

## การลดต้นทุนการขนส่งในระบบการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิ

โดยใช้ตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

### The Minimizing Transportation Costs in Cold Chain Logistics using the Mixed-Integer Linear Programming

สุภาพร แสนกุล<sup>1</sup>, ณัฐธินัย สุพัฒน์ธนานนท์<sup>2\*</sup>, นราธิป สุพัฒน์ธนานนท์<sup>3</sup>, รักษ์น้อย อัครรุ่งเรืองกุล<sup>1</sup>

Supaporn Sankul<sup>1</sup>, Natdhanai Supattananon<sup>2\*</sup>, Naratip Supattananon<sup>3</sup>,

Raknoi Akararungreangkul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Khonkaen University

<sup>2</sup>คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

<sup>2</sup>Faculty of Business Administration and Information Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

<sup>3</sup>คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

<sup>3</sup>Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการขนส่งสินค้าในระบบโลจิสติกส์ให้มีความเย็นให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยพิจารณาการบรรทุก 2 ประเภท ได้แก่ รถบรรทุกควบคุมอุณหภูมิ 1 ช่องบรรทุก และรถบรรทุกควบคุมอุณหภูมิ 2 ช่องบรรทุก ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิตามความเหมาะสมของสินค้าได้หลายระดับ นอกจากนี้รถบรรทุกทั้ง 2 ประเภท มีต้นทุนต่อระยะทางและต้นทุนค่าจ้างคนขับแตกต่างกัน การวิจัยนี้เน้นการจัดเส้นทางและคัดเลือกรถบรรทุกให้เหมาะสมสำหรับการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าตามความต้องการสินค้า 2 ประเภท ผลการวิจัย แสดงว่าตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้จริง กล่าวคือ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo อยู่ภายใต้เงื่อนไขหรือข้อกำหนดทุกประการ จากการทดสอบกับปัญหาจริงของกรณีศึกษาที่มีความต้องการที่แตกต่างกัน 3 วัน พบว่า ตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่น่าเสนอทำให้ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 23.75 อย่างมีนัยสำคัญที่ .05 ดังนั้น แนวทางนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในอุตสาหกรรมห่วงโซ่ความเย็น

**คำสำคัญ:** ห่วงโซ่ความเย็น ปัญหาการจัดเส้นทาง การขนส่งสินค้า ตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

\* Corresponding author : Natdhanai.su@rmu.ac.th

## Abstract

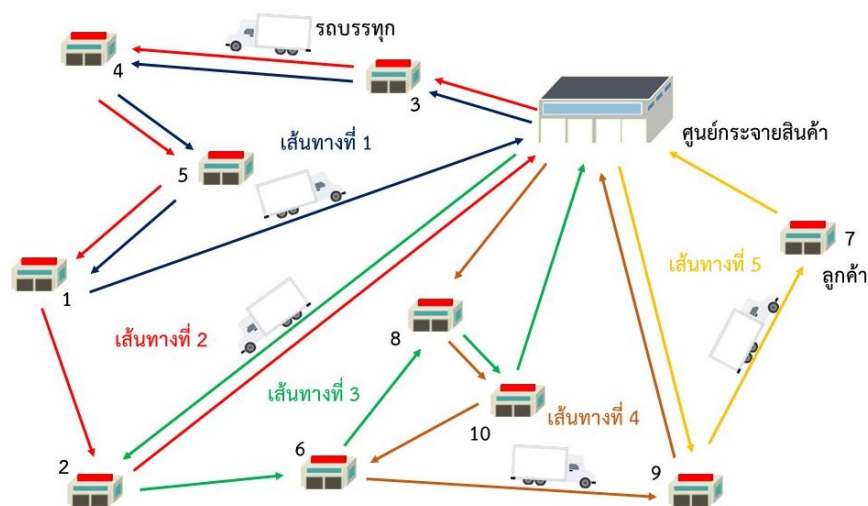
This research aims to develop an appropriate mathematical scheduling model for the problem of transporting goods in cold chain logistics with the lowest cost. Two types of trucks are considered: temperature-controlled trucks with 1 loading bay and temperature-controlled trucks with 2 loading bays, which can control the temperature according to the suitability of the product at various levels. In addition, the two types of trucks have different costs per distance and driver salary costs. This research focuses on routing and selecting trucks to be suitable for transporting goods from the distribution center to customers according to the demand for 2 types of products. The results show that the developed linear mixed integer model was accurate and can actually solve this problem, that is, the results obtained from the Lingo package are subject to all conditions or requirements. From testing on the real problem of a case study with 3 days of different demand, it was found that the proposed Mixed-Integer Linear Programming reduced transportation costs by an average of 23.75 percent, significantly at .05. Therefore, this approach can help increase efficiency. and value in the cold chain industry.

