วิธีฮิวริสติกการสร้างสำหรับการจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าที่ระยะเวลาเดินทางขึ้นกับเวลาภายใต้ข้อจำกัดกรอบเวลาในการรับส่งสินค้าแบบไม่เคร่งครัดและการใช้พาหนะหลายเที่ยว

วรรณวรา เนืองนิตย์นราพร[1] และ อำพล การุณสุนทวงษ์[2*]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ต้นทุนการขนส่งเป็นต้นทุนที่สำคัญสำหรับระบบโลจิสติกส์ เนื่องจากเป็นต้นทุนที่มีองค์ประกอบใหญ่ที่สุด และสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะทางและเวลา เพื่อลดต้นทุนการขนส่ง ผู้วิจัยจึงพัฒนาวิธี ฮิวริสติกการสร้างในการแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่พิจารณาเงื่อนไขการเดินรถ 3 ประการ เพื่อให้มีความเสมือนจริงของสถานการณ์ คือ กรอบเวลาการส่งสินค้าถึงลูกค้าแบบไม่เคร่งครัด ระยะเวลาในการขนส่งขึ้นกับช่วงเวลา และการเดินรถหลายเที่ยว โดยมีวัตถุประสงค์แบบลำดับชั้นสำหรับการหาค่าน้อยที่สุดในการจัดเส้นทางที่เรียงลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย ดังนี้ (ก) จำนวนรถส่งสินค้า (ข) จำนวนครั้งการส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลา (ค) จำนวนครั้งการส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลา (ง) ผลรวมถ่วงน้ำหนักของระยะทาง ระยะเวลา ค่าปรับการส่งสินค้าก่อนกรอบเวลา และค่าปรับการส่งสินค้าหลังกรอบเวลา วิธีการหาคำตอบที่เสนอ คือ วิธีการสร้าง 2 รูปแบบ ได้แก่ (ก) รูปแบบการเดินรถเที่ยวเดียวและฮิวริสติกแบบละโมบ (ST-GH) และ (ข) รูปแบบการเดินรถหลายเที่ยว (MT) ปัญหาที่นำมาใช้ในการทดสอบ คือ ปัญหาทดสอบมาตรฐานของ Solomon โดยมีลักษณะการกระจายตัว 3 แบบ ได้แก่ แบบกลุ่ม แบบสุ่ม และแบบกลุ่มผสมแบบสุ่ม วิธีการ ST-GH ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการ MT สำหรับปัญหาที่ลูกค้ามีการกระจายตัวแบบสุ่มและปัญหาที่ลูกค้ามีการกระจายตัวแบบกลุ่มผสมแบบสุ่ม มากถึงร้อยละ 4.55 และ 4.17 ตามลำดับ ในขณะที่วิธีการ MT จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ามากถึงร้อยละ 8.33 เฉพาะการกระจายตัวของลูกค้าแบบกลุ่ม

คำสำคัญ : การจัดเส้นทางเดินรถ / กรอบเวลาแบบไม่เคร่งครัด / การใช้พาหนะหลายเที่ยว / ระยะเวลาเดินทางขึ้นกับเวลา

* *Corresponding Author : ampol.kar@kmutt.ac.th*

[1] *นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[2] *รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

A Construction Heuristic Method for Time Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Multiple Use of Vehicles

Wanvara Nueangnitnaraporn[1] and Ampol Karoonsoontawong[2*]

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bandmod, Thungkru, Bangkok 10140

Abstract

Transportation costs are the important matter for logistics system since they could vary depending on both the distance and time duration. Therefore, a constructive heuristic algorithm to solve vehicle routing problem is developed. For complex and real situations, three features are considered in this research. They are soft time window constraint, time dependent travel time calculation, and multiple use of vehicles. The hierarchical objectives of vehicle routing problem are considered. The minimization objectives in descending order of importance are: (i) the number of vehicles, (ii) the number of late soft time windows, (iii) the number of early soft time windows and (iv) the weighted summation of transportation distance, time, early service time penalty, and late service time penalty. A constructive heuristic algorithm is proposed with two variations: (i) single trip per vehicle with post-processing greedy heuristic (ST-GH) and (ii) multiple trip per vehicle (MT). The Solomon's standard problems with three customer configuration types are employed: clustered, random, and random-clustered. The results show that the ST-GH variation yields better results than the MT variation on the random, and the random-clustered customer configuration types by up to 4.55% and 4.17%, respectively. The MT variation outperforms the ST-GH variation on the clustered customer configuration by up to 8.33%.

Keywords : Vehicle Routing Problem / Soft Time Windows / Multiple Use of Vehicles / Time-Dependent Travel Time

* *Corresponding Author : ampol.kar@kmutt.ac.th*

[1] *Student, Transportation Engineering Division, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Associate Professor, Transportation Engineering Division, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

ปัญหาการขนส่งสินค้าเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับระบบโลจิสติกส์ เนื่องจากการขนส่งเป็นต้นทุนที่มีองค์ประกอบใหญ่ที่สุด โดยสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติระบุว่าต้นทุนการขนส่งในประเทศไทยปี 2557 มีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 52.8 ของต้นทุน โลจิสติกส์ทั้งหมด [1] อีกทั้งต้นทุนการขนส่ง ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณ กล่าวคือ ระยะทางและเวลา ดังนั้น หากผู้แข่งขันทางธุรกิจสามารถเพิ่มกลยุทธ์เพื่อลดต้นทุนการขนส่งและยังคงตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้จะทำให้ธุรกิจของผู้แข่งขันนั้นมีศักยภาพมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบัน มีการพัฒนากลยุทธ์ในการจัดเส้นทางการเดินรถ (Vehicle Routing Problem, VRP) เพื่อลดต้นทุนการขนส่งอย่างกว้างขวางโดยพิจารณาถึงหลากหลายปัญหาความซับซ้อนเพื่อให้มีสถานการณ์การขนส่งที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยปัญหาที่มีเงื่อนไขสำคัญ 3 เงื่อนไขที่ควรนำมาพิจารณา ได้แก่ ปัญหาการจัดการเส้นทางการเดินรถภายใต้ข้อจำกัดกรอบเวลาการขนส่ง ปัญหาการจัดเส้นทางที่ความเร็วในการส่งสินค้าขึ้นกับเวลา และปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยว

ปัญหาการจัดการการขนส่งภายใต้ข้อจำกัดกรอบเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Window, VRPTW) เป็นปัญหาที่คำนึงถึงการตอบสนองความต้องการของลูกค้าเนื่องจากพิจารณาถึงกรอบเวลาที่สินค้าถึงมือลูกค้า เช่น ร้านค้าปลีกระบุกรอบเวลาการจัดส่งสินค้าเพื่อเติมสินค้าไม่ให้สินค้าขาดสต็อก โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Solomon [2] นำเสนอ VRP ที่เพิ่มข้อจำกัดกรอบเวลาการขนส่ง และสร้างปัญหาทดสอบ Solomon ซึ่งต่อมาปัญหาการทดสอบ Solomon ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้เป็นปัญหาทดสอบมาตรฐาน ถัดมา Koskosidis และคณะ [3] นำเสนอ VRPTW ที่เพิ่มข้อจำกัดด้านเวลาที่ไม่เคร่งครัด (Soft Time Window, VRPSTW) และงานวิจัยล่าสุด Figliozzi [4] สามารถแก้ไขได้ทั้งข้อจำกัดด้านเวลาที่เคร่งครัดและไม่เคร่งครัดด้วยขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทางการเดินรถแบบทำซ้ำและการปรับปรุง (Iterative Route Construction and Improvement Algorithm, IRCI)

ปัญหาที่สำคัญต่อมาคือปัญหาการจัดเส้นทางที่ความเร็วในการส่งสินค้าขึ้นกับเวลา (Time Dependent Vehicle Routing Problem, TDVRP) เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่มักสมมติให้ระยะเวลาในการเดินทางเป็นค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงแล้ว ระยะเวลาการเดินทางระหว่าง 2 ที่ตั้งไม่ได้ขึ้นกับระยะทางเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับความเร็วใน แต่ละช่วงเวลาของวันด้วย [5] ดังนั้น ปัญหาเส้นทางการเดินรถที่มีความเร็วในการส่งสินค้าขึ้นกับเวลาจึงเป็นปัญหาที่ควรนำมาพิจารณาเพื่อให้มีสถานการณ์ใกล้เคียงความจริงมากยิ่งขึ้น โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Malandraki และ Daskin [6] ได้นำเสนอ VRP ที่เพิ่มเงื่อนไขของความไม่เป็นอิสระกับเวลา และระยะเวลาเดินทางเป็นรูปแบบฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง ต่อมา Haghani และ Jung [7] นำเสนอระยะเวลาการเดินทางในรูปแบบของฟังก์ชันต่อเนื่อง และ งานวิจัยล่าสุด Figliozzi [8] พิจารณา TDVRP ที่มีข้อจำกัดด้านเวลาที่ไม่เคร่งครัด ใช้ระยะเวลาการเดินทางในรูปแบบของฟังก์ชันต่อเนื่องและแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการ IRCI

