

**การจำลองและวิเคราะห์การอพยพออกจากขบวนรถไฟฟ้ารางเดี่ยวในสถานการณ์ฉุกเฉิน :
กรณีรถไฟฟ้ามหานคร (MRT) สายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรี**

**Simulation and Analysis of Evacuation from Monorail Train in Emergency :
Case of Metropolitan Rapid Transit (MRT) Pink Line, Khae Rai-Min Buri**

จิตาภา สุวรรณเพชร¹ และ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล^{2*}

Jidapha Suwannaphet¹ and Ackchai Sirikijpanichkul^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

¹Safety Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*E-mail: fengacs@ku.ac.th

Received: May 07, 2025

Revised: Jun 23, 2025

Accepted: Jul 01, 2025

บทคัดย่อ

การเกิดอุบัติเหตุมักคาดเดาได้ยาก การเตรียมพร้อมรับมือสถานการณ์ฉุกเฉิน จะช่วยลดโอกาสเกิดความเสียหายรุนแรงได้ งานวิจัยนี้จำลองการอพยพออกจากขบวนรถไฟฟ้ารางเดี่ยวในสถานการณ์ฉุกเฉิน กรณีรถไฟฟ้ามหานคร (MRT) สายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรีโดยโปรแกรม Pathfinder เพื่อศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อเวลาอพยพ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความกว้างของบันไดออกจากรถไฟ (0.7 และ 0.9 เมตร) รูปแบบการอพยพ (แบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง) และอัตราการเพิ่มของผู้สูงอายุในอนาคต (ในปี พ.ศ. 2573 และ 2583) ผลการศึกษาพบว่า การอพยพแบบสองทิศทางใช้เวลาอพยพทั้งหมดออกจากขบวนรถไฟและไปขึ้นชานชาลาน้อยกว่าการอพยพแบบทิศทางเดียวอย่างมีนัยสำคัญเฉลี่ยที่ 10 นาที เมื่อขนาดความกว้างของบันไดทางออกจากขบวนรถไฟเพิ่มขึ้นจาก 0.7 เมตร เป็น 0.9 เมตร เวลาอพยพทั้งหมดของอพยพออกจากขบวนรถไฟแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทางจะใช้เวลาลดลงแตกต่างกัน 1 นาที แต่เวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการอพยพไปขึ้นชานชาลาพบว่ามีความแตกต่างกันเพียง 12 วินาที เมื่อพิจารณาถึงอัตราการเพิ่มของผู้สูงอายุจากหกเดือนแรกของการเปิดให้บริการ (ในปีพ.ศ. 2567) จนถึงปีพ.ศ. 2583 (ซึ่งคาดว่าจะอยู่ที่ร้อยละ 23.70) พบว่าเวลาการอพยพออกจากขบวนรถไฟจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 9.38 และเวลาอพยพทั้งหมดไปขึ้นชานชาลาจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 5.30 ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อการวางแผนและเตรียมการในอนาคตเพื่อลดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการอพยพผู้โดยสารจากขบวนรถไฟฟ้ารางเดี่ยว

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์ การอพยพ รถไฟฟ้ารางเดี่ยว รถไฟฟ้ามหานคร เหตุฉุกเฉิน

Abstract

Accidents are often difficult to predict. Being prepared for emergencies can reduce the chances of serious catastrophe. This research simulated evacuation from monorail trains in emergency, case of Metropolitan Rapid Transit (MRT) Pink Line, Khae Rai-Min Buri using the Pathfinder program to study factors that might affect evacuation time. The factors studied were the width of the exit stairs from the train (0.7 and 0.9 meters), the evacuation pattern (unidirectional and bidirectional), and the future elderly population growth (in 2030 and 2040). The results demonstrated that the bidirectional evacuation required significantly less total evacuation time from the train and to the platform than the unidirectional evacuation, at an average of 10 minutes. When the width of the exit stairs from the train was increased from 0.7 m to 0.9 meters, the total evacuation time for unidirectional

and bidirectional evacuation of the train differed by 1 minutes, but the total evacuation time to the platform differed by only 12 seconds. When the rate of increase in the elderly population from the first six months of service (in 2024) to 2040 (expected to be 23.7%) was considered, it was found that the evacuation time from the train would increase by an average of approximately 9.38% percent and the total evacuation time to the platform would increase by an average of approximately 5.30%. The information obtained from this research is useful for future planning and preparation to reduce the evacuation time and increase the efficiency of evacuation of passengers from monorail train.

Keywords: Simulation, Evacuation, Monorail train, Metropolitan rapid transit, Emergency

1. บทนำ

รถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) สายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรี เปิดให้บริการครั้งแรกเดือนมกราคม พ.ศ. 2567 เป็นระบบขนส่งทางรางระบบรอง (Urban passenger feeder rail; UPRF) สายแรกที่รถไฟฟ้ารางเดี่ยววิ่งคร่อมราง (Straddle monorail) ด้วยล้อยาง ยกสูงเหนือพื้นตลอดแนว ซึ่งมีเสียงรบกวนเบา รัศมีโค้งน้อย สามารถสร้างเข้าไปในที่แคบ ๆ ได้ ใช้พื้นที่และระยะเวลาก่อสร้างน้อย มีระบบการเดินรถและเขตทางวิ่งเฉพาะตัว แต่ละตู้โดยสารประกอบด้วย โบกี้ 2 ชุด โดยแต่ละชุดโบกี้มีล้อรับน้ำหนัก 2 ล้อ (Load tires) เพลาดูเดี่ยววิ่งบนคาน (Guideway beam) ล้อประคอง (Guide tires) 6 ล้อ ใช้ประคองตู้โดยสาร รถไฟฟ้าออกแบบให้สามารถวิ่งได้ 2 ทิศทาง มีระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า คานทางวิ่งจะมีรางจ่ายไฟ(Conductor rail) 750 โวลต์ [1] เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟให้ตัวรถเคลื่อนที่ ทางวิ่งส่วนใหญ่เป็นเสาเดี่ยวคานทางวิ่งคู่ขนานกันไปตลอดทั้งเส้นทาง ด้วยความกว้างคานทางวิ่งมีเพียง 0.69 เมตร จึงไม่เหมาะใช้เป็นทางเดินอพยพได้เหมือนระบบรางรถไฟทั่วไป หากเกิดกรณีรถไฟหยุดระหว่างสถานี แต่หากรางจ่ายไฟใช้งานได้ปกติ การอพยพผู้โดยสารในกรณีนี้จะนำรถไฟอีกขบวนมาจอดเทียบแล้ว

ติดตั้งสะพานทางเชื่อมเข้ารถไฟทั้งสองเพื่อให้ผู้โดยสารเดินข้ามมายังรถไฟที่เข้ามาช่วย เพื่อป้องกันในกรณีเกิดระบบรางจ่ายไฟขัดข้องรถไฟไม่สามารถวิ่งได้นั้น จึงมีการติดตั้งทางเดินอพยพไว้บริเวณใต้ท้องคานทางวิ่งและยื่นออกไปด้านข้างระหว่างตัวคานทั้งสอง ขนาดความกว้าง 1.12 เมตร ตามมาตรฐาน NFPA 130 [2] เพื่อใช้เป็นเส้นทางอพยพออกจากขบวนรถไฟ หากไม่อำนวยความสะดวกในการอพยพ หากไม่มีทางเดินอาจทำให้การอพยพต้องใช้เวลาเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น เมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2558 รถไฟฟ้ามุมไบโมโนเรล (Mumbai monorail) ประเทศอินเดีย เกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องรถไฟหยุดวิ่งระหว่างสถานี ทำการอพยพผู้โดยสาร 11 คน ใช้เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยรถกระเช้าไฟฟ้า ถึงแม้จะไม่มีผู้ได้รับบาดเจ็บ แต่ก็ทำให้ผู้โดยสารเสียเวลา หรือเกิดความตื่นตระหนก ตกใจ สับสนได้ ฉะนั้นการจัดการและเตรียมพร้อมรับมือเหตุฉุกเฉินที่จะเกิดขึ้น ถือเป็น การให้ความสำคัญ และเพิ่มความมั่นใจให้ผู้เข้ามาใช้บริการ ด้วยการออกแบบทางเดินอพยพของรถไฟฟ้าสายสีชมพูเพื่อไม่ให้เกิดขวางหรือเป็นอันตรายต่อระบบเดินรถ ทำให้ทางเดินอพยพและพื้นทางเดินภายในห้องผู้โดยสารมีความต่างระดับ 1.65 เมตร [3] (Figure 1)

