

WAREHOUSE COST REDUCTION USING ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY AND AUTONOMOUS FORKLIFTS CASE STUDY: GLASS BOTTLE MANUFACTURING COMPANY

Received Date: 2026, January 20

Revised Date: 2026, March 19

Accepted Date: 2026, April 23

Tharinee Manisri*

Suratin Tunyaplin*

ABSTRACT

The research aimed to enhance warehouse management by utilizing Ultra-Wideband (UWB) technology in conjunction with automated forklifts. The study employed a Fishbone Diagram to ascertain the root cause of the problem and applied the waste elimination principle for process improvement. The results showed that the Real-time Location System (RTLS) was accurate to within ± 5 cm. As a result, it reduced costs from picking errors and product losses from 7,500 baht per year to 0 baht. The study also used the industrial logistics performance index in the dimension of warehouse cost per sales. The results showed that staff wage costs decreased by 36%, from 2,226,000 baht per year to 1,434,325 baht.

Keywords: Ultra-Wideband (UWB), Automated Forklift, Smart Warehouse, Logistics Costs, Cost Reduction.

* College of Logistics and Supply Chain, Sripatum University

Corresponding author e-Mail: tharinee.ma@spu.ac.th, suratin.tn@spu.ac.th

การลดต้นทุนคลังสินค้าด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ กรณีศึกษา: บริษัทผลิตขวดแก้ว

วันที่ได้รับต้นฉบับบทความ: 20 มกราคม 2569

วันที่แก้ไขปรับปรุงบทความ: 19 มีนาคม 2569

วันที่ตอบรับตีพิมพ์บทความ: 23 เมษายน 2569

ธรีณี มณีศรี*

สุรทิน ัญญะผลิน*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการจัดการคลังสินค้าด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ร่วมกับรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา และใช้หลักการขจัดความสูญเปล่าในการปรับปรุงกระบวนการผลการวิจัยพบว่า ระบบการติดตามแบบเรียลไทม์ มีความแม่นยำ +/-5 เซนติเมตร สามารถลดต้นทุนความผิดพลาดในการหยิบสินค้าและการสูญหายได้ 100% จากเดิมมีต้นทุน 7,500 บาทต่อปี เหลือ 0 บาท โดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์อุตสาหกรรมในมิติสัดส่วนต้นทุนบริหารคลังสินค้าต่อยอดขาย ผลที่ได้คือสามารถลดต้นทุนหลักจากเงินเดือนพนักงานลงได้ 36% จาก 2,226,000 บาทต่อปี เหลือ 1,434,325 บาทต่อปี

คำสำคัญ: อัลตราไวด์แบนด์ รถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ คลังสินค้าอัจฉริยะ ต้นทุนโลจิสติกส์ การลดต้นทุน

* วิทยาลัยโลจิสติกส์และห่วงโซ่อุปทาน มหาวิทยาลัยศรีปทุม

Corresponding author e-Mail: tharinee.ma@spu.ac.th, suratin.tn@spu.ac.th

บทนำ

การจัดการคลังสินค้าเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบโลจิสติกส์ โดยในปี 2566 ต้นทุนโลจิสติกส์ของประเทศไทยมีสัดส่วนประมาณ 14.1% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) สะท้อนความจำเป็นของการยกระดับการบริหารจัดการคลังสินค้า สินค้าคงคลัง การขนส่ง และการกระจายสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพ (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายรัฐวิสาหกิจ, 2566, หน้า 3) อย่างไรก็ตามระบบคลังสินค้าแบบดั้งเดิมยังพึ่งพาแรงงานคนในกระบวนการรับสินค้า จัดเก็บ หยิบ และจ่ายสินค้า ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดเฉลี่ย 0.35-1.00% ต่อรายการหยิบ (Kudelska & Niedbal, 2021, pp. 882-892) รวมถึงการสูญเสียประสิทธิภาพจากการทำงานซ้ำซ้อน

ในบริบทอุตสาหกรรมไทยพบว่า ผู้ประกอบการมากกว่า 80% ยังคงใช้รหัสบาร์โค้ดแบบคนขับในการขนย้ายสินค้า (Bhandari, Online, 2025) ซึ่งก่อให้เกิดข้อจำกัดด้านความไม่สม่ำเสมอของผลการทำงานจากปัจจัยมนุษย์ ต้นทุนแรงงานที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 5-8% ต่อปี (Nikkei Asia, Online, 2025) ความเสี่ยงด้านความปลอดภัย และความสูญหาย/ ข้อผิดพลาดในการจัดเก็บ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นผลเชิงปฏิบัติ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ลดต้นทุนการดำเนินงาน 30-40% ภายใน 3 ปี และลดความผิดพลาดในการหยิบสินค้าจาก 0.35-1.00% เหลือน้อยกว่า 0.1% (McKinsey & Company, Online, 2025) 2) เพิ่มประสิทธิภาพ โดยเพิ่มความเร็วในการหยิบ-จัดเก็บ 40-60% ลดเวลาที่สูญเสียระหว่างการทำงานจาก 35% เหลือ 10% และเพิ่มปริมาณงาน 2-3 เท่า (Mikulla, Klotz, Ullrich, Weidmann & Zepter, Online, 2024) 3) เพิ่มความปลอดภัย ลดอุบัติเหตุการชนกัน 85-90% ผ่านระบบเตือนและปรับเส้นทางอัตโนมัติ (Cramer, Online, 2024) และ 4) เพิ่มความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับคลังสินค้าเดิม โดยใช้เวลาดัดตั้ง 2-4 สัปดาห์ มีอัตราการคืนทุน (ROI) 18-24 เดือน เหมาะสมกับ SMEs ไทย (SCM Champs, Online, 2025)

นอกจากนี้ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับแผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ ประเด็นที่ 7 โครงสร้างพื้นฐานระบบโลจิสติกส์ และดิจิทัล (พ.ศ. 2561-2580) ที่มุ่งยกระดับขีดความสามารถการแข่งขันด้านโลจิสติกส์ของประเทศไทยสู่อันดับที่ 25 ของโลก จากอันดับที่ 32 ในปี 2561 (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, ออนไลน์, 2567) รวมถึงตอบสนองแผนปฏิบัติการด้านการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2560-2565) และต่อเนื่องถึงฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2566-2570) ที่เน้น “Smart Logistics” ผ่านเทคโนโลยีดิจิทัล Internet of Things (IoT) และระบบอัตโนมัติ เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการคลังสินค้า (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข)., ออนไลน์, 2566)

