

HOLDING COST REDUCTION BY APPLYING ABC-XYZ ANALYSIS COMBINED WITH FORECASTING: A CASE STUDY OF A TIRE DISTRIBUTION BUSINESS IN UDON THANI PROVINCE

Chotirot CHUENARROM¹ and Panutporn RUANGCHOENGCHUM^{1*}

1 College of Graduate Study in Management Khon Kaen University, Thailand; rpanut@kku.ac.th
(Corresponding Author)

ARTICLE HISTORY

Received: 9 June 2025

Revised: 23 June 2025

Published: 7 July 2025

ABSTRACT

This research aims to holding cost reduction by applying ABC-XYZ analysis combined with forecasting: a case study of a tire distribution business in Udon Thani Province. The study begins with the ABC-XYZ analysis to classify inventory items based on their value and demand variability to develop appropriate ordering plans. Subsequently, a suitable time-series forecasting model is evaluated by comparing the forecasting error metrics, including MAD, MSD, and MAPE, for inventory items in category AY, which have high value and consistent demand. The results from classifying 42 inventory items identified five groups: AY, AZ, BY, BZ, and CZ. Group AY was tested using four forecasting methods: 1) Double Exponential Smoothing, 2) Triple Exponential Smoothing, 3) Decomposition, and 4) ARIMA. The ARIMA technique demonstrated the highest accuracy, making it the most suitable for the context of this business. The findings indicate that the integration of ABC-XYZ analysis with ARIMA forecasting significantly improves the efficiency of ordering planning, inventory control, and inventory holding cost reduction. This approach provides a practical solution for businesses aiming to effectively manage and reduce inventory costs.

Keywords: Holding Cost, ABC-XYZ Analysis, Forecasting, Cost Reduction

CITATION INFORMATION: Chuenarrom, C., & Ruangchoengchum, P. (2025). Holding Cost Reduction by Applying ABC-XYZ Analysis Combined with Forecasting: A Case Study of a Tire Distribution Business in Udon Thani Province. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 3(7), 43

การลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบ เอบีซี-เอ็กซ์วายแซดร่วมกับการพยากรณ์: กรณีศึกษาธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี

โชติรส ชื่นอารมณ¹ และ ปณัฑพร เรืองเชิงชุม^{1*}

1 วิทยาลัยบัณฑิตศึกษาการจัดการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; rpanut@kku.ac.th (ผู้ประพันธ์บรรณกิจ)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดร่วมกับการพยากรณ์ กรณีศึกษาธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี โดยเริ่มจากการวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วาย เพื่อจำแนกประเภทสินค้าคงคลังตามมูลค่าและความผันผวนของความต้องการ เพื่อวางแผนการสั่งซื้ออย่างเหมาะสม จากนั้นจึงประเมินตัวแบบการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน ได้แก่ MAD, MSD และ MAPE สำหรับสินค้าคงคลังประเภท AY ซึ่งมีมูลค่าสูงและมีความต้องการสม่ำเสมอ ผลการจำแนกสินค้าคงคลัง 42 รายการ พบ 5 กลุ่ม ได้แก่ AY, AZ, BY, BZ และ CZ โดยกลุ่ม AY ทดสอบด้วย 4 เทคนิคการพยากรณ์ ได้แก่ 1) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง 2) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสามครั้ง 3) การแยกส่วนประกอบ 4) เทคนิค ARIMA พบว่าเทคนิค ARIMA ให้ความแม่นยำสูงสุดจึงเหมาะสมกับบริบทของธุรกิจนี้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ ABC-XYZ ร่วมกับการพยากรณ์ ARIMA ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผนการสั่งซื้อ ควบคุมปริมาณสินค้าคงคลัง และการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังได้อย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นแนวทางที่สามารถประยุกต์ใช้กับธุรกิจที่ต้องจัดการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังที่มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การจัดเก็บสินค้าคงคลัง, การวิเคราะห์ ABC-XYZ, การพยากรณ์, การลดต้นทุน

ข้อมูลอ้างอิง: โชติรส ชื่นอารมณ และ ปณัฑพร เรืองเชิงชุม. (2568). การลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดร่วมกับการพยากรณ์: กรณีศึกษาธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 3(7), 43