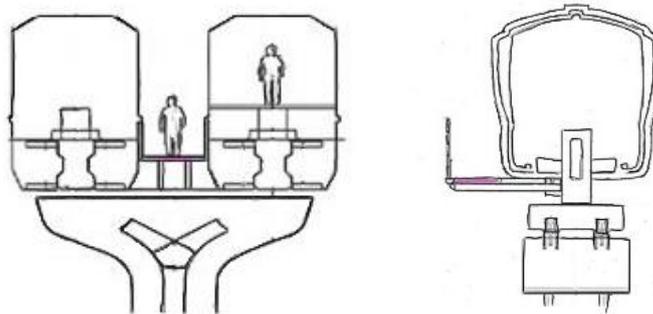


Figure 1 Evacuation walkway of MRT Pink line [3]

เมื่อเกิดเหตุที่จำเป็นต้องอพยพผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟด้วยการเดินบนทางอพยพ เพื่อไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุด ซึ่งเป็นเส้นทางตรง ยกระดับตลอดแนว ขนานไปกับทางวิ่งถึงสถานี นับว่าไม่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับการอพยพออกจากอาคาร แต่ด้วยความต่างระดับกันระหว่างพื้นรถไฟและทางเดินอพยพจำเป็นต้องใช้บันไดอำนวยความสะดวกและป้องกันการบาดเจ็บจากการกระโดดลงจากรถไฟ แต่เพราะบันไดที่นำมาใช้มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการติดตั้ง และน้ำหนักการเคลื่อนย้าย ทำให้ขนาดความกว้างของบันไดมีขนาดไม่เท่ากับประตูรถไฟ เป็นผลให้ความกว้างของทางออกเพื่อไปยังเส้นทางอพยพมีจำกัด การอพยพออกจากขบวนรถไฟถูกกำหนดให้มีทางออกได้มากที่สุดเพียง 2 ทิศทาง เมื่อบันไดถูกติดตั้งจะทำให้ทางเดินเหลือพื้นที่น้อยการเคลื่อนไหวลำบาก ทิศทางอพยพจึงมีเพียง 2 ทิศทาง รวมถึงระยะทางอพยพระหว่างสถานีแต่ละสถานีมีไม่เท่ากันมีทั้งมากกว่าหรือน้อยกว่า 1 กิโลเมตร หากระยะทางสั้นเวลาอพยพก็จะน้อย ตามหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ จึงทำให้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาอพยพในการอพยพออกจากขบวนรถไฟด้วยรูปแบบการเดินทางไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดมีปัจจัยหลัก ๆ คือ ขนาดความกว้างของทางออก จำนวนของทางออก ซึ่งจากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิ การจำลองการอพยพฉุกเฉินในสถานีรถไฟฟ้่าใต้ดินถนนไห่ฉาง ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อสะพานข้ามทะเล: กรณีศึกษาสถานีรถไฟใต้ดินถนนไห่ฉางของ Chen et al. [4] พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาอพยพและทำให้เกิดเป็นคอขวดหรือเกิดการรอคอย คือ ความกว้างของช่องทางอพยพ ระยะทางใกล้กับทางออก ความหนาแน่นของผู้คน และความเร็วในการก้าวเดินอพยพ งานวิจัยของ Qu et al. [5] ศึกษาการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนไหวของคนเดินเท้าและจำลองการอพยพบนบันได เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของคนเดินเท้าและการใช้บันไดระหว่างการอพยพ พบว่า จำนวนคนเดินเท้าที่มากขึ้นจะเกิดแกว่งคองและเวลาการอพยพจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้บันไดทำให้การอพยพเกิดเป็นรูปแบบคอขวด เนื่องจากความหนาแน่นเกิดขึ้นใกล้กับทางเข้าบันได หากมีความหนาแน่นน้อยจะทำให้เกิดการไหลได้เป็นอิสระมากขึ้น ความจุของบันไดขึ้นอยู่กับความกว้างของชั้นบันไดและความหนาแน่นของผู้คน ต่อมางานวิจัยของ Qin et al. [6] ได้จำลองการอพยพฉุกเฉินเหตุไฟไหม้ในสถานีรถไฟใต้ดินสถานการณ์ที่แตกต่างกันและมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในสถานี พบว่า การรวมกลุ่มจะทำให้เกิดความแออัดอยู่ที่ทางเข้าของบันได งานวิจัยของ Pan

et al. [7] ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์การออกแบบทางเดินอพยพต่อเวลาอพยพของผู้โดยสารในระบบเส้นทางรถไฟฟ้่ายกระดับ (Elevated EMS Maglev system) ด้วยโปรแกรม Pathfinder พบว่า ความกว้างของทางเดิน ระยะห่างของทางออก และตำแหน่งบันไดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระยะเวลาในการอพยพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความกว้างของทางเดินมีอิทธิพลมากที่สุด โดยหากเพิ่มความกว้างของทางเดินจาก 0.7 เมตร เป็น 1.5 เมตร จะสามารถลดเวลาอพยพลงได้สูงถึง 54.5% ต่อมางานวิจัยของ Najmanova et al. [8] ทดสอบการอพยพจากขบวนรถไฟฟ้่าสองชั้นโดยใช้โปรแกรม Pathfinder ในการตรวจสอบการอพยพออกจากรถรางสองชั้น พบว่าความกว้างของทางออก (≥ 0.9 เมตร) ส่งผลต่อเวลาการอพยพอย่างชัดเจน ตำแหน่งของทางออกและจำนวนจุดทางออก ความกว้างของทางเดินภายในรถไฟและจำนวนทางออกฉุกเฉิน เป็นปัจจัยที่ส่งผลสูงสุดต่อความเร็วการอพยพ งานวิจัยของ Noireuan [9] ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคนเดินเท้าภายในสถานีรถไฟฟ้่าใต้ดินในประเทศไทย พบว่าพฤติกรรมเคลื่อนที่ของผู้โดยสารเพศชายมีความเร็วกว่าเพศหญิง ช่วงอายุเดียวกันความเร็วในการเดินใกล้เคียงกัน ความลาดชันของบันไดมีผลกระทบต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ การระบายผู้โดยสารจะแปรผันตามความกว้างของบันได และ Wilunpan and Patvichaichod [10] จำลองหาเวลาการอพยพหนีไฟบนแท่นขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยโปรแกรม Pathfinder เพื่อประเมินประสิทธิภาพการอพยพหนีไฟบนแท่นขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ จากปัจจัยขนาดเส้นทางที่มีจำกัด พบว่า ขนาดเส้นทางอพยพและพฤติกรรมอพยพมีผลกระทบต่อตรงต่อเวลาอพยพเนื่องจากขนาดเส้นทางหนีไฟที่ลดลงจะส่งผลกระทบต่อเวลาของผู้อพยพทันที จึงไม่ควรให้ขนาดเส้นทางอพยพน้อยกว่าค่ามาตรฐานกำหนดไว้ จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของเส้นทางทางออก และบันไดมีผลมากที่สุดต่ออัตราการระบายผู้โดยสาร จำนวนและตำแหน่งทางออก มีผลต่อการกระจายผู้โดยสาร ที่จะช่วยลดการแออัดเฉพาะจุดหรือคอขวดได้ เมื่อมีจำนวนผู้โดยสารมากจะทำให้เกิดความหนาแน่นของผู้คนส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลงและเกิดการรอคอย ดังนั้นหากมีผู้โดยสารมากเวลาอพยพก็จะมากขึ้นตาม หากผู้โดยสารน้อย เวลาอพยพก็จะน้อย เป็นความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ส่วนในเรื่องระยะทางจากจุดเกิดเหตุถึงทางออก มีผลต่อเวลาโดยรวม ขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละบุคคล และพฤติกรรม

ผู้โดยสาร (เช่น การรวมกลุ่ม, การเลือกเส้นทาง) ซึ่งจะมีผลต่อรูปแบบการไหลของผู้คน โดยเฉพาะหากมีสิ่งกีดขวาง เมื่อผู้อพยพเดินคนใดคนหนึ่งเดินช้าหรือหยุด จะส่งผลให้เกิดการชะลอความเร็วในการเคลื่อนที่ของคนอื่น ๆ ตามมา นอกจากนี้ ในอนาคตคาดว่าสังคมผู้สูงอายุในประเทศไทยจะเพิ่มขึ้น [11] การอพยพออกจากขบวนรถไฟและเดินเท้าไปยังสถานีที่มีระยะทางไกล พื้นที่ทางเดินมีจำกัด ความเร็วในการเดินเท้าของผู้สูงอายุจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อเวลาอพยพ เนื่องจากความเร็วการเคลื่อนที่ของผู้สูงอายุที่ช้าลง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาความกว้างบริเวณทางออกจากขบวนรถไฟเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ว่าหากมีการเพิ่มความกว้างของทางออกจะสามารถลดเวลาการอพยพได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงใด รวมถึงรูปแบบการอพยพและสัดส่วนผู้สูงอายุที่อาจเพิ่มขึ้นในอนาคตจะมีผลต่อระยะเวลาอพยพหรือไม่ โดยจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม Pathfinder เป็นโปรแกรมที่น่าเชื่อถือทำให้เราสามารถคาดการณ์เวลาในการอพยพ อีกทั้งยังช่วยประหยัดในเรื่องของเวลาและค่าใช้จ่ายในซีกซ็อมอพยพและหาแนวทางแก้ไขปรับปรุงให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น [12]-[14] เพื่อเตรียมความพร้อมการจัดการรับมือตอบโต้หากเกิดเหตุฉุกเฉินได้อย่างครอบคลุมการจำลองผ่านโปรแกรมที่เสมือนจริงจึงช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้ดี

