



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การประยุกต์วิธีเซฟวิ่งร่วมกับระบบมดแม็ก-มินในการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าภายใต้กรอบเวลาและความเร็วในการขนส่งที่จำกัด

Applications of a saving method with max-min ant system to a vehicle routing problem with time windows and speed limits

สุพรรณ สูดsoon^{*1)} สรายุทธ กรวิรัตน์¹⁾ และ นคร สูดsoon²⁾

Suphan Sodsoon,^{*1)} Sarayut Kornvirat¹⁾ and Nakhon Sodsoon²⁾

¹⁾โปรแกรมวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์

อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

Department of Logistics Engineering, Faculty of Agri-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Kalasin Thailand, 46000.

²⁾คณะเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

Faculty of Social Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Kalasin Thailand ,46000.

Received September 2013

Accepted March 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้กรอบเวลาและความเร็วในการขนส่งที่จำกัด ซึ่งเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน และเป็นปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้เงื่อนไขเวลาที่จำกัด ซึ่งจัดเป็นปัญหาพิเศษของปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งมาตรฐาน โดยเกี่ยวข้องกับการจัดกลุ่มพาหนะขนส่งเพื่อเดินทางออกจากคลังสินค้ากลางไปส่งสินค้าแก่ลูกค้า โดยมีตั้งอยู่กระจัดกระจายในที่ต่างๆ ที่ลูกค้าแต่ละรายมีปริมาณความต้องการสินค้าที่แตกต่างกัน และรวมถึงการมีความเร็วพาหนะขนส่งเข้ามาเกี่ยวข้องในการส่ง-รับสินค้าในแต่ละเส้นทางหากพาหนะขนส่งมีการละเมิดเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งพาหนะขนส่งจะต้องเดินทางกลับมายังคลังสินค้ากลางทันทีซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น ผู้วิจัยประยุกต์วิธีเซฟวิ่งร่วมกับระบบมดแม็ก-มิน (Saving-Max Min Ant System; Saving-MMAS) สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งเพื่อหาระยะทางขนส่งที่เหมาะสมที่สุดภายใต้กรอบเวลาที่จำกัดและความเร็วในการขนส่งที่เหมาะสม ซึ่งวิธีที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง กรอบเวลาที่จำกัด ความเร็วที่จำกัด วิธีเซฟวิ่ง ระบบมดแม็ก-มิน

Abstract

This study aims to solve a Vehicle Routing Problem with Time Windows and Speed Limits (VRPTWSL), which has received considerable attention in recent years. The vehicle routing problem with time windows is an extension of the well-known Vehicle Routing Problem (VRP) and involves a fleet of vehicles set of from a depot to serve a number of customers at different geographic locations with various demands within specific time and speed limits before returning to the depot eventually. To solve the problem, an efficient Saving

* Corresponding author.Tel.: -

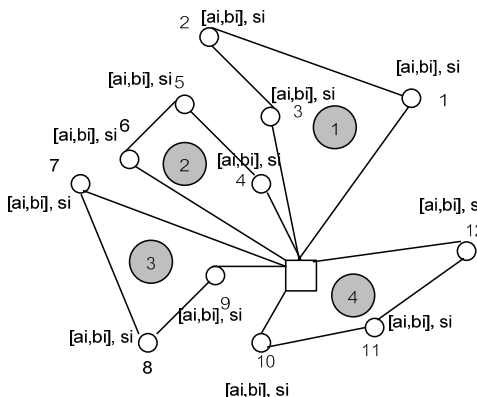
Email address: suphan_sodsoon@hotmail.com

Method-Max Min Ant System (Saving-MMAS) with Local Search algorithm is applied. Using minimization of the total transportation costs as the objective of the extension VRPTWSL, a mathematic model is constructed. Finally, the Saving-MMAS algorithms indicated the good quality of the method in this problem.

Keywords : Vehicle routing problem, Time windows, Speed limits, Saving method max-min ant system

1. บทนำ

การจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัด (Vehicle Routing Problem with Time Windows; VRPTW) เป็นอีกรูปแบบของการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งโดยมีการเพิ่มเงื่อนไขกรอบเวลาความต้องการสินค้าของลูกค้าเข้าไปในตัวปัญหา ซึ่งปัญหา VRP เป็นปัญหาที่สำคัญในกลุ่มการวิจัยดำเนินงาน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการหาต้นทุนโดยรวมที่เหมาะสมที่สุดจากการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งเพื่อออกไปส่งหรือรับสินค้า และ/หรือรวมถึงการจัดหน่วยบริการพาหนะขนส่งเคลื่อนที่เพื่อออกไปให้บริการแก่ลูกค้าตามสถานที่ต่างๆ เป็นต้น โดยกำหนดให้มีคลังสินค้ากลางเป็นจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นทาง ในแต่ละเส้นทางนั้นพาหนะขนส่งต้องบรรทุกสินค้าได้ไม่เกินข้อจำกัด ปัญหาดังกล่าวจัดเป็นปัญหาเชิงการจัดหมวดหมู่ และมีปรากฏของการดำเนินงานในองค์กรธุรกิจอยู่จริง โดยเฉพาะดำเนินงานภายใต้กรอบเวลาที่จำกัด ส่วนในการบริหารจัดการงานด้านการขนส่งโลจิสติกส์นั้น นับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญและมีนัยสำคัญในด้านเศรษฐศาสตร์บริหารงานในองค์กรด้วย โดยลักษณะข่ายงานปัญหา VRPTW ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข่ายงานคลังสินค้า 1 แห่ง ลูกค้า 12 ราย

