ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีความต้องการแบบสโทแคสติก

กิตติโรจน์ สันติฐายี[1*] และ อุดม จันทร์จรัสสุข[2]

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* *Corresponding Author: kittirod45895@gmail.com*

[1] *นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[2] *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 19 เมษายน 2561
แก้ไข : 4 กันยายน 2561
ตอบรับ : 3 ตุลาคม 2561

คำสำคัญ :
ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ / ความต้องการแบบสโทแคสติก / ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด / เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบสโทแคสติกที่ไม่ทราบความต้องการของลูกค้าอย่างแน่นอนก่อนล่วงหน้า โดยมีเป้าหมายเพื่อหาเส้นทางที่ให้ค่าคาดหมายของต้นทุนค่าขนส่งรวมน้อยที่สุดภายใต้ความไม่แน่นอนและมีระดับการให้บริการอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วนของจำนวนรถบรรทุกที่ไม่ทำให้เกิดความล้มเหลวในการส่งสินค้า งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt ในการแก้ปัญหา โดยคำตอบที่ได้จะถูกประเมินในแง่ต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการด้วยเทคนิคการสุ่มตัวอย่างภายใต้รูปแบบการแจกแจงของความต้องการที่กำหนดขึ้น และคำตอบที่ได้ค่าประเมินที่ดีที่สุดจะถูกนำไปใช้ในการปรับค่าฟีโรโมน เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นในการค้นหารอบถัดไป ผู้วิจัยได้พัฒนาขั้นตอนวิธีที่นำเสนอด้วยภาษา C# และได้ทำการทดลองแก้ปัญหาโดยดัดแปลงตัวอย่าง 24 ตัวอย่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าประเมินของคำตอบที่ได้จากปัญหาเดิม ผลการทดลองพบว่า วิธีที่นำเสนอสามารถหาคำตอบที่ให้ค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งที่ต่ำกว่าค่าประเมินของคำตอบจากปัญหาเดิมเมื่อความต้องการเป็นแบบสโทแคสติก

An Ant Colony Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands

Kittirod Santithayee[1*] and Udom Janjarassuk[2]

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

* *Corresponding Author: kittirod45895@gmail.com*

[1] *Graduate Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.*

Article Info

Article History:
Received: April 19, 2018
Revised: September 4, 2018
Accepted: October 3, 2018

Keywords:
Vehicle Routing Problem / Stochastic Demands / Ant Colony Optimization Algorithm / Sampling Technique

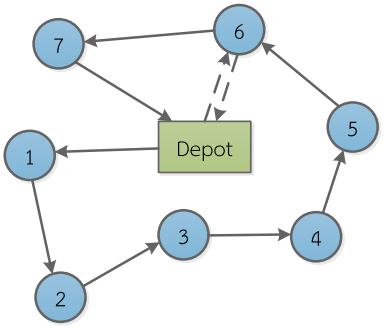
Abstract

This research studied the stochastic vehicle routing problem where customer demand is uncertain. The objective of this research was to find vehicle routes that minimize the expected total travel cost under demand uncertainties with an acceptable service level; the service level is defined by the proportion of trucks that allow successful deliveries. An ant colony optimization algorithm (ACO) in combination with the 2-Opt local search was proposed to solve the problem. Sampling technique was used to evaluate the travel cost and service level from a given demand distribution. The solutions with good evaluated values were selected for pheromone update in which to improve the solutions in a subsequent iteration. The proposed algorithm was developed in C#. Experiments were conducted to test the algorithm by using 24 modified CVRP instances from the literature; the results were compared with the solutions of the original problems. The results show that the proposed algorithm is capable of providing solutions with a lower expected cost than the optimal solutions from the original problems when demand is stochastic.

1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ (Vehicle Routing Problem, VRP) เป็นปัญหาที่มีความสำคัญต่อการจัดการโลจิสติกส์ และการจัดการห่วงโซ่อุปทาน เนื่องจากการดำเนินธุรกิจในทุกอุตสาหกรรมมีความเกี่ยวข้องกับการขนส่งสินค้าและการให้บริการ อาทิเช่น การบริการส่งไปรษณีย์ การส่งแก๊สหุงต้มตามบ้าน เป็นต้น

ความไม่แน่นอนทำให้การจัดเส้นทางการเดินรถที่เหมาะสมเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ตัวอย่างเช่น ความต้องการของลูกค้าที่ไม่แน่นอน [1] ทำให้เส้นทางที่ได้วางแผนไว้ล่วงหน้าไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเส้นทางในการเดินรถที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 1 ตัวอย่างเส้นทางการเดินรถภายใต้ความต้องการที่ไม่แน่นอน

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการเดินรถภายใต้ความต้องการที่ไม่แน่นอน ลูกศรเส้นทึบคือเส้นทางการเดินรถที่ได้วางแผนไว้ล่วงหน้า โดยมีลำดับการส่งสินค้าตามหมายเลขที่ระบุ แต่เนื่องจากปริมาณความต้องการของลูกค้ามีค่าที่ไม่แน่นอน ทำให้เมื่อรถบรรทุกไปถึงลูกค้ารายที่หกมีปริมาณสินค้าไม่เพียงพอ รถบรรทุกจึงต้องกลับไปเติมสินค้าที่ศูนย์กระจายสินค้าตามทิศทางของลูกศรเส้นประแล้วจึงกลับไปส่งสินค้าให้กับลูกค้ารายเดิมและรายที่เหลือบนเส้นทางที่ได้วางแผนไว้ ส่งผลให้เสียเวลาในการเดินรถและมีต้นทุนค่าขนส่งเพิ่มขึ้น

