



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การศึกษากระแสจราจรคนเดินเท้าระดับมหภาคโดยการจำลองสถานการณ์การใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างเดินและการเดินเร่งรีบ

A study of macroscopic pedestrian traffic flow by simulation experimentation of using mobile phone and rushed walking

วรวิทย์ พานนนท์ สุทธิพงษ์ มีใย*

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Worawut Phannont Sutthipong Meeyai*

School of Transportation Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

* Corresponding author.

E-mail: sutthi@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4248

วันที่รับบทความ 11 มีนาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 20 มิถุนายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ 1 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษากระแสจราจรคนเดินเท้าโดยการจำลองสถานการณ์ โดยก่อนการจำลองนั้นได้ทำการสำรวจเบื้องต้นบริเวณทางเดินเท้าภายในสถานีรถไฟฟ้า MRT เพื่อสังเกตสัดส่วนของพฤติกรรมคนเดินเท้าอันคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อกระแสจราจรคนเดินเท้า ได้แก่ พฤติกรรมการเดินอย่างเร่งรีบ และใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างเดิน จากนั้นจึงออกแบบการจำลองสถานการณ์ เพื่อให้พฤติกรรมคนเดินเท้ามีความหลากหลายได้แก่ สถานการณ์ปัจจุบันใช้สัดส่วนจากการสำรวจจริง สถานการณ์กำหนดให้สัดส่วนมีค่าสุดโต่ง และออกแบบกระแสจราจรให้มีความหนาแน่น (Density) ตั้งแต่ช่วงเบาบาง-หนาแน่น โดยผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) การเปรียบเทียบความเร็วในการเดินสถานการณ์ปัจจุบันกับสถานการณ์สุดโต่ง พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนคนเดินเร่งรีบ ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยจากกระแสจราจรทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนคนใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างเดิน ทำให้ความเร็วเฉลี่ยจากกระแสจราจรทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (2) สร้างแบบจำลอง Fundamental diagram พบว่า แบบจำลอง Northwestern มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบจากหลักเกณฑ์ทางสถิติ โดยแบบจำลองดังกล่าว สามารถนำไปคาดการณ์สภาพการจราจรคนเดินเท้า หรือใช้ในการออกแบบทางเดินที่เหมาะสมกับพฤติกรรมของกระแสจราจรในพื้นที่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ

คนเดินเท้า กระแสจราจรคนเดินเท้า แผนภูมิมูลฐาน การใช้โทรศัพท์มือถือ การเดินเร่งรีบ

Abstract

This article studies pedestrian traffic flow by simulating scenarios. Prior to experimentation, surveys were conducted within the pedestrian walkway of a subway station (MRT) to examine behavioral patterns expected to affect pedestrian traffic flow. These behaviors include hurry walking and mobile phone usage while walking. Subsequently, several scenarios were constructed to capture diversify behaviors including current scenarios with proportions from surveys, and scenarios with extreme proportions. Traffic flows were designed to vary in density from light to crowded. Analysis results were separated into two types: (1) comparing walking speeds between current and extreme scenarios revealed a statistically significant increase in average speed with an increase in the proportion of hurried pedestrians, while the average speed decreased significantly with an increase in the proportion of mobile phone users among pedestrians and (2) constructing

Fundamental Diagram models revealed that the Northwestern model demonstrated the highest performance based on statistical criteria. This model can be used to forecast pedestrian traffic conditions or to design walkways for optimal efficiency, tailored to the flow behavior in the area.

Keywords

pedestrian traffic flow; fundamental diagram; mobile phone usage; rushed walking

1. คำนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบขนส่งสาธารณะอย่างต่อเนื่อง เช่น การส่งเสริมระบบจอดแล้วจร (Park & Ride) และการพัฒนาเมืองอัจฉริยะบริเวณรอบสถานีขนส่งมวลชน (Transit-Oriented Development: TOD) อาทิ พื้นที่บริเวณบางซื่อ [1] เพื่อรองรับและกระตุ้นให้ประชาชนเปลี่ยนพฤติกรรมมาใช้ระบบขนส่งสาธารณะมากยิ่งขึ้น [2] การพัฒนาในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ “การเดินทาง” กลายเป็นรูปแบบการเดินทางที่มีความสำคัญเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในเขตเมือง ซึ่งพบว่าประชาชนส่วนใหญ่นิยมเดินในระยะไม่เกิน 800 เมตร หรือประมาณ 10 นาที [3]

ในขณะเดียวกัน พบว่าชาวกรุงเทพฯ ใช้รถยนต์เฉลี่ยสูงถึง 800 ชั่วโมงต่อปี และต้องแบกรับค่าใช้จ่ายด้านการเดินทางถึงร้อยละ 20 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด สะท้อนให้เห็นถึงภาระทั้งในด้านเวลาและเศรษฐกิจ ดังนั้น การส่งเสริมการเดินทางเท้าจึงถือเป็นกลยุทธ์สำคัญในการยกระดับคุณภาพชีวิต ลดภาระค่าใช้จ่าย และเสริมสร้างสุขภาวะของประชาชน อีกทั้งยังมีผลต่อมิติทางเศรษฐกิจ โดยข้อมูลชี้ว่า ร้อยละ 49 ของคนรุ่นใหม่ (Generation Me) เลือกที่อยู่อาศัยในย่านที่สามารถเดินได้สะดวกก่อนตัดสินใจเลือกงาน การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางเดินเท้าที่ปลอดภัยและเอื้อต่อการใช้งานจึงเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาเมืองที่ครอบคลุมและเป็นธรรมต่อทุกกลุ่มประชากร

การศึกษาและการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของทางเดินเท้าในบทความนี้ได้ทำการศึกษาระเบียงจราจรในระดับมหภาค ซึ่งเป็นการศึกษาระเบียงจราจรในภาพรวม และสามารถนำข้อมูลแสดงออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้แก่ ความเร็ว-ความหนาแน่น-การไหล หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แผนภูมิมูลฐาน (Fundamental diagrams) ซึ่งในอดีตได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ที่มีลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่

แตกต่างกัน เช่น ทางเดินเท้า [4] ทางเดินที่มีลักษณะเป็นคอขวด [5] ทางข้าม [6] จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการเดินเท้า นั้น มีหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อายุ เพศ [7] ความกว้างของช่องทางเดินเท้า [8] วัฒนธรรม [9] และวัตถุประสงค์ของการเดิน [10] แม้ว่าในอดีตได้มีการศึกษาและสำรวจการเดินเท้าในกรุงเทพมหานครแล้ว [11] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่มีอยู่ยังขาดการพิจารณาบริบทเฉพาะของประเทศไทยในปัจจุบัน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความสำคัญสูงและมีปริมาณผู้ใช้บริการหนาแน่น เช่น ทางเดินเท้าบริเวณสถานีขนส่งมวลชน

