



KKU Engineering Journal

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

วิธีซิมูเลเตด แอลเนลลิ่ง สำหรับการจัดเส้นทางรถขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่ยืดหยุ่น

Simulated annealing (SA) to vehicle routing problems with soft time windows

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

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

¹⁾ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์
อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

Department of Industrial Technology, Faculty of Agro-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 April 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาและพัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกส์เพื่อการค้นหาคำตอบการขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่ยืดหยุ่นที่เหมาะสม กรณีที่มีคลังสินค้ากลางแห่งเดียว ลูกค้ามีหลายราย ลูกค้าแต่ละรายตั้งอยู่กระจายอยู่กระจายทั่วไป และมีความต้องการสินค้าที่ไม่เท่ากัน แต่ทราบจำนวนสินค้าที่ต้องการและช่วงเวลาการรับสินค้าที่แน่นอน ศาสตร์การวิจัยดำเนินงานเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหา NP-hard ซึ่งเป็นปัญหาที่ยากยิ่งในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ผู้วิจัยได้ประยุกต์วิธีซิมูเลเตด แอลเนลลิ่ง เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีและเหมาะสมที่สุด อีกทั้งยังสามารถค้นหาคำตอบได้ในเวลาที่รวดเร็ว หลังจากพัฒนาอัลกอริทึมเรียบร้อยแล้วได้นำอัลกอริทึมไปทดสอบเพื่อหาแฟคเตอร์ กรอบเวลาขยายที่เหมาะสม แล้วนำแฟคเตอร์นั้นไปใช้ทดสอบกับปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัดของ Solomon ใน OR-Library กรณีที่มีลูกค้าสูงสุด 25 ราย จำนวน 6 ปัญหา อันได้แก่ ปัญหา C101, C102, R101, R102, RC101 และ RC102 ตามลำดับ พบว่าแฟคเตอร์กรอบเวลาขยายที่เหมาะสมควรใช้ ที่ระดับ 50 % และหลังการเปรียบเทียบคำตอบกับกรณีการจัดเส้นทางภายใต้กรอบเวลาที่จำกัดและกรอบเวลาที่ยืดหยุ่นนั้น พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจำนวนพาหนะขนส่งโดยเฉลี่ย -28.57 % และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระยะทางโดยเฉลี่ย -22.79 % โดยอัลกอริทึมใช้เวลาประมวลผลโดยเฉลี่ย 45.5 วินาที/ปัญหาตามลำดับ

คำสำคัญ : ซิมูเลเตด แอลเนลลิ่ง ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่ง กรอบเวลาที่จำกัด กรอบเวลาที่ยืดหยุ่น

* Corresponding author.

Email address: suphan_sodsoon@hotmail.com

Abstract

The researcher has applied and develops the meta-heuristics method to solve Vehicle Routing Problems with Soft Time Windows (VRPSTW). For this case there was only one depot, multi customers which each generally sparse either or demand was different though perceived number of demand and specific period of time to receive them. The Operation Research was representative combinatorial optimization problems and is known to be NP-hard. In this research algorithm, use Simulated Annealing (SA) to determine the optimum solutions which rapidly time solving. After developed the algorithms, apply them to examine the factors and the optimum extended time windows and test these factors with vehicle problem routing under specific time windows by Solomon in OR-Library in case of maximum 25 customers. Meanwhile, 6 problems are including of C101, C102, R101, R102, RC101 and RC102 respectively. The result shows the optimum extended time windows at level of 50%. At last, after comparison these answers with the case of vehicle problem routing under specific time windows and flexible time windows, found that percentage errors on number of vehicles approximately by -28.57% and percentage errors on distances approximately by -28.57% which this algorithm spent average processing time on 45.5 sec/problems.

Keywords : Simulatedannealing (SA), Vehicle routing problem, Time windows, Soft time windows

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งมีความสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจเกือบทุกประเภททั้งในส่วนการขนส่งวัตถุดิบ การขนถ่ายสินค้าระหว่างการผลิต การขนส่งสินค้าเพื่อการขาย และการจัดจำหน่าย เป็นต้น ในหลายธุรกิจต้นทุนการขนส่งนับเป็นต้นทุนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งและมีผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนโดยรวมของผลิตภัณฑ์และบริการ โครงสร้างต้นทุนขนส่งนั้นประกอบด้วย ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ซึ่งหมายถึงต้นทุนที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการขนส่ง เช่น ค่าเช่าสถานที่จอดรถ เงินเดือนพนักงานขับรถ เป็นต้น ส่วนต้นทุนแปรผัน (Variable Cost) เป็นต้นทุนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ การให้บริการ เช่น ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าซ่อมแซม ค่าน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น และสุดท้ายคือ ต้นทุนโดยรวม (Total Cost) ซึ่งหมายถึงการรวมเอา ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรเข้าไว้ด้วยกัน

ต้นทุนโดยรวมนี้ในทางการบริหารงานโลจิสติกส์ถือเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญซึ่งหมายถึงความสามารถ และประสิทธิภาพการดำเนินงานธุรกิจ ถ้าหากสามารถทำให้ต้นทุนโดยรวมลดลงได้มากเท่าใดก็จะทำให้องค์กรธุรกิจนั้นๆ สามารถดำเนินกิจกรรม ของตนเอง ได้ยาวนานยิ่งขึ้น หรือสามารถอยู่รอดได้ ในภาวะการณ์

แข่งขันที่รุนแรง แนวทางที่สำคัญที่สามารถลดต้นทุนโดยรวมลงได้ ถ้าหากทราบว่าต้นทุนของกระบวนการขนส่งสินค้ามีนัยสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจ เช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบการกระจายสินค้า โดยใช้แผนการจัดส่งสินค้าที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ก็จะสามารถทำให้ต้นทุนดำเนินการโดยรวมลดต่ำลงได้ด้วย และเพิ่มความสามารถในด้านการบริการแก่ลูกค้าได้ดียิ่งขึ้น และรวดเร็วมากยิ่งขึ้นกว่าเดิม ยิ่งในสภาวะปัจจุบันที่เศรษฐกิจโลกมีความผันผวนและมีการปรับตัวของราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ต้นทุนด้านเชื้อเพลิงนั้นมีสัดส่วนที่มากในต้นทุนการขนส่งทั้งหมด เมื่อราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ผู้ประกอบการด้านการขนส่งต้องแบกรับภาระต้นทุนการขนส่งสินค้าที่สูงขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง ดังนั้น ผู้ประกอบการ ด้านการขนส่งโลจิสติกส์ จำเป็นต้องมีกลยุทธ์ที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่ง โดยการวางแผนการจัดเส้นทางขนส่งเพื่อลดระยะทางหรือการใช้ระยะทางโดยรวมที่สั้นที่สุด และใช้จำนวนพาหนะขนส่งที่เหมาะสมเพื่อเป็นการลดต้นทุนทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการศึกษา และนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง ภายใต้กรอบเวลาที่ยืดหยุ่น โดยใช้วิธีซิมูเลเตด แอลเนลลิ่ง (Simulated

