

การวิเคราะห์การเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในสนามบินสุวรรณภูมิ

ทักษพร ทองบุญเพียร¹ และ วเรศรา วีระวัฒน์²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 999 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา

อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

Received: 2 May 2022; Revised: 10 October 2022; Accepted: 25 October 2022

บทคัดย่อ

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีการขนส่งที่นิยมนำมาใช้ภายในสนามบิน มีลักษณะการดำเนินงานคล้ายกับระบบขนส่งมวลชนทางรางคือเป็นการควบคุมการเดินรถจากศูนย์ควบคุมกลาง ทั้งนี้ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติมีลักษณะเฉพาะคือเป็นล้อรางและมี rail-guided นำทางอยู่ตรงกลางโดยเคลื่อนที่ไปบนทางคอนกรีต ซึ่งทำให้มีระยะเบรกที่สั้นเมื่อเทียบกับรถไฟที่เคลื่อนที่บนราง สำหรับโครงการขยายสนามบินสุวรรณภูมิได้มีการนำระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติมาใช้เพื่อขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารผู้โดยสารเหนือและอาคารเทียบเครื่องบิน 1 ภายในเขตการบิน ดังนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการให้บริการเดินรถจึงต้องมีการวางแผนตารางเดินรถให้สอดคล้องกับปริมาณผู้โดยสารที่มาใช้บริการในแต่ละช่วงเวลา งานวิจัยนี้เป็นการนำแบบจำลองสถานการณ์มาใช้ในการจำลองการเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่มีรูปแบบการเดินรถแบบ Communications-Based Train Control (CBTC) เพื่อวิเคราะห์และประเมินความสามารถในการให้บริการภายในสนามบินสุวรรณภูมิ รวมถึงวางแผนการเดินรถให้สอดคล้องกับจำนวนผู้โดยสารตามที่ได้มีการคาดการณ์ไว้ในแต่ละช่วงเวลาภายใต้โครงสร้างพื้นฐานทางรางที่กำหนด ประกอบด้วยเส้นทางการให้บริการสองลู่ ผลจากแบบจำลองสถานการณ์ พบว่า ความถี่ในการเดินรถต่ำสุดที่เป็นไปได้จะถูกจำกัดด้วยช่วงที่เป็นคอขวดตรงบริเวณทางเข้า-ออกของแต่ละสถานี โดยในช่วง Off-Peak สามารถเดินรถได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 400-450 วินาที และมีเวลาจอดที่สถานี 70-95 วินาที ใช้รถจำนวน 1 ขบวนก็เพียงพอในการให้บริการ ส่วนในช่วง Peak สามารถเดินรถได้ที่ความถี่ 200-212 วินาที มีเวลาจอดที่สถานี 70-90 วินาที ในช่วงนี้ต้องใช้รถ 2 ขบวนให้การให้บริการ ซึ่งทั้งสองช่วงเวลาสามารถเดินรถบนลู่เดียวก็เพียงพอ อย่างไรก็ตามในช่วง Surged Peak ที่มีผู้โดยสารจำนวนมาก การเดินรถบนลู่เดียวไม่สามารถรองรับผู้โดยสารได้เพียงพอ จึงกำหนดให้เดินรถที่ความถี่ 250 วินาที ทั้งสองลู่โดยให้ปล่อยรถสลับกันในแต่ละลู่ และมีเวลาจอดที่สถานี 84-125 วินาที ซึ่งใช้รถจำนวน 4 ขบวนในการให้บริการ การใช้แบบจำลองสถานการณ์ช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเดินรถได้อย่างสะดวกและรวดเร็วภายใต้ข้อจำกัดของโครงสร้างพื้นฐานทางราง รวมถึงช่วยให้เห็นถึงสิ่งที่อาจเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเดินรถได้

คำสำคัญ: ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ, ตารางเดินรถ, แบบจำลองสถานการณ์, การขนส่งในสนามบิน, ผู้โดยสาร

* Corresponding author. E-mail: waressara@gmail.com

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Analysis of Automated People Mover Operations at Suvarnabhumi Airport

Taksaporn Thongboonpian¹ and Waessara Weerawat^{*2}

Faculty of Engineering, Mahidol University, 999 Phuttamonthon 4 Road, Salaya,
Nakhon Pathom 73170, Thailand