ปัญหาที่สำคัญข้อสุดท้าย คือ ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยว ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบหลายเที่ยวคล้ายกับการจัดเส้นรถโดยทั่วไปแต่มีจำนวนข้อจำกัดที่มากกว่าและช่วงเวลาระหว่างวันรถส่งสินค้าสามารถส่งสินค้าได้มากกว่า 1 รอบ [9] ปัญหานี้สามารถเกิดขึ้นได้กรณีมีปริมาณความต้องการของลูกค้ามากแต่ความจุของรถส่งสินค้ามีจำกัด ทำให้เส้นทางการจัดส่งในเที่ยวแรกมีปริมาณลูกค้าน้อย รถส่งสินค้าจึงมีเวลาในการทำงานเหลือมาก โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Brandao และ Mercer [9] ได้นำเสนอข้อจำกัดเพิ่มเติมของ VRP คือ การเดินรถหลายเที่ยว (Multi-trip vehicle routing problem) และงานวิจัยล่าสุด Karoonsoontawong [10] แก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยวภายใต้กรอบเวลาการรับส่งสินค้าโดยทำการจัดเส้นทางการเดินรถเที่ยวเดียวก่อนโดยวิธีการฮิวริสติกการแทรก จากนั้นทำการจัดเส้นทางรถหลายเที่ยวด้วยฮิวริสติกแบบละโมบ (Greedy Heuristic)

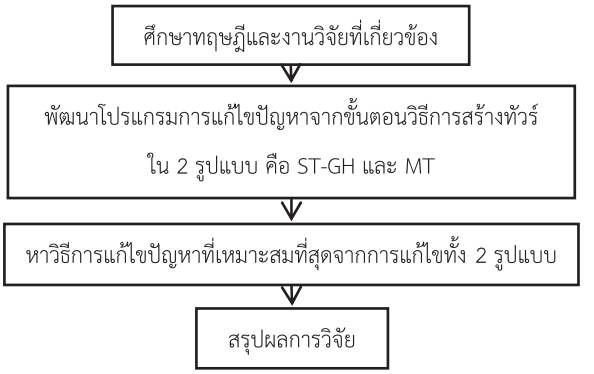
จากความสำคัญของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถข้างต้น เพื่อให้ได้การจัดเส้นทางการเดินรถส่งสินค้าที่เสมือนจริง สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการแก้ไขปัญหาที่มีเงื่อนไขที่สำคัญทั้งสามที่กล่าวข้างต้นในการแก้ไขเดียว กล่าวคือ พัฒนาแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยวที่ขึ้นกับเวลาภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลาแบบไม่เคร่งครัด

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถขนส่งสินค้าหลายเที่ยวที่ขึ้นกับเวลาภายใต้ข้อจำกัดกรอบเวลาในการรับส่งสินค้าแบบไม่เคร่งครัด โดยผู้วิจัยเลือกนำขั้นตอนวิธีการทำซ้ำ (Iterative Route Construction) ที่นำเสนอโดย Figliozzi [8] และฮิวริสติกแบบละโมบ (Greedy Heuristic) ที่นำเสนอโดย Karoonsoontawong [10] มาพัฒนาเป็นขั้นตอนวิธีการสร้าง (Construction Algorithm) โดยพัฒนาขั้นตอนวิธีการสร้างในการแก้ไขปัญหา 2 รูปแบบ คือ รูปแบบการเดินรถเที่ยวเดียวกับฮิวริสติกแบบละโมบ (Single Trip per Vehicle with a Greedy Heuristic, ST-GH) และรูปแบบการเดินรถหลายเที่ยว (Multiple Trips per Vehicle, MT) ในบทความนี้ ทัวร์ (Tour) คือ เซตของเส้นทางที่ใช้พาหนะเดียวกัน [10]

ผู้วิจัยพัฒนาวิธีฮิวริสติกการสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา C++ โดย Code Block ดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Window 8.1 CPU i7-3612QM RAM 8 GB และตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมและผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีเทียบเท่าการคำนวณมือจากการแก้ไขปัญหาตัวอย่าง

สุดท้ายเพื่อหาวิธีการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ผู้วิจัยจึงใช้ปัญหาทดสอบมาตรฐาน Solomon [2] มาเป็นปัญหาทดสอบโปรแกรมการแก้ไขทั้ง 2 รูปแบบแล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ โดยมีแผนการทำงานโดยสังเขปดังแสดงในรูปที่ 1

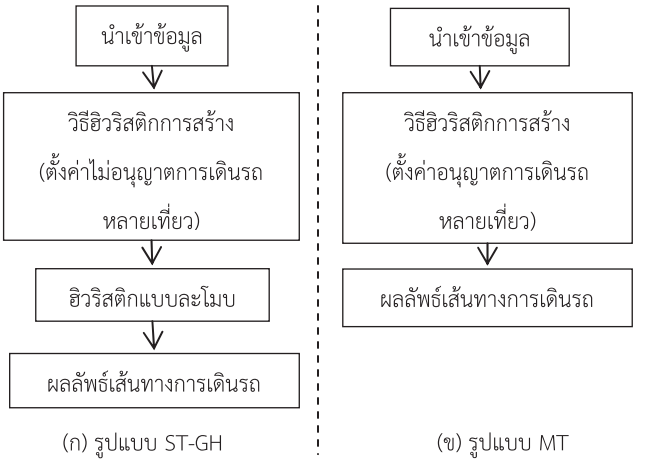


รูปที่ 1 แผนการดำเนินการวิจัยโดยสังเขป

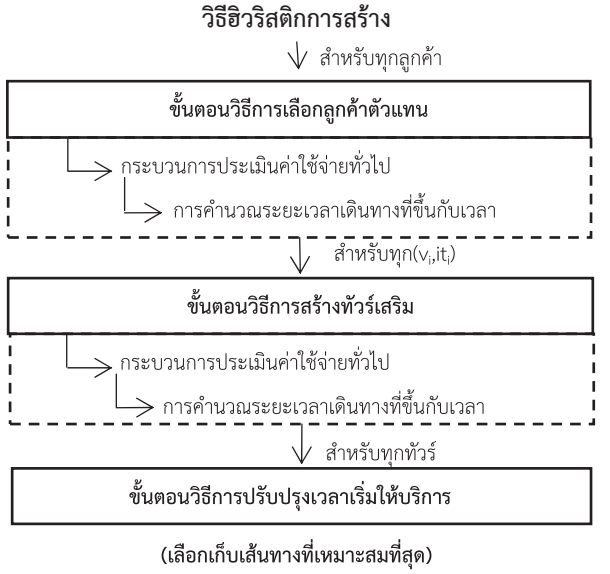
2.1 วิธีฮิวริสติกการสร้าง (Construction Heuristic Method)

วิธีฮิวริสติกการสร้างพัฒนาในลักษณะการแก้ไขปัญหา 2 รูปแบบ คือ ST-GH และ MT โดยมีการพัฒนาที่แตกต่างกัน คือ รูปแบบ ST-GH จะพัฒนาขั้นตอนวิธีการทำซ้ำของ Figliozzi [8] จากการเพิ่มฮิวริสติกแบบละโมบของ Karoonsoontawong [10] เพื่อช่วยในการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยว ส่วนรูปแบบ MT จะพัฒนาให้ขั้นตอนวิธีการทำซ้ำสามารถจัดเส้นทางการเดินหลายเที่ยวได้เองในขั้นตอนนี้ โดยรูปแบบทั้งสองมีแผนการทำงานโดยสังเขปแสดงดังรูปที่ 2

วิธีฮิวริสติกการสร้างเป็นขั้นตอนวิธีหลักที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา โดยเรียกขั้นตอนวิธีการย่อย 3 ขั้นตอนวิธีเข้ามาช่วย คือ ขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทน (Candidate Customer Selection Algorithm) และเรียกขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์เสริม (Auxiliary Tour Building Algorithm) และขั้นตอนการปรับปรุงเวลาเริ่มให้บริการ (Service Time Improvement Algorithm) ดังแสดงแผนการทำงานโดยสังเขปในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แผนการทำงานการแก้ไขปัญหารูปแบบ ST-GH และ MT



รูปที่ 3 แผนการทำงานของวิธีฮิวริสติกการสร้าง

2.1.1 สัญลักษณ์

$G = (V, A)$ = กราฟ

$V = (v_0,...,v_{n+1})$ = เซตของโหนด

$C = (v_1,...,v_n)$ = เซตของลูกค้า

A = $\{(v_i, v_j) \mid i \neq j, i \in V, j \in V\}$
= เซตของเส้นทางจากลูกค้า i ไปลูกค้า j

$r_k^m \in R(m)$ = เส้นทาง k ในเซตของเส้นทาง $R(m)$ มอบหมายด้วยทัวร์ m

$t(m)$ = จำนวนเส้นทางในทัวร์ m

TR = เซตของทัวร์การเดินรถหลายเที่ยวในรอบการคำนวณปัจจุบัน

TR^* = เซตของทัวร์การเดินรถหลายเที่ยวที่ดีที่สุด ตั้งแต่รอบการคำนวณแรกจนถึงรอบการคำนวณปัจจุบัน

$\overline{TR}$ = เซตบางส่วนของทัวร์การเดินรถหลายเที่ยว

$C(\overline{TR})$ = เซตของลูกค้าใน $\overline{TR}$

$\hat{C}$ = เซตของลูกค้าที่ยังไม่ได้รับมอบหมายการให้บริการ

2.1.2 พารามิเตอร์

N = จำนวนลูกค้า (ราย)

m = จำนวนของรถส่งสินค้าชนิดเดียวกัน (คัน)

v_0 , v_{n+1} = คลังสินค้าที่ซึ่งทุกเส้นทางของรถส่งสินค้าจำนวน m ที่มีความจุ $q_{\max}$ ใช้เป็นต้นทางและปลายทาง

Q_k = ความจุของรถส่งสินค้า k (หน่วย)