นอกจากการพิจารณาต้นทุนในการส่งสินค้าแล้ว ความพึงพอใจของลูกค้าก็เป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง การสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าสามารถทำได้โดยการกำหนดระดับการให้บริการหรือเกณฑ์การให้บริการที่ผู้ประกอบการกำหนดขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้หลายวิธี เช่น สัดส่วนของจำนวนลูกค้าที่รถบรรทุกสามารถส่งสินค้าได้ภายในรอบแรก เวลาที่ใช้ในการให้บริการลูกค้า เป็นต้น

ความต้องการที่มีค่าไม่แน่นอนส่งผลให้ระดับการให้บริการมีค่าลดลง เนื่องจากรถบรรทุกอาจต้องกลับไปเติมสินค้าที่ศูนย์กระจายสินค้าแล้วจึงกลับมาส่งสินค้าให้กับลูกค้ารายเดิม ส่งผลให้ลูกค้าเกิดความไม่พอใจในการรับบริการ เนื่องจากต้องรอสินค้าเป็นเวลานาน

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีค่าความต้องการเป็นแบบสโทแคสติก (Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand, VRPSD) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเส้นทางที่ให้ต้นทุนค่าขนส่งที่น้อยที่สุดภายใต้ความต้องการที่ไม่ทราบค่าล่วงหน้าและมีระดับการให้บริการอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

เนื้อหาส่วนที่เหลือของบทความประกอบด้วยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ ขั้นตอนวิธีสำหรับแก้ปัญหา การทดลองและผลการทดลอง และสรุปผลการวิจัย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถหรือปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีความจุรถจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) เป็นปัญหาการหาเส้นทางการขนส่งสินค้าของรถบรรทุกไปยังลูกค้าที่กระจายตามจุดต่างๆ [2] ซึ่งในการส่งสินค้าแต่ละครั้งรถบรรทุกจะเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ศูนย์กระจายสินค้า โดยที่ลูกค้าแต่ละรายจะรับสินค้าจากรถบรรทุกเพียงคันเดียวและปริมาณความต้องการรวมในแต่ละเส้นทางที่ใช้ขนส่งต้องไม่เกินความจุของรถบรรทุก [3] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุดหรือมีต้นทุนการเดินรถน้อยที่สุด

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบสโทแคสติก (Stochastic Vehicle Routing Problem, SVRP) เป็นปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่พิจารณาพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าแน่นอนอย่างน้อยหนึ่งตัว เช่น ความต้องการของลูกค้า เวลาในการส่งสินค้า เป็นต้น [4-5] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีความจุรถจำกัดภายใต้ความต้องการแบบสโทแคสติก (Capacitated Vehicle Routing

Problem with Stochastic Demands, CVRPSD) ตัวอย่างของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเช่นการจัดเส้นทางการเดินรถขนธนบัตรไปยังตู้เอทีเอ็มที่กระจายตามจุดต่างๆ เส้นทางที่ใช้เดินรถจะถูกกำหนดขึ้นก่อนที่จะรู้ปริมาณธนบัตรที่ต้องบรรจุเข้าไปในตู้เอทีเอ็มและจะทราบค่าจริงก็ต่อเมื่อรถไปถึงตู้เอทีเอ็ม โดยหากจำนวนธนบัตรที่เหลือในรถมีไม่เพียงพอ รถขนธนบัตรต้องกลับไปยังธนาคารเพื่อบรรทุกธนบัตรเพิ่ม แล้วจึงกลับไปบรรจุธนบัตรที่ตู้เอทีเอ็มเดิม และตู้เอทีเอ็มที่เหลือตามเส้นทางที่ได้กำหนด [6-7] ตัวอย่างปัญหาอื่นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางของรถส่งแก๊สหุงต้มในรัฐอลาสกา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเมื่อรถส่งแก๊สไปถึงลูกค้า ลูกค้าอาจต้องการให้เติมแก๊สในปริมาณที่ต่างจากค่าที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งหากปริมาณแก๊สที่เหลือในรถมีไม่เพียงพอ รถส่งแก๊สต้องกลับไปเติมแก๊สที่ปั๊มแก๊ส (Gas Station) แล้วจึงกลับมาส่งแก๊สให้กับลูกค้ารายเดิมและรายที่เหลือ [8]นอกจากนี้ ปัญหาที่มีลักษณะคล้ายคลึงและอาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถเก็บขยะ โดยรถเก็บขยะจะไม่ทราบปริมาณขยะล่วงหน้าในแต่ละจุดเก็บขยะจนกว่าจะไปถึงจุดเก็บขยะ ซึ่งหากปริมาณขยะมีมากกว่าความจุที่รถจะบรรทุกได้ รถเก็บขยะต้องกลับไปโรงเก็บขยะเพื่อถ่ายขยะออกแล้วจึงกลับมารับขยะตามจุดที่เหลือ [9] เป็นต้น

วิธีแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ วิธีแม่นตรง (Exact Method) และวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristic Method) [10] การแก้ปัญหาด้วยวิธีแม่นตรงแม้จะให้คำตอบที่เหมาะที่สุด แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เวลาในการประมวลผลนาน เนื่องจากแบบจำลองของปัญหาสโทแคสติกมักมีขนาดใหญ่และยากต่อการหาคำตอบ ดังนั้น วิธีฮิวริสติกส์จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดภายในเวลาอันสั้น [11] และถือเป็นข้อได้เปรียบสำคัญของวิธีฮิวริสติกส์เหนือวิธีแม่นตรง

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO) จัดอยู่ในประเภทของวิธีฮิวริสติกส์ และเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงการจัด (Combinatorial Problem) [12] โดยการแก้ปัญหาจะอาศัยหลักการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของมดในการหาคำตอบ

