

Research article

การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบทางลาดที่ส่งผลต่อเวลาในการใช้งานสำหรับรถเข็นวีลแชร์

An Analysis of the Impact of Ramp Designs on Wheelchair Users' Travel Time

พันธพัฒน์ บุญมา¹

Pantapat Boonma¹

Received: 13 November 2025 | Revised: 23 January 2026 | Accepted: 28 January 2026

<https://doi.org/10.55003/acaad.2026.284336>

บทคัดย่อ

ปัจจุบันสังคมไทยเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ความต้องการโครงสร้างพื้นฐานและสิ่งอำนวยความสะดวกที่รองรับการใช้งานของผู้สูงอายุและผู้พิการ โดยเฉพาะการเข้าถึงพื้นที่ต่างระดับ มีความสำคัญมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะทางลาด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของอาคารที่ช่วยให้การสัญจรเป็นไปอย่างปลอดภัย เท่าเทียม และลดอุปสรรคในการใช้งาน ทั้งในชีวิตประจำวันและในสถานการณ์ฉุกเฉินหรือภัยพิบัติ เช่น แผ่นดินไหวหรืออัคคีภัย ที่จำเป็นต้องมีการอพยพอย่างรวดเร็วและปลอดภัย ภายใต้เงื่อนไขที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและความสามารถทางกายภาพของผู้ใช้งาน

แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) ได้ถูกนำมาใช้เป็นกรอบแนวคิดสำคัญในการออกแบบสภาพแวดล้อมที่ทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้งานได้อย่างเท่าเทียม โดยทางลาดถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและสะท้อนแนวคิดดังกล่าวได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีข้อกำหนดและมาตรฐานด้านการออกแบบทางลาดที่ชัดเจน ทั้งในด้านความลาดชัน ความกว้าง และการจัดวางชนพัก แต่ในทางปฏิบัติยังพบว่ามีทางลาดจำนวนหนึ่งที่ไม่สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในมิติของเวลาในการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความปลอดภัยและการอพยพของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง รูปแบบทางลาด กับ เวลาในการเคลื่อนที่ เพื่อสร้างองค์ความรู้เชิงเปรียบเทียบที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางประกอบการออกแบบทางลาดได้อย่างเหมาะสม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบรูปแบบทางลาดที่แตกต่างกัน โดยวิเคราะห์ผลกระทบต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ รวมถึงเสนอแนวทางการออกแบบทางลาดที่มีประสิทธิภาพด้านเวลาและสอดคล้องกับหลักการออกแบบเพื่อทุกคนและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง การวิจัยเป็นการวิจัยเชิงทดลองโดยใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านโปรแกรม Pathfinder ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ที่รองรับการจำลองผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์รายบุคคลและรูปแบบทางลาดตามเรขาคณิตจริงได้โดยตรง เหมาะสมกับการวิเคราะห์เวลาในการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง

กลุ่มตัวอย่างของการวิจัยประกอบด้วยแบบจำลองทางลาดจำนวน 81 แบบ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้น 4 ปัจจัย ได้แก่ 1) รูปแบบทางลาด ประกอบด้วย ทางลาดตรง ทางลาดรูปตัว L และทางลาดรูปตัว U 2) การจัดวางชนพัก ได้แก่ ชนพักช่วงต้น ชนพักกึ่งกลาง และชนพักช่วงท้าย 3) ความกว้างของทางลาด 3 ระดับ คือ 1.50, 1.80 และ 2.00 เมตร และ 4) ความลาดชันของทางลาด 3 ระดับ คือ 1:12, 1:13 และ 1:14 โดยกำหนดให้รถเข็นวีลแชร์ที่ใช้ในการ

¹ สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

¹ Department of Architecture, School of Architecture and Fine Art, University of Phayao

ผู้ติดต่อประสานงาน (Corresponding Author) อีเมล: pantapat999@hotmail.com

จำลองเป็นรถเข็นแบบมือหมุนมาตรฐาน และกำหนดค่าความเร็วพื้นราบและตัวคูณความเร็วสำหรับทางลาดลงให้สอดคล้องกันในทุกแบบจำลอง เพื่อควบคุมเงื่อนไขการเปรียบเทียบให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

ทั้งนี้แบบจำลองถูกกำหนดขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ในมิติเชิงเวลาเป็นหลัก โดยโปรแกรม Pathfinder คำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกนศูนย์กลางของทางลาดและชันพักตามรูปแบบเรขาคณิตจริง โดยไม่ใช้การลัดแนวเฉียง และไม่รวมปัจจัยด้านชีวกลศาสตร์ของการควบคุมรถเข็น ผลการจำลองจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้เปรียบเทียบความแตกต่างด้านเวลาระหว่างรูปแบบทางลาดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จากการจำลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา และคำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Efficiency Index: EI) เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเวลาในการเคลื่อนที่ของทางลาดแต่ละรูปแบบ โดยค่า EI ที่เข้าใกล้ 100 แสดงถึงประสิทธิภาพเชิงเวลาที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มเดียวกัน

ผลการวิจัยพบว่ารูปแบบทางลาดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์มากที่สุด โดยทางลาดรูปแบบ L ให้ประสิทธิภาพด้านเวลาสูงสุด มีค่า EI เฉลี่ยเท่ากับ 98.7% รองลงมาคือทางลาดแบบตรง ซึ่งมีค่า EI เฉลี่ย 96.1% และต่ำสุดคือทางลาดรูปแบบ U ที่มีค่า EI เฉลี่ย 91.5% อันเป็นผลมาจากลักษณะการเปลี่ยนทิศทางการกลับตัว 180 องศา ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ขาดความต่อเนื่องและใช้เวลามากขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความลาดชัน พบว่าทางลาดที่มีความลาดชัน 1:12 ใช้เวลาเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความลาดชัน 1:13 และ 1:14 อย่างไรก็ตาม ลำดับประสิทธิภาพระหว่างรูปแบบทางลาดยังคงสอดคล้องกันในทุกระดับความลาดชัน ในด้านความกว้างของทางลาด พบว่าการเพิ่มความกว้างจาก 1.50 เมตร เป็น 2.00 เมตร ส่งผลให้เวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกแบบจำลอง แม้ว่าความกว้างที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งานจริง ส่วนการจัดวางชันพักพบว่าชันพักแบบกึ่งกลางช่วยให้การเคลื่อนที่มีจังหวะที่สมดุลและต่อเนื่องมากที่สุด ในขณะที่ชันพักช่วงท้ายยาวมีแนวโน้มทำให้เวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากระยะทางการเคลื่อนที่ที่ยาวขึ้น

โดยสรุป งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบทางลาดที่มีเส้นทางต่อเนื่อง มุมเอียงเหมาะสม และความลาดชันอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ดีขึ้นภายใต้เงื่อนไขของการจำลอง ทั้งในภาวะปกติและสถานการณ์ที่มีข้อจำกัดด้านเวลา ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับหลักการออกแบบเพื่อทุกคนในมิติของความชัดเจนและการเข้าถึงเชิงพื้นที่ และสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจด้านการออกแบบทางลาดในอาคารสาธารณะ และพื้นที่ที่ต้องรองรับกลุ่มผู้ใช้งานที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การจำลองการเคลื่อนที่ การออกแบบเพื่อทุกคน ทางลาด ผู้สูงอายุ รถเข็นวีลแชร์

Abstract

Currently, as Thailand officially has reached the stage of a completely aged society, there is an urgent need to have infrastructure that truly serve the elderly and disables, particularly when it comes to navigating different floor levels that are essential of buildings in terms of safe, equitable, and barrier-free access for all, so that users with limited physical capacity are able to move independently and with dignity within built environments. Beyond daily convenience, these features become a lifeline during emergency evacuations, such as fires or earthquakes under limitation of the physical mobility, when time constraints and physical stress significantly increase, a well-designed ramp is what makes a rapid and safe escape possible for everyone.

The concept of Universal Design has become a cornerstone in creating environments where everyone, regardless of physical ability, can enjoy equal access, emphasizing usability, safety, and inclusiveness throughout the design process. Among various architectural features, ramps stand out as a clear reflection of this inclusive philosophy. Although there are well-defined standards for slope gradients, widths, and landing placements, many ramps in practice still fail to function effectively in terms of moving—a factor that directly impacts the safety and evacuation efficiency of wheelchair users, particularly under continuous movement and emergency conditions. This research, therefore, focuses on analyzing the relationship between ramp configurations and movement to build a comparative body of knowledge as a practical guide for appropriately designing ramps.

The study aims to examine and compare various ramp configurations, specifically focusing on how they influence the moving wheelchair users. The research also seeks to propose design solutions achieving optimal time efficiency while staying true to Universal Design principles and official standards. The study implements an experimental approach through computer simulation, utilizing Pathfinder. This software was selected for its specialized capability to model individual wheelchair movements and account for complex, real-world ramp geometries. This makes it an ideal tool for accurately analyzing movement durations within a controlled, simulated environment.

The study's sample consists of 81 distinct ramp models, generated through a systematic cross-analysis of four key variables including 1) ramp configuration (straight, L-shaped, and U-shaped), 2) landing placement (at the start, midpoint, and end of the ramp), 3) width (1.50, 1.80, and 2.00 meters), and 4) slope gradient (1:12, 1:13, and 1:14). To ensure the integrity of the comparative analysis, a standard manual wheelchair was used as the baseline for all simulations. Furthermore, specific parameters—namely horizontal speed and downhill speed multipliers—were kept constant across every model. This hard control of variables ensures a standardized environment, allowing for a precise and reliable comparison of how different designs affect movement.

The simulation model is primarily designed to evaluate movement efficiency through a temporal lens. Within the Pathfinder environment, travel paths are calculated based on the central axis of the ramp and landing geometries, strictly following the physical layout without diagonal shortcuts or the inclusion of complex biomechanical factors related to wheelchair handling. Consequently, the simulation results are intended to provide a controlled comparison of time differences across various ramp configurations under identical conditions. The generated data were then analyzed using descriptive statistics and the calculation of an Efficiency Index (EI) to compare the temporal performance of each design. An EI value approaching 100 signifies superior time efficiency relative to other models within the same group, serving as a clear metric for performance evaluation.

The findings revealed that ramp configuration is the most influential factor affecting the movement of wheelchair users. Specifically, L-shaped ramps demonstrated the highest time efficiency with an average EI of 98.7%, followed by straight-run ramps at 96.1%. The U-shaped configuration yielded the lowest efficiency at 91.5%, a result of the 180-degree turns disrupting movement continuity and inherently increase

movement duration. Regarding slope gradients, the 1:12 ratio required the least travel time compared to 1:13 and 1:14; however, the efficiency ranking of the ramp shapes remained consistent across all gradient levels. Interestingly, increasing the ramp width from 1.50 to 2.00 meters led to a slight increase in movement across all models—suggesting that while wider paths enhance comfort and safety in practice, they also extend the movement duration. Finally, mid-point landings were found to provide the most balanced and fluid movement rhythm, whereas end-of-ramp landings tended to increase travel time slightly due to the extended travel distance.

In summary, this research highlights that ramp designs featuring continuous pathways, optimal turning angles, and standard-compliant gradients significantly enhance the travel efficiency of wheelchair users within simulated environments. These benefits remain consistent across both routine usage and time-sensitive scenarios. The findings align closely with Universal Design principles, particularly in terms of spatial clarity and accessibility. Ultimately, this study serves as a robust evidence-based resource to support informed design decisions for public buildings and spaces, ensuring they effectively accommodate a diverse range of users and promote a more inclusive built environment.