Received: 2 May 2022; Revised: 10 October 2022; Accepted: 25 October 2022

Abstract

The Automated People Mover (APM) is popular transportation technology used within airports. It operates in a similar way to a metro system, with operations managed by the Operation Control Center (OCC). However, APM has specific characteristics as it has rubber wheels with a central guided rail running on a concrete surface. This allows for shorter braking distances compared with a typical rail track. In the Suvarnabhumi airport expansion project, APM is used to transport passengers between the North Main Terminal Building (NMTB) and satellite concourse 1 (SAT-1) on the airside. APM operations must be planned in accordance with the predicted number of passengers in each period under the rail infrastructure to achieve maximum efficiency. This research applies simulation modelling to the APM operations with Communications-Based Train Control (CBTC) to analyze and evaluate the service capability within Suvarnabhumi airport. The system consists of two loops. The results of the simulation show that the minimum possible headway on each loop is often limited by the bottleneck at the entry-exit of each station. During off-peak times, trains can operate at a headway of 400-450 seconds with a dwell time of 70-95 seconds and 1 train is enough. During peak times, trains can operate at a headway of 200-212 seconds with a dwell time of 70-90 seconds. At these times, 2 trains are required for services. Both periods can be operated on a single loop. However, during surged peak times there are more passengers. APM operations on a single loop cannot handle the increased passenger numbers. Therefore, the determination of headway is 250 seconds on both loops by allowing trains to be released alternately with a dwell time of 84-125 seconds. In this period, 4 trains are required for services. Simulation modelling can modify parameters quickly to show the different effects in the system with the limited rail infrastructure. It can show potential operating problems.

Keywords: automated people mover, timetable, simulation, airport transit, passengers

* Corresponding author. E-mail: waessara@gmail.com

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

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

1. บทนำ

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติถูกนำมาใช้ในการขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารภายในสนามบินสุวรรณภูมิ เนื่องจากเป็นระบบขนส่งที่มีขนาดเหมาะสมกับพื้นที่ของสนามบิน และมีความจุค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับรถบัสที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบัน โดยสามารถขนส่งผู้โดยสารได้ปริมาณมากในระยะเวลาสั้นๆ ทั้งนี้ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติมีลักษณะเฉพาะที่ต่างจากระบบขนส่งมวลชนทางรางทั่วไป คือ เป็นระบบอัตโนมัติไร้คนขับและเป็นล้อราง [1] อีกทั้งขบวนรถแต่ละขบวนมีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารพิเศษเพื่อให้อุปกรณ์สามารถสื่อสารได้อย่างปลอดภัยด้วยระบบป้องกันรถไฟอัตโนมัติ (Automatic Train Protection : ATP) คล้ายกับระบบขนส่งทางรางสมัยใหม่ สำหรับการเดินรถจะถูกควบคุมจากศูนย์ควบคุมการเดินรถ (Operation Control Center : OCC) ด้วยระบบ Communications-Based Train Control (CBTC) ที่มีการควบคุมระยะห่างระหว่างขบวนรถเป็นแบบ Moving Block ช่วยให้ขบวนรถสามารถเดินรถได้ถี่กันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการเดินรถแบบ Fixed Block จะเห็นว่าการดำเนินงานของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่คล้ายกับระบบขนส่งมวลชนทางรางที่มีความซับซ้อน ซึ่งถือเป็นครั้งแรกในประเทศไทยที่มีการนำระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติมาใช้ภายในสนามบิน อย่างไรก็ตามระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติภายในสนามบินสุวรรณภูมินั้นมีข้อจำกัดของโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นทางเดี่ยวตรงบริเวณช่วงเข้า-ออกของแต่ละสถานี ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนการดำเนินงานอย่างละเอียดและรอบคอบ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในการให้บริการ ซึ่งปัจจุบันมีแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองการเดินรถได้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง ช่วยแสดงให้เห็นถึงสภาพการเดินรถได้ งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม OpenTrack ในการศึกษาและประเมินความเป็นไปได้ในการเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติภายใต้ข้อจำกัดของโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึงวางแผนตารางเดินรถให้สอดคล้องกับจำนวนผู้โดยสารตามการคาดการณ์

2. แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองการจําลองการเดินรถระดับจุลภาค

การดำเนินงานของรถไฟเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันที่ซับซ้อนของโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) ล้อเลื่อนรถไฟ (rolling stock) และตารางการเดินรถ (timetable) ซึ่งในปัจจุบันแบบจำลองสถานการณ์ระดับจุลภาค (microscopic simulation) เป็นเทคนิคที่แม่นยำที่สุดในการสร้างแบบจำลองและแสดงให้เห็นถึงลักษณะการดำเนินงานที่ซับซ้อนของรถไฟ [2] การจำลองสถานการณ์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลา ทั้งความเร็วของขบวนรถที่เปลี่ยนแปลง และรูปแบบการเคลื่อนที่ (fixed block หรือ moving block) เป็นต้น [3] โดยแบบจำลองสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนอย่างเป็นระบบ ช่วยให้เข้าใจถึงจุดที่เป็นปัญหา (bottle neck) และเงื่อนไขหลักที่สำคัญสำหรับการเดินรถ เช่น ความถี่ในการเดินรถ (headway) และเวลาจอดที่สถานี (dwell time) รวมถึงสามารถนำผลการจำลองสถานการณ์ไปใช้ในการจัดการตารางการเดินรถได้ เช่น ระยะเวลาเดินทางของขบวนรถ ระยะเวลาสูงสุดที่ใช้ในการกลับรถ และจำนวนรถที่ต้องใช้ในการให้บริการ [3]