โปรแกรม Pathfinder ของบริษัท Thunderhead Engineer [15] เป็นโปรแกรมใช้จำลองการเคลื่อนที่ของมนุษย์ในการหาทางออกได้เสมือนจริง ใช้ในการจำลองอพยพของคนเดินทางเท้าในพื้นที่ที่มีลักษณะต่าง ๆ ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น เครื่องบิน สถานีรถไฟใต้ดิน โรงพยาบาล อุโมงค์รถไฟใต้ดิน เป็นต้น สามารถแสดงผลได้หลากหลายรูปแบบ เช่น กราฟเวลาการอพยพ การแสดงความหนาแน่นของแต่ละพื้นที่อพยพ เป็นต้น สามารถวิเคราะห์ผลได้ทั้งรูป 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถปรับเปลี่ยน พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ เช่น ความเร็วการเคลื่อนที่ จำนวน ขนาดความกว้างของไหล ความสูง เพศ ช่วงอายุ การรอคอย การตัดสินใจในพื้นที่อพยพที่ต่างกัน เป็นต้น และรองรับการเชื่อมต่อกับ CAD/BIM เช่น Revit, IFC, DWG, FBX, JPG หรือ PNG เป็นต้น เหมาะสำหรับการจำลองผู้คนทั่วไป อีกทั้งยังเปิดให้บริการทดลองใช้เต็มรูปแบบฟรีเป็นเวลา 1 เดือน ทำให้ใช้งานง่าย เมื่อเทียบกับโปรแกรมการจำลองอื่น ๆ เช่น Simmulex EXODUS ที่ต้องใช้ความชำนาญและมีราคาสูงกว่า [16]

หลักการเคลื่อนที่ของผู้อพยพพัฒนาจากแบบจำลองของ Helbing and Molnar [17] โดยอาศัยแนวคิด การเคลื่อนที่ของแต่ละบุคคลเกิดจากแรงเสมือนหลายชนิด เช่น แรงปรารถนาไปยังเป้าหมาย แรงหลีกเลี่ยงจากคนอื่น โดยมีพื้นฐานมาจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ในเรื่องแรงกระทำรอบข้าง (Social force) การเปรียบเสมือนตัวบุคคลแทนวัตถุที่มากระทำต่อกันสำหรับแรงที่มากระทำต่อตัวบุคคลนั้นประกอบไปด้วย แรงกระทำทางกายภาพและแรงกระทำทางด้านจิตวิทยา ที่มีผลมาจากสิ่งแวดล้อมและปัจจัยอื่นที่อยู่รอบตัวบุคคล โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวบุคคลจะมีรูปแบบทิศทางการไหลของลมที่ความเร็วต่าง ๆ เพื่อเป็นการบอกให้ตัวแทนบุคคลรู้ว่าทางออกอยู่ที่ตำแหน่งใด ในการคำนวณเวลาอพยพ (Evacuation time) ได้โดยประมาณจากเวลาที่ใช้เคลื่อนที่ไปยังทางออก (Walking time to exit door) ซึ่งคำนวณจากระยะทางไปยังประตูทุกประตูเทียบกับความเร็วของผู้อพยพ บวกกับเวลาที่ใช้ในการรอคอยที่ประตู (Queuing time) คำนวณจากขนาดความกว้างของประตูที่มองเห็นเท่านั้นเทียบกับจำนวนผู้อพยพ เพื่อให้ตัวแทนบุคคลเลือกใช้ประตูทางออกที่ทำให้ใช้เวลาในการอพยพน้อยที่สุด [18] รูปแบบการเคลื่อนที่ที่แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

1) แบบ Society of Fire Protection Engineering (SFPE) เป็นรูปแบบที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ผู้อพยพจะไม่หลบหลีกสิ่งกีดขวางหรือผู้อพยพคนอื่น และสามารถเดินทะลุผ่านได้ ความเร็วในการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดโดยความกว้างของประตูและความหนาแน่นของผู้ใช้งานในแต่ละพื้นที่นั้น ๆ

2) แบบ Steering ถูกพัฒนามาจากวิธี SFPE เป็นรูปแบบการจำลองที่มีลักษณะการเคลื่อนที่อพยพแบบสมดุ มีการเลี้ยวหลบหลีกสิ่งกีดขวาง การอพยพจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน มีการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติได้จริง ทำให้มนุษย์สามารถเดินทางเป็นเส้นโค้ง มีการเว้นระยะห่างระหว่างสิ่งของต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยใช้การคำนวณเวกเตอร์ความเร็วและทิศทาง เส้นทางที่ได้จากอัลกอริทึม (Algorithm) จะถูกทำให้โค้งมนหรือเรียบ เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมเคลื่อนที่จริงของมนุษย์ที่ไม่เป็นเส้นตรงตลอดเวลา ระบบบังคับเคลื่อนที่ใน Pathfinder จะเคลื่อนย้ายผู้โดยสารเพื่อให้เคลื่อนที่ตามเส้นโค้ง ค้นหาโดยประมาณและสามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้

นักวิจัยหลายกลุ่มได้นำโปรแกรมการจำลองนี้มาใช้เพื่อศึกษาการอพยพ อาทิ การจำลองเวลาอพยพฉุกเฉินที่สถานีรถไฟใต้ดินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนของ Hui et al. [14] พบว่า เวลาอพยพที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับการจำลองโดยใช้โปรแกรม Pathfinder โดยมีอัตราข้อผิดพลาดเพียง 5.4% แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องทางวิทยาศาสตร์และความน่าเชื่อถือของแบบจำลองการอพยพ ต่อมาการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมมนุษย์และแบบจำลองการอพยพในอาคารสูงภายใต้สถานการณ์เพลิงไหม้ของ Ronchi and Nilsson [19] พบว่าการเคลื่อนที่แบบ Steering ให้ผลที่แม่นยำและสะท้อนพฤติกรรมมนุษย์จริงมากกว่าการเคลื่อนที่แบบ SFPE โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีความแปรผันสูง เช่น การอพยพในสถานการณ์ที่มีคนจำนวนมาก ต่อมางานวิจัยของ Boonprasert and Patvichaichod [20] ได้จำลองเวลาอพยพหนีไฟในอาคารสูงที่มีพื้นที่ครอบครองหลายประเภทด้วยโปรแกรม Pathfinder เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนที่ระหว่าง SFPE และ Steering พบว่าการเคลื่อนที่แบบ Steering มีความใกล้เคียงเหมาะสมกับพฤติกรรมของมนุษย์ และมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการเคลื่อนที่แบบ SFPE ต่อมางานวิจัยของ Tanavej [21] ได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรม Pathfinder จำลองการอพยพกรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถในการอพยพ พบว่าปัญหาจากการฝึกซ้อมอพยพหนีไฟจริงกับโปรแกรมจำลองพบประเด็นปัญหาที่ตรงกัน การศึกษาของ Champati and Patvichaichod [22] คำนวณหาเวลาอพยพหนีไฟออกจากอาคาร โดยการประยุกต์จากวิธี Hydraulic flow calculation ผสานกับวิธี Steering พบว่า เวลาในการอพยพจากการคำนวณด้วยวิธี Hydraulic flow calculation สมการคำนวณหาเวลาอพยพหนีไฟที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่จากวิธี Steering สามารถใช้งานได้จริง สรุปได้ว่าโปรแกรม Pathfinder มีรูปแบบการอพยพที่เป็นระเบียบ สามารถนำมาใช้จำลองการอพยพได้เสมือนจริง