ดังนั้น จึงมีนักวิจัยเป็นจำนวนมากที่ให้ความสนใจเป็นอย่างมากต่อการแก้ปัญหาทางด้านการขนส่งโลจิสติกส์ ซึ่งนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและมีการพัฒนา

เทคนิค-วิธีการแก้ปัญหาต่างๆ อย่างต่อเนื่อง จนถึงในปัจจุบัน [1], [3], [4], [5] ในข่ายงานปัญหา VRPTW จากรูปที่ 1 ประกอบด้วย เซตพาหนะขนส่งที่มีข้อจำกัดในการบรรทุกสินค้าสูงสุด โดยแต่ละเส้นทางพาหนะขนส่งมีจุดเริ่มต้น-สิ้นสุดที่คลังสินค้ากลาง ซึ่งเป็นต้นทางและปลายทางของการจัดพาหนะขนส่งเพื่อออกไปส่ง-รับสินค้าหรือให้บริการแก่ลูกค้าที่มีที่ตั้งอยู่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ในการให้บริการแก่ลูกค้าในแต่ละรายย่อมมีกรอบเวลาที่จำกัด กล่าวคือ กรอบเวลาที่สามารถเริ่มต้นรับสินค้าเร็วสุด และกรอบเวลาในการรับสินค้าช้าสุด ซึ่งรวมถึงเวลาหยุดพาหนะขนส่งให้บริการในการลำเลียงสินค้าขึ้นหรือลงจากพาหนะขนส่งด้วย เช่น ลูกค้ารายที่ 1 มีกรอบเวลารับสินค้าที่เวลา 9:00-10:30 น. และมีเวลาหยุดให้บริการ 30 นาที เป็นต้น ซึ่งในแต่ละเส้นทางการขนส่งนั้นต้องไม่ละเมิดเงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งสินค้าภายใต้กรอบเวลาและความเร็วในการขนส่งที่จำกัด (Vehicle Routing Problem with Time Windows and Speed Limits; VRPTWSL) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีส่วนขยายเพิ่มเติมจากปัญหา VRPTW ทั่วไป โดยนอกเหนือจากการควบคุมเส้นทางขนส่งที่มีกรอบเวลาที่จำกัดแล้วยังมีเรื่องของความเร็วของพาหนะขนส่งที่เกี่ยวข้องด้วย จากนั้นได้ทำการประยุกต์วิธีเซฟวิงร่วมกับวิธีระบบมดแม็ก-มิน (Saving-MMAS) ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยรายละเอียดเนื้อหาบทความวิจัยมีดังนี้ หัวข้อที่ 2 สถานะปัญหา VRPTWSL หัวข้อที่ 3 การประยุกต์วิธีแก้ปัญหาคิวข้อที่ 4 การทดลองและสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

2. สถานะปัญหา VRPTWSL

ปัญหา VRPTWSL อธิบายพอสังเขปดังนี้ เป็นปัญหาเชิงการจัดหมวดหมู่ (Combinatorial problem) ของ 2 เซตย่อย คือ เซตพาหนะขนส่งและเซตลูกค้าที่โหนดในข่ายงานจำนวน N โหนด แทนด้วยเซต V เมื่อ $v = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ ซึ่งใช้พาหนะขนส่งที่มีขนาดและชนิด

เหมือนกันทุกประการ (Identical vehicles) มีจำนวน K คัน เพื่อออกไปให้บริการแก่ลูกค้าในสถานที่ต่างๆ ตามเซตลูกค้า คือ C เมื่อ $C = \{1, 2, \dots, N\}$ กำหนดให้ c_0 เป็นคลังสินค้ากลาง ตัวแปรตัดสินใจ x_{ijk} เมื่อ $i, j = 0, 1, 2, \dots, N; i \neq j$ และ $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$ ถ้าให้ $x_{ijk} = 1$ หมายถึง ให้พาหนะขนส่งคันที่ k ทำการขนส่งสินค้าจากลูกค้า i ไปยังลูกค้า j อื่นๆ ให้ $x_{ijk} = 0$ ส่วน t_i เป็นเวลาเริ่มต้นของพาหนะขนส่งแต่ละคันในการให้บริการแก่ลูกค้ารายที่ i โดยที่ $c_{ij} \leq c_{in} + c_{nj}$ และ $t_{ij} \leq t_{in} + t_{nj} \quad \forall h, i, j \in N$ เหล่านี้เป็นต้น

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) แสดงดังต่อไปนี้

2.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Parameters)

- K จำนวนพาหนะขนส่งทั้งหมด
- N จำนวนลูกค้าทั้งหมด
- C_i โดยที่มีลูกค้า i ราย เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$
- c_0 ศูนย์กระจายสินค้า (Depot)
- c_{ij} ระยะทางในการขนส่งระหว่างลูกค้าที่ i และ j
- t_{ij} ระยะเวลาในการขนส่งระหว่างลูกค้าที่ i และ j
- m_i ความต้องการสินค้าในการขนส่งของลูกค้า i
- q_k ความสามารถในการบรรทุกของพาหนะขนส่ง k
- t_i เวลาที่พาหนะขนส่งมาถึงที่ลูกค้า i
- e_i เวลาที่พาหนะขนส่งมาถึงลูกค้าที่ j ได้เร็วที่สุด
- f_i ระยะเวลาในการลำเลียงสินค้าที่ลูกค้า i
- w_i ระยะเวลาที่รอคอยในการรับ-ส่งสินค้าที่ลูกค้า i
- r_k เวลาที่อนุญาตให้พาหนะขนส่ง k สูงสุด
- u_i เป็นโหนดกลางการเชื่อมเส้นทาง $i = 1, 2, \dots, N$

