



บทความวิจัย (Research Article)

แบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลัง  
แบบหลายคลังสินค้าสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย  
A Mixed-Integer Nonlinear Programming Model for the Multi-Depot Inventory  
Routing Problem with Perishable Products

เกวลิน หยีสัน<sup>1</sup> เอื้ออารี บุญเพิ่ม<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12120

Kevalin Yeesan<sup>1</sup> Aua-aree Boonperm<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Khlong Luang, Prathum Thani, 12120

\*Corresponding author: aua-aree@mathstat.sci.tu.ac.th

Received: 22/06/2024; Revised: 13/07/2024; Accepted: 19/07/2024

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้าของผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย โดยแบบจำลองที่นำเสนอนี้ต้องการกำหนดเส้นทางจัดส่ง ปริมาณการผลิตที่คลังสินค้า และระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ต้นทุนรวมซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการขนส่ง ต้นทุนการผลิต และต้นทุนการเก็บรักษาสินค้าคงคลังมีค่าต่ำที่สุด และเนื่องจากผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย แบบจำลองนี้จึงคำนึงถึงข้อจำกัดของอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ด้วย เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการแปลงเชิงเส้นเพื่อเปลี่ยนเป็นแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม สำหรับประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอได้แสดงให้เห็นโดยทดสอบกับข้อมูลกรณีศึกษา โดยใช้โปรแกรม CPLEX สำหรับปัญหาขนาดเล็ก ซึ่งให้ผลลัพธ์เหมาะสมที่สุดภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

**คำสำคัญ:** ผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย; ปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้า; กำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม; การทำให้เป็นเชิงเส้น; โลจิสติกส์และการจัดการห่วงโซ่อุปทาน

Abstract

This paper presents a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model for the multi-depot inventory routing problem (IRP) with perishable products. The proposed model optimizes delivery routes, production quantities at depots, and inventory levels at customers over time to minimize total costs, including transportation, production, inventory holding, and product spoilage. Given the perishable nature of the products, the model explicitly considers shelf-life constraints. To

reduce the model's complexity, linearization techniques are employed to transform it into a mixed-integer linear programming (MILP) model. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through a case study using a CPLEX solver for small-scale instances, yielding optimal solutions within a reasonable timeframe.

**Keywords:** Perishable Products; Multi-Depot Inventory Routing Problem; Mixed-Integer Nonlinear Programming; Linearization; Logistics and Supply Chain Management

## บทนำ

ปัญหาสินค้าคงคลัง (Inventory Problem) เป็นปัญหาที่พบบ่อยในธุรกิจ เนื่องจากปัญหาเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อผลกำไรของธุรกิจได้อย่างมาก หากมีสินค้าคงคลังมากเกินไป บริษัทจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการถือครองสินค้า สินค้าอาจเสื่อมสภาพ และพื้นที่จัดเก็บไม่เพียงพอ ในทางกลับกัน หากมีสินค้าคงคลังน้อยเกินไป บริษัทจะสูญเสียยอดขาย เสียชื่อเสียง และลูกค้าไม่พอใจ สาเหตุของปัญหาสินค้าคงคลัง มักมาจากการคาดการณ์ความต้องการที่ไม่ถูกต้อง การจัดการสินค้าคงคลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ และปัจจัยภายนอก เช่น สภาพเศรษฐกิจ เพื่อแก้ไขปัญหาสินค้าคงคลัง ธุรกิจควรปรับปรุงการคาดการณ์ความต้องการ จัดการสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพ ใช้เทคโนโลยี และสร้างห่วงโซ่อุปทานที่ยืดหยุ่น การจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นกุญแจสำคัญสำหรับความสำเร็จของธุรกิจ (Minner, 2003)

ปัญหาสินค้าคงคลังจะเกี่ยวข้องกับการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้มีสินค้าพร้อมสำหรับความต้องการของลูกค้า ซึ่งปัญหาสินค้าคงคลังอาจมีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อบริษัทต้องดำเนินการจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้าตามความต้องการของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา เนื่องจากบริษัทจะต้องคำนึงถึงทั้งค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการหาระดับของสินค้าคงคลังที่เหมาะสม ซึ่งปัญหานี้จะถูกเรียกว่า ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลัง (Inventory-Routing Problem: IRP) (Archetti et al., 2012; Bertazzi and Speranza, 2012; Leandro et al., 2012) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการจัดการห่วงโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ โดยผสมผสานการจัดการสินค้าคงคลังและการจัดเส้นทางของยานพาหนะ เพื่อช่วยให้บริษัทต่าง ๆ จัดการการเติมและกระจายสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ ในขณะเดียวกันก็ลดต้นทุนการจัดส่งและต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลังให้เหลือน้อยที่สุด เป้าหมายหลักของการแก้ปัญหา IRP คือการกำหนดจำนวนสินค้าคงคลังที่จะส่งมอบไปยังสถานที่ตั้งของลูกค้าแต่ละแห่ง และการวางแผนเส้นทางจัดส่งสินค้าสำหรับยานพาหนะอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัญหา IRP บางบริษัทอาจมีคลังสินค้าหลายแห่ง ซึ่งบริษัทจะต้องจัดการสินค้าคงคลังและวางแผนเส้นทางขนส่งไว้ด้วยกัน พร้อมทั้งพิจารณาระดับสินค้าคงคลังของคลังสินค้า (depot) หลายแห่ง เพื่อเก็บสินค้าโดยต้องจัดการพร้อมกัน ซึ่งปัญหานี้จะถูกเรียกว่า ปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้า (Multi-Depot Inventory-Routing Problem: MDIRP) ในปัญหา MDIRP แต่ละคลังสินค้านี้มีข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บสินค้าและความสามารถในการจัดส่งสินค้าที่แตกต่างกัน (Bertazzi, 2017; Bertazzi et al., 2019) การจัดการสินค้าคงคลังต้องกำหนดระดับสินค้าที่เหมาะสมในแต่ละคลังสินค้าเพื่อป้องกันการขาดแคลนหรือเกินความจำเป็น และต้องคำนึงถึง