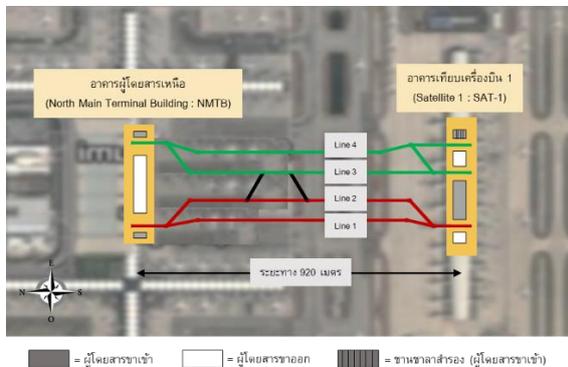
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์กับระบบขนส่งทางราง โดยส่วนมากจะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์การเดินรถทั้งในปัจจุบันและในอนาคต กล่าวคือ ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์สภาพการเดินรถในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการเดินรถ รวมไปถึงมีการวางแผนการเดินรถเพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ในอนาคต จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า มีการนำแบบจำลองไปใช้ในการวางแผนการเดินรถและปรับปรุงประสิทธิภาพของการขนส่งสินค้าทางราง [4-5] รวมถึงการวางแผนตารางเดินรถสำหรับรถไฟขนส่งผู้โดยสาร [6-9] นอกจากนี้ยังใช้ในการวางแผนการเดินแบบผสมผสาน [10-11] ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมแบบจำลองสถานการณ์หลาย

โปรแกรมที่นิยมนำมาใช้ในระบบขนส่งทางราง โปรแกรม OpenTrack ถือเป็นหนึ่งในโปรแกรมแบบจำลองทางรถไฟระดับจุลภาคที่สามารถจำลองลักษณะขององค์ประกอบทางรถไฟได้ทั้งหมด (โครงสร้างพื้นฐาน ล้อเลื่อนรถไฟ และตารางเดินรถ) ตลอดจนการดำเนินงานของรถไฟที่มีความซับซ้อน โดยสามารถวิเคราะห์และแสดงข้อมูลผลลัพธ์ในรูปแบบของ Train Diagram และ Statistics เป็นต้น [12]

3. ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในสนามบินสุวรรณภูมิ

ภายใต้โครงการขยายสนามบินสุวรรณภูมิได้มีการสร้างอาคารเทียบเครื่องบิน 1 (SAT-1) ขึ้น เพื่อให้สามารถรองรับจำนวนเที่ยวบินที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพอ โดยมีระยะทางอยู่ห่างจากอาคารผู้โดยสารหลังปัจจุบันหรือที่เรียกว่าอาคารผู้โดยสารเหนือ (NMTB) ประมาณ 920 เมตร พร้อมด้วยการนำระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติใต้ดินมาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้โดยสารในการเดินทางเชื่อมต่อระหว่างอาคารภายในเขตการบิน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในสนามบินสุวรรณภูมิ

ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติถูกนำมาใช้ในการเชื่อมระหว่างอาคารผู้โดยสารเหนือและอาคารเทียบเครื่องบิน 1 ประกอบด้วย 4 ราง (Line 1, 2, 3 และ 4) โดยสามารถแบ่งการให้บริการออกเป็นสองลูป เรียกว่า ลูปสีแดง (Red loop : RL) และลูปสีเขียว (Green loop : GL) สำหรับอาคารผู้โดยสารเหนือมี 3 ขานขาลา เป็นขานขาลาสำหรับผู้โดยสารขาเข้า 2 ขานขาลาอยู่ทางด้านข้าง และ 1 ขานขาลาสำหรับผู้โดยสารขาออกอยู่ตรงกลาง ในส่วนของอาคาร

เทียบเครื่องบิน 1 มี 3 ขานขาลาที่เปิดใช้งานปกติ แบ่งเป็น 2 ขานขาลาสำหรับผู้โดยสารขาออกและ 1 ขานขาลาสำหรับผู้โดยสารขาเข้า นอกจากนี้ยังมีอีก 1 ขานขาลาสำรองไว้สำหรับผู้โดยสารขาเข้า

4. แบบจำลองสถานการณ์

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม OpenTrack version 1.10.3 ในการศึกษาและประเมินความเป็นไปได้ในการเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในสนามบินสุวรรณภูมิ