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมการเดินอย่างเร่งรีบและการใช้โทรศัพท์มือถือขณะเดิน ซึ่งเป็นพฤติกรรมร่วมสมัยที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่เมือง ข้อมูลจากต่างประเทศพบอัตราการใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างเดินที่แตกต่างกัน เช่น จีน 32.8% [12], ออสเตรเลีย 44% [13], โปแลนด์ 14–60% [14] โดยเฉพาะบริเวณทางข้าม ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความเร็วในการเดิน การตัดสินใจเชิงพื้นที่ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างคนเดินเท้าอย่างมีนัยสำคัญ

การทำความเข้าใจปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองกระแสการไหลของคนเดินเท้าที่แม่นยำและสะท้อนความเป็นจริงได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยจึงใช้การจำลองสถานการณ์เพื่อควบคุมตัวแปรและแยกพฤติกรรมที่ส่งผลโดยตรงต่อกระแสการไหล ลดผลกระทบจากตัวแปรแทรกซ้อน เช่น การเดินแซง ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับคนเดินเท้าในประเทศไทย และช่วยพัฒนาเมืองให้ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้สัญจรทางเท้ามากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองทฤษฎีกระแสจราจรระดับมหภาค

การศึกษากระแสคนเดินเท้าได้พัฒนาขึ้นโดยอาศัยแนวคิดจากการวิเคราะห์กระแสจราจรของยานพาหนะ โดยมุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางมหภาคอันประกอบด้วย ความเร็ว (Speed) ปริมาณการไหล (Flow) และความหนาแน่น (Density) ซึ่งแสดงได้ด้วยแผนภาพ แผนภูมิมูลฐาน ซึ่งความสำคัญในการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับคนเดินเท้า ตลอดจนการประเมินและคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบ

ในบทความนี้ เลือกใช้แบบจำลอง Single-Regime เพื่อวิเคราะห์การจราจรของคนเดินเท้าเป็นหลัก โดยผู้วิจัยตัดสินใจเลือกแบบจำลองนี้จากการพิจารณาถึงความเรียบง่ายของแบบจำลอง ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและนำไปประยุกต์ใช้ในเบื้องต้นได้อย่างสะดวก นอกจากนี้ ยังเอื้อต่อการเปรียบเทียบผลการศึกษา กับงานวิจัยอื่น ๆ ได้ง่ายขึ้น

ในทางตรงกันข้าม แบบจำลอง Multi-Regime แม้จะมีความซับซ้อนและละเอียดกว่า แต่ก็ต้องการข้อมูลเชิงประจักษ์ในปริมาณมากและมีความแม่นยำสูง ซึ่งจากข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณของการวิจัยในปัจจุบัน ทำให้การรวบรวมข้อมูลและการเปรียบเทียบแบบจำลอง Multi-Regime เป็นไปได้ยาก

สมการ Single-Regime สามารถจัดอยู่ในรูปแบบสมการที่ (1)

$$q = kv \quad (1)$$

โดยที่

q = อัตราการไหล (คน/วินาที/ช่องจราจร)

k = ความหนาแน่น (คน/ตารางเมตร)

v = ความเร็วในการเดิน (เมตร/วินาที)

ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองให้มีรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสมการส่วนใหญ่ก็มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) เช่น ลอการิทึม (Logarithm) และเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) [15-18] สามารถสรุปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองประเภท Single Regime

แบบจำลอง	สมการของ แบบจำลอง	พารามิเตอร์
Greenshields [15]	$v = v_f - (1 - \frac{k}{k_j})$	v_f = ความเร็วอิสระ k_j = ความหนาแน่น ติดขัด
Greenberg [16]	$v = v_m - \ln(\frac{k_j}{k})$	v_m = ความเร็วเหมาะสม k_j = ความหนาแน่น ติดขัด
Underwood [17]	$v = v_f e^{\frac{-k}{k_m}}$	v_f = ความเร็วอิสระ k_m = ความหนาแน่นเหมาะสม
Drake [18]	$v = v_f e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{k_m})^2}$	v_f = ความเร็วอิสระ k_m = ความหนาแน่นเหมาะสม

2.2 ลักษณะทิศทางการเดิน

Duives, Daamen, and Hoogendoorn [19] จำแนกลักษณะการเดินเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) ทิศทางเดียว (Uni-directional) ได้แก่ ทางตรง (Straight flow), บริเวณขอบมุม (Rounding a corner), การเข้าสู่คอกวอด (Entering) และการออกจากคอกวอด (Exiting) (2) หลายทิศทาง (Multi-directional) เช่น เดินสวนกันสองทิศทาง การเดินมากกว่า 2 ทิศทาง หรือกระทั่งเป็นการเดินแบบสุ่มไร้ทิศทาง เป็นต้น

การจำแนกลักษณะทิศทางการเดินมีความสำคัญเนื่องจากข้อมูลหรือตัวแปรจากการวิเคราะห์ทางด้านความเร็วในการเดิน ความหนาแน่นของกระแสจราจร ลักษณะกระแสการไหลของการเดิน หรือตัวแปรอื่น ๆ ระหว่าง 2 ประเภทมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการสำรวจทางเดินหรือการทดลองโดยการจำลองสถานการณ์ อีกทั้งความแตกต่างของตัวแปรปัจจัย ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน และคุณลักษณะของคนเดินเท้าด้วย

2.3 โครงสร้างพื้นฐานคนเดินเท้า: ทางเดิน

ทางเดิน (Walkways) หมายถึง พื้นที่หรือทางเดินใด ๆ ที่ถูกกำหนดไว้สำหรับการใช้สัญจรของบุคคลด้วยการเดินเท้า หรือใช้รถเข็น โดยอาจรวมถึงทางเดินเท้า, ทางใช้ร่วมกัน, ทางเท้า หรือไหล่ทางถนน [20]

Tanaboriboon et al. [9] ได้ทำการศึกษาทางเท้าและทางเดินบริเวณย่านการค้า ประเทศสิงคโปร์ พบว่าความเร็ว

เฉลี่ยในการเดินมีค่า 74 เมตร/นาทีก่อน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับประเทศสหรัฐอเมริกา (81 เมตร/นาทีก่อน) อีกทั้งทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลพบว่าอัตราการไหลสูงสุดของประเทศสิงคโปร์มีค่า 89 คน/เมตร/นาทีก่อน ซึ่งมากกว่าประเทศสหรัฐอเมริกา