Annealing; SA) ให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ได้คำตอบทั้งจำนวนการใช้พาหนะขนส่งที่เหมาะสม ระยะทางการขนส่ง (ระยะทางโดยรวม) ที่สั้นที่สุด และให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีในเวลาอันรวดเร็ว เพื่อที่ผู้ประกอบการ จะสามารถนำวิธีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานได้ ทั้งปัญหาที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และสร้างความพึงพอใจในการให้บริการแก่ลูกค้ามากที่สุด บทความวิจัยนี้อธิบายเนื้อหาไว้ดังนี้ หัวข้อที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 3 สถานะปัญหา หัวข้อที่ 4 ประยุกต์วิธี SA ในการแก้ปัญหา VRPSTW หัวข้อที่ 5 ผลการทดลอง และหัวข้อที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

2. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

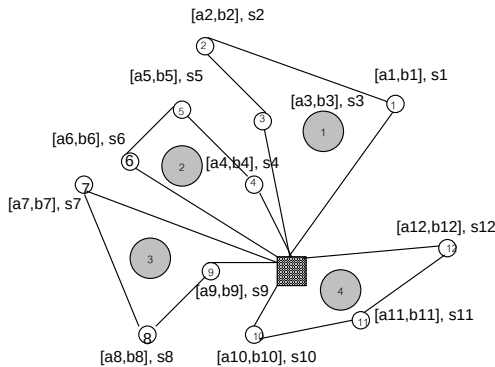
ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัด (Vehicle Routing Problems with Time Windows; VRPTW) เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นปัญหาการส่งมอบสินค้าแก่ลูกค้าแบบทันเวลาพอดี (Just in Time: JIT) โดยมีที่ข้อจำกัดด้านกรอบเวลา ซึ่งกรอบเวลาที่จำกัดนี้ได้เพิ่มเติมจากปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (Vehicle Routing Problems ; VRP) ในงานวิจัย Savelsbergh [1] ได้นิยามปัญหา VRPTW ว่าเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนมากกว่าปัญหา VRP ส่วนงานวิจัย Lau, et al. [2] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปัญหา VRPTW ที่มีข้อจำกัดจำนวนการใช้พาหนะขนส่งและข้อจำกัดเวลาแบบที่มีความยืดหยุ่น (Vehicle Routing Problems with Soft Time Windows; VRPSTW) กล่าวคือ หากไม่สามารถดำเนินการจัดส่งสินค้าได้ตามเงื่อนไขกรอบเวลาที่ตั้งไว้ได้ก็ให้จัดส่งสินค้าได้ แต่ให้ทำการเพิ่มโทษ (Penalty) ในสมการเป้าหมายแทน งานวิจัย Sam [3] ได้ประยุกต์วิธีการแก้ปัญหา VRPSTW โดยหาต้นทุนการขนส่งที่เหมาะสม เน้นเฉพาะการหาเวลาเดินทางจากลูกค้ารายหนึ่งไปยังลูกค้าถัดไป ในเที่ยวขนส่งหนึ่งๆ ที่สั้นที่สุดเท่านั้น โดยแยกเวลารอคอย (Waiting Time) กับเวลาให้บริการ (Service Time) ออกจากกันโดยไม่ได้นำมาคิดเป็นต้นทุน นอกจากนั้นยังยอมให้มีการส่งสินค้าได้ก่อนหรือหลังกรอบเวลาที่กำหนดได้ แต่จะต้องทำการเพิ่มโทษในสมการเป้าหมาย งานวิจัย Landrieu., et al. [4] ประยุกต์

วิธีการแก้ปัญหาเพื่อลดต้นทุนการขนส่งจากตัวแบบปัญหา Pickup and Deliver Time Windows ซึ่งไม่ยอมให้พาหนะขนส่งเดินทางไปถึงที่หมายช้ากว่ากรอบเวลาช้าสุดที่ส่งสินค้าได้ แต่ถ้าหากมาถึงก่อนเวลาที่กำหนดพาหนะขนส่งจะต้องรอจนกว่าจะถึงเวลาที่ส่งมอบซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัย Tan., et al. [5] และงานวิจัย Solomon [6] สำหรับ การแก้ปัญหา VRPTW และ VRPSTW จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการใช้ทั้งวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) และเมตาฮิวริสติกส์ (Meta-heuristics) รายละเอียดพอสังเขปมีดังนี้ งานวิจัย Homberger and Gehring [7] ใช้วิธี Genetics Algorithm (GA) งานวิจัย Metropolis., et al [8] ใช้วิธี Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) งานวิจัย Chiang, and Russell [9] ใช้วิธี Simulated Annealing (SA) งานวิจัย Bräysy., et al. [10] ใช้วิธี Multi-Start Local Search งานวิจัย Kolen and Rennooy Kan [11] ใช้วิธี Branch and Bound งานวิจัย Suphan and Preecha [12] ใช้ Max-Min Ant System (MMAS) เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธี ก็ล้วนแล้วให้คุณภาพคำตอบที่แตกต่างกันออกไป

3. สถานะปัญหา

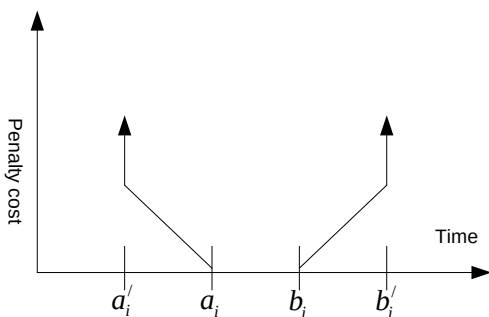
ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัดแสดงด้วยกราฟ ดังนี้ กราฟ $G = (V, A)$ โดยให้ V แทนด้วยจุดยอด (Vertex set) แทนด้วยเซต V หมายถึงจำนวนโหนดทั้งหมดในข่ายงาน โดยตำแหน่งที่ 0 คือคลังสินค้ากลาง ส่วนที่เหลือคือ จำนวนลูกค้าทั้งหมด แทนด้วย $V = \{1, 2, \dots, n\}$ ส่วนเซต A แทนด้วยเซตเส้นเชื่อม (i, j) โดยที่ ด้านเชื่อม $i, j \in A$ นอกจากนั้นยังกำหนดให้เซต K แทนด้วยพาหนะขนส่งซึ่งเป็นชนิดขนาดและประเภทเดียวกันทั้งหมด (Identical vehicles) และมีขนาดการบรรทุกสูงสุดเท่ากับ Q ต้นทุนเส้นทางเชื่อมแทนเซต C ซึ่งต้นทุนเส้นทางเชื่อมจากจุด i ไปยัง j แทนด้วย C_{ij} และเวลาในการเคลื่อนย้ายสินค้าจาก จุด i ไปยัง j แทนด้วยเวลา t_{ij} เมื่อเดินทางไปในแต่ละจุดให้พาหนะขนส่งหยุดให้บริการด้วยเวลา s_i เพื่อขนส่งสินค้าจำนวน d_i ลงจากพาหนะขนส่ง ทั้งนี้การดำเนินการจัดส่งสินค้าให้อยู่ภายใต้กรอบเวลา $[a_i, b_i]$ โดยที่ a_i

เป็นเวลาดำเนินการจัดส่งสินค้าได้เร็วสุด ส่วน b_i เป็นเวลาดำเนินการจัดส่งสินค้าได้ช้าสุด ข่ายงาน VRPTW ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข่ายงานคลังสินค้า 1 แห่ง ลูกค้า 12 ราย

