

การวิเคราะห์ความหนาแน่นและอัตราการไหลของการจราจร คนเดินเท้าในสถานีรถไฟฟ้า: กรณีศึกษาสถานีรถไฟฟ้าสยาม

Analysis of Pedestrian Density and Flow Rate in a Railway Station: A Case Study of Siam BTS Station

สายชล ผลโพธิ์¹ ประยุทธ์ ฤทธิเดช^{1*} ศุภรัชชัย วรรัตน์¹ และ ศิริวิทย์ ปุสสิโร¹
Saichol Pholpho¹, Prayuth Rittidatch^{1*}, Suparatchai Vorarat¹
and Sirawit Pussawiro¹

Received: 11 March 2025

Revised: 4 November 2025

Accepted: 21 January 2026

บทคัดย่อ

กรุงเทพมหานครซึ่งเป็นเมืองหลวงและศูนย์กลางเศรษฐกิจของประเทศไทย ประสบปัญหาการจราจรหนาแน่นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระบบขนส่งมวลชน โดยเฉพาะระบบขนส่งทางราง มีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหา ดังกล่าว อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้โดยสารก่อให้เกิดความแออัดภายในสถานีรถไฟฟ้า การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบสถานีรถไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยใช้สถานีรถไฟฟ้าสยามเป็นกรณีศึกษา และดำเนินการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PTV Viswalk เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเคลื่อนไหวของผู้โดยสารและระบุปัญหาการใช้งานภายในสถานีอย่างเป็นระบบการศึกษาได้สร้างแบบจำลองสถานีจำนวน 6 รูปแบบ ที่มีความแตกต่างกันด้านจำนวนชั้นให้บริการ ผลการวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์พบว่าสถานีแบบ 2 ชั้น (รูปแบบที่ 2) ซึ่งชั้นที่ 1 เป็นพื้นที่จำหน่ายตั๋ว และชั้นที่ 2 เป็นชานชาลาพร้อมรางตรงกลางและทางขึ้น-ลง อยู่ริมสองข้าง มีอัตราการไหลของผู้โดยสาร 0.0286 person/s/m และอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทาง 0.0192 person/s/m เป็นรูปแบบที่มีความคล่องตัวสูงสุด ส่วนสถานีแบบ 3 ชั้น รูปแบบที่ 5 ชั้นที่ 1 เป็นพื้นที่จำหน่ายตั๋ว และชั้นที่ 2-3 เป็นชานชาลาพร้อมรางตรงกลางและทางขึ้น-ลงอยู่ริมสองข้าง มีอัตราการ

¹หลักสูตรปริญญาโทบัณฑิตสาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10210

¹Graduate Program in Engineering Management, College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand 10210

*ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: prayuth.rit@dpu.ac.th.

ไหลของการจราจร 0.0260 person/s/m และอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทาง 0.0086 person/s/m ซึ่งให้ความคล่องตัวสูงที่สุดในกลุ่มแบบสามชั้น ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหรือปรับปรุงภายในสถานีรถไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของผู้โดยสาร ลดความแออัด และใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการวางแผนโครงสร้างพื้นฐานของสถานีใหม่ รวมถึงการจำลองสถานการณ์เพื่อประเมินผลกระทบก่อนดำเนินการจริง ซึ่งจะช่วยให้การบริหารจัดการจราจรคนเดินเท้าในสถานีรถไฟฟ้ามีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ความหนาแน่นของคนเดินเท้า การจำลอง สถานีรถไฟฟ้า อัตราการไหลของการจราจร

ABSTRACT

Bangkok, the capital and economic center of Thailand, continues to face severe traffic congestion, making mass transit systems—particularly rail transport—an essential part of the solution. However, the increasing number of passengers has led to crowding within stations. This study aims to propose guidelines for effective metro station design using Siam BTS Station as a case study. The research employs PTV Viswalk simulation software to analyze pedestrian movement patterns and systematically identify potential problems within the station. Six station models with varying numbers of service floors were developed and simulated. The results show that the two-level station (Model 2) — with the first level as the ticketing area and the second level as the platform with a central track and side access — demonstrated the highest efficiency, with a pedestrian flow rate of 0.0286 person/s/m and a destination flow rate of 0.0192 person/s/m. Similarly, the three-level station (Model 5)—where the first level is for ticketing and the second and third levels are platforms with a central track and side access—showed the highest efficiency among the three-level designs, with a pedestrian flow rate of 0.0260 person/s/m and a destination flow rate of 58 0.0086 person/s/m. The findings provide valuable insights for designing or improving metro station layouts to enhance passenger flow distribution, reduce congestion, and support infrastructure planning for new stations. Moreover, the simulation approach can be applied to assess potential impacts prior to implementation, contributing to more effective 62 pedestrian traffic management within metro stations.

Keywords: Pedestrian Density; Simulation; Train Station; Traffic Flow Rate

บทนำ

กรุงเทพมหานครเป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจและเมืองขนาดใหญ่ที่มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านการจราจรที่หนาแน่นและการเดินทางที่ติดขัด ซึ่งมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศรวมถึงการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ภาครัฐได้ลงทุนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานระบบ

ขนส่งมวลชนโดยเฉพาะระบบขนส่งทางราง ซึ่งเป็นทางเลือกสำคัญในการรองรับการเดินทางของประชาชนในเขตเมืองใหญ่ที่มีพื้นที่จำกัดและความหนาแน่นของประชากรสูง [1] ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาความนิยมการใช้บริการรถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานครเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะภายใต้นโยบายของภาครัฐที่ลดค่าโดยสารเหลือ 20 บาทตลอดสายตั้งแต่ปี พ.ศ. 2568 ส่งผลให้จำนวนผู้โดยสารเพิ่มสูงขึ้นทุกปี การเพิ่มขึ้นของผู้โดยสารดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาความแออัดภายในสถานีรถไฟฟ้า โดยเฉพาะในพื้นที่จำหน่ายตั๋ว ทางขึ้น-ลงและชานชาลา ซึ่งเป็นจุดที่เกิดความหนาแน่นและการไหลของคนเดินเท้าไม่คล่องตัวอาจเกิดคอขวด (Bottleneck) ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของระบบขนส่งโดยรวม ในระบบขนส่งมวลชนสถานีมีส่วนสำคัญที่ใช้ในการขึ้นลง โดยเฉพาะสถานีหลักที่มีความสำคัญในฐานะจุดศูนย์กลางการเปลี่ยนขบวนระหว่างสายสุขุมวิทและสายสีลม อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางการคมนาคมและการท่องเที่ยวของกรุงเทพมหานคร จึงเป็นกรณีศึกษาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมการจราจรคนเดินเท้าในสถานี การศึกษานี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบสถานีรถไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษาสถานีรถไฟฟ้าสยามในการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์และระบุปัญหาภายในสถานีอย่างเป็นระบบ