4.1 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ประกอบด้วยข้อมูลนำเข้า 3 ส่วนหลักที่สำคัญ ได้แก่

4.1.1 โครงสร้างพื้นฐาน

สำหรับข้อมูลในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับทางวิ่งของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ โดยต้องมีการระบุลักษณะสำคัญของเส้นทาง เช่น ตำแหน่งของสถานี ความโค้งและความชันของเส้นทาง ตำแหน่งประแจ และช่วงการจำกัดความเร็วของเส้นทาง งานวิจัยนี้กำหนดให้เมื่อผ่านเส้นทางที่มีความโค้งหรือความชันจะเดินรถที่ความเร็วไม่เกิน 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อผ่านทางที่มีประแจจะเดินรถที่ความเร็วไม่เกิน 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และเมื่อผ่านทางที่มีทั้งประแจและความโค้งจะเดินรถความเร็วไม่เกิน 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยระยะในการจำกัดความเร็วมาจากการประมาณเท่านั้น

4.1.2 ล้อเลื่อนรถไฟ

สำหรับข้อมูลในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับการระบุสเปคของเครื่องยนต์ขับเคลื่อนและลักษณะของขบวนรถ ประกอบด้วย น้ำหนักและความยาวของขบวนรถ อัตราเร่ง อัตราเบรก ความเร็วสูงสุด รวมไปถึงจำนวนมอเตอร์ งานวิจัยนี้ใช้รถโมเดล Siemens-Airval ที่มี 2 ตู้ต่อขบวนหรือที่เรียกว่า Married-Pair (MP) สามารถรองรับผู้โดยสารได้ 210 คนต่อขบวน ตัวรถเป็นล้อรางที่สามารถลดการเสียดสีเวลาเคลื่อนที่ได้ โดยวิ่งบนรางที่เป็นคอนกรีตและมี guideway นำทางอยู่ตรงกลาง

4.1.3 เส้นทางเดินรถ

ข้อมูลในส่วนนี้ จะเป็นการระบุรายละเอียดของเส้นทางให้บริการของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ เช่น สถานีต้นทางและปลายทาง รูปแบบและเวลาการหยุดจอดตลอดจนความถี่ในการเดินรถ โดยเส้นทางให้บริการของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติเป็นการเดินรถระหว่างอาคารผู้โดยสารเหนือและอาคารเทียบเครื่องบิน 1

4.2 การปรับเทียบแบบจำลองสถานการณ์

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้รับการปรับเทียบโดยใช้ข้อมูลเวลาการเดินรถระหว่างอาคารผู้โดยสารเหนือและอาคารเทียบเครื่องบิน 1 จำลองการเดินรถแบบรถขบวนเดียว (single train) เดินรถบน 4 ราง ดังแสดงในรูปที่ 1 ผลลัพธ์จากแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยนี้ควรกำหนดให้ใช้ขบวนรถที่ประสิทธิภาพเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีเวลาการเดินรถใกล้เคียงกับผู้ประกอบการมากที่สุด

4.3 การกำหนดแนวทางในการจำลอง

แนวทางในการจำลองสถานการณ์อ้างอิงจากจำนวนผู้โดยสารที่คาดการณ์ไว้ในแต่ละช่วงเวลา เบื้องต้นได้มีการคำนวณความถี่ในการเดินรถให้สอดคล้องกับจำนวนผู้โดยสาร โดยเริ่มจากการหาจำนวนทริปที่ต้องเดินรถใน 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงคำนวณหาความถี่ในการเดินรถ ตัวอย่างเช่น ในช่วง Off-Peak มีการคาดการณ์จำนวนผู้โดยสารเท่ากับ 1795 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ดังนั้นจึงทราบว่าต้องเดินรถอย่างน้อย 8.55 (1795/210) ทริปต่อชั่วโมง หรือประมาณ 8-9 ทริปต่อชั่วโมง โดยหากคิดที่ 9 ทริป จะต้องเดินรถที่ความถี่ 400 วินาที (รูปที่ 2 ก) และในชั่วโมงถัดไปรถขบวนแรกสามารถออกจากสถานีได้ทันทีที่ศูนย์ แต่หากคิดที่ 8.55 ทริป จะต้องเดินรถที่ความถี่ 420 วินาที (รูปที่ 2 ข) ซึ่งในชั่วโมงถัดไปรถขบวนแรกจะออกจากสถานีทันทีที่สาม และหากคิดที่ 8 ทริป จะต้องการเดินรถที่ความถี่ 450 วินาที (รูปที่ 2 ค) ดังนั้นในช่วง Off-Peak จึงสามารถเดินรถได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 400-450 วินาที