Bullnheimer และคณะ [13] ได้ประยุกต์ใช้วิธีระบบมด (Ant System, AS) และการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบเชิงกำหนด (Deterministic Vehicle Routing Problem) จำนวน 14 ปัญหาจากงานวิจัยของ Christofides และคณะ [14] ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะที่สุด (Optimal Solution) มีค่าเท่ากับ 4.43 เปอร์เซ็นต์ และ Bullnheimer และคณะ [15] ได้ปรับปรุงวิธีระบบมดต่อโดยประยุกต์ใช้วิธีแบบประหยัด (Savings Algorithm) และใช้วิธีเลือกลูกค้าจากรายชื่อของลูกค้าที่ถูกคัดเลือก (Candidate List) ในการแก้ปัญหา แล้วทำการทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.51 เปอร์เซ็นต์ Bin และคณะ [16] ได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดและการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธีการสับเปลี่ยนลูกค้าระหว่างเส้นทาง (Exchange Customer) และวิธี 2-Opt ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ โดยใช้วิธีการปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ (Local Pheromone Update) และการปรับค่าฟีโรโมนวงกว้าง (Global Pheromone Update) เพื่อเพิ่มโอกาสของการได้คำตอบที่ดี จากนั้นได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับงานวิจัยของ Rego และ Roucairol [17] Gendreau และคณะ [18] Osman [19] Bullnheimer และคณะ [15] ซึ่งผลที่ได้พบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะที่สุดเท่ากับ 0.14 เปอร์เซ็นต์

Marinakis และคณะ [2] ได้ใช้วิธีค้นหาแบบกลุ่มอนุภาครวม (Particle Swarm Optimization, PSO) ผสมกับวิธี Path Relinking และการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt และวิธี 3-Opt ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีค่าความต้องการเป็นแบบสโทแคสติกจำนวน 40 ปัญหา แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับงานวิจัยของ Christian และ Lysgaard [20] และ Goodson และคณะ [21] โดยเปลี่ยนค่าความต้องการของลูกค้าให้มีค่าต่างจากค่าความต้องการเดิมเท่ากับ ±1 หน่วยและ ±2 หน่วย โดยค่าความต้องการที่น้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าในทุกปัญหาที่ทดสอบ Reimann [22] ได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีค่าความต้องการเป็น

แบบสโทแคสติก โดยใช้วิธีประมาณค่าเชิงวิเคราะห์ (Analytical Approximate) และวิธีประมาณค่าเชิงประจักษ์ (Empirical Approximate) ในการประมาณค่าของคำตอบ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าวิธีประมาณค่าเชิงประจักษ์เป็นวิธีที่ให้คำตอบที่ดีกว่า เนื่องจากวิธีนี้ได้จำลองปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) และใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Technique) ในการประเมินคำตอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้แนวคิดที่จะใช้ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดและการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีค่าความต้องการเป็นแบบสโทแคสติกโดยใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างในการประเมินค่าคาดหมายของสมการวัตถุประสงค์ เพื่อหาเส้นทางที่ทำให้ต้นทุนค่าขนส่งมีค่าน้อยที่สุด

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่ศึกษาเป็นปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีความจุรถจำกัดภายใต้ความต้องการแบบสโทแคสติก (Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands, CVRPSD) ลักษณะของปัญหาประกอบด้วย ศูนย์กระจายสินค้าหนึ่งแห่ง เซตของลูกค้า รถบรรทุกสินค้าที่มีคุณลักษณะเหมือนกัน (Homogenous Vehicle) และความต้องการของลูกค้าเป็นแบบสโทแคสติก [3] ซึ่งในการส่งสินค้าแต่ละครั้ง รถบรรทุกจะไปส่งสินค้าตามเส้นทางที่ได้วางแผนไว้ (Priori Tour) โดยรถจะไม่รู้ค่าความต้องการจริงจนกว่าจะไปถึงลูกค้าซึ่งหากความต้องการของลูกค้ามีค่ามากกว่าปริมาณสินค้าที่เหลือในรถบรรทุกจะถือว่าเกิดความล้มเหลวบนเส้นทางการส่งสินค้า (Route Failure) ทำให้รถบรรทุกต้องกลับไปเติมสินค้า (Replenishment) ที่ศูนย์กระจายสินค้าใหม่แล้วจึงกลับไปส่งสินค้าให้กับลูกค้ารายเดิม และรายที่เหลือตามเส้นทางที่ได้วางแผนไว้ [23] เป้าหมายของการจัดเส้นทางการเดินรถคือหาเส้นทางที่ให้ต้นทุนค่าขนส่งที่น้อยที่สุด โดยมีระดับการให้บริการอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวัดจากสัดส่วนของจำนวนรถบรรทุกที่สามารถส่งสินค้าให้กับลูกค้าตามเส้นทางที่กำหนดไว้โดยไม่เกิดการล้มเหลว

3.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีค่าความต้องการเป็นแบบสโทแคสติกสามารถแสดงด้วยกราฟ (Graph) $G=(V, A)$ ที่ประกอบด้วยเซตของโหนด (Node) $V=\{v_0,...,v_n\}$ และเซตของเส้นเชื่อม (Arc) $A=\{(v_i,v_j):v_i,v_j\in V,\ i<j\}$ โดยที่ v_0 คือ ศูนย์กระจายสินค้า v_1 ถึง v_n คือลูกค้ารายที่ 1 ถึงรายที่ n ตามลำดับ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่ทำการวิจัยได้ถูกดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Laporte และคณะ [3] แสดงได้ดังนี้

กำหนดให้

ดัชนีและเซต

i, j, k คือ ดัชนีของลำดับการส่งสินค้า

p คือ ดัชนีของรถบรรทุก

S คือ เซตของลูกค้าบนเส้นทางย่อย (Sub-tour)