ภาคอุตสาหกรรมไทยยังมีข้อจำกัดจากการพึ่งพาเทคโนโลยีต่างประเทศและการพัฒนาเทคโนโลยีของตนเอง จึงจำเป็นต้องเร่งปรับตัวสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 เพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน (สำนักงานปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม, ออนไลน์, 2566) การพัฒนาต้นแบบระบบติดตามอัจฉริยะที่ผสาน UWB และรหัสบาร์โค้ดที่อัตโนมัติในงานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพในการถ่ายทอดและประยุกต์ใช้ได้จริง โดยเฉพาะในกลุ่ม SMEs เพื่อสนับสนุนความสามารถในการแข่งขันในเวทีโลก ทั้งยังสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 9 และ 12 ผ่านการลดความสูญเสีย

และใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ (Guterres, Online, 2023) ตลอดจนสอดคล้องกับแนวโน้มระดับโลกที่ คาดว่าตลาดคลังสินค้าอัตโนมัติจะเติบโตจาก 1.57 หมื่นล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2565 เป็น 4.12 หมื่นล้าน ดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2570 ด้วยอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (CAGR) 21.3% (Grand View Research, Online, 2026)

บริษัทการศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นผู้ผลิตขวดแก้ว ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในโซ่อุปทาน เครื่องดื่ม และจำเป็นต้องมีคลังเพื่อจัดเก็บสินค้า สำหรับบริษัทการศึกษานี้มีพื้นที่จัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปขนาด 2,925 ตารางเมตร ปัญหาที่พบในคลังสินค้า ได้แก่ การพึ่งพาแรงงานคน ความผิดพลาดจากกระบวนการรับจัดเก็บ และเบิกจ่ายสินค้า อุบัติเหตุจากรถโฟล์คลิฟท์ ต้นทุนสินค้าเสียหายและสูญหาย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่มีการ พัฒนาเทคโนโลยี เพื่อลดปัญหาดังกล่าวเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบติดตามอัจฉริยะแบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคโนโลยี UWB ร่วมกับรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ สำหรับบริหารคลังสินค้า
2. เพื่อลดต้นทุนการบริหารคลังสินค้าด้วยเทคโนโลยี

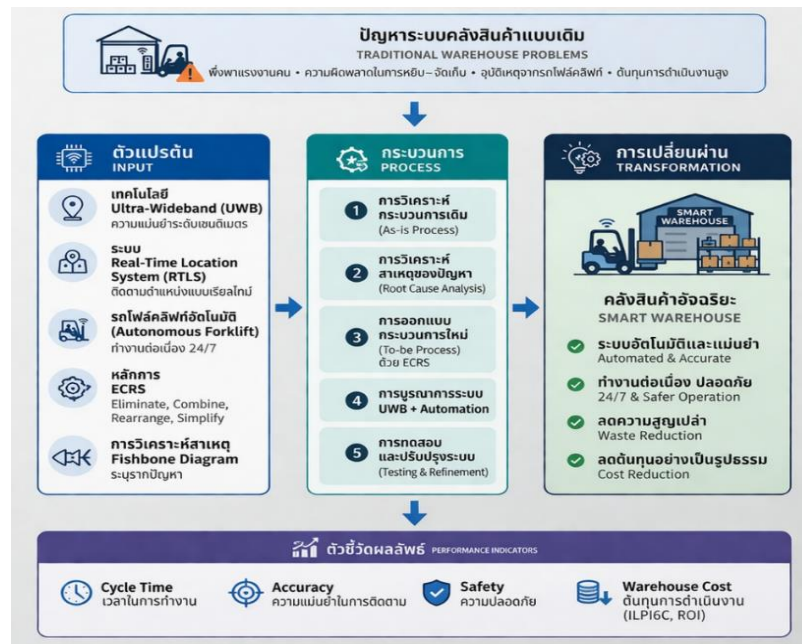
กรอบแนวคิดและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband: UWB) เป็นนวัตกรรมสื่อสารไร้สายที่มีความแม่นยำ ในการระบุตำแหน่งระดับเซนติเมตร (10-30 เซนติเมตร) เหนือกว่า RFID, Bluetooth และ ZigBee ที่ยังมีความคลาดเคลื่อน 3-5 เมตร (Omlox Technology Consortium, 2025, p. 7) โดย Wang, Sun, Zhang, and Jin (2024) พบว่า UWB สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมคลังสินค้าที่มีสิ่งกีดขวาง และโลหะจำนวนมากด้วยความแม่นยำสูงถึง 98.5% ดังนั้นการบูรณาการ UWB กับระบบรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ (Automated Guided Vehicles: AGV) จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับสู่คลังสินค้าอัจฉริยะและแก้ไข ปัญหาการปฏิบัติงานดังกล่าว นอกจากนี้ยังถูกพัฒนาเพื่อการติดตามและระบุตำแหน่งสินค้าแบบเรียลไทม์ใน คลังสินค้า โดยมีจุดเด่นด้านความแม่นยำ ความเสถียร และการใช้พลังงานต่ำ (Al-Okby, Junginger, Roddelkopf & Thurow, 2024; Gnaś, Majerek, Styła, Adamkiewicz, Skowron, Sak-Skowron, Ivashko, Stoktosa & Pietrzyk, 2024) งานวิจัยจำนวนมากเสนอการบูรณาการ UWB กับยานพาหนะนำทางอัตโนมัติ (Automated Guided Vehicles: AGVs) และรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ เพื่อเพิ่มศักยภาพการติดตามและการจัดการตำแหน่ง สินค้าในพื้นที่รอกการขนถ่าย (Monica & Ferrari, 2021; Motroni, Buffi & Nepa, 2021) รวมถึงการผสาน เซ็นเซอร์หลายประเภท เช่น Computer Vision และหน่วยวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Units: IMUs) เพื่อยกระดับความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบ (Luchetti, Carollo, Santoro, Nardello, Brunelli, Bosetti & De Cecco, 2021; Motroni, Buffi & Nepa, 2021) ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้ UWB-based Real-Time Localization Systems: RTLS ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม

(Gnaś, Majerek, Styła, Adamkiewicz, Skowron, Sak-Skowron, Ivashko, Stokłosa & Pietrzyk, 2024; Khan, Huda & Zaman, 2022) โดยการคัดเลือกกระบวนการพิจารณาทั้งข้อกำหนดทางเทคนิค ต้นทุน และปัจจัยด้านประสิทธิภาพการทำงานเพื่อให้การบูรณาการเหมาะสมที่สุด (Sinko, Marinič, Poljanec, Obrecht & Gajšek, 2022) ควบคู่กับความก้าวหน้าด้านการออกแบบเสาอากาศที่ช่วยขยายระยะและเพิ่มความแม่นยำของระบบ (Benouakta, Ferrero, Lizzi & Staraj, 2024)

