



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีกรอบเวลาโดยใช้การค้นหาเฉพาะที่แบบปรับเปลี่ยนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมผึ้งเทียม

Solving the vehicle routing problem with time windows by using the adaptive local search in artificial bee colony optimization

ศิริชัย ยศวังใจ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

Sirichai Yodwangjai^{1*}

Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th; Telephone: 0-2555-2000 Ext. 6523

วันที่รับบทความ 21 สิงหาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 8 พฤศจิกายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 11 ธันวาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 28 มกราคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 4 26 กุมภาพันธ์ 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 5 18 เมษายน; วันที่ตอบรับบทความ 23 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาที่ได้รับความนิยมในธุรกิจการขนส่งและโลจิสติกส์ ความยากในการแก้ปัญหาขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อจำกัด ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่พิจารณากรอบเวลาในการรับส่งสินค้า (VRP with time windows: VRPTW) เป็นปัญหาที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัยจำนวนมาก โดยปกติวัตถุประสงค์ของปัญหา VRPTW จะระบุเส้นทางให้กับยานพาหนะซึ่งระยะทางในการขนส่งจะสั้นที่สุด งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการอาณานิคมผึ้งเทียมร่วมกับวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบปรับเปลี่ยน (Adaptive Local Search in Artificial Bee Colony Optimization: ALABCO) สำหรับปัญหา VRPTW ในวิธีนี้การปรับปรุงคำตอบท้องถิ่นจะปรับเปลี่ยนวิธีเพื่อปรับปรุงคุณภาพคำตอบซึ่งป้องกันการติดคำตอบท้องถิ่น ขั้นตอนการซ่อมแซมคำตอบใช้สำหรับเปลี่ยนคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Solution) ที่ละเมิดความจุและกรอบเวลาให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) วิธีที่นำเสนอทดสอบกับโจทย์ปัญหาของโซโลมอน (Solomon instance) ในขนาดปัญหาที่ต่างกันและเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา

คำสำคัญ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง กรอบเวลา การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมผึ้งเทียม วิธีค้นหาเฉพาะที่แบบปรับเปลี่ยน

Abstract

Vehicle Routing Problem (VRP) is one of the popular problems in the transportation and logistics industry. With various types of constraints being difficult to solve, VRP with time windows (VRPTW) has received a large amount of attention from researchers. Usually, the objective of VRPTW is to specify the routes for the vehicles such that the total transportation distance is minimized. This study proposes an Artificial Bee Colony Optimization with Adaptive Local Search (ALABCO) for VRPTW. In this method, the local search method is adapted to improve the quality solution that adapted for escaping

the local optima. The repair procedure is used for changing infeasible solutions that exceed capacity and violate time windows to feasible solutions. The proposed method has been tested in Solomon instances in different problems and compared to other existing algorithms. The results show that the proposed method is effective in solving problem.

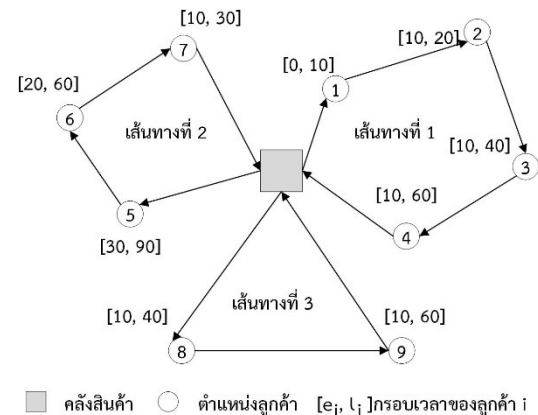
Keywords

vehicle routing problem; time windows; artificial bee colony optimization; adaptive local search

1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งเกี่ยวข้องกับการเดินทางขนส่งสินค้าระหว่างคลังสินค้าไปยังลูกค้า โดยปัญหานี้พัฒนามาจากปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย เพื่อหาเส้นทางเดินทางของพนักงานขายไปยังเมืองต่าง ๆ ให้ครบทุกเมือง ซึ่งมีข้อกำหนดว่าต้องกลับมายังเมืองเริ่มต้น เพื่อให้ระยะทางการเดินทางสั้นที่สุด ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นการจัดเส้นทางของพนักงานขายเพียงคนเดียว ต่อมาเมื่อมีการพิจารณาปัญหาที่ต้องการจัดเส้นทางที่มีพนักงานขายมากกว่า 1 คน โดยให้พนักงานขายทุกคนเดินทางออกและกลับมายังเมืองเริ่มต้น ซึ่งสามารถเทียบได้ว่าเป็นคลังสินค้า โดย Dantzig and Ramser [1] ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาที่พิจารณาความต้องการสินค้าและความจุของยานพาหนะ โดยใช้ชื่อว่า Truck dispatching problem ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle routing problem: VRP) และต่อมา มีการเพิ่มข้อจำกัดด้านต่าง ๆ เข้าไปยังปัญหาดังกล่าว เช่น ความจุของยานพาหนะ (Capacitated VRP: CVRP) มีหลายคลังสินค้า (Multi-Depot VRP: MDVRP) แบบมีการขนส่งสินค้ากลับมายังคลังสินค้า (VRP with Backhaul: VRPB) แบบมีการรับและส่งมอบ (VRP with Pickup and Delivery: VRPPD) เป็นต้น

ปัญหา VRP ที่พิจารณากรอบเวลาในการจัดส่ง (VRP with Time Windows: VRPTW) เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่มีความนิยม โดยปัญหานี้คำนึงถึงกรอบเวลาที่ลูกค้าต้องการรับบริการ ซึ่งลูกค้าแต่ละรายจะกำหนดกรอบเวลาเริ่มต้น (e_i) และสิ้นสุด (l_i) โดยกรอบเวลาที่ไม่ว่างจะอนุญาตให้ยานพาหนะสามารถเดินทางมาถึงลูกค้าก่อนกรอบเวลาเริ่มต้นได้ แต่ต้องรอเวลาจนถึงกรอบเวลาที่กำหนดจึงจะให้บริการได้โดยไม่มีการคิดค่าปรับ [2] จากรูปที่ 1 เป็นตัวอย่างปัญหา VRPTW โดยลูกค้าแต่ละรายจะมีกรอบเวลาในการบริการ



รูปที่ 1 ลักษณะของปัญหา VRPTW

ปัญหา VRP ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของ NP-hard โดยการหาคำตอบด้วยวิธีแม่นยำตรง (Exact Method) สามารถหาคำตอบได้เมื่อปัญหามีขนาดเล็กและข้อจำกัดน้อย แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีความซับซ้อน เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากขึ้นตาม และจะเพิ่มแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) ตามขนาดของปัญหา [3]