พารามิเตอร์

n คือ จำนวนลูกค้าทั้งหมด

m คือ จำนวนรถบรรทุกทั้งหมด

D คือ ความจุของรถบรรทุก

t คือ จำนวนลูกค้าบนเส้นทางที่ส่งสินค้า

L คือ ระดับการให้บริการที่ต้องการ

ϵ คือ ค่าคงที่เล็กๆ ที่มีค่าเป็นบวก

ξ_i คือ ความต้องการของลูกค้าลำดับที่ i

ξ_{p_j} คือ ความต้องการของลูกค้าลำดับที่ j บนเส้นทางของรถบรรทุกคันที่ p

$E(\xi_i)$ คือ ค่าคาดหมายของความต้องการของลูกค้าลำดับที่ i

c_{ij} คือ ต้นทุนต่อครั้งของการส่งสินค้าจากลูกค้าลำดับที่ i ไปยังลูกค้าลำดับที่ j โดยที่ $i < j$

ตัวแปร

x_{ij} คือ จำนวนครั้งของการเดินรถบรรทุกตามเส้นทางที่ได้วางแผนไว้ (First-stage Solution) จากลูกค้าลำดับที่ i ไปยังลูกค้าลำดับที่ j โดยที่ $i < j$ ซึ่งถ้า i มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า รถบรรทุกได้ส่งสินค้าให้กับลูกค้าลำดับที่ j โดยมีจุดเริ่มต้นหรือจุดสิ้นสุดที่ศูนย์กระจายสินค้า

δ_p คือ ตัวแปรบ่งชี้ (Indicator Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงค่าความสำเร็จหรือความล้มเหลวในการส่งสินค้าให้กับลูกค้าของรถคันที่ p

$$\delta_p = \begin{cases} 1\ ; & \text{รถคันที่ } p \text{ ไม่เกิดความล้มเหลวในการส่งสินค้า} \\ 0\ ; & \text{รถคันที่ } p \text{ เกิดความล้มเหลวในการส่งสินค้า} \end{cases}$$

สมการเป้าหมาย

$$Minimize \sum_{i<j} c_{ij}x_{ij} + Q(x) \qquad (3.1)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0j} = 2m \qquad (3.2)$$

$$\sum_{i<k} x_{ik} + \sum_{j>k} x_{kj} = 2\ ; \quad k = \{1, \dots, n\} \qquad (3.3)$$

$$\sum_{v_i, v_j \in S} x_{ij} \leq |S| - \left\lceil \frac{\sum_{v_i \in S} E(\xi_i)}{D} \right\rceil\ ; \quad S \subset V \backslash \{v_0\}\ ; \quad 2 \leq |S| \leq n-1 \qquad (3.4)$$

$$1 - \left(\frac{\sum_{p=1}^{m} (1-\delta_p)}{m} \right) \geq L \qquad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^{t} \xi_{p_j} + (D+\epsilon)\,\delta_p \geq D + \epsilon\ ; \quad \forall p = \{1, \dots, m\} \qquad (3.6)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1\ ; \quad 1 \leq i < j < n \qquad (3.7)$$

$$0 \leq x_{0j} \leq 2\ ; \quad j = \{1, \dots, n\} \qquad (3.8)$$

$$x_{ij} \quad integer\ ; \quad \forall i, j = \{0, \dots, n\} \qquad (3.9)$$

$$\delta_p \in \{0,1\}\ ; \quad \forall p = \{1, \dots, m\} \qquad (3.10)$$

จากแบบจำลองสมการที่ (3.1) เป็นการหาค่าคาดหมายของต้นทุนค่าขนส่งรวมที่น้อยที่สุดโดยค่า $Q(x)$ คือ ค่าคาดหมายของต้นทุนค่าขนส่งเมื่อเกิดความล้มเหลว (Failure) บนเส้นทางที่ใช้ส่งสินค้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.11) เงื่อนไขที่ (3.2) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าจำนวนครั้งรวมที่รถบรรทุกไปและกลับมายังศูนย์กระจายสินค้าต้องมีค่าเท่ากับสองเท่าของจำนวนรถบรรทุกทั้งหมดเงื่อนไขที่ (3.3) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่ารถบรรทุกไปส่งสินค้าให้กับลูกค้าลำดับที่ k แล้วต้องออกจากลูกค้าลำดับที่ k เงื่อนไขที่ (3.4) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าจะไม่เกิดเส้นทางย่อย (Sub-tour) ในแต่ละเส้นทางที่ใช้ส่งสินค้า เงื่อนไขที่ (3.5) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าระดับการให้บริการของเส้นทางการเดินรถต้องมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดเงื่อนไขที่ (3.6) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าถ้าความต้องการรวมของลูกค้าบนเส้นทางของรถบรรทุก p มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณ

ความจุของรถบรรทุกแล้วจะไม่เกิดความล้มเหลวในการส่งสินค้า เงื่อนไขที่ (3.7) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าหากมีการส่งสินค้าให้กับลูกค้าลำดับที่ j จากลูกค้าลำดับที่ i จำนวนครั้งที่รถบรรทุกไปส่งสินค้าจะมีค่าเท่ากับ 1 เงื่อนไขที่ (3.8) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าจำนวนครั้งที่รถบรรทุกออกจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าลำดับที่ j ต้องมีค่าไม่เกินสองครั้งเงื่อนไขที่ (3.9) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าจำนวนครั้งของการเดินรถมีค่าเป็นจำนวนเต็มเงื่อนไขที่ (3.10) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าความสำเร็จหรือความล้มเหลวในการส่งสินค้าเป็นตัวแปรฐานสอง (Binary Variable)