D_i = ความต้องการของลูกค้า i (หน่วย)

s_i =ระยะเวลาการให้บริการเป็นค่าคงที่ที่ลูกค้า i (นาที)

$[E_i, L_i]$ = กรอบเวลาการให้บริการของลูกค้า i ซึ่งสามารถเริ่มต้นให้บริการโดยไม่เสียค่าปรับ (นาที, นาที)

d_{ij} = ระยะทางของเส้นทางจากลูกค้า i ไปลูกค้า j (ไมล์)

$P_{\max}$ = ระยะเวลาที่อนุญาตให้ละเมิดกรอบเวลาการให้บริการเป็น 10% ของกรอบเวลาการทำงานทั้งหมด $P_{\max} = 0.1 \times (L_i - E_i)$ (นาที)

$[E_i^{\#}, L_i^{\#}]$ = กรอบเวลาการให้บริการลูกค้าที่ขยายเพิ่มตามระยะเวลาที่อนุญาตให้ละเมิดของลูกค้า i ($[E_i - P_{\max}, L_i + P_{\max}]$) (นาที, นาที)

δ_0 = ค่าใช้จ่ายกรณีเพิ่มจำนวนรถส่งสินค้า (หรือค่าปรับในกรณีไม่สามารถให้บริการลูกค้า j ได้ในทัวร์ปัจจุบัน) ($)

δ_1 = ค่าน้ำหนักของระยะทางระหว่างลูกค้า ($/ไมล์)

δ_2 = ค่าน้ำหนักของ slack ระหว่างการให้บริการลูกค้า i เสร็จสิ้นและเวลาการให้บริการเริ่มต้นที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ของลูกค้า j (กล่าวคือ $y_j^{km} = \max(a_j, e_j^{\#})$ โดยที่ $a_j = y_i^{km} + s_i + t_{ij}(y_i^{km} + s_i)$) ($/นาที)

δ_3 = ค่าน้ำหนักของ Urgency ของการให้บริการลูกค้า j แสดงเป็นระยะเวลาคงเหลือจนกระทั่งเวลาเริ่มต้นที่เป็นไปได้ช้าที่สุดของรถส่งสินค้า ($/นาที) [2]

δ_4 = ค่าน้ำหนักของความจุคงเหลือของรถส่งสินค้าหลังให้บริการลูกค้า j ($/หน่วย)

δ_5 = ค่าน้ำหนักของค่าปรับกรณีส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลาของลูกค้า ($/นาที)

δ_6 = ค่าน้ำหนักของค่าปรับกรณีส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลาของลูกค้า ($/นาที)

c_e = สัมประสิทธิ์ค่าปรับกรณีส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลาในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยค่าปรับกรณีส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลา คือ $c_e(E_i - y_i^{km})$ สำหรับ $y_i^{km} \in [E_i^{\#}, E_i]$ ($/นาที)

c_l = สัมประสิทธิ์ค่าปรับกรณีส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลาในฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดย ค่าปรับกรณีส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลา คือ $c_l(y_i^{km} - L_i)$ สำหรับ $y_i^{km} \in [L_i, L_i^{\#}]$ ($/นาที)

c_t = ค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยเวลาของทัวร์ ($/นาที)

c_d = ค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยระยะเดินทาง ($/ไมล์)

2.1.3 พารามิเตอร์ที่ขึ้นกับเวลา

$sp_{ij}(t)$ = ความเร็วของเส้นทางจากลูกค้า i ไปลูกค้า j มีค่าเป็นบวกและเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องของเวลา (ไมล์/นาที)

$t_{ij}(b_i)$ = ระยะเวลาเดินทางจากลูกค้า i ไปลูกค้า j เมื่อรถส่งสินค้าออกจาก i ที่เวลา b_i (นาที)

2.1.4 ตัวแปรตัดสินใจ

a_i = เวลาไปถึงของรถส่งสินค้าที่ลูกค้า i (นาที)

b_i = เวลาออกของรถส่งสินค้าจากลูกค้า i (นาที)

x_{ij}^{km} = ตัวแปรตัดสินใจไบนารีที่บ่งชี้ว่ารถส่งสินค้า m ในเส้นทาง k เดินทางระหว่างลูกค้า i และ j

y_i^{km} = ตัวแปรตัดสินใจจำนวนจริงที่บ่งชี้เวลาเริ่มให้บริการสำหรับลูกค้า i โดยรถส่งสินค้า m ในเส้นทาง k

y_0^{km} = เวลาของรถส่งสินค้าออกจากคลังสินค้าสำหรับเส้นทาง k ของรถส่งสินค้า m (นาที)

y_{n+1}^{km} = เวลาของรถส่งสินค้าที่ไปถึงคลังสินค้าสำหรับเส้นทาง k ของรถส่งสินค้า m (นาที)

ne_i = 1 ถ้ามีค่าปรับกรณีส่งเร็วกว่ากรอบเวลาที่ลูกค้า i
= 0 ในกรณีอื่นๆ

nl_i = 1 ถ้ามีค่าปรับกรณีส่งช้ากว่ากรอบเวลาที่ลูกค้า i
= 0 ในกรณีอื่นๆ

$\underline{y}_i^{km}$ = เวลาที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในการเริ่มให้บริการลูกค้า i โดยรถส่งสินค้า m ในเส้นทาง k

$= \max(a_i, e_i^{\#})$ (นาที)

$\bar{y}_i^{km}$ = เวลาที่ช้าที่สุดที่เป็นไปได้ในการเริ่มให้บริการลูกค้า i โดยรถส่งสินค้า m ในเส้นทาง k

$= \max(a_i, l_i^{\#})$ (นาที)

q^{km} = ความจุคงเหลือของรถส่งสินค้า m ในเส้นทาง k (หน่วย)

$g(\delta, i, j, m)$ = ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายทั่วไป (Generalized Cost Function) สำหรับลูกค้า i ไป j ในเส้นทางสุดท้ายในทัวร์ m ด้วยค่าน้ำหนัก δ ($)

2.1.5 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าที่น้อยที่สุด $z_1 = \sum_{m \in TR} \sum_{j \in C} x_{0j}^{1,m}$ (2.1)

ค่าที่น้อยที่สุด $z_2 = \sum_{i \in C} nl_i$ (2.2)

ค่าที่น้อยที่สุด $z_3 = \sum_{i \in C} ne_i$ (2.3)

ค่าที่น้อยที่สุด

$$z_4 = c_d \sum_{m \in TR} \sum_{k \in R(m)} \sum_{(i,j) \in A} d_{ij}^{k} x_{ij}^{km} + c_t \sum_{m \in TR} \sum_{j \in C} (y_{n+1}^{t(m),m} - y_0^{1,m}) x_{0j}^{1,m}$$
$$+ c_e \sum_{m \in TR} \sum_{k \in R(m)} \sum_{i \in C} (E_i - y_i^{km})^+ + c_l \sum_{m \in TR} \sum_{k \in R(m)} \sum_{i \in C} (y_i^{km} - L_i)^+ \quad (2.4)$$

สมการ (2.1) เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนรถส่งสินค้าที่ส่งสินค้าไปยังลูกค้าทุกราย (คัน) สมการ (2.2) เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนครั้งที่รถส่งสินค้าส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลาของลูกค้าแต่ละราย (นาที) สมการ (2.3) เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนครั้งที่รถส่งสินค้าส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลาของลูกค้าแต่ละราย (นาที) สมการ (2.4) เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของค่าใช้จ่ายตามจำนวนระยะทาง เวลาที่ใช้ในการเดินทาง ค่าปรับกรณีส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลาและค่าปรับกรณีส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลาทั้งหมด (นาที)

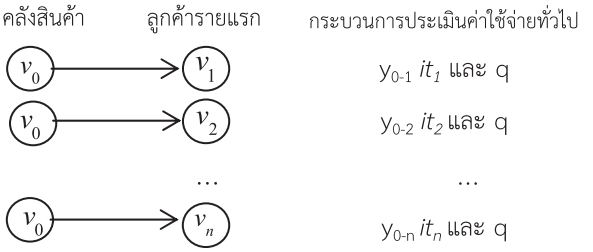
2.1.6 รหัสเทียมของวิธีฮิวริสติกการสร้าง

$H_c(H_t, W, \Delta, C)$
เริ่มต้น
$best_z_4 := +\text{inf}$
สำหรับ แต่ละ $\delta \in \Delta$
{
$TR := \{v_0\}$
$y := \{E_0^{\#}\}$
$v_{latest_inserted} := v_0$
$C' := C$
หาก ($C' \neq \varnothing$) ให้ทำ
{
$best_nb_4 := +\text{inf}$
W := min(W, $|C'|$)
$(C'^{*}, IT^{*}) :=$
$w(v_{latest_inserted}, C', W, \delta, v_0, TR, y)$
สำหรับแต่ละ $(v_i, it_i) \in (C'^{*}, IT^{*})$
{
$\overline{TR} = TR$
$\bar{y} = y$
$C'' = C' - \{v_i\}$
เรียก $H_t(\delta, v_i, C'', v_0, \overline{TR}, \bar{y})$
ถ้า $z_4(\overline{TR}) < best_nb_z_4$ แล้ว
{
$best_v_i := v_i$
$best_it_i := it_i$
}
ถ้า $z_4(\overline{TR}) < best_z_4$
{
$best_z_4 := z_4(\overline{TR})$
$TR^{*} = \overline{TR}$
$y^{*} = \bar{y}$
}
}
$v_{latest_inserted} := best_v_i$
$C' = C' \setminus \{best_v_i\}$
}
}
$TR := TR^{*}$
$y := y^{*}$
สิ้นสุดการทำงาน