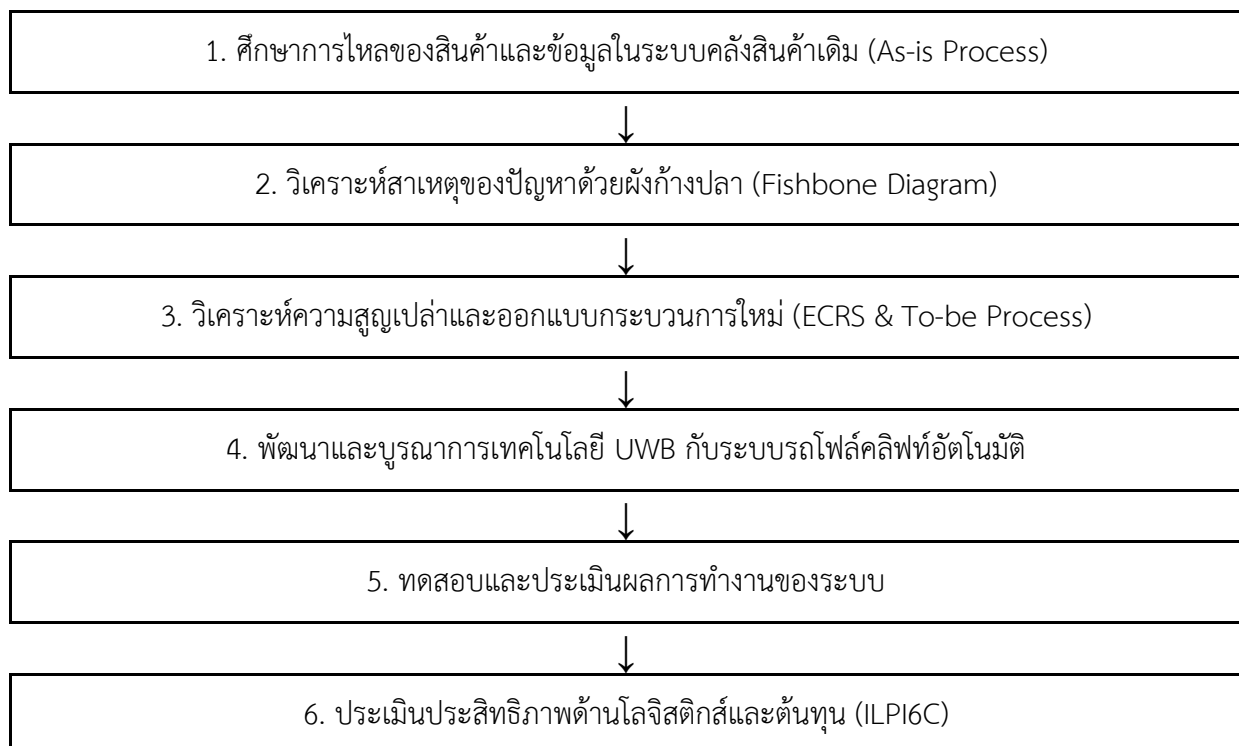
สำหรับรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ งานวิจัยล่าสุดมุ่งพัฒนาการนำทาง การควบคุม และประสิทธิภาพ พร้อมเพิ่มความปลอดภัยและความยั่งยืน โดยใช้เทคนิค เช่น Model Predictive Control: MPC และ Linear Segment with Parabolic Blends (LSPB) (Vorasawad, Park & Kim, 2023; Wang, Sun, Zhang & Jin, 2024) รวมถึง Smart Spaghetti Charts เพื่อระบุความเสี่ยงการชนกัน (Cantini, De Carlo & Tucci, 2020) และ Adaptive Fuzzy PID เพื่อการบังคับเลี้ยวที่เสถียร (Wang, Sun, Zhang & Jin, 2024) ตลอดจนการประเมิน/ คัดเลือก ด้วย Data Envelopment Analysis และ FUCOM-MARCOS (Mahmutagić, Stević, Nunić, Chatterjee & Tanackov, 2021, pp. 537-553) การเพิ่มประสิทธิภาพการชาร์จ (Carli, Dotoli, Digiesi, Facchin & Mossa, 2020) การใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Modica, Perotti & Melacini, 2021) และการติดตามตำแหน่งด้วยการผสมผสาน UWB, IMU-Inertial Navigation Systems และ Optical Flow Sensors (Motroni, Buffi & Nepa, 2021)

มีการวิเคราะห์ปัญหาด้วยผังก้างปลาช่วยวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้าของปัญหา (นฤมล ไชยโคตร, ภรปภากร อธิษฐานันท์, รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ และสิริเดช ชาตินิยม, 2560, หน้า 168-177; Molina, Eguia & Racero, 2019, pp. 253-287) การหาแนวทางในการลดความสูญเสียโดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้คลังสินค้าอัจฉริยะ อย่างไรก็ตามอุปสรรคสำคัญยังเป็นต้นทุนและข้อจำกัดเชิงกายภาพ (Tikwayo & Mathaba, 2023) ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี และระบบอัตโนมัติสำหรับบริหารคลังสินค้าเพื่อทดแทนแรงงานคน และการลดต้นทุน (Asemi, Ko & Nowkarizi, 2021, pp. 412-434) โดยมีกรอบแนวคิดงานวิจัยดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 2 แผนภาพวิธีการวิจัย

1. ศึกษาการไหลของสินค้าและข้อมูลในระบบคลังสินค้าเดิม (As-is Process) เริ่มจากการสำรวจหน้างานเพื่อทำความเข้าใจการไหลของสินค้าและศึกษากระบวนการเดิมใช้พนักงานดำเนินการทั้งหมด และประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) รอและสังเกตพาเลทที่สายพาน 2) เรียกกรรไกรโฟล์คลิฟท์มารับ 3) รับพาเลท 4) เคลื่อนที่ข้ามถนนซึ่งมีความเสี่ยงอุบัติเหตุ 5) ตรวจสอบประเภทสินค้า และ 6) นำเข้าจัดเก็บรวมระยะทางประมาณ 200 เมตร และเป็นงานซ้ำต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง 7 วันต่อสัปดาห์ ซึ่งสะท้อนจุดเสี่ยงของความผิดพลาดในการตรวจเช็ค การบันทึกข้อมูล และการระบุตำแหน่งจัดเก็บที่พึ่งพาแรงงานคนเป็นหลัก

2. วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยผังก้างปลา จากข้อมูลกระบวนการเดิม ทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้ผังก้างปลา

3. วิเคราะห์ความสูญเสียและออกแบบกระบวนการใหม่ (To-be) การวิเคราะห์กิจกรรมที่ก่อให้เกิดความสูญเสีย และกำหนดแนวทางปรับปรุงให้กระบวนการสั้นลงและแม่นยำขึ้น โดยสรุปผลเปรียบเทียบระบบเดิมกับระบบอัตโนมัติใน ตารางที่ 1 ครอบคลุมประเด็นสำคัญ ได้แก่ 1) ลดข้อผิดพลาดและงานซ้ำซ้อนด้วยการตรวจจับ/ ประมวลผลอัตโนมัติ 2) ลดความเสี่ยงการชนและความเสียหายระหว่างขนย้าย 3) ลดการเคลื่อนไหวเกินจำเป็นของพนักงาน และ 4) ลดการรอคอย/ การค้นหา พร้อมยกระดับการติดตามและการบริหารจัดการแบบเรียลไทม์