บทนำ

ปัจจุบันปริมาณการใช้รถยนต์ของประชาชนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในกลุ่มวัยเรียนและวัยทำงาน ประกอบกับการแข่งขันของผู้ประกอบการที่มุ่งพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตรถยนต์เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ส่งผลให้การใช้รถยนต์ในประเทศไทยมีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาจากความสะดวกในการเดินทาง และข้อจำกัดของระบบขนส่งสาธารณะ ทำให้จำนวนรถยนต์จดทะเบียนในปี พ.ศ.2566 เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.26 (กลุ่มสถิติ การขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก, 2567) การเติบโตดังกล่าวมีผลต่อการขยายตัวของธุรกิจบริการด้านดูแล และบำรุงรักษารถยนต์ เช่น ยางรถยนต์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในการขับขี่ โดยทั่วไปยางรถยนต์มีอายุการใช้งานประมาณ 2-4 ปี หรือ 50,000 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับลักษณะการขับขี่และสภาพถนน (ค็อกพิทสามไทย, 2567) ยางรถยนต์ยังเป็นสินค้าที่มีคุณลักษณะเฉพาะด้านขนาด รุ่น และยี่ห้อ ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องมีสินค้าคงคลังหลากหลายเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สถานการณ์เศรษฐกิจในประเทศส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการบริโภค โดยประชาชนมีแนวโน้มชะลอการใช้จ่าย และยืดอายุการใช้งานสินค้าทุนออกไป (ศูนย์พยากรณ์เศรษฐกิจและธุรกิจ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2567) ส่งผลต่อการแข่งขันในธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์ นอกจากนี้ความสำเร็จขององค์กรไม่ได้ขึ้นอยู่กับการบริหารจัดการทรัพยากรทางธุรกิจที่มีประสิทธิภาพเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการปรับตัวและตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและความต้องการของตลาดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกด้วย (Sublom et al., 2025) ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการต้องให้ความสำคัญกับการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันอย่างยั่งยืน

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า (Seesom & Ruangchoengchum, 2024) รวมถึงการประยุกต์เทคนิคต่างๆ ในการจัดการคลังสินค้า อาทิเช่น การวิเคราะห์เอบีซี รวมถึงการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุดและจุดสั่งซื้อใหม่ (ธัญชนก จันทรหอม, 2564) การวิเคราะห์เอบีซี-เอ็กซ์วายแซด (Venkatesh & Sowmiya, 2024; Borowiak, 2025) การพยากรณ์ด้วยการกำหนดปริมาณคลังสินค้า (Purnamasari et al., 2023) แต่ส่วนน้อยยังไม่ได้ศึกษาการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดร่วมกับการพยากรณ์ โดยเฉพาะธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์ในจังหวัดอุดรธานี ด้วยเหตุนี้วัตถุประสงค์ผู้วิจัยจึงกำหนดเพื่อ 1) ศึกษาการจัดการกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซด และ 2) ศึกษาตัวแบบการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสมกับสินค้าคงคลังของธุรกิจยางรถยนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ประกอบการในธุรกิจยางรถยนต์ รวมถึงธุรกิจอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

การทบทวนวรรณกรรม

การจัดการสินค้าคงคลัง (Inventory Management) เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้ธุรกิจดำเนินการได้อย่างราบรื่น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อรักษาระดับสินค้าคงคลังให้เหมาะสมกับความต้องการของลูกค้าและประสิทธิภาพในการผลิต การบริหารสินค้าคงคลังมีทั้งข้อดีและความท้าทาย เพราะการมีสินค้าคงคลังมากเกินไปจะก่อให้เกิดต้นทุนการจัดเก็บสูง รวมถึงปัญหาสินค้าหมดอายุหรือเสื่อมสภาพ ขณะเดียวกันการมีสินค้าคงคลังน้อยเกินไปก็อาจทำให้ธุรกิจไม่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ทันเวลา จึงต้องมีการวางแผนที่ดีในการจัดการสินค้าคงคลังให้สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทาน (ศิริลักษณ์ แก้วนวล และคณะ, 2565) ในขณะที่ Heizer et al. (2022) กล่าวถึง การจัดการคลังสินค้าเป็นส่วนสำคัญของการจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน โดยมุ่งเน้นในการจัดเก็บ จัดเรียง และควบคุมสินค้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้การบริหารสินค้าคงคลังที่ดีมีผลต่อการลดต้นทุนและเพิ่มกำไร เนื่องจากการจัดการที่มีประสิทธิภาพช่วยลดการสูญเสียจากสินค้าที่หมดอายุ เสื่อมสภาพ หรือสูญหาย ขณะเดียวกันก็สามารถรักษาระดับสินค้าคงคลังให้อยู่ในระดับที่สามารถรองรับความต้องการของลูกค้าได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ การวางแผนสินค้าคงคลังที่ดีจะทำให้สามารถใช้ทรัพยากรในรูปของเงินทุน