ต้นทุนการจัดเก็บสินค้า และในขณะเดียวกัน การวางแผนเส้นทางการขนส่งต้องกำหนดเส้นทางและตารางเวลาการจัดส่งสินค้าจากแต่ละคลังสินค้าไปยังลูกค้าหลายรายโดยลดระยะทางและเวลาการขนส่ง ความท้าทายหลักของปัญหานี้คือการประสานงานระหว่างคลังสินค้าหลายแห่งเพื่อให้การจัดส่งมีประสิทธิภาพสูงสุดและลดการซ้ำซ้อน การแก้ปัญหา MDIRP จะมุ่งเน้นที่การลดต้นทุนรวมของการจัดการสินค้าคงคลังและการขนส่ง เพิ่มประสิทธิภาพในการบริการลูกค้า ดังนั้น ปัญหานี้จึงมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้า ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา งานวิจัยเหล่านี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการจัดสรรสินค้าจากคลังสินค้าหลายแห่งไปยังโรงงานเดียวภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยคำนึงถึงความต้องการสินค้าแต่ละชนิดในแต่ละช่วงเวลา เช่น การนำเสนอขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบไฮบริดที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาการกำหนดเส้นทางการบรรทุกหลายคลังสินค้า (Multi-depot Vehicle Routing Problem: MDVRP) ซึ่งมุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการจัดส่งสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Moin et al., 2011) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาปัญหา MDIRP ที่พิจารณาขนส่งหลายคันที่มีความจุและความสามารถในการจัดส่งสินค้าจากซัพพลายเออร์หลายแห่งไปยังโรงงานเดียวเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของสินค้าแต่ละชนิดภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ (Mirzapour and Yacine, 2014) โดยวัตถุประสงค์คือการทำให้การจัดส่งสินค้าจากซัพพลายเออร์หลายแห่งไปยังโรงงานเดียวนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยพิจารณาตามความต้องการของสินค้าแต่ละชนิดภายในระยะเวลาการวางแผนที่กำหนดให้

ในปี 2015 Noor และ Shuib ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา MDIRP โดยใช้เทคนิคการจัดกลุ่ม (Clustering Techniques) โดยผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาข้อมูลทดสอบแบบใหม่สำหรับทดสอบปัญหา MDIRP ในการสร้างตัวอย่างคลังสินค้าหลายคลังสินค้า เพื่อใช้ในการตรวจสอบความสามารถของวิธีการแก้ปัญหาที่พัฒนาขึ้นมา และถัดมาในปี 2017 Qamsari และคณะ ได้นำเสนอวิธีฮิวริสติกแบบไฮบริดสองระยะสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้าหลายยานพาหนะ (MDMVIRP) ในระบบการจัดการคู่ค้า (Vendor-Managed Systems: VNS) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการถือครองและต้นทุนการขนส่งผ่านขั้นตอนการสร้างและการค้นหาย่านใกล้เคียงแบบแปรผันที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ (Variable Neighborhood Search: VNS)

นอกจากการแก้ปัญหามาตรฐานการจัดการสินค้าคงคลังของสินค้าทั่ว ๆ ไปแล้ว ความท้าทายใหม่ของบริษัทต่าง ๆ คือการจัดการกับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียได้ ซึ่งห่วงโซ่อุปทานของผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่ายประกอบด้วยหลายขั้นตอนตั้งแต่ซัพพลายเออร์ ผู้ผลิต การจัดเก็บและขนส่งในสถานะที่ควบคุมอุณหภูมิ ศูนย์กระจายสินค้า ผู้ค้าปลีก และผู้บริโภค โดยทุกขั้นตอนต้องรักษาความสดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การควบคุมคุณภาพและปฏิบัติตามกฎระเบียบจึงมีความสำคัญเพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์จะถึงมือผู้บริโภคอย่างปลอดภัย นอกจากนี้ การจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพและการลดของเสียจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรักษาความสดของผลิตภัณฑ์ ลดของเสีย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้เหลือน้อยที่สุด (Blackburn and Scudder, 2009; Amorim et al., 2012; Devapriya et al., 2017; Yavari et al., 2020)

สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย Soysal และคณะ (2015) ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยพิจารณาปัญหาแบบหลายช่วงเวลาในการจัดการห่วงโซ่อุปทานอาหารที่ยั่งยืน ซึ่งวิธีการนี้แสดงให้เห็นถึงการลดต้นทุนและการตัดสินใจที่ดีขึ้นในการจำหน่ายมะเขือเทศสดของห้างสรรพสินค้า นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังแบบสองระดับสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่ายโดยใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมและวิธีเมตาฮิวริสติกการค้นหาใกล้เคียงขนาดใหญ่ที่ปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Large Neighborhood Search Metaheuristic: ALNS) เพื่อลดต้นทุนการขนส่งและการถือครองทั้งหมดในห่วงโซ่อุปทานสองระดับ โดยเน้นถึงความสำคัญของโครงสร้างต้นทุนเพื่อการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพ (Rohmer et al., 2019)

สำหรับการแก้ปัญหา MDIRP นักวิจัยส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีฮิวริสติกหรือการสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม โดยใช้แนวทางในการสร้างแบบจำลองแบบ Route-Based นั่นคือ ต้องทราบเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด และแบบจำลองจะทำหน้าที่คัดเลือกเส้นทางที่เหมาะสมพร้อมทั้งคำนวณหาระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสม ในปี 2017 Hiassat และคณะ ได้นำเสนอแบบจำลองการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลังและการเลือกตำแหน่งที่ตั้งที่ออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับการจัดการสินค้าที่เน่าเสียง่าย โดยแบบจำลองที่นำเสนอใช้แนวทาง Route-Based ในการกำหนดเส้นทาง และนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยการกำหนดที่ตั้งและการจัดสรรระดับคลังสินค้าที่เหมาะสมที่สุดก่อน จากนั้นใช้ Genetic Algorithm (GA) เพื่อสร้างเส้นทางที่เป็นไปได้

วิธีการจัดเส้นทางจัดส่งที่ใช้แนวทาง Route-Based ที่มีการใช้งานเส้นทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้านั้น ผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่ยืดหยุ่นเพียงพอเมื่อนำมาใช้จัดการกับสินค้าที่เน่าเสียง่าย เนื่องจากสินค้ามีอายุการเก็บรักษาจำกัด จึงต้องการกลยุทธ์การจัดส่งที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพเพื่อลดการเน่าเสียและรักษาความสดของสินค้า ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงต้องการแก้ปัญหา MDIRP โดยการสร้างแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม และใช้แนวทาง Arc-Based ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งแนวทาง Arc-Based จะพิจารณาเส้นทางขนส่งที่เป็นเส้นทางหรือเส้นเชื่อม (Arc) ระหว่างจุดต่าง ๆ และสามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางได้ตามสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่า (Kara, 2011) แนวทางนี้มีความยืดหยุ่นสูงในการปรับเปลี่ยนเส้นทางตามสถานการณ์จริง และสามารถวางแผนการขนส่งได้อย่างละเอียดและแม่นยำมากขึ้น เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนเส้นทางตามสถานการณ์จริง และสามารถวางแผนการขนส่งได้อย่างละเอียดและแม่นยำมากขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถลดต้นทุนรวมของการขนส่งและการจัดการสินค้าคงคลังแบบหลายแห่งได้อย่างเหมาะสม พร้อมทั้งสามารถปรับปรุงการให้บริการลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้เนื่องจากแบบจำลองของปัญหาอยู่ในรูปแบบจำลองไม่เชิงเส้น ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้น หลังจากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาของแบบจำลองเชิงเส้นดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม CPLEX ผ่านตัวอย่างขนาดเล็ก และแสดงผลลัพธ์ที่ได้ พร้อมทั้งอภิปรายผลการศึกษา

## ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้า โดยใช้แบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-Integer Nonlinear Programming: MINLP) และใช้แนวทาง Arc-Based ที่มีความยืดหยุ่นสูงในการปรับเปลี่ยนเส้นทางตามสถานการณ์จริงในการสร้างแบบจำลองเพื่อลดต้นทุนรวมของการขนส่งและการจัดการสินค้าคงคลัง และปรับปรุงการให้บริการลูกค้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการจัดการสินค้าที่เน่าเสียง่าย ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนของระเบียบวิธีวิจัย ดังนี้

1. การกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการวิจัย
2. การสร้างแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม
3. การแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linearization)
4. การแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรม CPLEX

### การกำหนดปัญหา

งานวิจัยนี้จะพิจารณาการผลิตสินค้าที่เน่าเสียง่ายจากคลังสินค้าหลายคลังสินค้าในหลายช่วงเวลา ซึ่งคลังสินค้าแต่ละคลังสามารถผลิตสินค้าได้และค่าใช้จ่ายในการผลิตแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา และจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าในแต่ละช่วงเวลาตามความต้องการของลูกค้า พร้อมทั้งพิจารณาระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมของลูกค้า ดังนั้น ปัจจัยที่ต้องพิจารณาพร้อม ๆ กัน ประกอบด้วย ปริมาณการผลิตที่คลังสินค้า ความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้า ความจุของยานพาหนะ และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์คือการหาต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งต้นทุนประกอบไปด้วย ต้นทุนการจัดส่งสินค้า ต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง และต้นทุนการผลิต และเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่จัดส่งนั้นเน่าเสียง่าย จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาอายุการเก็บรักษา เนื่องจากความสดของผลิตภัณฑ์จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและเน่าเสียในที่สุด

ในงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น โดยสมมติฐานของแบบจำลองสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่ายเป็นดังนี้

- ในช่วงเวลาเริ่มต้น ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าทุกรายจะมีค่าเป็นศูนย์
- ผลิตภัณฑ์จะถูกจัดส่งผ่านยานพาหนะประเภทเดียวกันซึ่งมีความจุเท่ากัน
- ผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์จึงถูกวัดจากจำนวนของช่วงเวลา
- ลูกค้ามีความต้องการที่แน่นอน แต่ความต้องการของลูกค้าจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา
- ไม่มีสถานการณ์ที่สินค้าหมดสต็อก
- ความจุของยานพาหนะจะต้องไม่น้อยกว่าความต้องการสูงสุดของลูกค้าในช่วงเวลาใด ๆ
- ในแต่ละช่วงเวลา ยานพาหนะสามารถเดินทางได้มากที่สุดหนึ่งเส้นทาง

- ในแต่ละช่วงเวลา จะมีเส้นทางมายังลูกค้าได้มากที่สุดหนึ่งเส้นทาง
- ยานพาหนะจะเริ่มต้นและสิ้นสุดที่คลังสินค้าเดียวกัน
- จะอนุญาตให้มีการขนส่งระหว่างลูกค้าได้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการขนส่งระหว่างคลังสินค้า

#### การสร้างแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม

สำหรับการสร้างแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมจะพิจารณาเส้นทางการจัดส่งโดยใช้แนวทาง Arc-Based ซึ่งจะพิจารณาเส้นทางการขนส่งที่เป็นเส้นทางหรือเส้นเชื่อมระหว่างจุดต่าง ๆ โดยแบบจำลองที่นำเสนอประกอบด้วย เซต พารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจ ดังนี้

##### เซต

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| $B$ | แทน เซตของคลังสินค้า, $B = \{1, 2, \dots,  B \}$ |
| $V$ | แทน เซตของยานพาหนะ, $V = \{1, 2, \dots,  V \}$   |
| $C$ | แทน เซตของลูกค้า, $C = \{1, 2, \dots,  C \}$     |
| $T$ | แทน เซตของช่วงเวลา, $T = \{1, 2, \dots,  T \}$   |

##### พารามิเตอร์

|                  |                                                                                                                                         |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Q$              | แทน ความจุของยานพาหนะ (กิโลกรัม)                                                                                                        |
| $\lambda_{\max}$ | แทน อายุการเก็บรักษาสูงสุดของผลิตภัณฑ์ (ช่วงเวลา)                                                                                       |
| $r_{ij}$         | แทน ระยะทางระหว่างโหนด $i$ และโหนด $j$ โดยที่ $i, j \in B \cup C$                                                                       |
| $s_{jt}$         | แทน ต้นทุนในการถือครองสินค้าคงคลังของลูกค้า $j$ ในช่วงเวลา $t$ โดยที่ $j \in C, t \in T$                                                |
| $p_{it}$         | แทน ต้นทุนในการผลิตสินค้าของคลังสินค้า $i$ ในช่วงเวลา $t$ โดยที่ $i \in B, t \in T$                                                     |
| $c$              | แทน ต้นทุนในการจัดส่ง (บาท/กิโลเมตร)                                                                                                    |
| $d_j^t$          | แทน ความต้องการของลูกค้า $j$ ในช่วงเวลา $t$ โดยที่ $j \in C, t \in T$                                                                   |
| $u_{jt}$         | แทน ขอบเขตบนระดับสินค้าคงคลังของลูกค้า $j$ ในช่วงเวลา $t$ โดยที่ $u_{jt} = \sum_{\tau < t + \lambda_{\max}} d_j^\tau, j \in C, t \in T$ |

##### ตัวแปรตัดสินใจ

|               |                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $x_{ij}^{vt}$ | $= \begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางระหว่างโหนด } i \text{ และโหนด } j \text{ โดยใช้ยานพาหนะ } v \text{ ในช่วงเวลา } t \\ & \text{โดยที่ } i, j \in B \cup C, v \in V, t \in T \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$ |
| $z_i^{vt}$    | $= \begin{cases} 1, & \text{ถ้าผลิตภัณฑ์ถูกจัดส่งจากคลังสินค้า } i \text{ โดยใช้ยานพาหนะ } v \text{ ในช่วงเวลา } t \text{ โดยที่} \\ & i \in B, v \in V, t \in T \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$                   |
| $y_{lj}^{vt}$ | แทน ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ถูกส่งจากโหนด $l$ ไปยังโหนด $j$ โดยใช้ยานพาหนะ $v$ ในช่วงเวลา $t$ โดยที่ $l, j \in B \cup C, v \in V, t \in T$                                                                                   |
| $I_j^t$       | แทน ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้า $j$ ในช่วงเวลา $t$ โดยที่ $j \in C, t \in T$                                                                                                                                               |

$h_i^t$  แทน ปริมาณสินค้าที่ผลิต ณ คลังสินค้า  $i$  ในช่วงเวลา  $t$  โดยที่  $i \in B, t \in T$