4. หลักการทำงานของเทคโนโลยี UWB และการประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบรภโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติสำหรับคลังสินค้าอัจฉริยะ Ultra-Wideband (UWB) เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่ส่งข้อมูลผ่านพัลส์แคบระดับนาโนวินาทีถึงพิโควินาที โดยไม่ใช้คลื่นพาหะแบบต่อเนื่อง ทำให้ครอบคลุมแถบความถี่กว้างในย่าน 3.1-10.6 GHz ด้วยกำลังส่งต่ำกว่า -41.3 dBm ตามข้อกำหนดของ FCC เทคโนโลยีนี้จึงมีคุณสมบัติเด่นในด้านการใช้พลังงานต่ำ อัตราการส่งข้อมูลสูงถึง 480 Mbps ในระยะ 10 เมตร และทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากระบบสื่อสารไร้สายอื่นได้ดี ระบบระบุตำแหน่งของ UWB อาศัยหลักการ Time of Flight (ToF) โดย UWB Tag จะส่งสัญญาณไปยัง Anchor ซึ่ง Anchor จะตอบสนองกลับ จากนั้นระบบจะคำนวณระยะทางจากเวลาที่สัญญาณเดินทางไป-กลับร่วมกับความเร็วแสง ตามสมการ $D=C(T_1+T_2)/2$ โดย Tag สามารถรวบรวมข้อมูลระยะทางจาก Anchor โดยรอบได้สูงสุด 5 ชุด แล้วส่งข้อมูลตำแหน่งผ่านโปรโตคอล UDP Socket ไปยังเซิร์ฟเวอร์ เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอก งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ Kalman Filter เป็นอัลกอริทึมกรองสัญญาณซึ่งทำงานโดยการคาดการณ์สถานะจากข้อมูลปัจจุบันและอัปเดตอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับข้อมูลการวัดใหม่ ส่งผลให้ค่าตำแหน่งที่ได้มีความแม่นยำสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านการพัฒนาและติดตั้งระบบฮาร์ดแวร์ โครงการวิจัยนี้ได้กำหนดองค์ประกอบหลักของรภโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติเป็น 6 ส่วน ได้แก่ 1) ระบบนำทางด้วย 3D LiDAR ร่วมกับ Depth Camera เพื่อสร้างแผนที่ 3 มิติ ของสภาพแวดล้อมและกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ 2) ระบบชาร์จอัตโนมัติแบบออนไลน์ที่รองรับการทำงานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง 3) ระบบควบคุมแบบรวมศูนย์สำหรับสั่งงาน ติดตาม และจัดการยานพาหนะ 4) ระบบติดตามตำแหน่งแบบเรียลไทม์ด้วย UWB เพื่อบริหารเส้นทางและลดการชน พร้อมส่งข้อมูลเข้าสู่ศูนย์ควบคุม 5) ระบบความปลอดภัยซึ่งประกอบด้วยเลเซอร์ป้องกันการชน สวิตช์หยุดฉุกเฉิน Safety Mechanical Bumper และ

เซ็นเซอร์ตรวจจับสินค้าในจุดรับ-ปล่อย และ 6) ระบบเตือนภัยด้วยไฟ LED และเสียงพร้อมการสื่อสารไร้สาย เพื่อแก้ไขเหตุขัดข้องได้อย่างรวดเร็ว

ในเชิงโครงสร้างระบบ UWB RTLS ใช้ Anchor Nodes จำนวน 12 ตัว ร่วมกับ Tag nodes และ Gateway เพื่อคำนวณตำแหน่งแบบเรียลไทม์ด้วยอัลกอริทึม Trilateration ร่วมกับ Kalman Filter ระบบนี้เชื่อมต่อการอ่านป้ายสินค้าผ่านการสแกนบาร์โค้ด 1D/2D, RFID และกล้องประมวลผลภาพ (YOLOv8) เข้าสู่ระบบจัดการคลังสินค้า (WMS) สถาปัตยกรรมการควบคุมแบ่งออกเป็น 3 Layer ได้แก่ Network Layer สำหรับจัดเส้นทางข้อมูล, Software Layer สำหรับควบคุมอัลกอริทึมและแสดงผลผ่านหน้าจอ HMI รวมถึงกำหนดเงื่อนไขการทำงานของรถ และ Equipment Layer สำหรับรับ-ส่งคำสั่งระหว่างอุปกรณ์จริง เช่น รถโฟล์คลิฟท์ Call Button เซนเซอร์ และเครื่องจักร โดยระบบควบคุมภายในรถทำงานผ่านเครือข่าย CAN ที่รองรับมาตรฐาน CANopen และ J1939 ครอบคลุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ระบบพวงมาลัย ระบบยก-ลดงา และระบบเบรก โดยจำกัดความเร็วสูงสุดไว้ที่ 1.5 เมตรต่อวินาที เพื่อความปลอดภัย

5. การทดสอบและประเมินผลระบบ งานวิจัยดำเนินการตามกรอบเวลา 24 เดือน แบ่งเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 (12 เดือน) สำหรับประกอบฮาร์ดแวร์และพัฒนาระบบ และระยะที่ 2 (12 เดือน) สำหรับทดสอบประสิทธิภาพ ปรับแก้ข้อบกพร่อง และเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยการทดสอบประกอบด้วย 1) Cycle Time ซึ่งรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติมีเวลาเฉลี่ย 10-12 นาทีต่อรอบงาน 2) ความเสถียรและความแม่นยำของการนำทาง/การจัดตำแหน่ง 3) ความปลอดภัยและการตอบสนองต่อสิ่งกีดขวาง และ 4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับรถโฟล์คลิฟท์คนขับ