ปัจจุบันนักวิจัยส่วนใหญ่แก้ปัญหา VRP ด้วยวิธีฮิวริสติก [4] และวิธีเมตาฮิวริสติก ในช่วงแรกปัญหา VRPTW นั้นใช้วิธีเซฟวิ่งอัลกอริทึม (Saving Algorithm) [5] วิธีแทรก (Insertion Heuristic) [6] วิธีกวาดมุม (Sweep Algorithm) วิธีเพื่อนบ้านใกล้สุด (Nearest Neighborhood Method) [7] ซึ่งต่อมานำวิธีฮิวริสติกมาพัฒนาเพื่อให้เหมาะกับปัญหานั้น ๆ อย่างเช่นวิธีฮิวริสติกแบบแทรกไปข้างหน้า (Push Forward Insertion Heuristics; PFIH) [8] วิธีละโมภ (Greedy Heuristic) [9] ใช้ในการสร้างตัวแทนคำตอบเริ่มต้นของปัญหา VRPTW ส่วนการแก้ปัญหาด้วยเมตาฮิวริสติกจะมีทั้งคำตอบเชิงเดี่ยว (Single-solution based Metaheuristics) และวิธีคำตอบเชิงกลุ่ม (Population-based Metaheuristics) [10] ในช่วงแรกวิธีคำตอบเชิงเดี่ยวจะใช้วิธีทาบู (Tabu Search: TS) [2] วิธีออบ

อ่อนเหนียวจำลอง (Simulated Annealing: SA) [11-12] ส่วนคำตอบเชิงกลุ่มจะมีกลุ่มของคำตอบที่ได้แนวคิดมาจากธรรมชาติ เช่น วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) [13] วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [14] วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [15] วิธีมีมติก (Memetic Algorithm: MA) [16] และวิธีอาณานิคมผึ้งเทียม (Artificial Bee Colony Optimization: ABCO) เป็นวิธีหาคำตอบเชิงกลุ่มที่อาศัยวิวัฒนาการความฉลาดของฝูงผึ้งในการค้นหาหาวานมาช่วยในการหาคำตอบ ซึ่งนำไปแก้ปัญหาที่หลายหลาก เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการหาคำตอบนั้นจะมีการประยุกต์วิธีการปรับปรุงคำตอบร่วมกับวิธีการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) ถือเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับคามนิยมซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในเส้นและระหว่างเส้นทาง การปรับเปลี่ยนการค้นหาเฉพาะที่ (Adaptive Local Search: ALS) จะช่วยให้เพิ่มความหลากหลายของคำตอบ [17] เพื่อป้องกันการติดคำตอบท้องถิ่น ยังรวมไปถึงการอาศัยหน่วยความจำ (Memory) ที่เก็บคำตอบที่ดีของแต่ละวิธีไว้เพื่อใช้ในการพัฒนาคำตอบในรอบถัดไป [18]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการแก้ปัญหา VRPTW โดยเบื้องต้นจะใช้วิธีแทรกกลุ่มร่วมกับวิธีฮิวริสติก PFIH ในการสร้างประชากรเริ่มต้น ในการพัฒนาประสิทธิภาพการหาคำตอบจะใช้การค้นหาเฉพาะที่แบบปรับเปลี่ยนร่วมกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมผึ้งเทียม เพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการหาคำตอบกับโจทย์ปัญหามาตรฐาน VRPTW ของ Solomon [6] โดยผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับปัญหาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปัญหา VRPTW เป็นปัญหาการจัดหมวดหมู่ (Combinatorial Problem) ของ 2 เซตย่อย คือ เซตยานพาหนะและเซตของลูกค้า ปัญหา VRP สามารถแสดงได้โดยกราฟ $G = (V, A)$ ซึ่ง V แทนเซตของจุดลูกค้าทั้งหมด $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, A แทนเซตของเส้นเชื่อมระหว่างจุดทั้งหมด เป็นกลุ่มของลูกค้าซึ่งเท่ากับ $\{1, 2, \dots, n\}$, $A = \{(v_i, v_j) : 0 \leq i, j \leq n\}$ กำหนดให้ v_0 คือ คลังสินค้า และลูกค้า $v_i \in V$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย กลุ่มของดัชนี (Indices) พารามิเตอร์ (Parameters) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) สมการข้อจำกัด (Constraints) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดัชนีและเซต

i, j แทนหมายเลขลูกค้า

k แทนหมายเลขยานพาหนะ

N เซตของลูกค้า

K เซตของยานพาหนะ

พารามิเตอร์

d_{ij} ระยะทางขนส่งจากลูกค้าที่ i ไปยัง j

t_{ij} เวลาการขนส่งจากลูกค้า i ไปยัง j

q_i ปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้าที่ i

cp_k ความจุของยานพาหนะคันที่ k

s_i ระยะเวลาการให้บริการที่ลูกค้า i

e_i เวลาเริ่มต้นของรอบเวลาในการบริการลูกค้าที่ i

l_i เวลาสิ้นสุดของรอบเวลาในการบริการลูกค้าที่ i

ar_i เวลาการมาถึงของยานพาหนะที่ตำแหน่งลูกค้าที่ i

w_i เวลารอคอยในการบริการลูกค้าที่ i

M จำนวนบวกที่มีค่ามาก

ตัวแปรตัดสินใจ

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{ยานพาหนะคันที่ } k \text{ ขนส่งสินค้าจาก } i \text{ ไป } j \\ 0 & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

A_i เวลาเริ่มต้นในการให้บริการลูกค้าที่ i

แบบจำลอง

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} X_{ijk} \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N, i \neq j \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N, i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} X_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} q_i X_{ijk} \leq cp_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq 0} X_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} X_{0jk} = \sum_{i \in N} X_{i0k} \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ihk} - \sum_{j \in N} X_{hjk} = 0 \quad \forall h \in N, \forall k \in K \quad (8)$$

$$A_i + s_i + t_{ij} + w_i - M(1 - X_{ijk}) \leq A_j \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K \quad (9)$$

$$e_i \leq A_i + w_i \leq l_i \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (10)$$

$$w_i = \max\{e_i - ar_i, 0\} \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$ar_i \leq A_i \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (12)$$

