# การจัดเส้นทางเดินรถแบบผสมผสานระหว่างภารกิจการรับและส่ง ร่วมกับการใช้บริการรถเช่า: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

# Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem with Hybrid Missions and Third-Party Vehicle Rentals: A Case Study of Animal Feed Industry

ปุญญวิชญ์ เศรษฐ์สมบูรณ์[1,*], กาญจนา เศรษฐนันท์[2] และ กฤษณรัช นิติสิริ[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

[2]กลุ่มวิจัยการพัฒนาโมเดลเชิงระบบสำหรับอุตสาหกรรม, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

Punyawich Sessomboon[1,*], Kanchana Sethanan[2] and Krisanarach Nitisiri[2]

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Nai-Muang, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

[2]Research unit on System Modelling for Industry, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Nai-Muang, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

***Corresponding Author E-mail:** punyawich_sessomboon@kkumail.com

**Received:** Feb 12, 2024; **Revised:** May 24, 2024; **Accepted:** Jun 28, 2024

## บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน เนื่องจากรูปแบบการขนส่งในแต่ละเส้นทางเกิดขึ้นได้หลายแบบทั้งการจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้าและรับวัตถุดิบกลับมายังโรงงานผลิต โดยภาคธุรกิจในปัจจุบันยังขาดประสิทธิภาพในการวางแผนการใช้รถที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้ต้องใช้บริการรถเช่าซึ่งมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนขนส่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง ผ่านการแก้ปัญหารูปแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม โดยใช้ชุดข้อมูลสำหรับการทดลองที่สะท้อนปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในภาคอุตสาหกรรม ผลลัพธ์ของการปรับรูปแบบเส้นทางขนส่งใหม่ร่วมกับการจัดสรรการใช้บริการรถเช่าที่ได้นั้นช่วยลดต้นทุนขนส่งได้ร้อยละ 18.5 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาจริง และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางการลดต้นทุนขนส่งให้กับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน

**คำสำคัญ:** การจัดเส้นทางเดินรถ, การรับและจัดส่ง, ผู้ให้บริการขนส่งภายนอก, โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม

## Abstract

The vehicle routing problem for small and medium-sized animal feed manufacturers is a complex challenge because each transport route can vary significantly between delivering products to customers and picking up raw materials to return to the factory. Currently, businesses lack well-planned management for utilizing a limited number of trucks. As a result, they often incur additional costs by relying on third-party vehicle rentals. This research aims to reduce transportation costs for small and medium-sized animal feed manufacturers by solving a formulated mixed-integer linear programming (MILP)

model, using experimental data that accurately reflects the actual problems faced. The MILP model results help reduce transportation costs by up to 18.5% compared to current practices by optimizing route sequences and incorporating the use of third-party vehicle rentals. This also serves as a guideline for reducing transportation costs in other similar industries.

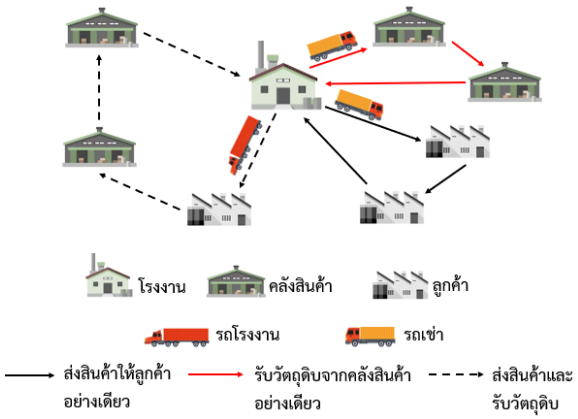
**Keywords:** Vehicle routing problem, Pickup and delivery, Subcontract logistic, Mixed-integer linear programing

## 1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นหนึ่งในปัญหาที่ท้าทาย และมีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จของธุรกิจต่าง ๆ การจัดเส้นทางขนส่งที่มีประสิทธิภาพช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานให้ดีมากขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยที่ใช้รถขนส่งขนาดเล็กและมีจำนวนจำกัด เพื่อทำภารกิจทั้งการไปรับวัตถุดิบจากคลังสินค้าต่าง ๆ ที่เป็นแหล่งต้นน้ำ และการไปส่งอาหารสัตว์ที่เป็นสินค้าสำเร็จรูปให้กับลูกค้า ซึ่งกระจายอยู่ในหลายพื้นที่ โดยจะต้องทำการรับส่งสินค้าและวัตถุดิบหลายเที่ยวให้ครบตามความต้องการของลูกค้าและกระบวนการผลิต จากข้อจำกัดของการขาดระบบจัดการการใช้รถที่มีอยู่อย่างจำกัดทำให้ภาคธุรกิจมีค่าใช้จ่ายสูงเกินจำเป็นถึงร้อยละ 46 ของต้นทุนขนส่งรวม [1] และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้บริการรถเช่าเพิ่มเติม ส่งผลให้ปัจจุบันต้นทุนขนส่งสูงถึงร้อยละ 50 ของต้นทุนโลจิสติกส์หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 10 ของราคาขายสินค้า [2],[3] ประกอบกับสถานการณ์การขาดแคลนวัตถุดิบอาหารสัตว์ทั่วโลกในปัจจุบันจากความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบอาหารสัตว์สูงขึ้นกว่าเท่าตัว [4] อย่างไรก็ดี หากพิจารณาในแง่มูลค่าทางเศรษฐกิจอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เป็นข้อต่อแรกที่สนับสนุนการเติบโตของกิจกรรมปศุสัตว์ มูลค่าทางเศรษฐกิจของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ต่อปีทั่วโลกเท่ากับ 4 แสนล้านดอลลาร์สหรัฐ และก่อให้เกิดกิจกรรมเชิงพาณิชย์ของประเทศทั่วโลกกว่า 130 ประเทศ [5] ด้วยเหตุนี้ หากภาคธุรกิจสามารถบริหารจัดการต้นทุนขนส่งได้ดีขึ้น ย่อมเป็นหนึ่งปัจจัยที่ช่วยยกระดับความสามารถในการแข่งขัน และเติบโตไปพร้อมกับกระแสการค้าโลก