Tanaboriboon and Guyano [21] ได้ทำการศึกษาทางเท้าบริเวณย่านศูนย์กลางธุรกิจ 4 แห่ง ที่กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย พบว่า ความเร็วในการเดินอิสระมีค่า 72.85 เมตร/นาทีก่อน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเร็วในการเดินอิสระของต่างประเทศฝั่งยุโรปซึ่งมีช่วงความเร็วตั้งแต่ 78.60 ถึง 82 เมตร/นาทีก่อน

Virkler and Elayadath [22] ได้ทำการศึกษาทางเดินก่อนเข้าสู่โมดในสหรัฐอเมริกา ซึ่งใช้แบบจำลอง 3 ประเภท มาเปรียบเทียบกับกัน คือ (1) แบบจำลอง Single-regime ได้แก่ Greenshield, Underwood, และ Northwestern (2) แบบจำลอง Two-regime ได้แก่ Greenberg, Edie และ 2-regime linear (3) แบบจำลอง Three-regime ได้แก่ 3-regime linear ซึ่งนำการทดสอบทางสถิติมาใช้ ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองจากค่า r^2 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error) เนื่องจากต้องการแบบจำลองที่สามารถอธิบายสภาพกระแสจราจรที่เหมาะสมที่สุด

2.4 การจำลองสถานการณ์

งานวิจัยนี้ได้จำลองสถานการณ์แทนการสำรวจจริงเนื่องจากสามารถเพิ่มตัวแปร ควบคุมตัวแปร และสามารถทำซ้ำได้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างคงที่ โดยการจำลองสถานการณ์นี้ได้มีการจำลองสถานการณ์ตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์กระแสจราจรคนเดินเท้าในเหตุการณ์การอพยพหนีไฟจำลอง [23]

Daamen and Hoogendoorn [24] ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลพฤติกรรมคนเดินเท้าอย่างละเอียด เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลของคนเดินเท้าแบบจุลภาคและมหภาค เช่น SimPed และ NOMAD โดยเน้นการทำความเข้าใจลักษณะการไหลภายใต้สภาวะต่าง ๆ และสังเกตการใช้พื้นที่เมื่อเกิดความแออัด ซึ่งการทดลองช่วยให้ผู้วิจัยสามารถควบคุมตัวแปรได้

Seyfried, Steffen, Klingsch, and Boltes [25] จำลองการเดินเท้าแบบแถวเดี่ยวในทางเดินปิดภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความหนาแน่น พบว่าความเร็วแปรเชิงเส้นกับระยะห่างระหว่างคนเดิน โดยไม่มีผลจากการแซงหรือแรงเบียดขัง ทั้งยังพบพฤติกรรมการปรับตัว เช่น การเดินจังหวะเดียว (lock-step) ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากความหนาแน่นและหลีกเลี่ยงการรบกวนกันระหว่างผู้เดิน

Chattaraj, Seyfried, and Chakroborty [26] จำลองการเดินเท้าในทางเดินปิดภายใต้เงื่อนไขควบคุมในอินเดียและเยอรมนี โดยใช้การเคลื่อนที่แบบแถวเดี่ยวเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความหนาแน่น พบความแตกต่างทางวัฒนธรรมด้านพื้นที่ส่วนตัวและการตอบสนองต่อความแออัด โดยผู้เดินชาวอินเดียมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นระเบียบมากกว่า

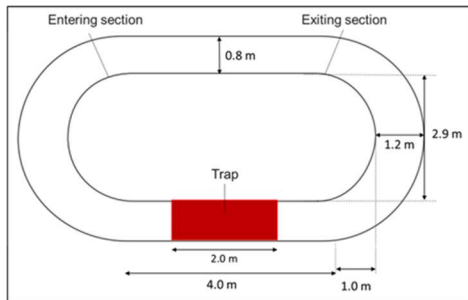
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาลักษณะกระแสจราจรของคนเดินเท้าระดับมหภาคโดยการจำลองสถานการณ์ นำสัดส่วนต่าง ๆ เช่น สัดส่วนการใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างเดิน สัดส่วนการเดินอย่างเร่งรีบเพื่อขึ้นรถไฟฟ้า จากการสำรวจจริงมาทำการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้

3.1 สถานที่สำรวจข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้กำหนดคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของพื้นที่จำลองให้คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Seyfried et al. [26] โดยสถานที่เก็บข้อมูลมีรายละเอียดดังนี้ ทางเดินมีลักษณะเป็นวงรอบ (Loop) แบบปิด ล้อมรอบด้วยเชือกและเก้าอี้ ความยาวของทางเดิน 17.3 เมตร ความกว้างของทางเดินตรง 0.8 เมตรและความกว้างของทางเดินขณะเลี้ยว 1.2 เมตร การเพิ่มความกว้างในช่วงโค้งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอิทธิพลของการเลี้ยวต่อการเคลื่อนไหวของผู้เดิน เพื่อไม่ให้เกิดพฤติกรรมที่วัดในช่วงดักจับข้อมูล (Trap section) ซึ่งตั้งไว้กึ่งกลางของช่วงทางตรง ทางเดินออกแบบให้รองรับการเดินแบบแถวเดี่ยว โดยมีช่วงทางเข้า (Entering section) อยู่ด้านซ้ายมือของผู้เข้าร่วม และช่วงทางออก (Exiting section) ต่อเนื่องตามทิศทางการเดิน ช่วงดักจับข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์มีความยาว 2 เมตร

ดังรูปที่ 1 ซึ่งพื้นที่จำลองนี้คล้ายคลึงกับทางเดินบริเวณทางเดินเข้าสถานีรถไฟ โดยทำการเก็บข้อมูลภายในอาคารปฏิบัติการ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา



รูปที่ 1 พื้นที่การจำลองสถานการณ์

3.2 กลุ่มตัวอย่าง

ใช้กลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 34 คน โดยมีสัดส่วนเพศชายและหญิงเท่า ๆ กัน การจำลองสถานการณ์จำแนกตามช่วงความหนาแน่นของพื้นที่วงรอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลกระแสการเดินที่ครอบคลุมตั้งแต่ความหนาแน่นต่ำไปสูง แบ่งเป็น 5 สถานการณ์ย่อย ได้แก่ 15, 20, 25, 30 และ 34 คน การกำหนดระดับจำนวนผู้เข้าร่วมหลายค่าเช่นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อครอบคลุมช่วงความหนาแน่นให้เพียงพอสำหรับการประมาณความสัมพันธ์ความเร็ว-ความหนาแน่น (Fundamental Diagram) ที่เริ่มจากระดับปานกลางไปจนถึงสูง ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมคนเดินเท้า ภายใต้ข้อจำกัดด้านจำนวนกลุ่มตัวอย่างโดยลำดับของการเดินจะถูกสุ่มอย่างง่าย (Random sampling) ทุกครั้ง โดยผู้เข้าร่วมจะต้องใช้ความเร็วในการเดินปกติ ไม่มีการแข่งกัน ไม่มีการเดินชนกัน และไม่มีการตื่นตระหนกระหว่างเดิน ยกเว้นจะได้รับเป็นคำสั่งอย่างอื่น สำหรับการเข้าสู่พื้นที่วงรอบนั้นผู้เข้าร่วมทั้งหมดของสถานการณ์ย่อยจะตั้งแถวอยู่นอกบริเวณ Entering section และทิศทางการเดินมีลักษณะการเดินวนตามเข็มนาฬิกาเป็นแถววงกลม

3.3 การสำรวจข้อมูล

การสำรวจข้อมูลในงานวิจัยนี้จะมีความแตกต่างกันไปในเรื่องของตัวแปรและสถานที่ ดังนั้นผู้วิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

3.3.1 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้น

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลได้แก่ (1) การใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างการเดิน พบว่าสัดส่วนการใช้โทรศัพท์มือถือมีสัดส่วนประมาณ 15% จากปริมาณจราจรที่สำรวจมาจากภาคสนาม (2) การเดินเร่งรีบ ซึ่งนิยามด้วย “ความถี่ก้าวเดิน” (ก้าว/วินาที) เป็นตัวชี้วัดระดับความเร่งรีบ ข้อมูลผ่านการทดสอบ Shapiro-Wilk ที่ระดับนัยสำคัญ 5% จึงถือว่ากระจายปกติ และใช้กฎเชิงประจักษ์ (Empirical rule) กำหนดเกณฑ์เร่งรีบ เป็นค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย ตั้งแต่ $+1\sigma$ ถึง $+3\sigma$ คิดเป็นสัดส่วนราว 15% ของปริมาณจราจรที่สำรวจมาจากภาคสนาม

3.3.2 การสำรวจข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์

การสำรวจข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์จะสำรวจตัวแปรเป็นจำนวน 2 ตัวได้แก่ (1) ความเร็วในการเดิน (2) ความหนาแน่นของคนเดินเท้า โดยใช้กล้องวิดีโอบันทึกตลอดระหว่างการจำลองสถานการณ์แล้วจึงถอดข้อมูลจากไฟล์วิดีโอ

1) ความเร็วในการเดิน (Walking speed)

เพื่อความสะดวกในการหาความเร็วในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความเร็วเฉลี่ยแบบเวลา (Time mean speed) แทนการใช้ความเร็วเฉลี่ยแบบระยะทาง (Space mean speed) ในการหาความเร็วในการเดิน เนื่องจากค่าความแปรปรวนความเร็วในการเดินของคนนั้นแตกต่างกันและมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนความเร็วของยานพาหนะ โดยความเร็วในการเดินของแต่ละคนสามารถหาได้จากเวลาที่เข้าสู่จุด Trap และเวลาออกจากจุด Trap ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$v_i = \frac{l_m}{t_i^{out} - t_i^{in}} \quad (1)$$

เมื่อ

v_i คือ ความเร็วเฉพาะตำแหน่งเฉลี่ยในการเดินของคนที่ i (เมตร/วินาที)

l_m คือ ความยาวจุด Trap (เมตร)

t_i^{out} คือ เวลาที่ออกจากจุด Trap ของคนที่ i

t_i^{in} คือ เวลาที่เข้าสู่จุด Trap ของคนที่ i

2) ความหนาแน่น (Density)

การหาความหนาแน่นนั้นจะใช้ตัวแปรระยะห่าง (Spacing) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนาแน่นเชิงเส้น หรือ 1 มิติ ซึ่งโดยไม่คิดผลกระทบจากความกว้างจากจุด Trap โดยการหารระยะห่างของแต่ละคนจะวัดจากทุเนื่องจากเป็นจุดที่มองเห็นได้สม่ำเสมอในมุกกล้องด้านข้าง และไม่ถูกรบกวนจากการแกว่งแขน/ไหล่ โดยคำนวณช่วงใบหูของคนที i และ คนก่อนหน้า $i - 1$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\rho_i = \frac{1}{s_i} \quad (3)$$

เมื่อ

ρ_i คือ ความหนาแน่นของคนที i (คน/เมตร)

s_i คือ ระยะห่างระหว่างคนที i กับคนก่อนหน้าที $i - 1$ (เมตร)

3.4 การออกแบบสถานการณ์

ผู้วิจัยออกแบบสถานการณ์ทั้งหมดดังตารางที่ 2 จากนั้นจึงกำหนดให้ผู้เข้าร่วมนั้นกระทำการกิจกรรมอย่างใดอย่างหนึ่งจาก 2 ปัจจัยที่กล่าวมา ได้แก่ การใช้โทรศัพท์มือถือ การเดินอย่างเร่งรีบ (เช่น S3: สถานการณ์เข้าสู่ตู้รถไฟ จะมีผู้เข้าร่วมที่เดินด้วยความเร็วปกติ 70% และเดินช้า 30%) โดยทำการสุ่มให้ตำแหน่งของผู้เข้าร่วมกระทำการกิจกรรมดังกล่าว ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบวงกลม (Circular systematic sampling) และการสุ่มทุกครั้งเมื่อเริ่มทำการจำลองสถานการณ์ย่อยใหม่

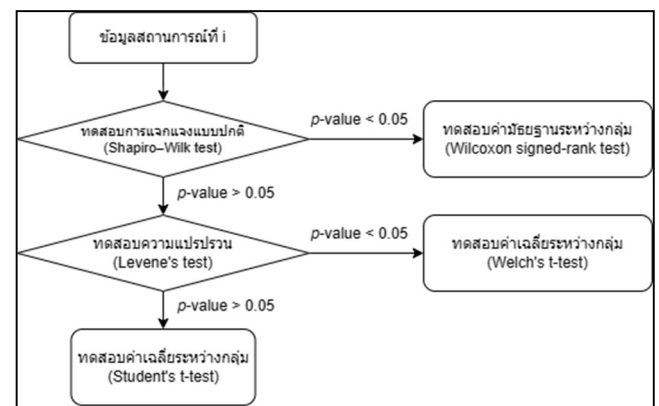
ตารางที่ 2 สรุปการออกแบบสถานการณ์

สัดส่วนความเร็วในการเดิน	สัดส่วนการใช้โทรศัพท์มือถือ
S1: สถานการณ์ปัจจุบัน (ความเร็วปกติ 70% : ช้า 15% : เร่งรีบ 15%)	S1: สถานการณ์ปัจจุบัน (ใช้มือถือ 15% : ไม่ใช้มือถือ 85%)
S2: สถานการณ์เดินปกติ (ความเร็วปกติ 100%)	S5: สถานการณ์สุดโต่ง (ใช้มือถือ 30% : ไม่ใช้มือถือ 70%)
S3: สถานการณ์เข้าสู่ตู้รถไฟ (ความเร็วปกติ 70% : ช้า 30%)	S6: สถานการณ์สุดโต่ง (ไม่ใช้มือถือ 100%)
S4: สถานการณ์เร็วสุดโต่ง (ความเร็วปกติ 70% : เร็ว 30%)	