2.2 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variable)

$x_{ijk} = 1$ ถ้าให้พาหนะขนส่ง k ทำการขนส่งสินค้าจาก i ไปยัง j กรณีอื่นๆ $x_{ijk} = 0$

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

ก. สมการเป้าหมาย (Objective function)

$$\text{Min } Z = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^{K-1} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

ส่วนขยายเพิ่มเติมจากปัญหา VRPTW เมื่อ

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^K x_{ijk} (t_i + \frac{c_{ij}}{V} + s_i)$$

$$\text{กำหนดให้ } t_0 = 0; s_0 = 0$$

v คือ อัตราความเร็วพาหนะขนส่งที่ใช้ในการขนส่ง

s_i คือ เวลาที่พาหนะขนส่งหยุดให้บริการลูกค้าที่ i

ข. สมการข้อข้อยกเว้น (Subject To)

$$\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=1}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall i = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{k=0}^K \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ihk} - \sum_{j=0, j \neq h}^N x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in \{1, \dots, N\}; k \in \{0, K-1\} \quad (4)$$

$$u_i - u_j + N x_{ij} \leq N - 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^N m_i (\sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk}) \leq q_k \quad \forall k \in \{1, \dots, K-1\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} (t_{ij} + f_i + w_i) \leq r_k \quad \forall k \in \{1, \dots, K-1\} \quad (7)$$

$$t_0 = 0 \quad (8)$$

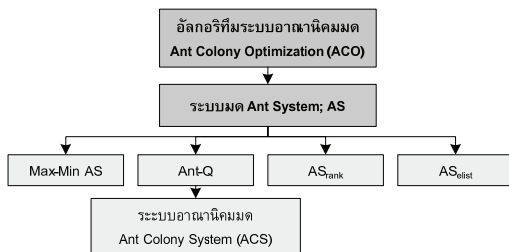
$$t_i + x_{ijk} (t_{ij} + f_i + w_i) \leq t_j \quad i, j \in \{1, N\}; i \neq j; k \in \{0, K-1\} \quad (9)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad k \in \{0, K-1\} \quad (10)$$

สมการเป้าหมายที่ (1) เป็นการหาระยะทางโดยรวมที่ใช้ที่สั้นที่สุดในการออกไปให้บริการแก่ลูกค้า สมการข้อข้อยกเว้นที่ (2)-(3) ประกันว่าลูกค้าแต่ละรายถูกกำหนดให้ใช้พาหนะขนส่งเพียงคันเดียว และเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น สมการข้อข้อยกเว้นที่ (4) ประกันว่าลูกค้าแต่ละรายมีเส้นทางเข้า-ออกของพาหนะขนส่งเพียง 1 เส้นทางเดียวเท่านั้น สมการข้อข้อยกเว้นที่ (5) ประกันว่าไม่มี Sub-tour เกิดขึ้นในคำตอบ สมการข้อข้อยกเว้นที่ (6) พาหนะขนส่งต้องบรรทุกสินค้าไม่เกินข้อกำหนด สมการข้อข้อยกเว้นที่ (7) ประกันว่าเวลาที่ใช้ของพาหนะขนส่งแต่ละคันต้องไม่เกินเวลานุญาต สมการข้อข้อยกเว้นที่ (8), (9) และ (10) ประกันว่าการขนส่งสินค้าของพาหนะขนส่งต้องไม่ขัดแย้งต่อเงื่อนไขทางด้านเวลา

3. การประยุกต์วิธีเซฟวิ่งร่วมกับระบบมดแม็ก-มิน (Saving-MMAS)

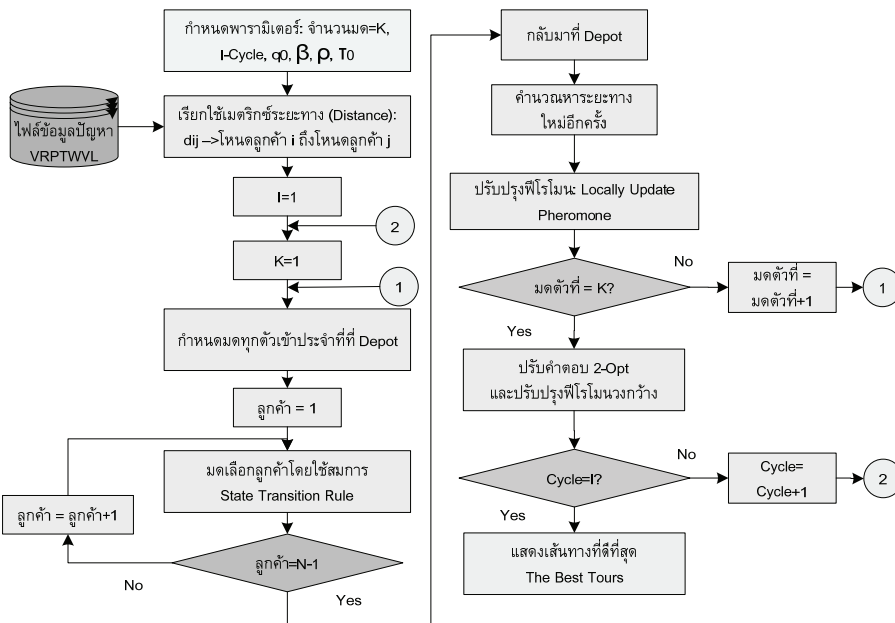
3.1 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีระบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization; ACO) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมเชิงการจัดหมวดหมู่เป็นวิธีที่เรียกชื่อโดยทั่วไปว่า “วิธีเมต้าฮีริสติกส์ (Meta-heuristics)” หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “วิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)” ซึ่งมีลักษณะที่เลียนแบบจากดำเนินชีวิตหรือพฤติกรรมทางสังคมของมดที่อาศัยอยู่ร่วมกัน โดยนักวิจัยเรียนรู้หลักการดังกล่าวและนำมาพัฒนาเป็นเทคนิคการแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรมจนมีเกิดเป็นกลุ่มอัลกอริทึมมด ดังแสดงในรูปที่ 2 [2]