Keywords: Mobility simulation, Accessible design, Ramps, Seniors, Wheelchairs

1. ที่มาและความสำคัญ

การออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) มีเป้าหมายสำคัญในการสร้างการเข้าถึงพื้นที่ต่าง ๆ อย่างเท่าเทียม โดยเฉพาะในปัจจุบันที่ประเทศไทยและหลายประเทศทั่วโลกกำลังก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างเต็มรูปแบบ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนประชากรที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง (National Statistical Office, 2021) สถานการณ์ดังกล่าวทำให้ความต้องการด้านโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับการใช้งานของผู้สูงอายุมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากผู้สูงวัยมักเผชิญข้อจำกัดในการเคลื่อนไหว ทั้งในด้านแรงกล้ามเนื้อ การทรงตัว และความเสี่ยงต่อการหกล้ม การออกแบบทางลาดที่ได้มาตรฐานจึงถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยลดอุบัติเหตุและส่งเสริมคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Department of Public Works and Town & Country Planning, 2020) การออกแบบที่คำนึงถึงผู้สูงวัยไม่ได้เป็นเพียงการตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มเปราะบางในสังคมเท่านั้น แต่ยังเป็นการเตรียมความพร้อมเชิงโครงสร้างสำหรับอนาคตที่ประชากรทุกคนมีโอกาเข้าสู่วัยชรา และอาจต้องพึ่งพาสิ่งอำนวยความสะดวกเหล่านี้เช่นกัน (Story, 1998) สำหรับกลุ่มประชากรที่มีข้อจำกัดด้านการเคลื่อนไหว เช่น ผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ ผู้สูงอายุ หรือผู้พิการทางกาย การออกแบบสิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ทางลาด ก็มีบทบาทสำคัญในการสร้างสภาพแวดล้อมที่เป็นธรรมและปลอดภัย โดยลดอุปสรรคและป้องกันการเลือกปฏิบัติ เพื่อให้ทุกคนสามารถใช้ชีวิตประจำวันได้อย่างเท่าเทียม (Center for Universal Design, 1997)

โดยองค์ประกอบหลักที่มีประสิทธิภาพของการออกแบบทางลาด คือ การกำหนดรูปแบบและสัดส่วนของทางลาด ซึ่งประกอบด้วย ความลาดชัน ความยาว รูปร่าง เป็นต้น องค์ประกอบดังกล่าวส่งผลต่อระยะเวลาและความยากง่ายในการใช้งานของรถเข็นวีลแชร์ การใช้ทางลาดที่มีลักษณะไม่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดความลำบาก หรืออันตรายต่อผู้ใช้งานได้ เช่น ทางลาดที่มีความลาดชันเกินไป อาจเพิ่มแรงต้านหรือทำให้เกิดอุบัติเหตุการลื่นล้มได้ ในขณะที่ทางลาดที่ยาวเกินไปอาจทำให้ผู้ใช้เกิดความเหนื่อยล้า (Story, 1998) อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีข้อกำหนดในการออกแบบสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการและผู้สูงอายุ อาทิเช่น มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง ที่กำหนดให้ความชันของทางลาด รวมถึงองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ของทางลาด แต่ในทางปฏิบัติพบว่ายังมีอาคารหลายแห่งที่ไม่สามารถอำนวยความสะดวกได้อย่างแท้จริงและมี

การใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ งบประมาณ หรือความรู้ความเข้าใจของผู้ออกแบบเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง รูปแบบของทางลาด และ ประสิทธิภาพในการใช้งาน โดยเฉพาะการใช้เครื่องมือที่สามารถจำลองการเคลื่อนที่ในสถานการณ์จริง

ซึ่งการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เช่น ซอฟต์แวร์จำลองการเคลื่อนที่ จึงมีความสำคัญ เพราะช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของรูปแบบทางลาดที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ได้อย่างแม่นยำ และเป็นระบบ ซอฟต์แวร์นี้สามารถจำลองการเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความชันและรูปทรงต่าง ๆ และสามารถวิเคราะห์ระยะเวลา ความเร็ว หรือแม้แต่เส้นทางการเคลื่อนที่ได้แบบเสมือนจริง (Thunderhead Engineering, 2023) นอกจากนี้ การใช้ซอฟต์แวร์จำลองยังช่วยลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้สูงอายุหรือผู้พิการ ซึ่งมีข้อจำกัดทางกายภาพและอาจมีความเสี่ยงต่อการหกล้มหรือได้รับบาดเจ็บหากต้องเคลื่อนที่ผ่านทางลาดที่มีความลาดชันหรือโครงสร้างที่ยังไม่ได้รับการทดสอบอย่างเพียงพอ การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเป็นทางเลือกที่มีปลอดภัย ลดข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ และสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ ซึ่งช่วยให้นักวิจัยสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกได้โดยไม่ต้องเสี่ยงต่อสุขภาพหรือความปลอดภัยของกลุ่มเปราะบาง (Kuligowski et al., 2010)

เทคโนโลยีการจำลองจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในกระบวนการออกแบบที่เน้นมนุษย์หรือกลุ่มประชากรวิจัยเป็นศูนย์กลาง โดยการสร้างแบบจำลองของผู้ใช้งานในสถานการณ์ที่หลากหลาย ทั้งในกรณีเร่งด่วน เช่น ภัยพิบัติ หรือสถานการณ์ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ทั้งนี้เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพทั้งด้านเวลา ความปลอดภัย และการใช้งานจริงในบริบทที่แตกต่างกัน (Ronchi & Nilsson, 2013) นอกจากนี้ในบริบทของการจัดการภัยพิบัติหรือสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น การอพยพทางลาดที่ดีไม่เพียงแต่ต้องใช้งานง่ายเท่านั้น แต่ยังสามารถรองรับการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขจำกัดด้วย (Kuligowski et al., 2010) ดังนั้นการศึกษารูปแบบทางลาดที่ส่งผลต่อเวลาในการใช้งานจึงมีความสำคัญทั้งในเชิงวิศวกรรมสถาปัตยกรรมและการจัดการความปลอดภัยในภาพรวม

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยด้านการออกแบบทางลาดสำหรับผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ส่วนใหญ่คำนึงถึงการกำหนดค่ามาตรฐานเชิงกายภาพของทางลาดทั่วไป เช่น ความลาดชัน ความกว้าง และความยาว (Story, 1998) ในขณะที่งานวิจัยที่ใช้การจำลองการเคลื่อนที่จำนวนมากจะให้ความสำคัญในเรื่องการอพยพหรือการเคลื่อนที่ของกลุ่มคนในสถานการณ์ฉุกเฉิน (Ronchi & Nilsson, 2013) ส่งผลให้ยังมียังงานศึกษาจำกัดที่วิเคราะห์ถึงผลของรูปแบบทางลาดต่อระยะเวลาในการใช้งานของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์

จากข้อมูลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการเปรียบเทียบรูปแบบของทางลาดที่แตกต่างกัน โดยใช้การจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์บนทางลาดแต่ละประเภท ผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับหลักการของการออกแบบเพื่อทุกคนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบทางลาดต่าง ๆ โดยจำลองการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านเวลาในการใช้งาน

2.2 เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบทางลาดที่มีประสิทธิภาพในด้านเวลาในการใช้งานและสอดคล้องกับหลักการออกแบบเพื่อทุกคนและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดการวิจัยหรือการศึกษา

การออกแบบทางลาดตามแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) มีเป้าหมายเพื่อให้ผู้ใช้งานทุกกลุ่ม โดยเฉพาะผู้สูงอายุและผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ สามารถเข้าถึงพื้นที่ได้อย่างสะดวกและปลอดภัย โดยรูปแบบของทางลาด เช่น ความชัน ความยาว และลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ ส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาและความสะดวกในการใช้งาน หากออกแบบไม่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุหรือความเหนื่อยล้า ถึงแม้จะมีมาตรฐานการออกแบบทางลาด เช่น กรมโยธาธิการและผังเมือง หรือสภาสถาปนิกเป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติยังพบปัญหาในการใช้งานจริง งานวิจัยจึงมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีการจำลอง การเคลื่อนที่ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในทางลาดแต่ละรูปแบบอย่างเป็นระบบ ช่วยให้เข้าใจผลกระทบของรูปแบบทางลาดต่อการใช้งานจริง โดยเฉพาะในกลุ่มเปราะบาง โดยผลการวิจัยจะนำไปสู่ข้อเสนอแนะในการออกแบบทางลาดที่มีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับหลักการออกแบบเพื่อทุกคน และเหมาะสมกับบริบทของสังคมผู้สูงอายุ

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องการวิจัยหรือการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้แบ่งแนวคิดหลักเกี่ยวข้องการวิจัยที่ช่วยสนับสนุนกรอบการวิเคราะห์และการออกแบบในงานวิจัย ให้ความครอบคลุมเป็น 4 ด้านประกอบด้วย

3.2.1 แนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) ซึ่งเน้นการสร้างสภาพแวดล้อมที่ทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้งานได้อย่างเท่าเทียม โดยแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) มุ่งเน้นการสร้างสิ่งแวดล้อมที่ทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้งานได้โดยไม่ถูกจำกัดจากเพศ วัย หรือสภาพร่างกาย หลักการสำคัญ 7 ประการ ได้แก่ 1) การใช้งานได้อย่างเท่าเทียม 2) ความยืดหยุ่นในการใช้งาน 3) ความเรียบง่ายและเข้าใจได้ง่าย 4) การสื่อสารที่ชัดเจน 5) ความปลอดภัย หากเกิดข้อผิดพลาด 6) การใช้แรงน้อย และ 7) ขนาดพื้นที่ที่เพียงพอ (Center for Universal Design, 1997) แนวคิดนี้มีความสำคัญต่อการจัดการต่อสถานการณ์ที่สังคมส่วนใหญที่กำลังก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ รวมถึงการใช้งานของกลุ่มผู้พิการในรูปแบบต่าง ๆ เนื่องจากทั้งสองกลุ่มดังกล่าวมีข้อจำกัดทางกายภาพที่เพิ่มขึ้นกว่ากลุ่มคนปกติทั่วไป ทำให้ต้องมีการจัดการโครงสร้างพื้นฐานที่ตอบโจทย์ความปลอดภัยและความสะดวกต่อผู้ใช้งาน

3.2.2 หลักการออกแบบทางลาดและข้อมูลพื้นฐานของรถเข็นวีลแชร์ ที่เกี่ยวข้องกับมิติ สัดส่วน และองค์ประกอบทางกายภาพที่ส่งผลต่อความปลอดภัยและความสะดวกในการใช้งาน โดยผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์มักประสบข้อจำกัดหลายด้านเมื่อต้องใช้ทางลาดหรือพื้นที่ต่างระดับ ประการแรกคือ แรงกล้ามเนื้อไม่เพียงพอ โดยเฉพาะผู้สูงอายุที่ไม่สามารถผลักดันรถเข็นบนทางลาดชันได้อย่างต่อเนื่อง (Tolerico et al., 2007) ประเด็นถัดมาคือการควบคุมทิศทางและการทรงตัว หากทางลาดแคบไม่มีราวจับ หรือมีมุมเลี้ยวไม่เหมาะสม ย่อมเสี่ยงต่อการหลุดออกนอกเส้นทาง นอกจากนี้ พื้นผิวและสิ่งแวดล้อม ก็มีผลในกรณีพื้นลื่นหรือไม่เรียบ รถเข็นอาจสะดุดหรือพลิกคว่ำได้ (Cooper et al., 1996) ในขณะเดียวกันการใช้แรงต่อเนื่องบนทางลาดที่ยาวหรือมีความชันมากเกินไปอาจทำให้เกิดความเหนื่อยล้าซึ่งจำเป็นต้องมีพื้นที่พัก (ซานพัก) รองรับ (Story, 1998) อีกทั้งการออกแบบควรคำนึงถึง สิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ราวจับ พื้นผิวกันลื่น และขอบกันตก เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและอีกประการหนึ่งความแตกต่างของ รถเข็นแต่ละประเภท ไม่ว่าจะเป็นแบบรถเข็นแมนนวล (manual wheelchair) หรือไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองชนิดต้องการรูปแบบทางลาดที่เหมาะสมต่างกัน ดังนั้นการออกแบบจึงควรครอบคลุมข้อจำกัดเหล่านี้ เพื่อให้ผู้ใช้ทุกกลุ่มเข้าถึงพื้นที่ได้อย่างปลอดภัยและเท่าเทียม