แนวคิดของการจำลอง (Simulation) ทางวิศวกรรม หมายถึงกระบวนการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบจำลองของระบบจริง เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประเมินผลลัพธ์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบในสถานการณ์จริง ซึ่งช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบที่ซับซ้อน [2] ตามมาตรฐาน Highway Capacity Manual HCM การไหลของการจราจรคนเดินเท้ามีลักษณะคล้ายคลึงกับการจราจรของยานพาหนะจะประกอบไปด้วย

ความหนาแน่นของคนเดินเท้า (Pedestrian Density) หมายถึงจำนวนคนเดินเท้าที่อยู่ในพื้นที่หนึ่งหน่วย (คนต่อตารางเมตร หรือ persons/m²) ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเป็นตัวชี้วัดระดับ ความแออัด (Congestion Level) ของพื้นที่ และสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วการเดิน (Speed) และอัตราการไหล (Flow Rate) [3] ดังสมการ (1)

$$k = \frac{N}{A} \quad (1)$$

โดยที่

- k คือ ความหนาแน่น (person/m²)
- N คือ จำนวนคนเดินเท้าที่อยู่ในพื้นที่นั้น (persons)
- A คือ พื้นที่ที่คนเดินเท้าใช้ในการเคลื่อนที่ (m²)

$$q = kv \quad (2)$$

โดยที่

- q คือ อัตราการไหล (person/s/m)
- k คือ ความหนาแน่น (person/m²)
- v คือ ความเร็ว (m/s)

การไหลไปยังจุดหมายปลายทาง (Flow toward Destination) คือ อัตราการไหลของคนเดินเท้าที่เคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทางเฉพาะ เช่น ประตูทางออก บันไดเลื่อน ชานชาลา หรือจุดเชื่อมต่อกับขบวนรถไฟ [4] ดังสมการ (3)

$$q_d = k \times v_d \quad (3)$$

โดยที่

q_d คือ อัตราการไหลของคนเดินเท้าที่เคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทางเฉพาะ (person/s/m)

k คือ ความหนาแน่น (person/m²)

v_d คือ ความเร็วของคนเดินเท้าที่เคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทางเฉพาะ (m/s)

ปัจจัยเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบและบริหารจัดการจราจรคนเดินเท้า และผลการจำลองสามารถนำไปปรับปรุงผังการเดินและจุดเชื่อมต่อให้ลดการเกิดคอขวด หรือการกำหนดเส้นทางอพยพและประเมินเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้โดยสารเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้ อีกทั้งยังใช้เป็นข้อมูลการปรับปรุงภายในสถานีรถไฟฟ้า เช่น การกำหนดความกว้างของทางเดิน การวางตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวก และการจัดการจุดทางขึ้น-ลง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและความสะดวกสบายสูงสุด [5–9] แนวคิดของการจำลองระดับจุลภาค (Microscopic Pedestrian Simulation) ได้รับความนิยมในการศึกษาพฤติกรรมของคนเดินแต่ละคน เช่น การหลบหลีก การเลือกเส้นทาง และการตอบสนองต่อความแออัด ซึ่งช่วยให้การออกแบบพื้นที่สาธารณะมีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากขึ้น [10] ซอฟต์แวร์การจราจรคนเดินเท้าเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการจำลองพฤติกรรมคนเดินของคน โดยใช้หลักการจำลองระดับจุลภาคเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ การหลีกเลี่ยงการชน และการตอบสนองต่อความหนาแน่นในพื้นที่จำกัด ซึ่งเหมาะสำหรับการประเมินสภาพการจราจรคนเดินในสถานีสาน่ง อาคารสาธารณะ หรือพื้นที่ชุมชนขนาดใหญ่ [11] สำหรับซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้คือ PTV Viswalk เป็นซอฟต์แวร์ที่ได้รับความนิยมในการจำลองการเคลื่อนที่ของคนเดิน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมคนเดินในพื้นที่ต่างๆ โดยพิจารณาความเร็วของการเดิน การหลีกเลี่ยงการชนกันในพื้นที่แออัด [12] สามารถจำลองพฤติกรรมของคนเดินที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่มีการจำกัด เช่น การหลีกเลี่ยงการชนกับคนเดินคนอื่นๆ หรือสิ่งกีดขวาง การเลือกเส้นทางเดินที่สั้นและเร็วที่สุด หรือการปรับพฤติกรรมให้เหมาะสมกับความแออัดช่วยในการประเมินความหนาแน่นของคนเดินในพื้นที่ต่างๆ [13]

Boonsomporn ใช้เทคนิคการจำลองแบบจุลภาคเพื่อศึกษาการเคลื่อนไหวกของคนเดินเท้าในพื้นที่สถานีขนส่งมวลชน ประเมินความหนาแน่นและอัตราการไหลของคนเดินเท้าเพื่อนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพของสถานี ขอบเขตและวัตถุประสงค์หลักเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมของผู้โดยสารในสถานีภายใต้เงื่อนไขพื้นที่จำกัด ในขณะที่งานวิจัยนี้เน้นการออกแบบและเปรียบเทียบโครงสร้างสถานีเพื่อหาแนวทางการจัดการพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุด [14] Fadhilah & Wibowo ทำการประเมินระดับการให้บริการของทางสัญจรภายในสนามบิน Sultan Mahmud Badaruddin II โดยการจำลองแบบจุลภาคร่วมกับการสังเกตภาคสนามผลการวิจัยชี้ว่าช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นสูงทำให้ความเร็วเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้มีความคล้ายกันในเชิงแนวทางการใช้แบบจำลองเพื่อประเมินระดับการบริการ แต่มีความแตกต่างในด้านพื้นที่ศึกษา และวัตถุประสงค์เนื่องจากเน้นไปที่การเดินทางภายในอาคารสนามบิน ไม่ใช่ระบบรถไฟฟ้า [15] Petchan & Karoonsoontawong ศึกษาพฤติกรรมระบบแถวคอย ณ จุดให้บริการ และวิเคราะห์ปัญหาการให้บริการบนสถานีรถไฟฟ้าบีทีเอส สะพานตากสิน พร้อมเสนอแนวทางการแก้ไขค่าคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและข้อมูลจริงอยู่ระหว่าง 14.63% - 28.22% ประโยชน์ที่ได้รับลดเวลารอคอยและความยาวแถวคอยได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ผู้โดยสารกระจายตัวดีขึ้น ลดการกีดขวางทางเดิน และลดความซับซ้อนของขั้นตอนบริการ สามารถแก้ปัญหาได้เฉพาะจุดต่างกับการออกแบบโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มองภาพรวมของปัญหาถ้าใช้ทั้งสองวิธีรวมกันจะสามารถแก้ปัญหาได้ดียิ่งขึ้น [16] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมาเมื่อเปรียบเทียบแล้วต่างก็มีจุดแข็งและจุดอ่อน ถ้านำมาใช้เสริม

กันอย่างสมบูรณ์โดยงานออกแบบโครงสร้างเป็นกระดูกสันหลังของระบบในขณะที่งานแก้ไขจุดคอขวดเป็นกลไกที่ช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทางปฏิบัติ

วิธีดำเนินการวิจัย

แนวคิดและพฤติกรรมแบบจำลองการใช้เทคนิคแบบจำลองเพื่อศึกษาวิธีการเคลื่อนที่ของคนเดินในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การศึกษาความหนาแน่นของผู้เดิน ความเร็วในการเคลื่อนที่หรืออัตราการไหลของคนเดินในพื้นที่ต่างๆ รูปแบบมีทั้งสถานีแบบ 2 ระดับและสถานีแบบ 3 ระดับ แสดงดัง Table 1

Table 1 Platform Layout of the Studied Railway Stations

Design	Types of stations	Types
1	The first level serves as the ticketing floor. The second level is the platform area, where the railway tracks are positioned on both sides, and a central platform facilitates passenger boarding and alighting.	T-1
2	The first level is designated for ticketing. The second level is the platform area, with railway tracks positioned in the center and boarding/alighting areas located on both sides.	T-2
3	The first level is the ticketing floor. The second level consists of a central railway track, with boarding and alighting areas on both sides. The third level has railway tracks positioned on both sides, with a central platform for passenger boarding and alighting.	T-3
4	The first level is the ticketing floor. The second level has railway tracks positioned on both sides, with a central platform for passenger boarding and alighting. The third level features a central railway track, with boarding and alighting areas on both sides.	T-4
5	The first level is the ticketing floor. The second level consists of a central railway track, with boarding and alighting areas on both sides. The third level follows the same configuration, with railway tracks in the center and boarding/alighting areas on both sides.	T-5
6	The first level is the ticketing floor. The second level has railway tracks positioned on both sides, with a central platform for passenger boarding and alighting. The third level maintains the same layout, with railway tracks on both sides and a central boarding/alighting platform.	T-6

ซึ่งการศึกษานี้ช่วยให้สามารถออกแบบพื้นที่และระบบการจราจรที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับคนเดินเท้า โดยการจำลองพฤติกรรมสามารถใช้ในการทำนายและจัดการสถานการณ์ในพื้นที่สาธารณะ เช่น

ทางเท้า สถานีขนส่ง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ต้นแบบจากสถานีรถไฟฟ้า BTS สยาม เพราะเป็นสถานีจุดศูนย์กลางและศูนย์รวมนักท่องเที่ยวสำหรับเปลี่ยนขบวนรถไฟฟ้า โดยใช้ขนาดความกว้างยาวของสถานีมาทำแบบจำลองการจราจรภายในสถานี โดยความยาวอยู่ที่ 192 m และความกว้างอยู่ที่ 25 m ขั้นตอนการศึกษาสถานีรถไฟฟ้าเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ การออกแบบสถานีมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณผู้โดยสาร พื้นที่ก่อสร้าง และการเชื่อมต่อกับระบบขนส่งอื่นๆ โดยทั่วไปสถานีรถไฟฟ้าจะมีรูปแบบหลักอยู่ 2 ประเภท คือ สถานีแบบสองชั้นและสถานีแบบสามชั้น ซึ่งแต่ละประเภทมีข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกัน การวิจัยนี้มีรูปแบบ 6 รูปแบบประกอบด้วย

รูปแบบที่ 1 (T-1) ประกอบด้วยชั้นที่ 1 จำหน่ายบัตรโดยสาร ชั้นที่ 2 วางรถไฟฟ้าอยู่ริมทั้งสองด้าน ขานขาลาสำหรับขึ้น-ลงอยู่ตรงกลางดัง Figure 1

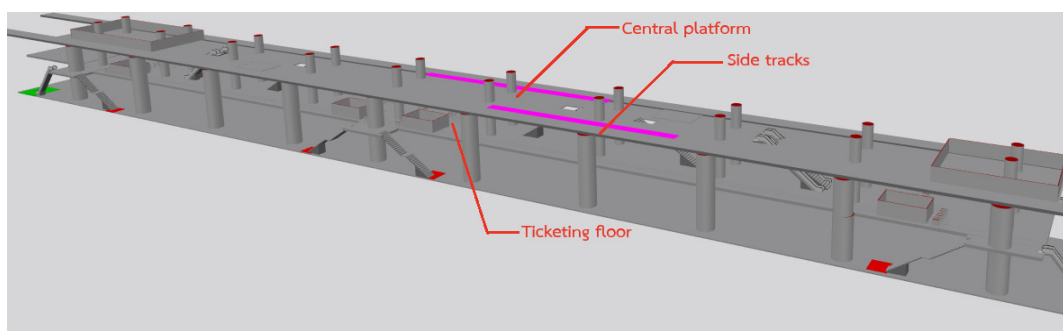


Figure 1 Design 1 (T-1) Two-Level Platform: central platform and side tracks

รูปแบบที่ 2 (T-2) ประกอบด้วยชั้นที่ 1 จำหน่ายบัตรโดยสาร ชั้นที่ 2 วางรถไฟฟ้าอยู่ตรงกลางขานขาลาสำหรับขึ้น-ลงอยู่ริมทั้งสองด้านดัง Figure 2

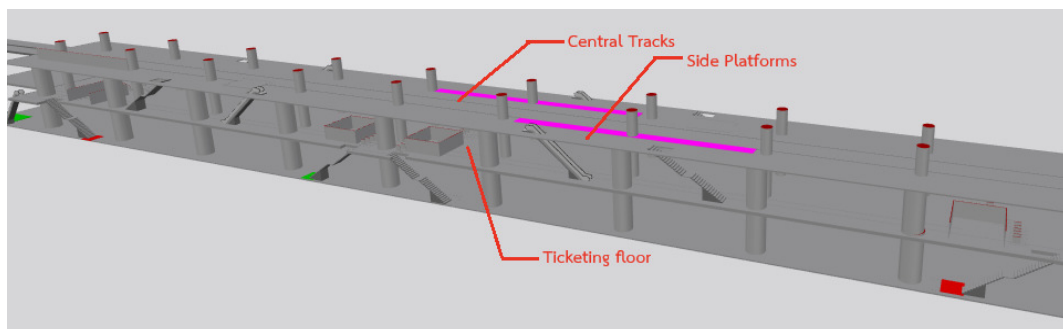


Figure 2 Design 2 (T-2) Two-Level Platform: Side Platforms with Central Tracks

รูปแบบที่ 3 (T-3) ประกอบด้วยชั้นที่ 1 จำหน่ายบัตรโดยสาร ชั้นที่ 2 วางรถไฟฟ้ายูเรียมตรงกลาง ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูเรียมทั้งสองด้าน ชั้นที่ 3 วางรถไฟฟ้ายูเรียมทั้งสองด้าน ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูเรียมตรงกลางดัง Figure 3

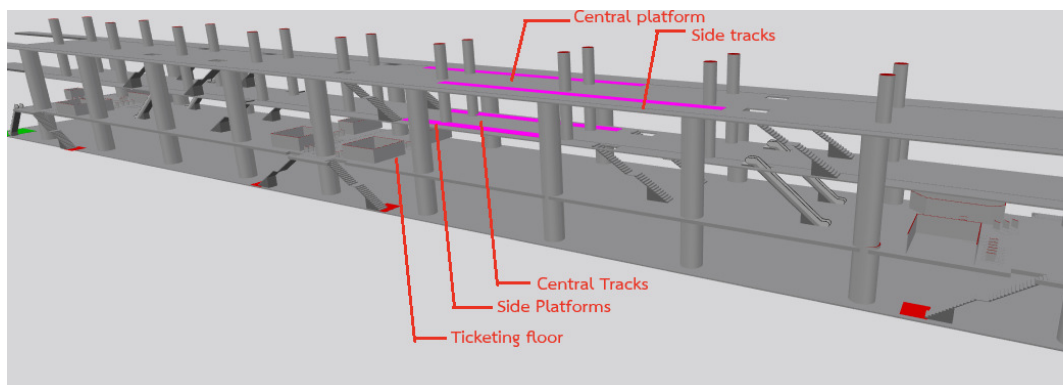


Figure 3 Design 3 (T-3) Three-Level Platform: The second level features central tracks with side platforms while the third level has outer tracks with a central platform

รูปแบบที่ 4 (T-4) ประกอบด้วยชั้นที่ 1 วางรถไฟฟ้ายูเรียมทั้งสองด้าน 2 จำหน่ายบัตรโดยสาร ชั้นที่ 1 ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูเรียมตรงกลาง ชั้นที่ 2 วางรถไฟฟ้ายูเรียมตรงกลาง ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูเรียมทั้งสองด้านดังแสดงใน Figure4

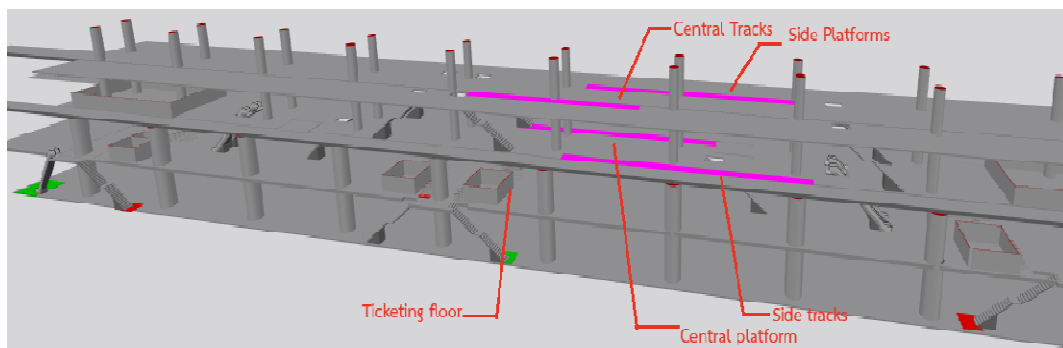


Figure 4 Design 4 (T-4) Three-Level Platform: The second level features side tracks with a central platform while the third level has central tracks with side platforms

รูปแบบที่ 5 (T-5) ประกอบด้วยชั้นที่ 1 จำหน่ายบัตรโดยสาร ชั้นที่ 2 รางรถไฟฟ้ายูรีมตรงกลาง ขานชาลาสำหรับขึ้นลงยูรีมทั้งสองด้าน ชั้นที่ 3 รางรถไฟฟ้ายูรีมตรงกลาง ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูรีมทั้งสองด้านดังแสดงใน Figure5

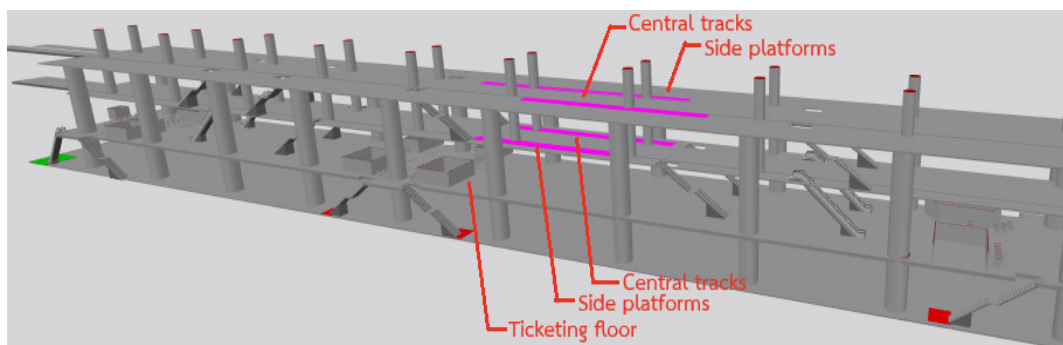


Figure 5 Design 5 (T-5) Three-Level Platform: The second level features central tracks with side platforms while the third level has central tracks with side platforms

รูปแบบที่ 6 (T-6) ประกอบด้วยชั้นที่ 1 จำหน่ายบัตรโดยสาร ชั้นที่ 2 รางรถไฟฟ้ายูรีมทั้งสองด้าน ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูรีมตรงกลาง ชั้นที่ 3 รางรถไฟฟ้ายูรีมทั้งสองด้าน ขานชาลาสำหรับขึ้น-ลงยูรีมตรงกลางดังแสดงใน Figure 6

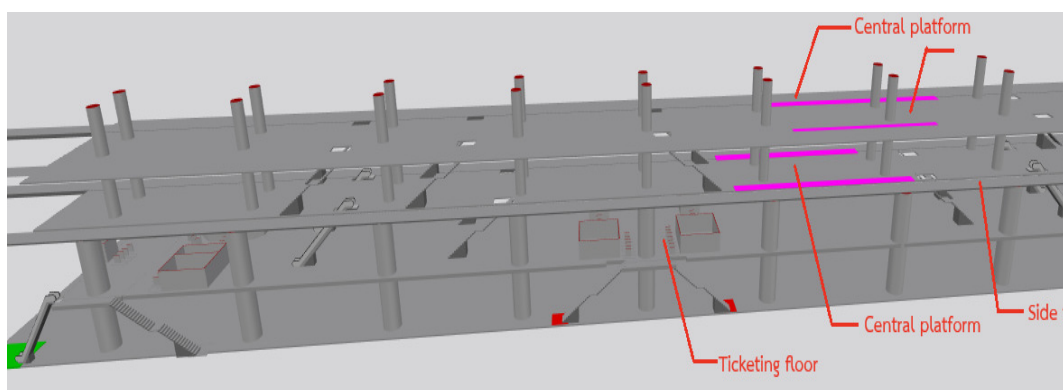


Figure 6 Design 6 (T-6) Three-Level Platform: The second level features side tracks with a central platform, while the third level has side platforms with central tracks

การพัฒนาแบบจำลองผู้วิจัยได้จัดทำแบบจำลองการเดินทางด้วยซอฟต์แวร์ PTV Viswalk และข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการเดินทางภายในสถานีรถไฟฟ้า และนำผลการวิเคราะห์มาทำการเปรียบเทียบ ขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลอง การดำเนินการของการให้บริการช่องทางจำหน่ายบัตรโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้าได้แบ่งขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองนำเข้าข้อมูลขั้นตอนการพัฒนาลักษณะทางกายภาพในการสร้างแบบจำลองคนเดินภายในสถานีรถไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ พื้นที่คนเดิน (Areas /