รูปที่ 2 อัลกอริทึมกลุ่ม ACO

ที่มา: Dorigo and Stützle, 2004

รูปที่ 2 เป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในตระกูลวิธีของมดทั้งหมดที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหา โดยเริ่มต้นพัฒนา



รูปที่ 3 ขั้นตอน Saving-MMAS เพื่อแก้ปัญหา VRPTWSL

มาจากวิธีระบบมด (Ant System; AS) และวิวัฒนาการมาเป็นลำดับ เช่น Max-Min Ant (MMAS) Ant-Q, AS_{rank} และ AS_{elist} ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละวิธีการของมดก็มักมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป แต่ที่สำคัญหลักหรือวิธีการจะคล้ายคลึงกันทั้งหมด เช่น กำหนดจำนวนมดที่ใช้งานก่อนเป็นอันดับแรก และให้มดแต่ละตัวทำการสุ่มเลือกโหนดที่เป็นจุดเริ่มต้นเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นออกเดินทาง จากนั้นทำการย้ายตำแหน่งหรือเดินทางไปยังโหนดอื่นๆ โดยใช้กฎการเปลี่ยนสถานะ (Transition rule) ในระหว่างการเดินทางมดจะวางสารฟีโรโมน (Pheromone) ลงบนเส้นทางนั้นๆ และมีการเปลี่ยนแปลงสารฟีโรโมนบนด้านเชื่อมเป็นลำดับ เรียกว่า “การปรับปรุงฟีโรโมนเฉพาะที่ (Local updating)” หลังจากนั้นเมื่อมดสร้างเส้นเชื่อมสมบูรณ์ (เส้นทางวงปิด (Closed tour)) ให้นำเส้นทางเชื่อมที่สั้นที่สุดมาปรับปรุงฟีโรโมนอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “การปรับปรุงฟีโรโมนวงกว้าง (Global updating)” การค้นหาคำตอบใช้วงรอบกระทำซ้ำ (Iterations) เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดและทำไปจนกระทั่งครบเงื่อนไขการหยุดและคืนค่าตอบที่ดีที่สุดออกมาเป็นตัวแทนประชากรคำตอบทั้งหมดที่หาได้

3.2 วิธี Saving-MMAS ในการปัญหา VRPTWSL ผู้วิจัยได้ออกแบบขั้นตอนวิธี Saving-MMAS ในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหา VRPTWSL ดังแสดงในรูปที่ 3

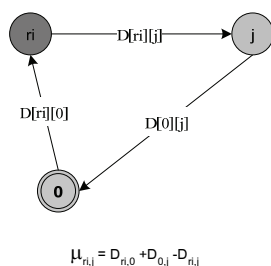
จากรูปที่ 3 ขั้นตอนแก้ปัญหาอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้
ขั้นตอนที่ 1: กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น α , β , ρ และ NC เมื่อ α คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญของฟีโรโมน β คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญของระยะทาง ρ คือ อัตราการระเหยฟีโรโมนและ NC คือ จำนวนรอบกระทำซ้ำสูงสุด

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดรอบกระทำซ้ำ $NC=0$, และกำหนดให้มด K ประจำที่คลังสินค้า

ขั้นตอนที่ 3: ให้มดแต่ละตัวทำการเลือกลูกค้าที่มดยังไม่ได้เดินทางจากรายการบัญชีคู่แข่ง โดยใช้กฎเปลี่ยนสถานะอันใหม่ จากการผสมผสานอิทธิพลที่เข้าด้วยกัน เช่น ค่าความประหยัด (Savings value) และ กรอบเวลาที่จำกัด ส่วนกลับระยะทางจริง เป็นต้น ดังนี้

$$p_j^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta \cdot [\mu_{ij}]^\gamma \cdot [\pi_{ij}]^\lambda}{\sum_{m \in N_i} [\tau_{im}]^\alpha \cdot [\eta_{im}]^\beta \cdot [\mu_{im}]^\gamma \cdot [\pi_{im}]^\lambda} & \text{if } j \in N_i \\ \text{Otherwise} & 0 \end{cases}$$

η_{ij} เป็นส่วนกลับระยะทางจากจุดเมือง i (i คือที่ตั้งลูกค้าที่มดอยู่ปัจจุบัน) ไปยังอีกจุดเมือง j บนเส้นทางเชื่อมของเมือง i ไปยังเมือง j โดยมีระยะทางเชื่อม D_{ij} และ ค่า π_{ij} หมายถึง ส่วนกลับของกรอบเวลาของลูกค้าที่ j การคำนวณแสดงดังนี้ $\eta_{ij} = 1.0/D_{ij}$ และ $\pi_{ij} = 1.0/(TW_{i1} - TW_{i0})$ โดยที่กำหนดให้ $\tau_{ij}^i = \tau_{ij}$ และ μ_{ij} คือ ค่าความประหยัด Saving-Method