$$A_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K \quad (14)$$

จากตัวแบบจำลองคณิตศาสตร์ข้างต้น (1) แสดงระยะทางรวมทั้งหมดที่ต่ำที่สุด สมการ (2) และ (3) เป็นเงื่อนไขบังคับให้มียานพาหนะเข้าและออกได้เพียงหนึ่งคันสำหรับลูกค้าแต่ละคน สมการ (4) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดว่ายานพาหนะจะต้องเดินทางออกจากคลังสินค้า อสมการ (5) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ปริมาณสินค้ารวมที่จะต้องขนส่งต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ อสมการ (6) – (7) กำหนดว่ายานพาหนะที่เดินทางออกจากคลังสินค้าจะต้องเดินทางกลับมาสิ้นสุดที่คลังสินค้าเดิม อสมการ (8) เป็นเงื่อนไขกำหนดว่ายานพาหนะ k ที่เข้าและออกแต่ละจุดต้องเป็นยานพาหนะคันเดียวกัน อสมการ (9) กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มขนส่งสินค้าของลูกค้าที่มีเส้นทางการขนส่งต่อเนื่องกัน อสมการ (10) กำหนดให้เวลาในการให้บริการต้องเริ่มหลังกรอบเวลาเริ่มต้นและไม่เกินหลังกรอบเวลาที่กำหนด สมการที่ (11) เป็นเงื่อนไขกำหนดเวลาให้บริการ อสมการที่ (12) กำหนดเวลาเริ่มต้นการให้บริการหลังเวลาการมาถึงของยานพาหนะ อสมการที่ (13) และ (14) กำหนดคุณสมบัติของตัวแปรตัดสินใจที่เกี่ยวข้อง

3. อาณาจักรผึ้งเทียม

วิธีอาณาจักรผึ้งเทียมเป็นเชิงวิวัฒนาการที่นำความฉลาดของฝูงผึ้งที่หาน้ำหวานมาช่วยในการค้นหาคำตอบ วิธี ABCO แบ่งกลุ่มผึ้งออกเป็น 3 ประเภทคือ ผึ้งงาน (Employed Bees:

EB) ผึ้งเฝ้าดู (Onlooker Bees: OB) และผึ้งสำรวจ (Scout Bees: SB) โดยผึ้งงานทำหน้าที่ในการค้นหาแหล่งอาหาร (Food Source: FS) และนำข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งอาหารมาให้กับผึ้งเฝ้าดู ผึ้งเฝ้าดูจะเลือกผึ้งงานเพื่อให้ออกไปเก็บน้ำหวานยังแหล่งอาหารตามข้อมูลที่ได้รับจากผึ้งงาน ถ้าแหล่งอาหารใดถูกเก็บน้ำหวานจนครบ ผึ้งงานตัวนั้นจะกลายเป็นผึ้งสำรวจเพื่อค้นหาแหล่งอาหารใหม่ สำหรับวิธี ABCO ในการแก้ปัญหา VRPTW นั้นจะมีประประยุคที่ใช้วิธีการปรับปรุงคำตอบแบบปรับได้ (Adaptive Local Search) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น โดยเรียกวิธีนี้ว่า Adaptive Local Search in Artificial Bee Colony Optimization (ALABCO) โดยมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 เป็นขั้นตอนการค้นหาคำตอบของวิธี ALABCO โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย จำนวนประชากร (FS), จำนวนผึ้งงาน (EB), จำนวนผึ้งเฝ้าดู (OB), จำนวนผึ้งสำรวจ (SB), จำนวนครั้งที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Limit) กำหนดจำนวนรอบวนซ้ำ (NumOfIte)

ขั้นตอนที่ 1 ทำการสร้างแหล่งอาหารตามจำนวน FS ด้วยวิธีการสุ่มแทรก (Random Insertion: RI) และวิธี PFH อย่างละ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามบรรทัดที่ 1-2

ขั้นตอนที่ 2 ทำการวนซ้ำ Iteration=0 ตามบรรทัดที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนของผึ้งงาน โดยผึ้งงานจะเลือกแหล่งอาหาร x_i ด้วยวิธีการเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Selection: RWS) ตามบรรทัดที่ 5-6 และหาแหล่งอาหารข้างเคียง x'_i ถ้า $f(x'_i)$ มีค่าน้อยกว่า $f(x_i)$ ให้แทน x_i ด้วย x'_i ถ้าค่ามากกว่าให้คงคำตอบเดิม ตามบรรทัดที่ 7-11

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนของผึ้งเฝ้าดู ที่จะเลือกผึ้งงานเพื่อให้หาแหล่งอาหาร sol_i จาก EB ด้วยวิธี RWS ตามบรรทัดที่ 12-13 ต่อกันนั้นกำหนด $limit(sol_i) = 0$ และทำการหาแหล่งอาหารข้างเคียง sol_i^* ถ้า $f(sol_i^*)$ มีค่าน้อยกว่า $f(sol_i)$ ให้แทน sol_i ด้วย sol_i^* ถ้าค่ามากกว่าให้คงคำตอบเดิมและ $limit(sol_i) = limit(sol_i) + 1$ ตามบรรทัดที่ 14-19

ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนการหาแหล่งอาหารใหม่และผึ้งงานจะกลายเป็นผึ้งสำรวจ โดย $abnd_list$ เป็นเซตของคำตอบที่ไม่มีการพัฒนาที่ดีขึ้น ซึ่งจะสร้าง $newsol_i$ ด้วยวิธี RI และวิธี

PFIH และแทนที่ลงใน sol_i เดิม ตามบรรทัดที่ 20-22 ในขณะเดียวกันสร้างส้มแหล่งอาหารใหม่ x_i ขึ้นตามจำนวน SB และทำการหาแหล่งอาหารข้างเคียง x_i' ตามบรรทัดที่ 23-25

ขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนการเลือกแทนที่ โดยแทน $newsol_i$ และ x_i ใน OB และกำหนดคำตอบ BestSol ในรอบการค้นหาคำตอบนี้ และ $Iteration = Iteration + 1$ ตามบรรทัดที่ 26-28

นอกจากการสร้างตัวแทนคำตอบแล้ววิธีการปรับปรุงคำตอบถือเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการพัฒนาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น โดยผู้วิจัยได้นำวิธี λ -Interchange [19] และวิธี 2-Opt มาปรับปรุงเส้นทาง โดยกระบวนการจะทำการเปลี่ยนวิธีสลับตำแหน่งลูกค้าเมื่อคำตอบที่ได้ติดคำตอบท้องถิ่น (Local Optima) ซึ่งวิธี λ -Interchange เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนลูกค้าระหว่างเส้นทาง (Inter Route) ของตัวแทนคำตอบ โดยเซตของวิธีการสลับตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับค่า λ เช่น