อย่างไรก็ตาม แม้โปรแกรม Pathfinder จะสร้างรูปแบบการจำลองพฤติกรรมทั่วไปได้ดี แต่เพราะมนุษย์มีความซับซ้อน จึงไม่สามารถครอบคลุมทุกรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของมนุษย์ในสถานการณ์เฉพาะได้ เช่น การขัดแย้งภายในฝูงชน, การตัดสินใจที่ไม่เหมาะสมในสถานการณ์ฉุกเฉิน หรือความแตกตื่นในเหตุการณ์ฉุกเฉินทำให้มนุษย์

สามารถแสดงพฤติกรรมที่แย่งที่สุดออกมาได้ และอาจส่งผลกระทบต่อกรอพยพ [23] การตัดสินใจในช่วงเหตุฉุกเฉินจะแตกต่างจากการตัดสินใจในแต่ละวัน [24]

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. อุปกรณ์

1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Inter® core™ i7-8550U CPU@ 1.99 GHz RAM 16.0 GM

2) โปรแกรม Pathfinder 2024

3) แบบแปลนโครงสร้างรถไฟฟ้า Monorail และทางเดินฉุกเฉินสายทางวิ่งสถานีพันธมิตร ไป สถานีบางชั้น ของรถไฟฟ้ารางเดี่ยว สายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรี

2.2. ขอบเขตการศึกษา

1) จำลองการอพยพผู้โดยสารออกขบวนรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) สายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรี ด้วยบันไดอพยพ (Evacuation stair) ลงทางเดินอพยพไปสถานีที่ใกล้ที่สุด ด้วยโปรแกรม Pathfinder

2) พื้นที่การจำลองคือ สายทางวิ่งจากสถานีพันธมิตร ไป สถานีบางชั้น นับเป็นจุดที่มีระยะของทางเดินไปยังสถานีใกล้ที่สุด เพื่อให้การจำลองที่ครอบคลุมอาจจะเลวร้ายที่สุด

3) สถานการณ์จำลอง รถไฟฟ้าเกิดเหตุขัดข้องไม่สามารถกักระบบคืนได้ รถไฟหยุดนิ่งระหว่างสถานี ระยะทางจากประตูแรก/สุดท้ายไปถึงชานชาลาทั้งหมด 937.5 เมตร

4) จำนวนกลุ่มตัวอย่างจากข้อมูลจำนวนผู้โดยสารที่รถไฟฟ้าสามารถรองรับได้มากที่สุดทั้งหมด 568 คนต่อขบวน เพื่อเป็นการคาดการณ์ถึงในสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด

5) กำหนดให้เจ้าหน้าที่จากภายนอกเข้าช่วยเหลือและดำเนินการติดตั้งบันไดอพยพที่ประตูทางออกเรียบร้อยแล้ว

2.3. การสร้างแบบจำลองอพยพ

ใช้โปรแกรม Pathfinder สร้างแบบจำลองพื้นที่ของรถไฟฟ้าและเส้นทางอพยพ โดยเริ่มจากการสร้างขอบเขตพื้นที่ภายในขบวนรถไฟฟ้าและเส้นทางอพยพ กำหนดลักษณะโดยทำการเพิ่มห้อง (Add a room) พร้อมทั้งกำหนดค่าความสูงของระนาบแกน Z (Z Plane) ตามสัดส่วน แล้วสร้างบันได กำหนด ความกว้าง ลูกตั้ง ลูกนอน จำนวนชั้น เพิ่มประตู (Door) และเพิ่มทางออก (Exit) ให้มีขนาดใกล้เคียงกับแบบ (Figure 2-4)



Figure 2 (A) Layout and (B) Model of MRT Pink line

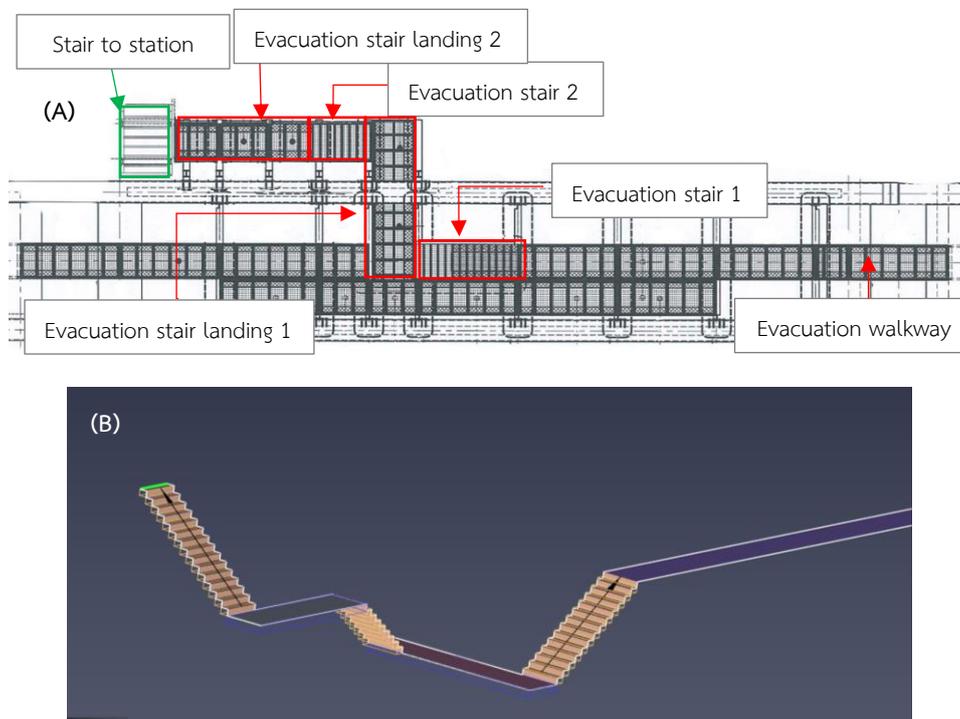


Figure 3 (A) Layout and (B) Model of evacuation stairs of walkway to station

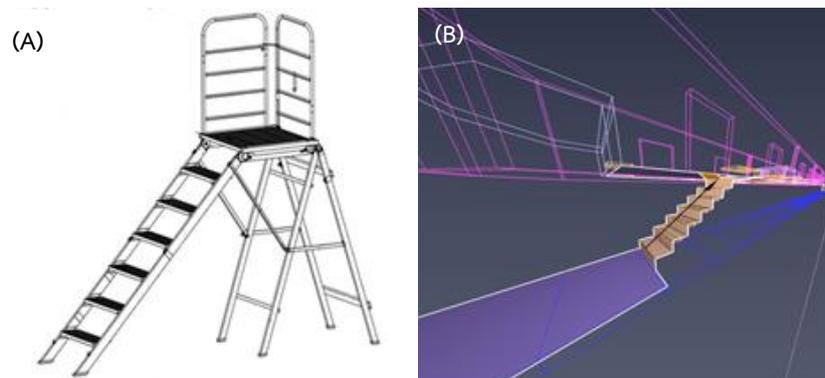


Figure 4 (A) Layout and (B) Model of evacuation stairs

2.4. การกำหนดจำนวนผู้อพยพและการตั้งค่าพารามิเตอร์ผู้อพยพ

การกำหนดจำนวนผู้อพยพและการตั้งค่าพารามิเตอร์ (Table 1) ในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนผู้โดยสารสูงสุดที่รถไฟ 1 ขบวน 4 ตู้สามารถรองรับได้สูงสุด 568 คน เพื่อให้มีความเสมือนจริงในการจำลองพฤติกรรมในการอพยพ ต้องกำหนดเงื่อนไขและคุณสมบัติการอพยพ โดยสัดส่วนผู้โดยสารอ้างอิงจากรายงานผู้ใช้บริการจริงในช่วง 6 เดือนแรก [25] และสัดส่วนผู้โดยสารกรณีผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2573 และ 2583 อ้างอิงจากสำนักงานสถิติแห่งชาติ [11] ปัจจัยปรับเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่การเดินบนบันได เพื่อจำลองความแตกต่างรายบุคคล เท่ากับ 0.75 เมตร/วินาที [7] ตามคู่มือวิศวกรรมการป้องกันอัคคีภัยของสมาคมวิศวกรป้องกันอัคคีภัย