แต่สำหรับการจัดเส้นทางการขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่ยืดหยุ่น (VRPSTW) เป็นการที่ยอมให้เกิดการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งที่สามารถละเมิดเงื่อนไขกรอบเวลาที่จำกัด (Time windows) ได้จากกรอบเวลาที่จำกัดเป็นกรอบเวลาที่ยืดหยุ่นได้เพียงเล็กน้อย (Soft Time Windows) ซึ่งการขยายเวลาการขนส่งนั้นสามารถทำได้ทั้งกรอบเวลาเริ่มต้นดำเนินการจัดส่งสินค้าได้เร็วสุด a_i ออกไปเป็น a'_i และกรอบเวลาเริ่มต้นดำเนินการจัดส่งสินค้าได้ช้าสุด b_i ออกไปเป็น b'_i ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การอนุญาตให้ละเมิดเงื่อนไขกรอบเวลาได้

ในกรณีที่มีการกำหนดต้นทุนทำโทษ (Penalty cost) หากมีการยอมให้สามารถละเมิดเงื่อนไขกรอบเวลาที่กำหนดได้ ให้แทนด้วยเป็น C_i เป็นต้นทุน ทำโทษ หากพาหนะขนส่งเดินทางมาถึงช้ากว่ากำหนด และ C_e เป็นต้นทุนทำโทษ หากพาหนะขนส่งเดินทางมาถึงก่อนตามลำดับ การคำนวณจากต้นทุนทำโทษทั้ง 2 ตัวนี้

มีผลให้เกิดการยอมรับทั้ง 2 ด้าน คือ ด้านต้นทุนโดยรวมที่เพิ่มขึ้นต่ำที่สุด และระยะเวลาที่ยอมให้พาหนะขนส่งละเมิดเงื่อนไขได้ต่ำที่สุด แต่ต้องไม่ทำให้ต้นทุนโดยรวมเพิ่มสูงขึ้นมากนัก การอนุญาตให้สามารถละเมิดเงื่อนไขกรอบเวลาได้ในรูปที่ 2 นั้น จะถูกควบคุมเงื่อนไขตามสมการที่ (1), (2) และ (3)

$$a'_i = \max[0, a_i - \frac{(c_{oi} - c_{io})}{C_e}] \quad (1)$$

$$b'_i = \max[b_0 - t_{io}, b_i - \frac{(c_{oi} - c_{io})}{C_i}] \quad (2)$$

$$C'_{ijk} = \begin{cases} c_{ij}, & \text{if } a_j \leq s'_{jk} \leq b_j \\ c_{ij} + c_i(s'_{jk} - b_j), & \text{if } b_j \leq s'_{jk} \leq b'_j \\ c_{ij} + c_e(a_j - s'_{jk}), & \text{if } a'_j \leq s'_{jk} \leq a_j \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ C_{oi} แสดงถึงระยะทางเส้นทางเชื่อมจากคลังสินค้ากลาง (0) ไปยังจุด i และ t_{io} แสดงถึงระยะเวลาเดินทางเส้นทางเชื่อมจากจุด i มายังคลังสินค้ากลาง (0) และสมการที่ (3) s'_{jk} แสดงถึงการคำนวณเวลาที่พาหนะขนส่ง k เดินทางมาถึงจุด j เมื่อ $j \in V$ จากที่กล่าวมาข้างต้น Narath B., et.al [13] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปัญหา VRPSTW ไว้ดังนี้

สมการเป้าหมาย (Objective function)

$$\text{Min} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c'_{ijk} x_{ijk} \quad (4)$$

สมการข้อบ่งชี้ (Subject to)

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ink} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0 \quad (8)$$

$$\forall h \in C, \forall k \in K$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$a'_i \leq s'_{ik} \leq b'_i \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (10)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (11)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - s_{jk} \leq (1 - x_{ijk}) M_{ijk} \quad (12)$$

$$\forall i \in V, \forall k \in K$$

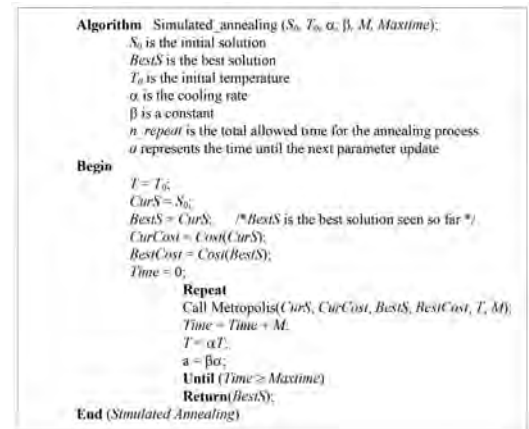
$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in A, \forall k \in K \quad (13)$$

สมการที่ (4) เป็นสมการเป้าหมายเพื่อหาระยะทางโดยรวมที่สั้นที่สุด สมการข้อบ่งชี้ที่ (5) ประกันว่าให้ลูกค้าแต่ละรายใช้พาหนะขนส่ง k ได้เพียงคันเดียวเท่านั้น สมการข้อบ่งชี้ที่ (6) ประกันว่าแต่ละเส้นทางขนส่งห้ามบรรจุทุกสินค้าเกิน Q สมการข้อบ่งชี้ที่ (7), (8) และ (9) เป็นการเชื่อมโยงจุดในเส้นทางขนส่ง มีเส้นทางเข้า 1 เส้นทาง และเส้นทางออกในแต่ละจุด 1 เส้นทาง สมการข้อบ่งชี้ที่ (10) s'_{ik} คือ กรอบเวลายืดหยุ่นออกจาก a'_i และ b'_i สมการข้อบ่งชี้ที่ (11) s_{ik} คือ กรอบเวลาที่จำกัดระหว่าง a_i และ b_i สมการข้อบ่งชี้ที่ (12) คำนวณเวลาต่อเนื่องในเส้นทางพาหนะขนส่ง k เมื่อผ่านจุด i ไปยังจุด j สมการข้อบ่งชี้ที่ (13) x_{ijk} เป็นตัวแปรตัดสินใจ ถ้า $x_{ijk} = 1$ ให้เชื่อมเส้นทางระหว่างจุด i ไปยัง j ด้วยพาหนะขนส่งที่ k (กรณีที่ $x_{ijk} = 0$ อื่นๆ เท่ากับ 0) M_{ijk} คือ ค่าบวกคงที่ (Large Constant)

4. ประยุกต์วิธี SA เพื่อการแก้ปัญหา VRPSTW

วิธี Simulated Annealing (SA) ประยุกต์ใช้ครั้งแรกเมื่อ ค.ศ.1980 ลักษณะเด่นของอัลกอริทึม SA มีโครงสร้างในการค้นหาคำตอบที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสามารถหาคำตอบที่ดีได้ภายในเวลาอันรวดเร็ว โดยวิธี SA มีแนวคิดพื้นฐานมาจากแบบจำลองการควบคุมการเย็นตัวของวัตถุในอ่างความร้อน (Heat Bath) ของ Metropolis., et al [8] ซึ่งเรียกว่า “การอบอ่อน (Annealing)” กล่าวคือ วัตถุจะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งถึงจุดหลอมเหลวต่อจากนั้นก็ปล่อยให้เย็นลง เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของวัตถุจะค่อยๆ ลดลงแล้วจะทำให้วัตถุมีความแข็งตัวขึ้นเมื่อวัตถุเย็นลง โครงสร้างคุณสมบัติ