กำหนดค่าเริ่มต้นประกอบด้วย ค่าวัตถุประสงค์ z_4 มีค่าอนันต์ ลูกค้ารายที่ 0 เป็นคลังสินค้า $TR := \{v_0\}$ ค่าแรกของเวลาเริ่มต้น $y := \{E_0^{\#}\}$ ลูกค้าที่ถูกแทรกรายสุดท้าย $v_{latest_inserted} := v_0$ และเซตของลูกค้าที่ยังไม่ได้รับบริการเป็นเซตลูกค้าทั้งหมด $C' := C$ จากนั้นดำเนินการทำงานโดยตรวจสอบว่ายังมีลูกค้าที่ไม่ได้รับบริการเหลืออยู่หรือไม่ $C' \neq \varnothing$ หากยังมีเหลืออยู่ จะเรียกขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทน $w(W, \delta, v_{latest_inserted}, m, C, v_0, TR, y)$ เพื่อเลือกลูกค้ารายแรก ต่อมาเพิ่มค่าของลูกค้ารายแรกเข้าไปโดยปรับทัวร์ใหม่ $\overline{TR} = TR$ ปรับเวลาเริ่มให้บริการใหม่ $\overline{y} = y$ และลบลูกค้ารายแรกออกจากเซตลูกค้าที่ยังไม่ได้รับบริการ $C'' = C' - \{v_i\}$ จากนั้นเรียกขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์เสริม H_t $(\delta, v_{latest_inserted}, \hat{C}, v_0, TR, y)$ เพื่อสร้างลูกค้า รายถัดไปกระทั่งครบทุกราย และตรวจสอบค่า $z_4(\overline{TR})$ ของทัวร์ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าในปัจจุบันหรือไม่ $z_4(\overline{TR}) < best_z_4$ หากน้อยกว่าให้เก็บค่าต่างๆ ของทัวร์นั้นไว้ $best_z_4 := z_4(\overline{TR})$ $TR^* = \overline{TR}$ และ $y^* = \overline{y}$ จากนั้นกระทำซ้ำโดยเปลี่ยนลูกค้ารายแรก สุดท้ายจะได้ทัวร์ที่ให้ค่าวัตถุประสงค์ z_4 ที่น้อยสุด

2.1.7 ขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทน

ขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทนเป็นขั้นตอนสำหรับการหาลูกค้ารายแรก โดยให้สิทธิลูกค้าทุกรายสามารถเป็นลูกค้ารายแรกได้ จากการแทรกลูกค้าแต่ละรายลงในเส้นทาง จากนั้นเรียกกระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไป เพื่อช่วยในการคำนวณค่าต่างๆ ดังแสดงแผนการทำงานในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนการทำงานขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทน

รหัสเทียมของขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทน

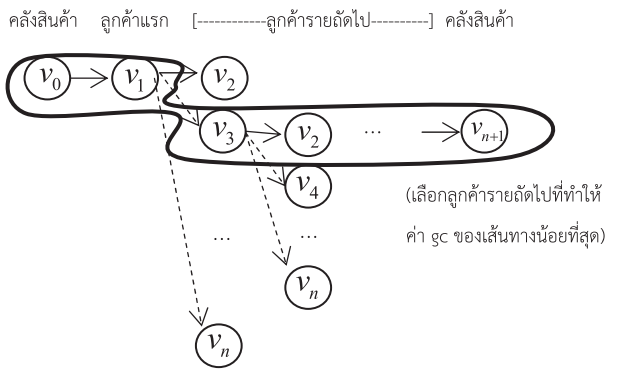
$w(W, \delta, v_{latest_inserted}, m, C, v_0, TR, y)$

เริ่มต้น
สำหรับแต่ละ j ใน C
{
เรียก $g(\delta, v_{latest_inserted}, v_j, m, v_0, TR, y)$
}
สิ้นสุดการทำงาน

ดำเนินขั้นตอนโดยเรียกกระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไป $g(\delta, v_{latest_inserted}, v_j, m, v_0, TR, y)$ เพื่อคำนวณหาค่าลูกค้ารายแรกและชนิดการแทรก (v_i, it_i) จากนั้นกระทำจนครบทุกลูกค้าเพื่อให้สิทธิ์ลูกค้าทุกรายเป็นลูกค้ารายแรก

2.1.8 ขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์เสริม

ขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์เสริมเป็นขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์ที่เหลือจากขั้นตอนวิธีการเลือกลูกค้าตัวแทน เพื่อให้ลูกค้าได้รับบริการครบทุกราย ดังแสดงแผนการทำงานในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนการทำงานขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์เสริม

รหัสเทียมของขั้นตอนวิธีการสร้างทัวร์เสริม

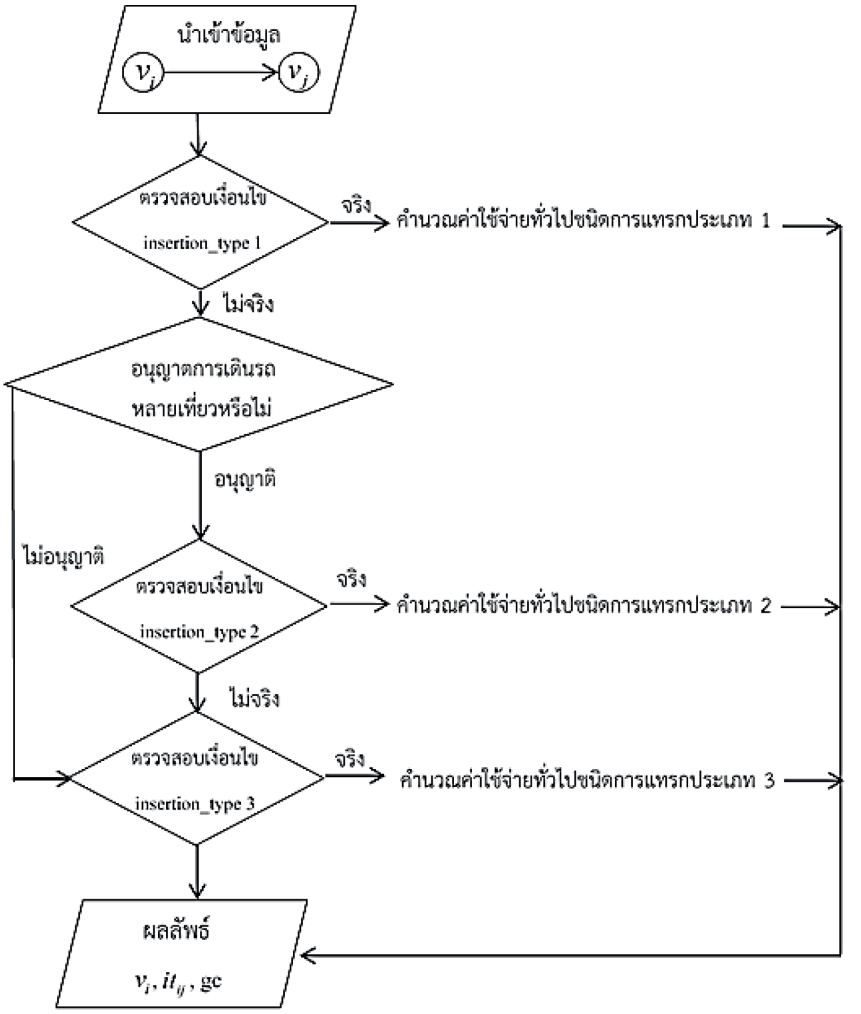
$H_t(\delta, v_{latest_inserted}, \hat{C}, v_0, TR, y)$
เริ่มต้น
หาก($\hat{C} \neq \varnothing$) ให้ทำ
{
$best_gc$ = +inf
สำหรับ j ใน $\hat{C}$
{
เรียก $g(\delta, v_{latest_inserted}, v_j, m, v_0, TR, y)$
ถ้า ($gc < best_gc$) แล้ว
{
$best_gc = gc$
$best_j = j$
best_insertion_type = insertion_type
}
}
$\hat{C} = \hat{C} \setminus best_j$
$v_{latest_inserted} = best_j$
}
สิ้นสุดการทำงาน

กำหนดค่าใช้จ่ายทั่วไปที่ดีที่สุดเริ่มต้นเป็นอนันต์ $best_gc$ = +inf ดำเนินการโดยแทรกลูกค้ารายที่สอง และเรียกกระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไป $g(\delta, v_{latest_inserted}, v_j, m, v_0, TR, y)$ ขึ้นมาเพื่อคำนวณหาค่าใช้จ่ายทั่วไปของลูกค้าที่ถูกแทรก ต่อมาตรวจสอบว่าลูกค้าที่ถูกแทรกเข้ามาใหม่ให้ค่าใช้จ่ายทั่วไปน้อยกว่าค่าในปัจจุบันหรือไม่ $gc < best_gc$ หากน้อยกว่าให้เก็บค่าต่างๆ ไว้ ได้แก่ $best_gc = gc$ $best_j = j$ และ *best_insertion_type = insertion_type* ต่อมากระทำซ้ำโดยเปลี่ยนลูกค้ารายที่สองไปเรื่อยๆ สุดท้ายจะได้ลูกค้ารายที่สองที่ให้ค่าใช้จ่ายทั่วไปที่น้อยที่สุด ให้ลบลูกค้ารายนั้นออกจากเซตของลูกค้าที่ยังไม่ได้รับบริการ $\hat{C} = \hat{C} \setminus best_j$ และกำหนดให้เป็นลูกค้าที่ถูกแทรกล่าสุด $v_{latest_inserted} = best_j$ จากนั้นใช้วิธีเดียวกันนี้ในการหาลูกค้ารายถัดไป จนกระทั่งลูกค้าทุกรายได้รับการให้บริการ $\hat{C} = \varnothing$