Train A	Train A	Train A
0	0	0
400	420	450
800	840	900
1200	1260	1350
1600	1680	1800
2000	2100	2250
2400	2520	2700
2800	2940	3150
3200	3360	3600
ก	ข	ค

รูปที่ 2 แนวทางการกำหนดความถี่ในการเดินรถ

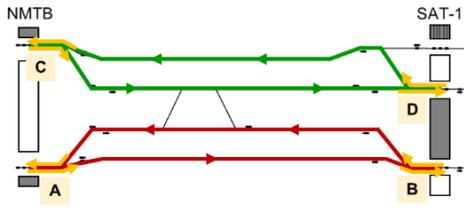
สำหรับในช่วงเวลา Peak และ Surged Peak มีแนวทางการคำนวณหาความถี่ในการเดินรถเช่นเดียวกัน โดยสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1 และในส่วนของเวลาจอดที่สถานีได้มีการกำหนดขั้นต่ำในช่วง Off-Peak และ Peak เท่ากับ 70 วินาที ส่วนช่วง Surged Peak เท่ากับ 84 วินาที

ตารางที่ 1 แนวทางการจำลองสถานการณ์

ช่วงเวลา	จำนวนผู้โดยสาร (คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง)	ความถี่ในการเดินรถ (วินาที)	เวลาจอดที่สถานี (วินาที)
Off-Peak	1795	400	70
		420	
		450	
Peak	3590	200	70
		210	
		212	
Surged Peak	5960	124	84
		126	

5. ผลลัพธ์จากแบบจำลองและการวิเคราะห์ผล

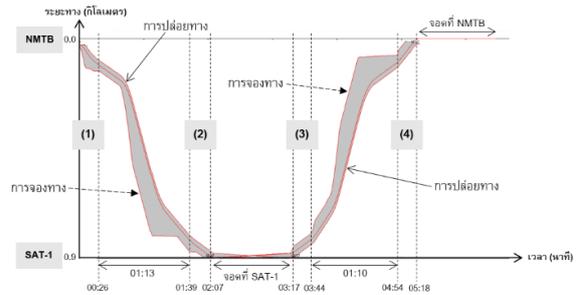
แบบจำลองสถานการณ์สามารถแสดงให้เห็นถึงสภาพการเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ โดยระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติภายในสนามบินสุวรรณภูมิมีเส้นทางที่เป็นการเดินรถช่องทางเดียวหรือจุดที่เป็นคอขวดของระบบ คือ บริเวณช่วงเข้า-ออกของแต่ละสถานี ดังรูปที่ 3 สำหรับลูปีสีแดงจะมีคอขวดที่บริเวณ A และ B ส่วนลูปีสีเขียวจะมีคอขวดที่บริเวณ C และ D



รูปที่ 3 บริเวณที่เป็นคอขวดของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

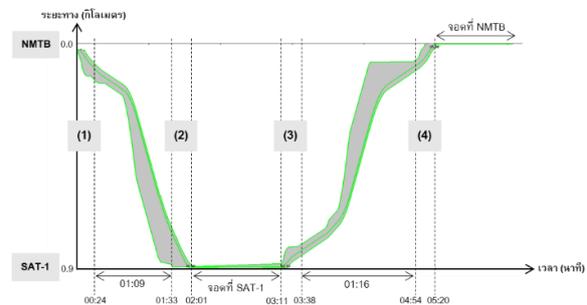
ผลลัพธ์จากแบบจำลอง พบว่า ในช่วงเวลา Off-Peak และ Peak ตรงบริเวณที่เป็นคอขวดของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติจะถูกจองเป็นเวลายาวนานอย่างน้อย 120-125 วินาที ส่วนในช่วง Surged Peak จะถูกจองเป็นเวลายาวนานอย่างน้อย 134-139 วินาที แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 เป็นการแสดงผลจากโปรแกรม OpenTrack ในรูปแบบของ Train diagram หรือเรียกว่า blocking time stairway โดยที่แกน X คือ เวลา และแกน Y คือ ระยะทาง (ตำแหน่งสถานี) จากรูปที่ 4 สามารถอธิบายได้ว่า ส่วนที่เป็นสีเทาและมีส่วนสีแดงสามเส้น คือ ลักษณะการเคลื่อนที่ของขบวนรถ ประกอบด้วย การจองและปล่อยเส้นทาง สีแดงตรงกลางคือตำแหน่งของขบวนรถ ส่วนสองเส้นที่ขนานข้างคือการจองและปล่อยเส้นทาง การที่ขบวนรถจะเคลื่อนไปข้างหน้า (แกน Y) ต้องมีการจองเส้นทางก่อน เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดขบวนอื่นเดินทางเข้ามาในบริเวณนั้นๆ และเมื่อขบวนรถเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วก็ปล่อยทางเพื่อให้ขบวนอื่นสามารถเดินทางเข้ามาได้ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันระหว่างระยะทางและเวลา รวมถึงความเร็วของขบวนรถ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเส้นทาง ได้มีการกำหนดช่วงการจำกัดความเร็วไว้ในหัวข้อ 4.1.1 จากรูปที่ 4 เป็นการเดินทางออกจากอาคารผู้โดยสารเหนือไปยังอาคารเทียบเครื่องบิน 1 และวนกลับมาที่อาคารผู้โดยสารเหนือ จะเห็นว่าขบวนรถสามารถจองทางได้ค่อนข้างไกล เนื่องจากทางข้างหน้าว่าง โดยสังเกตได้จากเส้นที่เป็นการจองทาง (ลูกศรเส้นประ) จะอยู่ห่างจากขบวนรถ กล่าวคือ เมื่อขบวนรถอยู่ที่ตำแหน่ง ก ทางข้างหน้าอาจถูกจองออกไปเป็นระยะ 150 เมตร ซึ่งห่างจากขบวนรถ เช่นเดียวกับการปล่อยทาง (ลูกศรเส้นทึบ) แต่จะเห็นว่าเส้นที่เป็นการปล่อยทางจะอยู่ใกล้กับขบวนรถ เนื่องจากเมื่อขบวนรถเคลื่อนผ่าน