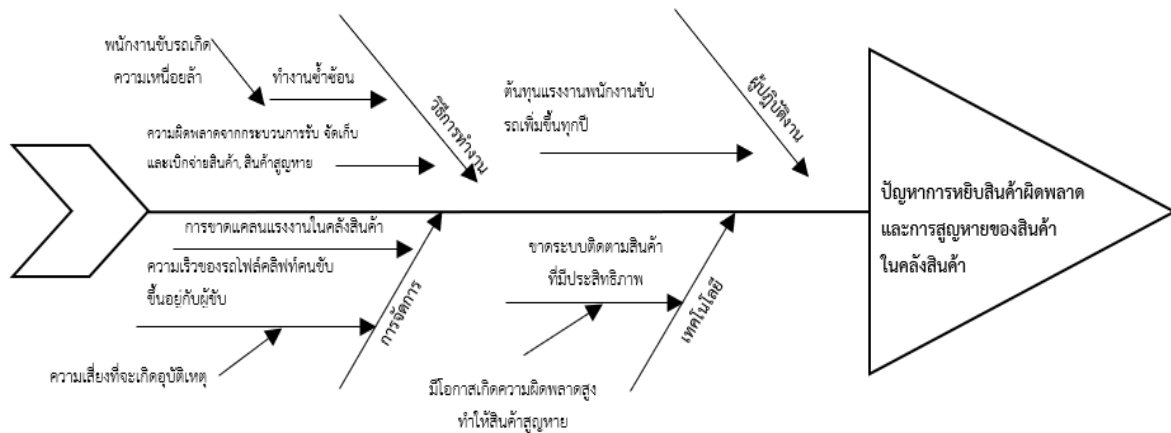
กระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติสรุปเป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่ 1) รับสินค้า 2) ตรวจสอบคุณภาพโดยพนักงาน 3) ระบบอัตโนมัติด้วย UWB และรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ 4) จัดเก็บตามตำแหน่ง 5) บันทึกข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูล/ WMS และ 6) วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อปรับปรุงกระบวนการ โดยลดภาระงานมนุษย์ในช่วงการขนย้าย-บันทึกข้อมูล-จัดเก็บผ่านการทำงานอัตโนมัติแบบวนลูป (Cyclic Process)

6. ประเมินประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ การประเมินผลด้านต้นทุนโดยใช้ดัชนีชี้วัดเพื่อวัดสัดส่วนต้นทุนบริหารคลังสินค้าต่อยอดขายครอบคลุมองค์ประกอบต้นทุนหลัก

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและวิเคราะห์ความสูญเสียเปล่า

1. ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา



ภาพที่ 3 การวิเคราะห์สภาพปัญหา

ผลการวิเคราะห์สภาพปัญหา แสดงให้เห็นถึงการพึ่งพาพนักงานขับรถโพลีคลิฟท์ และขาดเทคโนโลยีในการติดตามสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งพฤติกรรมคนขับที่ส่งผลต่อความเสี่ยงอุบัติเหตุและสินค้าเสียหาย ซึ่งผลการวิเคราะห์ใช้เป็นฐานในการกำหนดแนวทางออกแบบระบบอัตโนมัติและการติดตามแบบเรียลไทม์

2. ผลการวิเคราะห์ความสูญเสียเปล่า

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความสูญเสียเปล่าและการทดแทนระบบเดิมด้วยระบบอัตโนมัติ

ประเภทความสูญเสียเปล่า	ระบบเดิม (Manual)	ระบบอัตโนมัติ (Automated)
ข้อผิดพลาดและงานซ้ำซ้อน	พนักงานเรียกรถโพลีคลิฟท์ผิดเวลา อ่านสัญลักษณ์บนพาเลทผิดพลาด จัดเก็บสินค้าผิดตำแหน่ง	ระบบเซ็นเซอร์ควบคุมการรับสินค้าอัตโนมัติ ระบบประมวลผลภาพอ่านสัญลักษณ์ถูกต้อง จัดเก็บพาเลทได้ตรงตามตำแหน่งที่กำหนด
การขนย้าย	อุบัติเหตุจากการชนในบริเวณต่าง ๆ ชนกับรถบรรทุกบนถนน สินค้าเสียหาย วางผิดตำแหน่ง	รถโพลีคลิฟท์อัตโนมัติทำงานแม่นยำ ระบบ UWB จัดการจราจรบนถนนตัดผ่านลดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพการขนย้าย

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเภทความสูญเสีย	ระบบเดิม (Manual)	ระบบอัตโนมัติ (Automated)
การเคลื่อนที่และเดินเท้า	เสียเวลาจากการเคลื่อนไหวของพนักงาน กระบวนการทำงานที่ใช้เวลานาน	ระบบเซ็นเซอร์และควบคุมอัตโนมัติ เก็บข้อมูลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ ลดเวลาการดำเนินงาน
การรอคอยและค้นหา	พนักงานสำรวจและแจ้งการรับสินค้า ค้นหารายการสินค้าในคลังด้วยตนเอง พนักงานดูแลคลังสินค้าตลอดเวลา	ระบบจัดการคลังสินค้าอัจฉริยะ แจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อพื้นที่เต็ม การติดตามและจัดการแบบเรียลไทม์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

การเปลี่ยนจากระบบขนย้ายแบบใช้แรงงานคนเป็นระบบอัตโนมัติ ส่งผลให้กระบวนการรับ-จัดเก็บสินค้ามีความต่อเนื่องและเป็นมาตรฐานมากขึ้น โดย Cycle Time เฉลี่ยต่อรอบงานลดลงขึ้นอยู่กับตำแหน่งจัดเก็บและประเภทงาน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม พบว่าความเร็วในการขนย้ายและจัดเก็บเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถรองรับปริมาณงานได้สูงขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มกำลังคน

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพผลผลิตของรถโฟล์คลิฟท์ระหว่างพนักงานและระบบอัตโนมัติ

กะ	ช่วงเวลา	รถคนขับ (พาเลท)	รถอัตโนมัติ (พาเลท)	รวม/ กะ
A	07:30-15:30	64	36	100
B	15:30-23:30	64	36	100
C	23:30-07:30	64	36	100
รวม/ วัน	24 ชั่วโมง	192 (64%)	108 (36%)	300
	ความสามารถ/ ชม.	คนขับ 16 พาเลท/ รอบ/ 2 คัน/ 6คน	อัตโนมัติ 9 พาเลท/ รอบ/ 1 คัน	

ตารางที่ 2 แสดงผลการทำงานระหว่างรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ และรถโฟล์คลิฟท์คนขับในสภาพแวดล้อมคลังสินค้าจริง ซึ่งมีผลลัพธ์ที่น่าสนใจ คือ รถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยี UWB สามารถจัดการงานได้ 108 พาเลทต่อวัน ต่อ 1 คัน คิดเป็น 36% ของปริมาณงานทั้งหมด 300 พาเลท ในขณะที่รถโฟล์คลิฟท์คนขับสามารถจัดการงานได้ 192 พาเลทต่อวัน ต่อ 2 คัน โดยใช้คนขับทั้งหมด 6 คน แบ่งเป็น 3 กะ คิดเป็น 64% ของงานทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนคลังสินค้า

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานต่อหน่วยพบว่า แม้รถโฟล์คลิฟท์แบบคนขับจะมีผลผลิตรวมสูงกว่า โดยสามารถขนย้ายได้ 192 พาเลทต่อวัน จากการใช้งานรถจำนวน 2 คัน ขณะที่ระบบรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติใช้เพียง 1 คัน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพต่อคันพบว่า รถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงกว่า 12.5% โดยมีอัตราการขนย้าย 9 พาเลทต่อคัน ต่อชั่วโมง เทียบกับ 8 พาเลทต่อคัน ต่อชั่วโมง ของรถแบบคนขับ ความได้เปรียบดังกล่าวเกิดจากความสามารถในการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง 7 วันต่อสัปดาห์ โดยไม่ต้องหยุดพักหรือเปลี่ยนกะตามข้อกำหนดแรงงาน ในมิติของต้นทุนการดำเนินงาน การนำรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ 1 คัน มาทำงานร่วมกับรถโฟล์คลิฟท์แบบคนขับ 2 คัน ทำให้สามารถลดจำนวนพนักงานขับรถจาก 3 คน เหลือ 2 คน ส่งผลให้ประหยัดต้นทุนแรงงานได้ 791,675 บาทต่อปี ซึ่งประกอบด้วยเงินเดือน ค่าล่วงเวลา ค่าสวัสดิการ และเงินสมทบประกันสังคม นอกจากนี้ ระบบอัตโนมัติยังช่วยลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุและความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดของมนุษย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

1. ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการดำเนินงานคลังสินค้าตามตัวชี้วัด ILPI6C การประเมินต้นทุนการบริหารคลังสินค้าดำเนินการตามตัวชี้วัด ILPI6C ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคลังสินค้า จากข้อมูลของแผนกคลังสินค้าและฝ่ายบัญชีพบว่า บริษัทมีต้นทุนการบริหารคลังสินค้ารวม 6,227,469 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับยอดขาย 789,667,297 บาทต่อปี (กรมพัฒนาธุรกิจการค้า, ออนไลน์, 2565) คิดเป็นสัดส่วนต้นทุนการบริหารคลังสินค้าต่อยอดขายเท่ากับ 0.79%

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณสัดส่วนต้นทุนการบริหารคลังสินค้าต่อยอดขาย (Warehouse Cost Per Sales)

ตัวแปร	ILPI6C สัดส่วนต้นทุนการบริหารคลังสินค้าต่อยอดขาย (Warehouse Cost per Sales)	จำนวน (บาท/ ปี)	สัดส่วนของ ค่าใช้จ่ายจาก ต้นทุนรวม (%)
6C.1	เงินเดือนและค่าจ้างพนักงานแผนกคลังสินค้า	2,226,000	35.7
6C.2	ค่าเสื่อมราคาของอาคารคลังสินค้าตามที่ลงบัญชี (หากไม่ทราบให้ใช้มูลค่าก่อสร้างอาคารคลังสินค้าเฉลี่ย 20 ปี)	774,000	12.4
6C.3	ค่าเช่าพื้นที่คลังสินค้าภายนอก	ไม่มี	0
6C.4	ค่าประกันภัยอาคารคลังสินค้า (ตัวอาคารและวินาศภัย)	1,484,560	23.8
6C.5	ค่าเสื่อมราคาของอุปกรณ์ขนถ่าย (Material Handling Equipment) ทั้งหมดภายในคลังสินค้าที่เป็นทรัพย์สินของบริษัท (หากไม่ทราบให้ใช้มูลค่าอุปกรณ์ขนถ่ายเฉลี่ย 10 ปี)	ไม่มี	0
6C.6	ค่าเช่าอุปกรณ์ขนถ่าย (Material Handling Equipment) ทั้งหมดภายในคลังสินค้า	1,426,656	22.9

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ตัวแปร	ILPI6C สัดส่วนต้นทุนบริหารคลังสินค้าต่อยอดขาย (Warehouse Cost per Sales)	จำนวน (บาท/ ปี)	สัดส่วนของ ค่าใช้จ่ายจาก ต้นทุนรวม (%)
6C.7	ค่าเสื่อมราคาของระบบสารสนเทศการบริหารคลังสินค้า (Warehouse Management System) (หากไม่ทราบให้ ใช้มูลค่าระบบสารสนเทศการบริหารคลังสินค้าเฉลี่ย 5 ปี)	ไม่มี	0
6C.8	ค่าเช่าระบบสารสนเทศการบริหารคลังสินค้า	ไม่มี	0
6C.9	ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำประปา และ ค่าสาธารณูปโภคภายในคลังสินค้า	86,253	1.4
6C.10	ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ในคลังสินค้า เช่น ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ ขนถ่ายและระบบสารสนเทศการบริหารคลังสินค้า	230,000	3.7
รวม		6,227,469	100

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าเงินเดือนและค่าจ้างพนักงาน (6C.1) มีสัดส่วนสูงสุดที่ 2,226,000 บาท ต่อปี (35.7%) รองลงมาคือ ค่าประกันภัยอาคาร 1,484,560 บาทต่อปี (23.8%) และค่าเช่าอุปกรณ์ขนถ่าย 1,426,656 บาทต่อปี (22.9%) ซึ่งรวมกันคิดเป็น 82.4% ของต้นทุนทั้งหมด ส่วนต้นทุนรอง ได้แก่ ค่าเสื่อมราคา อาคาร 12.4% ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ 3.7% และค่าสาธารณูปโภค 1.4%

สูตรการคำนวณต้นทุนบริหารคลังสินค้าต่อยอดขายเป็นดังนี้

$$\text{ILPI6C (\%)} = [(6C.1 + 6C.2 + \dots + 6C.10) / \text{ยอดขายต่อปี}] \times 100$$

ผลการคำนวณสะท้อนว่าบริษัทมีประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าอยู่ในระดับดีอย่างไรก็ตาม ต้นทุนหลักที่สามารถบริหารจัดการเพื่อลดลงได้ คือ ต้นทุนแรงงาน (6C.1) และต้นทุนจากความผิดพลาดในการหยิบสินค้า

2. การเปรียบเทียบต้นทุนก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนการดำเนินงานคลังสินค้า

ต้นทุน	ก่อนปรับปรุง (บาท/ ปี)	หลังปรับปรุง (บาท/ ปี)	ผลต่าง (บาท/ ปี)	การเปลี่ยนแปลง
ต้นทุนพนักงานขับรถยก	2,226,000		-791,675	ลดลง ร้อยละ
	(6C.1) พนักงาน 6 คน	1,434,325	(6C.1 ลด พนักงาน 2 คน)	35.56
ต้นทุนที่เกิดจากความผิดพลาดในการหยิบสินค้าและสินค้าสูญหาย (เฉลี่ย)	7,500	0	-7,500	ลดลง ร้อยละ 100

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า หลังการลงทุนในระบบ UWB และรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ บริษัทสามารถลดต้นทุนสำคัญได้ 2 รายการ ได้แก่ ต้นทุนพนักงานขับรถโฟล์คลิฟท์ ลดจาก 2,226,000 บาทต่อปี (พนักงาน 6 คน) เหลือ 1,434,325 บาทต่อปี (พนักงาน 4 คน) คิดเป็นการประหยัด 791,675 บาทต่อปี หรือลดลง ร้อยละ 35.56 ต้นทุนจากความผิดพลาดในการหยิบสินค้าและสินค้าสูญหาย ลดจากค่าเฉลี่ย 7,500 บาทต่อปี เหลือ 0 บาท คิดเป็นการลดลง ร้อยละ 100