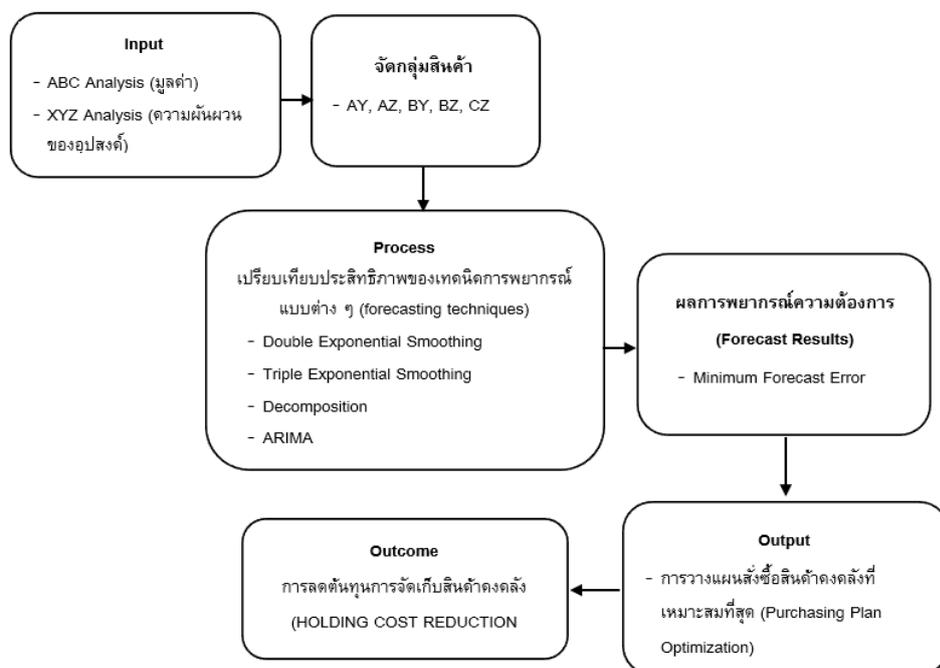
ที่จมอยู่ในสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยหลักการในการบริหารสินค้าคงคลังนั้นควรคำนึงถึงการสร้างสมดุลระหว่างความต้องการของลูกค้าและต้นทุนการจัดเก็บสินค้า ซึ่งจะต้องใช้เทคโนโลยีและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อลดความเสี่ยงจากการขาดแคลนสินค้าหรือการเก็บสินค้ามากเกินไป ทั้งนี้การพัฒนาระบบการบริหารสินค้าคงคลังที่มีประสิทธิภาพจะช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและสร้างความพึงพอใจสูงสุดให้แก่ลูกค้าในระยะยาว (Seesom & Ruangchoengchum, 2024) ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า เพื่อเพิ่มผลลัพธ์ให้ดีขึ้น หรือลดการสูญเสียจากการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เท่าเดิมหรือลดลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการบำรุงรักษาและปรับปรุงกระบวนการโดยลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น ลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานให้เสร็จสิ้น การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่ให้มากที่สุด รวมถึงระยะเวลา แรงงาน วัสดุ และเทคโนโลยี เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ การเพิ่มผลผลิตต่อหน่วยของทรัพยากรที่ใช้โดยการเพิ่มความเร็ว ความแม่นยำ และความถูกต้องในการดำเนินงาน การเพิ่มขีดความสามารถในการประสานงานและความร่วมมือทางธุรกิจในกระบวนการจัดการซัพพลายเชนเพื่อปรับปรุงกระบวนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กระบวนการลดระยะเวลาการจัดส่งสินค้า การอบรมและพัฒนาทักษะ ความรู้ของพนักงานเพื่อให้ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเต็มใจ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพจะช่วยให้องค์กรสามารถลดต้นทุนในการดำเนินธุรกิจได้ โดยการลดการสูญเสียและการใช้ทรัพยากรที่ไม่จำเป็น เช่น เวลา แรงงาน วัสดุ ลดข้อบกพร่อง เพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า และเพิ่มความแข็งแกร่งและยั่งยืนขององค์กรในการแข่งขันทางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Schreibfeder, 2017)

การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซด (ABC-XYZ Analysis) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจัดการสินค้าคงคลัง โดยการผสมผสานการวิเคราะห์ทั้งมิติของสำคัญของสินค้าตามมูลค่า (ABC) และมิติของความผันผวนของความต้องการ (XYZ) เพื่อให้การจัดการสินค้าคงคลังมีความเหมาะสมกับลักษณะของสินค้าแต่ละประเภท ซึ่งทำให้ผู้จัดการสามารถกำหนดกลยุทธ์การจัดการสินค้าที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยที่ประเภทสินค้าในกลุ่ม AX คือ สินค้าที่มีมูลค่าสูงและมีความต้องการสม่ำเสมอ ความผันผวนของความต้องการต่ำ การพยากรณ์สามารถทำได้อย่างแม่นยำ การจัดการควรรักษาระดับสินค้าคงคลังอย่างต่อเนื่องและใช้ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมเพื่อให้บริการที่มีคุณภาพสูงสุด ส่วน AY เป็นสินค้าที่มีมูลค่าสูงแต่มีความผันผวนของความต้องการปานกลาง การจัดการควรใช้การทบทวนสินค้าตลอดเวลาและตั้งระดับการให้บริการที่เหมาะสม ในขณะที่ AZ เป็นสินค้าที่มีมูลค่าสูงและความผันผวนสูง ซึ่งการพยากรณ์ทำได้ยาก การจัดการสินค้าประเภทนี้ควรมีการสำรองสินค้าในปริมาณน้อยเพื่อลดความเสี่ยง สำหรับประเภทสินค้า BX และ BY มีมูลค่าปานกลาง โดย BX มีความต้องการสม่ำเสมอและสามารถพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำ ขณะที่ BY มีความต้องการไม่สม่ำเสมอและการพยากรณ์ความต้องการมีความเที่ยงตรงต่ำ การจัดการสินค้าทั้งสองประเภทควรใช้การทบทวนสินค้าตลอดเวลา และ BZ เป็นสินค้าที่มีมูลค่าปานกลางและความต้องการผันผวนสูง การจัดการสินค้าประเภทนี้ควรใช้การทบทวนสินค้าตลอดเวลาเช่นกัน ในขณะที่ CX เป็นสินค้าที่มีมูลค่าต่ำและความต้องการสม่ำเสมอ การจัดการสินค้าคงคลังประเภทนี้ควรใช้การสั่งซื้อแบบช่วงเวลาเดียว และการสั่งซื้อเป็นรายไตรมาสหรือรายปี โดยควบคุมสินค้าคงคลังให้อยู่ในปริมาณต่ำเพื่อลดต้นทุน การจัดการสินค้าคงคลังในกลุ่ม CY และ CZ ที่มีมูลค่าต่ำและความผันผวนสูง จำเป็นต้องใช้การทบทวนตามรอบการจัดเก็บสินค้าโดยเฉพาะและรักษาระดับการให้บริการที่เหมาะสม การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดมีประโยชน์ในหลายด้าน ได้แก่ การช่วยเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ความต้องการสินค้า การปรับปรุงความเสถียรของกระบวนการผลิต และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า โดยเฉพาะการจัดสรรพื้นที่การจัดเก็บที่เหมาะสม การลดต้นทุนการจัดเก็บ และการเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ความต้องการ ดังนั้นการวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดช่วยให้การจัดการสินค้าคงคลังมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และช่วยให้การตัดสินใจในการจัดเก็บสินค้าและการจัดการสินค้าคงคลังในระดับต่างๆ มีความเหมาะสม สอดคล้องกับลักษณะของสินค้าและความผันผวนของความต้องการสินค้าของแต่ละประเภท เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา (Time Series Forecasting) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสูงในการประเมินแนวโน้มของความต้องการในอนาคต โดยเฉพาะในกลุ่มสินค้าที่มีพฤติกรรมซ้ำซากหรือมีฤดูกาลชัดเจน ได้แก่ 1) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง (Double Exponential Smoothing or Holt's Method) 2) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสามครั้ง (Triple Exponential Smoothing or Holt-Winters Method) 3) การแยกส่วนประกอบ (Decomposition) 4) เทคนิค ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) ซึ่งแต่ละวิธีมีคุณลักษณะการทำงานที่เหมาะสมกับรูปแบบข้อมูลต่างกัน เพื่อตัดสินใจเลือกเทคนิคที่เหมาะสมที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยทั่วไปนิยมใช้ 3 ตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ 1) ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Deviation: MAD) 2) ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Squared Deviation: MSD) 3) ค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ตัวชี้วัดเหล่านี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองต่างๆ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการพยากรณ์สินค้าที่มีความสำคัญสูง เช่น สินค้ากลุ่ม AY ซึ่งต้องการระดับความแม่นยำในการพยากรณ์สูงสุด (Makridakis et al., 1998).

จากการทบทวนวรรณกรรมสามารถสรุปเป็นกรอบแนวคิดการวิจัย (ภาพที่ 1) การวิจัยครั้งนี้มีกรอบแนวคิดที่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์สินค้าคงคลังแบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดร่วมกับการพยากรณ์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการสั่งซื้อและลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ข้อมูลสินค้าคงคลังด้วย การวิเคราะห์ ABC (วิเคราะห์ตามมูลค่า) และการวิเคราะห์ XYZ (วิเคราะห์ตามความผันผวนของความต้องการ) เพื่อจัดกลุ่มสินค้าออกเป็นประเภทต่างๆ ซึ่งจะสะท้อนถึงระดับความสำคัญและความไม่แน่นอนในการบริหารจัดการสินค้าแต่ละประเภท จากนั้นจะนำข้อมูลสินค้าแต่ละกลุ่ม โดยเฉพาะกลุ่มที่มีความสำคัญสูง (AY Group) มาดำเนินการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการพยากรณ์แบบต่างๆ ได้แก่ การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสามครั้ง การแยกส่วนประกอบ และ ARIMA เพื่อเลือกเทคนิคที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด นำไปสู่การวางแผนการสั่งซื้อสินค้า ผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์จะช่วยเสริมประสิทธิภาพการจัดการสินค้าคงคลัง ซึ่งลดต้นทุนที่ไม่จำเป็นต่อไป