3.2.3 รูปแบบและมาตรฐานของทางลาด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานที่ช่วยเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการสัญจร โดยเฉพาะสำหรับผู้ใช้รถเข็น ผู้สูงอายุ ผู้พิการ รวมถึงผู้ที่ต้องการความช่วยเหลือในการขึ้น-ลงพื้นที่ต่างระดับ โดยรูปแบบทางลาดที่พบเห็นโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ประเภท ได้แก่ 1) ทางลาดตรง (Straight Ramp) เหมาะกับพื้นที่กว้างหรือไม่มีข้อจำกัดด้านความยาว 2) ทางลาดรูปตัว L (L-Shaped Ramp) เหมาะกับพื้นที่แคบหรือมุมอาคารที่ต้องการเลี้ยว 90 องศา และ 3) ทางลาดรูปตัว U (U-Shaped Ramp) ใช้ในกรณีที่ต้องยกระดับสูงหรือพื้นที่จำกัด

โดยมีมุมเลี้ยว 180 องศาพร้อมพื้นที่พักระหว่างทาง (Chareonwongsak & Thong, 2017) ซึ่งทั้งสามประเภทนี้เป็นรูปแบบทางลาดที่พบได้บ่อยในอาคารสาธารณะและสถานที่ราชการรวมถึงสถานที่ที่มีการใช้งานอื่น ๆ เพื่อให้ผู้ใช้ทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงพื้นที่ได้อย่างเท่าเทียมและมีความปลอดภัย

นอกจากนี้ กฎกระทรวงกำหนดสิ่งอำนวยความสะดวกในอาคาร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2564 ได้ระบุข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับการออกแบบทางลาด เช่น ความชันต้องไม่เกิน 1:12 หากมีความยาวเกิน 6 เมตร ต้องมีชานพักไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร และต้องมีราวจับทั้งสองด้านเมื่อยาวตั้งแต่ 1.80 เมตรขึ้นไป รวมถึงมีราวจับเพิ่มเติมในกรณีที่มีความกว้างเกิน 3 เมตร โดยพื้นผิวต้องไม่ลื่น จุดเชื่อมต่อเรียบไม่มีขอบสะดุด และหากไม่มีผนังกันตกต้องมีขอบยกสูงไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร พร้อมราวกันตกต่อเนื่อง ขนาดความกว้างสุทธิต้องไม่น้อยกว่า 90 เซนติเมตร และสำหรับทางลาดสองทางต้องกว้างอย่างน้อย 1.50 เมตร โดยมาตรการเหล่านี้แสดงถึงถึงความปลอดภัย ความสะดวก และสอดคล้องกับหลักการ Universal Design ที่เน้นการเข้าถึงอย่างเท่าเทียม (Center for Universal Design, 1997; Ministry of Interior, 2021)

3.2.4 แนวคิดด้านการจำลองการเคลื่อนที่และการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม Pathfinder Simulation กับโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่อื่น ๆ โดยใช้เทคโนโลยีเพื่อประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบทางลาดในสถานการณ์จำลอง ซึ่งการใช้โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ในงานวิจัยเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาการเคลื่อนที่ในสถานที่ต่าง ๆ โดยไม่ต้องมีการทดลองกับกลุ่มตัวอย่างบุคคลจริง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นต่อกลุ่มตัวอย่างรวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการทดลอง ซึ่งสามารถจำลองสถานการณ์ที่หลากหลายได้อย่างสมจริงและมีความยืดหยุ่น โดยโปรแกรมจำลองเหล่านี้สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ต่าง ๆ เช่น ทางลาดสำหรับผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ หรือการจัดการฝูงชนในสถานที่ขนาดใหญ่ การเลือกโปรแกรมที่เหมาะสมจะช่วยให้การวิเคราะห์และการออกแบบมีความแม่นยำและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างดียิ่งขึ้น

ในขณะเดียวกันมีโปรแกรมหลายประเภทที่ถูกจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของบุคคลและกลุ่มคนในพื้นที่ต่าง ๆ ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีจุดเด่นที่แตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน เช่น 1) โปรแกรมPathfinder ใช้จำลองการอพยพและทางหนีไฟในอาคาร (Thunderhead Engineering, 2023) 2) โปรแกรม AnyLogic รองรับการจำลองหลายระบบ รวมถึงการเคลื่อนที่ของบุคคล (AnyLogic Company, 2022) 3) โปรแกรม MassMotion เน้นการเคลื่อนที่ของฝูงชนจำนวนมากในพื้นที่ใหญ่ เช่น สนามบินหรือสถานี (Oasys, 2021) 4) โปรแกรม SimWalk ใช้กับพื้นที่สาธารณะและการวางแผนเมือง (SimWalk, 2020) และ 5) โปรแกรม Legion ซึ่งเหมาะกับการจัดการฝูงชนหนาแน่นในระบบขนส่ง (Bentley Systems, 2022) เป็นต้น โดยโปรแกรมเหล่านี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และนำไปสู่การออกแบบพื้นที่ให้ปลอดภัยและรองรับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการเลือกโปรแกรมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานเฉพาะทางนั้นจำเป็นต้องพิจารณาจุดเด่นและข้อจำกัดของแต่ละโปรแกรม

3.2.5 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) เป็นกรอบแนวคิดสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่เอื้อต่อการใช้งานของคนทุกกลุ่ม โดยเฉพาะผู้สูงอายุและผู้พิการ โดย Story (1998) ได้นำเสนอหลักการออกแบบ 7 ประการที่มุ่งเน้นการใช้สอยที่เท่าเทียม ปลอดภัย และสะดวกสบาย ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการออกแบบทางลาดที่ตอบสนองต่อผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ในบริบทของงานวิจัยนี้

Imrie (2012) ได้ชี้ให้เห็นเพิ่มเติมว่า Universal Design ไม่เพียงแต่เป็นการออกแบบเพื่อกลุ่มเปราะบางเท่านั้น แต่ยังเป็นการวางแผนระยะยาวเพื่อสร้างสังคมที่เป็นธรรมและครอบคลุมความหลากหลายของผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ซึ่งช่วยเน้นย้ำถึงความสำคัญของการออกแบบพื้นที่ที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้โดยไม่มีแบ่งแยกการใช้งาน

สำหรับด้านการออกแบบทางลาด Suen et al. (2010) ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพที่ส่งผลต่อความเหนื่อยล้าและความเร็วของผู้ใช้รถเข็น โดยพบว่าความชันและความยาวมีความสัมพันธ์กับความพยายามในการเคลื่อนที่ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการกำหนดมาตรฐานที่ชัดเจนในการออกแบบ เพื่อให้รองรับผู้ใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

ในขณะเดียวกันด้านเทคโนโลยีการจำลองการเคลื่อนที่ Kuligowski et al. (2010) ได้ทำการทบทวนและเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองการอพยพจากอาคาร ซึ่งสามารถใช้ประเมินพฤติกรรมของผู้ใช้งานในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นในพื้นที่ที่มีทางลาด ผลการศึกษาเหล่านี้สอดคล้องกับ Ronchi and Nilsson (2013) ที่แสดงถึงความสำคัญของการออกแบบแบบจำลองซึ่งครอบคลุมความหลากหลายของผู้ใช้งาน โดยเฉพาะในสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น การอพยพจากอาคารสูง เป็นต้น

4. วิธีการวิจัย เครื่องมือวิจัย และระเบียบวิธีวิจัย

4.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านเวลาในการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์บนทางลาดรูปแบบต่าง ๆ

4.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรของการวิจัย ประกอบด้วยรูปแบบทางลาดที่ออกแบบเพื่อการสัญจรของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ในอาคารพักอาศัยและพื้นที่สาธารณะ โดยกลุ่มตัวอย่างของการวิจัย คือ แบบจำลองทางลาดที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Pathfinder ซึ่งจำลองจากข้อมูลทางกายภาพจริง โดยมีจำนวนทั้งหมด 81 แบบจำลอง ที่ได้จากการผสมผสานตัวแปรต้น 4 ปัจจัย ได้แก่

- 1) รูปแบบทางลาด (ตรง / ตัว L / ตัว U)
- 2) การจัดวางขานพัก (ช่วงแรกยาว 6 ม. / กึ่งกลาง / ช่วงหลังยาว 6 เมตร)
- 3) ความกว้างของทางลาด (1.50 / 1.80 / 2.00 เมตร)
- 4) ความลาดชันของทางลาด (1:12 / 1:13 / 1:14)

โดยหน่วยการทดลองแต่ละแบบจำลองทำหน้าที่เป็นตัวแทนของ สภาพการใช้งานจริง ของทางลาดในลักษณะต่าง ๆ เพื่อใช้วิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์

4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

4.3.1 โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

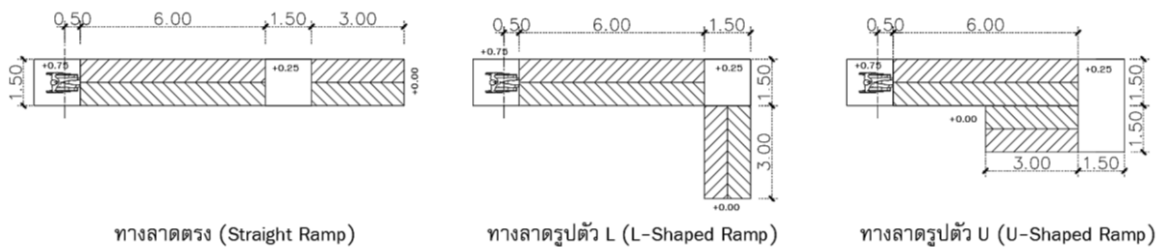
โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในการวิจัยคือ โปรแกรม Pathfinder ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของบุคคล ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล สามารถกำหนดพฤติกรรมของผู้ใช้แต่ละรายได้อย่างละเอียด รองรับการใช้งานผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ และสร้างภาพจำลองสามมิติ เพื่อแสดงการเคลื่อนที่ได้สมจริง ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาโปรแกรมจำลองอื่น ๆ ได้แก่ AnyLogic, MassMotion, SimWalk และ Legion เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสม โดยพบว่า Pathfinder มีศักยภาพสูงที่สุดในการใช้งานที่สอดคล้องกับงานวิจัยโดยมีลักษณะเด่นเมื่อเทียบกับโปรแกรมอื่น ๆ ดังนี้

- 1) จำลองอุปกรณ์เฉพาะ (รถเข็นวีลแชร์) ได้โดยตรง
- 2) สามารถวิเคราะห์เส้นทาง ความเร็ว และเวลาการเคลื่อนที่
- 3) สร้างสภาพแวดล้อมตามมาตรฐานกายภาพของอาคารได้อย่างถูกต้อง
- 4) ใช้งานง่ายและประมวลผลได้รวดเร็ว

4.3.2 การกำหนดรูปแบบและโครงสร้างของแบบจำลอง

แบบจำลองทางลาดที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งจำลองจากข้อมูลทางกายภาพจริง โดยแบบจำลองทางลาดที่สร้างขึ้น โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดกฎหมายและมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น กฎกระทรวงกำหนดสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับคนพิการ (ประเทศไทย), มาตรฐาน ADA (สหรัฐอเมริกา) และแนวทาง WHO รวมถึงพิจารณาแบบบ้านกรณีศึกษาจาก การเคหะแห่งชาติ และกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยสามารถกำหนดลักษณะทางลาดได้ 3 รูปแบบดังนี้