วิธี ALABCO

กำหนดค่า FS, EB, OB, SB, Limit, NumOfIte

```

1: for  $i = 1: \backslash \# FS$ 
2:   สร้างแหล่งอาหาร  $x_i$  ด้วยวิธี RI และวิธี PFIH
3:  $Iteration \leftarrow 0$ ;
4: while  $Iteration < NumOfIte$ :
5:   for  $i = 1: \backslash \# EB$ 
6:     เลือก  $x_i$  จาก FS ด้วยวิธี RWS
7:     หาแหล่งอาหารข้างเคียง  $x_i \rightarrow x_i'$ 
8:     If  $f(x_i') < f(x_i)$ 
9:       แทน  $x_i \leftarrow x_i'$ 
10:    else:
11:       $x_i \leftarrow x_i$ 
12:   for  $i = 1: \backslash \# OB$  limit( $sol_i$ ) = 0
13:     เลือก  $sol_i$  จาก EB ด้วยวิธี RWS
14:     หาแหล่งอาหารข้างเคียง  $sol_i \rightarrow sol_i^*$ 
15:     if  $f(sol_i^*) < f(sol_i)$ :
16:       แทน  $sol_i \leftarrow sol_i^*$ 
17:     else:
18:       limit( $sol_i$ ) = limit( $sol_i$ ) + 1;
19:   for  $i = 1: \backslash \# OB$ 
20:     if limit( $sol_i$ )  $\geq$  Limit:

```

```

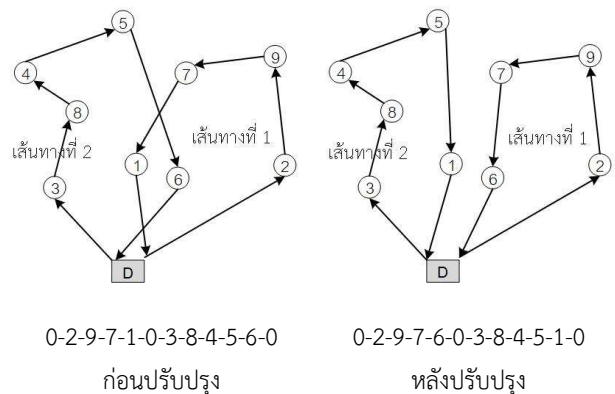
22:   คำตอบใน  $abnd\_list \leftarrow$ ,  $newsol_i$  สร้าง
       $newsol_i$  ด้วยวิธี RI และวิธี PFIH
23:   for  $i = 1: \backslash \# SB$ 
24:     สร้างคำตอบใหม่  $x_i$ 
25:     หาแหล่งอาหารข้างเคียง,  $x_i \rightarrow x_i'$ 
26:   แทน  $newsol_i$  และ  $x_i$  ใน OB
27:   BestSol  $\leftarrow$  คำตอบที่ดีที่สุดที่ผ่านมา (best so far)
28:    $Iteration = Iteration + 1$ ;

```

รูปที่ 2 ขั้นตอนของวิธี ALABCO

λ เท่ากับ 1 (1-Interchnage) จะมีรูปแบบการสลับ (0, 1), (1, 0) และ (1, 1) ซึ่งรูปแบบ (0, 1) จะนำลูกค้า 1 ราย ในเส้นทางที่ 2 แทรกลงในตำแหน่งของเส้นทางที่ 1 ในทางกลับกันของวิธี (1, 0) ที่นำลูกค้า 1 ราย ในเส้นทางที่ 1 แทรกลงในเส้นทางที่ 2 และวิธี (1, 1) จะนำลูกค้า 1 รายจากทั้งสองเส้นทางสลับกันแสดงดังรูปที่ 3

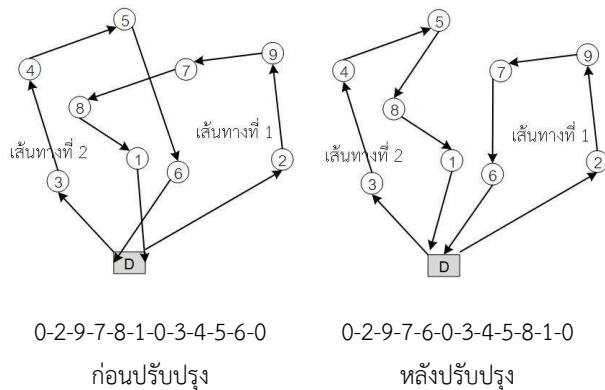
λ เท่ากับ 2 (2-Interchnage) จะมีรูปแบบการสลับเช่นเดียวกับ 1-Interchnage และมีรูปแบบที่ (2, 0), (0, 2), (1, 2), (2, 1) และ (2, 2) เพิ่มเข้ามา ตัวอย่างของวิธี (2, 1) จะนำลูกค้า 2 รายที่ติดกันในเส้นทางที่ 1 สลับตำแหน่งกับลูกค้า 1 ราย ในเส้นทางที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4



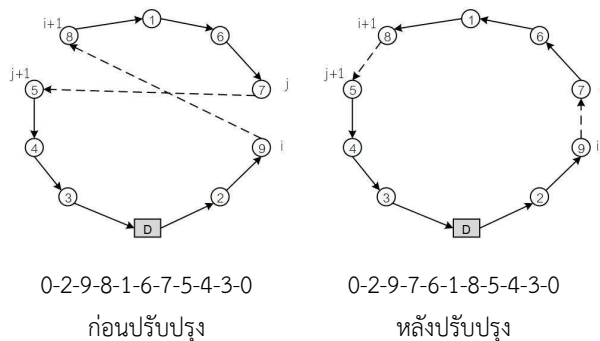
รูปที่ 3 รูปแบบ 1-1 Interchange

งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า λ เท่ากับ 2 ดังนั้น เซตวิธีการสลับตำแหน่งประกอบด้วย (0, 1), (1, 0), (1, 1), (2, 0), (0, 2), (1, 2), (2, 1) และ (2, 2) ส่วนการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนเส้นเชื่อมภายในเส้นทาง (Intra route)

ที่เชื่อมระหว่างลูกค้า $(i, i+1)$ และ $(j, j+1)$ โดยทำการลบเส้นเชื่อมสองเส้นทางและแทนที่ด้วยเส้นเชื่อมใหม่เป็น (i, j) และ $(i+1, j+1)$ การแลกเปลี่ยนเส้นเชื่อมนี้จะทำให้ทิศทางของเส้นเชื่อมกลับด้านกัน ซึ่งถือเป็นการจัดเรียงลำดับลูกค้าภายในยานพาหนะแต่ละคัน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 รูปแบบ 2-1 Interchange