**Keywords:** Cold chain, Vehicle routing problem, Transportation, Mixed-integer linear programming

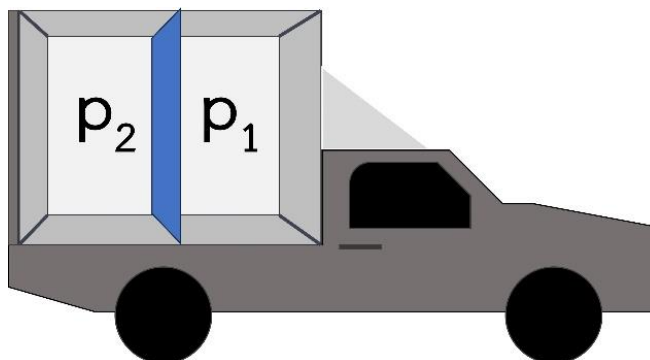
## 1. บทนำ

การขนส่งสินค้าในอุตสาหกรรมห่วงโซ่ความเย็นมีความสำคัญต่อการรับรองคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียง่าย (Office of the National Economic and Social Development Council, 2021) การรักษาสภาพอุณหภูมิที่ต้องการตลอดการขนส่งและการเก็บรักษาจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเน่าเสีย (Chandran, Hasanuzzaman, Arici & Kumar, 2022; Zhao, Zhang, Xu, & Zhang, 2020) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสินค้ากลุ่มอาหารสดหรือยาซึ่งไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Qi, Ji, Zhang, Liu, Xu, Ma, & Gao, 2022; Lin, Zhao, & Lev, 2020) และเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ขายกับผู้ซื้อ ปัจจุบันบริษัทส่วนใหญ่ใช้รถบรรทุกตอนเดียวในการขนส่งสินค้าให้กับลูกค้า (Guo, Zhang, & Liu, 2022; Zhang, Guan, Qiu, & Wu, 2023) เนื่องจากบริษัทเหล่านั้นให้บริการสินค้าประเภทเดียว แต่ปัจจุบันสินค้าที่ขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิมีหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท ได้แก่ 1) สินค้าธรรมดา 2) สินค้าแช่เย็นที่อุณหภูมิ 3 ถึง 10 องศา และ 3) สินค้าแช่แข็งที่อุณหภูมิ -24 ถึง -4 องศา เป็นต้น (Qiu, Zhang, Chen, Wang, Pan, Sheng, & Kong, 2020) ทำให้เกิดการจัดเส้นทางที่ไม่เหมาะสมและนำมาซึ่งต้นทุนที่มากเกินไปจนความจำเป็น ดังภาพที่ 1

Zhang, Guan, Qiu, & Wu (2023) แก้ปัญหาการขนส่งสินค้าในระบบโลจิสติกส์ให้มีความยั่งยืน โดยพิจารณาผลกระทบหลายประเภทที่มีปริมาณการบรรทุกสูงสุดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ มีช่องบรรทุกสินค้าเพียงช่องเดียวหรือที่เรียกว่า “รถบรรทุกตอนเดียว” โดยมุ่งเน้นการคัดเลือกรถบรรทุกที่เหมาะสมกับเส้นทางการขนส่งและลดต้นทุนการขนส่งรวม แตกต่างจาก (Chowmalia, & Sukto, 2021) ที่ใช้รถบรรทุกประเภทเดียวแต่มีหลายช่องบรรทุกสินค้า ทำให้สามารถให้บริการลูกค้าที่มีความต้องการสินค้าหลายประเภทในการขนส่งเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังนั้น ถ้าลูกค้ามีความต้องการสินค้าหลายประเภท และสินค้าแต่ละประเภทต้องการอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน การพิจารณาผลกระทบหลายช่องบรรทุกสินค้า จึงมีความเหมาะสมมากกว่าดังภาพที่ 2

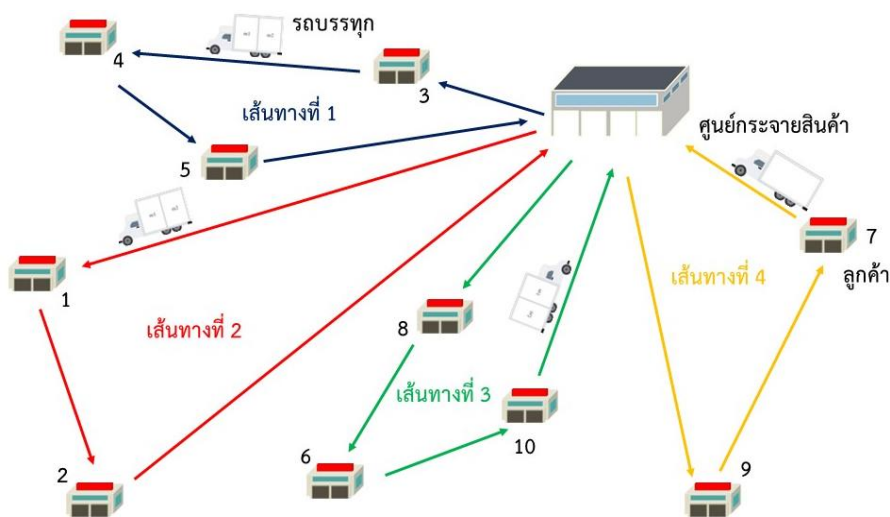


ภาพที่ 1 เส้นทางการขนส่งในปัจจุบัน



ภาพที่ 2 รถบรรทุกแบบดัดแปลง

จากภาพที่ 2 พบว่า รถบรรทุกสามารถขนส่งสินค้าที่มีความต้องการควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้ 2 ประเภท ภายในการขนส่งครั้งเดียวได้ จึงทำให้สามารถลดเส้นทางการขนส่งที่ซ้ำซ้อนลงได้ ส่งผลให้ระยะทางรวมในการขนส่งสินค้าลดลง อย่างไรก็ตาม การขนส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิมากกว่า 1 ประเภท จะทำให้ต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยระยะทางสูงขึ้น ซึ่งต้องได้รับการพิสูจน์ว่าการจัดรถบรรทุกและเส้นทางที่เหมาะสมจะส่งผลต่อต้นทุนการขนส่งรวมมากกว่าต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการควบคุม 2 อุณหภูมิ ซึ่งจะนำเสนอในรูปแบบของปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสม ดังภาพที่ 3