$R_i^t$  แทน ลำดับในเส้นทางของลูกค้า  $i$  ในช่วงเวลา  $t$  โดยที่  $i \in C, t \in T$

จากตัวแปรตัดสินใจที่ใช้สำหรับการเลือกเส้นทาง ( $x_{ij}^{vt}$ ) จะพิจารณาทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ นั่นคือ เส้นทางระหว่างคลังสินค้าและลูกค้า ซึ่งการกำหนดตัวแปรนี้เป็นการแสดงถึงการใช้นโยบาย Arc-Based ในการสร้างแบบจำลอง และแบบจำลองไม่เชิงเส้นสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่ายสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\min \sum_{i \in B \cup C} \sum_{j \in B \cup C} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} cr_{ij} x_{ij}^{vt} + \sum_{i \in B} \sum_{t \in T} p_{it} h_i^t + \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} s_{jt} I_j^t \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in B \cup C} \sum_{v \in V} x_{ij}^{vt} \leq 1 \quad \forall j \in C, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{l \in B \cup C} y_{lj}^{vt} \leq Q \quad \forall v \in V, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in B \cup C} x_{ip}^{vt} = \sum_{j \in B \cup C} x_{pj}^{vt} \quad \forall p \in B \cup C, v \in V, t \in T \quad (4)$$

$$x_{ij}^{vt} = 0 \quad \forall i, j \in B, i \neq j, v \in V, t \in T \quad (5)$$

$$R_i^t - R_j^t \geq (|B| + |C|) \left[ \sum_{v \in V} x_{ij}^{vt} - 1 \right] + 1 \quad \forall i, j \in C, t \in T \quad (6)$$

$$x_{ii}^{vt} = 0 \quad \forall i \in B \cup C, v \in V, t \in T \quad (7)$$

$$I_j^t \leq \sum_{\tau < t + \lambda_{\max}}^{\tau > t} d_{\tau}^t \quad \forall j \in C, t \in T \quad (8)$$

$$I_j^0 = 0 \quad \forall j \in C \quad (9)$$

$$I_j^{t-1} + \sum_{l \in B \cup C} \sum_{i \in B} \sum_{v \in V} y_{lj}^{vt} z_i^{vt} = d_j^t + I_j^t \quad \forall j \in C, t \in T \quad (10)$$

$$z_i^{vt} = \sum_{j \in C} x_{ij}^{vt} \quad \forall i \in B, v \in V, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{l \in B \cup C} \sum_{j \in C} \sum_{v \in V} y_{lj}^{vt} z_i^{vt} \leq h_i^t \quad \forall i \in B, t \in T \quad (12)$$

$$y_{ij}^{vt} \leq Q x_{ij}^{vt} \quad \forall i \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (13)$$

$$x_{ij}^{vt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in B \cup C, v \in V, t \in T \quad (14)$$

$$z_i^{vt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, v \in V, t \in T \quad (15)$$

$$h_i^t \geq 0 \quad \forall i \in B, t \in T \quad (16)$$

$$I_j^t \geq 0 \quad \forall j \in C, t \in T \quad (17)$$

$$y_{ij}^{vt} \geq 0 \quad \forall l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (18)$$

$$R_i^t \geq 0 \quad \forall i \in C, t \in T \quad (19)$$

จากแบบจำลองข้างต้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (1) แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุดที่เกิดจากการพิจารณาต้นทุนในการจัดส่ง ต้นทุนในการผลิตสินค้า และต้นทุนในการถือครองสินค้าคงคลัง เงื่อนไขที่ (2) แสดงให้เห็นว่าจะมีเส้นทางมายังลูกค้าได้มากที่สุดเพียงหนึ่งเส้นทางเท่านั้น เงื่อนไขที่ (3) แสดงให้เห็นว่าปริมาณที่จัดส่งจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ เงื่อนไขที่ (4) แสดงให้เห็นว่ายานพาหนะออกจากคลังสินค้าแล้วจะต้องกลับไปยังคลังสินค้าเดิม เงื่อนไขที่ (5) ทำให้มั่นใจได้ว่าไม่มีเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างคลังสินค้า เงื่อนไขที่ (6) เป็นการป้องกันการเกิดเส้นทางย่อย (Sub-tour) กล่าวคือ จะไม่มีเส้นทางที่กลับไปยังลูกค้ารายเดิม เงื่อนไขที่ (7) แสดงให้เห็นว่าไม่มีเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างโหนดเดียวกัน เงื่อนไขที่ (8) แสดงให้เห็นว่าระดับสินค้าคงคลังที่ช่วงเวลาใด ๆ จะต้องไม่เกินขอบเขตบนของระดับสินค้าคงคลังในช่วงเวลานั้น ๆ เงื่อนไขที่ (9) แสดงให้เห็นว่าระดับสินค้าคงคลังในช่วงเวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ เงื่อนไขที่ (10) แสดงให้เห็นสมการดุลสินค้าคงคลัง (Inventory Balance Equation) นั่นคือ ระดับสินค้าคงคลังในช่วงเวลาก่อนหน้าเมื่อรวมกับปริมาณที่จัดส่งมาในช่วงเวลาปัจจุบันจะต้องมีค่าเท่ากับความต้องการของลูกค้า ซึ่งหากเกินจะถูกนำไปเก็บไว้ในคลังของลูกค้าเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาปัจจุบัน เงื่อนไขที่ (11) แสดงให้เห็นจำนวนของเส้นทางที่ออกจากคลังสินค้าในแต่ละช่วงเวลาที่สามารถให้บริการลูกค้าแต่ละรายได้ เงื่อนไขที่ (12) แสดงให้เห็นว่าปริมาณในการจัดส่งจะต้องไม่เกินปริมาณที่ผลิตในแต่ละคลังสินค้า เงื่อนไขที่ (13) ทำให้มั่นใจได้ว่าจะเกิดการจัดส่งหากมีเส้นทางระหว่างโหนดนั้น ๆ เงื่อนไขที่ (14) และ (15) แสดงให้เห็นถึงตัวแปรทวิภาคที่ใช้ในแบบจำลองนี้ และเงื่อนไขที่ (16) ถึง (19) ทำให้มั่นใจได้ว่าตัวแปรตัดสินใจที่แทนปริมาณในการผลิตที่คลังสินค้า ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้า ปริมาณในการจัดส่ง และลำดับของลูกค้าในเส้นทางจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

#### การแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น

จากแบบจำลองที่นำเสนอจะเห็นว่าเงื่อนไขที่ (10) และ (12) มีพจน์ของการคูณกันของตัวแปรตัดสินใจ นั่นคือ  $y_{ij}^{vt} z_i^{vt}$  ซึ่งทำให้แบบจำลองเป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้น ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองไม่เชิงเส้นจะต้องใช้ขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนและยุ่งยาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการแปลงแบบจำลองไม่เชิงเส้นให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นด้วยการกำหนดตัวแปรตัดสินใจใหม่ ดังนี้