รูปที่ 4 วิธี Saving Method

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณสินค้าสะสม $sum(i,j)$ ในเส้นทางระหว่างลูกค้า i และลูกค้า j ถ้า $sum(i,j) < q$ ให้ข้าม

ขั้นตอนถัดไปอื่นๆ ให้คืนลูกค้า j ไว้ในบัญชีคู่แข่งชั้น แล้วข้ามไปทำในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณหาเวลา $T(i)$ ถ้านำลูกค้า j เข้ามาในเส้นทาง กรณีที่ไม่ละเมิดเงื่อนไขให้คำนวณหาความยาวเส้นทางทัวร์ และค่าใช้จ่ายระหว่างลูกค้า i ไปยัง j จากนั้นให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ซ้ำใหม่อีกครั้ง กรณีอื่นๆ ให้ข้ามไปทำในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 6: เพิ่มจำนวนพาหนะขนส่ง แล้วให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ซ้ำใหม่อีกครั้ง เพื่อสร้างเส้นทางทัวร์ใหม่ กรณีอื่นๆ ให้ข้ามทำขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 7: ให้คำนวณหาความยาวเส้นทางทัวร์ และค่าใช้จ่ายในทุกเส้นทางที่ได้จากมด และให้นำเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุดจากมด ไปทำขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 8: ปรับปรุงคุณภาพคำตอบด้วย 2-Opt ความยาวที่ดีที่สุดซึ่งจะถูกบันทึกไว้ ถ้าไม่มีการละเมิดเงื่อนไขด้านเวลาและการบรรทุกสินค้า

ขั้นตอนที่ 9: ถ้า $L_{local}(t) < L_{opt}(t)$ กำหนดให้ $L_{local}(t) < L_{opt}(t)$ และให้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการปรับปรุงฟีโรโมนวงกว้าง

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_{best}(t)} & \text{if } (ij) \in L_{best}(t) \\ \frac{Q}{L_{worst}(t)} & \text{if } (ij) \in L_{worst}(t) \end{cases}$$

$$\tau = \tau_{max} \text{ อื่นๆ } \tau = \tau_{min}$$

ขั้นตอนที่ 10: ตรวจสอบรอบกระทำซ้ำ $NC = \text{Max Iteration?}$ อื่นๆ ให้กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ผู้วิจัยทำการทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมาแก้ปัญหาทดลองกรณีที่มีโรงงานผู้ผลิตสินค้าจำนวนหนึ่งแห่ง ลูกค้าที่ต้องให้บริการขนส่งสินค้า จำนวน 8 ราย แต่ละรายมีปริมาณความต้องการสินค้าที่แตกต่างกัน พาหนะขนส่งบรรทุกได้ครั้งละ 8 หน่วย ความเร็วพาหนะขนส่งที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือ 40, 50, 60 และ 70 กม/ชม ตามลำดับ ข้อมูลดังตารางที่ 1 และ 2

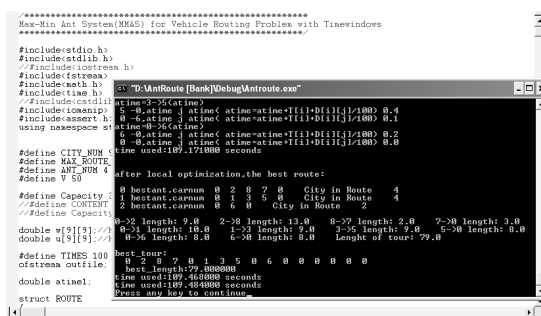
ตารางที่ 1 ข้อมูลระยะทางการขนส่งสินค้าของโรงงานตัวอย่าง (หน่วย: กิโลเมตร)

d_{ij}	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	40	60	75	90	200	100	160	80
1		0	65	40	100	50	75	110	100
2			0	75	100	100	75	75	75
3				0	100	50	90	90	150
4					0	100	75	75	100
5						0	70	90	75
6							0	70	100
7								0	100
8									0

ตารางที่ 2 ข้อมูลปริมาณความต้องการสินค้า และกรอบเวลาในการขนส่งสินค้า (หน่วย: ชั่วโมง)

ลูกค้ารายที่ i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ความต้องการสินค้า	0	2	1.5	4.5	3	1.5	4	2.5	3
(หน่วย)									
กรอบเวลา $[et_i, lt_i]$	[0,0]	[1,4]	[4,6]	[1,2]	[4,7]	[3,5]	[2,5]	[5,8]	[1.5,4]
เวลาลำเลียงสินค้าขึ้น-ลง	0	1	2	1	2	2	2.5	3	0.8

4.2 ผู้วิจัยได้พัฒนารหัส Saving-MMAS เขียนคำสั่งด้วย ภาษา Studio Visual C++ เวอร์ชัน 6.0 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โปรแกรม MMAS-VRPTWSL

และทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น Pentium Intel(R) Core™ 2Dua CPU 2.20 Ghz 0.99 Gb of RAM ทดสอบ พารามิเตอร์ที่ใช้วิธี Saving-MMAS สำหรับการแก้ปัญหา VRPTWSL เช่น อัตราการระเหยฟิโรโมน น้ำหนัก ความสำคัญระยะทางและฟิโรโมน เหล่านี้เป็นต้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับการใช้ พารามิเตอร์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experimental; DOE) ซึ่งมี 3 ปัจจัยการทดลอง (Factors) แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ คือ ค่าต่ำ (Low) และค่าสูง (High)