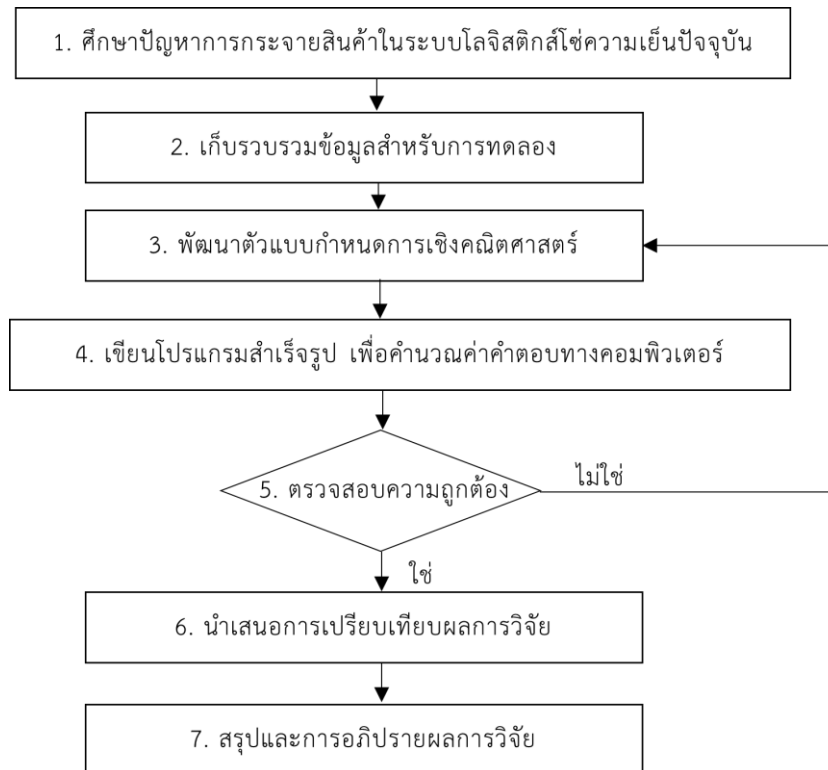
ภาพที่ 3 เส้นทางการขนส่งที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการขนส่งสินค้า ในระบบโลจิสติกส์ใช้ความเย็นให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีเป้าหมายหลักคือการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการกำหนดเส้นทางการขนส่งกรณีที่ใช้รถบรรทุกตอนเดียวกับการกรณีที่ใช้รถบรรทุกสองตอนภายใต้เงื่อนไขการขนส่งเดียวกัน ซึ่งจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและเพิ่มความคุ้มค่าในอุตสาหกรรมห่วงโซ่ความเย็น

ในส่วนถัดไปของบทความวิจัยนี้จะบรรยายเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัย อธิบายตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่เสนอ นำเสนอการทดลองและผลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ สรุปและอภิปรายผลการวิจัย และให้คำแนะนำตามผลการวิจัย

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยได้ออกแบบภายใต้ขอบเขตงานวิจัยและมุ่งเป้าหมายการพัฒนาตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการขนส่งสินค้าในระบบโลจิสติกส์ใช้ความเย็นให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการวิจัย

## 2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) ความต้องการสินค้า เพื่อใช้ในการทดสอบตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น โดยการศึกษาวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษาที่เป็นบริษัทที่ประกอบธุรกิจกระจายสินค้าในระบบโลจิสติกส์โซ่ความเย็นขนาดกลางในประเทศไทย ซึ่งมีลักษณะปัญหาและเงื่อนไขการจัดการขนส่งสินค้าเดียวกันกับที่นำเสนอ จึงใช้เป็นตัวแทนของปัญหาสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ข้อมูลของความต้องการสินค้าถูกจัดเก็บโดยใช้หน่วยเป็น “กล่อง” ตามบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่เหมาะสมและได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งจะอยู่ในรูปของความต้องการสินค้าของลูกค้าทั้งหมดจำนวน 11 ราย มีหน่วยเป็น “กล่องต่อวัน” ดังตารางที่ 1

2) ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งสินค้า ถูกจัดเก็บในรูปแบบของโครงข่ายระยะทาง จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นระยะทางจริงที่ใช้จัดการขนส่งสินค้าในปัจจุบัน มีหน่วยเป็น “กิโลเมตร” โดยกำหนดให้จุดที่ 0 (ศูนย์) เป็นศูนย์กระจายสินค้า ดังตารางที่ 2