(Society of Fire Protection Engineers; SFPE) แนะนำว่าให้ใช้เวลาหน่วงก่อนอพยพหรือเวลาที่บุคคลากรรับรู้เหตุการณ์ตัดสินใจหรือเกิดอาการตื่นตระหนก ไม่ควรเกิน 120 วินาที เพื่อความสอดคล้องกับพฤติกรรมในสถานการณ์ฉุกเฉินที่มีความไม่แน่นอนสูง เวลาที่บุคคลจะเริ่มอพยพถูกสุ่มจากช่วง 30-120 วินาที ด้วยความน่าจะเป็นเท่ากัน [7] ในการกำหนดความกว้างบริเวณทางออก แม้ว่าความกว้างของประตูรถไฟจะกว้าง 1.6 เมตร แต่ความกว้างทางออกจริงหรือบันไดที่เป็นทางเชื่อมเข้าสู่เส้นทางเดินอพยพอยู่ที่ 0.7 เมตร เป็นขนาดความกว้างจริงของบันไดที่ใช้เป็นทางลงมายังทางเดิน ในงานวิจัยนี้จึงมีสถานการณ์การจำลองในกรณีความกว้างของทางออกเพิ่มขึ้นอีกเพียง 0.2 เมตร [8] เนื่องจากมีข้อจำกัดของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนเคลื่อนย้ายมาติดตั้ง

Table 1 Parameter setting

Parameter	Setting values		
	Child	Adult	Elderly people
Elderly people, first 6 months [25]	5.90%	86.40%	7.70%
Elderly people in 2030 [11]	5.90%	68.60%	25.50%
Elderly people in 2040 [11]	5.90%	62.70%	31.40%
Shoulder width [13]	31 cm	33.7-43.2 cm	33.7-35.2 cm
Movement speed [13]	0.78-1.12 m/sec	1.1-1.3 m/sec	0.56-0.94 m/sec
Passenger number [1]		568 persons	
Factors influencing walking speed adjustments [7]		0.75 m/sec	
Delay time before evacuation initiation [7]		30-120 sec	
Movement patterns [18], [19]		Steering	
Width of evacuation stair of train exit		0.7 m and 0.9 m	

2.5. การจำลองสถานการณ์

งานวิจัยนี้จำลองการอพยพทั้งหมด 120 ครั้ง แบ่งเป็นสถานการณ์การอพยพแบบทิศทางเดียว 60 ครั้ง อพยพแบบสองทิศทาง 60 ครั้ง ขนาดความกว้างบันได 0.7 เมตร และ 0.9 เมตร ขนาดละ 30 ครั้ง ภายในขบวนรถไฟจะมีการปรับสัดส่วนช่วงอายุผู้โดยสาร โดยในแต่ละกรณี ๆ ละ 10 ครั้ง (Figure 5) ซึ่งใน 10 ครั้งนี้จะมีการปรับตำแหน่งผู้โดยสารภายในขบวนรถไฟด้วยการสุ่มของโปรแกรมใน การสุ่มตำแหน่งผู้โดยสารและการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนจำนวนผู้โดยสารช่วย ซึ่งจากการทดลองซ้ำ 10 ครั้งของแต่ละสัดส่วนผู้โดยสาร พบว่าผลลัพธ์แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันเล็กน้อย มีความแตกต่างเท่ากันเพียง -1.52% ถึง -1.9%

กรณีอพยพผู้โดยสารแบบทิศทางเดียว หมายถึงประตูเปิดให้ออกเพียงทางออกเดียว (Figure 6) ผู้อพยพจะต้องออกประตู 1 ตู้ A1 ฝั่งขวามือ เพื่อลงเดินเท้าบนทางเดินฉุกเฉินไปยังสถานีบางซัน ด้วยระยะทาง 937.5 เมตร ขนาดความกว้างทางออกจากขบวนรถไฟหรือบันไดอพยพ (Evacuation stair) สำหรับเป็นทางออกจากขบวนรถไฟลงทางเดิน เท่ากับ 0.7 เมตร และ 0.9 เมตรทำการจำลองอพยพซ้ำขนาดความกว้างละ 10 ครั้ง โดยทั้ง 10 ครั้งของแต่ละขนาดความกว้างทางออกจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งของผู้โดยสารภายในขบวนรถไฟใหม่ด้วยการสุ่มของโปรแกรม

กรณีอพยพผู้โดยสารแบบสองทิศทาง หมายถึงประตูทางออกจะเปิด 2 ประตู (Figure 7) ผู้โดยสารสามารถเลือก

เองได้ว่าจะออกประตู 1 ตู้ A1 ฝั่งขวามือ เพื่อไปยังสถานีบางชัน หรือประตู 1 ตู้ B1 ฝั่งซ้ายมือ เพื่อไปยังสถานีนพรัตน์ ระยะทางทั้งสองเท่ากันคือ 937.5 เมตร สำหรับเป็นทางออก จากขบวนรถไฟลงทางเดิน เท่ากับ 0.7 เมตร และ 0.9 เมตร

ทำการจำลองอพยพเข้าขนาดกว้างละ 10 ครั้ง โดยทั้ง 10 ครั้ง ของแต่ละขนาดความกว้างทางออกจะปรับเปลี่ยนตำแหน่ง ของผู้โดยสารภายในขบวนรถไฟใหม่ด้วยการสุ่มของโปรแกรม

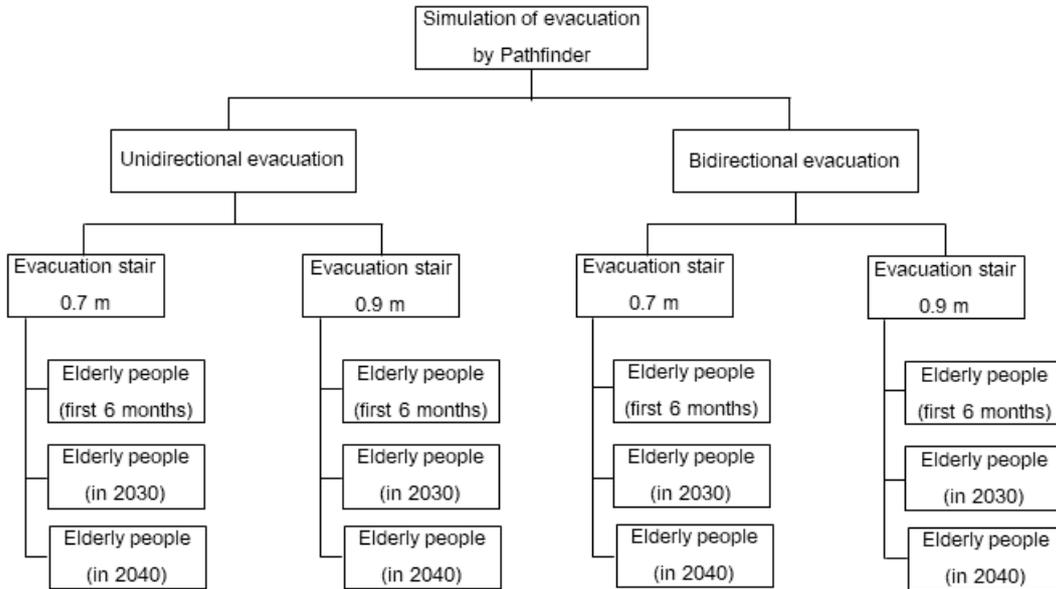


Figure 5 Diagram of evacuation simulation

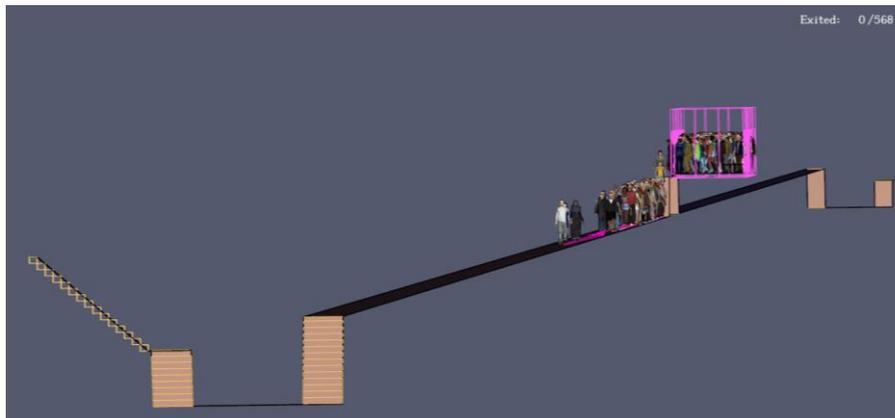


Figure 6 Unidirectional evacuation Door Exit 1 Car A1 go to Bang Chan station



Figure 7 Bidirectional evacuation Door Exit 1 Car A1 to Bang Chan station or Door Exit 1 Car B1 to Nopparat station

3. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จำลองสถานการณ์กรณีไฟฟ้าขัดข้องขบวนรถไฟหยุดนิ่งเจ้าที่ประจำขบวนจะดำเนินการติดต่อไปยังศูนย์ควบคุมการเดินรถ เมื่อต้องอพยพด้วยทางเดินเท้า จะมีการประกาศชี้แจ้งผู้โดยสารถึงขั้นตอนการดำเนินการพร้อมเปิดคลิปวิดีโอ ในระหว่างนั้นเจ้าหน้าที่จากภายนอกจะเข้ามาช่วยเหลือในการติดตั้งบันไดและเปิดประตูนำอพยพไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุด ซึ่งระยะเวลาและระยะทางในการเข้าช่วยเหลือแต่ละกรณีจะมีความแตกต่างกัน เป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน งานวิจัยนี้จึงได้จำลองสถานการณ์เพียงหลังจากที่เจ้าหน้าที่เข้าช่วยเหลือพร้อมอพยพแล้ว เพื่อควบคุมเวลาที่ไม้อาจคาดเดาของเหตุฉุกเฉิน จากการจำลองพบว่าการอพยพทั้งสองรูปแบบคนแรกใช้เวลาอพยพทั้งหมดเพื่อเดินไปยังชั้นชานชาลาเฉลี่ยเท่ากับ 14 นาที เท่ากัน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.81 ซึ่งเวลาที่ได้นี้ใกล้เคียงกับการทดลองเดินจริง

ผลการจำลองเวลาอพยพผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟทั้งหมดพบว่าการอพยพแบบทิศทางเดียว ขนาดบันได 0.7 เมตร เฉลี่ย 21.8 นาที และขนาดบันได 0.9 เมตร เฉลี่ย 20.5 นาที มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.97 และ 0.91 ตามลำดับ อพยพแบบสองทิศทาง ขนาดบันได 0.7 เมตร เฉลี่ย 11.7 นาที และขนาดบันได 0.9 เมตร เฉลี่ย 10.8 นาที มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.95 และ 0.78 ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบผลการจำลองเวลาผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟทั้งหมด

พบว่าขนาดบันได 0.9 เมตร ใช้เวลาอพยพน้อยกว่าขนาด 0.7 เมตร เฉลี่ย 1 นาที การอพยพแบบสองทิศทางใช้เวลา น้อยกว่าแบบทิศทางเดียว เฉลี่ย 10 นาที และผู้สูงอายุที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาอพยพเพิ่มขึ้น (Figure 8)

ผลการจำลองเวลาอพยพผู้โดยสารไปขึ้นชานชาลาสถานีทั้งหมด พบว่าอพยพแบบทิศทางเดียว ขนาดบันได 0.7 เมตร เฉลี่ย 49.6 นาที และขนาดบันได 0.9 เมตร เฉลี่ย 49.3 นาที มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.41 และ 1.55 ตามลำดับ อพยพแบบสองทิศทาง ขนาดบันได 0.7 เมตร เฉลี่ย 39.3 นาที และขนาดบันได 0.9 เมตร เฉลี่ย 39.4 นาที มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.39 และ 1.18 ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบผลการจำลองเวลาผู้โดยสารไปขึ้นชานชาลาสถานีทั้งหมดพบว่าขนาดบันได 0.9 เมตร ใช้เวลาอพยพน้อยกว่าขนาด 0.7 เมตร เฉลี่ย 0.3 นาที การอพยพแบบสองทิศทางใช้เวลา น้อยกว่าแบบทิศทางเดียว เฉลี่ย 10 นาที ผู้สูงอายุที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาอพยพเพิ่มขึ้น (Figure 9)

การจำลองนี้กำหนดให้ผู้โดยสารเลือกทางออกเอง และคนสุดท้ายที่ออกจากขบวนรถไฟอาจเป็นผู้สูงอายุที่มีอัตราการเคลื่อนไหวช้ากว่า และการอพยพแบบสองทิศทางมีปัจจัยด้านระยะทางจากขบวนรถไฟไปขึ้นชานชาลาสถานีเข้ามาส่งผลกระทบต่อเวลาโดยรวม เช่น คนที่จะไปถึงชานชาลาเป็นคนสุดท้ายทั้งสองสถานีอาจเป็นผู้สูงอายุ ซึ่งมีความเร็วการเคลื่อนที่จำกัด

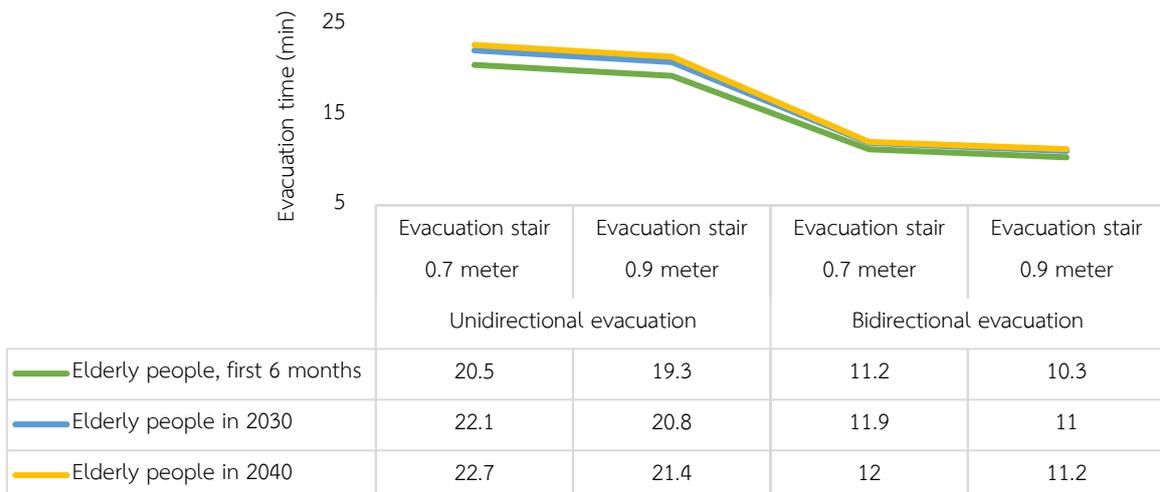


Figure 8 Comparison of simulation results of all passenger evacuation time from monorail train

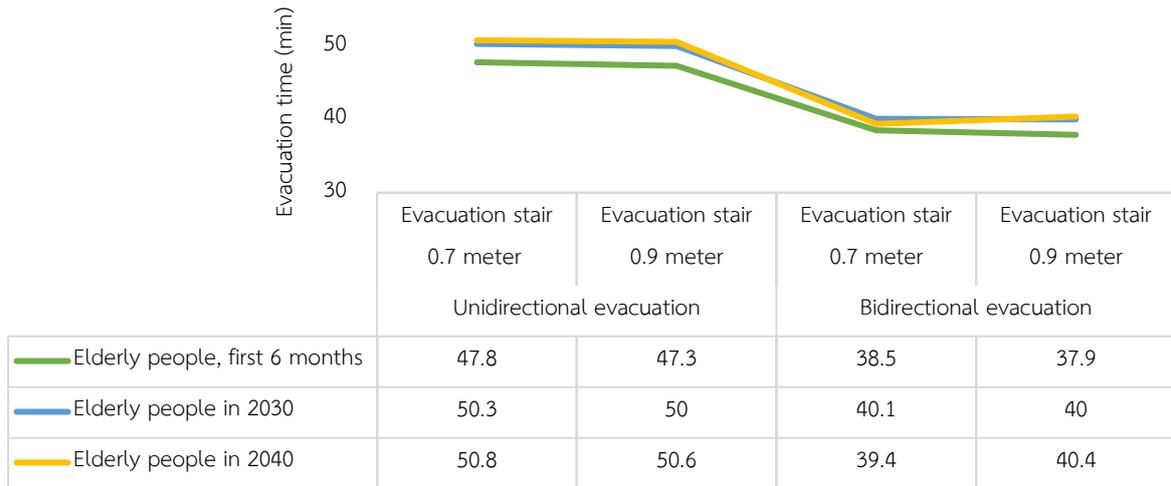


Figure 9 Comparison of simulation results of all passenger evacuation time to station

4. อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้จำลองการอพยพผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟ เมื่อเกิดเหตุรถไฟหายุดนี้ระหว่างสถานีเนื่องจากเกิดระบบรางจ่ายไฟขัดข้องไม่สามารถกู้ระบบคืนได้ในระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นผู้โดยสารจำเป็นต้องอพยพออกจากขบวนรถไฟที่ลงเดินบนทางเดินอพยพ ผ่านประตูและบันไดอพยพ ด้านข้างขบวนรถไฟที่ฝั่งทางเดินเข้าได้ไม่เกิน 2 จุด บันไดอพยพถูกติดตั้งเตรียมพร้อมโดยเจ้าหน้าที่จากสถานี สอดคล้องตามระเบียบปฏิบัติงาน เรื่อง การปฏิบัติการสถานีในการอพยพผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟไปยังทางเดินอพยพ เพื่อไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุด ซึ่งการอพยพในรูปแบบดังกล่าวต้องได้รับการอนุมัติให้ใช้ทางเดินฉุกเฉินจากศูนย์ควบคุมระบบการเดินทางรถไฟฯ ข้อจำกัดด้านความปลอดภัยที่จำเป็นต้องทำการตัดกระแสไฟฟ้าและต้องตรวจสอบให้แน่ชัดว่าที่คานทางวิ่งไม่มีกระแสไฟในระบบรางจ่ายไฟ ก่อนทำการอพยพผู้โดยสาร และจากข้อจำกัดในการติดตั้งบันไดอพยพและการเปิดประตูด้านข้างได้ไม่ควรเกิน 2 จุด เนื่องด้วยทางอพยพมีเพียงด้านข้างฝั่งใดฝั่งหนึ่งของรถไฟเท่านั้น และทางเดินอพยพมีขนาดความกว้าง 1.12 เมตร เมื่อติดตั้งบันไดที่มีขนาดกว้าง 0.7 หรือ 0.9 เมตร จะทำให้ช่องทางเดินยิ่งแคบลง ทำให้การกำหนดจุดทางออกมากที่สุดเพียงได้ 2 จุด เพื่อป้องกันความแออัดบนเส้นทางเดินบริเวณด้านข้างขบวนรถไฟ และด้วยระยะทางจากขบวนรถไฟไปสถานีหากเกิดเหตุไปยังสถานีอาจจะใกล้หรือไกลจากสถานีมีความไม่แน่นอน ลักษณะเส้นทางอพยพเป็นเส้นตรง ขบวนรถไฟเป็นต้นทาง สถานีรถไฟเป็นปลายทาง ด้วยความสัมพันธ์พื้นฐานการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรง ระยะทางมีผลต่อเวลา เมื่อระยะทางลดลงจะส่งผลให้

เวลาที่ใช้ในการอพยพก็ลดลงตาม [26] งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ระยะทางอพยพไปสถานีทั้งสองทิศทางมีระยะทางเท่ากัน เพื่อไม่ให้ระยะทางเป็นตัวแปรต่อรูปแบบการอพยพ และเพื่อให้ครอบคลุมสถานการณ์ที่อาจจะเลวร้ายที่สุด จึงเลือกช่วงระยะทางที่มีความยาวที่สุดของรถไฟฯ จากข้อจำกัดดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการอพยพผู้โดยสารทั้งหมดออกจากขบวนรถไฟฯ ต้องใช้ระยะเวลาในต้องใช้ระยะเวลาในการอพยพเกินกว่า 6 นาที ซึ่งตามมาตรฐาน NFPA 130 [2] กำหนดเวลาในการอพยพผู้โดยสารที่สามารถอพยพได้อย่างปลอดภัยหากวันไม่รบกวนการอพยพ เวลาที่ยอมรับคือ 4-6 นาที แต่จุดปลอดภัยไม่ได้มีการระบุไว้ชัดเจนนัก ส่วนใหญ่จะถูกมองว่าอยู่เหนือระดับพื้นดิน (นอกสถานีใต้ดิน) [27] ด้วยลักษณะทางกายภาพของทางเดินอพยพรถไฟฯ สายสีชมพูยกระดับเหนือพื้นดินตลอดแนว อยู่ในพื้นที่โล่ง ทั้งสองฝั่งจะมีคานทางวิ่งเป็นคอนกรีตที่มีความสูง 1.34 เมตร เมื่อผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟฯ เข้าเส้นทางเดินอพยพขนาดตามมาตรฐานกำหนดไม่มีการจ่ายไฟ มีสภาพแวดล้อมปลอดภัย ทำให้มีผู้มีความเสี่ยงน้อยกว่ารถไฟใต้ดินหรือในอาคาร นับว่าทางเดินอพยพเป็นจุดปลอดภัยได้สอดคล้องงานวิจัยของ Silpsamosorn [13] วิเคราะห์แบบจำลองการอพยพและการจัดการเหตุฉุกเฉิน กรณีเกิดเหตุภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดินในประเทศไทย โดยกำหนดการอพยพการอพยพจากรถไฟฯ ไปยังราง (Train to track) เพื่อไปยังจุดปลอดภัย พบว่า เส้นทางอพยพภายนอกขบวนรถไฟฯ อาจสามารถเป็นจุดปลอดภัยได้เนื่องจากการตัดกระแสไฟฟ้า บนรางรถไฟฯ ก่อนการอพยพผู้โดยสาร พร้อมทั้งเปิดระบบระบายอากาศและแสงสว่างภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ดังนั้นระยะเวลาที่สามารถอพยพ

ได้อย่างปลอดภัยคือผู้โดยสารออกจากขบวนรถไฟ การลดเวลาอพยพออกจากตัวรถไฟ เพื่อให้ผู้โดยสารออกจากโซนเสี่ยงของทางเดินอพยพจึงมีความสำคัญมากกว่าเวลาอพยพทั้งหมด [7] จากผลการจำลองรูปแบบการอพยพแบบสองทิศทางใช้เวลาน้อยกว่าแบบทิศทางเดียวอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับการศึกษาของ Boonliang [28] พบว่าขั้นตอนและวิธีการอพยพ เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการลดระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพผู้โดยสารภายใต้สภาวะฉุกเฉินพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยด้านขนาดทางออก เมื่อขนาดความกว้างเพิ่มขึ้นช่วยให้เวลาอพยพลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Pan et al. [7] ที่พบว่าความกว้างของทางออกไม่น้อยกว่า 0.9 เมตร ส่งผลต่อเวลาการอพยพให้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกเหนือการเพิ่มขึ้นของผู้สูงอายุมีผลต่อเวลาอพยพ เพราะพฤติกรรมทางกายภาพและความสามารถในการเคลื่อนไหวของพวกเขาแตกต่างจากกลุ่มวัยทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมรรถภาพทรงตัวของผู้สูงอายุจะแย่ลง ทำให้ขึ้นลงบันไดยาก ผู้สูงอายุจึงใช้เวลาเดินมากกว่า และเกิดคอขวดเมื่อรวมกลุ่มในจุดอพยพแคบ หรือการชะลอ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Noireuan [9] พบว่าพฤติกรรมการเดินทางของผู้โดยสารเพศชายมีความเร็วมากกว่าเพศหญิง ช่วงอายุผู้โดยสารเดียวกันความเร็วในการเดินใกล้เคียงกัน และ Carlson et al. [29] ทดสอบการอพยพบนทางเดินยกระดับภายในอุโมงค์รถไฟ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของมนุษย์ พบว่า ความเร็วและอัตราการไหลมีผลต่อเวลาอพยพ ดังนั้นการคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อเวลาอพยพช่วยให้การวางแผนการจัดการตอบโต้กับเหตุฉุกเฉินที่เกิดขึ้นได้

ขณะที่ดำเนินการทำงานวิจัยนี้รถไฟฟาสายสีชมพูเพิ่งเปิดให้บริการได้เพียง 6 เดือน ถึงแม้ก่อนให้เปิดให้บริการจะมีการฝึกซ้อมจริงเพื่อเตรียมความพร้อมของเจ้าหน้าที่รวมกับผู้โดยสาร แต่ยังไม่มีการฝึกซ้อมอพยพรวมกับผู้โดยสารที่มีการเข้าใช้บริการเต็มขบวนที่รถไฟสามารถรองรับได้ (568 คน) ทำให้การศึกษานี้ไม่ครอบคลุมถึงสถานการณ์อื่น ๆ ที่ยังคงคาดเดาไม่ได้ เช่น จำนวนผู้พิการที่เข้ามาใช้บริการ ทำให้ไม่สามารถนำเวลาอพยพที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับสถานการณ์จริงได้ และด้วยโปรแกรม Pathfinder แม้จะจำลองพฤติกรรมทั่วไปได้ดี แต่ด้วยข้อจำกัดด้านพฤติกรรมของมนุษย์ที่ซับซ้อน และการรวมกลุ่มของผู้คนที่ไม่รู้จึกคุ้นเคยกันมาก่อนภายในขบวนรถไฟ ทำให้การจำลองไม่สามารถ

ครอบคลุมทุกรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของมนุษย์ในสถานการณ์เฉพาะ เช่น ความตื่นตระหนก การขัดแย้งภายในฝูงชน หรือการตัดสินใจที่ไม่เหมาะสม