โดยรวม การใช้ระบบอัตโนมัติช่วยลดต้นทุนรวมได้ 799,175 บาทต่อปี ส่งผลให้สัดส่วนต้นทุนบริหารคลังสินค้าต่อยอดขายลดลงจาก ร้อยละ 0.79 เป็นร้อยละ 0.69 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน และศักยภาพของเทคโนโลยี UWB และรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติในการยกระดับประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าอย่างเป็นรูปธรรม

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินระบบติดตามอัจฉริยะแบบเรียลไทม์ โดยบูรณาการเทคโนโลยี Ultra-Wideband (UWB) ร่วมกับรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติ เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าอุตสาหกรรมขนาดแก้ว ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างเป็นรูปธรรม

ในด้านประสิทธิภาพการปฏิบัติงานพบว่า รถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติมีประสิทธิภาพต่อคันสูงกว่ารถโฟล์คลิฟท์แบบคนขับ โดยสามารถขนย้ายได้เฉลี่ย 9 พาเลทต่อคัน ต่อชั่วโมง เพิ่มขึ้น ร้อยละ 12.5 เมื่อเทียบกับระบบเดิม เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง 7 วันต่อสัปดาห์ โดยไม่ต้องหยุดพักหรือเปลี่ยนกะ ส่งผลให้กระบวนการขนย้ายและจัดเก็บสินค้ามีความต่อเนื่องและเป็นมาตรฐานมากขึ้น

ในด้านความแม่นยำและความปลอดภัย ระบบ UWB สามารถระบุตำแหน่งสินค้าและยานพาหนะได้แบบเรียลไทม์ ส่งผลให้ความผิดพลาดในการหยิบสินค้าและการจัดเก็บผิดตำแหน่งลดลงจนไม่พบมูลค่าความเสียหายจากสินค้าสูญหาย อีกทั้งระบบนำทางและหลีกเลี่ยงการชนของรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติยังช่วยลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุในการทำงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนตามกรอบ ILPI6C พบว่า หลังการปรับปรุงระบบ บริษัทสามารถลดต้นทุนแรงงานจากการลดจำนวนพนักงานขับรถโฟล์คลิฟท์ลงจาก 6 คน เหลือ 4 คน ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 791,675 บาทต่อปี และสามารถขจัดต้นทุนจากความผิดพลาดในการหยิบสินค้าได้ทั้งหมด ส่งผลให้ต้นทุนรวมลดลง 799,175 บาทต่อปี และทำให้สัดส่วนต้นทุนบริหารคลังสินค้าต่อยอดขายลดลงจาก ร้อยละ 0.79 เป็น ร้อยละ 0.69

โดยสรุป การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี UWB ร่วมกับรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติสามารถยกระดับคลังสินค้าไปสู่ระบบ Smart Warehouse ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมสู่ Industry 4.0 และสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและ SMEs ไทยต่อไปได้

อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การบูรณาการเทคโนโลยี Ultra-Wideband (UWB) ร่วมกับรถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติสามารถยกระดับประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในมิติด้านประสิทธิภาพ ความแม่นยำ ความปลอดภัย และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาทบทวนในวรรณกรรมที่ชี้ให้เห็นว่า UWB เป็นเทคโนโลยีระบุตำแหน่งภายในอาคารที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตร มีความเสถียร และเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมคลังสินค้าที่มีโลหะและสิ่งกีดขวางจำนวนมาก (Al-Okby, Junginger, Roddelkopf & Thurow, 2024; Wang, Sun, Zhang & Jin, 2024; Motroni, Buffi & Nepa, 2021) ในด้านประสิทธิภาพการดำเนินงานผลการศึกษาพบว่า รถโฟล์คลิฟท์อัตโนมัติมีประสิทธิภาพต่อคันสูงกว่ารถแบบคนขับ ร้อยละ 12.5 เนื่องจากสามารถทำงานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่ต้องหยุดพักหรือเปลี่ยนกะ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vorasawad, Park and Kim (2023) และ Wang, Sun, Zhang and Jin (2024) ที่ระบุว่า การใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะและการนำทางอัตโนมัติช่วยเพิ่มความต่อเนื่องและความสม่ำเสมอของการทำงานในคลังสินค้าอัจฉริยะ นอกจากนี้การลด Cycle Time และการลดงานซ้ำซ้อนยังสอดคล้องกับแนวคิดการปรับปรุงกระบวนการตามหลัก ECRS ที่มุ่งลดความสูญเปล่าและเพิ่มความคล่องตัวของกระบวนการ ในมิติด้านความแม่นยำและความปลอดภัย ระบบ UWB RTLS ที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำระดับ ± 5 เซนติเมตร ส่งผลให้ความผิดพลาดในการหยิบสินค้าและการสูญหายลดลงจนไม่พบมูลค่าความเสียหาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Monica and Ferrari (2021) และ Gnaś, Majerek, Styła, Adamkiewicz, Skowron, Sak-Skowron, Ivashko, Stokłosa and Pietrzyk (2024) ที่ชี้ว่าระบบ RTLS บนพื้นฐาน UWB ช่วยเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลตำแหน่งและลดความเสี่ยงด้านอุบัติเหตุในคลังสินค้าได้อย่าง

มีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ที่เพิ่มขึ้นจากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและโพลีคลิฟท์อัตโนมัติ ซึ่งสามารถต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี UWB ร่วมกับรถโพลีคลิฟท์อัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้ประกอบการควรเริ่มนำไปทดลองใช้ในรูปแบบนำร่องและบูรณาการร่วมกับระบบ WMS ควบคู่กับการพัฒนาทักษะบุคลากรด้านดิจิทัล ขณะเดียวกันภาครัฐควรมีมาตรการสนับสนุนการลงทุนด้าน Smart Warehouse สำหรับ SMEs ทั้งนี้ งานวิจัยในอนาคตควรขยายไปยังหลายอุตสาหกรรมและวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุนในระยะยาวเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.)