3) ข้อมูลของรถบรรทุก คือข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของรถบรรทุก ต้นทุนค่าขนส่งสินค้า ความสามารถสูงสุดในการบรรทุก และข้อมูลอื่นๆ ซึ่งเก็บรวบรวมจากข้อมูลจริงของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 1** ความต้องการสินค้าของลูกค้าแต่ละราย

| ลูกค้ารายที่ | ปริมาณความต้องการสินค้า |     |             |     |             |     |
|--------------|-------------------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|
|              | วันที่ 1                |     | วันที่ 2    |     | วันที่ 3    |     |
|              | (กล่อง/วัน)             |     | (กล่อง/วัน) |     | (กล่อง/วัน) |     |
|              | 1                       | 2   | 1           | 2   | 1           | 2   |
| 1            | 43                      | 37  | 22          | 22  | 87          | 46  |
| 2            | 37                      | 51  | 50          | 70  | 94          | 85  |
| 3            | 61                      | 53  | 69          | 47  | 6           | 13  |
| 4            | 81                      | 68  | 20          | 68  | 20          | 25  |
| 5            | 9                       | 93  | 80          | 77  | 58          | 40  |
| 6            | 14                      | 70  | 8           | 78  | 13          | 21  |
| 7            | 72                      | 55  | 93          | 37  | 21          | 64  |
| 8            | 9                       | 52  | 75          | 82  | 21          | 68  |
| 9            | 70                      | 68  | 12          | 89  | 26          | 96  |
| 10           | 75                      | 68  | 34          | 79  | 98          | 83  |
| 11           | 12                      | 50  | 38          | 84  | 76          | 56  |
| รวม          | 483                     | 665 | 501         | 733 | 520         | 597 |

**ตารางที่ 2** ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งสินค้า (กิโลเมตร)

| จาก/ไป | 0    | 1    | 2    | 3    | ... | 10   | 11   |
|--------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 0      | -    | 42.6 | 62.7 | 27.1 |     | 11.8 | 18   |
| 1      | 42.6 | -    | 61.5 | 49.9 |     | 48.3 | 56.1 |
| 2      | 62.7 | 61.5 | -    | 76.4 |     | 67.4 | 76.3 |
| 3      | 27.1 | 49.9 | 76.4 | -    |     | 35.7 | 38.2 |
| ...    |      |      |      |      |     |      |      |
| 10     | 11.8 | 48.3 | 67.4 | 35.7 |     | -    | 25.7 |
| 11     | 18   | 56.1 | 76.3 | 38.2 |     | 25.7 | -    |

\* จุดที่ 0 คือ ศูนย์กระจายสินค้า

**ตารางที่ 3** ข้อมูลรถบรรทุก

| ประเภทรถบรรทุก<br>ควบคุมอุณหภูมิ | ความสามารถในการบรรทุกสูงสุด<br>ของช่องบรรทุกสินค้า (กล่อง) |     | ต้นทุนต่อ<br>ระยะทาง (บาท/<br>กม.) | ต้นทุนค่าจ้าง<br>คนขับ (บาท) | จำนวน<br>พร้อมใช้<br>(คัน) |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
|                                  | 1                                                          | 2   |                                    |                              |                            |
| 1 ช่องบรรทุก                     | 320                                                        | -   | 12.78                              | 800                          | 5                          |
| 2 ช่องบรรทุก                     | 240                                                        | 240 | 17.25                              | 1,000                        | 5                          |

## 2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ใช้ตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์คือ ตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Linear Programming: MILP) เนื่องจากมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขหรือข้อจำกัดเป็นทั้งสมการเชิงเส้นและจำนวนเต็ม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิ (Ahmadi-Javid, Mansourfar, Lee, & Liu, 2023; Chowmalia, & Sukto, 2020) และสามารถแก้ไขปัญหาแบบ Exact Method ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Wonginta, Wangrungwichaisri, & Kantasa-ard, 2018) ทั้งนี้ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Lingo ในการประมวลผลเพื่อหาผลลัพธ์ของการศึกษานี้ เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวมีความเหมาะสม สะดวกในการใช้งาน และได้รับความนิยมสำหรับการหาผลลัพธ์จากตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ในปัจจุบัน (Moonsri, Sethanan, Worasan, & Nitisiri, 2022; Supattananon, & Akararungruangkul, 2019)

## 2.3 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo รุ่นที่ 13.0 จะใช้การทดสอบทางสถิติแบบ Paired samples test เนื่องจากข้อมูลที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกันหรือกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มมีความสัมพันธ์กัน โดยตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

เมื่อกำหนดให้  $\mu_1$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากคำตอบวิธีดั้งเดิม และ  $\mu_2$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากคำตอบวิธีที่นำเสนอ ซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้าทั้งหมด 3 วัน ตามตารางที่ 1 จากนั้นพิจารณาว่าค่า p-values น้อยกว่า 0.05 หรือไม่ ถ้าน้อยกว่าแสดงว่าวิธีที่นำเสนอทำให้มีต้นทุนรวมต่ำกว่าวิธีแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05

### 3. ตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์

สำหรับตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มจะพัฒนาจากตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ของ Chowmalia, W. & Sukto, S. (2021) เนื่องจากมีลักษณะของปัญหาที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ รถบรรทุกที่ใช้ในการขนส่งสินค้ามีหลายช่องบรรทุกสินค้าและมีเพียงขนาดเดียวเท่านั้น แต่การวิจัยนี้พิจารณาบรรทุกหลายช่องบรรทุกและหลายขนาดรวมด้วย ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ตัวแปร

$i, j$  คือ ดัชนีของศูนย์กระจายสินค้าและลูกค้า;

$$i, j = \{1, 2, 3, \dots, 11\}$$

$t$  คือ ดัชนีของรถบรรทุกที่ใช้ในการขนส่ง;