กำหนดให้

$$u_{ij}^{vt} = y_{ij}^{vt} z_i^{vt}, \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \text{ เมื่อ } y_{ij}^{vt} \in \square, z_i^{vt} \in \{0,1\} \quad (20)$$

โดยที่  $u_{ij}^{vt}$  แทนปริมาณสินค้าที่จัดส่งโดยจากคลังสินค้า  $i$  มีเส้นทางจากโหนด  $l$  ไปยังโหนด  $j$  โดยใช้ยานพาหนะ  $v$  ในช่วงเวลา  $t$  โดยที่  $i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T$

เพื่อให้ค่าของตัวแปร  $u_{ij}^{vt}$  สอดคล้องกับค่าของตัวแปร  $y_{ij}^{vt}$  และ  $z_i^{vt}$  จำเป็นที่จะต้องเพิ่ม 3 เงื่อนไขดังต่อไปนี้



$$u_{ij}^v \leq y_{ij}^v \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (21)$$

$$u_{ij}^v \leq Wz_i^v \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (22)$$

$$W(z_i^v - 1) + y_{ij}^v \leq u_{ij}^v \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (23)$$

เมื่อ  $W$  แทน จำนวนเต็มบวกที่มีค่ามาก

เนื่องจาก  $u_{ij}^v = y_{ij}^v z_i^v$  เกิดจากการคูณกันของตัวแปรที่เป็นจำนวนจริงและตัวแปรทวิภาค ค่าของตัวแปร  $u_{ij}^v$  จึงขึ้นอยู่กับตัวแปร  $y_{ij}^v$  และ  $z_i^v$  ดังนี้

- ถ้า  $z_i^v = 0$  จะได้ว่า  $u_{ij}^v \leq y_{ij}^v$ ,  $u_{ij}^v \leq 0$  และ  $-W + y_{ij}^v \leq u_{ij}^v$  นั่นคือ  $u_{ij}^v = 0$
- ถ้า  $z_i^v = 1$  จะได้ว่า  $u_{ij}^v \leq y_{ij}^v$ ,  $u_{ij}^v \leq W$  และ  $y_{ij}^v \leq u_{ij}^v$  นั่นคือ  $u_{ij}^v = y_{ij}^v$

จากที่แสดงข้างต้น จะได้ว่า ค่าของ  $u_{ij}^v$  และการกำหนดเงื่อนไข (21) – (23) สมมูลกับค่า  $u_{ij}^v = y_{ij}^v z_i^v$  โดยที่  $y_{ij}^v \in \square$ ,  $z_i^v \in \{0,1\}$  ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอถูกทำให้เป็นเชิงเส้นจึงกลายเป็นแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-Integer Linear Programming: MILP) และสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\min \sum_{i \in B \cup C} \sum_{j \in B \cup C} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} cr_{ij} x_{ij}^v + \sum_{i \in B} \sum_{t \in T} p_{it} h_i^t + \sum_{j \in C} \sum_{t \in T} s_{jt} I_j^t \quad (24)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in B \cup C} \sum_{v \in V} x_{ij}^v \leq 1 \quad \forall j \in C, t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{l \in B \cup C} y_{lj}^v \leq Q \quad \forall v \in V, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{i \in B \cup C} x_{ip}^v = \sum_{j \in B \cup C} x_{pj}^v \quad \forall p \in B \cup C, v \in V, t \in T \quad (27)$$

$$x_{ij}^v = 0 \quad \forall i, j \in B, i \neq j, v \in V, t \in T \quad (28)$$

$$R_i^t - R_j^t \geq (|B| + |C|) \left[ \sum_{v \in V} x_{ij}^v - 1 \right] + 1 \quad \forall i, j \in C, t \in T \quad (29)$$

$$x_{ii}^v = 0 \quad \forall i \in B \cup C, v \in V, t \in T \quad (30)$$

$$I_j^t \leq \sum_{\tau < t + \lambda_{\max}} d_\tau^t \quad \forall j \in C, t \in T \quad (31)$$

$$I_j^0 = 0 \quad \forall j \in C \quad (32)$$

$$I_j^{t-1} + \sum_{l \in B \cup C} \sum_{i \in B} \sum_{v \in V} u_{ilj}^v = d_j^t + I_j^t \quad \forall j \in C, t \in T \quad (33)$$

$$z_i^v = \sum_{j \in C} x_{ij}^v \quad \forall i \in B, v \in V, t \in T \quad (34)$$

$$\sum_{l \in B \cup C} \sum_{j \in C} \sum_{v \in V} u_{ilj}^v \leq h_i^t \quad \forall i \in B, t \in T \quad (35)$$

$$y_{ij}^v \leq Qx_{ij}^v \quad \forall i \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (36)$$

$$u_{ij}^v \leq y_{ij}^v \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (37)$$

$$u_{ij}^v \leq Wz_i^v \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (38)$$

$$W(z_i^v - 1) + y_{ij}^v \leq u_{ij}^v \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (39)$$

$$x_{ij}^v \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in B \cup C, v \in V, t \in T \quad (40)$$

$$z_i^v \in \{0,1\} \quad \forall i \in B, v \in V, t \in T \quad (41)$$

$$h_i' \geq 0 \quad \forall i \in B, t \in T \quad (42)$$

$$I_j' \geq 0 \quad \forall j \in C, t \in T \quad (43)$$

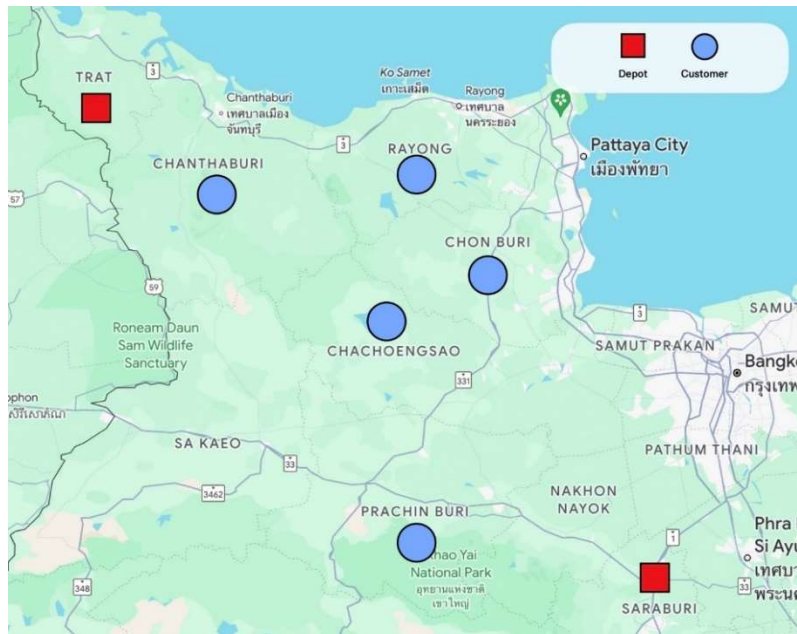
$$y_{lj}^v \geq 0 \quad \forall l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (44)$$

$$R_i' \geq 0 \quad \forall i \in C, t \in T \quad (45)$$

$$u_{ij}^v \geq 0 \quad \forall i \in B, l \in B \cup C, j \in C, v \in V, t \in T \quad (46)$$