งานวิจัยในอดีตได้มีการศึกษาปัญหาการขนส่งที่มีลักษณะเฉพาะ ดังเช่น Kocatürk et al. [6] และ Zhu et al. [7] ได้แก้ปัญหาการขนส่งแบบที่รถมีขนาดต่างกัน (Heterogeneous Fleet) ซึ่งมีการจัดเส้นทางเดินรถที่ประกอบด้วยภารกิจทั้งไปรับและจัดส่ง โดยแต่ละเส้นทางต้องไปส่งก่อนรับ (Vehicle Routing Problem with Backhaul: VRPB) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังขาดการศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งในมิติของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ในรูปแบบที่ซับซ้อนโดยอนุญาตให้รูปแบบการเดินรถในแต่ละเส้นทางเกิดขึ้นได้หลายแบบซึ่งใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น ได้แก่ เส้นทางที่ส่งสินค้าอย่างเดียว รับวัตถุดิบอย่างเดียว และ ทั้งส่งสินค้าและรับวัตถุดิบ ร่วมกับการใช้บริการรถเช่าในกรณีที่รถของโรงงานไม่เพียงพอในการทำภารกิจ (**รูปที่ 1**) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบผสมผสานระหว่างภารกิจการรับและส่ง ร่วมกับการใช้บริการรถเช่า (Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem with Hybrid Missions and Third-Party Vehicle Rentals: PDVRPHT) ให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม เพื่อลดต้นทุนการขนส่งให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง รวมถึงเป็นแนวทางให้กับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน

ส่วนถัดไปของบทความมีรายละเอียด ดังนี้ ส่วนที่ 2 นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา PDVRPHT ส่วนที่ 3 เสนอวิธีการดำเนินการวิจัยสำหรับแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับปัญหา PDVRPHT ส่วนที่ 4 ผลการศึกษา ส่วนที่ 5 สรุปผลและเสนอแนะสำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะปัญหาที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น




**รูปที่ 1** การขนส่งของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะรถขนส่งของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางโดยมากเป็นรถขนาดเล็กและมีขนาดในการบรรทุกที่แตกต่างกันทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานแตกต่างกัน โดยหากพิจารณางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของรถที่มีขนาดต่างกัน (Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem: HFVRP) พบว่าได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงที่ผ่านมา ดังเช่น Stavropoulou [8] ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของรถที่มีขนาดต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการขนส่งให้น้อยที่สุด ขณะเดียวกันยังคงรักษาระดับการบริการลูกค้าให้สม่ำเสมอในแต่ละช่วงเวลา เช่นเดียวกับ Gasque และ Munari [9] และ Bustos-Coral และ Costa [10] ที่มุ่งเน้นไปที่การศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีทั้งภารกิจรับและจัดส่งของรถที่มีขนาดต่างกัน โดยพิจารณาหลายปัจจัยเข้ามาร่วม อาทิ กรอบเวลาในการรับและจัดส่ง และประเภทสินค้าที่หลากหลาย สำหรับ Ahmed และ Yousefikhoshbakht [11] ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของรถที่มีขนาดต่างกัน ภายใต้รูปแบบการเดินรถที่มีลักษณะแบบเปิด (Open Vehicle Routing Problem: OVRP) กล่าวคือเมื่อรถออกจากจุดเริ่มต้นแล้วไม่จำเป็นต้องกลับเข้าจุดเดิม ด้าน López-Castro [12] นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม โดยมีจุดประสงค์หลักคือ การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ควบคู่ไปกับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของรถที่มีขนาดต่างกัน เช่นเดียวกับ Yu et al. [13] และ Santos et al. [14] ที่ศึกษาลักษณะปัญหาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ (Reverse logistics) ซึ่งเป็นหนึ่งแนวคิดที่คำนึงถึงเรื่องสิ่งแวดล้อมเช่นกัน

นอกจากปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของรถที่มีขนาดต่างกันในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางแล้ว ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่พิจารณาการเช่ารถของผู้ให้บริการภายนอก (Vehicle Routing Problem with Private Fleet and Third-Party Vehicle Rentals) เป็นอีกลักษณะที่สอดคล้องกับบริบทของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง เนื่องจากปริมาณรถของโรงงานมีจำนวนจำกัดบางครั้งจึงจำเป็นต้องใช้บริการรถเช่า สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการขนส่งที่ใช้บริการรถเช่าซึ่งได้รับความสนใจในช่วงที่ผ่านมาเช่นกัน [15] ดังเช่น Li et al. [16] ที่ศึกษาปัญหาการขนส่งที่พิจารณาการใช้รถเช่า และพิจารณาความแตกต่างของต้นทุนระหว่างการขนส่งขาไป (Linehaul) และการขนส่งขากลับ (Backhaul) ซึ่งช่วยให้การคำนวณต้นทุนโดยรวมมีความแม่นยำมากขึ้น เช่นเดียวกับ Alcaraz et al. [17] และ Dang et al. [18] ศึกษาปัญหาการขนส่งที่ใช้รถเช่าที่มีเงื่อนไขซับซ้อนขึ้น เช่น กฎระเบียบเกี่ยวกับชั่วโมงการทำงานของพนักงานขับรถ ประเภทสินค้าที่ไม่สามารถขนส่งร่วมรถคันเดียวกันได้ และคลังสินค้าและจุดรับสินค้าหลายแห่ง เป็นต้น นอกจากนี้ Gahm et al. [19] ศึกษาปัญหาการขนส่งที่ใช้รถเช่า ผ่านตัวเลือกต้นทุนการเช่ารถสองแบบ ได้แก่ แบบคิดตามระยะทาง (Mileage costs) และแบบคิดตามวัน (Daily costs) ซึ่งตอบสนองความต้องการที่หลากหลาย