มีดังนี้ ปัจจัยที่ 1 น้ำหนักความสำคัญฟิโรโมน (α) ใช้ $1 \leq \alpha \leq 5$ ปัจจัยที่ 2 น้ำหนักความสำคัญระยะทาง (β) ใช้ค่า $1 \leq \beta \leq 5$ และปัจจัยที่ 3 อัตราการระเหยของฟิโรโมน (ρ) ใช้ค่า $0 \leq \rho \leq 1$ ดังในตารางที่ 3

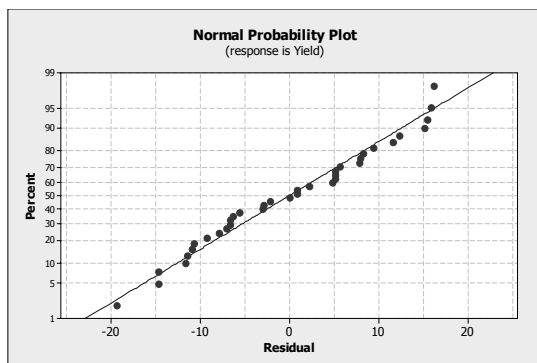
ตารางที่ 3 ระดับปัจจัยการทดสอบพารามิเตอร์

ปัจจัยการทดลอง (Factors)	ระดับปัจจัย	
	(-)	(+)
1. น้ำหนักความสำคัญฟิโรโมน	1	5
2. น้ำหนักความสำคัญระยะทาง	1	5
3. อัตราการระเหยของฟิโรโมน	0	1.0

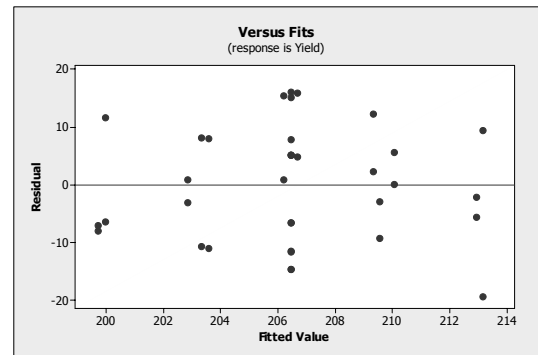
โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เท่ากับจำนวน 2^k โดยใช้โปรแกรม Minitab R15 กำหนด Replicate อีก 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด 36 การทดลอง ผู้วิจัยได้เลือกทำการสอบกับปัญหาใน OR-Library ในปัญหา C101 ขนาดที่มีลูกค้า 25 ราย ระดับความเชื่อมั่นในการทดสอบ 95% ด้วยเหตุผลที่ว่าปัญหา C101 สามารถเปรียบเทียบคำตอบที่ทราบได้ OR-Library ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดสอบพารามิเตอร์

ครั้งที่	พารามิเตอร์ (Alpha)	พารามิเตอร์ (Beta)	พารามิเตอร์ (Rho)	ผลลัพธ์ที่ได้ (Yield)
1	1	5	0.545	200.313
2	5	1	0.545	211.58
3	3	3	0.545	211.58
4	3	3	0.545	221.637
5	3	3	0.545	191.814
6	1	1	0.545	211.58
7	3	1	0.1	211.58
8	3	3	0.545	211.58
9	1	3	0.1	211.58
36	1	5	0.545	206.718



รูปที่ 6 กระจายแบบแจกแจงปกติ



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ ค่าสัมบูรณ์ส่วนตกค้างทั้ง 36 ครั้งพบว่ามีความเหมาะสม ความเสถียรพบว่าผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดปัจจัยโดย Response Optimizer วัดความพึงพอใจผลตอบ (Composite Desirability; D) ตามรูปที่ 8

Goal	Lower Target	Upper Weight	Import
Yield	Minimum 191.3	191.3 222.619	1 1
Alpha	= 1.40404		
Beta	= 1		
Rho	= 0.99		
Predicted Responses			
Yield	= 191.789 , desirability = 0.984397		
Composite Desirability = 0.984397			

รูปที่ 8 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบ Saving-MMAS

ครั้งที่	ระดับความเร็วในการขนส่งสินค้า											
	40 กม/ชม			50 กม/ชม			60 กม/ชม			70 กม/ชม		
	AS	MMAS	เวลา:	AS	MMAS	เวลา:	AS	MMAS	เวลา:	AS	MMAS	เวลา:
1	885	885	1.13	935	805	1.03	940	940	1.07	1070	1070	1.06
2	1020	885	1.03	1040	805	1.07	975	940	1.03	1070	1070	1.03
3	1010	885	1.09	805	805	1.05	975	940	1.06	1070	1070	1.05
4	890	885	1.05	950	805	1.03	940	940	1.05	1070	1070	1.03
5	920	885	1.06	935	805	0.98	975	940	1.11	1070	1070	1.06
6	885	885	1.05	1040	805	1.09	940	940	1.06	1070	1070	1.09
7	1020	885	1.07	805	805	1.05	975	940	1.03	1070	1070	1.08
8	1010	885	1.03	950	805	1.08	940	940	1.03	1070	1070	1.03
9	890	885	1.05	935	805	1.00	975	940	1.06	1070	1070	1.03
10	920	885	1.05	1040	805	1.05	940	940	1.03	1070	1070	1.06
ค่าที่ดี	885	885	1.06	805	805	1.04	940	940	1.05	1070	1070	1.05
ค่าเฉลี่ย	945	885	1.061	943.5	805	1.043	957.5	940	1.053	1070	1070	1.052
%Error	6.78%	0.00%	-	17.20%	0.00%	-	1.86%	0.00%	-	0.00%	0.00%	-