$t = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$  นั่นคือ  $t = \{1, 2, 3, \dots, 5\}$  หมายถึง รถบรรทุกประเภทควบคุมอุณหภูมิ 1 ช่องบรรทุก และ  $t = \{6, 7, 8, \dots, 10\}$  หมายถึง รถบรรทุกประเภทควบคุมอุณหภูมิ 2 ช่องบรรทุก

$p$  คือ ประเภทของสินค้าที่ขนส่ง ซึ่งการวิจัยนี้สนใจสินค้าควบคุมอุณหภูมิทั้งหมด 2 ช่วงอุณหภูมิ จึงแบ่งประเภทของสินค้าออกเป็น 2 ประเภท ดังนั้น  $p = \{1, 2\}$

#### 3.2 พารามิเตอร์

$D_{ij}$  คือ ระยะทางจากจุด  $i$  ไปยังจุด  $j$  (กิโลเมตร)

$Q_{ip}$  คือ ความต้องการสินค้า  $p$  ของลูกค้ารายที่  $i$  (กล่อง)

$VC_t$  คือ ต้นทุนค่าขนส่งตามระยะทางของรถบรรทุกคันที่  $t$  (บาทต่อกิโลเมตร)

$FC_t$  คือ ต้นทุนค่าขนส่งคงที่ต่อเที่ยว (ค่าจ้างคนขับ) ของรถบรรทุกคันที่  $t$  (บาท)

$MAXLOAD_{tp}$  คือ ความสามารถในการขนส่งสูงสุดในการบรรทุกสินค้า  $p$  ต่อเที่ยวของรถบรรทุกคันที่  $t$  (กล่อง)

#### 3.3 ตัวแปรตัดสินใจ

เป็นตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจในการเดินทางกระจายสินค้าของรถบรรทุกที่ถูกคัดเลือกตามเส้นทางต่างๆ เพื่อให้การขนส่งมีต้นทุนที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$x_{ijt}$  คือ เดินทางจากจุด  $i$  ไปยังจุด  $j$  ด้วยรถบรรทุกคันที่  $t$  เป็นตัวแปรแบบไบนารี กล่าวคือ  $x_{ijt}$  เท่ากับ 1 เมื่อมีการเดินทางจากจุด  $i$  ไปยังจุด  $j$  ด้วยรถบรรทุกคันที่  $t$  หรือเท่ากับ 0 เป็นกรณีอื่นๆ

$y_{jtp}$  คือ การให้บริการ ณ จุด  $j$  ด้วยรถบรรทุกคันที่  $t$  สำหรับสินค้า  $p$  เป็นตัวแปรแบบไบนารี กล่าวคือ  $y_{jtp}$  เท่ากับ 1 เมื่อมีการให้บริการ ณ จุด  $j$  ด้วยรถบรรทุกคันที่  $t$  สำหรับสินค้า  $p$  หรือเท่ากับ 0 เป็นกรณีอื่นๆ

$z_t$  คือ ตัดสินใจว่ารถบรรทุกคันที่  $t$  ถูกใช้งาน เป็นตัวแปรแบบไบนารี กล่าวคือ  $z_t$  เท่ากับ 1 เมื่อรถบรรทุกคันที่  $t$  ถูกใช้งาน หรือเท่ากับ 0 เป็นกรณีอื่นๆ

### 3.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เป็นเป้าหมายของการดำเนินการของตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด ดังสมการที่ (1)

$$MIN = \sum_{t=1}^{10} \sum_{j=1}^{11} \sum_{i=1}^{11} VC_t \cdot D_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{t=1}^{10} FC_t \cdot z_t \quad (1)$$

### 3.5 สมการข้อจำกัดหรือเงื่อนไข

คือสมการที่แสดงถึงขอบเขตของค่าคำตอบที่จะได้มาซึ่งเป้าหมายของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ อย่างไรก็ตามเงื่อนไขที่มากขึ้นจะทำให้ค่าคำตอบถูกบีบบังคับให้ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้มีสมการเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\sum_{i=1}^{11} x_{ijt} \leq 1 \quad \forall_{jt} \quad (2)$$

สมการที่ 2 คือ รถบรรทุกจะต้องเดินทางออกจากศูนย์กระจายสินค้าเท่านั้น

$$\sum_{i=1}^{11} x_{ikt} = \sum_{j=1}^{11} x_{kjt} \quad \forall_{tk} \quad (3)$$

สมการที่ 3 คือ รถบรรทุกแต่ละคันจะเดินทางไปยังลูกค้าใดๆ และออกจากจุดนั้น เพียงครั้งเดียวเท่านั้น โดยที่  $k = \{1, 2, 3, \dots, 11\}$

$$\sum_{j=1}^{11} \sum_{i=1}^{11} u_i - u_j + (N \cdot x_{ijt}) \leq N - 1 \quad \forall_{i \neq j, t} \quad (4)$$