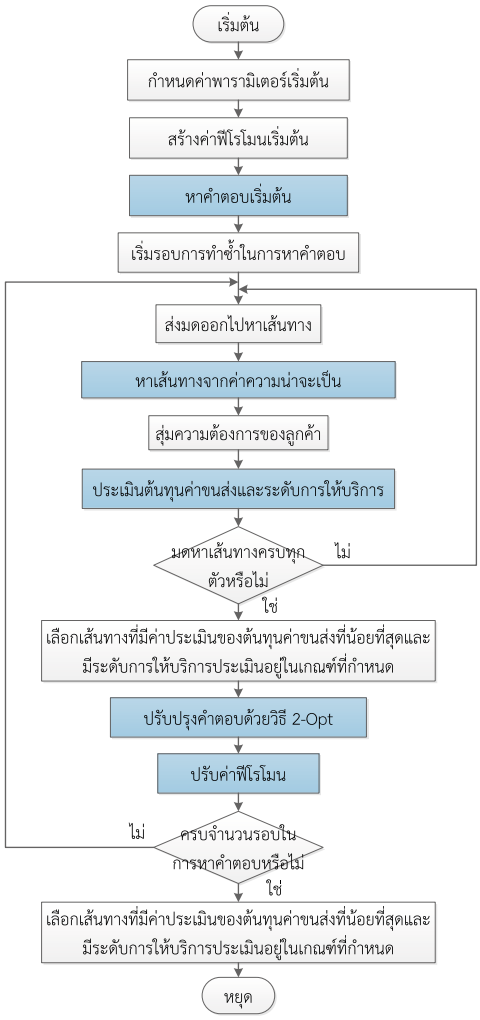
ค่าคาดหมายของต้นทุนค่าขนส่งเมื่อเกิดความล้มเหลว (Failure) บนเส้นทางที่ใช้ส่งสินค้า สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$
\begin{aligned}
&Q(x) \\
&= 2\sum_{j=1}^{t}\sum_{\ell=1}^{j} P\left(\sum_{s=1}^{j}\xi_{p_s} \leq \ell D < \sum_{s=1}^{j+1}\xi_{p_s}\right) c_{0p_j}; \\
&\forall p = \{1, \ldots, m\}
\end{aligned}
\qquad (3.11)
$$

โดย s คือ ดัชนีของลำดับการส่งสินค้า ℓ คือ ดัชนีของครั้งที่เกิดความล้มเหลวในการส่งสินค้าให้กับลูกค้าลำดับที่ j ของรถบรรทุกคันที่ p ξ_{p_s} คือ ความต้องการของลูกค้าลำดับที่ s บนเส้นทางของรถบรรทุกคันที่ p และ c_{0p_j} คือ ต้นทุนต่อครั้งของการส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าลำดับที่ j บนเส้นทางของรถบรรทุกคันที่ p

3.2 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด เป็นวิธีค้นหาคำตอบที่เลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของมดเมื่อมดพบแหล่งอาหาร มันจะทิ้งสารที่เรียกว่าฟีโรโมนไว้บนเส้นทางที่เดินกลับสู่รัง เพื่อให้มดตัวอื่นสามารถตามรอยไปยังแหล่งอาหารได้โดยมดจะเลือกเส้นทางจากความเข้มข้นของฟีโรโมนที่มีค่ามากในการหาเส้นทางครั้งถัดไป



รูปที่ 2 แผนภูมิขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหา CVRPSD

รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหา CVRPSD โดยเริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (จากผู้ใช้งาน) ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของปัญหาและพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดแล้วทำการสร้างค่าฟีโรโมนเริ่มต้น จากนั้น ทำการหาคำตอบเริ่มต้นของปัญหาด้วยวิธีค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด ในแต่ละรอบของการหาคำตอบมดแต่ละตัวจะหาเส้นทางที่เป็นไปได้โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นแล้วทำการสุ่มค่าความต้องการของลูกค้า (Sampling Demand) เพื่อประเมินค่าคาดหมาย (Expected Value) ของเส้นทางที่ได้ ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการจากกลุ่ม

ตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมา โดยเส้นทางของมดที่ดีที่สุดจะถูกเลือกไปปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt จากนั้นจะนำเส้นทางที่ได้ไปปรับค่าฟีโรโมน กระบวนการหาคำตอบจะทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนด ซึ่งเส้นทางที่ให้ค่าประเมินดีที่สุดจะถูกรายงาน

พารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบที่สำคัญได้แก่

จำนวนรอบทั้งหมดในการหาคำตอบ (T)

จำนวนมดที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (M)

ค่าที่กำหนดอิทธิพลของการใช้ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน (α)

ค่าที่กำหนดอิทธิพลของการใช้ค่าทัศนวิสัยของมด (β)

อัตราการระเหยของฟีโรโมน (ρ)

อัตราการเพิ่มของฟีโรโมน (Δ)

ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (r) ที่ใช้ในการประเมิน (Sample Size)

3.2.1 การหาคำตอบเริ่มต้น

การหาคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด (Nearest Neighbor Search, NNS) เป็นวิธีหาเส้นทางที่ให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีสุ่มคำตอบ (Random Solution) การหาเส้นทางของรถบรรทุกแต่ละคันจะเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ศูนย์กระจายสินค้า โดยรถจะไปส่งสินค้าให้กับลูกค้าที่มีระยะทางที่น้อยที่สุดจากตำแหน่งของลูกค้าปัจจุบัน จนกว่าปริมาณสินค้าที่เหลือมีไม่เพียงพอหรือลูกค้าได้รับสินค้าครบทุกราย โดยลูกค้าแต่ละรายต้องรับสินค้าได้จากรถบรรทุกเพียงคันเดียว