Pedestrian Areas) เป็นพื้นที่ที่สามารถเดินได้ โดยมีความกว้างของพื้นที่ในการเดินไม่น้อยกว่า 0.6 m อุปสรรค (Obstacles) เป็นสิ่งกีดขวางในการเดินทางของคนเดินในแบบจำลองซึ่งไม่สามารถเดินผ่านได้ การพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ถึงสภาพปัญหาของระบบขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจึงมีความสำคัญ ตัวแบบจำลองจะต้องสามารถวัดผลได้จริง เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผล การเปรียบเทียบแบบจำลองเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมากในการทำแบบจำลอง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรบางตัวในแบบจำลองเพื่อให้ผลลัพธ์มีค่าที่ใกล้เคียงเสมือนจริงกับค่าที่ได้จากการไปสำรวจข้อมูล โดยการนำผลลัพธ์มาทำการสอบเทียบกับข้อมูลแบบจำลองของระบบ โดยผลลัพธ์จะต้องผ่านเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อที่สามารถยอมรับได้ว่าแบบจำลองสามารถอ้างอิงระบบในโลกความจริงได้ หลังจากนั้นจึงจะสามารถนำแบบจำลองเหล่านั้นไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยงานวิจัยนี้จะทำการสอบเทียบเวลาของคนเดินในทางเดินปกติ เกณฑ์ในการเปรียบเทียบแบบจำลองเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองจะนำหลักการทางสถิติมาช่วยในการหาผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมของแบบจำลอง และใช้วิธีการประเมินผลด้วยค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) เป็นวิธีวัดความแม่นยำ คำนวณเปอร์เซ็นต์ค่าคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์โดยไม่คำนึงถึงค่าผลลัพธ์ที่ได้แต่มีความแม่นยำสูง [12-14] ดังสมการ (2)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

A_t คือ ค่าจริงในช่วงเวลา t

F_t คือ ค่าที่พยากรณ์ได้ในช่วงเวลา t

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่า Mean Absolute Percentage Error ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ระหว่างค่าจริง (Actual Values, A_t) และค่าที่ได้จากแบบจำลอง (Forecasted Values, F_t) ใช้การรายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถทำความเข้าใจถึงระดับความแม่นยำได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดของสิ่งที่กำลังทำนายอยู่ (scale-independent) ทำให้เข้าใจได้ง่ายและสามารถตัดสินใจได้รวดเร็ว ค่า MAPE ที่ได้จะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำมาแปลผลความแม่นยำของแบบจำลองได้ตามเกณฑ์ที่ได้เสนอไว้ แสดงดัง Table 2

Table 2 Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and interpretation of model accuracy [20, 21]

MAPE (%)	Interpretation of Model Accuracy
< 10%	Highly accurate forecast
10–20%	Good forecast
20–50%	Reasonable forecast
> 50%	Inaccurate forecast

ค่าที่ได้จากการเดินในทางเดินปกติจากการสำรวจที่สถานีรถไฟฟ้าสยามโดยทำการเก็บข้อมูลจำนวน 120 ตัวอย่าง ในวันทำงานจันทร์-ศุกร์ช่วงเวลา 06.30-08.30น. และ 17.00-19.30 น. ซึ่งเป็นชั่วโมงเร่งด่วนของผู้โดยสารใช้บริการหนาแน่น และนำข้อมูลการสำรวจที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ยความเร็วของคนเดิน MAPE มาทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อให้ได้ค่าที่ยอมรับได้ในการปรับพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์ให้เกิดความเหมือนจริงของการเคลื่อนที่ในแบบจำลองแสดงดัง Table 3

Table 3 Calibration of the model with walking time data in a normal walkway from survey

Sex	Actual survey	Model	MAPE
Male	1.21 (m/s)	1.22 (m/s)	3.880 %
Female	1.18 (m/s)	1.19 (m/s)	4.030 %
Male / Female	1.19 (m/s)	1.20 (m/s)	1.940 %

คำนวณหาค่าจากการเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงและจากการจำลองของซอฟต์แวร์ ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพและความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การจราจรคนเดินเท้าในสถานีรถไฟฟ้า โดยค่า MAPE ที่คำนวณได้คือ ผู้ชาย 3.880 % ผู้หญิง 4.030 % และผู้ชาย/ผู้หญิง 1.940 % ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนพบว่าค่า Error ที่ได้มีทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองบางครั้งให้ค่าสูงกว่าความจริง (Overestimation) และบางครั้งให้ค่าต่ำกว่าความจริง (Underestimation) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Values of Errors Divided by Actual Values) แสดงถึงความคลาดเคลื่อนในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ซึ่งช่วยให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนมีผลกระทบต่อค่าจริง สรุปได้ว่าค่า MAPE ที่ต่ำแสดงว่าแบบจำลองมีความเที่ยงตรงสูงและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หรือพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการวัดระดับความแม่นยำของแบบจำลอง และช่วยส่งเสริมให้ผู้วิจัยหรือวิศวกรสามารถปรับแต่งแบบจำลองให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

ผลการวิจัย

ในชั่วโมงเร่งด่วนของวันทำงานความหนาแน่นของผู้โดยสารที่สถานีรถไฟฟ้าอาจนำไปสู่ปัญหาความแออัด ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินทางและการจัดการจราจรคนเดินเท้า การแก้ไขปัญหาที่มุ่งเน้นที่การปรับปรุงการไหลของผู้โดยสารให้มีความต่อเนื่อง โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ที่ช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมการจราจรคนเดินเท้าในมิติต่างๆ ทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จุดมุ่งหมายหลักของการวิจัยนี้คือการประเมินและปรับปรุงประสิทธิภาพของการจราจรคนเดินเท้าภายในสถานีรถไฟฟ้า โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการจัดการจราจรที่หลากหลายผ่านการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง เพื่อค้นหารูปแบบที่ลดความหนาแน่นและความคล่องตัวและลดเวลาการเดินทางของผู้โดยสาร ทั้งนี้เพื่อให้การเดินทางในสถานีมีประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการได้อย่างสูงสุด ผลการทดลองที่ได้แสดงรายละเอียดค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและการไหลของการจราจรในสถานีดังนี้

ความหนาแน่นของคนเดินเท้า (Pedestrian density) พื้นที่ในสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 6 รูปแบบ แบ่งเป็นแบบสถานี 2 ชั้น และแบบสถานี 3 ชั้นทำการทดลองในแบบจำลองของซอฟต์แวร์ PTV Viswalk แสดงดัง Table 4

Table 4 Average density of space in the railway station

Design	Types of stations	Pedestrian density) person /m ² (
1	Two-Level Platform	0.0570
2	Two-Level Platform	0.0520
3	Three-Level Platform	0.0880
4	Three-Level Platform	0.0860
5	Three-Level Platform	0.0840
6	Three-Level Platform	0.0866

เมื่อนำค่าความหนาแน่นของพื้นที่ในสถานีรถไฟมาแสดงในรูปของกราฟดังแสดงในดังแสดงใน Figure 7