3.5 การวิเคราะห์สถานการณ์

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ความเร็วในการเดินเฉลี่ยซึ่งคาดว่าจะมีความเร็วแตกต่างกันไปในแต่ละสถานการณ์ ด้วยการใช้สถานการณ์ปัจจุบันเป็นหลัก (เนื่องจากสัดส่วนที่ได้สำรวจเบื้องต้น ปัจจุบันพบว่ามีคนทีเดินช้า เดินเร็ว ปะปนกันไป) เทียบกับสถานการณ์อื่น ๆ เพื่อหาความแตกต่างด้วยวิธีการทางสถิติ และการสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์กระแสจราจร มีรายละเอียดดังนี้

1) การวิเคราะห์ค่าความเร็วในการเดินเฉลี่ยเพื่อหาความแตกต่างระหว่างสถานการณ์โดยใช้การทดสอบทางสถิติ มีขั้นตอนดังผังขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังการวิเคราะห์เพื่อหาความแตกต่างระหว่างสถานการณ์

2) การวิเคราะห์ถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลอง จากนั้นจึงประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง โดยประเมินใช้ค่าสถิติ (1) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของส่วนที่เหลือ (Residual Standard Error, RSE) โดยหากมีค่า RSE ต่ำ แสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายสูง (2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (Coefficient of Multiple Determination, r^2) มีเกณฑ์แนะนำควรจะ $r^2 = 0.50$ ขึ้นไป [27] การที่ r^2 มีค่าสูง แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี (3) เกณฑ์ข้อสนเทศของอาไคเคะ (Akaike Information Criterion, AIC) จะเลือกแบบจำลองที่มีค่า AIC ต่ำที่สุด หมายความว่าแบบจำลองมีความสมดุลระหว่างความสามารถในการอธิบายข้อมูลและความซับซ้อนของแบบจำลอง (ไม่ซับซ้อนเกินความจำเป็น)

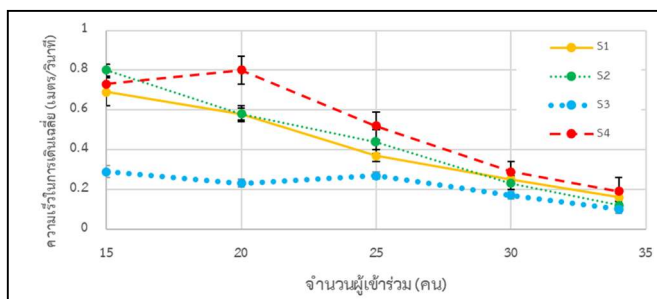
4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยแบ่งเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ (1) ข้อมูลเบื้องต้น แสดงค่าเฉลี่ย (Mean) ความเร็วในการเดิน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) แสดงเป็นขีดแสดงค่าความผิดพลาด (Error bar) (2) ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบข้อมูลความเร็วของแต่ละสถานการณ์โดยใช้การทดสอบทางสถิติ (3) แบบจำลองแผนภูมิมูลฐาน (Fundamental diagram)

4.1 การเปรียบสถานการณ์ปัจจุบันกับปัจจัยความเร็วในการเดิน

4.1.1 ข้อมูลความเร็วในการเดินเฉลี่ย

พบว่าในภาพรวมความเร็วในการเดินจะลดลงเรื่อย ๆ ตามจำนวนของผู้เข้าร่วมในกระแสจราจร โดยความเร็วในการเดินเฉลี่ยสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ สถานการณ์ที่ 4 (เดินเร็วสุดโต่ง) สถานการณ์ที่ 2 (เดินปกติ) สถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) และสถานการณ์ที่ 3 (เดินช้าสุดโต่ง) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความเร็วในการเดินของสถานการณ์ที่ 1 ถึง 4 (N = 15-34 คน)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบข้อมูลความเร็วระหว่างสถานการณ์ปัจจุบันกับสถานการณ์ที่ปัจจัยความเร็วในการเดินแตกต่างกัน

จากตารางที่ 3 พบว่าเมื่อความหนาแน่นยังไม่มาก (N = 15–25) ความเร็วเฉลี่ยของสถานการณ์ที่ 2 (เดินปกติ) สูงกว่าสถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) โดยเหตุผลคือในสถานการณ์ที่ 1 มีผู้ใช้โทรศัพท์มือถือระหว่างเดิน ทำให้ลดความเอาใจใส่ทางเดิน ส่งผลให้มีระยะห่างระหว่างคน หรือ headway เพิ่มขึ้นและลดความเร็วเฉลี่ย แต่เมื่อความหนาแน่นสูง (N = 30–34) พบว่าสถานการณ์ที่ 1 กลับมีความเร็วเฉลี่ยมากกว่า ซึ่งอธิบายได้จากแรงกดดันของฝูงชนและการมีผู้เดินเร่งรีบที่ทำให้ความเร็วเพิ่ม

ประสงค์เพิ่มขึ้น จนผลของการใช้โทรศัพท์ถูกหักล้างและทุกคนต้องเดินให้ทันกระแส

ตารางที่ 3 ค่าทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเร็วในการเดินเฉลี่ยระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) กับ สถานการณ์ที่ 2 (เดินปกติ)

N	V_{S1} (m/s)	V_{S2} (m/s)	Shapiro-Wilk (p-value)		Levene's test (p-value)	T-test (p-value)	Mann - Whitney U test (p-value)
			S1	S2			
15	0.692	0.799	0.554	0.284	0.001*	0.000*	-
20	0.576	0.581	0.917	0.149	0.799	0.632	-
25	0.368	0.444	0.300	0.105	0.003*	0.000*	-
30	0.252	0.230	0.337	0.079	0.419	0.000*	-
34	0.158	0.124	0.043	0.000*	-	-	0.000*