2.1.9 กระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไป

กระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไปเป็นกระบวนในการคำนวณค่าใช้จ่ายทั่วไปและชนิดการแทรก (insertion_type) ของลูกค้าที่ถูกแทรกเข้ามาในเส้นทาง ดังแสดงแผนการทำงานโดยสังเขปในรูปที่ 6 โดย insertion_type มีทั้งหมด 3 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 เดินรถต่อเนื่อง
ประเภทที่ 2 เดินรถหลายเที่ยว
ประเภทที่ 3 เดินรถด้วยรถส่งสินค้าคันใหม่



รูปที่ 6 แผนการทำงานของกระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไป

รหัสเทียมของขั้นตอนกระบวนการประเมินค่าใช้จ่ายทั่วไป

$g(\delta, v_i, v_j, m, v_0, TR, y, output_m)$

เริ่มต้น

k = t(m)

$a_j = y_i^{km} + s_i + t_{ij}(y_i^{km} + s_i)$

$y_j^{km} = \max(a_j, E_j^{\#}) = \underline{y}_j^{km}$

$y_{n+1}^{km} = \max\left(y_j^{km} + s_j + t_{j,n+1}(y_j^{km} + s_j), E_{n+1}^{\#}\right)$

ถ้า $D_j \le q^{km}$ และ $y_j^{km} \le l_j^{\#}$ และ $y_{n+1}^{t(m),m} \le l_0^{1,m}$ แล้ว

{

$gc = \delta_1 d_{ij} + \delta_2(y_j^k - (y_i^{km} + s_i)) + \delta_3(L_j^{\#} - a_j) + \delta_4(q^{km} - D_j)$

$+ \delta_5(E_j - y_j^{km})^+ + \delta_6(y_j^{km} - L_j)^+$

$q^{km} = q^{km} - D_i$

output_m =m;

insertion_type = 1

}

ถ้าไม่เป็นเช่นนั้น

{

ถ้าอนุญาตการเดินรถหลายเที่ยว

{

ถ้า $y_j^{km} \le l_j^{\#}$ และ $y_{n+1}^{t(m),m} \le L_{n+1}^{\#}$ แล้ว

{

t(m)=t(m)+1

k=t(m)

$y_0^{km} = y_{n+1}^{k-1,m}$

$a_j = y_0^{km} + s_0 + t_{0j}(y_0^{km} + s_0)$

$y_j^{km} = \max(a_j, E_j^{\#}) = \underline{y}_j^{km}$

$q^{km} = Q_m$

$y_{n+1}^{km} = \max\left(y_j^{km} + s_j + t_{j,n+1}(y_j^{km} + s_j), E_{n+1}^{\#}\right)$

ถ้า $y_{n+1}^{t(m),m} \le L_{n+1}^{\#}$ และ $y_j^{km} \le l_j^{\#}$

{

$gc = \delta_1 d_{0j} + \delta_2(y_j^{km} - y_0^{km})$
$+\delta_3(L_j^{\#} - a_j) + \delta_4(q^{km} - D_j)$
$+\delta_5(E_j - y_j^{km})^+ + \delta_6(y_j^{km} - L_j)^+$

$q^{km} = q^{km} - D_j$

output_m =m;

insertion_type = 2

}

}

ถ้าลูกค้า j ไม่ได้รับการบริการ แสดงว่าต้องจ้างรถส่งสินค้าคันใหม่เพื่อให้บริการ

{

m= m+1

t(m)=1

k=t(m)

$y_0^{km} = E_0^{\#}$

$a_j = y_0^{km} + s_0 + t_{0j}(y_0^{km} + s_0)$

$y_j^{km} = \max(a_j, E_j^{\#}) = \underline{y}_j^{km}$

$q^{km} = Q_m$

$y_{n+1}^{km} = \max\left(y_j^{km} + s_j + t_{j,n+1}(y_j^{km} + s_j), E_{n+1}^{\#}\right)$

ถ้า $D_j \le q^{km}$ และ $y_j^{km} \le l_j^{\#}$ และ $y_{n+1}^{t(m),m} \le L_{n+1}^{\#}$

{

$gc = \delta_0 + \delta_1 d_{0j} + \delta_2(y_j^{km} - E_0^{\#}) +$
$\delta_3(L_j^{\#} - a_j) + \delta_4(q^{km} - D_j)$
$+\delta_5(E_j - y_j^{km})^+ + \delta_6(y_j^{km} - L_j)^+$

$q^{km} = q^{km} - D_j$

output_m =m;

insertion_type = 3

}

}

ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแสดงว่าเป็นปัญหาผิดรูปแบบ ให้ออกจากการทำงาน

}

สิ้นสุดการทำงาน

กำหนดค่าเริ่มต้นประกอบด้วย จำนวนเส้นทางในทัวร์ k = t(m) คำนวณเวลาไปถึงลูกค้าที่ถูกแทรกเข้ามาใหม่ $a_j = y_i^{km} + s_i + t_{ij}(y_i^{km} + s_i)$ คำนวณเวลาเริ่มให้บริการที่เร็วที่สุด $y_j^{km} = \max(a_j, E_j^{\#}) = \underline{y}_j^{km}$ คำนวณเวลาเดินทางกลับไปยังคลังสินค้าหลังให้บริการ $y_{n+1}^{km} = \max\left(y_j^{km} + s_j + t_{j,n+1}(y_j^{km} + s_j), E_{n+1}^{\#}\right)$ ต่อมานำค่าที่คำนวณได้ตรวจสอบเงื่อนไขการเดินรถประเภทที่ 1 ได้แก่ ตรวจสอบความจุ เวลาเริ่มให้บริการ และกรอบเวลาการทำงานทั้งหมด $D_j \le q^{km}$ $y_j^{km} \le l_j^{\#}$ และ $y_{n+1}^{t(m)\,m} \le l_0^{1,m}$ หากตรงหากเป็นไปตามเงื่อนไขแสดงว่าสามารถเดินรถประเภทที่ 1 ได้ ให้คำนวณค่าใช้จ่ายทั่วไปแบบเดินรถประเภทที่ 1

$gc = \delta_1 d_{ij} + \delta_2(y_j^k - (y_i^{km} + s_i)) + \delta_3(L_j^{\#} - a_j)$
$+\delta_4(q^{km} - D_j) + \delta_5(E_j - y_j^{km})^+ + \delta_6(y_j^{km} - L_j)^+$

หากไม่ตรงตามเงื่อนไข ให้ตรวจสอบว่าอนุญาตให้เดินรถหลายเที่ยวได้หรือไม่ กรณีอนุญาตให้เดินรถหลายเที่ยว ให้ตรวจสอบเงื่อนไขการเดินรถประเภทที่ 2 $y_j^{km} \le l_j^{\#}$ และ $y_{n+1}^{t(m),m} \le L_{n+1}^{\#}$ หากตรงตามเงื่อนไขให้คำนวณค่าต่างๆ ใหม่ และตรวจสอบประเภทการเดินรถประเภทที่ 2 ใหม่อีกครั้ง $y_{n+1}^{t(m),m} \le L_{n+1}^{\#}$ และ $y_j^{km} \le l_j^{\#}$ หากตรงตามเงื่อนไขแสดงว่าเป็นการเดินรถประเภทที่ 2 ให้คำนวณค่าใช้จ่ายทั่วไปแบบการเดินรถประเภทที่ 2

$gc = \delta_1 d_{0j} + \delta_2(y_j^{km} - y_0^{km}) + \delta_3(L_j^{\#} - a_j) +$
$\delta_4(q^{km} - D_j) + \delta_5(E_j - y_j^{km})^+ + \delta_6(y_j^{km} - L_j)^+$

หากไม่อนุญาตให้เดินรถหลายเที่ยว หรือไม่ตรงตามเงื่อนไขการตรวจสอบการเดินรถประเภทที่ 2 แสดงว่าเป็นการเดินรถประเภทที่ 3 ให้คำนวณค่าต่างๆ ใหม่ และคำนวณค่าใช้จ่ายทั่วไปแบบการเดินรถประเภทที่ 3

$gc = \delta_0 + \delta_1 d_{0j} + \delta_2(y_i^{km} + E_0^{\#})$
$+\delta_3(L_j^{\#} - a_j) + \delta_4(q^{km} - D) + \delta_5(E_j - y_j^{km})^+$
$+\delta_6(y_j^{km} - L_j)^+$ สุดท้ายจะได้ค่าชนิดการแทรกและค่าใช้จ่ายของลูกค้าที่ถูกแทรก

2.1.10 การคำนวณระยะเวลาเดินทางที่ขึ้นกับเวลา $t_{ij}(b_i)$

การคำนวณระยะเวลาเดินทางที่ขึ้นกับเวลาเป็นขั้นตอนการคำนวณระยะเวลาการเดินทางตามความเร็วในช่วงเวลาที่เดินทางส่งสินค้า กล่าวคือ หากช่วงเวลาเช้าสภาพการจราจรหนาแน่น ความเร็วรถน้อยทำให้ใช้ระยะเวลาเดินทางมาก เป็นต้น สำหรับในกรณีการขนส่งคาบช่วงเวลาระหว่าง 2 ความเร็ว ขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณระยะเวลาการเดินทางจากความเร็วทั้งสองช่วงตามที่ได้เดินทางจริง