3.2.2 การหาเส้นทางจากค่าความน่าจะเป็น

คำตอบที่เป็นไปได้ของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ คือลำดับของลูกค้าบนเส้นทางที่ใช้ในการส่งสินค้า การเลือกเส้นทางในขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดจะใช้ค่าความน่าจะเป็นที่มดจะเลือกลูกค้า j จากตำแหน่งของลูกค้า i ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.12)

$$P_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^{\alpha}[\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum_{z \in N}[\tau_{iz}]^{\alpha}[\eta_{iz}]^{\beta}}\ ;$$

$$\forall j \in N;\ N \subset V \qquad \textbf{(3.12)}$$

N คือ เซตของลูกค้าที่ยังไม่ได้รับสินค้า ค่าพารามิเตอร์ α และ β เป็นค่าที่กำหนดอิทธิพลของการใช้ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน (τ_{ij}) และค่าทัศนวิสัยของมด (η_{ij}) ตามลำดับ

ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนเป็นข้อมูลที่สำคัญในการสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ของเส้นทางการเดินรถ โดยในช่วงเริ่มต้นค่าฟีโรโมนจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้งหมด และเก็บไว้ในรูปของเมทริกซ์ขนาด $(n+1)$ x $(n+1)$ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วย $[\tau_{ij}]\ ; i,j \in \{0,\dots,n\}$ โดยที่ 0 คือศูนย์กระจายสินค้า และ n คือจำนวนลูกค้าทั้งหมด

ค่าทัศนวิสัยของมดเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเลือกเส้นทางการเดินรถ โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาแค่ระยะทางจากลูกค้า i ไปยังลูกค้า j เท่านั้น แต่ได้ประยุกต์ใช้ฟังก์ชันแบบประหยัด (Saving Function) [24] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการหาคำตอบให้ดีขึ้น โดยค่าทัศนวิสัยของมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13)

$$\eta_{ij} = \frac{s_{ij}}{d_{ij} + 1} = \frac{d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}}{d_{ij} + 1};$$

$$\forall i,j \in \{0,\dots,n\} \qquad \textbf{(3.13)}$$

โดย s_{ij} คือค่าของฟังก์ชันแบบประหยัดหรือระยะทางที่สามารถลดได้โดยไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขของการส่งสินค้าเมื่อไปส่งสินค้าให้กับลูกค้า j ต่อจากลูกค้า i แทนที่จะกลับไปที่ศูนย์กระจายสินค้าก่อนแล้วจึงไปส่งสินค้าให้กับลูกค้า j d_{i0} คือระยะทางจากลูกค้า i ไปยังศูนย์กระจายสินค้า d_{0j} คือระยะทางจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า j และ d_{ij} คือระยะทางจากลูกค้า i ไปยังลูกค้า j และ 1 เป็นค่าที่ถูกเพิ่มเพื่อป้องกันการหาค่าไม่ได้ในกรณีที่ d_{ij} มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.3 การประเมินต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการ

เนื่องจากความต้องการของลูกค้ามีค่าที่ไม่แน่นอน ต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการจึงไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงและต้องใช้การประมาณค่า (Estimation) งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Technique) จาก

รูปแบบการแจกแจงของความต้องการที่กำหนดขึ้น เพื่อประเมินค่าคาดหมาย (Expected Value) ของต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการภายใต้ความต้องการที่ไม่แน่นอน

การสุ่มตัวอย่างหนึ่งครั้งคือหนึ่งเหตุการณ์ (Scenario) ของการจำลองเส้นทางการเดินรถ เส้นทางที่มดแต่ละตัวหาได้จะถูกนำมาประเมินต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการตามกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมา โดยงานวิจัยนี้ได้คิดต้นทุนค่าขนส่งจากระยะทางรวมของการส่งสินค้า และวัดระดับการให้บริการจากสัดส่วนของจำนวนรถบรรทุกที่สามารถส่งสินค้าให้กับลูกค้าตามเส้นทางที่กำหนดไว้โดยไม่เกิดการล้มเหลว

งานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าเฉลี่ย (Average Value) ในการประเมินค่าคาดหมายของเส้นทางการเดินรถโดยมีสมมติฐานว่าแต่ละเหตุการณ์มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นเท่ากันซึ่งค่าเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.14)

$$\hat{a}^k(x) = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} a_i^k(x) \; ; \quad \forall k \in \{c; w\} \qquad (3.14)$$

โดย $\hat{a}^k(x)$ คือค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งของเส้นทาง x (ในกรณี $k = c$) หรือค่าประเมินของระดับการให้บริการของเส้นทาง x (ในกรณี $k = w$) และ r คือขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการประเมิน

3.2.4 การปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt

ในแต่ละรอบของการหาคำตอบ เส้นทางที่ให้ค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งที่น้อยที่สุดและมีระดับการให้บริการอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจะถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt โดยกระบวนการปรับปรุงคำตอบจะใช้การสลับเส้นเชื่อม (Edge) สองเส้นที่ไม่อยู่ติดกันโดยพิจารณาเส้นเชื่อมทุกคู่ที่เป็นไปได้ ซึ่งการสลับจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นทางใหม่ที่ได้มีค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งน้อยกว่าของเส้นทางเดิม และมีระดับการให้บริการที่ประเมินอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

3.2.5 การปรับค่าฟีโรโมน

ข้อมูลของฟีโรโมนควรได้รับการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มดสามารถหาคำตอบได้ดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีปรับค่าฟีโรโมนเป็นสองส่วนคือการปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ (Local Pheromone Update) และการปรับค่าฟีโรโมนวงกว้าง (Global Pheromone Update) การปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่เป็นการปรับค่าฟีโรโมนโดยใช้คำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบของการทำซ้ำ ส่วนการปรับค่าฟีโรโมนวงกว้างเป็นการปรับค่าฟีโรโมนโดยใช้คำตอบที่ดีที่สุดตั้งแต่ที่ได้หามาซึ่งในการปรับค่าแต่ละครั้งค่าฟีโรโมนอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับเส้นทางที่พิจารณา การปรับค่าฟีโรโมนสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ การลดค่าฟีโรโมนและการเพิ่มค่าฟีโรโมน