เช่นเดียวกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่ประกอบด้วยภารกิจทั้งไปรับและจัดส่ง (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery) ที่เป็นอีกหนึ่งลักษณะปัญหาการขนส่งของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางซึ่งมีทั้งภารกิจการไปรับวัตถุดิบจากแหล่งต้นน้ำและส่งสินค้าสำเร็จรูปให้กับลูกค้า โดยงานวิจัยปัญหาดังกล่าวได้รับความสนใจในช่วงที่ผ่านมามากเช่นกัน ตัวอย่างเช่น Bergmann et al. [20] ประเมิน

ประสิทธิภาพของเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการผสมผสานกิจกรรมการรับสินค้าช่วงแรก (First-mile pickup) และการส่งสินค้าช่วงสุดท้าย (Last-mile delivery) เข้าด้วยกันในระบบการจัดจำหน่ายสินค้าในเมือง นอกจากนี้ Wang et al. [21], Zhao et al. [22] และ Dubey และ Tanksale [23] ได้เสนอแนวทางการแบ่งการจัดส่งให้กับลูกค้า (Demand splitting) และ ออกแบบเส้นทางระหว่างหลายคลังสินค้าเพื่อให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดียิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Ren et al. [24] ศึกษาปัญหาการรับและจัดส่งสินค้าโดยพิจารณาเงื่อนไขที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เช่น สภาพการจราจร ความพึงพอใจของลูกค้า และการลดการปล่อยมลพิษ เป็นต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wang et al. [25] ที่พิจารณาเงื่อนไขให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น ได้แก่ พิจารณาการจัดเส้นทางเดินรถแบบหลายศูนย์ร่วมมือกัน (Multicenter Vehicle Routing Problem) นอกจากนี้ ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่ประกอบด้วยภารกิจทั้งไปรับและจัดส่งสามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน (Simultaneous pickup and delivery) ดังเช่น Sun และ Wang [26] ที่ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีการรับและส่งสินค้าพร้อมกันในแต่ละจุดของโครงการก่อสร้าง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานวิจัยในอดีตที่ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งในหลากหลายมิติของข้อจำกัด อาทิ ขนาดของรถขนส่งที่แตกต่างกัน การใช้บริการรถเช่า หรือการขนส่งที่มีทั้งภารกิจรับและจัดส่ง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดแต่ละมิติมักจะถูกวิจัยแยกจากกัน ซึ่งไม่สะท้อนปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในภาคอุตสาหกรรม และยังมีงานวิจัยจำนวนไม่มากที่รวมรูปแบบปัญหาที่หลากหลายข้างต้นไว้ด้วยกัน ซึ่งเป็นรูปแบบปัญหาที่มีความซับซ้อนคล้ายกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางในกรณีศึกษาครั้งนี้ ด้วยเหตุนี้ การศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบผสมผสานระหว่างภารกิจการรับและส่ง ร่วมกับการใช้บริการรถเช่า (Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem with Hybrid Missions and Third-Party Vehicle Rentals: PDVRPHT) กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยที่แต่ละเส้นทางทำภารกิจได้หลายแบบทั้งการรับวัตถุดิบและจัดส่งสินค้า มีการใช้บริการรถเช่า รวมถึงการพิจารณากรอบเวลาสำหรับการจัดส่งสินค้าและรับวัตถุดิบ ผ่านการแปลงลักษณะปัญหาข้างต้นให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อหาต้นทุนขนส่งรวมที่ต่ำสุด

## 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ข้อสมมติของปัญหา PDVRPHT สำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางมีดังนี้ 1) รถทุกคันเริ่มต้นและสิ้นสุดเส้นทางที่โรงงาน 2) แต่ละเส้นทางเป็นการจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้า หรือรับวัตถุดิบจากคลังสินค้าอย่างเดียว หรือทั้งจัดส่งสินค้าและรับวัตถุดิบ (กรณีใช้รถโรงงาน) 3) มีรถสองประเภทคือ รถโรงงาน และรถเช่า (รถเช่ามีความจุในการบรรทุกมากกว่า) 4) รถเช่าจะถูกใช้เมื่อรถโรงงานมีไม่เพียงพอ โดยมีค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการใช้รถเช่า 5) แต่ละเส้นทางมีระยะเวลาการเดินทางหลายคาบเวลา และทราบวันที่จะจัดส่งสินค้าและรับวัตถุดิบที่แน่นอน 6) ลูกค้าและคลังสินค้ามีกรอบเวลาสำหรับการจัดส่งสินค้าและรับวัตถุดิบ 7) ลูกค้าแต่ละแห่งมีความต้องการสินค้าหลักประเภทเดียว เช่นเดียวกับคลังสินค้าแต่ละแห่งที่มีวัตถุดิบหลักประเภทเดียว โดยทราบความต้องการสินค้าที่จะไปส่งและปริมาณวัตถุดิบที่จะไปรับล่วงหน้า และ 8) โรงงานมีปริมาณสินค้าไม่จำกัด

### 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ดัชนี (Indices)

- $u$ ดัชนีของจุด $u$
- $v$ ดัชนีของจุด $v$
- $c$ ดัชนีของรถ $c$
- $t$ ดัชนีของเวลา $t$

เซต (Sets)

- $A$ เซตของจุดทั้งหมด $\in \{O\} \cup \{G\} \cup \{H\}$
- $O$ โรงงาน (มี 1 แห่ง)
- $G$ เซตของลูกค้าที่ต้องจัดส่งสินค้า $\in \{1,2,..,G\}$
- $H$ เซตของคลังสินค้าที่ไปรับวัตถุดิบ $\in \{1,2,..,H\}$