ค่าที่ดี (The Best) หมายถึง ค่าที่สามารถค้นพบได้จากวิธีการ

ค่าเฉลี่ย (Average) หมายถึง ผลการหารเฉลี่ยจากคำตอบที่ได้ในจำนวนครั้งทดสอบ (Average)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (\%Error) หาได้จาก } \%Error = \left(\frac{\text{Average} - \text{Best}}{\text{Best}} \right) * 100$$

4.3 จากนั้นใช้พารามิเตอร์

$\alpha = 1.4$, $\beta = 1$ และ $p = 0.99$ ทดสอบปัญหาโดยวิธี Saving-MMAS และทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับ Ant System (AS)+2Opt ในงานวิจัย [6] โดยผู้วิจัยทำการทดสอบปัญหาที่ระดับความเร็วในการขนส่งสินค้าระดับความเร็วละ 10 ครั้ง ที่อัตราความเร็วพาหนะขนส่ง 40, 50, 60 และ 70 กม/ชม ตามลำดับ ผลการทดสอบอัลกอริทึมแสดงในตารางที่ 5 ทดสอบปัญหาและการเปรียบเทียบวิธีการค้นหาคำตอบระหว่าง Saving-MMAS และ Ant System (AS)+2Opt ที่อัตราความเร็วพาหนะขนส่งสินค้าระดับ 40 กม/ชม พบว่า AS+2Opt ค้นหาคำตอบที่ดีจาก 10 ครั้งเพียง 2 ครั้งเท่านั้น ซึ่งคิดเป็น 20% โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%Error) ในการค้นหาคำตอบ 6.78% ในทางตรงกันข้าม Saving-MMAS นั้น

สามารถค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดได้ทุกครั้งจาก 10 ครั้ง ซึ่งคิดเป็น 100% และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%Error) เท่ากับ 0.00% ส่วนการทดสอบที่ระดับความเร็วพาหนะขนส่งสินค้าที่ระดับอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 สรุปได้ว่าวิธีการค้นหาคำตอบโดยวิธี Saving-MMAS สามารถให้คำตอบที่ดี และให้คำตอบที่แม่นยำมากกว่าวิธี AS+2Opt โดยสังเกตได้จากการมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%Error) เท่ากับ 0.00% ถึงแม้ทั้งสองวิธีการนี้จะให้คำตอบที่ดีนั้นเท่ากันในทุกๆ ระดับความเร็วของการทดสอบก็ตาม แต่วิธี Saving-MMAS นั้นสามารถให้คำตอบที่แม่นยำกว่า AS+2Opt ทุกครั้งไป แสดงถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่า ผลการจัดเส้นทางของการขนส่งที่ดีที่สุดจากวิธี Saving-MMAS ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบ Saving-MMAS

ความเร็ว ที่ใช้ขนส่งสินค้า	เส้นทางที่	ลำดับลูกค้า	ระยะทาง(กม.)	ระยะทาง โดยรวม (กม.)
40 กม/ชม	1	0- 1- 5- 7- 2- 0	315	885
	2	0- 6- 4- 0	265	
	3	0- 8- 3- 0	305	
50 กม/ชม	1	0- 6- 7- 2- 0	305	805
	2	0 - 8- 5- 4- 0	345	
	3	0- 3- 1- 0	155	
60 กม/ชม	1	0- 3- 5- 2- 0	285	940
	2	0- 8- 6- 0	280	
	3	0- 1- 4- 7- 0	375	
70 กม/ชม	1	0- 3- 1- 5- 0	365	1070
	2	0- 8- 6- 0	280	
	3	0- 4- 2- 7- 0	425	

จากผลการทดสอบในตารางที่ 6 แสดงเส้นทางที่ดีที่สุดจากวิธี Saving-MMAS พบว่าการใช้พาหนะขนส่งที่ระดับความเร็ว 50 กม/ชม โดยมีจำนวน 3 เส้นทาง ประกอบด้วยเส้นทางที่ 1: 0-6-7-2-0 เส้นทางที่ 2: 0-8-4-0 และเส้นทางที่ 3: 0-3-1-0 ให้ความยาวเส้นทางทัวร์ (ระยะทางการ

ขนส่ง) โดยรวมเท่ากับ 805 กม ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่นำมาใช้ในการทดสอบและแสดงลำดับของเวลาของการบริการลูกค้าในแต่ละรายที่พาหนะขนส่งเข้าส่งสินค้าได้ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 กรอบเวลาที่พาหนะขนส่งเดินทางมาถึงแต่ละลูกค้า

พาหนะขนส่งคันที่ 1	พาหนะขนส่งคันที่ 2	พาหนะขนส่งคันที่ 3
0->6 เวลาเดินทางมาถึง:2	2->0 เวลาเดินทางมาถึง:13.6	4->0 เวลาเดินทางมาถึง:11.7
6->7 เวลาเดินทางมาถึง:5.9	0->8 เวลาเดินทางมาถึง:1.6	0->3 เวลาเดินทางมาถึง:1.5
7->2 เวลาเดินทางมาถึง:10.4	8->5 เวลาเดินทางมาถึง:3.9	3->1 เวลาเดินทางมาถึง:3.3
	5->4 เวลาเดินทางมาถึง:7.9	1->0 เวลาเดินทางมาถึง:5.1