### ผลการวิจัย

จากแบบจำลองที่นำเสนอ ผู้วิจัยจะนำเสนอตัวอย่างการหาผลลัพธ์ของแบบจำลองสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังแบบหลายคลังสินค้าสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย โดยนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากตัวอย่างขนาดเล็กซึ่งประกอบไปด้วย 2 คลังสินค้า และลูกค้า 5 ราย โดยคลังสินค้าประกอบด้วยข้อมูลของคลังสินค้าในจังหวัดสระบุรีและจังหวัดตราด และข้อมูลของลูกค้าประกอบด้วยข้อมูลในจังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี ฉะเชิงเทรา และปราจีนบุรี โดยตำแหน่งของคลังสินค้าและตำแหน่งของลูกค้าแสดงดังภาพที่ 1 สำหรับการหาผลลัพธ์ของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม CPLEX Studio IDE 20.1.0 ด้วยคอมพิวเตอร์ 64 bit, core i5 processor (1.80 GHz), with 8 GB RAM ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองเชิงเส้น โดยผลลัพธ์ที่ต้องการจากแบบจำลอง คือ ปริมาณการผลิตของแต่ละคลังสินค้าในแต่ละช่วงเวลา ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา ปริมาณที่ต้องจัดส่งไปยังลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา และเส้นทางที่ใช้ในการขนส่งสินค้า ซึ่งจะช่วยให้ทราบต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 1: สถานที่ตั้งของคลังสินค้าและลูกค้า

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาของตัวอย่างขนาดเล็กมีการพิจารณาโดยกำหนดจำนวนของยานพาหนะที่ใช้ได้ คือ จำนวน 5 คัน อายุการเก็บรักษาสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) ของผลิตภัณฑ์คือ 2 ช่วงเวลา ความจุของยานพาหนะคือ 325 กิโลกรัม/คัน จำนวนของช่วงเวลาทั้งหมด คือ 3 ช่วงเวลา และมีการกำหนดช่วงของจำนวนเต็มเพื่อสุมพารามิเตอร์ซึ่งประกอบด้วย ความต้องการของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา ( $d'_j$ ) คือ [10,130] ต้นทุนในการถือครองสินค้าคงคลัง ( $s_{ji}$ ) คือ [0,3] และต้นทุนในการผลิต ( $p_{ii}$ ) คือ [20,150] โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนในการจัดส่งระหว่างคลังสินค้าและลูกค้าแต่ละราย (หน่วยเป็นบาท) และความต้องการของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา (หน่วยเป็นกิโลกรัม) ต้นทุนในการจัดเก็บสินค้าของลูกค้าที่สอดคล้องกับระดับสินค้าคงคลัง (หน่วยเป็นบาท) และต้นทุนในการผลิตสินค้าในแต่ละช่วงเวลา (หน่วยเป็นบาท) แสดงดังตารางที่ 1 - 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1: ต้นทุนในการขนส่งระหว่างคลังสินค้าและลูกค้าร่วมกับความต้องการของลูกค้าแต่ละรายในแต่ละช่วงเวลา

| ลูกค้า     | ต้นทุนในการขนส่ง |      | ความต้องการของลูกค้า |     |     |
|------------|------------------|------|----------------------|-----|-----|
|            | สระบุรี          | ตราด | t=1                  | t=2 | t=3 |
| ชลบุรี     | 104              | 102  | 10                   | 50  | 100 |
| ระยอง      | 133              | 92.5 | 20                   | 50  | 120 |
| จันทบุรี   | 170.5            | 47.5 | 90                   | 80  | 10  |
| ฉะเชิงเทรา | 81               | 131  | 130                  | 30  | 60  |
| ปราจีนบุรี | 56.5             | 144  | 85                   | 60  | 30  |

ตารางที่ 2: ต้นทุนในการถือครองสินค้าคงคลังของลูกค้าแต่ละรายในแต่ละช่วงเวลา

| ลูกค้า     | ต้นทุนในการถือครองสินค้าคงคลัง |     |     |
|------------|--------------------------------|-----|-----|
|            | t=1                            | t=2 | t=3 |
| ชลบุรี     | 0                              | 1   | 3   |
| ระยอง      | 1                              | 2   | 2   |
| จันทบุรี   | 3                              | 2   | 1   |
| ฉะเชิงเทรา | 1                              | 1   | 1   |
| ปราจีนบุรี | 2                              | 3   | 0   |



ตารางที่ 3: ต้นทุนในการผลิตสินค้าของแต่ละคลังสินค้าในแต่ละช่วงเวลา

| คลังสินค้า | ต้นทุนในการผลิตสินค้า |     |     |
|------------|-----------------------|-----|-----|
|            | t=1                   | t=2 | t=3 |
| สระบุรี    | 20                    | 20  | 30  |
| ตราด       | 20                    | 25  | 25  |

เมื่อนำข้อมูลข้างต้นไปหาผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม CPLEX ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง นั้นคือ ปริมาณในการผลิตของแต่ละคลังสินค้า ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา และปริมาณในการจัดส่งจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าแต่ละราย แสดงดังตารางที่ 4 – 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4: ปริมาณการผลิตสินค้าของแต่ละคลังสินค้าในแต่ละช่วงเวลา

| คลังสินค้า | ปริมาณการผลิตสินค้า |     |     |
|------------|---------------------|-----|-----|
|            | t=1                 | t=2 | t=3 |
| สระบุรี    | 325                 | 505 | 0   |
| ตราด       | 95                  | 0   | 0   |

ตารางที่ 5: ระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าแต่ละรายในแต่ละช่วงเวลา

| ลูกค้า     | ระดับสินค้าคงคลัง |     |     |
|------------|-------------------|-----|-----|
|            | t=1               | t=2 | t=3 |
| ชลบุรี     | 50                | 100 | 0   |
| ระยอง      | 30                | 120 | 0   |
| จันทบุรี   | 5                 | 10  | 0   |
| ฉะเชิงเทรา | 0                 | 60  | 0   |
| ปราจีนบุรี | 0                 | 30  | 0   |