ของวัตถุที่เย็นตัวนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการทำให้วัตถุนั้นเย็นตัวลง (Rate of Cooling) ขั้นตอนอัลกอริทึม SA เมื่อนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหา VRPSTW แสดงดังรูปที่ 3

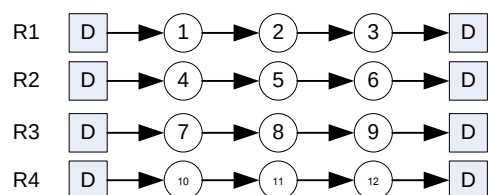


รูปที่ 3 รหัสเทียมวิธีซิมูเลเตด แอลเนลลิ่ง (SA)

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึม SA มีดังนี้ S_0 คือ คำตอบเริ่มต้น $BestS$ คือ คำตอบที่ดีที่สุดจากอัลกอริทึม T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น α คือ อัตราการเย็นตัว β คือ ค่าคงที่ $n_repeated$ คือ จำนวนรอบกระทำซ้ำ และ a คือ ค่าคงที่ที่กำหนด เป็นต้น การแก้ปัญหา VRPSTW จากรูปที่ 1 อธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของ SA เช่น กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) เท่ากับ $t_0 = 100$ ฟังก์ชันการลดอุณหภูมิ $\alpha(t) = at$ โดย a คือค่าคงที่ที่กำหนดให้ $a = 0.99$ จำนวนรอบการกระทำซ้ำในแต่ละค่าของอุณหภูมิเป็น $n_repeated = 10$ และเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบเมื่อ $t_{min} = 0.1$

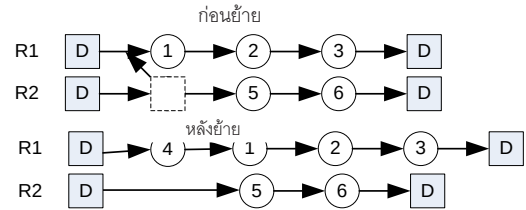
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการสร้างคำตอบเริ่มต้น (Initial Solutions) ด้วยวิธีการสุ่มเลือก (Random) โดยใช้กลยุทธ์กรอบเวลาที่จำกัด การสร้างเส้นทางขนส่งที่เป็นไปได้ โดยวิธีการสุ่มเลือกนั้นจะได้จำนวน 4 เส้นทาง ดังรูปที่ 4



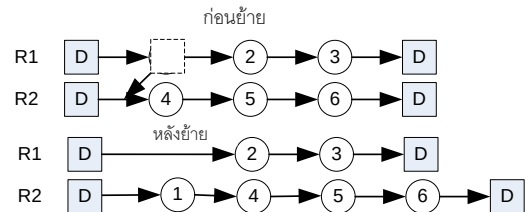
รูปที่ 4 เส้นทางขนส่งที่เป็นไปได้

สมมติให้ความยาวทั้ง 4 เส้นทาง ดังนี้ เส้นทางที่ 1 (R1) มีความยาวเท่ากับ 250 กม. ความยาวเส้นทางขนส่งที่ 2 (R2) มีความยาวเท่ากับ 150 กม. ความยาวเส้นทางขนส่งที่ 3 (R3) มีความยาวเท่ากับ 220 กม. และความยาวเส้นทางขนส่งที่ 4 (R4) มีความยาวเท่ากับ 150 กม. ตามลำดับ

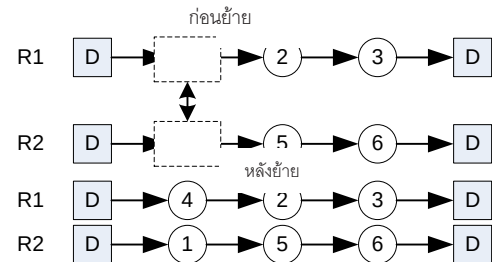
ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพคำตอบ (เส้นทาง) ในเนบอร์ฮูด s เมื่อ $s \in N(s_0)$ จากนั้นคำนวณ $\Delta = f(s_1) - f(s_0)$ เพื่อหาค่าความแตกต่างระหว่างฟิสเนสอันใหม่ $f(s_1)$ และปัจจุบัน $f(s_0)$ จากการปรับปรุงคุณภาพคำตอบด้วยการสลับลูกค้าในแต่ละเส้นทางในขั้นตอนที่ 2 โดยให้จับคู่ลำดับที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากจำนวน 4 เส้นทาง คือ ตั้งแต่ $R_1, \dots, R_4$ วิธีการจับคู่ทางเลือกเส้นทางที่จะนำมาสลับลูกค้ากันให้คำนวณจากสูตร $K(K-1)/2$ เมื่อ $K = 4$ จะได้ดังนี้ $4(4-1)/2 = 6$ ดังนั้น ทางเลือกที่เป็นไปได้ในการจับคู่เส้นทางเพื่อสลับเปลี่ยนลูกค้าและตำแหน่งลูกค้าในเส้นทางจะได้ 6 ทางเลือกดังนี้ (R_1, R_2) , (R_1, R_3) , (R_1, R_4) , (R_2, R_3) , (R_2, R_4) และ (R_3, R_4) ตามลำดับ ในการย้ายลูกค้าจากเส้นทางหนึ่งไปยังอีกเส้นทางหนึ่งและหาตำแหน่งที่แทรกใหม่ในเส้นทาง ผู้วิจัยใช้ตัวดำเนินการย้าย (Exchange Operation) อยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ ตัวดำเนินการแบบ (0,1) และ (1,1) ตามลำดับ ตัวดำเนินการเคลื่อนย้าย (0,1) เป็นการย้ายลูกค้าจำนวน 1 ราย โดยตัดออกจากเส้นทางเดิมแล้วไปหาที่แทรกใหม่บนเส้นทางใหม่ และตัวดำเนินการเคลื่อนย้าย (1,1) เป็นการย้ายลูกค้า 1 รายจากเส้นทางเดิมแล้วไปหาที่แทรกใหม่บนเส้นทางใหม่ และย้ายลูกค้า 1 รายจากเส้นทางใหม่แล้วไปหาที่แทรกใหม่บนเส้นทางเดิมซึ่งเป็นสลับแบบแลกเปลี่ยนตำแหน่งกัน ดังรูปที่ 5 และ 6



ตัวดำเนินการเคลื่อนย้าย (0, 1)

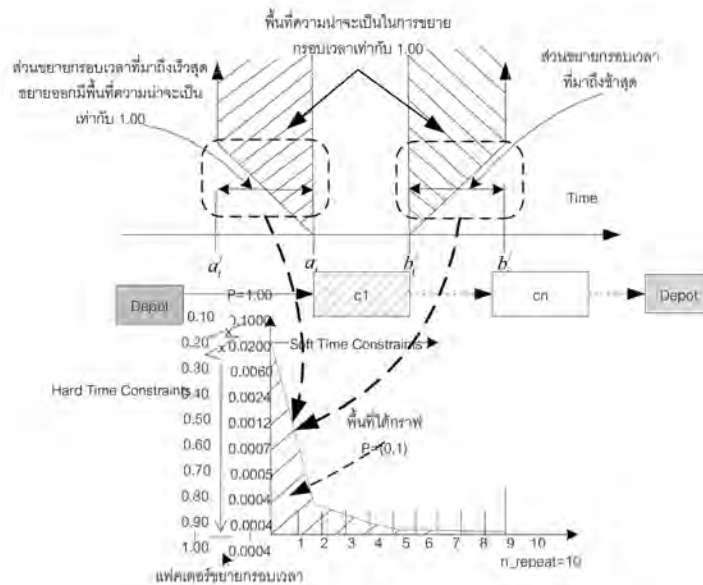


รูปที่ 5 ตัวดำเนินการเคลื่อนย้าย (0, 1)