รูปที่ 5 วิธี 2-Opt

ในแต่ละครั้งที่มีการสร้างตัวแทนคำตอบหรือปรับปรุงคำตอบ คำตอบที่ได้จะประกอบด้วยคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) และคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Solution) ซึ่งในส่วนของคำตอบที่เป็นไปไม่ได้นี้เกิดจากการสลับตำแหน่งของลูกค้าระหว่างเส้นทางจะส่งผลให้ปริมาณสินค้ารวมของลูกค้าที่ต้องการเกินความจุของยานพาหนะที่กำหนดและการสลับตำแหน่งของลูกค้าภายในเส้นทางส่งผลต่อระยะเวลาของยานพาหนะที่ต้องเดินทางกลับให้ทันเวลาก่อนคลังสินค้าปิด ซึ่งการซ่อมแซมคำตอบจะเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้

คำตอบที่เป็นไปไม่ได้เปลี่ยนเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ ขั้นตอนการแทรกลูกค้าที่ละเมิดเงื่อนไขนั้นจะพิจารณาทั้งความจุของยานพาหนะและกรอบเวลาที่ยานพาหนะกลับยังคลังสินค้าพร้อมกันโดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 6

กระบวนการซ่อมแซมคำตอบ

- 1: สร้างเซตลูกค้าที่ละเมิดความจุยานพาหนะและเกินกรอบเวลา $CusEx_i, i=1, \dots, n$
- 2: **While** $CusEx_i \neq \emptyset$;
- 3: เลือกลูกค้า i จากเซต $CusEx_i$ ด้วยการสุ่ม (Random Search)
- 4: **if** ความต้องการสินค้า $q_i <$ ความจุที่เหลือของยานพาหนะ cp_k
- 5: แทรกลูกค้า i ลงในยานพาหนะ v_k
- 6: **If** เวลาคลังสินค้า $A_0 >$ เวลาคลังสินค้าปิด t_0 :
- 7: ย้ายลูกค้า i ออกจากยานพาหนะ v_k
- 8: **end if**
- 9: **end if**
- 10: **end while**

รูปที่ 6 ขั้นตอนการซ่อมแซมคำตอบ

4. ผลการทดลอง

วิธีการที่นำเสนอนี้ได้นำมาทดสอบกับโจทย์ปัญหามาตรฐานของ Solomon ที่แบ่งตามลักษณะของการกระจายตำแหน่งลูกค้าแบบสุ่ม (Random Distribution; R) และแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กรอบเวลาแคบและความจุยานพาหนะน้อยแทนด้วยเลข 1 และกรอบเวลากว้างและความจุยานพาหนะมากแทนด้วยเลข 2 โดยโจทย์ปัญหาแบ่งออกเป็น 3 ขนาด ประกอบด้วยลูกค้า 25, 50 และ 100 ราย

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้จากการทดลองและปรับค่าจนได้ค่าที่น่าพอใจ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ของวิธี PFH ประกอบด้วย $\alpha=0.7, \beta=0.1, \gamma=0.2$ วิธีการปรับปรุงคำตอบ $\lambda=2$ และวิธี ALABCO ประกอบด้วย $FS=50, EB=50, OB=50, SB=25, limit_list=100$ โดยจำนวนคำตอบสำหรับโจทย์ขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่เท่ากับ 1,000 3,000 และ 10,000 คำตอบ ตามลำดับ ซึ่งนำค่าคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผล Best Known Solution

(BKS) และวิธี PSO ในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงลูกค้ายาน 25 และ 50 ราย ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับผล BKS วิธี PSO วิธี BCO และวิธี TS-VNS ในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงลูกค้ายาน 100 ราย พร้อมทั้งจำนวนยานพาหนะที่ใช้ (N.V.) ในแต่ละวิธีในตารางที่ 3 ค่า %Gap_{BKS} แสดงเปอร์เซ็นต์ความต่างของคำตอบของวิธีที่นำมาเปรียบเทียบกับผล BKS สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15) โดยค่าเปอร์เซ็นต์ที่เป็นบวก หมายถึง ผล BKS มีค่าคำตอบที่ต่ำกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ และค่าเปอร์เซ็นต์ที่เป็นลบ หมายถึง ผล BKS มีค่าคำตอบที่สูงกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

$$\%Gap_{BKS} = \frac{(\text{the considered solution}) - (\text{the best known solution})}{\text{the best known solution}} \times 100 \quad (15)$$

ตารางที่ 1 ผลทดสอบประสิทธิภาพของวิธีในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงกลุ่ม R จำนวน 25 ราย

No.	BKS	PSO [15]	ALABCO	%Gap _{BKS}	
				PSO	ALABCO
R101	617.1	618.33	619.17	0.20%	0.34%
R102	547.1	548.11	554.70	0.18%	1.39%
R103	454.6	473.39	464.83	4.13%	2.25%
R104	416.9	418.3	432.26	0.34%	3.68%
R105	530.5	556.72	536.88	4.94%	1.20%
R106	465.4	466.48	483.76	0.23%	3.94%
R107	424.3	425.27	433.16	0.23%	2.09%
R108	397.3	405.39	412.78	2.04%	3.90%
R109	441.3	460.52	442.63	4.36%	0.30%
R110	444.1	445.8	453.88	0.38%	2.20%
R111	428.8	429.7	440.05	0.21%	2.62%
R112	393	394.1	403.84	0.28%	2.76%
R201	463.3	523.66	485.73	13.03%	4.84%
R202	410.5	455.53	420.15	10.97%	2.35%
R203	391.4	408.89	394.70	4.47%	0.84%
R204	355	389.91	365.37	9.83%	2.92%
R205	393	501.83	405.86	27.69%	3.27%
R206	374.4	413.21	376.67	10.37%	0.61%
R207	361.6	402.28	369.21	11.25%	2.10%
R208	328.2	329.33	344.94	0.34%	5.10%
R209	370.7	438.24	381.54	18.22%	2.92%
R210	404.6	513.98	426.66	27.03%	5.45%
R211	350.9	361.69	360.81	3.07%	2.82%

จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับผล BKS และวิธี PSO ทั้งหมด 23 ข้อ พบว่าวิธี ALABCO มีคำตอบต่างจากผล BKS น้อยสุดในข้อ R109 ที่ 0.30 เปอร์เซ็นต์ และมากสุดในข้อ R210 ที่ 5.45 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PSO พบว่าวิธี ALABCO สามารถหาค่าคำตอบต่ำสุดดีกว่าวิธี PSO จำนวน 13 ข้อ โดยวิธี PSO มีค่า %Gap_{BKS} สูงกว่าวิธี ALABCO ถึง 24.42 เปอร์เซ็นต์ ในข้อ R205 โดยแสดงตัวอย่างเส้นทางของโจทย์ปัญหาข้อ R101 ที่มีระยะทาง 619.17 หน่วย แสดงดังรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ผลทดสอบประสิทธิภาพของวิธีในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงกลุ่ม R จำนวน 50 ราย