$C$ เซตของประเภทรถ $\in \{C_O\} \cup \{C_R\}$

$C_O$ เซตของรถโรงงาน

$C_R$ เซตของรถผู้ให้บริการภายนอก

$T$ เซตของคาบเวลา $\in \{1,2,..,t_{max}\}$

$L$ เซตของจุดทั้งหมดที่ไม่รวมโรงงาน $\in \{A\} \backslash \{O\}$

ตัวแปร (Parameters)

$d_v$ ความต้องการสินค้า/ปริมาณวัตถุดิบที่ต้องไปรับที่จุด $v$ (ตัน)

$cap_c$ ความสามารถในการบรรทุกของรถบรรทุก $c$ (ตัน)

$ss_{ut}$ เวลาเริ่มให้บริการที่จุด $u$ คาบเวลา $t$ (ชม.)

$en_{ut}$ เวลาปิดให้บริการที่จุด $u$ คาบเวลา $t$ (ชม.)

$ts_u$ เวลาในการให้บริการ ณ จุด $u$ (ชม.)

$ta_{uv}$ ระยะเวลาเดินทางจากจุด $u$ ไปยัง $v$ (ชม.)

$W$ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท/ลิตร)

$DS_{uv}$ ระยะทางจากจุด $u$ ไป $v$ (กม.)

$FU_c$ อัตราสิ้นเปลืองพลังงานของรถ $c$ (ลิตร/กม.)

$E_c$ ค่าเช่ารถจากผู้ให้บริการภายนอก (บาท/คัน)

$Q$ จำนวนเต็มบวกที่มีค่ามาก

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

$Int_{uct}$ เวลาเริ่มให้บริการจุด $u$ โดยรถ $c$ คาบเวลา $t$ (ชม.)

$X_{uvct} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อออกจากจุด } u \text{ ไป } v \text{ รถ } c \text{ เวลา } t \\ 0 & \text{อื่น ๆ} \end{cases}$

$I_c = \begin{cases} 1 & \text{หากมีการใช้รถคันที่ } c \\ 0 & \text{อื่น ๆ} \end{cases}$

สมการเป้าหมาย (Objective function)

$$MinZ = W[\sum_{u\in A}\sum_{v\in A}\sum_{c\in C}\sum_{t\in T} DS_{uv}X_{uvct}FU_c] + \sum_{c\in C_o} I_cE_c \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด (Constraints)

$$\sum_{u\in A}\sum_{c\in C}\sum_{t\in T} X_{uvct} = 1 \quad ;\forall v \in \{G \cup H\}, u \neq v \quad (2)$$

$$\sum_{v\in A}\sum_{c\in C}\sum_{t\in T} X_{uvct} = 1 \quad ;\forall u \in \{G \cup H\}, u \neq v \quad (3)$$

$$\sum_{V\in A}\sum_{t\in T} X_{vuct} - \sum_{v\in A}\sum_{t\in T} X_{uvct} = 0 \quad ;\forall u \in \{G \cup H\}, u \neq v \quad (4)$$

$$\sum_{v\in\{G\cup H\}}\sum_{t\in T} X_{uvct} - I_c = 0 \quad ;\forall c \in C, u \in O \quad (5)$$

$$\sum_{u\in\{G\cup H\}}\sum_{t\in T} X_{uvct} - I_c = 0 \quad \forall c \in C, v \in O \quad (6)$$

$$X_{uvct} = 0 \quad ;\forall u \in H, v \in G, c \in C, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{v\in G}\sum_{t\in T} d_v X_{uvct} \leq cap_c \quad ;\forall u \in A, c \in C \quad (8)$$

$$\sum_{v\in H}\sum_{t\in T} d_v X_{uvct} \leq cap_c \quad ;\forall u \in A, c \in C \quad (9)$$

$$Int_{uct} + ts_u + ta_{uv} - Q(1 - X_{uvct}) \leq Int_{vct} \quad ;\forall u \in \{G \cup H\}, v \in A, c \in C, t \in T \quad (10)$$

$$ss_{ut} \leq Int_{uct} \leq en_{ut} \quad ;\forall u \in A, c \in C, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{u\in A}\sum_{v\in A}\sum_{t\in T} X_{uvct} \leq |L| - 1 \quad ;\forall c \in C, L \subseteq A, L \neq O \quad (12)$$

$$X_{uvct} \text{ และ } I_c \in \{0,1\} \quad ;\forall u, v \in A, c \in C, t \in T \quad (13)$$

สมการที่ (1) สมการเป้าหมายเพื่อลดค่าใช้จ่ายต่ำสุดของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 คือ ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง และส่วนที่ 2 คือ ค่าเช่ารถผู้ให้บริการภายนอก สมการที่ (2)–(3) กำหนดให้ลูกค้า/คลังสินค้าถูกแวะเพียงครั้งเดียว สมการที่ (4) กำหนดให้จำนวนครั้งที่รถ $c$ แวะเข้าจุดใด ๆ จะต้องเท่ากับจำนวนครั้งที่รถ $c$ วิ่งออกจากจุดนั้น ๆ สมการที่ (5)–(6) กำหนดให้รถ $c$ เริ่มต้นออกเดินทางจากโรงงาน และกลับเข้าโรงงานในท้ายสุด สมการที่ (7) กำหนดว่าห้ามไปรับวัตถุดิบก่อนไปส่งสินค้า สมการที่ (8) ระบุว่าความสามารถในการบรรทุกของรถแต่ละคันมีมากกว่าปริมาณสินค้าที่จะส่งให้กับลูกค้า สมการที่ (9) ระบุว่าความสามารถในการบรรทุกของรถแต่ละคันมีมากกว่าปริมาณวัตถุดิบที่จะไปรับจากคลังสินค้า สมการที่ (10) กำหนดให้เวลาเริ่มต้นแวะจุดถัดไปต้องมากกว่าหรือเท่ากับเวลาเริ่มต้นให้บริการบวกกับเวลาบริการในจุดก่อนหน้าบวกกับระยะเวลาเดินทางระหว่างจุด สมการที่ (11) กำหนดกรอบเวลาในการให้บริการโดยรถ $c$ ต้องแวะไปแต่ละจุดภายในกรอบเวลาที่กำหนด สมการที่