รหัสเทียมของการคำนวณระยะเวลาเดินทางที่ขึ้นกับเวลา

เริ่มต้น

หาช่วงเวลา k ที่ $b_i \in [\underline{t_k}, \overline{t_k}]$

$a_j := b_i + d_{ij} / u_{ijk}$

$d := d_{ij}$

$t := b_i$

หาก $a_j > \overline{t_k}$ ให้ทำ

{

$d := d - (\overline{t_k} - t) \cdot u_{ijk}$

$t := \overline{t_k}$

$k := k + 1$

$a_j := t + d / u_{ijk}$

}

นำข้อมูลออก $t_{ij}(b_i) = a_j - b_i$

สิ้นสุดการทำงาน

ดำเนินขั้นตอนโดยหาช่วงเวลาการเดินทางออกจากลูกค้า *i* ว่าอยู่ในช่วงใด $b_i \in [\underline{t_k}, \overline{t_k}]$ ต่อมาคำนวณหาเวลาเดินทางไปถึงลูกค้า *j* $a_j := b_i + d_j / u_{ijk}$ ตรวจสอบว่าช่วงเวลาที่ไปถึงลูกค้า *j* เลยช่วงเวลาที่เดินทางออกจากลูกค้า *i* (ช่วงเวลาเดิม) หรือไม่ $a_j > \overline{t_k}$ หากใช่ให้คำนวณค่าระยะเวลาที่ไปถึงลูกค้า *j* ใหม่ โดยคำนวณหาระยะทางที่เหลือหลังเดินทางด้วยความเร็วในช่วงเวลาเดิม $d := d - (\overline{t_k} - t) \cdot u_{ijk}$ จากนั้นเปลี่ยนช่วงเวลาเป็นช่วงเวลาถัดไป $k := k + 1$ และคำนวณระยะเวลาการเดินทางไปถึงลูกค้า *j* ใหม่ จากระยะทางที่เหลือและความเร็วในช่วงเวลาใหม่ $a_j := t + d / u_{ijk}$ จากนั้นคำนวณค่าระยะเวลาการเดินทางจากลูกค้า *i* ไปลูกค้า *j* $t_{ij}(b_i) = a_j - b_i$ หากไม่เลยช่วงเวลาเดิมค่าที่คำนวณได้เป็นคำตอบ สุดท้ายจะได้ค่าระยะเวลาเดินทางจากลูกค้า *i* ไปลูกค้า *j*

2.1.11 ขั้นตอนวิธีปรับปรุงเวลาการเริ่มให้บริการ

ขั้นตอนวิธีปรับปรุงเวลาการเริ่มให้บริการเป็นขั้นตอนการปรับปรุงเวลาให้บริการโดยมีการปรับปรุงใน 2 รูปแบบ คือ แบบถอยหลัง และ แบบเดินหน้า มีหลักการของการปรับปรุง คือ สำหรับการปรับปรุงแบบถอยหลังจะกำหนดเวลาเริ่มต้นให้บริการใหม่โดยให้เริ่มต้นให้บริการช้าที่สุดที่เป็นไปได้ สำหรับการปรับปรุงแบบถอยหลังจะกำหนดเวลาเริ่มต้นให้บริการใหม่โดยให้เริ่มต้นให้บริการเร็วที่สุดที่เป็นไปได้โดยไม่เสียค่าปรับ

รหัสเทียมของขั้นตอนวิธีปรับปรุงเวลาการเริ่มให้บริการ

1. การปรับปรุงเวลาเริ่มให้บริการแบบถอยหลัง

เริ่มต้น H_{yb}

สำหรับ m = 1,...,|*TR*|

ถ้า ทัวร์ *m* ที่ได้จาก H_i ส่งสินค้าถึงลูกค้าเร็วกว่ากรอบเวลาให้ทำ

{

$\overline{y}_{n+1}^{t(m),m} = l_{n+1}^{\#}$

สำหรับ k=*t*(*m*),...,1

สำหรับ j = n+1,...,1

ถ้า $y_j^{km} < l_j$ และ $y_j^{km} < \overline{y}_j^{km}$

{

$y_j^{km} := \min\{l_j, \overline{y}_j^{km}\}$

$i := j - 1$

$d := d_{ij}$

$t := y_j^{km}$

หาก $b_i < \underline{t_k}$ ให้ทำ

{

$d := d - (t - \underline{t_k}) \cdot u_k$

$t := \underline{t_k}$

$k := k - 1$

$b_i := t - d / u_k$

}

$\overline{y}_i^{km} := \min\{b_i - s_i, l_i^{\#}\}$

}

ถ้า k>1 แล้ว

{

$\overline{y}_{n+1}^{k-1,m} = \overline{y}_0^{k,m}$

}

}

ผลลัพธ์ $y_j^{km}, \overline{y}_i^{km}$

สิ้นสุดการทำงาน

ดำเนินขั้นตอนโดยเลือกทัวร์ที่ได้จากขั้นตอนการสร้างทัวร์มา 1 ทัวร์ m หากทัวร์เรียกขึ้นมามีการส่งสินค้าถึงลูกค้าเร็วกว่ากรอบเวลา ให้ดำเนินการต่อ โดยกำหนดเวลาสิ้นสุดของทัวร์เป็นเวลาช้าที่สุดในกรอบเวลาที่ไม่เคร่งครัดของคลังสินค้า $\overline{y}_{n+1}^{t(m),m} = l_{n+1}^{\#}$ จากนั้นกำหนดให้ทำในทุกเส้นทาง k ของทัวร์ m โดยไล่จากลูกค้ารายสุดท้ายไปยังลูกค้ารายแรกดังนี้ ตรวจสอบว่าระยะเวลาเริ่มให้บริการลูกค้า j ที่คำนวณได้จากขั้นตอนการสร้างทัวร์มีค่าน้อยกว่ากรอบเวลาของลูกค้า j และน้อยกว่าเวลาเริ่มให้บริการของลูกค้ารายสุดท้ายหรือไม่ $y_j^{km} < l_j$ และ $y_j^{km} < \overline{y}_j^{km}$ หากใช่แสดงว่าเวลาเริ่มต้นให้บริการลูกค้า j ที่คำนวณได้ในขั้นตอนการสร้างทัวร์เร็วกว่าเวลาให้บริการที่ช้าที่สุดของลูกค้า j ให้เลื่อนเวลาเริ่มให้บริการลูกค้า j เป็นเวลาเริ่มให้บริการที่ช้าที่สุด $y_j^{km} := \min\{l_j, \overline{y}_j^{km}\}$ และคำนวณหาเวลาเริ่มให้บริการลูกค้ารายก่อนหน้า โดยหาช่วงเวลาที่เริ่มให้บริการลูกค้า j $y_j^{km} \in [\underline{t_k}, \overline{t_k}]$ กำหนดให้ลูกค้า i คือลูกค้าที่ให้บริการรายก่อนหน้า ลูกค้า j $i := j-1$ จะสามารถคำนวณเวลาเดินทางออกจากลูกค้า i เป็น $b_i := y_j^{km} - d_{ij} / u_k$ หากช่วงเวลาไปถึงลูกค้า i อยู่คนละช่วงเวลากับเวลาเริ่มให้บริการของลูกค้า j ให้คำนวณหาเวลาออกจากลูกค้า i ใหม่โดยคิดระยะเวลาตามช่วงความเร็ว (คล้ายการคำนวณระยะเวลาเดินทางที่ขึ้นกับเวลา) จากนั้นเลือกค่าให้บริการลูกค้ารายก่อนหน้าเป็นค่าน้อยกว่าของเวลาออกเดินทางลบกับเวลาให้บริการและกรอบเวลาที่ช้าที่สุดของลูกค้า i จากนั้นกระทำซ้ำในทุกทัวร์

2. การปรับปรุงเวลาเริ่มให้บริการแบบเดินหน้า

เริ่มต้น H_{yf}

สำหรับ m = 1,...,$|TR|$

ถ้า ทัวร์ m ที่ได้จาก H_i ส่งสินค้าถึงลูกค้าช้ากว่ากรอบเวลา ให้ทำ

{

$\underline{y}_0^{1,m} = e_0^{\#}$

สำหรับ k=1,...,$t(m)$

สำหรับ i = 0,..., n

ถ้า $y_i^{km} > e_i$ และ $y_i^{km} > \underline{y}_i^{km}$ แล้ว

{

$y_i^{km} := \max\{e_i, \underline{y}_i^{km}\}$

$dep_time = y_i^{km} + s_i$

หาช่วงเวลา k ที่ $dep_time \in [\underline{t_k}, \overline{t_k}]$.