No.	BKS	PSO [15]	ALABCO	%Gap _{BKS}	
				PSO	ALABCO
R101	1,044	1,100.72	1,097.08	5.43%	5.08%
R102	909	923.71	944.95	1.62%	3.95%
R103	772.9	790.17	823.16	2.23%	6.50%
R104	625.4	631.58	672.42	0.99%	7.52%
R105	899.3	983.49	943.21	9.36%	4.88%
R106	793	865.93	828.07	9.20%	4.42%
R107	711.1	737.1	782.47	3.66%	10.04%
R108	617.7	624.29	638.91	1.07%	3.43%
R109	786.8	801.97	852.09	1.93%	8.30%
R110	697	710.4	767.69	1.92%	10.14%
R111	707.2	756.35	763.12	6.95%	7.91%
R112	630.2	638.49	668.14	1.32%	6.02%
R201	791.9	953.29	866.19	20.38%	9.38%
R202	698.5	815.21	784.73	16.71%	12.35%
R203	605.3	668.36	664.97	10.42%	9.86%
R204	506.6	518.37	518.51	2.32%	2.35%
R205	690.1	756.38	761.33	9.60%	10.32%
R206	632.4	661.55	668.95	4.61%	5.78%
R207	-	593.95	599.19	-	-
R208	-	508.41	515.03	-	-
R209	600.6	658.28	667.16	9.60%	11.08%
R210	645.4	670.99	705.70	3.96%	9.34%
R211	535.3	562.74	590.66	5.13%	10.34%

ในทางกลับกันโจทย์ปัญหาเทียบเคียงลูกค้ายาน 50 ราย แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าวิธี ALABCO มีคำตอบต่างจากผล BKS น้อยสุดในข้อ R109 ที่ 0.30 เปอร์เซ็นต์ และมากสุดในข้อ R204 ที่ 2.35 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี

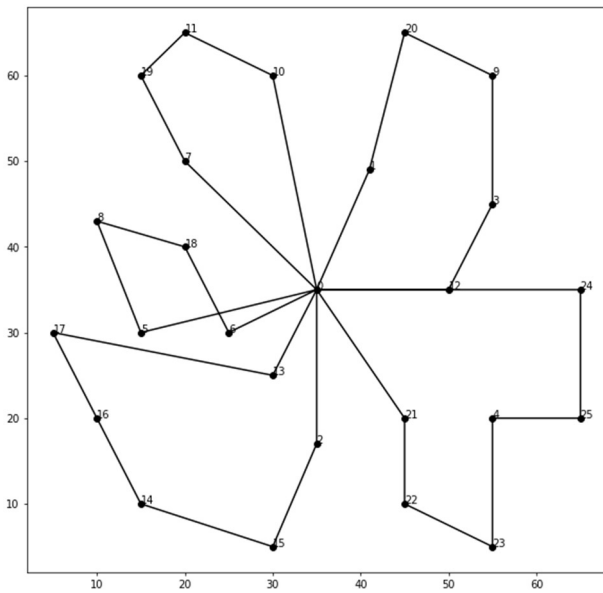
PSO พบว่าวิธี ALABCO สามารถหาค่าคำตอบต่ำสุดดีกว่าวิธี PSO จำนวน 6 ข้อ โดยวิธี ALABCO มีค่า %Gap_{BKS} สูงถึง 12.35 เปอร์เซ็นต์ ในข้อ R202 และผลต่างสูงกว่าวิธี PSO 4.36 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย %Gap_{BKS} ของวิธี ALABCO และวิธี PSO มีค่า 7.57 เปอร์เซ็นต์ และ 6.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยแสดงตัวอย่างเส้นทางของโจทย์ปัญหาข้อ R204 ที่มีระยะทาง 518.51 หน่วย แสดงดังรูปที่ 8

การเปรียบเทียบในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงลูกค้าจำนวน 100 ราย แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า วิธี ALABCO ให้ค่าคำตอบต่ำสุดสูงกว่าผล BKS ด้วยค่า %Gap_{BKS} เพียง 0.55 เปอร์เซ็นต์

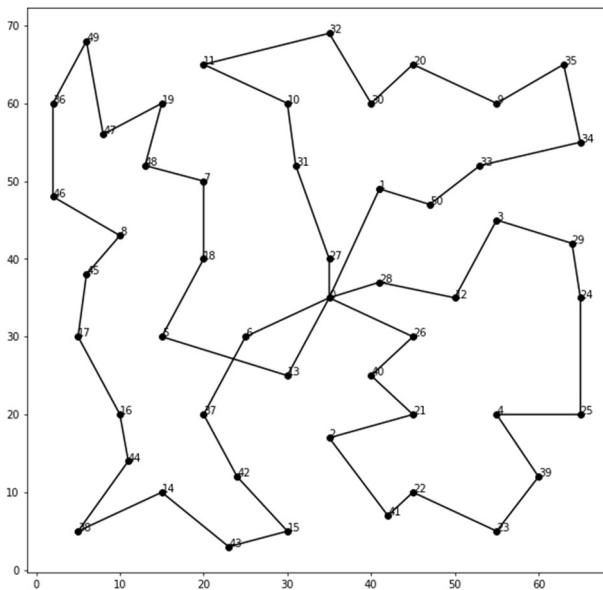
ในข้อ R211 ในทางกลับกันมีค่า %Gap_{BKS} สูงถึง 28.67 เปอร์เซ็นต์ ในข้อ R109 โดยค่า %Gap_{BKS} เฉลี่ยของวิธี ALABCO ทั้ง 23 ข้อ ที่ 14.30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PSO และวิธี BCO มีผลต่างของค่า %Gap_{BKS} เฉลี่ยไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างเส้นทางของโจทย์ปัญหาข้อ R211 ที่มีระยะทาง 897.61 หน่วย แสดงดังรูปที่ 8 โดยภาพรวมถือว่าวิธี ALABCO ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาทั้งโจทย์เทียบเคียงขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ได้

ตารางที่ 3 ผลทดสอบประสิทธิภาพของวิธี ในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงกลุ่ม R จำนวน 100 ราย