การลดค่าฟีโรโมนจะกระทำกับทุกๆ ค่าของฟีโรโมน ทั้งในการปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่และปรับค่าฟีโรโมนวงกว้างค่าฟีโรโมนจะถูกลดเป็นสัดส่วนที่เท่ากัน (โดยใช้อัตราการระเหย $(\rho \in [0,1])$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.15)

$$\tau_{ij} = (1-\rho)\cdot\tau_{ij} \; ; \quad \forall i,j \in \{0,\dots,n\} \qquad (3.15)$$

การปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ และการปรับค่าฟีโรโมนวงกว้างจะใช้วิธีที่เหมือนกันในการเพิ่มค่าฟีโรโมน การเพิ่มค่าฟีโรโมนจะกระทำกับค่าฟีโรโมนบนเส้นทางที่ดีที่สุด (x_h^*) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (3.16) โดย h แทนดัชนีของเส้นทางที่ถูกปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ และเส้นทางที่ถูกปรับค่าฟีโรโมนวงกว้าง (g)

$$\tau_{ix_h^*(i)} = \tau_{ix_h^*(i)} + \Delta \; ; \quad \forall i \in \{0,\dots,n\} \; ; \quad \forall h \in \{1,\dots,W; g\} \qquad (3.16)$$

โดย $\tau_{ix_h^*(i)}$ คือค่าฟีโรโมนระหว่างลูกค้า i กับลูกค้าที่อยู่บนเส้นทางที่ดีที่สุด x_h^* $x_h^*(i)$ คือ หมายเลขของลูกค้าที่ถัดจากลูกค้า i บนเส้นทางที่ดีที่สุด x_h^* Δ คืออัตราการเพิ่มของฟีโรโมน $(\Delta > 0)$ และ W คือ จำนวนเส้นทางที่ดีที่สุดทั้งหมดที่ได้จากการหาคำตอบในแต่ละรอบของการทำซ้ำ

4. การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ โดยใช้ตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถจำนวน 24 ตัวอย่าง ซึ่งจากความรู้ของผู้วิจัย ยังไม่มีตัวอย่างปัญหา CVRPSD ที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบเชิงกำหนดจากงานวิจัยของ Fukasawa และคณะ [25] ซึ่งหาได้จากเว็บไซต์ www.coin-or.org/SYMPHONY/branchandcut/VRP/data มาดัดแปลงใช้ในงานวิจัยนี้ โดยค่าความต้องการของปัญหาจะถูกแทนที่ด้วยค่าที่ไม่แน่นอนโดยใช้รูปแบบการแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform Distribution) และกำหนดช่วงของความต้องการให้มีค่าแปรผันจากค่าความต้องการเดิมเท่ากับ ±10%

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างปัญหาที่ใช้ทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยชื่อตัวอย่างปัญหา จำนวนรถบรรทุก ความจุของรถบรรทุกและจำนวนลูกค้า ตามลำดับ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างปัญหาที่ใช้ทดสอบ

ตัวอย่างปัญหา	จำนวนรถบรรทุก	ความจุของรถบรรทุก	จำนวนลูกค้า
A-n33-k5	5	100	32
A-n53-k7	7	100	52
A-n64-k9	9	100	63
A-n80-k10	10	100	79
B-n34-k5	5	100	33
B-n41-k6	6	100	40
B-n45-k5	5	100	44
B-n51-k7	7	100	50
B-n66-k9	9	100	65
B-n78-k10	10	100	77
E-n22-k4	4	6000	21
E-n23-k3	3	4500	22
E-n33-k4	4	8000	32
E-n76-k10	10	140	75
F-n45-k4	4	2010	44
F-n72-k4	4	30000	71
F-n135-k7	7	2210	134
M-n101-k10	10	200	100
M-n121-k7	7	200	120
P-n19-k2	2	160	18
P-n55-k7	7	170	54
P-n60-k15	15	80	59
P-n76-k5	5	280	75
P-n101-k4	4	400	100

4.1 การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วนคือ 1. การประเมินต้นทุนค่าขนส่งและระดับการให้บริการของเส้นทางที่เหมาะที่สุดจากปัญหาเดิมโดยใช้ความต้องการที่มีค่าไม่แน่นอน 2. การหาเส้นทางของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบสโทแคสติกในกรณีไม่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการและ 3. การหาเส้นทางของปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถแบบสโทแคสติกในกรณีกำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำที่ 85% ซึ่งการหาคำตอบในส่วนที่สองและสามมีวัตถุประสงค์ที่เหมือนกันคือเพื่อหาเส้นทางที่ให้ค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งที่น้อยที่สุด และประเมินระดับการให้บริการที่เกิดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าประเมินที่ได้กับค่าประเมินของ

คำตอบในส่วนที่หนึ่ง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้นจากปัญหาเดิม

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error Method) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วย จำนวนรอบทั้งหมดในการหาคำตอบ $(T=500)$ จำนวนมด $(M=200)$ อิทธิพลของค่าฟีโรโมน $(\alpha=1)$ อิทธิพลของค่าทัศนวิสัยมด $(\beta=2)$ อัตราการระเหยของฟีโรโมน $(\rho=0.025)$ อัตราการเพิ่มของฟีโรโมน $(\Delta=0.1)$ และขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการประเมิน $(r=100)$