รูปที่ 6 ตัวดำเนินการเคลื่อนย้าย (1, 1)

ในระหว่างการปรับปรุงคุณภาพคำตอบในแต่ละรอบกระทำซ้ำนั้น ผู้วิจัยอนุญาตให้มีการละเมิดเงื่อนไขกรอบเวลาขนส่งได้ ยกเว้นเฉพาะในรอบที่แรกเท่านั้นที่ต้องอยู่บนเงื่อนไขกรอบเวลาที่จำกัด การอนุญาตให้เกิดการละเมิดเงื่อนไขกรอบเวลา หรือเรียกว่า “การผ่อนปรนกรอบเวลา” เพื่อให้ได้เป็นกรอบเวลาแบบ VRPSTW ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผังการดำเนินงานผ่อนปรนกรอบเวลาจาก Hard Time Constraints ให้เป็น Soft Time Constraints

ในการผ่อนปรนกรอบเวลาจากกรอบเวลาปกติ นีวีริชิมูเลเตด แอลเนลลิ่งทำได้โดยการขยายกรอบเวลาออกไปจาก $a_i \rightarrow a_i'$ และ $b_i \rightarrow b_i'$ ภายใต้พื้นที่กราฟที่มีความน่าจะเป็นตั้งแต่ 0-1 จำนวนครั้งของการผ่อนปรนนี้ให้เท่ากับ n_repeat ลักษณะการดำเนินการดังกล่าวจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับสมการที่ (1) (2) และ (3)

ขั้นตอนที่ 4 ให้ทำการตรวจสอบค่า $\Delta < 0$ หรือไม่? (สมมติการปรับปรุงคุณภาพคำตอบเส้นทางขนส่ง R1: $250 > 0$) เมื่อค่า $\Delta > 0$ ให้ทำการเลือกการสุ่มตัวเลขจำนวนจริง (Random number) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง (0, 1] สมมติค่า r ที่สุ่มได้มีค่าเท่ากับ 0.6 จากนั้นให้ทำการตรวจสอบค่าว่า $r < P_{accept}$ หรือไม่? ถ้าใช่ ให้ $P_{accept} = \exp(-250/2) = 0.00$ กรณีที่ $t_0 = 2$ ถ้า $r < P_{accept}$ ถ้าหากค่า r มีค่าเท่ากับ $0.6 > 0.00$ อัลกอริทึม SA จะไม่ยอมรับคำตอบอันใหม่และคำตอบอันใหม่นี้มีค่าคำตอบที่แย่กว่าคำตอบในปัจจุบัน (Non-improving move) ฉะนั้นรอบกระทำซ้ำนี้ s_i จะยังเป็นคำตอบปัจจุบันเช่นเดิม

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อให้ตัวดำเนินการทั้ง 2 แบบครบทั้ง 6 ทางเลือกแล้ว ให้ทำการตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบว่าอุณหภูมิ $t = t_{min}$ หรือไม่? ถ้าไม่ จากนั้นก็วนรอบกระทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง $t = t_{min}$

จึงคืนคำตอบที่ดีที่สุดออกมาเป็นคำตอบสุดท้ายของอัลกอริทึมเป็นอันสิ้นสุดการค้นหาคำตอบ

5. ผลการทดลอง

ขั้นตอนวิธี SA-VRPSTW ตามหัวข้อที่ 4 นั้น ผู้วิจัยเขียนเป็นชุดคำสั่งต่างๆ โดยใช้โปรแกรมภาษา C++ เวอร์ชัน 6.00 ทำการทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น Pentium [R]4 CPU 3.06 GHz Ram 256 MB ปัญหาที่ใช้ทดสอบเป็นปัญหา VRPTW ใน OR-Library ของ Solomon ขนาดลูกค้า 25 ราย จำนวน 6 ปัญหา ได้แก่ C101, C102, R101, R102, RC101 และ RC102 ตามลำดับ สาเหตุที่ต้องใช้ปัญหา VRPTW ในการทดสอบดังกล่าวก็เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกรณีที่มีการจัดเส้นทางขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัดและกรอบเวลาที่ยืดหยุ่นนั้น ว่ามีการใช้ระยะทาง และจำนวนการใช้พาหนะขนส่ง แตกต่างกันอย่างไร เนื่องจากในบางธุรกิจไม่จำเป็นต้องจัดเส้นทางขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัดเสมอไปนั่นเอง รายละเอียดในการทดสอบมีดังนี้

5.1 ทดสอบแฟคเตอร์กรอบเวลาขยายที่เหมาะสม

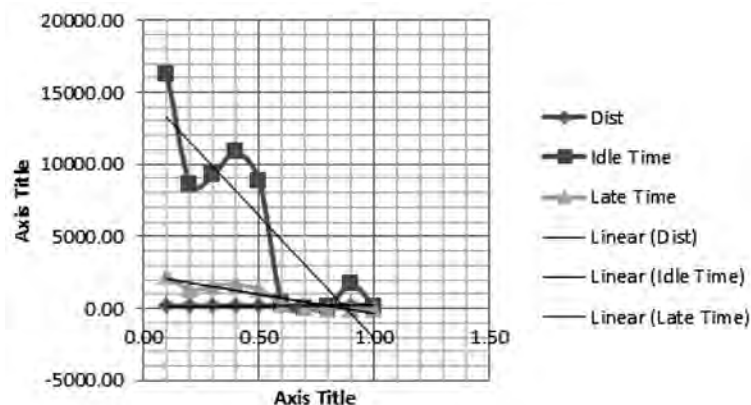
การทดสอบแฟคเตอร์หากรอบเวลาขยายที่เหมาะสม ที่อยู่ภายใต้พื้นที่ความน่าจะเป็นเท่ากับ 1.00 ให้เพิ่มพื้นที่ขยายกรอบเวลาออกไปครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลทดสอบแฟคเตอร์รอบเวลาที่ขยาย

แฟคเตอร์	ระยะทาง	Idle Time	Late Time
0.10	193.69	16295.94	2318.34
0.20	188.53	8539.14	1334.08
0.30	216.82	9269.27	1581.97
0.40	191.15	10854.50	1675.43
0.50	198.55	8832.22	1330.64
0.60	232.23	304.69	391.19
0.70	244.57	3.30	130.32
0.80	269.85	161.26	0.00
0.90	293.72	1686.94	25.00
1.00	252.10	158.47	0.00

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 1 พบว่า ถ้าหากแบ่งการทดสอบออกไปครั้งละ 10% ซึ่งกำหนดให้ระดับ