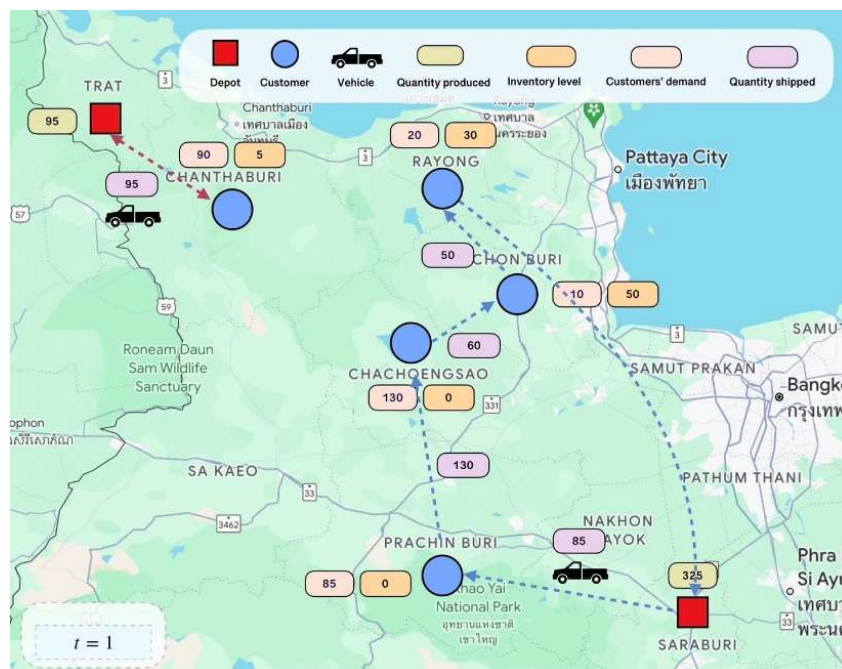
ตารางที่ 6: ปริมาณสินค้าที่จัดส่งไปยังลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา

| ช่วงเวลา | คลังสินค้า | ยานพาหนะ | ลูกค้า |       |          |            |            |
|----------|------------|----------|--------|-------|----------|------------|------------|
|          |            |          | ชลบุรี | ระยอง | จันทบุรี | ฉะเชิงเทรา | ปราจีนบุรี |
| t=1      | สระบุรี    | 1        | 60     | 50    | -        | 130        | 85         |
|          | ตราด       | 2        | -      | -     | 95       | -          | -          |
| t=2      | สระบุรี    | 1        | -      | -     | -        | 90         | 90         |
|          | สระบุรี    | 2        | 100    | 140   | 85       | -          | -          |

จากตารางที่ 6 นอกจากจะทราบว่าปริมาณที่จัดส่งไปยังลูกค้าแต่ละรายเป็นเท่าไร ยังทราบอีกด้วยว่าในแต่ละช่วงเวลาใช้ยานพาหนะกี่คันและแต่ละคลังสินค้าจัดส่งไปให้ลูกค้ารายไหนบ้าง ซึ่งในช่วงเวลาที่ 3 ไม่ปรากฏค่าต่าง ๆ เนื่องจากระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าแต่ละรายในช่วงเวลาก่อนหน้าสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาที่ 3 ได้ ทำให้คลังสินค้าแต่ละคลังไม่จำเป็นต้องผลิตสินค้า และไม่มีการจัดส่ง ซึ่งทำให้ต้นทุนรวมมีค่าน้อยลง

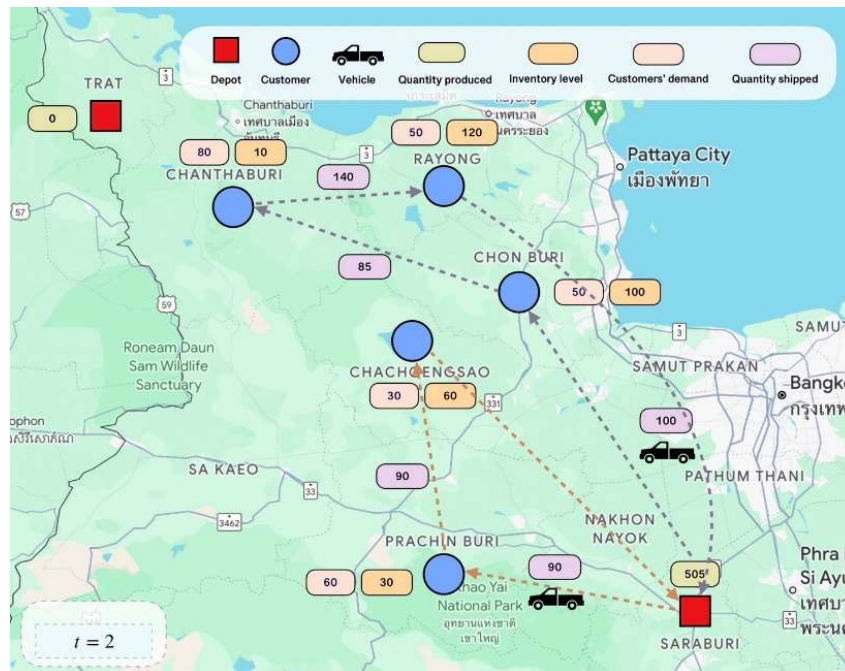
จากผลเฉลยที่ได้ จะได้ว่าต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุดคือ 20,001 บาท ซึ่งประกอบไปด้วยต้นทุนในการขนส่งคือ 946 บาท ต้นทุนในการผลิตสินค้าที่คลังสินค้าคือ 18,500 บาท และต้นทุนในการถือครองสินค้าคงคลังรวมของลูกค้าคือ 555 บาท โดยเวลาที่ใช้ในการประมวลผล คือ 7 วินาที โดยจะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงเวลา ระดับสินค้าคงคลังที่ลูกค้าและปริมาณที่ผลิตในคลังสินค้าจะถูกกำหนดตามต้นทุนการผลิตและต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง

เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมด นั่นคือ ปริมาณในการผลิตของแต่ละคลังสินค้า ปริมาณในการจัดส่งจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าแต่ละราย และระดับสินค้าคงคลังของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลามาแสดงเส้นทางการจัดส่งลงในแผนที่จริง เพื่อให้เห็นภาพการจัดส่งได้มากขึ้น ผลเฉลยที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาสามารถแสดงดังภาพที่ 2 - 4