หมายเหตุ *p-value < 0.05

ตารางที่ 4 ค่าทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเร็วในการเดินเฉลี่ยระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) กับ สถานการณ์ที่ 3 (เดินช้าสุดโต่ง)

N	V_{S1} (m/s)	V_{S3} (m/s)	Shapiro-Wilk (p-value)		Levene's test (p-value)	T-test (p-value)	Mann - Whitney U test (p-value)
			S1	S3			
15	0.692	0.292	0.554	0.790	0.010*	0.000*	-
20	0.576	0.232	0.917	0.027*	-	-	0.000*
25	0.368	0.271	0.300	0.049	-	-	0.000*
30	0.252	0.171	0.337	0.246	0.843	0.000*	-
34	0.158	0.096	0.043*	0.001*	-	-	0.000*

หมายเหตุ *p-value < 0.05

จากตารางที่ 4 พบว่าความเร็วในการเดินของสถานการณ์ที่ 1 มากกว่า สถานการณ์ที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ตลอดทุกช่วงความหนาแน่น เนื่องจากสถานการณ์ที่ 3 มีผู้เดินที่ตั้งใจเดินช้ามาก ก่อให้เกิดการชะลอตาม/จัดขบวน (platooning) และเพิ่ม headway จึงกีดความเร็วเฉลี่ยของฝูงชนลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงความหนาแน่นต่ำ-ปานกลาง (N = 15–25) ส่วนช่วงความหนาแน่นสูง (N = 30–34) ด้วยข้อจำกัดเชิงพื้นที่และแรงกดดันจากฝูงชนทำให้ทุกคนช้าลงอยู่แล้ว จึงเห็นช่องว่างความเร็วที่แคบลง

ตารางที่ 5 ค่าทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเร็วในการเดินเฉลี่ยระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) กับ สถานการณ์ที่ 4 (เดินเร็วสุดโต่ง)

N	V _{S1} (m/s)	V _{S4} (m/s)	Shapiro-Wilk (p-value)		Levene's test (p-value)	T-test (p-value)	Mann - Whitney U test (p-value)
			S1	S4			
15	0.692	0.732	0.554	0.026	0.010*	0.047*	-
20	0.576	0.803	0.917	0.070	0.056	0.000*	-
25	0.368	0.523	0.300	0.001	0.001*	0.000*	-
30	0.252	0.292	0.337	0.089	0.000*	0.000*	-
34	0.158	0.187	0.043*	0.000*	-	-	0.407

หมายเหตุ *p-value < 0.05

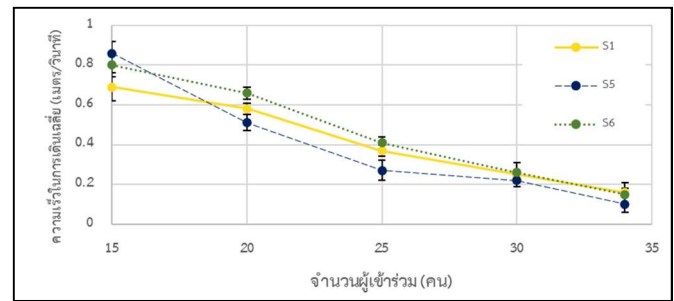
จากตารางที่ 5 พบว่าช่วงความหนาแน่นต่ำ-ปานกลาง (N = 15-25) การมีผู้เดินเร็วมากหรือสัดส่วนการเดินเร็วสุดโต่งสูงมากกว่าสถานการณ์ที่ 1 ก่อให้กระแสนเดินเร่งตามและลด headway ลง จึงทำให้ค่าเฉลี่ยให้สูงกว่าสถานการณ์ที่ 1 เมื่อช่วงความหนาแน่นสูง (N = 30-34) เริ่มมีขีดจำกัดด้านพื้นที่เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งผู้คนพยายามหลีกเลี่ยงการเดินชนกัน ทำให้ทุกคนซึ่งรวมถึงผู้เดินเร็ว ถูกบังคับให้เดินช้าลง

4.2 การเปรียบสถานการณ์ปัจจุบันกับปัจจัยการใช้โทรศัพท์มือถือ

4.2.1 ข้อมูลความเร็วในการเดินเฉลี่ย

พบว่าในภาพรวมความเร็วในการเดินจะลดลงเรื่อย ๆ ตามจำนวนของผู้เข้าร่วมในกระแสจราจร โดยความเร็วในการเดินเฉลี่ยสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ สถานการณ์ที่ 6 (ไม่ใช้มือถือ) สถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) สถานการณ์ที่ 5 (ใช้มือถือสุดโต่ง) ดังรูปที่ 4

จากตารางที่ 6 พบว่าช่วงความหนาแน่นต่ำ (N = 15) ยังมีพื้นที่โล่งทำให้ผู้ใช้มือถือยังคงก้าวได้ใกล้เคียง/สูงกว่าค่าเฉลี่ยของสถานการณ์ที่ 1 เมื่อความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น (N = 20-34) เมื่อจำนวนคนใช้โทรศัพท์มือถือเพิ่มมากขึ้นนำไปสู่การเพิ่มระยะห่าง (headway) และเริ่มหยุดชะงักย่อย ๆ ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของสถานการณ์ที่ 5 ลดต่ำกว่าสถานการณ์ที่ 1



รูปที่ 4 ความเร็วในการเดินของสถานการณ์ที่ 1 5 และ 6 (N = 15-34 คน)

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบข้อมูลความเร็วระหว่างสถานการณ์ปัจจุบันกับสถานการณ์ที่มีปัจจัยการใช้มือถือระหว่างเดิน

ตารางที่ 6 ค่าทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเร็วในการเดินเฉลี่ยระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) กับ สถานการณ์ที่ 5 (ใช้มือถือสุดโต่ง)

N	V _{S1} (m/s)	V _{S5} (m/s)	Shapiro-Wilk (p-value)		Levene's test (p-value)	T-test (p-value)	Mann - Whitney U test (p-value)
			S1	S5			
15	0.692	0.865	0.554	0.583	0.507	0.000*	-
20	0.576	0.514	0.917	0.209	0.117	0.000*	-
25	0.368	0.271	0.300	0.501	0.101	0.000*	-
30	0.252	0.217	0.337	0.159	0.006*	0.000*	-
34	0.158	0.104	0.043*	0.000*	-	-	0.000*

หมายเหตุ *p-value < 0.05

ตารางที่ 7 ค่าทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความเร็วในการเดินเฉลี่ยระหว่างสถานการณ์ที่ 1 (ปัจจุบัน) กับ สถานการณ์ที่ 6 (ไม่ใช้มือถือ)