$j := i+1$

$a_j := dep_time + d_{ij} / u_k$

$d := d_{ij}$

$t := dep_time$

หาก $a_j > \overline{t_k}$ ให้ทำ

{

$d := d - (\overline{t_k} - t) \cdot u_k$

$t := \overline{t_k}$

$a_j := t + d / u_{k+1}$

$k := k+1$

}

$\underline{y}_j^{km} := \max\{a_j, e_j^{\#}\}$

}

ถ้า k<t(m) แล้ว

{

$\underline{y}_0^{k+1,m} = \underline{y}_{n+1}^{km}$

}

}

ผลลัพธ์ $y_i^{km}, \underline{y}_j^{km}$

สิ้นสุดการทำงาน

ขั้นตอนการปรับปรุงเวลาให้บริการแบบเดินหน้าคล้ายขั้นตอนแบบถอยหลัง แตกต่างกันตรงที่ขั้นตอนแบบเดินหน้าจะกำหนดเวลาเริ่มต้นให้บริการใหม่โดยให้เริ่มต้นให้บริการเร็วที่สุดที่เป็นไปได้

2.2 ฮิวริสติกแบบละโมบ

ฮิวริสติกแบบละโมบเป็นขั้นตอนการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยวของรูปแบบแก้ไขปัญหา ST-GH โดยวิธีการจะพยายามนำเส้นทางเดินรถทางเดียวมาเชื่อมต่อกัน

จากการหาระยะเวลารอคอยของเส้นทางสองเส้นทาง

รหัสเทียมของฮิวริสติกแบบละโมบ

เริ่มต้น
ตั้งค่า Hooked = 0
WaitTime* = $+\infty$
สำหรับ $(m_i = 1,...,|TR|)$
สำหรับ $(m_j = 1,...,|TR|)$
ถ้า $(m_i \neq m_j)$ แล้ว
{
WaitTime = $pt_0^{t(m_j)} - pt_{n+1}^{t(m_i)}$
ถ้า (WaitTime > 0 และ WaitTime < WaitTime*) แล้ว
{
WaitTime* =WaitTime
Hooked = 1
$m_{i*} = m_i$
$m_{j*} = m_j$
}
}
ถ้า Hooked = 1 แล้ว
ปรับปรุงทัวร์ TR โดยการเชื่อม m_{j*} ไปที่ท้ายเส้นทางของ m_{i*}
สิ้นสุดการทำงาน

กำหนดค่าเริ่มต้นว่าเส้นทาง 2 เส้นทาง (m_i และ m_j) ไม่ได้สามารถเชื่อมต่อกันเป็นการเดินรถหลายเที่ยวได้ Hooked = 0 ตั้งค่าระยะเวลารอคอยจากเส้นทางแรกไปเส้นทางที่ 2 มีค่าอนันต์ WaitTime* = $+\infty$ ตรวจสอบว่าทั้งสองไม่ใช้เส้นทางเดียวกัน $(m_i \neq m_j)$ จากนั้นคำนวณระยะเวลารอคอย WaitTime = $pt_0^{t(m_j)} - pt_{n+1}^{t(m_i)}$ ต่อมาตรวจสอบว่ามีระยะเวลารอคอยหรือไม่ WaitTime > 0 และตรวจสอบว่าระยะเวลารอคอยน้อยกว่าระยะเวลารอคอยในปัจจุบันหรือไม่ WaitTime < WaitTime* หากเป็นจริงแสดงว่าสองเส้นทางนี้สามารถเชื่อมต่อกันได้ ให้ตั้งค่า Hooked = 1 เก็บค่าเส้นทาง $m_{i*} = m_i$ และ $m_{j*} = m_j$ ไว้กระทำซ้ำโดยเปลี่ยนเส้นทางที่สอง m_j จนครบทุกเส้นทาง จากนั้นกระทำซ้ำโดยเปลี่ยน m_i จนครบทุกเส้นทาง สุดท้ายกรณี Hooked = 1 ให้ทำการปรับปรุงทัวร์ โดยนำทัวร์ m_{j*} มาต่อท้ายทัวร์ m_{i*}

2.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการแก้ไขปัญหา

การเปรียบเทียบผลลัพธ์เพื่อให้ทราบถึงวิธีการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสม จะทำการเปรียบเทียบเป็นร้อยละความแตกต่างของวิธีการที่สนใจ 2 วิธี และพิจารณาตามลำดับความสำคัญจากค่าวัตถุประสงค์ คือ จำนวนรถส่งสินค้า (Z_1) จำนวนครั้งการส่งสินค้าช้ากว่าและเร็วกว่ากรอบเวลาของลูกค้า (Z_2 และ Z_3) และค่าใช้จ่ายของทัวร์ที่น้อยที่สุด (Z_4) ตามลำดับ โดยร้อยละความแตกต่างสามารถคำนวณได้ดังนี้

ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยระหว่าง :

ST และ MT $= \frac{-(z_{1\,ST} - z_{1\,MT})}{z_{1\,ST}} \times 100\%$

ST และ ST-GH $= \frac{-(z_{1\,ST} - z_{1\,ST\text{-}GH})}{z_{1\,ST}} \times 100\%$

ST-GH และ MT $= \frac{-(z_{1\,ST\text{-}GH} - z_{1\,MT})}{z_{1\,ST\text{-}GH}} \times 100\%$

3. ปัญหาทดสอบ

ผู้วิจัยเลือกใช้กลุ่มลูกค้าของปัญหาทดสอบ Solomon [2] ซึ่งได้แบ่งกลุ่มของปัญหาตามลักษณะการกระจายตัวของลูกค้า 3 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับลักษณะความเร็วต่อช่วงเวลาในการเดินรถเลือกใช้ตามงานวิจัยของ Figliozzi [8] โดยมีสภาพการจราจร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะของปัญหาทดสอบพื้นฐาน Solomon

ลักษณะการกระจายตัว	ชุดข้อมูล	จำนวนปัญหาการทดสอบ
1. กระจายตัวแบบกลุ่ม	C101 - C109 C201 - C208	17 ปัญหา
2. กระจายแบบสุ่ม	R101 - R112 R201 - R211	23 ปัญหา
3. กระจายตัวแบบกลุ่มผสมแบบสุ่ม	RC101 - RC108 RC201 - RC208	16 ปัญหา

ตารางที่ 2 สภาพการจราจรในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงเวลา	สภาพการจราจร
ช่วงเวลาที่ 1 ช่วงเช้าตรู่	การจราจรไม่หนาแน่น
ช่วงเวลาที่ 2 ช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเช้า	การจราจรหนาแน่น
ช่วงเวลาที่ 3 ช่วงกลางวัน	การจราจรค่อนข้างไม่หนาแน่น
ช่วงเวลาที่ 4 ช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเย็น	การจราจรหนาแน่น
ช่วงเวลาที่ 5 ช่วงค่ำ	การจราจรไม่หนาแน่น

4. ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

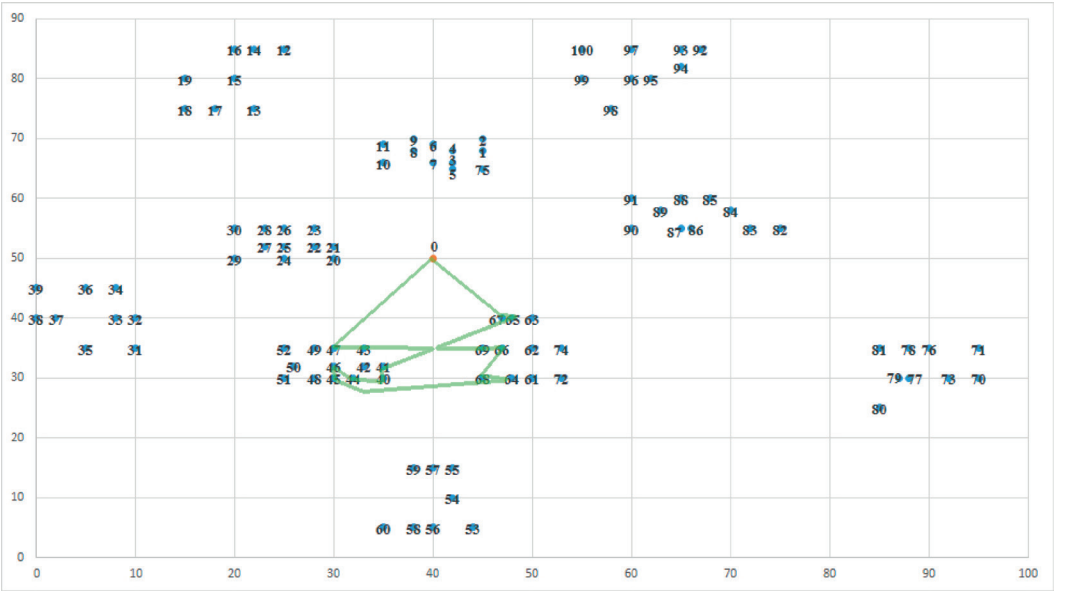
ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ คือ เส้นทางการจัดส่งสินค้าที่ให้ค่าวัตถุประสงค์ที่เรียงลำดับตามความสำคัญ ได้แก่ จำนวนรถส่งสินค้า จำนวนครั้งที่ส่งสินค้าช้าและเร็วกว่ากรอบเวลาของลูกค้า และค่าใช้จ่ายของเส้นทางที่น้อยที่สุด โดยเส้นทางผลลัพธ์จะระบุถึงเวลาเริ่มให้บริการของลูกค้าแต่ละรายเพื่อให้ผู้ส่งสินค้าทราบถึงเวลาที่ต้องเริ่มให้บริการ ด้วย 3 วิธีการแก้ไข ได้แก่ การจัดเส้นทางการเดินรถเที่ยวเดียว (ST) การจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยวรูปแบบ ST-GH และ MT

4.1 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

ผู้วิจัยเลือกตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ คือ ทัวร์ที่ 1 ของการแก้ไขปัญหา C102_2a ในรูปแบบ MT มานำเสนอเพื่อให้เห็นภาพ โดยแสดงทัวร์อยู่ในรูปที่ 7 และแสดงข้อมูลในตารางที่ 3