ตำแหน่ง ก ทั้งขบวน เส้นทางทางจะถูกลบออกทันที ทั้งนี้ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติมีรูปแบบการเดินทางแบบ Moving Block ดังนั้นจะเห็นว่าลักษณะการจองและปล่อยเส้นทางจะมีความโค้งงอ ต่างจากการเดินทางแบบ Fixed Block ที่มีลักษณะการจองและปล่อยเส้นทางเป็นตอนคล้ายขั้นบันได



รูปที่ 4 ลักษณะการจองเส้นทางบนลูบสีแดง

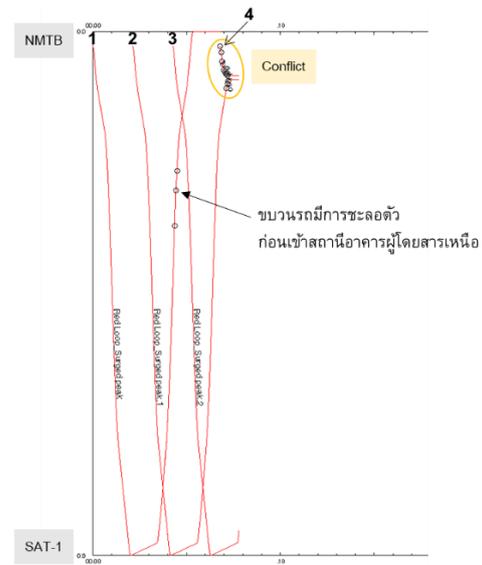
จากรูปที่ 4 เป็นการเดินทางบนลูบสีแดง สามารถอธิบายได้ว่า บริเวณ A (รูปที่ 3) ประกอบด้วยเวลาการจองเส้นทางสามส่วน คือ การจองเส้นทางก่อนเข้าสถานี (4) เป็นเวลา 24 วินาที เวลาจอดที่สถานีอาคารผู้โดยสารเหนือ 70 วินาที และการจองเส้นทางก่อนออกจากสถานี (1) เป็นเวลา 26 วินาที สำหรับบริเวณ B (รูปที่ 3) ก็เช่นเดียวกัน ประกอบด้วย การจองเส้นทางก่อนเข้าสถานี (2) เป็นเวลา 28 วินาที เวลาจอดที่สถานีอาคารเทียบเครื่องบิน 1 เป็นเวลา 70 วินาที และการจองเส้นทางก่อนออกจากสถานี (3) เป็นเวลา 27 วินาที



รูปที่ 5 ลักษณะการจองเส้นทางบนลูบสีเขียว

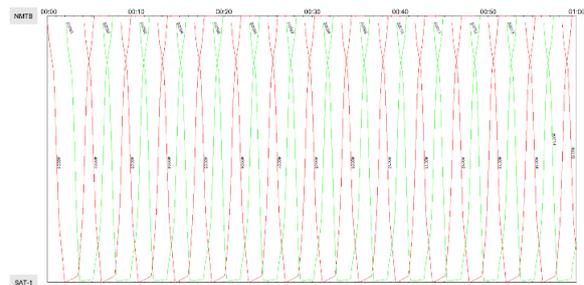
จากรูปที่ 5 สามารถอธิบายได้ว่า บริเวณ C (รูปที่ 3) ประกอบด้วยเวลาการจองเส้นทางสามส่วน คือ การจองเส้นทางก่อนเข้าสถานี (4) เป็นเวลา 26 วินาที เวลาจอดที่สถานีอาคารผู้โดยสารเหนือ 70 วินาที และการจองเส้นทางก่อนออกจากสถานี (1) เป็นเวลา 24 วินาที สำหรับบริเวณ D (รูปที่ 3) ก็เช่นเดียวกัน ประกอบด้วย การจองเส้นทางก่อนเข้าสถานี (2) เป็นเวลา 28 วินาที เวลาจอดที่สถานีอาคารเทียบเครื่องบิน 1 เป็นเวลา 70 วินาที และการจองเส้นทางก่อนออกจากสถานี (3) เป็นเวลา 27 วินาที