N	V _{S1} (m/s)	V _{S6} (m/s)	Shapiro-Wilk (p-value)		Levene's test (p-value)	T-test (p-value)	Mann - Whitney U test (p-value)
			S1	S6			
15	0.692	0.796	0.554	0.035	-	-	0.000*
20	0.576	0.662	0.917	0.489	0.739	0.000*	-
25	0.368	0.409	0.300	0.422	0.846	0.000*	-
30	0.252	0.262	0.337	0.100	0.000*	0.170	-
34	0.158	0.149	0.043	0.000*	-	-	0.005*

หมายเหตุ *p-value < 0.05

จากตารางที่ 7 พบว่าความเร็วในการเดินเฉลี่ยของช่วงความหนาแน่นต่ำ - ค่อนไปทางสูง ($N = 15-30$) ของสถานการณ์ที่ 6 มากกว่าสถานการณ์ที่ 1 เนื่องจากสถานการณ์ที่ 6 ไม่มีผู้คนใช้มือถือระหว่างเดินเลย ส่งผลให้เพิ่มการรับรู้สภาพแวดล้อม ลด headway ลดความลังเลในการเดินลง เนื่องจากเห็นคนเดินข้างหน้า อย่างไรก็ตามเมื่อถึงช่วงความหนาแน่นสูง ($N = 34$) พบว่าสถานการณ์ที่ 1 เดินเร็วกว่าเนื่องจากมีคนเดินเร่งรีบปะปน

4.3 แบบจำลองแผนภูมิมูลฐาน (Fundamental diagram)

ในการศึกษาความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่าง ความเร็วเฉลี่ยของการเดิน และ ความหนาแน่นของคนเดินเท้า ของแต่ละสถานการณ์ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองแผนภูมิพื้นฐาน (Fundamental diagram) โดยทดสอบแบบจำลอง 4 แบบ ได้แก่ Greenshields, Greenberg, Underwood และ Northwestern แล้วประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัด (1) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของส่วนที่เหลือ (RSE) (2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (r^2) และ (3) เกณฑ์ข้อสนเทศของอาไคเคะ (AIC) ผลการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลอง Northwestern ให้ความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ของแต่ละสถานการณ์ดีกว่าแบบอื่น จึงเลือกนำเสนอสมการที่ประมาณได้ของแบบจำลอง Northwestern ดังตารางที่ 8

จากค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของการไหลของคนเดินเท้า ซึ่งประกอบด้วยความเร็วอิสระ (v_f) และความหนาแน่นที่เหมาะสม (k_m) ในตารางที่ 8 พบว่าแต่ละสถานการณ์มีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจ เริ่มจากสถานการณ์ที่ 2 (การเดินปกติ) แสดงค่าความเร็วพื้นฐานสูงสุดที่ประมาณ $v_f = 1.12$ เมตร/วินาที โดยความเร็วจะเริ่มลดลงเมื่อเข้าใกล้ค่า $k_m = 0.94$ คน/ตารางเมตร ซึ่งเป็นสภาวะการไหลโดยทั่วไป ในทางตรงกันข้ามสถานการณ์ที่ 3 (เข้าสู่ต๋อง) มีความเร็วพื้นฐานต่ำสุดที่ $v_f = 0.38$ เมตร/วินาที เนื่องจากผู้เข้าร่วมมีพฤติกรรมการจงใจเดินช้าและสามารถรองรับความหนาแน่นได้สูงสุดถึง $k_m = 1.34$ คน/ตารางเมตร

ตารางที่ 8 แบบจำลองสถานการณ์ที่ 1-6

สถานการณ์	แบบจำลอง	สมการแบบจำลอง	r^2	RSE	AIC
1	NW	$v = 0.98e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{1.05})^2}$	0.63	0.15	-342.0
2	NW	$v = 1.12e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{0.94})^2}$	0.78	0.13	-470.1
3	NW	$v = 0.38e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{1.34})^2}$	0.42	0.07	-890.1
4	NW	$v = 1.08e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{1.09})^2}$	0.61	0.16	-299.0
5	NW	$v = 1.03e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{0.94})^2}$	0.73	0.13	-433.3
6	NW	$v = 0.96e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{1.00})^2}$	0.58	0.17	-248.3

หมายเหตุ: NW หมายถึง แบบจำลอง Northwestern

ขณะที่สถานการณ์ที่ 4 (เร็วสุดต๋อง) บ่งชี้ถึงความเร็วอิสระค่อนข้างสูง $v_f = 1.08$ เมตร/วินาที และยังสามารถคงการไหลไปจนถึงระดับความหนาแน่นปานกลางค่อนข้างสูงได้ถึง $k_m = 1.09$ คนต่อตารางเมตร ส่วนในกลุ่มสถานการณ์ที่ 1, 5, และ 6 ซึ่งสะท้อนผลของการไม่มีมือถือและพฤติกรรมผสมอื่น ๆ มีค่าพารามิเตอร์อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน คือ $v_f = 0.96-1.03$ เมตร/วินาที และ $k_m = 0.94-1.05$ คน/ตารางเมตร แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมที่แตกต่างกันเหล่านี้ส่งผลให้ระดับความเร็วอิสระและความหนาแน่นที่เหมาะสมนั้นแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างสถานการณ์

5. สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรกระแสจราจรคนเดินเท้าโดยการจำลองสถานการณ์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการจำลองทั้งหมด 6 สถานการณ์ พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วในการเดินของแต่ละสถานการณ์ $N = 15$ มีช่วงความเร็วตั้งแต่ 0.29-0.86 เมตร/วินาที ซึ่งช่วงความเร็วมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากสัดส่วนของปัจจัยของผู้เข้าร่วมในแต่ละสถานการณ์ที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน เช่น ในสถานการณ์ที่ 3 (เดินเข้าสู่ต๋อง) ทำการเพิ่มสัดส่วนผู้เข้าร่วมที่เดินช้าให้มากขึ้นกว่าปกติ ซึ่งการเพิ่มสัดส่วนดังกล่าวทำให้มีจำนวน

ผู้เข้าร่วมที่เดินช้าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผู้เข้าร่วมคนอื่น ๆ ภายในกระแสจราจรของสถานการณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ความเร็วให้น้อยกว่าผู้เข้าร่วมที่ถูกกำหนดให้เดินช้ากว่าปกติ เนื่องจากผู้เข้าร่วมคนอื่น ๆ ที่อยู่ข้างหลังไม่สามารถแซงผู้เข้าร่วมที่ถูกกำหนดให้เดินช้ากว่าปกติ จึงทำให้ค่าความเร็วเฉลี่ยในการเดินมีค่า 0.29 เมตร/วินาที