4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม

ผลการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมการเดินรถเที่ยวหลายเที่ยว ST-GH และ MT กับ โปรแกรมการเดินรถเที่ยวเดียว ST และผลการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมการเดินรถเที่ยวหลายเที่ยว ST-GH กับ MT โดยเปรียบเทียบจากคำนวณหาร้อยละความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ แสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ทัวร์ที่ 1 ของการแก้ไขปัญหา C102_2a ในรูปแบบ MT

ตารางที่ 3 ข้อมูลการเดินทางของทัวร์ที่ 1

หมายเลขลูกค้าเรียงตามลำดับการส่งสินค้า	กรอบเวลาการรับส่งสินค้าของลูกค้า				y_i^{km} (เวลาเริ่มให้บริการ)
	E_i	L_i	$E_i^{\#}$	$L_i^{\#}$	
0	0	1236	0	1236	0
67	12	77	5	84	12.207
65	76	129	71	134	103.207
41	166	235	159	242	208.471
40	264	321	258	327	299.471
44	359	412	354	417	390.971
46	448	509	442	515	482.385
45	541	600	535	606	573.718
64	632	693	626	699	675.718
68	734	777	730	781	767.218
66	826	875	821	880	859.911
69	916	969	911	974	950.911
47	1054	1127	1047	1134	1055.910
101	0	1236	0	1236	1163.940

ตารางที่ 4 ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยของแต่ละปัญหาการทดสอบ C1 C2 R1 R2 RC1 และ RC2 ระหว่างผลลัพธ์ของ ST กับ ST-GH และ ผลลัพธ์ของ ST กับ MT

ปัญหาการทดสอบ	ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลลัพธ์ของ ST กับ ST-GH					ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลลัพธ์ของ ST กับ MT				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	CPU Time	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	CPU Time
C1	0	0	0	0	0	2.22	-20.11	4.63	0.16	-10.22
C2	0	0	0	0	0	0	8.33	-20.83	0.17	-6.39
R1	0	0	0	0	0	-0.06	-15.05	-23.79	0.07	-3.78
R2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.39
RC1	1.59	0	0	-0.07	0	0.92	-16.74	-56.82	-0.95	-12.07
RC2	0	0	0	0	0	0	-4.17	0	-0.19	-1.82

ตารางที่ 5 ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยของแต่ละปัญหาการทดสอบ C1 C2 R1 R2 RC1 และ RC2 ระหว่างผลลัพธ์ของโปรแกรมการเดินรถเที่ยวหลายเที่ยวรูปแบบ ST-GH และ MT

ปัญหาการทดสอบ	ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลลัพธ์ของ ST กับ ST-GH				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	CPU Time
C1	2.22	-20.11	4.63	0.16	-10.22
C2	0.00	8.33	-20.83	0.17	-6.39
R1	-0.06	-15.05	-23.79	0.07	-3.78
R2	-4.55	0.00	0.00	0.13	-1.39
RC1	-0.83	-16.74	-56.82	-0.88	-12.07
RC2	0.00	-4.17	0.00	-0.19	-1.82

5. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการสร้างวิธีฮิวริสติกการสร้างที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถหลายเที่ยวที่ขึ้นกับเวลาภายใต้ข้อจำกัดกรอบเวลาในการรับส่งสินค้าแบบไม่เคร่งครัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาการจัดเส้นทางที่มีจำนวนรถส่งสินค้า จำนวนครั้งที่ส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลาของลูกค้า จำนวนครั้งที่ส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลาของลูกค้า และค่าใช้จ่ายของเส้นทางที่น้อยที่สุด ผู้วิจัยเลือกพัฒนาขั้นตอนวิธีการทำซ้ำ (iterative route construction) ที่นำเสนอโดย Figliozzi [8] และ ฮิวริสติกละโมบ (greedy heuristic) ที่นำเสนอโดย Karoonsoontawong [10] เป็นวิธีฮิวริสติกการสร้าง (Construction Algorithm) ซึ่งพัฒนาขั้นตอนวิธีการแก้ไขใน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบการเดินรถเที่ยวเดียวกับฮิวริสติกแบบละโมบ (ST-GH) และรูปแบบ

การเดินรถหลายเที่ยว (MT) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา C++ โดย Code Block ทดสอบด้วยปัญหาทดสอบมาตรฐาน Solomon ด้วยวิธีการแก้ไขทั้งสองวิธีเพื่อเปรียบเทียบหาวิธีการจัดเส้นทางการเดินรถส่งสินค้าที่เหมาะสม บนเครื่องคอมพิวเตอร์คอมพิวเตอร์ Window 8.1 CPU i7-3612QM RAM 8 GB

ปัญหา Solomon มีการกระจายตัวของลูกค้า 3 รูปแบบ คือ การกระจายตัวแบบกลุ่ม การกระจายตัวแบบสุ่ม และการกระจายตัวแบบกลุ่มผสมแบบสุ่ม โดยมีปัญหาทดสอบรวมทุกรูปแบบการกระจายตัว 56 ปัญหา ทดสอบด้วยความเร็ว 3 รูปแบบ รวมทดสอบทั้งสิ้น 168 ปัญหา ในการวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบ ผู้วิจัยให้ลำดับความสำคัญของวัตถุประสงค์จำนวนรถส่งสินค้า (Z_1) เป็นอันดับแรก จากนั้นจะพิจารณาความสำคัญของจำนวนครั้งที่ส่งสินค้าช้ากว่ากรอบเวลาของลูกค้า (Z_2) จำนวนครั้งที่ส่งสินค้าเร็วกว่ากรอบเวลาของลูกค้า (Z_3) และค่าใช้จ่ายของเส้นทางที่น้อยที่สุด (Z_4) ตามลำดับ

จากผลลัพธ์ ตารางที่ 4 ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ ST กับ ST-GH พบว่า ในการกระจายตัวของลูกค้า RC1 วิธีการ ST-GH ให้ค่า Z_1 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 1.59 ส่วนการกระจายตัวลูกค้าแบบอื่นให้ผลลัพธ์เท่ากัน และจากการเปรียบเทียบวิธีการ ST กับ ST-GH พบว่าวิธีการ ST-GH ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ดังนี้ การกระจายตัวของลูกค้าแบบ C1 ให้ค่า Z_1 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 2.22 และ C2 ให้ค่า Z_2 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 8.33 และ RC1 ให้ค่า Z_1 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 0.92 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธี ST-GH และ MT ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธี ST

จากผลลัพธ์ตารางที่ 5 ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ MT กับ ST-GH พบว่าหากลูกค้ามีการกระจายตัวแบบกลุ่ม C1 และ C2 วิธีการ MT จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยให้ค่า Z_1 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 2.22 และ Z_2 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 8.33 ตามลำดับ สำหรับการกระจายตัวแบบอื่น R1 R2 RC1 ให้ค่า Z_1 เฉลี่ยที่ดีกว่า 0.06 4.55 และ 0.83 ตามลำดับ ส่วน RC2 ให้ค่า Z_2 เฉลี่ยที่ดีกว่าร้อยละ 4.17 จึงสรุปได้ว่าวิธีการ MT ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในลูกค้ามีการกระจายตัวแบบกลุ่ม ส่วนวิธีการ ST-GH ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในลูกค้ามีการกระจายตัวแบบสุ่ม และแบบกลุ่มผสมแบบสุ่ม

6. ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาการจัดเส้นทางการเดินรถเพื่อให้มีความเสมือนจริงของสถานการณ์มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้สามารถต่อยอดโดยเพิ่มเงื่อนไข เช่น ยานพาหนะหลายขนาดและหลายประเภท การมีข้อจำกัดด้านเวลาในการทำงานของคนขับรถส่งสินค้าเป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจธ. (CE-KMUTT-FTERO 6101)

8. เอกสารอ้างอิง

1. Office of the National Economics and Social Development Board, Thailand's Logistics Report 2015 [Online], Available : http://www.mot.go.th/statmot.html?id=3 [3 March 2016].

2. Solomon, M.M., 1987, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints," *European Journal of Operational Research*, 35, pp. 254-265.

3. Koskosidis, Y.A., Powell, W.B. and Solomon, M.M., 1992, "An Optimization-based Heuristic for Vehicle Routing and Scheduling with Soft Time Windows Constraints," *Transportation Science*, 26, pp. 69–85.

4. Figliozzi, M.A., 2010, "The Impacts of Congestion on Commercial Vehicle Tour Characteristics and Costs," *Logistics and Transportation Review*, 46, pp. 496-506.

5. Ichoua, S., Gendereau, M. and Potvi, J.Y., 2003, "Vehicle Dispatching with Time-dependent Travel Times," *European Journal of Operational Research*, 144, pp. 379-396.

6. Malandraki, C. and Daskin, M.S., 1992, "Time Dependent Vehicle Routing Problem : Formulation, Properties and Heuristic Algorithms," *Transportation Science*, 26, pp. 185-200.

7. Haghani, A. and Jung, S., 2005, "A Dynamic Vehicle Routing Problem with Time-dependent Travel Times," *Computers and Operations Research*, 32, pp. 2959-2986.

8. Figliozzi, M.A., 2012, "The Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows : Benchmark Problems, an Efficient Solution Algorithm, and Solution Characteristics," *Logistics and Transportation Review*, 48, pp. 616-636.

9. Brandao, J. and Mercer, A., 1996, "A Tabu Search Algorithm for the Multi-trip Vehicle Routing and Scheduling Problem," *European Journal of Operational Research*, 100, pp. 180-191.

10. Karoonsoontawong, A., 2015, "Efficient Insertion Heuristics for Multitrip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Shift Time Limits," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1, pp. 27-39.