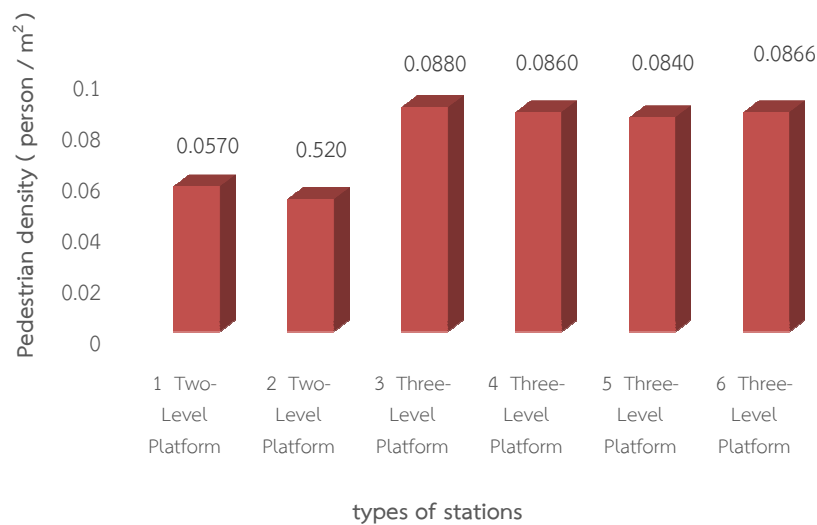


Figure 7 Average density of space in the railway station (person/m²)

ค่าอัตราการไหลและค่าอัตราการไหลของคนเดินเท้าที่มุ่งหน้า ไปยังจุดหมายปลายทางที่ของการจราจรคนเดินเท้าในสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 6 รูปแบบแบ่งเป็นแบบสถานี 2 ชั้น และแบบสถานี 3 ชั้น ทำการทดลองในแบบจำลองของซอฟต์แวร์ PTV ดังแสดงใน Table 5

Table 5 Pedestrian flow average and flow toward destination

Design	Types of stations	Flow Average)person/s/m(	Flow toward Destination)person/s/m(
1	Two-Level Platform	0.0266	0.0146
2	Two-Level Platform	0.0286	0.0192
3	Three-Level Platform	0.0202	0.0078
4	Three-Level Platform	0.0245	0.0083
5	Three-Level Platform	0.0260	0.0086
6	Three-Level Platform	0.0226	0.0080

เมื่อนำค่าเฉลี่ยอัตราการไหลและอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางของสถานีรถไฟฟ้ามาทำในรูปของกราฟแสดงดัง Figure 8

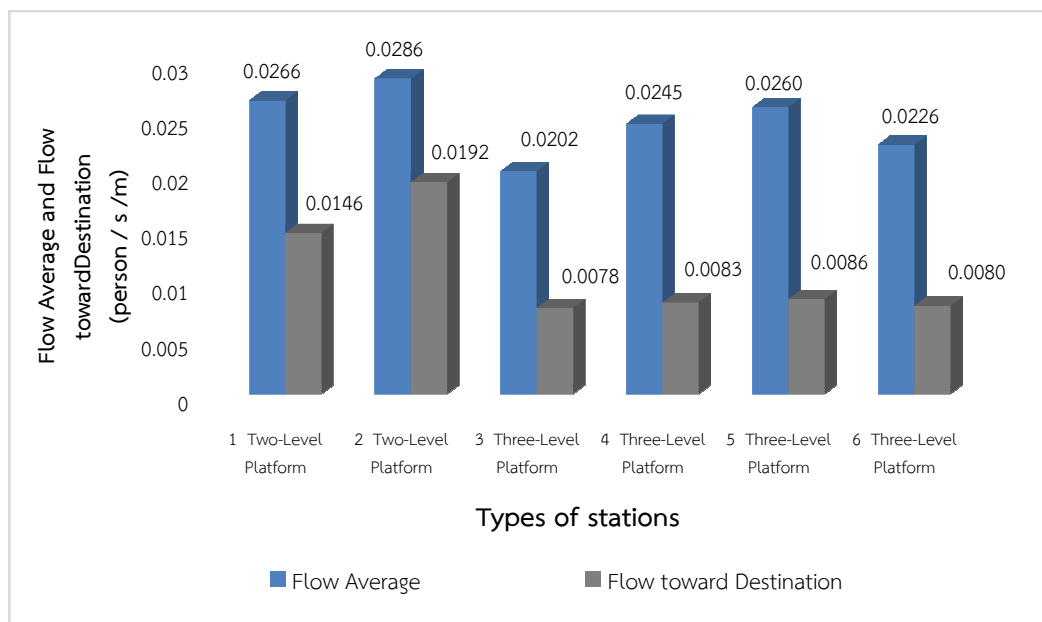


Figure 8 Flow rate and destination flow rate of pedestrian traffic in the station

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ความหนาแน่นของคนเดินเท้าในพื้นที่ในสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 6 รูปแบบ แบ่งเป็นแบบ 2 ชั้น ประกอบด้วยรูปแบบที่ 1 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของพื้นที่อยู่ที่ 0.0570 person/m² และรูปแบบที่ 2 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของพื้นที่อยู่ที่ 0.0520 person/m² พื้นที่ภายในสถานีรูปแบบที่ 2 สามารถรองรับผู้โดยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยลดความแออัดในพื้นที่ได้ดีกว่า ค่าที่ต่ำกว่าหมายถึงพื้นที่ที่มีความ

คลองตัวสูงกว่าและเหมาะสมกับการรองรับผู้โดยสารจำนวนมาก ความแตกต่างของค่าความหนาแน่นระหว่างรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลของการออกแบบพื้นที่ใช้งานภายในสถานีที่ต่างกันถึงจะเป็นสถานีแบบ 2 ชั้นเหมือนกันแต่การจัดวางทางเดินเชื่อม การกระจายตำแหน่งบันไดและบันไดเลื่อนตลอดจนพื้นที่รอขบวนรถไฟมีผลต่อการกระจายตัวของผู้โดยสารภายในสถานีโดยตรง รูปแบบที่ 2 มีการจัดพื้นที่ให้ผู้โดยสารสามารถกระจายตัวเข้าสู่จุดต่างๆของสถานีได้อย่างทั่วถึง ทำให้ลดการเกิดคอขวด (bottleneck) บริเวณบันไดและทางเข้าสู่ชานชาลาได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยโดยรวมต่ำกว่าแบบที่ 1 ค่าความหนาแน่นในระดับ 0.0520 person/m² ยังถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐานการประเมินระดับความแออัดของคนเดินเท้า (Pedestrian Level of Service) ซึ่งอยู่ในช่วงระดับ B-C หมายถึงสามารถเคลื่อนไหวได้สะดวกโดยไม่เกิดการชนกันของผู้เดินเท้า การออกแบบในลักษณะนี้จึงส่งผลให้รูปแบบที่ 2 มีความเหมาะสมกว่าในเชิงประสิทธิภาพของพื้นที่และความปลอดภัยของผู้โดยสารในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้บริการสูง