(12) เป็นเงื่อนไขทัวร์ย่อย (Sub-tour elimination) และสมการที่ (13) กำหนดตัวแปรเป็นเลขฐานสอง (Binary variables)

### 3.2 กรณีศึกษาจริง (Current Practice)

ในปัจจุบัน การจัดเส้นทางการขนส่งและรับวัตถุดิบของโรงงานผลิตอาหารสัตว์กรณีศึกษา ใช้การจัดเส้นทางด้วยการตัดสินใจของพนักงาน โดยมีขั้นตอนกำหนดเส้นทางและเลือกรถขนส่ง ดังนี้:

- ลำดับการรับและส่งของโหนดทั้งหมดถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าตามหลักการมาก่อนได้ก่อน (First come first serve)
- รถที่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำจะได้รับสิทธิ์ก่อน
- ในกรณีที่รถของโรงงานไม่เพียงพอ จะมีการใช้บริการรถเช่าเพิ่มเติม

### 3.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลองเทียบกับกรณีศึกษาจริง

การพัฒนาคำตอบของแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (MILP) เทียบกับกรณีศึกษาจริง (Current practice) สามารถประเมินได้จากค่าการปรับปรุงเชิงสัมพัทธ์ (Relative Improvement: RI) ดังสมการที่ (14) ซึ่งคำนวณจากความแตกต่างระหว่างต้นทุนรวมจากวิธี MILP (*R_MILP*) และต้นทุนรวมจากกรณีศึกษาจริง (*R_current*)

$$RI(\%) = \frac{R_current - R_MILP}{R_current} \qquad (14)$$

## 4. ผลการศึกษา

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม LINGO เวอร์ชัน 16.0 บนระบบปฏิบัติการ Windows บนเครื่องแล็ปท็อปที่มีสเปคดังต่อไปนี้ ซีพียู Intel(R) i5-6200U CPU ความเร็ว 2.30GHz หน่วยความจำ RAM 16.0 GB ระบบ 64 บิต

เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ชุดข้อมูลทั้งหมด 18 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูล 1A ถึง 6C ซึ่งสะท้อนปัญหาจริงที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยหมายเลข 1 ถึง 6 คือกรณีที่มีจำนวนโหนดน้อยสุดไปมากสุด ขณะที่ตัวอักษร A ถึง C คือชุดข้อมูลตามสถานการณ์ที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ข้อมูลรถบรรทุก ปริมาณความต้องการของลูกค้าที่ต้องไปส่งและปริมาณวัตถุดิบที่ต้องไปรับ ข้อมูลระยะทาง และข้อมูลระยะเวลาเดินทาง ทั้งนี้ ขอยกตัวอย่างการแก้ปัญหาในชุดข้อมูล 1A ที่เป็นปัญหาขนาดเล็กเพื่อความเข้าใจง่าย ชุดข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วย 7 โหนด ดังนี้ โรงงาน (*O*) 1 โหนด ลูกค้า (*G*) 3 โหนด คลังสินค้า (*H*) 3 โหนด จำนวนรถทั้งหมด 5 คัน แบ่งเป็นรถของโรงงาน 3 คัน รถของผู้ให้บริการภายนอก 2 คัน (ค่าใช้จ่ายคงที่ในการเช่ารถ 42,000 บาท/คัน) ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 30 บาท/ลิตร ดังแสดงใน**ตารางที่ 1** สำหรับแผนการผลิตเป็นแบบวางแผนล่วงหน้า 1 สัปดาห์ โดยรู้วันและช่วงเวลาที่ต้องส่งสินค้าให้กับลูกค้าและเดินทางไปรับวัตถุดิบที่คลังสินค้า รายละเอียดเพิ่มเติม ประกอบด้วยข้อมูลเมทริกซ์ระยะทาง (**ตารางที่ 2**) เมทริกซ์ระยะเวลา (**ตารางที่ 3**) และผลการทดสอบจากโปรแกรม LINGO แสดงดัง**รูปที่ 2** สำหรับ

รายละเอียดของผลการทดสอบจากชุดข้อมูล 1A แสดงดัง**ตารางที่ 4** สะท้อนให้เห็นว่าต้นทุนรวมต่ำสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 48,572 บาท ประกอบด้วยต้นทุนขนส่ง 6,572 บาท และค่าเช่ารถ 42,000 บาท โดยเลือกใช้รถทั้งหมด 4 คัน เป็นรถของโรงงาน 3 คัน และรถเช่า 1 คัน รูปแบบการเดินรถในแต่ละเส้นทางเกิดขึ้นหลายแบบ ได้แก่ ไปรับวัตถุดิบอย่างเดียว (รถ *C1*) ไปส่งสินค้าอย่างเดียว (รถ *C3* และ *C4*) และไปส่งสินค้าและรับวัตถุดิบ (รถ *C5*) ซึ่งรูปแบบการเดินรถดังกล่าวสามารถแปลงให้เห็นเป็นภาพได้ดัง**รูปที่ 3**

สำหรับ**ตารางที่ 5** สะท้อนผลลัพธ์ของขนาดปัญหาที่แตกต่างกันทั้งหมดจากชุดข้อมูล 18 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูล 1A ถึง 6C ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถช่วยลดต้นทุนขนส่งให้กับภาคธุรกิจเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาจริง (Current Practice) ผ่านการกำหนดรูปแบบเส้นทางเดินรถใหม่ที่มีประสิทธิภาพให้กับภาคธุรกิจมากกว่าเดิม กล่าวคือใช้จำนวนรถที่มีอยู่อย่างจำกัดเท่าเดิมแต่ช่วยลดต้นทุนเฉลี่ยได้ร้อยละ 18.5 ดังแสดงใน**ตารางที่ 6**