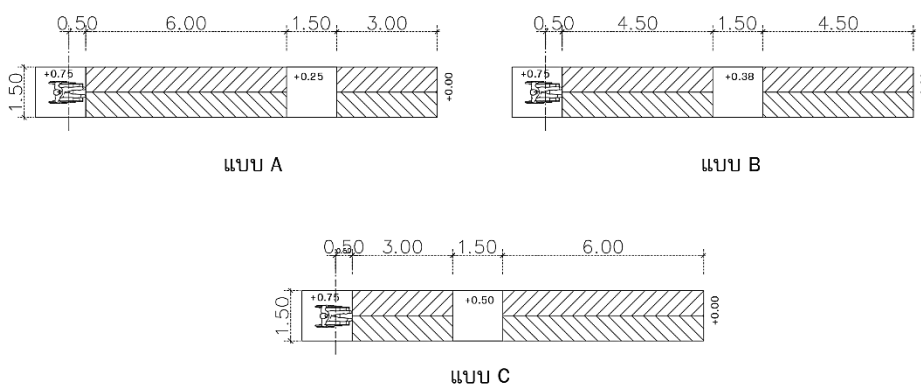
- 1) ทางลาดตรง (Straight Ramp)
- 2) ทางลาดรูปตัว L (L-Shaped Ramp)
- 3) ทางลาดรูปตัว U (U-Shaped Ramp)



รูปที่ 1 ตัวอย่างรูปแบบลักษณะทางลาด

Figure 1 Examples of Ramp Designs and Forms

และจากข้อกำหนดของกฎหมายที่กำหนดความยาวช่วงทางลาดต่อเนื่องไม่เกิน 6 เมตร จึงได้กำหนดการจัดวางชันพักโดยพิจารณาแบ่งเป็น 3 ลักษณะดังนี้ 1) แบบ A ทางลาดยาว 6 เมตร ก่อนถึงชันพัก 2) แบบ B ทางลาดก่อนและหลังชันพักยาวเท่ากันและ 3) แบบ C ทางลาดยาว 6 เมตร หลังชันพัก ดังรายละเอียดแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างรูปแบบลักษณะทางลาดที่พิจารณาจากการจัดวางชันพักในลักษณะต่าง ๆ

Figure 2 Examples of ramp layouts considering various landing arrangements

จากนั้นสร้างแบบจำลองเพิ่มเติมโดยกำหนดความกว้างทางลาด 3 ระดับคือ 1.50, 1.80 และ 2.00 เมตร ซึ่งอ้างอิงจากข้อกำหนดของมาตรฐานที่กำหนดให้ความกว้างทางลาดต้องไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร โดยเพิ่มการเปรียบเทียบขนาดที่กว้างขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงของรถเข็นวีลแชร์ และสร้างแบบจำลองที่ความลาดชัน 3 ระดับคือ 1:12, 1:13 และ 1:14 รวมแบบจำลองทั้งหมดเป็น 81 แบบจำลอง เพื่อให้การอ้างอิงแบบจำลองทั้ง 81 แบบมีความกระชับและอ่านง่าย งานวิจัยนี้ใช้ระบบรหัสแบบจำลองโดยกำหนดโครงสร้างรหัสเป็น รูปแบบ-ชันพัก-ความกว้าง-ลาดชัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 นิยามสัญลักษณ์ของแบบจำลองทางลาด

Table 1 Symbol definitions for ramp simulation models

องค์ประกอบ (Element)	สัญลักษณ์และความหมาย (Symbol and Meaning)
รูปแบบทางลาด Ramp configuration	S = ทางลาดตรง (Straight ramp), L = รูปตัว L (L-shaped ramp), U = รูปตัว U (U-shaped ramp)
ตำแหน่งชานพัก Landing arrangement	A = ช่วงแรกยาว 6 ม. (First section is 6 m long) B = กึ่งกลาง (ยาวเท่ากัน) (Middle landing (equal lengths on both sides) C = ช่วงหลังยาว 6 ม. (Last section is 6 m long)
ความกว้าง (ม.) (Width (m))	15 = 1.50, 18 = 1.80, 20 = 2.00
ความลาดชัน (Slope)	12 = 1:12, 13 = 1:13, 14 = 1:14

ตัวอย่างย่อ: L-C-20-13 = ทางลาดรูปตัว L, ชานพักช่วงหลัง 6 ม., กว้าง 2.00 ม., ลาดชัน 1:13

Abbreviated example: L-C-20-13 = L-shaped ramp, rear landing length 6 m, width 2.00 m, slope 1:13

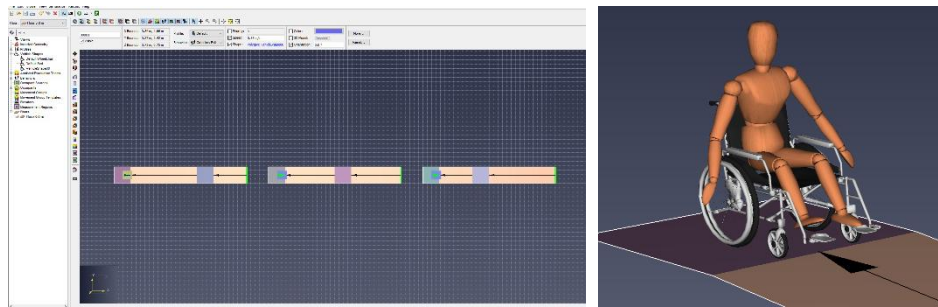
4.3.3 รถเข็นวีลแชร์ที่ใช้ในการจำลอง

ใช้รถเข็นวีลแชร์แบบมือหมุนมาตรฐาน (Standard Manual Wheelchair) อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 7176-5 (2008), ADA (2010) และแนวทางขององค์การอนามัยโลก (WHO, 2008) ซึ่งมีคุณลักษณะโดยสรุปคือ ความกว้าง 65 ซม. ความลึกที่นั่ง 40–45 ซม. ความสูงที่นั่งจากพื้น 45–50 ซม. และล้อหลังขนาด 24 นิ้ว และล้อหน้า 5–8 นิ้ว

การจำลองการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นในโปรแกรม Pathfinder กำหนดความเร็วพื้นราบเท่ากับ 0.55 เมตรต่อวินาที และปรับค่าความเร็วสำหรับทางลาดลงโดยใช้ตัวคูณความเร็ว (Speed Multiplier) เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความเร็วตามองศาความชัน โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Koontz et al. (2005), Van der Woude et al. (2001), and WHO (2008) ซึ่งระบุว่าความเร็วในการลงทางลาดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2–6 จากพื้นราบ จึงกำหนดค่าตัวคูณเท่ากับ 1.02, 1.04 และ 1.06 สำหรับทางลาด 1:14, 1:13 และ 1:12 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเพื่อสรุปความเร็วในแต่ละทางลาดได้ดังนี้ ทางลาด 1:14 ใช้ความเร็ว 0.56 เมตรต่อวินาที ทางลาด 1:13 ใช้ความเร็ว 0.57 เมตรต่อวินาที และทางลาด 1:12 ใช้ความเร็ว 0.58 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้ค่าดังกล่าวเป็นค่าประมาณเชิงเปรียบเทียบเพื่อใช้ควบคุมเงื่อนไขการจำลองให้สอดคล้องกันในทุกแบบจำลอง

เพื่อกำหนดขอบเขตของการศึกษาอย่างชัดเจน แบบจำลองในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ในมิติเชิงเวลาเป็นหลัก ภายใต้เงื่อนไขทางกายภาพของทางลาดที่ควบคุมตัวแปรไว้ตามแบบจำลอง โดยโปรแกรม Pathfinder คำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์ตามแนวแกนศูนย์กลางของพื้นที่ทางลาดและชานพักที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง ถูกคำนวณตามรูปแบบเรขาคณิตของพื้นที่จริง โดยไม่ใช้การลัดแนวเฉียง (diagonal shortcut) และไม่ลดระยะทางจากลักษณะเรขาคณิตของทางลาด

ทั้งนี้ แบบจำลองดังกล่าวไม่ได้รวมปัจจัยด้านชีวกลศาสตร์บางประการที่มีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่จริงของผู้ใช้รถเข็น ได้แก่ 1) การใช้แรงเบรกระหว่างการเลี้ยวหรือการชะลอความเร็ว และ 2) การหมุนล้อแบบไม่สมมาตร ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเปลี่ยนทิศทาง โดยเฉพาะกรณีการเลี้ยว 90 องศา ดังนั้น ผลการจำลองจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้เปรียบเทียบ ความแตกต่างด้านเวลา ระหว่างรูปแบบทางลาดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน มากกว่าการแทนค่าพฤติกรรมควบคุมรถเข็นจริงในทุกสถานการณ์การใช้งาน



รูปที่ 3 ตัวอย่างการตั้งค่ารถเข็นวีลแชร์ (Vehicle Shape) ในโปรแกรม Pathfinder

Figure 3 Wheelchair Configuration (Vehicle Shape) in Pathfinder Program

4.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

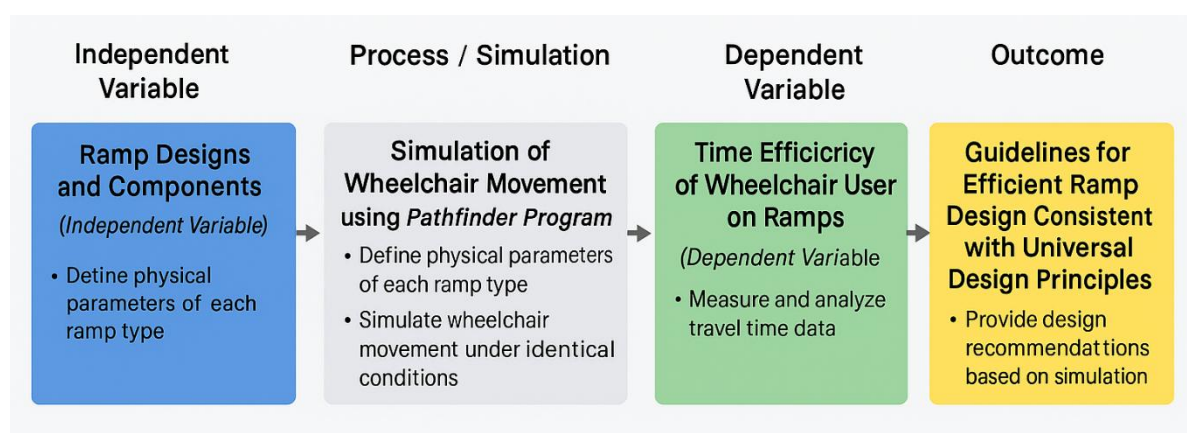
การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Pathfinder เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์จากแบบจำลองทางลาดทั้งหมด 81 รูปแบบ ภายใต้เงื่อนไขของตัวแปรที่กำหนด ได้แก่ รูปแบบทางลาด การจัดวางขาพับ ความกว้าง และความลาดชัน โดยกำหนดให้เป็นรถเข็นวีลแชร์แบบมาตรฐาน ตั้งค่าความเร็วเฉลี่ยตามความลาดชันของทางลาดดังมีรายละเอียดที่แสดงไว้ในข้างต้น การจำลองแต่ละแบบจะบันทึกข้อมูลระยะเวลาในการเคลื่อนที่ตั้งแต่จุดเริ่มต้นถึงจุดสิ้นสุดของทางลาด ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลและวิเคราะห์ทางสถิติในขั้นตอนต่อไป

4.5 การประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถเข็นวีลแชร์ในแต่ละแบบจำลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงพรรณนา โดยใช้ค่าเวลาจำลองเฉลี่ยเป็นตัวแทนในการประเมินแนวโน้มของการเคลื่อนที่ภายใต้ปัจจัยหลักที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปแบบทางลาด ความลาดชัน ความกว้าง และการวางขาพับ จากนั้นได้คำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Efficiency Index: EI) เพื่อใช้เปรียบเทียบเชิงปริมาณของประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ในแต่ละเงื่อนไขการออกแบบ

4.6 กรอบแนวคิดในการวิจัย

กรอบแนวคิดในการวิจัย มีขั้นตอน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

Figure 4 Conceptual Framework.