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาธุรกิจการค้า. (2565). คลังข้อมูลธุรกิจ. <https://datawarehouse.dbd.go.th/index>
- นฤมล ไชยโคตร, ภรปภากร อธิษฐานันท์, รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ และสิริเดช ชาตินิยม. (2560). การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฮิวริสติกส์ในการจัดการขนส่งสำหรับโรงงานกรณีศึกษาโรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 12(2), 168-177.
- สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.). (2566). แผนปฏิบัติการด้านการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2566-2570) ในส่วนของกระทรวงคมนาคม. https://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/PolicyPlan/25660427-Plan-Logi2566-2570.pdf
- สำนักงานปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม. (2566). แผนปฏิบัติราชการระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2566-2570) ของกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับทบทวนประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566. https://psd.industry.go.th/web-upload/83xeb2d8c561297c0393d3253145eb234fd/m_document/18769/92180/file_download/ea557693e0548f89e5187f5bdf716be0.pdf
- สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (กันยายน 2567). รายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทย ประจำปี 2566. <https://www.nesdc.go.th/wordpress/wp-content/uploads/2025/04/LogisticsReportTH-1.pdf>

- Al-Okby, M. F. R., Junginger, S., Roddelkopf, T., & Thurow, K. (2024). UWB-based real-time indoor positioning systems: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 14(23), 11005.
<https://doi.org/10.3390/app142311005>
- Asemi, A., Ko, A., & Nowkarizi, M. (2021). Intelligent libraries: A review on expert systems, artificial intelligence, and robot. *Library Hi Tech*, 39(2), 412-434.
<https://doi.org/10.1108/LHT-02-2020-0038>
- Benouakta, A., Ferrero, F., Lizzi, L., & Staraj, R. (2024). Advancements in industrial RTLSs: A technical review of UWB localization devices emphasizing antennas for enhanced accuracy and range. *Electronics*, 13(4), 751.
<https://doi.org/10.3390/electronics13040751>
- Bhandari, R. (2025, April). *Thailand Forklift Trucks Market (2025-2031) Size, Share, Value, Analysis, Revenue, Industry, Outlook, Trends, Growth & Segmentation*. 6Wresearch.
<https://www.6wresearch.com/industry-report/thailand-forklift-trucks-market-2020-2026>
- Cantini, A., De Carlo, F., & Tucci, M. (2020). Towards forklift safety in a warehouse: An approach based on the automatic analysis of resource flows. *Sustainability*, 12(21), 8949.
<https://doi.org/10.3390/su12218949>
- Carli, R., Dotoli, M., Digiesi, S., Facchini, F., & Mossa, G. (2020). Sustainable scheduling of material handling activities in labor-intensive warehouses: A decision and control model. *Sustainability*, 12(8), 3111.
<https://doi.org/10.3390/su12083111>
- Cramer, J. (2024, January 23). *Exploring the latest technologies in forklift safety*. Industrial Safety & Hygiene News.
<https://www.ishn.com/articles/114042-exploring-the-latest-technologies-in-forklift-safety>
- Gnaś, D., Majerek, D., Styła, M., Adamkiewicz, P., Skowron, S., Sak-Skowron, M., Ivashko, O., Stokłosa, J., & Pietrzyk, R. (2024). Enhanced indoor positioning system using ultra-wideband technology and machine learning algorithms for energy-efficient warehouse management. *Energies*, 17(16), 4125.
<https://doi.org/10.3390/en17164125>

- Grand View Research. (2026). *Warehouse Automation Market (2024 - 2030)*.
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/warehouse-automation-market-report>
- Guterres, A. (2023, July 10). *The Sustainable Development Goals report 2023: Special edition*. Sustainable Development Goals.
<https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>
- Khan, M. G., Huda, N. U., & Zaman, U. K. U. (2022). Smart warehouse management system: Architecture, real-time implementation and prototype design. *Machines*, 10(2), 150.
<https://doi.org/10.3390/machines10020150>
- Kudelska, I., & Niedbal, R. (2021). The Impact of organizational change on the improvement of the picking process in a logistics center - A Case Study. *European Research Studies Journal*, XXIV(2B), 882-892.
<https://doi.org/10.35808/ersj/2297>
- Luchetti, A., Carollo, A., Santoro, L., Nardello, M., Brunelli, D., Bosetti, P., & De Cecco, M. (2021). Human identification and tracking using ultra-wideband-vision data fusion in unstructured environments. *ACTA IMEKO*, 10(4), 124.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v10i4.1139
- Mahmutagić, E., Stević, Ž., Nunić, Z., Chatterjee, P., & Tanackov, I. (2021). An integrated decision-making model for efficiency analysis of the forklifts in warehousing systems. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 19(3), 537-553.
<https://doi.org/10.22190/FUME210416052M>
- McKinsey & Company. (2025, April 17). *Beyond automation: How gen AI is reshaping supply chains*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/beyond-automation-how-gen-ai-is-reshaping-supply-chains>
- Mikulla, D., Klotz, C., Ullrich, P., Weidmann, M., & Zepter, D. (2024, October 25). *Four bold moves for logistics service providers*. Boston Consulting Group.
<https://www.bcg.com/publications/2024/four-bold-moves-for-logistics-service-providers>
- Modica, T., Perotti, S., & Melacini, M. (2021). Green warehousing: Exploration of organisational variables fostering the adoption of energy-efficient material handling equipment. *Sustainability*, 13(23), 13237.
<https://doi.org/10.3390/su132313237>

- Molina, J. C., Eguia, I., & Racero, J. (2019). Reducing pollutant emissions in a waste collection vehicle routing problem using a variable neighborhood tabu search algorithm: A case study. *Top*, 27(2), 253-287.
- Monica, S., & Ferrari, G. (2021). Robust UWB-Based localization with application to automated guided vehicles. *Advanced Intelligent Systems*, 3(4), 2000083.
<https://doi.org/10.1002/aisy.202000083>
- Motroni, A., Buffi, A., & Nepa, P. (2021). Forklift tracking: industry 4.0 Implementation in large-scale warehouses through UWB sensor fusion. *Applied Sciences*, 11(22), 10607.
<https://doi.org/10.3390/app112210607>
- Nikkei Asia. (2022, September 13). *Thailand approves 5% to 8% minimum wage increase*.
https://asia.nikkei.com/economy/thailand-approves-5-to-8-minimum-wage-increase?utm_term=nikkei%20asia&utm_campaign=BA_Asia_keyword&utm_source
- Omlox Technology Consortium. (2025). *Locating technologies reimagined*. Omlox.
- SCM Champs. (2025). *166 Hours of Manual Labor Wasted Daily We Eliminated It in 6 Weeks*.
<https://www.scmchamps.com/blog/implementation-of-agv-amr-robotic-technologies-for-warehouse-management/>
- Šinko, S., Marinič, E., Poljanec, B., Obrecht, M., & Gajšek, B. (2022). Performance-Oriented UWB RTLS Decision-Making Approach. *Sustainability*, 14(18), 11456.
<https://doi.org/10.3390/su141811456>
- Tikwayo, L. N., & Mathaba, T. N. (2023). Applications of industry 4.0 technologies in warehouse management: A systematic literature review. *Logistics*, 7(2), 24.
<https://doi.org/10.3390/logistics7020024>
- Vorasawad, K., Park, M., & Kim, C. (2023). Efficient navigation and motion control for autonomous forklifts in smart warehouses: LSPB trajectory planning and MPC implementation. *Machines*, 11(12), 1050.
<https://doi.org/10.3390/machines11121050>
- Wang, Y., Sun, K., Zhang, W., & Jin, X. (2024). A velocity-adaptive mpc-based path tracking method for heavy-duty forklift AGVs. *Machines*, 12(8), 558.
<https://doi.org/10.3390/machines12080558>