้างพื้นฐาน

เดียวกันนั้นมีความหลากหลาย การปรับเปลี่ยนแผนการเดินรถจึงส่งผลต่อปริมาณขบวนรถที่ต้องใช้งานด้วยเช่นกัน

ทั้งนี้ ข้อมูลหลักที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองการเดินรถไฟฟ้าประกอบด้วยตำแหน่งของสถานี อาณัติสัญญาณ ความชัน รัศมีความโค้ง และข้อจำกัดด้านความเร็ว ซึ่งมีเอกสารหลายประเภทที่ให้ข้อมูลข้างต้น อาทิ แบบแผนผังด้านอาณัติสัญญาณ แบบแผนผังด้านโยธา และแบบแผนผังด้านการวางราง และพบว่าเอกสารแต่ละประเภทมีการระบุค่าของข้อมูลเดียวกันไม่ตรงกัน ในงานวิจัยนี้จึงใช้เอกสารที่มีข้อมูลครบที่สุดเป็นข้อมูลหลักและใช้ส่วนที่ยังขาดจากเอกสารอื่นมาเพิ่มเติม ดังนั้นเมื่อทาง รฟม. หรือผู้รับผิดชอบโครงการรถไฟฟ้าต้องการสร้างแบบจำลองการเดินรถขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์ผลต่าง ๆ อาจจะติดต่อให้ทางผู้รับผิดชอบสัญญา (contractor) ต่าง ๆ ช่วยเตรียมข้อมูลให้ตรงกันในรูปแบบตารางข้อมูลและแบบแนวคิดการสร้างแบบจำลองในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยนี้ เพื่อความถูกต้องและสอดคล้องกับการติดตั้งใช้งานจริง

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับโครงการรถไฟฟ้าอื่น ๆ ทั้งรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในตัวเมืองและรถไฟฟ้าทางไกลระหว่างเมืองนั้นสามารถนำการเตรียมข้อมูลและการจัดทำแบบแนวคิดโครงสร้างเส้นทางต่าง ๆ ไปใช้เป็นแบบอย่างในการเก็บข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้องได้ในทำนองเดียวกัน เนื่องจากมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเดินรถเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การวางแผนการเดินรถล่วงหน้าหรือการคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการเดินรถต่าง ๆ ซึ่งไม่ครอบคลุมการปรับการเดินรถในระหว่างช่วงเวลาการให้บริการ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณในความร่วมมือจากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ที่สนับสนุนทั้งด้านข้อมูลของกรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม และข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

7. รายการอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.), โครงการรถไฟฟ้า, แหล่งที่มา : <https://www.mrta.co.th/th/index.php>, 10 กุมภาพันธ์ 2559.

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.), รถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม, แหล่งที่มา : <https://www.mrta.co.th/th/project/electrictrain/purpleline>, 4 สิงหาคม 2560.

นคร จันทกร, 2555, ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (BEM), รถไฟฟ้าสายสีม่วง, แหล่งที่มา : <https://www.bangkokmetro.co.th/mapPPL.aspx?Menu=183&Lang=Th>, 4 สิงหาคม 2560.

ประจวบ กล่อมจิตร และกัญญา ทองสนิท, 2554, การจำลองสถานการณ์เบื้องต้น, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

มานะชัย วัฒนหัตถกรรม, 2556, ระบบควบคุมรถไฟฟ้าและอาณัติสัญญาณเบื้องต้น, โครงการศูนย์นวัตกรรมทางโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

วเรศรา วีระวัฒน์, โชคชัย จุฑะโกสิทร์กานนท์, อธิธิ โชติ จักรไพวงศ์, สมินดา รัตนูปะโชติ, ธรรมวฤทธิ์ สิงห์วิลัย และภูมิษฐ์ กิระวานิช, 2557, ระบบรางขั้นพื้นฐาน (Fundamentals

of rail systems), โครงการศูนย์นวัตกรรมทางโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

วิกิพีเดีย, รถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม, แหล่งที่มา : https://th.wikipedia.org/wiki/รถไฟฟ้ามหานคร_สายฉลองรัชธรรม, 4 สิงหาคม 2560.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.), การพัฒนาระบบราง, แหล่งที่มา : <http://eit.or.th>, 20 กุมภาพันธ์ 2559.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.), การพัฒนาระบบราง, แหล่งที่มา : <http://www.otp.go.th/index.php/component/content/article/71.html>, 20 กุมภาพันธ์ 2559.

Cancaa, D., Barrenaa, E. and Algabaa, E., 2014, Design and analysis of demand-adapted railway timetables, J. Adv. Transport. 48: 119-137.

Cordeau, J. F., Toth, P. and Vigo, D., 1998, A survey of optimization models for train outing and scheduling, Transport. Sci. 32: 380-404.

Dicembre, A. and Ricci, S., 2011, Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable, J. Rail Transport Plan. Manag. 1(2): 59-68.

Fang, W., Yang, S. and Yao, X., 2015, A Survey on Problem Models and Solution Approaches to Rescheduling in Railway Networks, Intel. Transport. Syst. IEEE Transact. 99: 1-20.

Hansen, I. A. and Pachl, J., 2008, Railway Timetabling & Operation, Eurailpress, Germany.

- Hasannayebi, E. , Sajedinejad, A. , Mardani, S. and Mohammadi, K. S. A. R. M. , 2012, An integrated simulation model and evolutionary algorithm for train timetabling problem with considering train stops for praying, Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin, p. 1-13.
- Huerlimann, D. and Nash, A. B. , 2017, Open Track Simulation of Railway Networks User Manual, ETH Zurich.
- Wen, Z. J. , Tin, K. H. and Bao, H. M. , 2009, A Study of Heuristic Approach on Station Track Allocation in Mainline Railways, Proceeding of the Fifth International Conference of Natural Computation (ICNC).
- Yalçinkaya, Ö. and Bayhan, G. M. , 2012, A feasible timetable generator simulation modelling framework for train scheduling problem, Simul. Model. Pract. Theor. 20: 124-141.