**ตารางที่ 1** ข้อมูลรถบรรทุก

| รถ | ความจุของรถ (ตัน) | อัตราสิ้นเปลือง (ลิตร/กม.) | ค่าน้ำมัน (บาท/ลิตร) | ประเภทรถ | ค่าเช่า |
|---|---|---|---|---|---|
| C1 | 25 | 0.23 | 30 | โรงงาน | - |
| C2 | 50 | 0.34 | 30 | เช่า | 42,000 |
| C3 | 50 | 0.34 | 30 | เช่า | 42,000 |
| C4 | 25 | 0.23 | 30 | โรงงาน | - |
| C5 | 25 | 0.26 | 30 | โรงงาน | - |

**ตารางที่ 2** เมทริกซ์ระยะทาง (กม.)

| | | ไปยัง | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | O | G1 | G2 | G3 | H1 | H2 | H3 |
| ออกจาก | O | 0 | 111 | 89 | 11 | 71 | 102 | 88 |
| | G1 | 111 | 0 | 101 | 23 | 111 | 104 | 142 |
| | G2 | 89 | 101 | 0 | 103 | 143 | 125 | 107 |
| | G3 | 11 | 23 | 103 | 0 | 78 | 12 | 210 |
| | H1 | 71 | 111 | 143 | 78 | 0 | 134 | 146 |
| | H2 | 102 | 104 | 125 | 12 | 134 | 0 | 138 |
| | H3 | 88 | 142 | 107 | 210 | 146 | 138 | 0 |

**ตารางที่ 3** เมทริกซ์ระยะเวลา (ชม.)

| | | ไปยัง | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | O | G1 | G2 | G3 | H1 | H2 | H3 |
| ออกจาก | O | 0 | 6 | 5 | 1 | 4 | 6 | 5 |
| | G1 | 6 | 0 | 6 | 1 | 6 | 6 | 8 |
| | G2 | 5 | 6 | 0 | 6 | 8 | 7 | 6 |
| | G3 | 1 | 1 | 6 | 0 | 4 | 1 | 12 |
| | H1 | 4 | 6 | 8 | 4 | 0 | 8 | 8 |
| | H2 | 6 | 6 | 7 | 1 | 8 | 0 | 8 |
| | H3 | 5 | 8 | 6 | 12 | 8 | 8 | 0 |

**ตารางที่ 4** รายละเอียดของผลการทดสอบ

| ปัญหาที่ 1 ชุดข้อมูล A | ผลลัพธ์ |
|---|---|
| ต้นทุนรวม (บาท) | 48,572 |
| - ต้นทุนขนส่ง (บาท) | 6,572 |

**ตารางที่ 4** รายละเอียดของผลการทดสอบ (ต่อ)

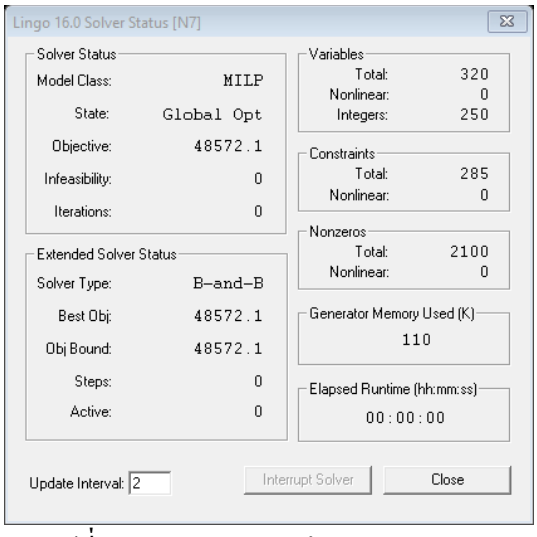
| ปัญหาที่ 1 ชุดข้อมูล A | ผลลัพธ์ |
|---|---|
| - ค่าเช่ารถ (บาท) | 42,000 |
| จำนวนรถที่เลือกใช้ | 4 |
| - รถโรงงาน | 3 |
| - รถเช่า | 1 |
| รูปแบบเส้นทางเดินรถ | C1: O->H1->H3->O<br>C3: O->G1->O<br>C4: O->G2->O<br>C5: O->G3->H2->O |
| เวลาประมวลผล (นาที) | 0.00 |