5. ผลการวิจัยหรือการศึกษา

ผลการวิจัยในการศึกษานี้คำนึงถึงการประเมินประสิทธิภาพเวลาของการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์บนทางลาดที่มีลักษณะแตกต่างกัน ประกอบด้วยด้านรูปแบบ (S, L และ U) ตำแหน่งขาพับ (A, B และ C) ความกว้าง (1.50, 1.80 และ 2.00 เมตร) และความลาดชัน (1:12, 1:13 และ 1:14) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความชัดเจนและเปรียบเทียบได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลวิจัยในรูปแบบของ ดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Efficiency Index: EI) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของเวลาน้อยที่สุดในกลุ่มเดียวกันต่อเวลาของแบบจำลองนั้น ๆ โดยมีดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) คำนวณจากสมการดังนี้

$$EI = (T_{min} / T_i) \times 100$$

โดยที่ T_i คือเวลาการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง และ T_{min} คือเวลาน้อยที่สุดในกลุ่มเดียวกัน โดยค่า EI มากใกล้ 100 แสดงถึงประสิทธิภาพสูง

ในการวิเคราะห์ผลการจำลอง ได้จัดกลุ่มผลการวิจัยตามความสัมพันธ์ของตัวแปรหลักที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพเชิงเวลา ได้แก่

- 1) รูปแบบทางลาด เพื่อเปรียบเทียบเส้นทางและทิศทางการเคลื่อนที่ภายใต้ความชันเดียวกัน
- 2) ความลาดชันของทางลาด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมลาดกับประสิทธิภาพ
- 3) ความกว้างของทางลาด เพื่อประเมินผลกระทบเชิงกายภาพต่อการเคลื่อนที่
- 4) การวางขาพับ เพื่อวิเคราะห์ผลต่อความต่อเนื่องของการเคลื่อนที่
- 5) การวิเคราะห์เชิงรวม (รูปแบบ $\times$ ความชัน) เพื่อระบุแนวโน้มภาพรวมและลำดับความเหมาะสมของแบบจำลอง

การจัดกลุ่มผลการวิจัยตามแนวทางดังกล่าวมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การวิเคราะห์สามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อเวลาเคลื่อนที่ได้อย่างชัดเจน ผลการจำลองเบื้องต้นได้ถูกสรุปในรูปแบบของเวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงค่าทางสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อให้เห็นแนวโน้มพื้นฐานของแต่ละรูปแบบทางลาด ผลดังกล่าวยังใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการคำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Efficiency Index: EI) ในการวิเคราะห์ส่วนต่อไป

ตารางที่ 2 แสดงค่าเวลาเฉลี่ยและค่าทางสถิติพื้นฐานของการเคลื่อนที่สำหรับทางลาดทั้งสามรูปแบบหลัก

Table 2 Average travel time and basic statistical values of wheelchair user movement on each ramp configuration

รูปแบบทาง ลาด Ramp Configuration	เวลาต่ำสุด (วินาที) Minimum Time (s)	เวลาสูงสุด (วินาที) Maximum Time (s)	เวลาเฉลี่ย (วินาที) Average Time (s)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน มาตรฐาน Deviation (S.D.)	จำนวน แบบจำลอง Number of Models (n)	ระดับประสิทธิภาพ โดยรวม Overall Efficiency Level
รูปแบบ L (L-type)	18.80	19.23	19.00	0.17	27	สูงที่สุด Highest
รูปแบบ S S-type	19.57	22.93	19.60	0.25	27	ปานกลาง Moderate
รูปแบบ U U-type	20.85	23.95	20.80	0.31	27	ต่ำที่สุด Lowest

จากผลการจำลองจำนวนทั้งหมด 81 แบบจำลอง พบว่าเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์อยู่ในช่วง 18.80–23.95 วินาที โดยมีค่าความแปรผันเฉลี่ย (S.D.) อยู่ในช่วง 0.17–0.31 วินาที ซึ่งทางลาดรูปแบบ L มีค่าเฉลี่ยเวลาน้อยที่สุด (19.00 วินาที) และมีส่วนเบี่ยงเบนน้อยที่สุด แสดงถึงความต่อเนื่องของเส้นทางและความราบรื่นของการเปลี่ยนทิศทาง ส่วนรูปแบบ U ใช้เวลามากที่สุด (เฉลี่ย 20.80 วินาที) และมีค่าความแปรผันสูงกว่า ในขณะที่รูปแบบ S อยู่ในระดับปานกลาง โดยใช้เวลามากกว่าแบบ L เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI, %) จำแนกตามรูปแบบทางลาดความลาดชัน 1:12

Table 3 Relative Efficiency Index (EI, %) of simulated ramp configurations at a slope ratio of 1:12

แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)
S-A-15-12	95.9	L-A-15-12	100.0	U-A-15-12	90.0
S-B-15-12	95.9	L-B-15-12	99.9	U-B-15-12	90.2
S-C-15-12	95.9	L-C-15-12	99.9	U-C-15-12	89.8
S-A-18-12	95.9	L-A-18-12	98.6	U-A-18-12	89.0
S-B-18-12	95.9	L-B-18-12	98.6	U-B-18-12	89.0
S-C-18-12	95.9	L-C-18-12	98.6	U-C-18-12	88.8
S-A-20-12	95.9	L-A-20-12	97.7	U-A-20-12	88.3
S-B-20-12	95.9	L-B-20-12	97.7	U-B-20-12	88.3
S-C-20-12	95.9	L-C-20-12	97.7	U-C-20-12	87.8

จากข้อมูลในตารางพบว่าค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) ของแบบจำลองทางลาดที่มีความลาดชัน 1:12 พบว่าแบบจำลองในกลุ่มรูปตัว L มีค่า EI อยู่ใกล้ 100% ในทุกกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่สูงสุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองในกลุ่มนี้มีความแตกต่างระหว่างกันเพียงเล็กน้อยในช่วงประมาณ 97.7–100.0% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของข้อมูลจำลองในกลุ่มดังกล่าว

ในขณะที่แบบจำลองรูปตัว U มีค่า EI ต่ำที่สุดในทุกกรณี โดยมีค่าดัชนีเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 87.8–90.2% แสดงให้เห็นถึงระดับประสิทธิภาพที่ต่ำกว่ากลุ่มอื่น ส่วนแบบจำลอง รูปแบบ S มีค่า EI อยู่ในระดับปานกลางในช่วงประมาณ 95.9% ซึ่งมีความคงที่มากกว่ารูปแบบ U เล็กน้อย ทั้งนี้ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นแนวโน้มทั่วไปว่า รูปแบบทางลาดรูปแบบ L ให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ดีกว่ารูปแบบอื่นภายใต้เงื่อนไขความลาดชัน 1:12

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI, %) จำแนกตามรูปแบบทางลาดความลาดชัน 1:13

Table 4 Relative Efficiency Index (EI, %) of simulated ramp configurations at a slope ratio of 1:13

แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)
S-A-15-13	96.1	L-A-15-13	100.0	U-A-15-13	93.7
S-B-15-13	96.1	L-B-15-13	99.9	U-B-15-13	93.6
S-C-15-13	96.1	L-C-15-13	99.6	U-C-15-13	93.3
S-A-18-13	96.1	L-A-18-13	98.7	U-A-18-13	92.0

แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)
S-B-18-13	96.1	L-B-18-13	98.7	U-B-18-13	92.1
S-C-18-13	96.1	L-C-18-13	98.3	U-C-18-13	91.9
S-A-20-13	96.1	L-A-20-13	97.8	U-A-20-13	91.6
S-B-20-13	96.1	L-B-20-13	97.9	U-B-20-13	91.8
S-C-20-13	96.1	L-C-20-13	97.7	U-C-20-13	91.7

ผลการศึกษาคำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) ของแบบจำลองทางลาดที่มีความลาดชัน 1:13 พบว่าแบบจำลองในกลุ่มรูปตัว L ยังคงมีค่า EI อยู่ใกล้ 100% ในทุกกรณี โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 97.7–100.0% แสดงถึงความคงที่ของประสิทธิภาพและแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับผลของความลาดชัน 1:12 ซึ่งแสดงถึงความมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่สูงเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

ส่วนแบบจำลองรูปแบบ S มีค่า EI คงที่ในทุกกรณีที่มีประมาณ 96.1% โดยอยู่ในระดับปานกลางและมีความสม่ำเสมอสูงของผลการจำลอง ในขณะที่แบบจำลองรูปแบบ U มีค่า EI ต่ำที่สุดในทุกแบบจำลอง โดยมีค่าดัชนีอยู่ในช่วงประมาณ 91.6–93.7% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองอื่นในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับความลาดชัน 1:12 ผลดังกล่าวแสดงแนวโน้มทั่วไปได้ว่า เมื่อความลาดชันลดลง (จาก 1:12 เป็น 1:13) ลักษณะความแตกต่างของค่าดัชนีระหว่างรูปแบบต่าง ๆ ยังคงสอดคล้องกัน โดยแบบจำลองรูปแบบ L ยังคงให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดในทุกขนาดความกว้างและตำแหน่งขานพัก

ตารางที่ 5 ค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI, %) จำแนกตามรูปแบบทางลาดความลาดชัน 1:14

Table 5 Relative Efficiency Index (EI, %) of simulated ramp configurations at a slope ratio of 1:14

แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)
S-A-15-14	96.0	L-A-15-14	100.0	U-A-15-14	93.2
S-B-15-14	95.9	L-B-15-14	99.8	U-B-15-14	93.4
S-C-15-14	96.0	L-C-15-14	99.9	U-C-15-14	93.4
S-A-18-14	96.0	L-A-18-14	98.8	U-A-18-14	92.0
S-B-18-14	95.9	L-B-18-14	98.7	U-B-18-14	92.1
S-C-18-14	96.0	L-C-18-14	98.8	U-C-18-14	92.1
S-A-20-14	96.0	L-A-20-14	97.9	U-A-20-14	92.1
S-B-20-14	95.9	L-B-20-14	97.7	U-B-20-14	92.3
S-C-20-14	96.0	L-C-20-14	97.9	U-C-20-14	92.3

จากข้อมูลในตารางพบว่าค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) ของแบบจำลองทางลาดภายใต้ความลาดชัน 1:14 พบว่าแบบจำลองในกลุ่มรูปตัว L ยังคงมีค่า EI สูงที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น โดยมีค่าดัชนีอยู่ในช่วงประมาณ 97.7–100.0% ซึ่งแสดงถึงความคงที่ของประสิทธิภาพในเวลาในการเคลื่อนที่และแนวโน้มที่ต่อเนื่องจากผลของความลาดชัน 1:12 และ 1:13 ทั้งนี้ค่าที่ได้จากแบบจำลองในกลุ่มนี้มีความแตกต่างระหว่างกันเพียงเล็กน้อย

ส่วนแบบจำลองรูปแบบ S มีค่า EI อยู่ในระดับปานกลางประมาณ 95.9–96.0% โดยมีค่าคงที่ในทุกแบบจำลองของความกว้างและการวางขนานพัก ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสถียรของผลการจำลองในกลุ่มนี้ ขณะที่แบบจำลองรูปแบบ U มีค่า EI ต่ำที่สุด โดยอยู่ในช่วงประมาณ 88.8–89.0% ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลของความลาดชันระดับอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่ารูปแบบทางลาดรูปแบบ U ให้ค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบอื่น แม้ในกรณีที่มีความลาดชันน้อยลง