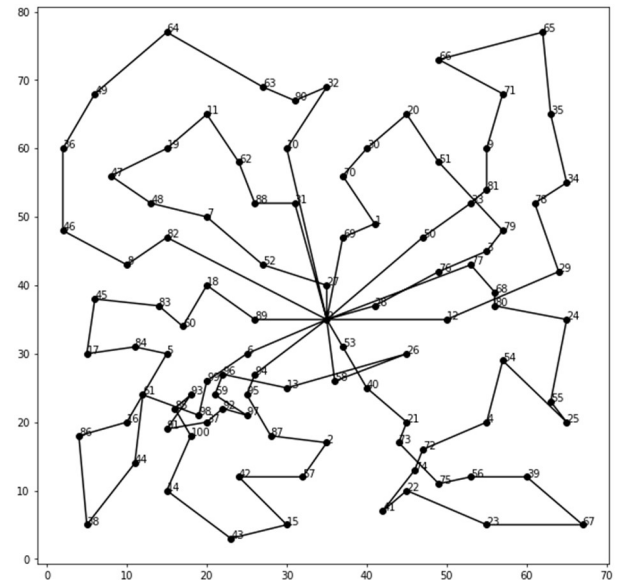
No.	BKS		PSO [15]		BCO [20]		TS-VNS [21]		ALABCO		%Gap _{BKS}			
	N.V.	Best	N.V.	Best	N.V.	Best	N.V.	Best	N.V.	Best	PSO	BCO	TS-VNS	ALABCO
R101	18	1,607.7 [22]	19	1,652.00	20	1,643.18	N/A	1,626.42	23	1,720.17	2.76%	2.21%	1.16%	7.00%
R102	17	1,434 [22]	17.8	1,500.81	18	1,476.11	N/A	1,452.20	19	1,572.87	4.66%	2.94%	1.27%	9.68%
R103	13	1,175.67 [23]	14	1,242.65	14	1,245.86	N/A	1,232.13	16	1,326.63	5.70%	5.97%	4.80%	12.84%
R104	10	974.2 [24]	10.5	1,042.22	11	1,026.91	N/A	979.63	14	1,114.08	6.98%	5.41%	0.56%	14.36%
R105	15	1,346.12 [25]	14.3	1,385.08	15	1,361.39	N/A	1,362.88	18	1,521.31	2.89%	1.13%	1.25%	13.01%
R106	13	1,234.6 [26]	12.9	1,294.87	13	1,264.50	N/A	1,246.08	16	1,355.60	4.88%	2.42%	0.93%	9.80%
R107	11	1,051.84 [25]	11	1,123.98	11	1,108.11	N/A	1,075.48	14	1,211.63	6.86%	5.35%	2.25%	15.19%
R108	10	954.03 [24]	10.1	1,011.68	10	994.68	N/A	955.35	13	1,081.70	6.04%	4.26%	0.14%	13.38%
R109	12	1,013.2 [27]	12.4	1,211.63	13	1,168.91	N/A	1,178.57	15	1,303.66	19.58%	15.37%	16.32%	28.67%
R110	12	1,068 [26]	12	1,190.36	12	1,108.22	N/A	1,114.86	15	1,262.27	11.46%	3.77%	4.39%	18.19%
R111	12	1,048.7 [26]	11.3	1,102.99	12	1,080.84	N/A	1,081.08	14	1,223.47	5.18%	3.06%	3.09%	16.67%
R112	10	953.63 [28]	10.8	1,029.12	10	992.22	N/A	991.46	12	1,093.74	7.92%	4.05%	3.97%	14.69%
R201	8	1,198.15 [29]	4	1,274.97	7	1,197.09	N/A	1,152.34	14	1,344.23	6.41%	-0.09%	-3.82%	12.19%
R202	6	1,077.66 [29]	3.5	1,247.03	6	1,092.22	N/A	1,077.94	13	1,301.77	15.72%	1.35%	0.03%	20.80%
R203	5	933.286 [29]	3	1,052.71	5	983.06	N/A	893.26	9	1,006.58	12.80%	5.33%	-4.29%	7.85%
R204	3	789.72 [24]	3	844.16	4	845.30	N/A	775.19	8	877.30	6.89%	7.04%	-1.84%	11.09%
R205	3	994.42 [30]	3	1,061.46	5	999.54	N/A	983.99	9	1,111.82	6.74%	0.51%	-1.05%	11.81%
R206	3	833 [31]	3	1,016.35	4	955.94	N/A	929.16	8	1,052.93	22.01%	14.76%	11.54%	26.40%
R207	3	814.78 [28]	3	946.78	4	903.59	N/A	858.53	8	957.73	16.20%	10.90%	5.37%	17.54%
R208	2	731.23 [32]	2.6	834.72	3	769.96	N/A	749.70	4	828.99	14.15%	5.30%	2.53%	13.37%
R209	3	855 [31]	3	1,003.19	5	935.57	N/A	936.29	8	1,039.63	17.33%	9.42%	9.51%	21.59%
R210	3	954.12 [33]	3	1,040.54	6	988.34	N/A	965.07	8	1,070.92	9.06%	3.59%	1.15%	12.24%
R211	2	892.71 [34]	3	861.32	3	867.95	N/A	808.00	7	897.61	-3.52%	-2.77%	-9.49%	0.55%



รูปที่ 7 เส้นทางของโจทย์ปัญหาข้อ R109 (ลูกค้า 25 ราย)



รูปที่ 8 เส้นทางของโจทย์ปัญหาข้อ R204 (ลูกค้า 50 ราย)



รูปที่ 9 เส้นทางของโจทย์ปัญหาข้อ R211 (ลูกค้า 100 ราย)

5. สรุป

ปัญหา VRPTW เป็นปัญหาหนึ่งที่มีความนิยมนักวิจัย โดยพยายามหาวิธีมาแก้ปัญหาเนื่องจากปัญหามีความซับซ้อน วิธีเมตาฮิวริสติกถือเป็นหนึ่งวิธีที่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมในระยะเวลาที่กำหนดได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีอาณานิคมผึ้งเทียมร่วมกับการประยุกต์วิธีการปรับปรุงคำตอบแบบปรับได้ (ALABCO) โดยเริ่มต้นจากการสร้างตัวแทนคำตอบด้วยวิธี RI และวิธี PFIH การปรับปรุงคำตอบจะเปลี่ยนวิธีที่อยู่ในเซตของการสลับตำแหน่งของ λ -interchange และวิธี 2-Opt จากผลการทดลองพบว่าวิธี ALABCO สามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงผล BKS และมีค่าคำตอบต่ำกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงบางข้อ สำหรับงานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยคาดหวังว่าสามารถนำวิธี ALABCO ร่วมกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision-Support Model) [35] ไปแก้ปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นรวมถึงปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีข้อจำกัดด้านอื่น ๆ ที่พิจารณาวัตถุประสงค์หลายอย่าง (Multi-Objective) [36]

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dantzig GB, Ramser JH. The truck dispatching problem. *Management Science*. 1959;6(1):80-91.
- [2] Taillard É, Badeau P, Gendreau M, Guertin F, Potvin JY. A tabu search heuristic for the vehicle