ความสำคัญรอบเวลาแบบจำกัดเป็น $w_1 = 1.00$ (ระดับความสำคัญมาก) และเมื่อผ่อนปรนรอบเวลาออกไปให้ระดับความสำคัญเป็น $w_2 = \{0 - 1.00\}$ แทนด้วยกรอบเวลาที่ขยายด้านเวลาพาหนะขนส่งเดินทางมาถึงเร็วสุดให้เป็น “Idle Time” ส่วน $w_3 = \{0 - 1.00\}$ แทนด้วยกรอบเวลาขยายด้านเวลาพาหนะขนส่งเดินทางมาถึงช้าสุดให้เป็น “Late Time” ทั้งนี้กำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายรอบเวลาทั้ง w_2 และ w_3 ออกไปข้างละเท่ากัน โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเป็นการทดสอบหาแฟคเตอร์รอบเวลาขยายที่เหมาะสมภายใต้พื้นที่ความน่าจะเป็น ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลทดสอบแฟคเตอร์ขยายกรอบเวลา

ในตารางที่ 1 และรูปที่ 8 การขยายรอบเวลาทั้ง w_2 และ w_3 ออกไปข้างละเท่ากันเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์นั้น แบ่งการสอบออกเป็น 10 ช่วงนั้น ในช่วง 10-50 % แรกนี้ ผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึม SA ให้ระยะทางการขนส่งที่สั้นลงกว่าแบบกรอบเวลาที่จำกัด แต่จะให้ “Idle Time” และ “Late Time” ระดับที่สูงกว่าเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม ในช่วง 50-100% พบว่า ระยะทางการขนส่งที่ได้นั้น มีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ “Idle Time” และ “Late Time” อยู่ในระดับที่ต่ำลง ซึ่งสวนทิศทางการนี้ ทั้งนี้ถ้าเป็นกรณีการจัดเส้นทางแบบ VRPSTW นั้นสมการเป้าหมายหลัก คือ การหา ระยะทางการขนส่ง ที่สั้นที่สุดและควรมีเวลา “Idle Time”

และ “Late Time” ที่อยู่ในระดับต่ำด้วย มิเช่นนั้นจะทำให้สูญเสียความน่าเชื่อถือในการให้บริการเพราะมีการส่งมอบสินค้าไม่ตรงเวลานั่นเอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือก ใช้ระดับแฟคเตอร์กรอบเวลาขยายที่เหมาะสมที่ระดับ 0.5 หรือ 50 เปอร์เซ็นต์เพื่อการทดสอบทั้ง 6 ปัญหา ในลำดับถัดไป

5.2 ผลการทดสอบปัญหาใน OR-Library

ผลการทดสอบทั้ง 6 ปัญหา อันได้แก่ C101 C102 R101 R102 RC101 และ RC102 โดยใช้ระดับแฟคเตอร์กรอบเวลาขยายที่ระดับ 0.5 และ $n_repeat = 10$ พบว่า คำตอบที่ดีที่สุดจากอัลกอริทึม SA-VRPSTW ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

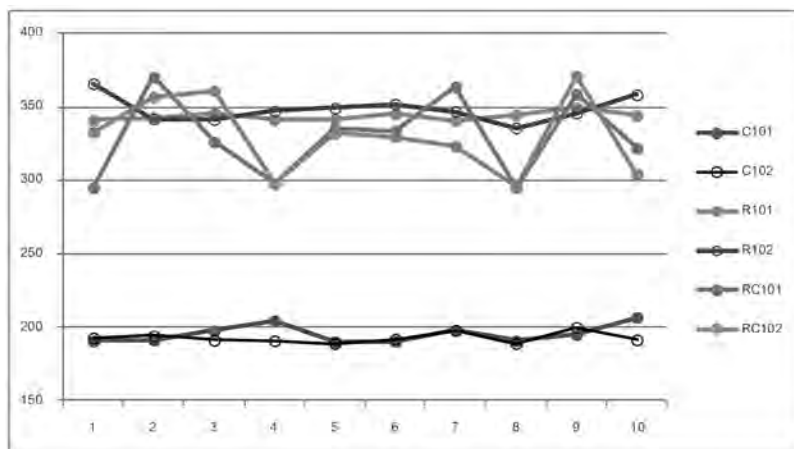
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบปัญหาอัลกอริทึม SA-VRPSTW

จำนวน ครั้ง ปัญหา		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ค่าเฉลี่ย
C101	Vehicles	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Distance	190.57	191.33	197.65	204.50	190.14	190.30	197.81	190.78	194.99	206.77	195.48
	Idle Time	5,179.08	9,035.11	7,235.24	7,612.66	13,925.67	13,214.99	19,116.30	13,052.04	1,868.85	8,964.49	10,820.44
	Late Time	1,059.51	1,494.79	1,212.57	1,241.46	1,948.00	1,948.55	2,307.07	2,035.35	1,675.43	1,471.21	1,639.39
	Time(sec.)	33.95	32.64	36.34	32.65	39.19	33.25	29.12	30.82	38.93	31.29	33.82
C102	Vehicles	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Distance	192.73	194.14	191.09	190.80	188.83	191.85	198.04	188.93	200.02	191.42	192.79
	Idle Time	8,933.90	4,114.80	4,213.66	6,792.30	7,053.57	9,331.43	6,466.84	5,172.47	1,604.01	3,690.98	6,637.40
	Late Time	1,560.94	1,216.92	1,125.06	1,495.16	1,487.59	1,586.83	1,115.68	1,241.71	1,575.98	927.05	1,333.29
	Time(sec.)	30.03	40.68	33.32	37.08	32.97	30.25	33.65	40.29	25.63	42.81	34.67
R101	Vehicles	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Distance	341.00	342.76	345.75	341.45	341.65	345.22	340.90	344.60	349.53	344.19	343.71
	Idle Time	3,710.39	3,414.06	4,317.08	4,241.19	4,009.71	4,030.95	3,691.69	3,455.20	4,692.58	3,470.26	3,903.31
	Late Time	235.64	200.82	259.74	276.52	244.27	244.27	219.01	193.66	293.59	190.79	235.83
	Time(sec.)	46.01	40.25	41.53	40.35	50.55	47.19	44.26	54.54	46.47	48.35	45.95
R102	Vehicles	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Distance	365.99	341.91	341.45	347.25	349.22	351.97	346.97	335.69	345.94	358.33	348.47
	Idle Time	1,154.70	4,134.12	3,098.49	3,028.90	3,968.78	3,880.18	3,668.34	4,111.95	3,302.99	4,716.86	3,506.53
	Late Time	232.74	258.77	166.30	178.58	253.64	226.97	198.54	260.82	193.60	262.15	223.21
	Time(sec.)	35.78	47.44	53.39	55.77	56.17	55.43	44.64	48.33	45.09	57.91	50.00
RC101	Vehicles	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Distance	294.99	370.45	325.97	297.79	334.90	333.56	363.86	294.99	358.81	321.83	329.72
	Idle Time	1,675.89	1,894.66	1,445.46	907.93	1,465.89	1,523.27	1,753.54	974.29	2,050.71	996.92	1,468.86
	Late Time	308.48	298.20	274.16	208.64	259.94	249.71	275.21	228.75	293.78	221.33	261.82
	Time(sec.)	59.56	51.52	55.84	52.31	55.92	52.19	59.96	50.82	54.65	55.45	54.82
RC102	Vehicles	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Distance	332.73	356.81	361.16	297.60	332.05	329.64	323.17	295.74	371.09	304.13	330.41
	Idle Time	1,114.20	1,380.22	1,171.22	1,126.36	1,015.32	1,121.59	1,342.69	1,007.03	1,097.54	1,209.62	1,158.58
	Late Time	241.79	259.02	267.78	265.10	248.12	250.07	301.21	263.25	211.45	272.61	258.04
	Time(sec.)	53.52	50.02	50.35	55.46	52.53	53.52	53.28	56.09	53.59	57.90	53.63