สมการที่ 4 คือ สมการป้องกันการขนส่งทับเส้นทางหรือไม่ให้เกิด sub-tour

$$\sum_{i=1}^{11} x_{ijt} \geq y_{jtp} \quad \forall_{jtp} \quad (5)$$

สมการที่ 5 คือ การยืนยันว่าถ้ามีการเดินทางผ่านของรถบรรทุกไปยังลูกค้า  $j$  ใดๆ จะต้องให้บริการลูกค้ารายนั้นด้วย

$$x_{ijt} \leq z_t \quad \forall_{ijt} \quad (6)$$

สมการที่ 6 คือ การสร้างค่าตัวแปรตัดสินใจ  $z_t$  กล่าวคือ ถ้ามีการใช้รถบรรทุก  $t$  ใดๆ จะต้องมีค่า  $z_t$  เท่ากับ 1

$$\sum_{j=1}^{11} Q_{ip} \cdot y_{jtp} \leq MAXLOAD_{tp} \quad \forall_{tp} \quad (7)$$

สมการที่ 7 คือ ยืนยันว่าปริมาณสินค้าแต่ละชนิดที่ให้บริการจะต้องไม่เกินความสามารถในการบรรทุกสูงที่สุดของช่องบรรทุกสินค้าของรถบรรทุกแต่ละคัน

$$x_{ijt}, y_{jtp}, z_t = \{0, 1\} \quad \forall_{ijtp} \quad (8)$$

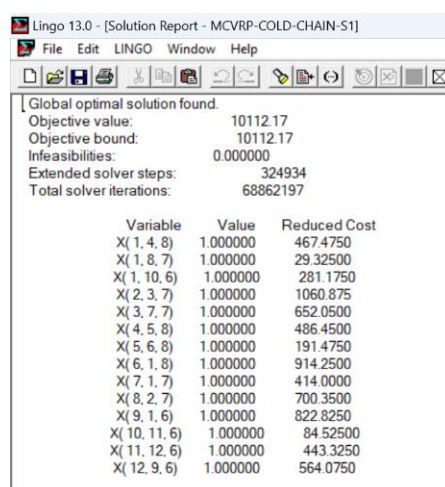
และสมการที่ 8 คือ กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจทั้งหมดเป็นแบบไบนารี

#### 4. ผลการวิจัย

การดำเนินการหาผลลัพธ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผล Intel(R) Core(TM) i7-9750HF CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz, RAM 16.0 G. ระบบปฏิบัติการ Windows7 ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 5



(ก) สถานะของผลลัพธ์



**Lingo 13.0 - [Solution Report - MCVRP-COLD-CHAIN-S1]**

Global optimal solution found.

Objective value: 10112.17  
Objective bound: 10112.17  
Infeasibilities: 0.000000  
Extended solver steps: 324934  
Total solver iterations: 68862197

| Variable      | Value    | Reduced Cost |
|---------------|----------|--------------|
| X( 1, 4, 8)   | 1.000000 | 467.4750     |
| X( 1, 8, 7)   | 1.000000 | 29.32500     |
| X( 1, 10, 6)  | 1.000000 | 281.1750     |
| X( 2, 3, 7)   | 1.000000 | 1060.875     |
| X( 3, 7, 7)   | 1.000000 | 652.0500     |
| X( 4, 5, 8)   | 1.000000 | 486.4500     |
| X( 5, 6, 8)   | 1.000000 | 191.4750     |
| X( 6, 1, 8)   | 1.000000 | 914.2500     |
| X( 7, 1, 7)   | 1.000000 | 414.0000     |
| X( 8, 2, 7)   | 1.000000 | 700.3500     |
| X( 9, 1, 6)   | 1.000000 | 822.8250     |
| X( 10, 11, 6) | 1.000000 | 84.52500     |
| X( 11, 12, 6) | 1.000000 | 443.3250     |
| X( 12, 9, 6)  | 1.000000 | 564.0750     |

(ข) ค่าของผลลัพธ์

ภาพที่ 5 ผลลัพธ์จากโปรแกรม Lingo

จากภาพที่ 5 ทดลองหาคำตอบสำหรับปัญหาความต้องการลูกค้าวันที่ 1 ซึ่งคำตอบที่ได้เป็นแบบจำลองมีลักษณะเป็นเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มหรือ MILP ตามที่พัฒนาขึ้น และมีสถานะคำตอบเป็นแบบ Global Optimum หรือเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา กล่าวคือ สำหรับปัญหาการขนส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิตามความต้องการลูกค้าวันที่ 1 มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 10,112.17 บาท และใช้เวลาในการหาคำตอบของปัญหาการขนส่งสินค้าในระบบโลจิสติกส์ใช้ความเย็น นั่นคือ วิธีการเดินทางที่ทำให้ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าต่ำที่สุดที่ 2 ชั่วโมง 22 นาที 4 วินาที หรือประมาณ 142.07 นาที จากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถแปลผลได้ ดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** การแปลผลการทดลองจากความต้องการลูกค้าวันที่ 1

| เส้นทางที่ | วิธีดั้งเดิม                    |                      | วิธีที่นำเสนอ                   |                |
|------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------|
|            | ใช้รถบรรทุกประเภทควบคุมอุณหภูมิ | วิธีเดินทาง          | ใช้รถบรรทุกประเภทควบคุมอุณหภูมิ | วิธีเดินทาง    |
| 1          | 1 ช่องบรรทุก                    | 1-7-3-2-6-5-4-9-12-1 | 2 ช่องบรรทุก                    | 1-4-5-6-1      |
| 2          | 1 ช่องบรรทุก                    | 1-8-11-10-1          | 2 ช่องบรรทุก                    | 1-8-2-3-7-1    |
| 3          | 1 ช่องบรรทุก                    | 1-4-6-5-8-1          | 2 ช่องบรรทุก                    | 1-10-11-12-9-1 |
| 4          | 1 ช่องบรรทุก                    | 1-9-12-1             | -                               | -              |
| 5          | 1 ช่องบรรทุก                    | 1-11-10-7-3-2-1      | -                               | -              |