ตารางที่ 6 ค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI, %) จำแนกตามรูปแบบการวางขนานพักของทางลาด (ที่ความลาดชัน 1:12)

Table 6 Relative Efficiency Index (EI, %) of ramp configurations classified by landing arrangement at slope ratio 1:12

รูปแบบทางลาด Ramp Configuration	ตำแหน่งขนานพัก Landing arrangement	แบบจำลองทางลาด Ramp Model Code	EI (%)
รูปแบบ S (S-type)	A (ช่วงแรกลาย 6 ม.) A (first landing 6 m.)	S-A-18-12	95.9
รูปแบบ S (S-type)	B (กึ่งกลางยาวเท่ากัน B (center landing)	S-B-18-12	95.9
รูปแบบ S (S-type)	C (ช่วงหลังยาว 6 ม.) C (rear landing 6 m.)	S-C-18-12	95.9
รูปแบบ L (L-type)	A (ช่วงแรกลาย 6 ม.) A (first landing 6 m.)	L-A-18-12	98.6
รูปแบบ L (L-type)	B (กึ่งกลางยาวเท่ากัน B (center landing)	L-B-18-12	98.6
รูปแบบ L (L-type)	C (ช่วงหลังยาว 6 ม.) C (rear landing 6 m.)	L-C-18-12	98.6
รูปแบบ U (U-type)	A (ช่วงแรกลาย 6 ม.) A (first landing 6 m.)	U-A-18-12	89.0
รูปแบบ U (U-type)	B (กึ่งกลางยาวเท่ากัน B (center landing)	U-B-18-12	89.0
รูปแบบ U (U-type)	C (ช่วงหลังยาว 6 ม.) C (rear landing 6 m.)	U-C-18-12	88.8

จากข้อมูลพบว่าค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) จำแนกตามลักษณะการวางขนานพัก แบบจำลองรูปแบบ L ให้ค่า EI สูงสุดในทุกตำแหน่งขนานพัก อยู่ที่ประมาณ 98.6% แสดงถึงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ที่ราบรื่นและต่อเนื่องโดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งการพักตัวของผู้ใช้ ในขณะที่แบบจำลองรูปแบบ S มีค่า EI อยู่ในระดับคงที่ประมาณ 95.9% และ แบบจำลองรูปแบบ U ต่ำสุดในช่วง 88.8–89.0% ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของทางลาดแต่ละรูปแบบ

เมื่อพิจารณาความลาดชันอื่น ๆ (1:13 และ 1:14) พบว่าแนวโน้มของค่าดัชนียังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยรูปแบบ L ยังคงให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือรูปแบบ S และ U ตามลำดับ ทั้งนี้แบบจำลองที่มีขนานพักช่วงหลังยาว 6 เมตร (C-type) พบว่ามีค่าเวลาเคลื่อนที่สูงกว่าแบบ A และ B เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางลาดที่มีระยะช่วงสุดท้ายยาวกว่า ทำให้การเคลื่อนที่ต่อเนื่องยาวขึ้นก่อนสิ้นสุดการจำลอง โดยภาพรวมแสดงให้เห็นว่าการวางขนานพักมีอิทธิพลต่อจังหวะและความต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ มากกว่าต่อค่าประสิทธิภาพเชิงเวลาโดยตรงแตกต่างกัน แต่ลักษณะการเคลื่อนไหวมักมีความสม่ำเสมอและให้ความรู้สึกเชื่อมต่อนระหว่างช่วงทางลาดดีกว่าแบบ A และ C ซึ่งมีการเปลี่ยนระดับหรือ

จังหวะเคลื่อนไหวชัดเจนกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาความลาดชันอื่น ได้แก่ 1:13 และ 1:14 พบว่าแนวโน้มของค่าดัชนียังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยรูปแบบ L ยังคงมีค่า EI สูงที่สุด รองลงมาคือรูปแบบ S และ U ตามลำดับ และไม่พบความแตกต่างของผลในแต่ละตำแหน่งขานพักอย่างชัดเจน

ตารางที่ 7 ค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI, %) จำแนกตามความกว้างของทางลาด

Table 7 Representative Efficiency Index (EI, %) by Ramp Width (across slope levels)

ความกว้างทางลาด (ม.) Ramp Width (m.)	ความลาดชัน Slope	EI (รูปแบบ S) EI (S-type)	EI (รูปแบบ L) EI (L-type)	EI (รูปแบบ U) EI (U-type)
1.50	1:12	95.9	100.0	90.0
1.50	1:13	96.1	99.8	93.5
1.50	1:14	96.0	99.9	93.4
1.80	1:12	95.9	98.6	89.0
1.80	1:13	96.1	98.6	92.0
1.80	1:14	96.0	98.8	92.0
2.00	1:12	95.9	97.8	88.3
2.00	1:13	96.1	97.8	91.7
2.00	1:14	96.0	97.9	92.1

จากตารางข้างต้นแสดงค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) ซึ่งเป็นตัวอย่างแนวโน้มจากผลการจำลองในความลาดชันต่าง ๆ ซึ่งพบว่าเมื่อมีความกว้างเพิ่มจาก 1.50 เมตร เป็น 2.00 เมตร ค่า EI มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในทุกแบบจำลอง ทั้งในรูปแบบ S รูปแบบ L และรูปแบบ U ซึ่งสอดคล้องกันในทุกค่าความลาดชัน รูปแบบ L ให้ค่า EI สูงที่สุดในทุกระดับความกว้าง โดยลดลงจากประมาณ 100% เหลือ 97–98% เมื่อความกว้างเพิ่มจาก 1.50 เป็น 2.00 เมตร ส่วนรูปแบบ S มีค่าคงที่ 96% ขณะที่รูปแบบ U มีค่าต่ำสุดและลดลงต่อเนื่องตามความกว้าง แนวโน้มดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า แม้การเพิ่มความกว้างอาจจะช่วยให้ผู้ใช้งานมีระยะเคลื่อนที่กว้างขึ้นและสะดวกในการสวนทาง แต่ในทางกลับอาจทำให้การควบคุมทิศทางใช้เวลามากขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ลดลงในภาพเชิงเวลาของการทดลองโดยรวม

ตารางที่ 8 ค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI, %) จำแนกตามรูปแบบทางลาด (ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของแบบจำลองทั้งหมดในแต่ละรูปแบบ)

Table 8 Average Efficiency Index (EI, %) by Ramp Configuration (Values represent the mean EI of all simulation models within each configuration type)

รูปแบบทางลาด Ramp Configuration	EI (%)	รหัสแบบจำลองตัวแทน (ใช้เป็นตัวอย่างเพื่อการอ้างอิงเท่านั้น) Representative Model Codes (for reference only)
รูปแบบ L (L-type)	98.7	L-A-15-13, L-B-18-13, L-C-20-14
รูปแบบ S (S-type)	96.1	S-A-15-13, S-B-18-13, S-C-20-14
รูปแบบ U (U-type)	91.5	U-A-15-13, U-B-18-13, U-C-20-14

ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยจากแบบจำลองทั้งหมดพบว่า รูปแบบทางลาดรูปแบบ L มีค่าดัชนีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (EI) สูงที่สุดที่ 98.7% ซึ่งสะท้อนถึงความต่อเนื่องของการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนทิศทางที่ราบรื่น ในขณะที่รูปแบบ S มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 96.1% แสดงถึงระดับประสิทธิภาพปานกลางและคงที่ ส่วนรูปแบบทางลาดรูปแบบ U มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 91.5% เนื่องจากต้องเลี้ยวกลับ 180 องศาสองครั้งในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ ซึ่งส่งผลให้เวลาเพิ่มขึ้นและลดความต่อเนื่องของการเคลื่อนที่โดยรวม

6. การอภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ

6.1 อภิปรายผล

ผลการวิจัยพบว่ารูปแบบทางลาดมีอิทธิพลต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์มากที่สุด โดยทางลาดรูปแบบ L ให้ประสิทธิภาพด้านเวลาสูงสุด มีการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องและราบรื่น รองลงมาคือทางลาดรูปแบบ S และต่ำสุดคือทางลาดรูปแบบ U ผลการศึกษานี้สามารถอธิบายได้ภายใต้กรอบแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) ในมิติของความชัดเจนและความเข้าใจง่ายของโครงสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ (Center for Universal Design, 1997; Story, 1998) โดยทางลาดรูปแบบ L มีจุดเปลี่ยนทิศทางที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนเพียงครั้งเดียวบนชันพัก ส่งผลให้การเคลื่อนที่ในรูปแบบจำลองมีความต่อเนื่องในเชิงเวลาเมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขการคำนวณเดียวกัน ทั้งนี้การเชื่อมโยงกับแนวคิด Universal Design ในงานวิจัยนี้มุ่งพิจารณาเฉพาะมิติของความชัดเจนของโครงสร้างเส้นทางและการรับรู้เชิงพื้นที่ (Simple and Intuitive Use) ภายใต้กรอบการจำลองเชิงเวลา โดยผลที่ได้สะท้อนลักษณะของเส้นทางการเคลื่อนที่ตามแบบจำลองเป็นหลัก และไม่ครอบคลุมประเด็นด้านความง่ายหรือภาระในการใช้งานจริงในทุกมิติ

ในขณะเดียวกันผลการวิจัยยังสอดคล้องกับแนวคิดของ Imrie (2012) ที่พบว่า Universal Design ไม่ได้จำกัดเฉพาะการออกแบบเพื่อผู้พิการเท่านั้น แต่เป็นการสร้างสภาพแวดล้อมที่ทุกคนสามารถเข้าถึงและใช้งานได้เท่าเทียม โดยผลที่พบดังกล่าวนี้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทางลาดรูปแบบ L มีค่าดัชนีประสิทธิภาพสูงและมีความสม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ จึงเป็นการยืนยันแนวคิดการออกแบบเพื่อความเท่าเทียมในเชิงพื้นที่และการใช้งานจริง นอกจากนี้ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ Pantapat Boonma (2024) ซึ่งได้จำลองการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นในทางลาดรูปแบบต่าง ๆ และพบว่าทางลาดรูปแบบ L (หักมุม 90°) ใช้เวลาน้อยที่สุด ขณะที่ทางลาดรูปแบบ U (กลับตัว 180°) ใช้เวลามากที่สุด โดยงานวิจัยชี้ให้เห็นแนวโน้มเดียวกันว่า การเปลี่ยนทิศทางที่สมดุลและต่อเนื่องช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลา โดยเฉพาะชันพักแบบกึ่งกลางที่ให้จังหวะการเคลื่อนที่ราบรื่นกว่าการวางรูปแบบชันพักในตำแหน่งอื่น

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพด้านเวลาที่สูงกว่าของทางลาดรูปแบบ L สามารถอธิบายได้จากลักษณะการเปลี่ยนทิศทางที่ชัดเจนและไม่ซับซ้อน ซึ่งช่วยลดการชะลอความเร็วที่เกิดจากการควบคุมรถเข็นในช่วงเลี้ยวหรือการกลับตัว เมื่อเทียบกับทางลาดรูปแบบ U ที่ต้องอาศัยการเปลี่ยนทิศทางในมุมกว้างมากกว่า ส่งผลให้ผู้ใช้งานต้องใช้เวลามากขึ้นในการจัดแนวการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มความกว้างของทางลาดยังช่วยให้ผู้ใช้สามารถควบคุมทิศทางของการเคลื่อนที่ได้ ลดความจำเป็นในการปรับตำแหน่งรถเข็นซ้ำ ส่งผลทำให้การเคลื่อนที่มีความต่อเนื่อง ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดในบทบทวนวรรณกรรมที่ระบุว่ารูปแบบทางลาดควรเอื้อต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ ลดความเหนื่อยล้าจากการใช้แรงต่อเนื่อง และเพิ่มความมั่นคงในการใช้งานของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพด้านเวลาไม่ได้ขึ้นอยู่กับความลาดชันเพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมในการควบคุมรถเข็นและรูปแบบการเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน

ในกรอบของแบบจำลองนี้ ความแตกต่างด้านเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างรูปแบบทางลาดสะท้อนผลของลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการเปลี่ยนทิศทางของเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยทางลาดรูปแบบ L ให้ประสิทธิภาพด้านเวลาสูงสุด เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางเพียงครั้งเดียวในมุม 90 องศาบนชันพักที่มีขนาดเพียงพอ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่มีความต่อเนื่องและลดการปรับแนวซ้ำ ในขณะที่ทางลาดรูปแบบ S แม้ไม่มีการเลี้ยว แต่มีระยะการเคลื่อนที่ต่อเนื่องยาวกว่า จึงทำให้เวลา

โดยรวมสูงกว่าเล็กน้อย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งผลลัพธ์ที่พบไม่ได้หมายความว่าถึงการเลี้ยวส่งผลทำให้เร็วขึ้น แต่สะท้อนว่าโครงสร้างเส้นทางที่สั้นและแบ่งช่วงอย่างเหมาะสม สามารถลดเวลาในการเคลื่อนที่รวมได้มากกว่าเส้นทางตรงที่ยาวต่อเนื่อง ส่วนทางลาดรูปแบบ U ต้องมีการเปลี่ยนทิศทาง 180 องศา ส่งผลให้เกิดการจัดแนวการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นและใช้เวลามากที่สุด

ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลการจำลองเชิงเวลาควบคู่กับข้อมูลด้านชีวกลศาสตร์ของการใช้งานรถเข็นวีลแชร์ พบว่าการเปลี่ยนทิศทางในมุม 90 องศาเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากกว่าการเคลื่อนที่ในแนวตรง งานศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเลี้ยวรถเข็นวีลแชร์ต้องอาศัยการควบคุมการหมุนล้อแบบไม่สมมาตร การใช้แรงเบรกของแขนด้านใน และการชะลอความเร็วก่อนเข้าโค้ง ซึ่งส่งผลให้เกิดภาระทางกายและความต้องการด้านแรงกล้ามเนื้อที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในแนวตรง (Chaikhot et al., 2023) ปัจจัยดังกล่าวเป็นกลไกสำคัญของการเคลื่อนที่จริงที่อาจส่งผลต่อทั้งเวลา ความเหนื่อยล้า และความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของระบบแขนส่วนบน

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยด้านชีวกลศาสตร์ดังกล่าวไม่ได้ถูกรวมอยู่ในแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ ซึ่งมุ่งประเมินประสิทธิภาพในมิติเชิงเวลา ภายใต้เงื่อนไขทางกายภาพของทางลาดที่ควบคุมตัวแปรไปตามแบบจำลอง ผลลัพธ์ที่ได้จึงสะท้อนความแตกต่างด้านเวลาที่เกิดจากรูปแบบเรขาคณิตของเส้นทางและลักษณะการเปลี่ยนทิศทางของทางลาดเป็นหลัก มากกว่าการแทนกลไกการควบคุมรถเข็นและภาระทางกายที่เกิดขึ้นจริงในทุกสถานการณ์การใช้งาน

โดยผลการวิจัยนี้ยังผลการวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bertocci et al. (2019) ซึ่งระบุว่าความชันของทางลาดมีผลต่อระดับความพยายามและลักษณะการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ รวมถึงแนวคิดของ Kuligowski et al. (2010), and Ronchi and Nilsson (2013) ที่ชี้ให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองจำลอง (simulation) สามารถประเมินพฤติกรรมของผู้ใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดด้านการใช้เทคโนโลยีการจำลองการเคลื่อนที่ในการทบทวนวรรณกรรม ที่ให้ความสำคัญในการใช้แบบจำลองเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลของลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ต่อการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้ ดังนั้นการใช้แบบจำลองในงานวิจัยนี้จึงช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของผู้ใช้วีลแชร์ได้อย่างเป็นระบบและมีความน่าเชื่อถือ

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการกำหนดค่าความเร็วและตัวคุณความเร็วของรถเข็นวีลแชร์ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจากงานวิจัยและแนวทางที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าตัวแทนเชิงเฉลี่ย และอาจไม่สามารถสะท้อนความแตกต่างของพฤติกรรมเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นแต่ละกลุ่มได้อย่างครบถ้วน เช่น ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ ประสบการณ์ในการใช้งาน หรือทักษะในการควบคุมทิศทางรถเข็น นอกจากนี้ แบบจำลองยังไม่ได้คำนึงถึงผลของความเมื่อยล้าสะสมหรือการหยุดพักระหว่างการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในการใช้งานจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของรูปแบบทางลาดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งมีขอบเขตจำกัดในการสะท้อนพฤติกรรมการใช้งานจริงของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์

ในขณะเดียวกันผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทของอาคารสาธารณะ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความถี่และมีความหลากหลายในการใช้งาน รูปแบบทางลาดที่ช่วยให้การเคลื่อนที่มีความต่อเนื่องและใช้เวลาน้อยสามารถเอื้อต่อการเข้าถึงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคนที่มุ่งลดความซับซ้อนในการใช้งานและลดภาระทางกายของผู้ใช้ (Story, 1998) นอกจากนี้ในบริบทของสถานการณ์อพยพฉุกเฉิน ทางลาดที่มีรูปแบบชัดเจนและไม่ซับซ้อนอาจช่วยลดความสับสนในการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ส่งผลให้การเคลื่อนที่มีความปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขที่มีข้อจำกัดด้านเวลา อย่างไรก็ตามการเลือกใช้รูปแบบทางลาดไม่ควรพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพด้านเวลาเพียงอย่างเดียว แต่ควรคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานร่วมด้วย เนื่องจากอาจไม่เหมาะสมกับผู้ใช้งานบางกลุ่มหรือบางสถานการณ์ จึงควรพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความมั่นคง และความปลอดภัย เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานได้ในบริบทที่หลากหลายและแตกต่างกัน (Ronchi & Nilsson, 2013)

กล่าวโดยสรุป ผลการวิเคราะห์เชิงเวลานี้ช่วยสะท้อนบทบาทของโครงสร้างเส้นทางและรูปแบบการจัดวางทางลาดต่อการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาด้านโครงสร้างและการ

จัดรูปแบบพื้นที่ในกรอบแนวคิดการออกแบบเพื่อทุกคนในมิติของความชัดเจนและการรับรู้เชิงพื้นที่ ทั้งนี้ ผลการศึกษายังมีข้อจำกัดในการอธิบายภาระทางกายและความปลอดภัยในการใช้งานจริง ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในบริบทการใช้งานจริงร่วมกับผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์

6.2 สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบทางลาดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ ภายใต้เงื่อนไขของการจำลองที่กำหนด โดยทางลาดรูปแบบ L แสดงประสิทธิภาพด้านเวลาสูงสุดในเชิงผลลัพธ์จากแบบจำลอง รองลงมาคือทางลาดรูปแบบ S ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพอยู่ในระดับปานกลางและคงที่ ส่วนทางลาดรูปแบบ U ให้ค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการกลับ 180 องศา ซึ่งส่งผลให้เวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในแบบจำลอง

โดยเมื่อเปรียบเทียบผลด้านเวลาในแต่ละระดับความลาดชัน พบว่าเมื่อความลาดชันลดลงจาก 1:12 เป็น 1:14 เวลาในการเคลื่อนที่จากการจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ ลำดับประสิทธิภาพระหว่างรูปแบบทางลาดยังคงสอดคล้องกันในทุกระดับความลาดชัน กล่าวคือ รูปแบบทางลาดรูปแบบ L ยังคงมีประสิทธิภาพสูงสุด ขณะที่รูปแบบ U มีค่าต่ำสุด การเปลี่ยนแปลงของความลาดชันจึงส่งผลต่อเวลาโดยรวม แต่ไม่เปลี่ยนลำดับของประสิทธิภาพระหว่างรูปแบบ

ด้านความกว้างของทางลาด พบว่าเมื่อเพิ่มความกว้างจาก 1.50 เมตร เป็น 2.00 เมตร เวลาการเคลื่อนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกแบบจำลอง แม้การเพิ่มความกว้างจะช่วยเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งาน แต่ก็ทำให้การควบคุมทิศทางใช้เวลามากขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามความแตกต่างดังกล่าวถือว่าอยู่ในระดับยอมรับได้เมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งานจริง

การวางแผนพื้นที่มีผลต่อเวลาการเคลื่อนที่ในระดับเล็กน้อย โดยขนาดพื้นที่กึ่งกลางให้จังหวะการเคลื่อนที่ต่อเนื่องและสมดุลที่สุด ส่วนขนาดพื้นที่ช่วงหลังยาว 6 เมตรใช้เวลามากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากระยะทางที่ยาวขึ้น ทั้งนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีผลน้อยกว่าปัจจัยด้านรูปแบบทางลาด

โดยสรุปการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งหมดชี้ให้เห็นว่า ทางลาดรูปแบบ L มีประสิทธิภาพด้านเวลาในการเคลื่อนที่สูงสุดเมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา รองลงมาคือทางลาดรูปแบบ S และทางลาดรูปแบบ U ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลการศึกษานี้สะท้อนความแตกต่างเชิงเวลาจากลักษณะทางกายภาพและรูปแบบเรขาคณิตของทางลาด ซึ่งไม่ครอบคลุมการประเมินภาระทางกายหรือความเสี่ยงในการใช้งานจริง โดยประเด็นดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยกรอบการศึกษาและเครื่องมือวิเคราะห์ที่แตกต่างออกไป จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปผลการวิจัยดังมีรายละเอียดแสดงในตาราง

ตารางที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะทางออกแบบทางลาด

Table 8 Summary of Research Findings and Design Recommendations for Wheelchair Ramps

ประเด็นการศึกษา Key Aspect	ผลการวิเคราะห์เชิงวิจัย Research Findings	ข้อเสนอแนะเชิงการออกแบบ Design Recommendations
รูปแบบทางลาด Ramp Configuration	ทางลาดรูปแบบ L ให้ค่าเวลาเคลื่อนที่ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง รองลงมาคือ S และต่ำสุดคือ U L-shaped ramps resulted in the shortest travel time under the simulated conditions, followed by S-	ทางลาด รูปแบบ L แสดงศักยภาพด้านประสิทธิภาพเชิงเวลาในแบบจำลอง และสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาด้านโครงสร้างเส้นทางและการจัดรูปแบบพื้นที่ L-shaped ramps demonstrate strong potential in terms of time efficiency within the simulation framework and may be considered as a key reference for route planning and spatial layout design.