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยการทดสอบปัญหาอัลกอริทึม SA-VRPSTW

ลำดับที่	NV	TD	Idle Time	Late Time	CPU Time (sec)
C101	3	195.5	10,820.4	1,639.4	33.8
C102	3	192.8	6,637.4	1,333.3	34.7
R101	2	343.7	3,903.3	235.8	46.0
R102	2	348.5	3,506.5	223.2	50.0
RC101	3	329.7	1,468.9	261.8	54.8
RC102	3	330.4	1,158.6	258.0	53.6
ค่าเฉลี่ย	2.667	290.1	4,582.5	658.6	45.5

หมายเหตุ: NV = จำนวนพาหนะขนส่งที่ใช้
 TD = ระยะทางโดยรวมในทุกเส้นทางขนส่ง
 Idle Time = เวลาที่ส่งสินค้าก่อนกำหนด
 Late Time = เวลาที่ส่งสินค้าหลังกำหนด
 CPU Time = เวลาประมวลขั้นตอนทางคอมพิวเตอร์ (วินาที)



รูปที่ 9 ผลการทดสอบอัลกอริทึม SA-VRPSTW จำนวน 10 ครั้ง ใน 6 ปัญหา

ในตารางที่ 3-4 และรูปที่ 9 สรุปได้ว่า อัลกอริทึม SA-VRPSTW เมื่อทดสอบจำนวน 10 ครั้ง พบว่า มีจำนวนพาหนะขนส่งที่ใช้เฉลี่ย 2.667 (3 คัน) ระยะทางการขนส่งโดยรวม 290.10 เวลาที่ส่งสินค้าก่อนกำหนด (Idle Time) 4,582.50 เวลาที่ส่งสินค้าช้ากว่ากำหนด (Late Time) 4,582.50 และเวลาประมวลผลที่ใช้ 45.50 วินาที ตามลำดับ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จากการเปรียบเทียบคำตอบ

โดยรวมทั้ง 6 ปัญหา ระหว่างปัญหา VRPTW และปัญหา VRPSTW มีจำนวนการใช้พาหนะขนส่งลดลง 42.85% และระยะทางโดยรวมลดลง 26.37% สำหรับ VRPSTW มีเวลาที่เพิ่มขึ้นมาในส่วนของเวลาส่งก่อนเวลาที่จำกัด คิดเป็น 87.43 % และส่งช้ากว่ากำหนด 12.57% เมื่อเทียบคุณภาพคำตอบดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคำตอบปัญหา VRPTW จาก OR-Library กับ SA- VRPSTW

คำตอบที่ดีที่สุดปัญหา VRPTW จาก OR-Library			คำตอบที่ดีที่สุดปัญหา VRPSTW จาก SA			เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	
Instance	Vehicles	Distance	Instance	Vehicles	Distance	%Error Vech	%Error Dist
C101	3	191.3	C101	3	190.14	0.00	-0.61
C102	3	190.3	C102	3	188.83	0.00	-0.77
R101	8	617.1	R101	2	340.9	-75.00	-44.76
R102	7	547.1	R102	2	335.69	-71.43	-38.64
RC101	4	461.1	RC101	3	294.99	-25.00	-36.02
RC102	3	351.8	RC102	3	295.74	0.00	-15.94
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด						-28.57	-22.79

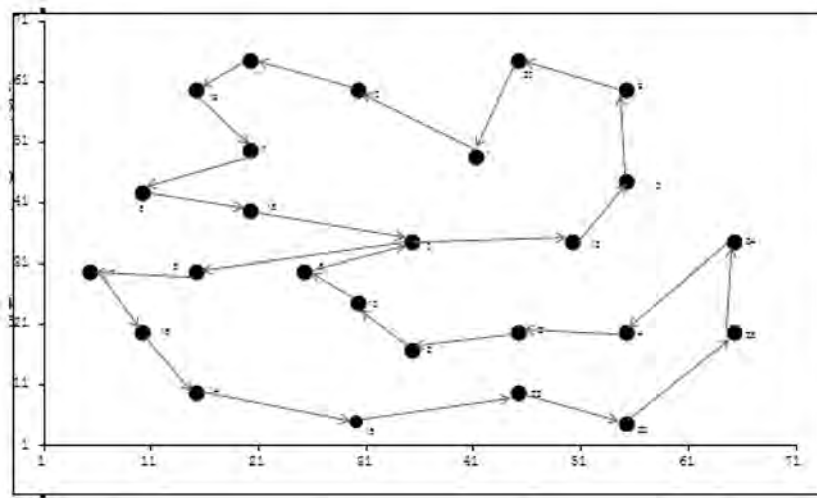
$$\text{เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (\%Error)} = \left(\frac{\text{Best known}-\text{Best SA}}{\text{Best known}} \right) \times 100$$

Best known หมายถึง คำตอบที่ได้จาก OR-Library

Best SA หมายถึง คำตอบที่ได้จากวิธีการ SA

%Error Vech หมายถึง เปอร์เซนต์ความผิดพลาดจำนวนพาหนะขนส่งที่ใช้น้อยที่สุดระหว่าง VRPTW และ VRPSTW

%Error Dist หมายถึง เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของระยะทางที่ใช้น้อยที่สุดระหว่าง VRPTW และ VRPSTW



Route : Distance =152.30, Load =138 => 0 12 3 9 20 1 10 11 19 7 8 18 0

Route : Distance =194.96, Load =194 => 0 5 17 16 14 15 22 23 25 24 4 21 2 13 6 0

Total Distance = 347.26, Idle = 3493.41, Late =196.20

Computational Time (sec.): 00:00:53.1612694

รูปที่ 10 คำตอบที่ดีที่สุดจากอัลกอริทึม SA-VRPSTW

พบว่าปัญหา R101, R102 และ RC101 คำตอบที่ได้จาก SA-VRPSTW มีการใช้จำนวนพาหนะขนส่งและความยาวของระยะทางที่ลดลงหากเปรียบเทียบกับ VRPTW โดยเฉพาะกรณีปัญหา R101 ถ้าเป็นปัญหา VRPTW ใช้ระยะทางรวม 617.10 ใช้พาหนะขนส่งจำนวน 8 คัน แต่ถ้าเป็นปัญหา VRPSTW ใช้ระยะทางรวมเท่ากับ 314.65 ใช้พาหนะขนส่งจำนวน 2 คัน การจัดเส้นทางขนส่งจาก SA.ที่ใช้เวลาประมวลผล 53.16 วินาที ดังรูปที่ 10