จากตารางที่ 4 ตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์โดยวิเคราะห์เทียบกับเงื่อนไขของการขนส่งสินค้าที่นำเสนอไว้ในข้อ 5 สมการข้อจำกัดหรือเงื่อนไข ยกตัวอย่างเช่น เส้นทางที่ 1 ของวิธีที่นำเสนอใช้รถบรรทุกควบคุมอุณหภูมิ 2 ช่องบรรทุก ที่มีความสามารถในการบรรทุกสูงที่สุดช่องละ 240 กล่อง จำนวน 2 ช่อง พิจารณาเส้นทางที่รถบรรทุกคันดังกล่าวให้บริการคือ ลูกค้ารายที่ 4, 5 และ 6 ซึ่งมีความต้องการสินค้าประเภทที่ 1 จำนวน 61, 81 และ 9 กล่อง ตามลำดับ รวมเป็น 151 กล่อง และมีความต้องการสินค้าประเภทที่ 2 จำนวน 53, 68 และ 93 กล่อง ตามลำดับ รวมเป็น 214 กล่อง นั่นคือ ปริมาณสินค้าที่จัดส่งในเที่ยวนี้ไม่เกินความสามารถในการบรรทุกสูงที่สุดของช่องบรรทุกสินค้า ตามสมการที่ 7 จึงยืนยันได้ว่าผลลัพธ์ดังกล่าวมีความถูกต้อง สำหรับปัญหาการขนส่งสินค้าตามความต้องการของลูกค้าอื่นๆ จะใช้เวลาในการหาคำตอบไม่เกิน 4 ชั่วโมง หรือ 240 นาที เนื่องจากเวลาดังกล่าวคือเวลาที่เหมาะสมสำหรับการวางแผนเส้นทางการขนส่งสินค้าที่อ้างอิงตามบริษัทกรณีศึกษา ผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำมาเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมได้ ดัง ตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** การเปรียบเทียบความแตกต่างของต้นทุน

| วันที่ | วิธีดั้งเดิม |              | วิธีที่นำเสนอ |              | ความแตกต่างของต้นทุน (%) |
|--------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------------------|
|        | สถานะผลลัพธ์ | ต้นทุน (บาท) | สถานะผลลัพธ์  | ต้นทุน (บาท) |                          |
| 1      | Global Opt.  | 13,671.90    | Global Opt.   | 10,112.17    | 26.04                    |
| 2      | Global Opt.  | 13,873.83    | Feasible      | 11,182.90    | 19.40                    |
| 3      | Global Opt.  | 12,937.08    | Global Opt.   | 9,598.13     | 25.81                    |
|        |              |              |               | เฉลี่ย       | 23.75                    |

จากตารางที่ 5 พบว่า ค่าคำตอบที่ได้จากตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มน้อยกว่าค่าคำตอบวิธีดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญที่ .05 กล่าวคือ การทดสอบทางสถิติตามสมมติฐานข้างต้น พบว่า ค่า p-value เท่ากับ 0.003 นั่นคือ การปฏิเสธ  $H_0$  และยอมรับ  $H_1$  นั่นคือ วิธีที่นำเสนอมีต้นทุนรวมต่ำกว่าวิธีดั้งเดิม โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของต้นทุนโดยรวมเฉลี่ย คิดเป็นร้อยละ 23.75

## 5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่ช่วยลดต้นทุนการขนส่งสินค้าในระบบการขนส่งแบบควบคุมอุณหภูมิ โดยพิจารณาผลกระทบทุกที่มีช่องบรรจุทุกสินค้า 1 และ 2 ช่องบรรจุทุก ซึ่งผลการวิจัยแสดงว่าวิธีที่นำเสนอทำให้กรณีศึกษาต้นทุนต่ำลงจากวิธีดั้งเดิมเฉลี่ยร้อยละ 23.75 เนื่องจากความแตกต่างของผลลัพธ์ 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ 1) เส้นทางในการขนส่งมีความเหมาะสม เนื่องจากรถบรรทุกควบคุมอุณหภูมิที่มีช่องบรรจุทุกสินค้า 2 ช่องบรรจุทุก ต่างจากรถบรรทุกควบคุมอุณหภูมิที่มีช่องบรรจุทุกสินค้า 1 ช่องบรรจุทุก ทำให้รถบรรทุกที่นำเสนอสามารถขนส่งสินค้าได้ทั้ง 2 ประเภท ในการให้บริการเพียงครั้งเดียว ระยะทางในการขนส่งสินค้าจึงสั้นลงสอดคล้องกับการศึกษาของ Ahmadi-Javid, Mansourfar, Lee & Liu (2023) และ 2) ปริมาณการใช้รถบรรทุกในการขนส่งสินค้าน้อยลง กล่าวคือ รถบรรทุกดัดแปลงสามารถบรรจุทุกสินค้าได้มากขึ้นจากเดิม 320 กล้อง/เที่ยว เป็น 480 กล้อง/เที่ยว แต่มีต้นทุนค่าขนส่งเพิ่มขึ้นไม่มากนัก (ต้นทุนต่อระยะทางเพิ่มจาก 12.78 บาท/กม. เป็น 17.25 บาท/กม. และต้นทุนค่าจ้างคนขับเพิ่มขึ้นจาก 800 บาท/เที่ยว เป็น 1,000 บาท/เที่ยว) ทำให้ต้นทุนการขนส่งต่อเที่ยวมากขึ้นแต่จำนวนเที่ยวลดลง จึงทำให้ต้นทุนต่ำลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang, Guan, Qiu & Wu (2023) จาก 2 ประเด็นดังกล่าวจึงยืนยันว่าเมื่อรถบรรทุกมีช่องบรรจุทุกสินค้า 2 ช่อง ทำให้ระยะทางในการขนส่งสั้นลงและใช้รถบรรทุกจำนวนน้อยลง