**ตารางที่ 5** ผลของปัญหาที่ต่างกันจากโปรแกรม LINGO

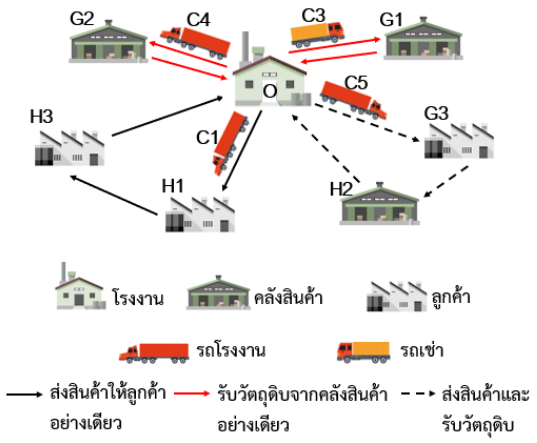
| ชุดข้อมูล | จุดส่ง | จุดรับ | ใช้รถ | Current Practice [บาท] | LINGO [บาท] | เวลา (นาที) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1A | 3 | 3 | 4 | 55,548 | 48,572 | 0.00 |
| 1B | 3 | 3 | 4 | 11,298 | 11,260 | 0.00 |
| 1C | 3 | 3 | 4 | 17,592 | 16,994 | 0.00 |
| 2A | 6 | 3 | 4 | 108,396 | 94,438 | 0.00 |
| 2B | 6 | 3 | 4 | 61,288 | 57,913 | 0.00 |
| 2C | 6 | 3 | 4 | 64,810 | 57,684 | 0.00 |
| 3A | 9 | 3 | 4 | 109,318 | 98,701 | 0.01 |
| 3B | 9 | 3 | 4 | 116,748 | 100,634 | 0.01 |
| 3C | 9 | 3 | 4 | 118,220 | 95,848 | 0.00 |
| 4A | 10 | 5 | 5 | 118,904 | 99,174 | 0.02 |
| 4B | 10 | 5 | 5 | 115,570 | 99,626 | 0.04 |
| 4C | 10 | 5 | 5 | 114,686 | 100,622 | 0.04 |
| 5A | 10 | 9 | 6 | 180,188 | 146,902 | 1.34 |
| 5B | 10 | 9 | 6 | 200,988 | 148,842 | 1.02 |
| 5C | 10 | 9 | 6 | 170,962 | 144,823 | 1.55 |
| 6A | 10 | 10 | 7 | 240,043 | 162,887 | 2,880 |
| 6B | 10 | 10 | 7 | 230,839 | 170,763 | 2,880 |
| 6C | 10 | 10 | 7 | 237,463 | 192,010 | 2,880 |

**ตารางที่ 6** ผลการพัฒนาคำตอบของแบบจำลองเทียบกับกรณีศึกษาจริง

| ชุดข้อมูล | RI (%) | ชุดข้อมูล | RI (%) | ชุดข้อมูล | RI (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1A | 14.4 | 3A | 10.8 | 5A | 22.7 |
| 1B | 0.3 | 3B | 16.0 | 5B | 35.0 |
| 1C | 3.5 | 3C | 23.3 | 5C | 18.0 |
| 2A | 14.8 | 4A | 19.9 | 6A | 47.4 |
| 2B | 5.8 | 4B | 16.0 | 6B | 35.2 |
| 2C | 12.4 | 4C | 14.0 | 6C | 23.7 |
| เฉลี่ย | | | | | 18.5 |




**รูปที่ 2** ผลการทดสอบจากโปรแกรม LINGO




**รูปที่ 3** รูปแบบการขนส่งของปัญหาที่ 1 ชุดข้อมูล A

## 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางเป็นปัญหาที่มีรูปแบบซับซ้อน เนื่องจากรถขนส่งมีขนาดเล็กและมีจำนวนจำกัดทำให้ภาคธุรกิจจำเป็นต้องใช้รถในการทำภารกิจทั้งการไปรับวัตถุดิบจากกคลังสินค้าต่าง ๆ และไปส่งสินค้าสำเร็จรูปให้กับลูกค้าในหลายพื้นที่ ให้ทันตามกรอบเวลาของลูกค้าและคลังสินค้า ส่งผลให้มีความจำเป็นต้องใช้รูปแบบการเดินรถในแต่ละเส้นทางหลายรูปแบบ ได้แก่ เส้นทางที่ส่งสินค้าอย่างเดียว รับวัตถุดิบอย่างเดียว หรือทั้งส่งสินค้าและรับวัตถุดิบ การขาดการวางแผนการจัดการที่ดีในการใช้รถขนส่งที่มีจำนวนจำกัดทำให้โรงงานผลิตมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากการเช่ารถของผู้ให้บริการภายนอก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหารูปแบบเส้นทางเดินรถขนส่งของโรงงานร่วมกับการพิจารณาการใช้บริการรถเช่า ที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำสุด โดยผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ต้นทุนขนส่งของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลางลดลงเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาจริงเฉลี่ยร้อยละ 18.5 จากจำนวนการทดลอง 18 ชุดการทดลอง โดยค่าการปรับปรุงเชิงสัมพัทธ์นี้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้ การศึกษาในครั้งนี้จึงบรรลุวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนขนส่งให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง รวมถึงเป็นแนวทางให้กับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในกรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการประมวลผลกลับเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด งานวิจัยในอนาคตควรพัฒนาเครื่องมือสำหรับแก้ปัญหาขนาดใหญ่ อาทิ เมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristic) ซึ่งคาดว่าช่วยพัฒนาคำตอบแบบใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุดและใช้เวลาในการประมวลผลน้อยลง นอกจากนี้ งานวิจัยในอนาคตสามารถเพิ่มเงื่อนไขเพิ่มเติมเพื่อให้สะท้อนสถานการณ์จริงมากขึ้น เช่น การจัดการสินค้าคงคลังเพื่อลดต้นทุนการจัดเก็บสินค้า ซึ่งมีผลต่อการวางแผนของธุรกิจในการจัดหาวัตถุดิบเข้าคลังสินค้า

สำหรับใช้ในการผลิตสินค้าสำเร็จรูปส่งมอบให้กับลูกค้าในสถานการณ์จริงของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ Research unit on System Modelling for Industry ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับการสนับสนุนที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

[1] S. Asgharieh Ahari, I. Bakir and K. J. Roodbergen, "A new perspective on carrier collaboration: Collaborative vehicle utilization," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 163, 2024, Art. no. 104647, doi: 10.1016/j.trc.2024.104647.

[2] TTNews. "US Logistics Costs Rise 11.4% in 2018, Report Says." ttnews.com. https://www.ttnews.com/articles/us-logistics-costs-rise-114-2018-report-says (accessed Nov. 09, 2022).

[3] Cogoport. "The key element of logistics." cogoport.com. https://www.cogoport.com/blogs/transport-cost (accessed Nov. 09, 2022).