- routing problem with soft time windows. *Transportation Science*. 1997;31(2):170-86.
- [3] Toth P, Vigo D, editors. The vehicle routing problem. *Society for Industrial and Applied Mathematics*; 2002 Jan 1.
- [4] คลอเคลีย วจนะวิชาการ, กนกกาญจน์ ศรีสุรินทร์. วิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางรถเก็บขยะมูลฝอย กรณีศึกษา เทศบาลตำบลอุบล จังหวัดอุบลราชธานี. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2561;11: 41-52.
- [5] Clarke G, Wright JW. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*. 1964 Aug;12(4):568-81.
- [6] Solomon MM. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*. 1987 Apr;35(2):254-65.
- [7] ณัฐพล ธิมา, ณัฐพนธ์ ลาละคร, ชยานนท์ สุริวงษ์, นวพรพรช ทอนสรณ้อย, ปรัชญ์ บุญแซม, วรุทัย เดชตานนท์. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกส์เพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถขนส่งแบบมีกรอบเวลาในการจัดส่ง. ใน: *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 13*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม: มหาวิทยาลัย; 2559. หน้า 632-641.
- [8] นรงค์ วิชาผา, ไทยทัศน์ สุดสวนสี, พรเทพ ขอขจายเกียรติ. การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบมีกรอบเวลาโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบผสมผสานด้วยวิธีฮิวริสติกแบบแทรกไปข้างหน้าและวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 2562; 29(1):4-13.
- [9] วรณวรา เนืองนิตย์นราพร, อำพล การุณสุนทวงษ์. วิธีฮิวริสติกการสร้างสำหรับการจัดเส้นทางรถขนส่งสินค้าที่ระยะเวลาเดินทางขึ้นกับเวลาภายใต้ข้อจำกัดกรอบเวลาในการรับส่งสินค้าแบบไม่เคร่งครัดและการใช้พาหนะหลายเที่ยว. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* 2561;41(1): 63-81.
- [10] Talbi EG. *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons; 2009 May 27.
- [11] สุพรรณ สุดสนธิ์, สรายุทธ กรวิรัตน์, นคร สุดสนธิ์. วิธีซิมูเลเตด แอลเนลลิง สำหรับการจัดเส้นทางขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่ยืดหยุ่น. *วิศวกรรมสาร มช.* 2557;41(4):449-461.
- [12] Razavi M, Eshlaghy AT. A two Phase Approach for solving Dynamic Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Research Journal of Recent Sciences*. 2015;4:34-40.
- [13] Yu B, Yang ZZ, Yao BZ. A hybrid algorithm for vehicle routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*. 2011 Jan 1;38(1):435-41.
- [14] Ombuki B, Ross BJ, Hanshar F. Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows. *Applied Intelligence*. 2006 Feb 1;24(1):17-30.
- [15] Gong YJ, Zhang J, Liu O, Huang RZ, Chung HS, Shi YH. Optimizing the vehicle routing problem with time windows: A discrete particle swarm optimization approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2011 May 27;42(2):254-67.
- [16] Nagata Y, Bräysy O, Dullaert W. A penalty-based edge assembly memetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*. 2010 Apr 1;37(4):724-37.
- [17] Bezerra SN, Souza MJ, de Souza SR, Coelho VN. A VNS- based algorithm with adaptive local search for solving the multi- depot vehicle routing problem. *In International Conference on Variable Neighborhood Search*. 2018 Oct 4 (pp. 167-181). Springer, Cham.
- [18] Avci M, Topaloglu S. An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries. *Computers & Industrial Engineering*. 2015 May 1;83:15-29.

- [19] Wassan NA, Osman IH. Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*. 2002 Jul 1;53(7):768-82.
- [20] Jawarneh S, Abdullah S. Sequential insertion heuristic with adaptive bee colony optimisation algorithm for vehicle routing problem with time windows. *PloS one*. 2015 Jul 1;10(7):e0130224.
- [21] Batsyn M, Bychkov I, Komosko L, Nikolaev A. Tabu search for fleet size and mix vehicle routing problem with hard and soft time windows. In: *International Conference on Network Analysis* 2016 May 26 (pp. 3-18). Springer, Cham.
- [22] Desrochers M, Desrosiers J, Solomon M. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations Research*. 1992 Apr;40(2):342-54.
- [23] Lau HC, Lim YF, Liu Q. Diversification of neighborhood via constraint-based local search and its application to VRPTW. *Proceeding of CP-AI-OR 2001 Workshop* 2001.
- [24] Tan KC, Chew YH, Lee LH. A hybrid multiobjective evolutionary algorithm for solving vehicle routing problem with time windows. *Computational Optimization and Applications*. 2006 May;34(1):115-51.
- [25] Kallehauge B, Larsen J, Madsen OB. Lagrangian duality applied to the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*. 2006 May 1;33(5):1464-87.
- [26] Cook W, Rich JL. A parallel cutting-plane algorithm for the vehicle routing problem with time windows. 1999.
- [27] Chiang WC, Russell RA. A reactive tabu search metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows. *INFORMS Journal on Computing*. 1997 Nov;9(4):417-30.
- [28] Rochat Y, Taillard ÉD. Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of heuristics*. 1995 Sep;1(1):147-67.
- [29] Tan KC, Lee LH, Ou K. Artificial intelligence heuristics in solving vehicle routing problems with time window constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001 Dec 1;14(6):825-37.
- [30] Rousseau LM, Gendreau M, Pesant G. Using constraint-based operators to solve the vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*. 2002 Jan;8(1):43-58.
- [31] Thangiah SR, Osman IH, Sun T. Hybrid genetic algorithm, simulated annealing and tabu search methods for vehicle routing problems with time windows. Computer Science Department, Slippery Rock University, Technical Report SRU CpSc-TR-94-27. 1994;69.
- [32] Homberger J, Gehring H. Two evolutionary metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *INFOR: Information Systems and Operational Research*. 1999 Aug 1;37(3):297-318.
- [33] Berger J, Barkaoui M. A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*. 2004 Oct 1;31(12):2037-53.
- [34] Bent R, Van Hentenryck P. A two-stage hybrid local search for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*. 2004 Nov;38(4):515-30.
- [35] Ransikarbum K, Pitakaso R, Kim N. A decision-support model for additive manufacturing scheduling using an integrative analytic hierarchy process and multi-objective optimization. *Applied Sciences*. 2020 Jan;10(15):5159.
- [36] Ransikarbum K, Ha S, Ma J, Kim N. Multi-objective optimization analysis for part-to-Printer assignment in a network of 3D fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Systems*. 2017 Apr 1;43:35-46.