สำหรับสถานีแบบ 3 ชั้น รูปแบบที่ 5 มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นต่ำที่สุดที่ 0.0840 person/m² แสดงว่าพื้นที่รองรับผู้โดยสารได้ดีในแง่ความคล่องตัวและความแออัดต่ำ รองลงมาคือรูปแบบที่ 4 (0.0860 person/m²) รูปแบบที่ 6 (0.0866 person/m²) และรูปแบบที่ 3 (0.0880 person/m²) ซึ่งมีความแออัดสูงที่สุด เปรียบเทียบเชิงร้อยละพบว่าความแตกต่างระหว่างรูปแบบที่ 5 ดีที่สุดและรูปแบบที่แออัดที่สุดรูปแบบที่ 3 มีความแตกต่างของความหนาแน่นเกิดจากการกระจายตัวของผู้โดยสารในจุดคอขวด เช่น บันไดเลื่อนจุดซื้อตั๋ว และชานชาลา รูปแบบที่ 5 แสดงการออกแบบที่สมดุลระหว่างการเชื่อมต่อแนวดิ่งและแนวนอนทำให้ผู้โดยสารกระจายตัวได้ดี ลดความแออัด รูปแบบที่ 4 แม้ค่าใกล้เคียงแต่ยังพบการรวมตัวในพื้นที่เชื่อมต่อทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วนรูปแบบที่ 6 มีจุดรวมของทางเดินและบันไดเลื่อน ทำให้การเคลื่อนที่ชะลอ รูปแบบที่ 3 มีข้อจำกัดในจุดคอขวดจึงเกิดการสะสมของผู้โดยสารสูง สรุปคือสถานีแบบ 3 ชั้นรูปแบบที่ 5 เหมาะสมที่สุดในการกระจายผู้โดยสารและลดความแออัด รองลงมาคือรูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 6 ขณะที่รูปแบบที่ 3 ควรปรับปรุงจุดคอขวดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ ส่วนพื้นที่ทั่วไปของสถานียังเหลือพื้นที่สำหรับรองรับผู้โดยสารหรือจะหนาแน่นอีกเมื่อเกิดเหตุขัดข้องของรถไฟฟ้ามายังช้ากว่าเวลากำหนดก็จะเกิดความแออัดเนื่องจากไม่สามารถระบายผู้โดยสารได้แสดงดัง Table 6

Table 6 The percentage of area density in a railway station

Design	Types of stations	Pedestrian density (person/m ²)	Percentage of average density
1	Two-Level Platform	0.0570	12.57 %
2	Two-Level Platform	0.0520	11.46 %
3	Three-Level Platform	0.0880	19.40 %
4	Three-Level Platform	0.0860	18.96 %
5	Three-Level Platform	0.0840	18.52 %
6	Three-Level Platform	0.0866	19.09 %

ค่าเฉลี่ยอัตราการไหลและค่าเฉลี่ยอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางของสถานีแบบ 2 ชั้น พบว่ารูปแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ยอัตราการไหล 0.0266 (person/s/m) และรูปแบบที่ 2 มีค่า 0.0286 (person/s/m) ขณะที่ค่าเฉลี่ยอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางของรูปแบบที่ 1 คือ 0.0146 (person/s/m) และรูปแบบที่ 2 คือ 0.0192 (person/s/m) แสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการเคลื่อนไหวของคนเดินเท้าดีกว่า ทั้งในด้านอัตราการไหลรวมและการเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทางโดยตรง ผลการวิเคราะห์ชี้ว่าการจัดวางผังพื้นที่และเส้นทางเดินในรูปแบบที่ 2 มีความเหมาะสมกว่า โดยช่วยลดจุดติดขัดและกระจายผู้โดยสารภายในสถานีได้ดียิ่งขึ้น ทำให้การเคลื่อนไหวเป็นไปอย่างราบรื่นและลดเวลาเดินทางโดยรวม กล่าวคือสถานีที่ออกแบบให้สอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนไหวหลักของผู้โดยสารและจัดสรรพื้นที่เพียงพอจะสามารถรองรับความหนาแน่นได้ดีกว่า ดังนั้นรูปแบบที่ 2 ของสถานีแบบ 2 ชั้น จึงมีความเหมาะสมเชิงการออกแบบมากกว่า เพราะช่วยเพิ่มความคล่องตัวและลดความแออัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แบบ 3 ชั้น ค่าเฉลี่ยอัตราการไหลรูปแบบที่ 5 มีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 0.0260 (person/s/m) รูปแบบที่มีค่าน้อยที่สุดคือรูปแบบที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 0.0202 (person/s/m) สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางรูปแบบที่ 5 อยู่ที่ 0.0086 (person/s/m) และรูปแบบที่ 3 อยู่ที่ 0.0078 (person/s/m) รูปแบบที่ 5 มีอัตราการไหลสูงกว่ารูปแบบที่ 3 แสดงให้เห็นการจราจรของคนเดินเท้าที่ดีกว่า สำหรับอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางรูปแบบที่ 5 มีอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางสูงกว่ารูปแบบที่ 3 จากผลการวิเคราะห์สถานีรถไฟฟ้าแบบ 3 ชั้น พบว่ารูปแบบที่ 5 มีค่าเฉลี่ยอัตราการไหลและค่าเฉลี่ยอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางสูงที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ โดยมีค่าอยู่ที่ 0.0260 และ 0.0086 person/s/m ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่ารูปแบบนี้มีประสิทธิภาพในการจัดการการเคลื่อนไหวของคนเดินเท้าได้ดีที่สุด สาเหตุที่รูปแบบที่ 5 มีค่าการไหลสูงกว่าแบบอื่น โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด (0.0202 และ 0.0078 person/s/m) อาจมาจากการออกแบบพื้นที่และการเชื่อมโยงระหว่างแต่ละชั้นที่มีความต่อเนื่องของเส้นทาง (continuous circulation) และการกระจายผู้โดยสารเข้าสู่พื้นที่หลักได้ดี เช่น การจัดตำแหน่งบันไดเลื่อนหรือประตูทางเข้าออกให้เหมาะสมกับทิศทางการเคลื่อนไหวของผู้โดยสาร นอกจากนี้ค่าอัตราการไหลที่สูงของรูปแบบที่ 5 ยังแสดงถึงความคล่องตัวของการจราจรคนเดินเท้าที่ดีกว่า และมีความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 6 ที่พบว่ารูปแบบนี้มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นต่ำที่สุดในบรรดาสถานีแบบ 3 ชั้น กล่าวโดยสรุปได้ว่าสถานีแบบ 3 ชั้น รูปแบบที่ 5 เป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของการจัดการการเคลื่อนไหวของคนเดินเท้า สามารถลดความแออัดและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำผู้โดยสารไปยังจุดหมายปลายทางได้ดีกว่ารูปแบบอื่นๆ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการนำผู้โดยสารไปยังจุดหมายปลายทางได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่าแสดงดัง Table 7

Table 7 The percentage of average flow rate and the average flow rate to the destination.