ประเด็นการศึกษา Key Aspect	ผลการวิเคราะห์เชิงวิจัย Research Findings	ข้อเสนอแนะเชิงการออกแบบ Design Recommendations
	shaped ramps, while U-shaped ramps exhibited the longest travel time.	
ความลาดชัน Slope	ความชัน 1:12 ให้เวลาเคลื่อนที่น้อยที่สุด ขณะที่ 1:13 และ 1:14 ให้ความปลอดภัยมากกว่า A slope of 1:12 produced the shortest travel time, whereas slopes of 1:13 and 1:14 provided higher levels of safety.	ควรกำหนดความลาดชันให้อยู่ในช่วง 1:12–1:14 เพื่อสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพด้านเวลา ความสบาย และความปลอดภัยในการใช้งานของผู้ใช้รถเข็นวีลแชร์ The ramp slope should be designed within the range of 1:12–1:14 to achieve a balance between time efficiency, user comfort, and safety for wheelchair users.
ความกว้างทางลาด Ramp Width	การเพิ่มความกว้างในช่วงขนาด 1.50 ถึง 2.00 เมตร ส่งผลให้เวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย Increasing the ramp width from 1.50 m to 2.00 m resulted in a slight increase in travel time.	ควรกำหนดความกว้างของทางลาด ไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร ตามมาตรฐานขั้นต่ำ และอาจขยายถึง 2.00 เมตร ในพื้นที่ที่ต้องการรองรับการสวนทางหรือเพิ่มความปลอดภัยในการสัญจร The ramp width should be no less than 1.50 m in accordance with minimum standards, and may be increased up to 2.00 m in areas requiring bidirectional movement or enhanced safety.
การวางชนพัก Landing Arrangement	รูปแบบชนพักแบบกึ่งกลาง (B-type) ให้จังหวะเคลื่อนที่สมดุลที่สุด The mid-landing configuration (B-type) provided the most balanced movement rhythm.	ควรเลือกใช้ ชนพักแบบกึ่งกลาง (B-type) เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของการเคลื่อนไหว ลดการหยุดพักที่ไม่จำเป็น และช่วยเพิ่มความปลอดภัยระหว่างการเปลี่ยนระดับ The mid-landing (B-type) arrangement is recommended to maintain continuity of movement, reduce unnecessary stopping, and enhance safety during level transitions.
ภาพรวมประสิทธิภาพ Overall Performance	ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ รูปแบบทางลาด ส่วนความลาดชันและความกว้างมีผลรองลงมา Ramp configuration was identified as the most influential factor, while slope and width had secondary effects.	การเลือกรูปแบบทางลาดเป็นปัจจัยหลักในเชิงเวลา ภายใต้กรอบการจำลองที่กำหนด โดยควรพิจารณาพร้อมกับปัจจัยอื่นในการออกแบบจริง Ramp configuration should be considered the primary design factor affecting travel time within the defined simulation conditions, and should be evaluated in conjunction with other parameters in practical design applications.

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1) การออกแบบและปรับปรุงสิ่งแวดล้อมทางกายภาพของอาคารสาธารณะ ควรนำผลการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดรูปแบบทางลาดให้เหมาะสมกับผู้พิการเข็นวีลแชร์ โดยเฉพาะทางลาดรูปแบบ L ซึ่งให้ประสิทธิภาพด้านเวลาสูงสุดและมีความต่อเนื่องของการเคลื่อนไหวสูง การประยุกต์ใช้ควรอยู่ในอาคารราชการ โรงพยาบาล สถานศึกษา และพื้นที่สาธารณะ เพื่อให้ผู้ใช้ทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงได้อย่างเท่าเทียมตามหลักการออกแบบเพื่อทุกคน

2) การออกแบบทางลาดเพื่อรองรับภาวะฉุกเฉินและการอพยพหนีภัย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความชันที่อยู่ในช่วง 1:12 – 1:14 ให้สมตลระหว่าง เวลาในการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนเส้นทางอพยพในอาคาร โดยเฉพาะในพื้นที่ที่อาจเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น โรงพยาบาล อาคารสำนักงาน หรือสถานศึกษา เทคโนโลยีการจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถต่อยอดไปใช้ประเมินสมรรถนะของผู้พิการเข็นวีลแชร์ภายใต้สถานการณ์จำกัดเวลา เพื่อออกแบบ ทางลาดเพื่อการอพยพ ที่ปลอดภัยและสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของผู้ใช้งาน

3) การใช้เทคโนโลยีการจำลองในการพัฒนาแนวทางการออกแบบ โดยเครื่องมือและวิธีการวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีการจำลอง จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปปรับใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ในการพัฒนาแนวทางการออกแบบทางสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การบูรณาการเทคโนโลยีการจำลองเข้ากับการสำรวจภาคสนาม การทดสอบต้นแบบ หรือ การประเมินจากผู้ใช้งานจริง จะช่วยให้สามารถออกแบบทางลาดและสิ่งอำนวยความสะดวกที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเหมาะสมต่อการใช้งานได้ทั้งในภาวะปกติและภาวะฉุกเฉิน เช่น การอพยพหนีภัยหรือแผ่นดินไหว

4) ผลการศึกษานี้สะท้อนประสิทธิภาพด้านเวลาในการเคลื่อนที่ของรูปแบบทางลาดภายใต้กรอบการจำลองที่กำหนดไว้ การนำผลไปใช้ในการออกแบบจริงจึงควรพิจารณาควบคู่กับปัจจัยอื่นที่ไม่ได้รวมอยู่ในแบบจำลอง เช่น แรงที่ผู้ใช้งานต้องใช้ในการควบคุมรถเข็นและการบังคับทิศทางขณะเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ เพื่อให้การออกแบบทางลาดมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงและสอดคล้องกับบริบทของพื้นที่

6.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1) ศึกษาปัจจัยด้านสรีรวิทยาและแรงกล้ามเนื้อของผู้พิการเข็น ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์เชิงเวลาเป็นหลัก การวิจัยต่อไปควรศึกษาควบคู่กับปัจจัยด้านแรงกล้ามเนื้อและความเหนื่อยล้าของผู้ใช้ เพื่อสร้างความเข้าใจด้านพลังงานการเคลื่อนไหวที่ใช้ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบทางลาดตอบสนองต่อศักยภาพทางกายภาพของผู้ใช้อย่างแท้จริง

2) การวิเคราะห์ผลกระทบของพื้นผิวทางลาดและวัสดุปูพื้น ควรศึกษาผลของวัสดุที่มีรูปแบบและพื้นผิวต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของผู้พิการเข็น เพื่อกำหนดแนวทางเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง การบูรณาการเทคโนโลยีการจำลองขั้นสูง

3) การวิจัยในอนาคตอาจพัฒนาแบบจำลองที่รวมเทคโนโลยี virtual reality (VR) หรือ motion tracking เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนไหวของผู้ใช้ในมิติที่ละเอียดขึ้น เช่น การหมุนล้อ มุมองศา และแรงผลักในแต่ละช่วงของทางลาด เป็นต้น ซึ่งจะเป็ข้อมูลเชิงลึกสำหรับการออกแบบเชิงกายภาพและการพัฒนาเทคโนโลยีช่วยการเคลื่อนไหวในอนาคต

4) การใช้การจำลองการเคลื่อนที่ที่มีความเหมาะสมในฐานะเครื่องมือวิเคราะห์เชิงระบบที่ช่วยลดความเสี่ยงในระยะต้นของการวิจัย และเอื้อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของรูปแบบทางลาดภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาในอนาคตควรพิจารณาการทดลองในพื้นที่ใช้งานจริงร่วมกับผู้พิการเข็นวีลแชร์ เพื่อให้ได้มุมมองจากประสบการณ์การใช้งานโดยตรง ควบคู่กับการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่และการควบคุมรถเข็นในช่วงการเปลี่ยนทิศทาง แนวทางดังกล่าวจะช่วยเสริมความรอบด้านของผลการวิจัย และสอดคล้องกับหลักการ Nothing About Us Without Us ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการออกแบบเพื่อทุกคน

เอกสารอ้างอิง

- AnyLogic Company. (2022). *AnyLogic simulation software*. <https://www.anylogic.com>
- Bentley Systems. (2022). *Legion software*. <https://www.bentley.com>
- Boonma, P. (2024). *A study of home planning for the elderly for earthquake emergency response* [Doctoral dissertation, Naresuan University]. Naresuan University Repository. <https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/handle/123456789/5908>
- Center for Universal Design. (1997). *The principles of universal design (Version 2.0)*. North Carolina State University.
- Chaikhot, D., Taylor, M. J. D., De Vries, W. H. K., & Hettinga, F. J. (2023). Biomechanics of wheelchair turning manoeuvres: Novel insights into wheelchair propulsion. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1127514. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1127514>
- Chareonwongsak, K., & Thong, J. (2017). *Designing accessible spaces: The importance of universal design for people with disabilities*. National Research Council.
- Cooper, R. A., Boninger, M. L., & Rentschler, A. J. (1996). Use of wheelchair pushrim biomechanics for understanding injury mechanisms and design criteria. *Assistive Technology*, 8(1), 3–11.
- Department of Public Works and Town & Country Planning. (2019). *Building design standards for accessibility of persons with disabilities* (Building Code No. 13). Department of Public Works and Town & Country Planning. (in Thai)
- Department of Public Works and Town & Country Planning. (2020). *Universal design standards for buildings*. <https://www.dpt.go.th/> (in Thai)
- Koontz, A. M., Cooper, R. A., Boninger, M. L., Yang, Y., Impink, B. G., & van der Woude, L. H. v. (2005). A kinetic analysis of manual wheelchair propulsion during start-up on select indoor and outdoor surfaces. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42(4), 447. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2004.08.0106>
- Kuligowski, E. D., Peacock, R. D., & Hoskins, B. L. (2010). *A review of building evacuation models* (NIST Technical Note 1680). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1680>
- Imrie, R. (2012). Universalism, universal design and equitable access to the built environment. *Disability & Rehabilitation*, 34(10), 873–882. <https://doi.org/10.3109/09638288.2011.624250>
- International Organization for Standardization (ISO). (2008). *ISO 7176-5:2008 — Wheelchairs — Part 5: Determination of overall dimensions, mass and turning space*. ISO.
- Ministry of Interior. (2021). *Ministerial Regulation prescribing facilities in buildings for persons with disabilities or older persons* (No. 2), B.E. 2564 (2021). Royal Thai Government Gazette. <https://download.asa.or.th/03media/04law/cba/mr/mr48-58e-upd%2802%29.pdf>
- National Statistical Office (Thailand). (2021). *Thailand becomes a complete aged society*. Ministry of Digital Economy and Society. Retrieved April 9, 2025, from <https://www.nso.go.th/> (in Thai)
- Oasys. (2021). *MassMotion crowd simulation*. <https://www.oasys-software.com>

- Ronchi, E., & Nilsson, D. (2013). Fire evacuation in high-rise buildings: A review of human behaviour and modelling research. *Fire Science Reviews*, 2(7), 1–21. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-7>
- SimWalk. (2020). *Pedestrian simulation software*. <https://www.simwalk.com>
- Story, M. F. (1998). Maximizing usability: The principles of universal design. *Assistive Technology*, 10(1), 4–12. <https://doi.org/10.1080/10400435.1998.10131955>
- Bertocci, G., Smalley, C., Page, A., & Digiovine, C. (2019). Manual wheelchair propulsion on ramp slopes encountered when boarding public transit buses. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 14(6), 561–565. <https://doi.org/10.1080/17483107.2018.1465602>
- Tolerico, M. L., Ding, D., Cooper, R. A., Spaeth, D. M., Fitzgerald, S. G., Cooper, R., & Boninger, M. L. (2007). Assessing mobility characteristics and activity levels of manual wheelchair users. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 44(4), 561–571. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2006.05.0054>
- Thunderhead Engineering. (2023). *Pathfinder – Advanced fire and egress simulation*. <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder>
- U.S. Department of Justice. (2010). *ADA standards for accessible design*. Author.
- van der Woude, L. H. V., Veeger, H. E. J., Dallmeijer, A. J., Janssen, T. W. J., & Rozendaal, L. A. (2001). Biomechanics and physiology in active manual wheelchair propulsion. *Medical Engineering & Physics*, 23(10), 713–733. [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(01\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(01)00083-2)
- World Health Organization (WHO). (2008). *Guidelines on the provision of manual wheelchairs in less-resourced settings*. WHO Press.