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ รายการสินค้าขยายนต์ จำนวน 42 รายการ โดยเก็บข้อมูลยอดขาย, รายการสั่งซื้อ และต้นทุนสินค้าคงคลัง ครอบคลุมระยะเวลา 36 เดือน (มกราคม พ.ศ.2565-ธันวาคม พ.ศ.2567) จากระบบบัญชีของธุรกิจ ซึ่งถือเป็นข้อมูลทุติยภูมิที่สะท้อนพฤติกรรมการจัดเก็บสินค้าคงคลังจริง

การเก็บรวบรวมข้อมูล ดำเนินการรวบรวมข้อมูลจากเอกสารภายในของธุรกิจ และศึกษาข้อมูลทุติยภูมิจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสินค้าคงคลัง การวิเคราะห์ ABC-XYZ และเทคนิคการพยากรณ์อนุกรมเวลา เพื่อใช้เป็นกรอบในการออกแบบกระบวนการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ข้อมูล กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการเป็นขั้นตอน ดังนี้

- 1) การจัดกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์ ABC-XYZ โดยวิเคราะห์มูลค่าการใช้งานรวมต่อปี แบ่งเป็นกลุ่ม A (80%), B (15%) และ C (5%) ตามหลัก Pareto และการวิเคราะห์ XYZ วิเคราะห์ความผันผวนของความต้องการ โดยคำนวณ Coefficient of Variation (CV) จากยอดขายรายเดือน และแบ่งเป็นกลุ่ม X, Y และ Z
- 2) การเลือกกลุ่มสินค้าเป้าหมายสำหรับการพยากรณ์ โดยเลือกกลุ่ม AY (มูลค่าสูง + ความมั่นคงของความต้องการปานกลาง) ซึ่งมีความสำคัญต่อธุรกิจ โดยเป็นกลุ่มที่มีมูลค่าการจัดเก็บสูงสุด ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนสินค้าคงคลัง และผลกระทบต่อกระแสเงินสดของธุรกิจ
- 3) การทดสอบเทคนิคการพยากรณ์ โดยใช้ข้อมูลยอดขายของกลุ่ม AY เพื่อทดสอบ 4 เทคนิคการพยากรณ์อนุกรมเวลา ได้แก่ 1) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง 2) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสามครั้ง 3) การแยกส่วนประกอบ 4) เทคนิค ARIMA
- 4) การเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 21.4.1 ในการวิเคราะห์ประเมินความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ MAD, MSD และ MAPE เพื่อเลือกแบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด สำหรับการวางแผนการสั่งซื้อสินค้าในกลุ่มนั้น

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดการลดต้นทุนสินค้าคงคลัง โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอ็กซ์-เอ็กซ์วายแซด ร่วมกับการพยากรณ์อนุกรมเวลา ในธุรกิจจำหน่ายขยายนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี ผลการวิจัยสามารถสรุปได้เป็น 2 ส่วนสำคัญ ดังนี้

ผลการจัดกลุ่มสินค้าด้วยการวิเคราะห์ ABC-XYZ

ข้อมูลขยายนต์ย้อนหลัง 3 ปี (ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ.2565-เดือนธันวาคม พ.ศ.2567) จำนวน 42 รายการ ผลการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์ ABC มีสินค้าประเภท A มีจำนวน 22 รายการ มีมูลค่ารวม 14,283,700.68 บาท คิดเป็นร้อยละ 78.49 ของมูลค่ารวมทั้งหมด สินค้าประเภท B มีจำนวน 12 รายการ มีมูลค่ารวม 2,853,483.47 บาท คิดเป็นร้อยละ 15.68 ของมูลค่ารวมทั้งหมด สินค้าประเภท C มีจำนวน 8 รายการ มีมูลค่ารวม 1,060,222.38 บาท คิดเป็นร้อยละ 5.83 ของมูลค่ารวมทั้งหมด (ตารางที่ 1) ผลการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์ XYZ ไม่มีสินค้าคงคลังประเภท X มีสินค้าคงคลังประเภท Y จำนวน 3 รายการ คิดเป็นร้อยละ 7.14 และเป็นสินค้าคงคลังประเภท Z มีจำนวน 39 รายการ คิดเป็นร้อยละ 92.86 (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 ผลการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์ ABC

กลุ่มสินค้า	มูลค่าการสั่งซื้อสินค้า	มูลค่าสะสม (ร้อยละ)	จำนวนรายการสินค้า
A	14,283,700.68	78.49	22
B	2,853,483.47	15.68	12
C	1,060,222.38	5.83	8
รวม	18,197,406.52	100	42

ตารางที่ 2 ผลการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์ XYZ

กลุ่มสินค้า	มูลค่าการสั่งซื้อสินค้า	มูลค่าสะสม (ร้อยละ)	จำนวนรายการสินค้า
X	-	-	-
Y	1,948,272.49	10.71	3
Z	16,249,134.03	89.29	39
รวม	18,197,406.52	100.00	42