เมื่อทำการเพิ่มจำนวนผู้เข้าร่วมไปเรื่อย ๆ ทำให้ความเร็วในการเดินเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และช่วงความเร็วในการเดินลดลง โดยเฉพาะสถานการณ์ย่อย N = 34 ซึ่งมีช่วงความเร็วที่ต่ำลงอย่างมาก โดยมีค่าตั้งแต่ 0.10-0.19 เมตร/วินาที เนื่องจาก กระแสจราจรมีความหนาแน่นจึงทำให้ผู้เข้าร่วมที่มีปัจจัยต่าง ๆ ต้องชะลอความเร็วในการเดินของตนเองเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดชนกันข้างหน้า ถึงแม้ว่าจะได้รับคำสั่งให้เดินอย่างเร่งรีบ หรือคำสั่งอื่น ๆ ก็ตาม

ผู้ที่สนใจสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ในการคาดการณ์สภาพการจราจรคนเดินเท้าบริเวณต่าง ๆ ที่มีสถานการณ์แตกต่างกันออกไปได้ เช่น ทางเดินบริเวณสถานีรถไฟฟ้า (สถานการณ์ปกติ) ทางเดินบริเวณห้างสรรพสินค้า (สถานการณ์เดินเข้าสุดโถง) หรือใช้ในการออกแบบทางเดินให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของกระแสจราจรในพื้นที่นั้น ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่ในการทดลอง และผู้อำนวยการศูนย์การขนส่งและโลจิสติกส์ที่สนับสนุนงบประมาณในการจ้างผู้เข้าร่วมการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. โครงการบริหารจัดการความต้องการในการเดินทาง (Demand Management) เพื่อรองรับการพัฒนาโครงข่ายการจราจรและระบบขนส่งสาธารณะในเขตกรุงเทพมหานคร. เข้าถึงได้จาก: http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/ProjectOTP/2558/Project10-Demand/FinalReportTDM.pdf [เข้าถึง 7 กุมภาพันธ์ 2567]
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. แผนการพัฒนาเมืองอัจฉริยะพื้นที่โดยรอบสถานีกลางบางซื่อ เข้าถึงได้จาก: http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/PDF/2563-04/25630410-PDF-SmartCity.pdf [เข้าถึง 7 กุมภาพันธ์ 2567]
- [3] ศูนย์สื่อสารองค์กร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. GoodWalk Thailand ออกแบบ “เมืองเดินได้-เมืองเดินดี” เข้าถึงได้จาก <https://www.chula.ac.th/highlight/144804/> [เข้าถึง 25 กรกฎาคม 2568]
- [4] Lam WH, Morraal JF, Ho H. Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. *Transportation Research Record*. 1995; 1487: 56-62.
- [5] Seyfried A, Passon O, Steffen B, Boltes M, Rupprecht T, Klingsch W. New insights into pedestrian flow through bottlenecks. *Transportation Science*. 2009;43(3):395-406.
- [6] Lee YC. *Pedestrian Walking and Choice Behavior on Stairways and Escalators in Public Transport Facilities*. Master of Engineering Thesis, TU Delft, Netherlands. 2005 Oct.
- [7] Fitzpatrick K, Brewer MA, Turner S. Another look at pedestrian walking speed. *Transportation Research Record*. 2006;1982(1):21-29.
- [8] Hoogendoorn SP, Daamen W. Pedestrian behavior at bottlenecks. *Transportation Science*. 2005;39(2):147-159.
- [9] Tanaboriboon Y, Hwa SS, Chor CH. Pedestrian characteristics study in Singapore. *Journal of Transportation Engineering*. 1986;112(3):229-35.
- [10] Fang SH. Analysis of Pedestrian Walking Microscopic Characteristics in Urban Rail Transit Station Different Types Passageway. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 392(6): 062131.
- [11] Tanaboriboon Y, Guyano JA. Analysis of pedestrian movements in Bangkok. *Transportation Research Record*. 1991;1294:52-56.
- [12] Hao QH, Wang Y, Zhou MZ, Yi T, Cui JR, Gao P, et al. Factors influencing pedestrian smartphone

- use and effect of combined visual and auditory intervention on “smombies”: A Chinese observational study. *International Journal of Public Health*. 2022; 67: 1604601.
- [13] Frej D. Observational study of pedestrian behavior at signalized crosswalks. *Komunikácie-vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2025;27(1):54-66.
- [14] Stark J, Ruzsicska K, Wiesmann T. Young pedestrians’ mobile phone use while crossing the road. *Transactions on Transport Sciences*. 2022; 9;12(3):78-84.
- [15] Greenshields BD, Bibbins JR, Channing WS, Miller HH. A study of traffic capacity. In *Highway research board proceedings* 1935; 14(1): 448-477).
- [16] Greenberg H. An analysis of traffic flow. *Operations Research*. 1959;7(1):79-85.
- [17] Underwood RT. Speed, volume and density relationships. In: *Quality and Theory of Traffic Flow*. New Haven: Bureau of Highway Traffic. Yale University; 1961. p. 141-87.
- [18] Drake JS. A statistical analysis of speed density hypothesis. *Highway Research Record*. 1967; 154: 53-87.
- [19] Duives DC, Daamen W, Hoogendoorn SP. State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013;37:193-209.
- [20] Federal Highway Administration. Walkways. U.S. Department of Transportation. Available from: <https://highways.dot.gov/safety/proven-safety-countermeasures/walkways> [เข้าถึง 7 กุมภาพันธ์ 2567]
- [21] Tanaboriboon Y, Guyano JA. Level-of-service standards for pedestrian facilities in Bangkok: a case study. *Institute of Transportation Engineers Journal*. 1989;59(11):39-41.
- [22] Virkler MR, Elayadath S. Pedestrian speed-flow-density relationships. *Transportation Research Record*. 1994.
- [23] Liu XD, Song WG, Huo FZ, Jiang ZG. Experimental study of pedestrian flow in a fire-protection evacuation walk. *Procedia Engineering*. 2014; 1(71): 343-349.
- [24] Daamen W, Hoogendoorn SP. Experimental research of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Record*. 2003; 1828(1):20-30.
- [25] Seyfried A, Steffen B, Klingsch W, Boltes M. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2005;10:P10002.
- [26] Chattaraj U, Seyfried A, Chakroborty P. Comparison of pedestrian fundamental diagram across cultures. *Advances in Complex Systems*. 2009;12(03):393-405.
- [27] Ozili PK. The acceptable R-square in empirical modelling for social science research. *Social Research Methodology and Publishing Results*. 2023:134-143.