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การจัดเส้นทางพาหนะขนส่งสินค้าภายใต้กรอบเวลาและความเร็วในการขนส่งที่จำกัด (VRPTWSL) ผู้วิจัยทำการทดลองอัลกอริทึมโดยแบ่งความเร็วพาหนะขนส่งออกเป็น 4 ระดับ คือ 40, 50, 60 และ 70 กม/ชม ตามลำดับ พบว่าวิธี Saving-MMAS ให้ประสิทธิภาพคำตอบที่แม่นยำกว่าวิธี AS+2Opt แต่ให้ความยาวระยะทางทั่วโดยรวมของทั้ง 4 ระดับความเร็ว ดังนี้ 885, 805, 940 และ 1,070 กม/ชม ตามลำดับที่เท่ากัน ความเร็วที่พาหนะขนส่งใช้และให้ระยะทางที่สั้นที่สุด คือ 50 กม/ชม ซึ่งมีความยาวทั่วเท่ากับ 805 กม สรุปได้ว่า ถ้าหากเป็นการขนส่งสินค้าที่ลูกค้ามีกรอบเวลาจำกัดในการรับสินค้า การใช้ความเร็วพาหนะขนส่งสูงๆ ไม่ได้ตอบสนองความต้องการของลูกค้าอย่างแท้จริง ในทางตรงกันข้าม ยิ่งทำให้ผู้ประกอบการหรือพนักงานขนส่งต้องใช้ระยะทางที่เพิ่มขึ้นและสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น อีกทั้งมีอันตรายและความเสี่ยงสูงที่สินค้าจะเสียหายระหว่างการจัดส่ง เช่น กรณีรถบรรทุกขนาดใหญ่ การขนส่งใช้ความเร็วที่ระดับ 70 กม/ชม ซึ่งถือว่าค่อนข้างเร็วมาก เมื่อวิ่งส่งสินค้าตามกรอบเวลาเดิม เทียบกับที่ระดับ 50 กม/ชม. จะพบได้ว่าถ้าเพิ่มความเร็วพาหนะขนส่งจาก 50 กม/ชม เป็น 70 กม/ชม จะวิ่งด้วยระยะทางที่เพิ่มขึ้นถึง 256 กม สาเหตุก็เพราะว่า การที่พาหนะขนส่งถูกขับด้วยความเร็วสูง จะสามารถถึงเป้าหมายที่เป็นลูกค้าได้เร็วขึ้น แต่เมื่อพาหนะขนส่งเดินทางไปถึงที่หมายแล้วกลับไม่สามารถส่งสินค้าก่อนเวลาได้นั่นเอง ดังนั้น จึงจำเป็นจะต้องวิ่งหาจุดที่มีลูกค้าต้องการสินค้าในเวลาที่กำหนด $[et_i, lt_i]$ สรุปจากงานวิจัยนี้จะพบว่า หากเป็นการขนส่งที่มีกรอบระยะเวลารับ-ส่งสินค้าด้วย ควรมีการวิเคราะห์หลายปัจจัยร่วมด้วยก่อนทำการตัดสินใจการ

เส้นทางการขนส่ง เนื่องจากปัจจัยหลายตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ระยะทาง กรอบเวลาให้บริการ และความเร็วพาหนะขนส่งที่ใช้ เป็นต้น จึงจะทำให้การต้นทุนดำเนินการต่ำที่สุด และยังประเด็นการใช้ความเร็วที่สูงของพาหนะขนส่งเพียงอย่างเดียวนั้นไม่ใช่ข้อบ่งชี้จะสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างมีนัยสำคัญ และไม่สามารถลดต้นทุนดำเนินการลงได้ ส่วนข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยในอนาคต ควรมีการศึกษาการจัดเส้นทางขนส่ง กรณีที่มีทั้งความต้องการสินค้าของค่าที่ไม่แน่นอนและกรอบเวลาไม่แน่นอน ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับสภาพความเป็นจริงในการดำเนินการขนส่งในปัจจุบันมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการขนส่งอย่างแท้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ถือส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการขนส่ง โดยมีพาหนะขนส่งหลายขนาดและมีกรอบเวลาที่จำกัดเพื่อประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง” โดยได้รับสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา พ.ศ. 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์ กรมส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนวิจัยไว้ ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Braysy O, Gendreau M. 2005. Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics. Transport. Sci., 39: 119-139.
- [2] Dorigo M, Stützle T. Ant colony optimization. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.

- [3] Laporte G, Semet F. 2001. Classical Heuristics for Capacitated VRP. 1st Edn., Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA., ISBN: 0-89871-498-2, pp: 109-128.
- [4] Pisinger D, Ropke S. 2007. A general heuristic for vehicle routing problems, Computers & Operations Research 34, pp. 2403-2435.
- [5] Sivanandam S N, Deepa S N. 2008. Introduction to Genetic Algorithms. ISBN 978-3-540-73189-4@Springer-VerlagBerlin Heidelberg.
- [6] Suphan S, Sarayut K, Nakhon S. Vehicle routing problem with time and velocity limited. Operations Research Network Conference; 2013 Sep 11-14; The Greenery Resort Khao Yai: Thailand; 2013. p. 550-556.