เมื่อนำผลการศึกษาการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังมารวมกันด้วยการวิเคราะห์ XYZ พบว่า มีสินค้าคงคลังจำนวน 42 รายการ เป็นสินค้ากลุ่ม AY จำนวน 2 รายการ สินค้ากลุ่ม AZ จำนวน 20 รายการ สินค้ากลุ่ม BY จำนวน 1 รายการ สินค้ากลุ่ม BZ จำนวน 11 รายการ และสินค้ากลุ่ม CZ จำนวน 8 รายการ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ผลการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์ ABC-XYZ

กลุ่ม	X	Y	Z	รวม
A	0	2	20	22
B	0	1	11	12
C	0	0	8	8
รวม	0	3	39	42

ผลการศึกษาตัวแบบการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสม

ผลการเลือกกลุ่มสินค้าเป้าหมายพบว่า กลุ่ม AY มูลค่าสูงและความต้องการระดับปานกลางถูกเลือกเป็นกลุ่มเป้าหมายหลักในการพยากรณ์ เนื่องจากมีผลกระทบสูงต่อต้นทุนสินค้าคงคลังและกระแสเงินสดของธุรกิจ จึงดำเนินการทดสอบเทคนิคการพยากรณ์อนุกรมเวลา (ตารางที่ 4) ได้แก่ 1) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง 2) การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสามครั้ง 3) การแยกส่วนประกอบ 4) เทคนิค ARIMA เมื่อประเมินประสิทธิภาพด้วย MAD, MSD, MAPE พบว่า ARIMA (0,0,1) เป็นแบบจำลองที่ให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำที่สุด (MAPE = 23.37%) จึงสรุปได้ว่า เทคนิค ARIMA (0,0,1) ให้ผลการพยากรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด โดยเฉพาะค่า MAPE ต่ำกว่ารูปแบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญ จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้วางแผนการสั่งซื้อในกลุ่มสินค้า AY ของธุรกิจนี้ เนื่องจากข้อมูลยอดขายของกลุ่ม AY มีลักษณะแนวโน้ม (Trend) ที่ชัดเจน และมี Seasonality ต่ำ ซึ่ง ARIMA สามารถ Modeling ได้อย่างแม่นยำกว่าเทคนิคการพยากรณ์อื่นๆ

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแบบแต่ละวิธีจากผลการพยากรณ์ทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบการพยากรณ์	ค่าความคลาดเคลื่อน		
	MAPE	MAD	MSD
การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสองครั้ง ($\alpha = 0.2$ และ $\gamma = 0.2$)	53.05	4.41	30.08
การปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซ้ำสามชั้น ($\alpha = 0.2$ $\gamma = 0.2$ $\delta = 0.2$)	41.91	3.84	25.25
การแยกส่วนประกอบ	40.54	3.64	22.84
เทคนิค ARIMA (0,0,1)	23.37	2.03	6.68

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ ABC-XYZ ร่วมกับเทคนิคการพยากรณ์แบบ ARIMA ในการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังของธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์ในจังหวัดอุดรธานี โดยกระบวนการวิเคราะห์ที่ได้ช่วยจัดกลุ่มสินค้าให้มีความเหมาะสมต่อการวางแผนสั่งซื้อและควบคุมสต็อก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่ม AY ซึ่งเป็นกลุ่มสินค้าที่มีมูลค่าสูงและมีความต้องการในระดับที่มีความเสถียร จากการทดสอบเทคนิคการพยากรณ์ทั้ง 4 รูปแบบ พบว่า ARIMA (0,0,1) เป็นแบบจำลองที่ให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำที่สุด การนำผลการพยากรณ์ไปใช้ในการวางแผนสั่งซื้อสินค้า สามารถลดต้นทุนการสั่งซื้อสินค้าได้จากเดิม 8.76% คิดเป็นจำนวนเงิน 42,200 บาท ทำให้สามารถลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Swastomo et al. (2020), Stevic and Merima (2021), Pandya and Thakkar (2016) และ Seesom and Ruangchoengchum (2024) แสดงให้เห็นว่า การจัดกลุ่มสินค้าแบบการวิเคราะห์ ABC-XYZ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังได้จริง และสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมเพื่อเสริมการตัดสินใจในการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังของธุรกิจ ในส่วนของเทคนิคการพยากรณ์ ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับงานของ Fattah et al. (2018) และ Jadhav et al. (2017) ที่ชี้ให้เห็นว่า ARIMA model เป็นเครื่องมือที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงในการพยากรณ์ความต้องการสินค้าในภาคธุรกิจจริง โดยเฉพาะสินค้าที่มีแนวโน้ม (Trend) ชัดเจนและไม่มี seasonality สูง ข้อค้นพบจากงานวิจัยนี้มีความสำคัญเชิงปฏิบัติในบริบทของธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์ เนื่องจากยางรถยนต์เป็นสินค้าที่มีต้นทุนต่อหน่วยสูง และมีข้อจำกัดด้านอายุการเก็บรักษาการมีแบบจำลองที่สามารถพยากรณ์ความต้องการได้อย่างแม่นยำจึงช่วยลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังเกิน และยังช่วยเสริมความคล่องตัวทางการเงินให้กับธุรกิจได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับ Zabinska and Czaplicka Kalaman (2020), ยุทธนา เศรษฐฐาโมทย์ และ สมพร บันโกษา (2566) โดยสรุปผลการวิจัยยืนยันว่า การผสมผสานเทคนิค ABC-XYZ Analysis กับ Time Series Forecasting (ARIMA) เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง และเสริมขีดความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พัฒนพงศ์ กุณสิน และ อนุพงศ์ สุขประเสริฐ (2567) ที่พบว่าการเลือกเทคนิคพยากรณ์ที่เหมาะสมช่วยให้สามารถวางแผนสินค้าที่มีความผันผวนได้แม่นยำขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนในการตัดสินใจทางธุรกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพ Jadhav et al. (2017) แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการพยากรณ์ที่ใช้โมเดลทางสถิติ เช่น ARIMA และ SARIMA สามารถประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ราคาสินทรัพย์และการทำนายราคาในตลาดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ และผลการวิจัยของ Venkatesh & Sowmiya (2024) ที่ชี้ให้เห็นว่าการนำเทคนิค ABC-XYZ มาผสมผสานกับการพยากรณ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารสินค้าคงคลังได้อย่างชัดเจนอย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการ ดังเช่น การใช้ข้อมูลจากธุรกิจเดียวทำให้ข้อค้นพบอาจไม่สามารถใช้กับธุรกิจทุกประเภทได้ นอกจากนี้ ควรมีการทดสอบเชิงลึกกับกลุ่ม AZ BY BZ และ CZ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในกลุ่มสินค้าที่มีลักษณะความผันผวนของความต้องการ (demand volatility) แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะที่ได้รับจากการวิจัย

จากผลการลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซดร่วมกับการพยากรณ์ กรณีศึกษาธุรกิจจำหน่ายยางรถยนต์แห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

- 1) ธุรกิจควรมีระบบบันทึกการขายการซื้อและขายสินค้า เพื่อนำข้อมูลในอดีต มาประยุกต์ใช้ในการวางแผน จัดการสินค้า และการบันทึกค่าใช้จ่าย ต้นทุนในการสั่งซื้อ ขนส่ง จัดเก็บตลอดจนต้นทุนในการดำเนินการ เป็นส่วนช่วยชี้ให้เห็นภาพถึงรวมของการทำงาน มองเห็นปัญหาและสาเหตุว่าควรปรับปรุง แก้ไขนโยบายการบริหารจัดการให้เหมาะสมกับสถานการณ์ในปัจจุบันได้
- 2) ธุรกิจควรลงทุนในการเลือกใช้โปรแกรมพยากรณ์ข้อมูลเชิงลึกทางธุรกิจ เพื่อความสะดวก รวดเร็ว ความถูกต้อง แม่นยำของข้อมูล ตลอดจนเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน สร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันได้อย่างยั่งยืน
- 3) ธุรกิจควรจัดระบบการสั่งซื้อสินค้าคงคลังที่มีมาตรฐานเดียวกัน ให้ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซี-เอ็กซ์วายแซด ร่วมกับการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาและฝึกอบรมการดำเนินงานจัดการสินค้าคงคลังรูปแบบใหม่ ให้แก่พนักงานฝ่ายสั่งซื้อ เพื่อปรับปรุงกระบวนการสั่งซื้อให้มีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมต้นทุนสั่งซื้อสินค้าคงคลังให้ลดลงได้