ดังนั้นความถี่ในการเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติจึงถูกจำกัดด้วยช่วงเวลาการจองเส้นทางตรงบริเวณที่เป็นคอขวด (A, B, C และ D) โดยในช่วง Off-Peak และ Peak สามารถเดินรถได้ที่ความถี่ต่ำสุดเท่ากับ 125 วินาทีบนแต่ละลูบ ส่วนช่วง Surged Peak สามารถเดินรถได้ที่ความถี่ต่ำสุดเท่ากับ 139 วินาทีบนแต่ละลูบ ซึ่งในการจำลองการเดินรถตามแนวทางที่ได้กำหนดไว้ (ตารางที่ 1) พบว่า ในช่วงเวลา Off-Peak และ Peak สามารถเดินรถได้ แต่ในช่วง Surged Peak จะเห็นว่าตรงบริเวณที่เป็นคอขวด เส้นทางจะถูกจองเป็นเวลาประมาณ 134-139 วินาที จึงไม่สามารถเดินรถที่ความถี่ต่ำกว่า 139 วินาทีได้ ซึ่งการจำลองการเดินรถตามแนวคิดที่กำหนดที่ความถี่ 124-126 วินาที ทำให้เกิดการขัดแย้งกัน (conflict) ตรงบริเวณทางเข้า-ออกสถานีอาคารผู้โดยสารเหนือ ดังรูปที่ 6 จะเห็นว่า รถขบวนที่ 1 วนกลับมาและต้องจอดที่สถานีอาคารผู้โดยสารเหนือเป็นเวลา 84 วินาที ทำให้รถขบวนที่ 4 ออกจากสถานีอาคารผู้โดยสารเหนือล่าช้า และไปเจอกับรถขบวนที่ 2 ที่วนกลับมาพอดี นอกจากนี้จะเห็นว่ารถขบวนที่ 1 มีการชะลอตัวเล็กน้อยก่อนเข้าสถานีอาคารผู้โดยสารเหนือ เพื่อให้รถขบวนที่ 3 ออกจากสถานีก่อน



รูปที่ 6 การจำลองการเดินรถในช่วง Surged Peak

อย่างไรก็ตามในช่วง Surged Peak จึงได้มีการกำหนดให้เดินรถบนลูบสีแดงและลูบสีเขียวที่ความถี่บนแต่ละลูบเท่ากับ 250 วินาที และให้มีการปล่อยรถสลับกัน ดังรูปที่ 7 ดังนั้นจะทำให้มีความถี่ที่แต่ละสถานีเท่ากับ 125 วินาที ใกล้เคียงกับแนวทางการจำลองสถานการณ์ (ตารางที่ 1) ซึ่งวิธีนี้ขบวนรถสามารถจอดรับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานีได้ประมาณ 84-125 วินาที



รูปที่ 7 การแสดงผลในรูปแบบ Train diagram ในช่วง Surged Peak

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

แบบจำลองสถานการณ์ถูกนำมาใช้ในการศึกษาและประเมินการเดินทางของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในสนามบินสุวรรณภูมิ รวมถึงวางแผนการเดินทางให้สอดคล้องกับจำนวนผู้โดยสารตามการคาดการณ์ โดยผลลัพธ์จากแบบจำลองสถานการณ์ของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 ทั้งนี้เมื่อต้องเดินรถบนลูบไต่ลูบหนึ่งจะกำหนดให้เดินรถบนลูบสีแดงเป็นหลัก เนื่องจากใช้เวลาในการเดินรถน้อยกว่าลูบสีเขียว

ตารางที่ 2 สรุปผลลัพธ์จากแบบจำลองสถานการณ์

ช่วงเวลา	ความถี่การเดินรถ (วินาที)	เวลาจอดที่สถานี (วินาที)	จำนวนทริปต่อชั่วโมง	จำนวนรถที่ใช้ในการให้บริการ
Off-Peak	400 (RL)	70-80	9a/9b	1
	420 (RL)	70-87	9a/8b	
	450 (RL)	70-95	8a/8b	
Peak	200 (RL)	70-80	18a/18b	2
	210 (RL)	70-84	18a/17b	
	212 (RL)	70-90	17a/17b	
Surged Peak	250 (RL)	84-125	15a/14b	4
	250 (GL)		14a/14b	