## 6. ข้อเสนอแนะ

### 6.1 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

สำหรับการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่แก้ปัญหาการจัดการขนส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ โดยดำเนินการหาคำตอบผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป Lingo รุ่นที่ 13.0 ภายใต้คุณสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาดังกล่าว ทำให้ใช้เวลาในการหาคำตอบมากที่สุดคือ 4 ชั่วโมงสำหรับคำตอบในสถานะ Feasible หากคุณสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์สูงขึ้นอาจจะใช้เวลาน้อยลงสำหรับปัญหาเดียวกันหรืออาจจะทำให้ได้คำตอบในสถานะ Global Optimum

### 6.2 ข้อเสนอแนะในครั้งต่อไป

หากลูกค้ามีจำนวนเพิ่มขึ้นจะต้องมีการเพิ่มพารามิเตอร์ต่างๆ อาจจะทำให้ไม่สามารถหาคำตอบในเวลาที่เหมาะสมได้ด้วยวิธีที่นำเสนอ จึงแนะนำให้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิธีสถิติในการหาคำตอบสำหรับปัญหานี้

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ภายใต้ทุนสนับสนุนทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ คุชภินิพนธ์หรือการศึกษาอิสระ และขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ให้การสนับสนุนข้อมูลและร่วมทดลอง

## 8. เอกสารอ้างอิง

- Ahmadi-Javid, A., Mansourfar, M., Lee, C.G. & Liu, L. (2023). Optimal distribution of perishable foods with storage temperature control and quality requirements: An integrated vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 182, 109215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109215>
- Chandran, R., Hasanuzzaman, M., Arici, M. & Kumar, L. (2022). Energy, economic and environmental impact analysis of phase change materials for cold chain transportation in Malaysia. *Journal of Energy Storage*, 55(Part A), 105481. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105481>
- Chowmalia, W. & Sukto, S. (2021). A hybrid FJA-ALNS algorithm for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles for the fuel delivery problem. *Decision Science Letters*, 10, 497–510. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2021.6.001>
- Chowmalia, W. & Sukto, S. (2020). A novel two-phase approach for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles: a case study on fuel delivery. *Decision Science Letters*, 9, 77–90. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2019.7.003>

- Guo, X., Zhang, W. & Liu, B. (2022). Low-carbon routing for cold-chain logistics considering the time-dependent effects of traffic congestion. *Transportation Research Part D*, 113, 103502. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103502>
- Lin, Q., Zhao, Q. & Lev, B. (2020). Cold chain transportation decision in the vaccine supply chain. *European Journal of Operational Research*, 283(1), 182-195. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.005>
- Moonsri, K., Sethanan, K., Worasan, K. & Nitisiri, K. (2022). A hybrid and self-adaptive differential evolution algorithm for the multi-depot vehicle routing problem in egg distribution. *Applied Sciences*, 12(1), 35. <https://doi.org/10.3390/app12010035>
- Office of the National Economic and Social Development Council. (2021). Cold chain system development in Thailand. *Logistics information*, 4(1), 4-13. (in Thai)
- Qiu, F., Zhang, G., Chen, P.K., Wang, C., Pan, Y., Sheng, X. & Kong, D. (2020). A novel multi-objective model for the cold chain logistics considering multiple effects. *Sustainability*, 12, 8068. <https://doi.org/10.3390/su12198068>
- Qi, T., Ji, J., Zhang, X., Liu, L., Xu, X., Ma, K. & Gao, Y. (2022). Research progress of cold chain transport technology for storage fruits and vegetables. *Journal of Energy Storage*, 56(Part B), 105958. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105958>
- Supattananon, N. & Akararungruangkul, R. (2019). Modified differential evolution algorithm for a transportation software application. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 5(4), 84. <https://doi.org/10.3390/joitmc5040084>
- Wonginta, T., Wangrungwichaisri, C. & Kantasa-ard, A. (2018). Transport cost reduction and vehicle routing improvement in a milk-run of automotive parts manufacturing in thailand. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 8(1), 71-90. (in Thai)
- Zhang, S., Guan, C., Qiu, Y. & Wu, N. (2023). Multi-objective route optimization of urban cold chain distribution using electric and diesel powered vehicles. *Research in Transportation Business & Management*, 49, 100969. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.100969>
- Zhao, Y., Zhang, X., Xu, X. & Zhang, S. (2020). Research progress of phase change cold storage materials used in cold chain transportation and their different cold storage packaging structures. *Journal of Molecular Liquids*, 319(1), 114360. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114360>