[4] NBCNews. "U.S. farmers feel the squeeze as Ukraine invasion sends livestock feed costs higher." nbcnews.com https://www.nbcnews.com/news/us-news/us-farmers-feel-squeeze-ukraine-invasion-sends-livestock-feed-costs-hi-rcna20087 (accessed Nov. 09, 2022).

[5] IFIF. "International Feed Industry Federation – The Global Feed Industry." ifif.org. https://ifif.org/global-feed/industry/ (accessed Nov. 09, 2022).

[6] F. Kocatürk, G. Y. Tütüncü and S. Salhi, "The multi-depot heterogeneous VRP with backhauls: formulation and a hybrid VNS with GRAMPS meta-heuristic approach," *Annals of Operations Research*, vol. 307, pp. 277–302, 2021, doi: 10.1007/s10479-021-04137-6.

[7] X. Zhu, Z. Zhao and R. Yan, "Low carbon logistics optimization for multi-depot cvrp with backhauls-model and solution," *Tehnički vjesnik*, vol. 27, no. 5, pp. 1617–1624, 2020, doi: 10.17559/TV-20200809211109.

[8] F. Stavropoulou, "The Consistent Vehicle Routing Problem with heterogeneous fleet," *Computers & Operations Research*, vol. 140, 2022, Art. no. 105644, doi: 10.1016/j.cor.2021.105644.

[9] D. Gasque and P. Munari, "Metaheuristic, models and software for the heterogeneous fleet pickup and delivery problem with split loads," *Journal of Computational Science*, vol. 59, 2022, Art. no. 101549, doi: 10.1016/j.jocs.2021.101549.

[10] D. Bustos-Coral and A. M. Costa, "Drayage routing with heterogeneous fleet, compatibility constraints, and truck load configurations," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 168, 2022, Art. no. 102922, doi: 10.1016/j.tre.2022.102922.

[11] Z. Hussain Ahmed and M. Yousefikhoshbakht, "An improved tabu search algorithm for solving heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem with time windows," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 64, pp. 349–363, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.09.008.

[12] L. F. López-Castro, E. L. Solano-Charris and A. Pagès-Bernaus, "Environmental approach for the design of raw milk collection routes with a heterogeneous fleet," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 211, 2023, Art. no. 107995, doi: 10.1016/j.compag.2023.107995.

[13] V. F. Yu, P. T. Anh, A. Gunawan and H. Han, "A simulated annealing with variable neighborhood descent approach for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with multiple forward/reverse cross-docks," *Expert Systems with Applications*, vol. 237, 2024, Art. no. 121631, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121631.

[14] M. J. Santos, D. Jorge, T. Ramos and A. Barbosa-Póvoa, "Green reverse logistics: Exploring the vehicle routing problem with deliveries and pickups," *Omega*, vol. 118, 2023, Art. no. 102864, doi: 10.1016/j.omega.2023.102864.

[15] J. Euchi, "The vehicle routing problem with private fleet and multiple common carriers: Solution with hybrid metaheuristic algorithm," *Vehicular Communications*, vol. 9, pp. 97–108, 2017, doi: 10.1016/j.vehcom.2017.04.005.

[16] J. Li, L. Jia, T. Li, X. Guan, H. Wang, D. Lu and H. Sun, "Scheduled service network design of long-haul freight transportation based on the segment subcontract," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 157, 2021, Art. no. 107253, doi: 10.1016/j.cie.2021.107253.

[17] J. J. Alcaraz, L. Caballero-Arnaldos and J. Vales-Alonso, "Rich vehicle routing problem with last-mile outsourcing decisions," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 129, pp. 263–286, 2019, doi: 10.1016/j.tre.2019.08.004.

[18] Y. Dang, T. T. Allen and M. Singh, "A heterogeneous vehicle routing problem with common carriers and time regulations: Mathematical formulation and a two-color ant colony search," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 168, 2022, Art. no. 108036, doi: 10.1016/j.cie.2022.108036.

[19] C. Gahm, C. Brabänder, and A. Tuma, "Vehicle routing with private fleet, multiple common carriers offering volume discounts, and rental options," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 97, pp. 192–216, 2017, doi: 10.1016/j.tre.2016.10.010.

[20] F. M. Bergmann, S. M. Wagner and M. Winkenbach, "Integrating first-mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e-commerce distribution," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 131, pp. 26–62, 2020, doi: 10.1016/j.trb.2019.09.013.

[21] Y. Wang, Q. Li, X. Guan, J. Fan, M. Xu and H. Wang, "Collaborative multi-depot pickup and delivery vehicle routing problem with split loads and time windows," *Knowledge-Based Systems*, vol. 231, 2021, Art. no. 107412, doi: 10.1016/j.knosys.2021.107412.

[22] J. Zhao, H. Dong and N. Wang, "Green split multiple-commodity pickup and delivery vehicle routing problem," *Computers and Operations Research*, vol. 159, 2023, Art. no. 106318, doi: 10.1016/j.cor.2023.106318.

[23] N. Dubey and A. Tanksale, "A multi-depot vehicle routing problem with time windows, split pickup and split delivery for surplus food recovery and redistribution," *Expert Systems with Applications*, vol. 232, 2023, Art. no. 120807, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120807.

[24] T. Ren, T. Luo, B. Jia, B. Yang, L. Wang and L. Xing, "Improved ant colony optimization for the vehicle routing problem with split pickup and split delivery," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 77, 2023, Art. no 101228, doi: 10.1016/j.swevo.2023.101228.

[25] Y. Wang, L. Ran, X. Guan, J. Fan, Y. Sun and H. Wang, "Collaborative multicenter vehicle routing problem with time windows and mixed deliveries and pickups," *Expert Systems with Applications*, vol. 197, 2022, Art. no. 116690, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116690.

[26] J. Sun and R. Wang, "Multi-objective optimization of a sustainable two echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery in construction projects," *Journal of Engineering Research*, 2023, doi: 10.1016/j.jer.2023.10.033.