ปัญหาที่ R101 พบว่า SA-VRPSTW ให้คำตอบด้านระยะทางขนส่ง (TD) และจำนวนพาหนะขนส่ง ที่ใช้ที่ดีกว่าปัญหา VRPTW แต่ต้องพิจารณาปัจจัยด้านอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น เวลาที่ส่งสินค้าเข้าสู่ b_i และเวลาส่งสินค้าก่อนกำหนด a_i เช่น สมมติว่าการใช้พาหนะขนส่ง 1 คัน เท่ากับ 1 เส้นทางมีต้นทุนการใช้พาหนะขนส่งแต่ละเส้นทางเท่ากับ 500 บาท (คิดจากค่าพนักงานขับรถ ค่าจ้างพนักงานสายส่ง รวมถึงค่าใช้จ่ายอื่นๆ) ต้นทุนการใช้ระยะทางหรือต้นทุนการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงคิดเป็น 1 บาท/กม ต้นทุนทำโทษในการส่งสินค้าก่อนเวลากำหนดที่ทำให้ลูกค้าเสียค่าใช้จ่ายด้านพื้นที่เก็บสินค้าก่อนใช้งานหรือต้นทุนเก็บรักษาคิดเป็น 0.1 บาท/นาที่ (การขนส่งสินค้าในแต่ละเส้นทางมีการคำนวณเป็น 1 กม.เท่ากับ 1 นาที่ หรือมีความเร็วในการขนส่งสินค้าเป็น 60 กม/ชม) และต้นทุนที่ส่งสินค้าช้ากว่ากำหนดที่ทำให้ลูกค้าเสียโอกาสในการรอคอยคิดเป็น 0.5 บาท/นาที่ ตามลำดับ การคำนวณต้นทุนต่างๆ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การคำนวณค่าใช้จ่าย

ค่าใช้จ่าย	VRPTW	VRPSTW
การใช้พาหนะขนส่ง	4,000.00	1,000.00
การใช้ระยะทาง	617.10	347.21
ค่าทำโทษส่งก่อนกำหนด	-	349.34
ค่าทำโทษส่งช้ากว่ากำหนด	-	98.10
รวม	4,617.10	1,794.65

จากการเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ทั้ง 2 ปัญหาพบว่า VRPSTW ให้มีต้นทุนหลังถูกปรับ (ต้นทุนทำโทษ) แล้วมีความประหยัดกว่าปัญหา VRPTW เท่ากับ 4,617.10-

1,794.65 = 2,822.45 บาท ซึ่งดีกว่าการจัดเส้นทางขนส่งแบบเวลาจำกัด แต่ทั้งนี้ควรพิจารณาด้านกรอบเวลาควบคุมก่อนการตัดสินใจอีกครั้งหนึ่ง

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การประยุกต์วิธี SA-VRPSTW พบว่า ระยะทางโดยรวมของการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งแบบ VRPSTW ดีกว่าแบบ VRPTW เพราะว่าหาก มีข้อจำกัดกรอบเวลามากจนเกินไป จะทำให้ไม่สามารถส่งสินค้าได้ หรือมีการใช้จำนวนพาหนะขนส่งมากเกินไปจนความจำเป็น (หากมีการละเมิดเงื่อนไข) แต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่าในทุกธุรกิจเมื่อมีกรอบเวลาที่จำกัดแล้วจะไม่สามารถผ่อนปรนกรอบเวลานั้นๆ เพื่ออำนวยความสะดวกให้กันได้ และเพื่อประโยชน์ทั้งสองฝ่ายก็ย่อมมีข้อตกลงกรณีที่ยอมให้ละเมิดเงื่อนไขได้ ภายใต้กรอบเวลาที่ขยายออกไปด้วยเหมาะสม แต่ต้องยอมเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ในบางส่วน เช่น ต้นทุนทำโทษ (Penalty Cost) นั่นเอง หากมีเช่นนั้นฝ่ายที่จัดส่งสินค้าจะต้องแบกรับต้นทุนด้านจำนวนพาหนะขนส่งที่ใช้มากเกินไปเพียง ฝ่ายเดียว เช่น ต้นทุนการจัดหาพาหนะขนส่ง ต้นทุนพนักงานขับรถ และ/หรือต้นทุนอื่นๆ ที่ต้องตามมา และในกรณีฝ่ายลูกค้ายอมที่จะหาที่จัดเก็บสินค้า และยอมมีค่าใช้จ่ายด้านพื้นที่เก็บ หรือต้นทุนเก็บรักษาจากฝ่ายจัดส่งสินค้าได้ เป็นกลยุทธ์ที่เรียกว่า Win-Win strategy เป็นต้น

ดังนั้น จากการประยุกต์วิธีแก้ปัญหาโดยใช้วิธีทางเมตาฮิวริสติกส์ด้วยเทคนิควิธี SA นี้จึงทำให้ การค้นหาได้คำตอบที่ดีมีคุณภาพและใช้เวลาประมวลผลที่เหมาะสม หลังจากการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้รับระหว่าง VRPTW และ VRPSTW นั้น พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจำนวนพาหนะขนส่งโดยเฉลี่ย -28.57 % และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระยะทางโดยเฉลี่ย -22.79 % โดยอัลกอริทึมใช้เวลาประมวลผลโดยเฉลี่ย 45.5 วินาที/ปัญหาตามลำดับ ซึ่งผู้ประกอบการสามารถนำประยุกต์และปรับใช้ได้ทั้งปัญหขนาดเล็กลง และขนาดใหญ่ได้ เพื่อเป็นการส่งเสริมและอนุรักษ์การใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เหมาะสมจากที่มีการใช้ระยะทางที่สั้น และจำนวนพาหนะขนส่งที่เหมาะสมโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อีกทั้งยังสามารถให้บริการลูกค้าด้วยต้นทุนดำเนินการที่เหมาะสม ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคตควรมี

การศึกษาค้นคว้าความต้องการสินค้าของลูกค้ามีความต้องการสินค้าที่ไม่แน่นอน (Stochastic demand) ซึ่งจะใกล้เคียงกับสภาพการดำเนินการที่เป็นจริงของการขนส่งมากที่สุดในปัจจุบัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา พ.ศ. 2556 สำนักงานคณะกรรมการกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์ กรมส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยไว้ ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Savelsbergh MWP, Sol M. Dynamic routing independent vehicles. *Oper res* 1998; 474-90.
- [2] Lau HC, Sim M, Teo KM. Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles. *European Journal of Operational Research*. 2003;148(3):559-69.
- [3] Sam RT. Vehicle routing with time windows using genetic algorithms. *Application handbook of genetic algorithms: New frontiers*; 1995:253-77.
- [4] Landrieu A, Mati Y, Binder Z. A tabu search heuristic for the single vehicle pickup and delivery problem with time windows. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2001;12(5-6): 497-508.
- [5] Tan KC, Lee LH, Ou K. Artificial intelligence heuristics in solving vehicle routing problems with time window constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001;14(6):825-37.
- [6] Solomon, M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 1987;35: 254-65.
- [7] Homberger J, Gehring H, Hagen F, Wirtschaftsinformatik L, Hagen D, Deutschland B. Two evolutionary metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Inform*1999;37:297-318.
- [8] Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, Teller AH, Teller E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*. 1953;21(6) :1087-92.
- [9] Chiang W-C, Russell RA. A Reactive Tabu Search Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *INFORMS Journal on Computing*. 1997;9(4):417-30.
- [10] Bräysy O, Hasle G, Dullaert W. A multi-start local search algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*. 2004;159(3):586-605.
- [11] Kolen AWJ, Rennooy K, Trienekens HWJM. Vehicle routing with time windows. *operations research* 1987;35(2):266-73.
- [12] Suphan S, Preecha C. Max-min ant system (MMAS) for vehicle routing problem with time windows. *KKU Res J* 2011;38(3):313-24. (In Thai).
- [13] Narath B, Ali Gul Q, Eiichi T. Vehicle routing and scheduling problems for convenience store industry considering soft time windows. *Proceedings of the Eastern Asia Society for transportation studies*, Vol.9, 2013.