Design	Types of stations	Flow average	Percentage of flow average	Flow toward destination	Percentage of Flow toward Destination
1	Two-Level Platform	0.0266	17.90	0.0146	22.25
2	Two-Level Platform	0.0286	19.25	0.0192	27.98
3	Three-Level Platform	0.0202	13.62	0.0078	11.87
4	Three-Level Platform	0.0245	16.49	0.0083	12.67
5	Three-Level Platform	0.0260	17.53	0.0086	13.03
6	Three-Level Platform	0.0226	15.18	0.0080	12.17

ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าสถานีแบบ 2 ชั้น รูปแบบที่ 2 มีค่าเฉลี่ยอัตราการไหลสูงกว่ารูปแบบที่ 1 1.35% และมีค่าเฉลี่ยอัตราการไหลไปยังจุดหมายปลายทางสูงกว่า 5.73% แสดงถึงความคล่องตัวและประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการรองรับการเดินทางของผู้โดยสาร ส่วนสถานีแบบ 3 ชั้น รูปแบบที่ 5 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการรองรับการจราจรคนเดินเท้า รองลงมาคือรูปแบบที่ 4 ซึ่งยังคงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ส่วนรูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 3 มีค่าต่ำกว่า โดยรูปแบบที่ 3 ต่ำที่สุด ภาพรวมพบว่ารูปแบบที่ 2 (2 ชั้น) และรูปแบบที่ 5 (3 ชั้น) มีความเหมาะสมสูงสุดสำหรับการใช้งานในสถานการณ์ที่ต้องการลดความล่าช้าและเพิ่มความคล่องตัว ข้อมูลจากแบบจำลองสามารถใช้วางแผนจัดการจราจรคนเดินเท้า รวมถึงกำหนดตำแหน่งบันไดเลื่อน ทางเข้าออก และพื้นที่จำหน่ายตั๋วให้เหมาะสม ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและความสะดวกในการเดินทางในระบบขนส่งมวลชนได้อย่างยั่งยืน

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่อาจส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของผลการศึกษา โดยข้อมูลพฤติกรรมผู้โดยสารจากการสังเกตภาคสนามและการจำลองด้วยโปรแกรม PTV Viswalk แม้สะท้อนลักษณะการเคลื่อนไหวได้บางส่วน แต่ยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมจริงทั้งหมด เช่น การเดินเป็นกลุ่ม การหยุดพัก หรือพฤติกรรมช่วงเวลาเร่งด่วน อีกทั้งขอบเขตพื้นที่และรูปแบบสถานีที่ศึกษาอยู่ในวงจำกัด ทำให้ผลลัพธ์อาจไม่สะท้อนลักษณะของสถานีรถไฟฟ้าทั้งระบบได้ครบถ้วน โดยเฉพาะสถานีที่มีการเชื่อมต่อกับระบบขนส่งอื่นหรือมีโครงสร้างซับซ้อน นอกจากนี้แบบจำลองยังไม่สามารถจำลองปัจจัยทางจิตวิทยาและเผชิญข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากรในการทดสอบสถานการณ์จำลองได้เพียงพอ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เสนอแนวทางพัฒนาในอนาคต เช่น การปรับความกว้างของทางเดินและตำแหน่งช่องจำหน่ายตั๋วให้เหมาะสม การจัดเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างชั้นให้ต่อเนื่อง รวมถึงการศึกษาศาสนาที่มีขนาดใหญ่หรือเชื่อมต่อหลายระบบขนส่ง เพื่อปรับปรุงการจัดการผู้โดยสารตามบริบทต่างๆ นอกจากนี้ควรประยุกต์ใช้เทคโนโลยี เช่น เซนเซอร์ติดตามผู้โดยสารหรือ AI เพื่อปรับการจัดสรรพื้นที่และเส้นทางเดินให้เหมาะสมกับจำนวนผู้โดยสารจริงในแต่ละช่วงเวลา อัน

จะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการเคลื่อนไหวของคนเดินเท้า และสามารถต่อยอดผลการวิจัยไปใช้พัฒนาสถานีรถไฟฟ้าอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบัณฑิตศึกษาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่สนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริง แอนด์แมเนจเม้นท์ จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยสนับสนุนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์งานวิจัย

References

- [1] Pholpho, S., & Worrarat, S. (2023). Pedestrian Traffic Analysis in Elevated Train Stations: A Case Study of Siam BTS Station, Bangkok. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 17(3), 127–143. (in Thai)
- [2] Banks, J., et al. (2005). *Discrete-Event System Simulation* (4th ed.). Pearson Prentice Hall.
- [3] Korbmacher, R., & Tordeux, A. (2024). Toward Better Pedestrian Trajectory Predictions: The Role of Density and Time-to-Collision in Hybrid Deep-Learning Algorithms. *Sensors*, 24(7), 2356.
- [4] Giannoulaki, M., & Christoforou, Z. (2024). Pedestrian Walking Speed Analysis: A Systematic Review. *Sustainability*, 16(11), 4813.
- [5] Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual* (5th ed.). National Research Council.
- [6] Gupta, A., & Pundir, N. (2015). Pedestrian Flow Characteristics Studies: A Review. *Transportation Planning and Technology*, 38(6), 575–595.
- [7] Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282–4286.
- [8] Hsu, C., & Huang, W. (2013). Pedestrian Flow Rate and Its Relationship to Crowd Density in Urban Public Spaces. *Transportation Research Part B: Methodological*, 50, 31–42.
- [9] Hoogendoorn, S. P., & Daamen, W. (2005). Pedestrian Behavior at Bottlenecks. *Transportation Science*, 39(2), 147–159.
- [10] Intrapreecha, A., et al. (2022). Study of Pedestrian Behavior at Signalized Crosswalks: A Case Study in Chiang Mai Province. In *The 25th National Convention on Civil Engineering* 24–26 August 2022, Chiang Mai, Thailand. (in Thai)
- [11] Thanyakit, T., & Karoonsoontawong, A. (2022). Traffic Microsimulation Using VISSIM to Improve Traffic Control Measures at Railway Intersection by Preemption System. *RMUTK Journal of Engineering*, 16(1), 42–54. (in Thai)
- [12] Helbing, D., et al. (2000). Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, 407(6803), 487–490.

- [13] Kirimatthong, M. & Chaiwong, S. (2020). An Evaluation of Service Time at the Security Checkpoint of Chiang Mai International Airport During Normal and New Normal Situations. In *The 25th National Conference on Civil Engineering* (p. TRL06.1 TRL06.8). 15–17 July 2020, Chonburi, Thailand. (in Thai)
- [14] Boonsomparn, P. (2019). *Modeling Pedestrian Flow in Transit Stations: A Case Study of Transit Stations in Bangkok*. (Master's thesis, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University). (in Thai)
- [15] Fadhilah, S. R. & Wibowo, S. S. (2020). Calibration and Validation of Walking Behavior Parameter (Case Study: Sky Bridge of Sultan Mahmud Badaruddin II Airport, Palembang). In *The 2nd International Symposium on Transportation Studies in Developing Countries* (p. 46–51). 15 October 2019, Palembang, Indonesia.
- [16] Petchan, P., & Karoonsoontawong, A. (2020). Development of Simulation Scenarios for the Study of Queuing System at Saphan-Taksin BTS Station by Using PTV Viswalk. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 10(3), 25–45.