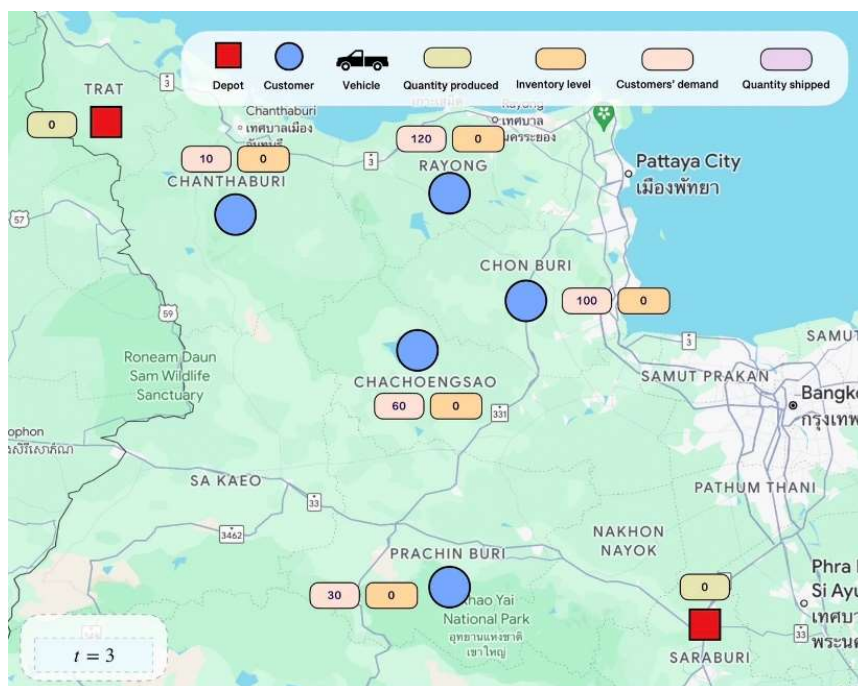
ภาพที่ 2: ตัวอย่างผลเฉลยในช่วงเวลาที่ 1

จากภาพที่ 2 ประกอบไปด้วยปริมาณที่คลังสินค้าแต่ละที่ผลิตสินค้า ปริมาณและเส้นทางในการจัดส่ง และระดับสินค้าคงคลังที่ลูกค้าแต่ละรายจัดเก็บไว้ในตอนสิ้นสุดช่วงเวลาแรกเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการในช่วงเวลาที่ถัดไป



ภาพที่ 3: ตัวอย่างผลเฉลยในช่วงเวลาที่ 2

จากภาพที่ 3 แสดงผลเฉลยของช่วงเวลาที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผลิตสินค้าที่จังหวัดตราด เนื่องจากการลงทุนในการผลิตสินค้าในช่วงเวลาที่ 2 นั้นมากกว่าจังหวัดสระบุรี นอกจากนี้ลูกค้าบางรายมีการจัดเก็บสินค้าที่ได้จากจังหวัดตราดไว้แล้วในช่วงเวลาที่ผ่านมา จึงส่งผลให้ไม่มีการผลิตสินค้าและไม่มีเส้นทางในการจัดส่งออกจากจังหวัดตราดในช่วงเวลานี้



ภาพที่ 4: ตัวอย่างผลเฉลยในช่วงเวลาที่ 3



จากภาพที่ 4 จะเห็นว่า ไม่มีการผลิตที่คลังสินค้า และไม่มีเส้นทางในการจัดส่ง เนื่องจากระดับคลังสินค้าในช่วงเวลาที่ผ่านมา สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทความวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าคงคลังสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย โดยนำเสนอแบบจำลองกำหนดการไม่เชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม และพิจารณาการแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมโดยใช้เทคนิคการแปลงเชิงเส้น (Linearization Technique) เพื่อลดความซับซ้อนในการแก้ปัญหา และใช้โปรแกรม CPLEX ในการหาผลลัพธ์จากแบบจำลอง ซึ่งผลลัพธ์จากตัวอย่างที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เช่น ความต้องการของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา ต้นทุนการผลิต หรือต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง จะส่งผลต่อผลเฉลยที่ได้รับ ไม่ว่าจะเป็นเส้นทางในการจัดส่ง ปริมาณสินค้าที่ผลิตในแต่ละคลังสินค้า ระดับสินค้าคงคลังเมื่อสิ้นสุดแต่ละช่วงเวลา และปริมาณที่จัดส่งไปยังลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งสะท้อนถึงความซับซ้อนและความยืดหยุ่นของปัญหา

อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองเป็นตัวอย่างขนาดเล็ก ซึ่งเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้น การค้นหาผลลัพธ์จะใช้เวลามากขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่สถานการณ์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ภายในเวลาที่สมเหตุสมผล ดังนั้นในอนาคต ผู้วิจัยจะพิจารณาการใช้วิธีอื่น ๆ เช่น ฮิวริสติก เพื่อช่วยลดเวลาในการแก้ปัญหาและทำการศึกษาปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนและมีความหลากหลายมากขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- Amorim, P., Gunther, H.-O., & Almada-Lobo, B. (2012). Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.005>
- Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, A., & Speranza, M.G. (2012). A hybrid heuristic for an inventory routing problem. *Journal on Computing*, 24(1), 101-116. <http://dx.doi.org/10.1287/ijoc.1100.0439>
- Bertazzi, L., & Speranza, M.G. (2012). Inventory routing problems: an introduction. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(4), 307-326. <https://doi.org/10.1007/s13676-012-0016-7>
- Bertazzi, L., C. Coelho, L., Maio, A. D., & Laganà, D. (2017). *The Multi-Depot Inventory Routing Problem: An Application of Vendor-Management Inventory in City Logistics*. Enterprise Networks, Logistics and Transportation.



- Bertazzi, L., Coelho, L. C., De Maio, A., & Laganà, D. (2019). A metaheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem. *Transportation Research Part E*, 122, 524-544.  
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.005>
- Blackburn, J., & Scudder, G. (2009). Supply chain strategies for perishable products: the case of fresh produce. *Production and Operations Management*, 18(2), 129-137.  
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01016.x>
- Devapriya, P., Ferrell, W., & Geismar, N. (2017). Integrated production and distribution scheduling with a perishable product. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 906-916.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.019>
- Hiassat, A., Ali, D., & Iyad, R. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 93-103.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.004>
- Kara, I. (2011). Arc Based Integer Programming Formulations for the Distance Constrained Vehicle Routing Problem. *IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, 3rd. <http://dx.doi.org/10.1109/LINDI.2011.6031159>
- Leandro, C., Jean, C., & Gilbert, L. (2012). The inventory-routing problem with transshipment. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2537-2548.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.12.020>
- Minner, S. (2003). Multiple-supplier inventory models in supply chain management: A review. *International Journal of Production Economics*, 81-82, 265-279.  
[https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00288-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00288-8)
- Mirzapour, S.M.J., & Yacine, R. (2014). Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach. *International Journal of Production Economics*, 157, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.09.005>
- Moin, N. H., Salhi, S., & Aziz, N. A. B. (2011). An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 334-343. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.06.012>
- Noor, N.M., & Shuib, A. (2015). Multi-depot instances for inventory routing problem for using clustering techniques. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(2), 97-101.  
<http://dx.doi.org/10.12720/jiii.3.2.97-101>





- Qamsari, A. S. N., Hosseini Motlagh, S. M., & Jokar, A. (2017). A two-phase hybrid heuristic method for a multi-depot inventory-routing problem. *International Journal of Transportation Engineering*, 4(4), 287-304. <https://doi.org/10.22119/ijte.2017.44432>
- Rohmer, S. U. K., Claassen, G. D. H., & Laporte, G. (2019). A two-echelon inventory routing problem for perishable products. *Computers & Operations Research*, 107, 156-172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.015>
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J. (2015). Modeling an Inventory Routing Problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 164, 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.008>
- Yavari, M., Enjavi, H., & Geraeli, M. (2020). Demand management to cope with routes disruptions in location-inventory-routing problem for perishable products. *Research in Transportation Business & Management*, 37, 100552. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100552>