5. บทสรุป

จากการจำลองพบว่ารูปแบบการอพยพแบบสองทิศทางใช้เวลาอพยพผู้โดยสารทั้งหมดออกจากขบวนรถไฟและอพยพไปขึ้นขานชาลาน้อยกว่าการอพยพแบบทิศทางเดียวแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเฉลี่ยที่ 10 นาที หากเพิ่มขนาดความกว้างบันไดที่เป็นทางเชื่อมต่อระหว่างขบวนรถไฟและทางเดินฉุกเฉินขึ้น 0.2 เมตร การอพยพแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง จะใช้เวลาทั้งหมดอพยพออกจากขบวนรถไฟลดลงซึ่งแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเฉลี่ยที่ 1 นาที หรือ 60 วินาที จะเห็นว่าเวลาอพยพขึ้นกับขนาดความกว้างของทางออก แต่เวลาทั้งหมดที่ใช้อพยพไปขึ้นขานชาลาสถานีกลับพบว่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยไม่ถึง 1 นาที (เฉลี่ยประมาณ 12 วินาที) เมื่อพิจารณาถึงจำนวนผู้สูงอายุระหว่าง 6 เดือนแรกของการเปิดให้บริการที่อาจเพิ่มขึ้นใน 16 ปีข้างหน้า ในสัดส่วนเพิ่มขึ้นร้อยละ 23.70 ส่งผลให้เวลาการอพยพออกจากขบวนรถไฟเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 9.38 และเวลาอพยพทั้งหมดไปขึ้นขานชาลาเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 5.30 เวลาอพยพทั้งหมดทั้งการออกจากขบวนรถไฟและไปขึ้นขานชาลามีแนวโน้มไปทางเดียวกันคือทำให้ระยะเวลาอพยพเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากการเลือกทางออกเองของผู้โดยสารคนสุดท้ายที่ไปถึงขานชาลาอาจเป็นผู้สูงอายุที่มีข้อจำกัดความเร็วในการเคลื่อนไหวช้ากว่าผู้ใหญ่หรือเด็ก ดังนั้นการเตรียมการที่ดีสามารถช่วยลดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการอพยพได้อย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้เพิ่มความกว้างบันได การติดตั้งบันไดควรสามารถติดตั้งได้จากคนภายในขบวน และควรให้มีการซ้อมแผนอพยพจริงรวมกับผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการจริงอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ผู้โดยสารและเจ้าหน้าที่มีความคุ้นเคยต่อการตอบโต้เหตุฉุกเฉิน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการรถไฟฟาส่งมวลงขนส่งแห่งประเทศไทย (รฟม.) และ บริษัทนอร์ทเทิร์น บางกอกโมโนเรล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับประกอบงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัท Thunderhead Engineering ผู้พัฒนาโปรแกรม Pathfinder ที่อนุญาตให้ใช้งานโปรแกรมดังกล่าว (ฉบับทดลอง)

7. References

- [1] Northern Bangkok Monorail Company Limited. 2023. **BTS Trains System: Pink Line**. <https://www.nbm.co.th/en/system-smodel/>. Accessed 20 June 2025.
- [2] National Fire Protection Association. 2023. **Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems (NFPA130)**. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- [3] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. 2015. **Environmental Impact Assessment (EIA) Report**. <https://www.mrta.co.th/storage/content/uploads/167765799109khaerai.pdf>. Accessed 20 June 2025. (*in Thai*)
- [4] Chen, Y. and et al. 2020. Emergency evacuation simulation at starting connection of cross-sea bridge: Case study on Haicang Avenue Subway Station in Xiamen Rail Transit Line. **Journal of Building Engineering**. 29: 101163.
- [5] Qu, Y. and et al. 2014. Modeling the pedestrian's movement and simulating evacuation dynamics on stairs. **Safety Science**. 70: 189-201.
- [6] Qin, J., Liu, C. and Huang, Q. 2020. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinde. **Case Studies in Thermal Engineering**. 21: 100677.
- [7] Pan, Z. and et al. 2019. Influence of evacuation walkway design parameters on passenger evacuation time along elevated rail transit lines using a multi-agent simulation. **Sustainability**. 11(21): 6049.
- [8] Najmanova, H. and et al. 2022. Evacuation trials from a double-deck electric train unit: Experimental data and sensitivity analysis. **Safety Science**. 146: 105523.
- [9] Noiruean, T. 2017. **Application of Models for Analyzing Passenger Evacuation at Subway Stations in Thailand**. M.Eng. Thesis, Burapha University. (*in Thai*)
- [10] Wilunpan, T. and Patvichaichod, S. 2017. The efficiency of fire evacuation on wellhead platform in varied widths of evacuation routes, and evacuation behaviour using Pathfinder programme. **Kasem Bundit Journal**. 18(2): 51-63. (*in Thai*)
- [11] Social Statistical Analysis and Forecasting Group, Forecasting Statistical Division, National Statistical Office. 2021. **The Situation of Thai Elderly People in Spatial Disparities, 2021**. Report, National Statistical Office. (*in Thai*)
- [12] Kerdporn, S. and Patvichaichod, S. 2020. Comparison of fire evacuation time between actual evacuation and evacuation simulations by Pathfinder software: Case study carbon fiber reinforced polymers industry. In: **Proceedings of the 4th KU SRC National Conference, 28 August 2020**. Chonburi, Thailand. (*in Thai*)
- [13] Silpsamosorn, P. 2022. Analysis of evacuation modeling and emergency management in case of emergency within subway tunnels in Thailand. In: **Proceedings of the 60th Kasetsart University Annual Conference, 21-23 February 2022**. Bangkok, Thailand. (*in Thai*)
- [14] Hui, Y., Yu, Q. and Peng, H. 2024. Data-driven mathematical simulation analysis of emergency evacuation time in smart station's operations management. **PLoS One**. 19(2): e0298622.
- [15] Thunderhead Engineering. 2024. **Pathfinder Technical Reference Manual**. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2024-2/technical-reference-manual>. Accessed 20 June 2025.
- [16] Sriprom, K. 2017. **Simulation of Evacuation Route Performance: Case Study of a 46-Story High-Rise Building Using Pathfinder**. M.Eng. Thesis, Kasetsart University. (*in Thai*)
- [17] Helbing, D. and Molnar, P. 1995. Social force model for pedestrian dynamics. **Physical Review E**. 51(5): 4282-4286.

- [18] Nateepayayutith, T. 2017. **Simulation of Fire Evacuation Using Computer Modeling: A Case Study of the Engineering Research Operations Building**. M.Eng. Thesis, Kasetsart University. *(in Thai)*
- [19] Ronchi, E. and Nilsson, D. 2013. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. **Fire Science Reviews**. 2(1): 7.
- [20] Boonprasert, N. and Patvichaichod, S. 2016. Comparison of evacuation time in a high-rise building between SFPE and steering methods using Pathfinder program. In: **Proceedings of the 1st KU SRC National Conference**, 26 August 2016. Chonburi, Thailand. *(in Thai)*
- [21] Tanavej, A. 2019. Application of evacuation simulation software for analyzing evacuation capacity: A case study of an automotive parts manufacturing factory. In: **Proceedings of the 20th National Graduate Research Conference**, 15 March 2019. Khon Kaen, Thailand. *(in Thai)*
- [22] Champati, N. and Patvichaichod, S. 2017. Development of equation for calculating fire evacuation time by using steering method integrated with SFPE method. **Journal of Science and Technology, Kasetsart University**. 6(3): 27-40. *(in Thai)*
- [23] Sihai, F. and et al. 2022. Cellular automata model for emergency evacuation considering panic factor. **China Safety Science Journal**. 32(4): 148-154.
- [24] Fahy, R.F. and Proulx, G. 2009. Panic and human behaviour in fire. In: **Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire**, 13 July 2009. Cambridge, United Kingdom.
- [25] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. 2024. **Passenger Statistics for the Pink Line MRT Project in 2024**. <https://www.mrta.co.th/th/number-of-passengers-of-the-mrta-project/24670>. Accessed 20 June 2025. *(in Thai)*
- [26] Sirinutanon, T. and Chaengbamrung, A. 2014. Means of egress analysis and evacuation time calculation by using hydraulic flow calculation: Case study of a high-rise and extra large building. **Kasetsart University Engineering Journal**. 27(90): 77-92. *(in Thai)*
- [27] Kornprasert, N. and et al. 2018. **Development of an Evacuation Planning Model in Case of Fire within MRT Stations**. Research Report, Chiang Mai University. *(in Thai)*
- [28] Boonliang, T. 2011. **A Study and Simulation of Human Evacuation Behavior from Aircraft in Emergency Situations**. M.Eng. Thesis, Kasetsart University. *(in Thai)*
- [29] Carlson, E.S. and et al. 2019. Evacuation tests with elevated platforms in railway tunnels. **Fire Safety Journal**. 108: 102840.