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

- 1) ศึกษาการพยากรณ์รูปแบบอื่นเพิ่มเติม เช่น การพยากรณ์โดยการวิเคราะห์หาแนวโน้ม (Trend Analysis) และพยากรณ์โดยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เปรียบเทียบกับค่าการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาเพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์รูปแบบต่างๆ เพื่อหาค่าพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่สุด
- 2) นำเรื่องการบริหารปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (Economic Order Quantity: EOQ) จุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder Point: ROP) และสต็อกเพื่อความปลอดภัย (Safety Stock) มาศึกษาต่อยอดจากการพยากรณ์ เพื่อช่วยเป็นแนวทางในการวางแผนการจัดการสินค้าคงคลัง และควบคุมต้นทุนและปริมาณสินค้าคงคลังของธุรกิจ
- 3) วิเคราะห์ช่องทางการจำหน่ายเพิ่มเติม เพื่อศึกษาหาช่องทางที่สร้างรายได้มากที่สุด มาจากช่องทางใด และนำมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนจัดการ สั่งซื้อสินค้าที่เฉพาะเจาะจงละเอียดมากขึ้น โดยศึกษาช่องทางการขายระหว่างธุรกิจกับผู้บริโภค (Business-to-Customer: B2C) และช่องทางการขายระหว่างธุรกิจกับธุรกิจ (Business-to-Business: B2B) และช่องทางการขายระหว่างธุรกิจและธุรกิจไปสู่ผู้บริโภค (Business-to-Business-to-Customer: B2B2C)
- 4) การศึกษาต่อยอดเรื่องการสั่งซื้อเพื่อเติมเต็มสินค้า (Replenishment) ร่วมกับการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ตั้งแต่การติดตามตรวจนับสินค้า ด้วยการใช้ระบบบาร์โค้ด (Barcode) และการกำหนดนโยบายเติมเต็มสินค้าที่เหมาะสมกับสินค้าแต่ละประเภท เช่น การเติมเต็มสินค้าเมื่อสินค้าเกิดการขาดแคลน (Shortage) หรือการเติมสินค้าเมื่อสินค้าต่ำกว่าปริมาณต่ำที่สุดที่กำหนดไว้ (Minimum Stock) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก. (2567). รายงานสถิติการขนส่งของประเทศไทยปี 2566. กรมการขนส่งทางบก.
- คือกพิทสามไทย. (2567). ข้อควรรู้เกี่ยวกับการใช้ยางรถยนต์อย่างวิธี. สืบค้นจาก <https://cockpit.co.th/post/1797/ข้อควรรู้-เกี่ยวกับการใช้ยางรถยนต์อย่างวิธี>.
- พัฒนพงศ์ กุมสิน และ อนุพงษ์ สุขประเสริฐ. (2567). การพยากรณ์ราคาหลักทรัพย์ กลุ่มอุตสาหกรรมทรัพยากร โดยใช้เทคนิคการเรือนรูของเครื่อง. วารสารวิทยาลัยบัณฑิตศึกษากิจการมหาวิทยาลัยขอนแก่น, 18(1), 160-181.

- ศิริลักษณ์ แก้วนวล, ศักดิ์ชาย รักรการ และ สำเรึง เนตรภู. (2565). การจัดการสินค้าคงคลัง กรณีศึกษาบริษัทรับเหมาติดตั้งระบบดับเพลิงภายในอาคาร. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช*, 21(2), 45-54.
- ศูนย์พยากรณ์เศรษฐกิจและธุรกิจ. (2567). *การวิเคราะห์สถานการณ์เศรษฐกิจไทย (ฉบับพิเศษ)*. มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.
- Fattah, M., Ezzine, M., Aman, H., Moussami, M., & Lachhab, A. (2018). Demand forecasting using ARIMA model for food production planning. *Journal of Food Science*, 40(2), 20-25.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2022). *Operations Management Sustainability and Supply Chain Management*. 14th ed. Pearson Publisher.
- Jacek Borowiak. (2025). Application of ABC and XYZ methods to inventory management of automotive spare parts and consumable materials. *Journal of Civil Engineering and Transport*, 7(3), 141-149.
- Jadhav, V., Chinnappa Reddy, B. V., & Gaddi, G. M. (2017). Application of ARIMA model for forecasting agricultural commodity prices. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19(5), 981-992.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and applications*. 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Pandya, B., & Thakkar, H. (2016). A review on inventory management control techniques: ABC-XYZ analysis. *REST Journal on Emerging trends in Modelling and Manufacturing*, 2(3), 82-86.
- Purnamasari, D. I., Permadi, V. A., Saefudin, A., & Agusdin, R. P. (2023). Demand forecasting for improved inventory management in small and medium-sized businesses. *JANAPATI*, 12(1), 56-66.
- Schreibfeder, J. (2017). *Achieving effective inventory management*. 6th ed. Effective Inventory Management.
- Stevic, Z., & Bascelija, M. (2021). ABC/XYZ inventory management model in a construction material warehouse. *Alphanumeric Journal*, 9(2), 326-334.
- Sublom, P., Leecharoen, B., & Sangthong, T. (2025). Drivers of high-performing logistics: An Asian perspective on organizational success in Thailand. *Asian Administration and Management Review*, 8(1), Article 24.
- Swastomo, P., Widiadivito, D., & Parung, A. (2020). An empirical study on ABC-XYZ inventory analysis for effective supply chain management. *International Journal of Business and Economics*, 25(3), 100-110.
- Seesom, T., & Ruangchoengchum, P. (2024). Enhancing Online Warehouse Management Efficiency with ABC-XYZ Analysis and Forecasting Techniques: A Case Study in Thailand's Automotive Accessories Sector. *Pakistan Journal of Life & Social Sciences*, 22(1), 1937.
- Venkatesh, P., & Sowmiya, P. (2024). ABC-XYZ classification and forecasting for inventory optimization. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(12), 5348-5357.
- Zabinska, I., & Czaplicka Kalaman, P. (2020). Improving the management of storage stock in the tire industry using the example of a selected company. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 3(1), 548-558.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Conflicts of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.



Copyright: © 2025 by the authors. This is a fully open-access article distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).