หมายเหตุ RL ย่อมาจาก Red loop และ GL ย่อมาจาก Green loop
a ย่อมาจาก การเดินรถจาก NMTB ไป SAT-1
b ย่อมาจาก การเดินรถจาก SAT-1 ไป NMTB

การใช้แบบจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเดินทาง การจองและปล่อยเส้นทาง รวมไปถึงแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเดินรถ เช่น ความถี่ในการเดินรถ เวลาจอดที่สถานี และโครงสร้างพื้นฐาน โดยการปรับลดความถี่ในการเดินรถสามารถทำได้ภายใต้ข้อจำกัดของโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในสนามบินสุวรรณภูมิมีเส้นทางที่เป็นการเดินทางทางเดียว นอกจากนี้การปรับความถี่ในการเดินรถมีผลต่อระยะเวลาจอดที่สถานีเช่นกัน หากเดินรถที่ความถี่สูงจะทำให้ระยะเวลาจอดที่สถานีน้อยลง ในทางตรงกันข้ามหากเดินรถที่ความถี่ต่ำก็สามารถเพิ่มระยะเวลาจอดที่สถานีได้ สำหรับในช่วง Off-Peak และ Peak สามารถเดินรถได้ตามแนวทางการจำลองที่วางแผนไว้

แต่ในช่วง Surged Peak ที่มีความถี่ต่ำมากๆ จะถูกจำกัดด้วยช่วงที่เป็นคอขวด ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดให้เดินรถบนลูบสีแดงและลูบสีเขียวเพื่อให้สามารถรองรับผู้โดยสารได้ตามที่คาดการณ์ไว้

สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจต้องมีการกำหนดระยะเวลาของรางหรือการตัดรางตามลักษณะการเดินทางจริง เนื่องจากในส่วนนี้จะมีความเกี่ยวข้องกับช่วงจำกัดความเร็วของการเดินรถ กล่าวคือ ขบวนรถต้องลดความเร็วลงเมื่อถึงระยะทางเท่าใดก่อนเข้าสู่สถานี

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เรืองณรงค์ จำกัด ที่สนับสนุนข้อมูลในการทำวิจัย ตลอดจนการสนับสนุนทุนการศึกษา ระดับปริญญาโทร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้ทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พอ.

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Airport Cooperative Research Program, Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports Report 37, United States: Transportation Research Board, 2012.
- [2] F. S. De, G. Medeossi and G. Montanaro, "Improving the Microscopic Simulation of Railway Networks," in *16th International Conference on Railway Engineering Design & Operation*, Portugal, 2018.
- [3] วเรศรา วีระวัฒน์ และ ฐานันดร บุญไชย, "การใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์รูปแบบการให้บริการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง," *Thai Journal of Science and Technology*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, น. 293-306, 2561.
- [4] H. Hrvoje, I. Talan and B. Michaljevic, "Improvement of suburban railway services by infrastructure and timetable modifications based on

- simulation modelling,” *Transport Problems.*, vol. 13, no. 3, pp. 15-27, 2018.
- [5] P. Hamed and P. Lautala, “Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules,” *Journal of Rail Transport Planning & Management.*, vol. 5, no. 4, pp. 211-224, 2015.
- [6] A. Nash, U. Weidmann, S. Bollinger, M. Luethi, and S. Buchmueller, “Increasing schedule reliability on the S-Bahn in Zurich,” *Transportation Research Record.*, vol. 1955, no. 1, pp. 17-25, 2006.
- [7] S. Hans, “Evaluation of Single Track Timetables using Simulation,” in *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, New York, 2014.
- [8] H. N. Koutsopoulos and Z. Wang, “Simulation of urban rail operations: application framework,” *Transportation research record.*, vol. 2006, no. 1, pp. 84-91, 2007.
- [9] C. Zhen and B. M. Han, “Simulation study based on opentrack on carrying capacity in district of Beijing-Shanghai high-speed railway,” *Applied Mechanics and Materials.*, vol. 505, pp. 567-570, 2014.
- [10] W. Weerawat, L. Samitiwantikul and R. Torpanya, “Operational challenges of the Bangkok Airport Rail Link,” *Urban Rail Transit.*, vol. 6, no. 1, pp. 42-55, 2020.
- [11] I. Ljubaja, M. Mikulčića and T. J. Mlinarića, “Possibility of increasing the railway capacity of the R106 regional line by using a simulation tool,” *Transportation Research Procedia.*, vol. 4, pp. 137-144, 2020.
- [12] A. Jelena and A. Schöbel, “OpenTrack—a tool for simulation of railway networks,” *Mechanics Transport Communications.*, vol. 15, no. 3, pp. 32-40, 2017.