ในการทดลองแต่ละปัญหาจะถูกทดลองซ้ำ 10 ครั้งโดยใช้หน่วยประมวลผล Intel®Core i5, 2.5 GHz แล้วบันทึกค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่ง ค่าประเมินของระดับการให้บริการ และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

4.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกับตัวอย่างปัญหาที่ทดสอบทั้ง 10 ครั้ง ซึ่งประกอบด้วย ค่าประเมินของเส้นทางที่เหมาะที่สุด (ค่าในคอลัมน์ที่ 3 ถึง 5) ค่าประเมินของคำตอบในกรณีไม่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการ (ค่าในคอลัมน์ที่ 6 ถึง 8) และค่าประเมินของคำตอบในกรณีกำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำที่ 85% (ค่าในคอลัมน์ที่ 10 ถึง 12)

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ผลการทดลองในส่วนที่หนึ่งค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งเฉลี่ยของเส้นทางที่เหมาะที่สุดที่ได้ส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเดิมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่าต้นทุนค่าขนส่งของคำตอบที่เหมาะที่สุดเมื่อความต้องการมีค่าไม่แน่นอน (Stochastic Demand) ย่อมมีค่ามากกว่าต้นทุนค่าขนส่งของคำตอบที่เหมาะที่สุดจากปัญหาเดิมซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 10.00%

ผลการทดลองในส่วนที่สอง จะเห็นได้ว่า ค่าประเมินที่ได้ของคำตอบในกรณีที่ไม่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการส่วนใหญ่มีค่าที่ดีกว่าค่าประเมินของคำตอบที่ได้ในส่วนที่หนึ่ง แม้คำตอบที่ได้จะไม่สามารถรับประกันว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากการแก้ปัญหาสโทแคสติกก็ตาม ยกตัวอย่างเช่น ในตัวอย่างปัญหา A-n53-k7 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้นจากปัญหาเดิมมีค่าน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด จาก 16.48% เป็น 6.86% และมีค่าประเมินของระดับการให้บริการเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 73.12% เป็น 94.40% เป็นต้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความต้องการมีค่าไม่แน่นอน เส้นทางที่เหมาะที่สุดจากปัญหาเดิมอาจไม่ใช่เส้นทางที่ดีที่สุดอีกต่อไป

ผลการทดลองในส่วนที่สาม จะเห็นได้ว่า ค่าประเมินของคำตอบในกรณีที่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำที่ 85% มีค่าต่างจากค่าประเมินของคำตอบในกรณีที่ไม่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการไม่มากเช่น ในตัวอย่างปัญหา M-n121-k7 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้นจากปัญหาเดิมของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากัน คือ 7.18% แต่ในกรณีที่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำที่ 85% พบว่าค่าประเมินของระดับการให้บริการเฉลี่ยมีค่าที่ดีกว่า แต่ก็ใช้เวลาในการประมวลผลที่นานกว่าอย่างไรก็ตามการกำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำอาจส่งผลให้ไม่สามารถหาคำตอบได้ เนื่องจากปัญหามีค่าประเมินของระดับการให้บริการไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนด เช่น ในตัวอย่างปัญหา B-n45-k5 และ B-n51-k7

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีความจุรถจำกัดภายใต้ความต้องการแบบสโทแคสติก จากการทดสอบกับตัวอย่างปัญหาพบว่า เส้นทางที่เหมาะที่สุดจากปัญหาเดิมไม่สามารถให้ค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งที่ดีที่สุดเมื่อความต้องการมีค่าไม่แน่นอน ในขณะที่คำตอบจากวิธีที่นำเสนอสามารถให้ค่าประเมินของต้นทุนค่าขนส่งที่น้อยกว่า และมีระดับการให้บริการที่สูงกว่าทั้งในกรณีที่ไม่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการ และกรณีที่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำที่ 85%

ในด้านของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล การแก้ปัญหาสโทแคสติกและการกำหนดเกณฑ์การให้บริการจะทำให้การหาคำตอบใช้เวลานานขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการใช้งานเมื่อใช้กับปัญหาขนาดใหญ่

ตารางที่ 2 ผลการทดลองกับตัวอย่างปัญหาที่ทดสอบ

ตัวอย่างปัญหา	ต้นทุนค่าขนส่งของเส้นทางที่เหมาะที่สุด	ค่าประเมินของเส้นทางที่เหมาะที่สุด			ไม่กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการ				กำหนดเกณฑ์ของระดับการให้บริการขั้นต่ำที่ 85%			
		ต้นทุนค่าขนส่งเฉลี่ย	ต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้น (%)	ระดับการให้บริการเฉลี่ย (%)	ต้นทุนค่าขนส่งเฉลี่ย	ต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้น (%)	ระดับการให้บริการเฉลี่ย (%)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)	ต้นทุนค่าขนส่งเฉลี่ย	ต้นทุนค่าขนส่งที่เพิ่มขึ้น (%)	ระดับการให้บริการเฉลี่ย (%)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
A-n33-k5	661	694.09	5.01%	89.86	682.28	3.22%	98.33	22.10	683.85	3.46%	98.30	26.02
A-n53-k7	1010	1176.41	16.48%	73.12	1079.25	6.86%	94.40	42.21	1077.86	6.72%	94.10	50.27
A-n64-k9	1401	1646.91	17.55%	67.18	1563.81	11.62%	95.46	57.43	1560.09	11.36%	94.51	66.99
A-n80-k10	1763	2003.11	13.62%	81.88	1990.18	12.89%	93.45	116.41	1987.54	12.74%	93.53	398.39
B-n34-k5	788	879.04	11.55%	82.42	821.78	4.29%	97.91	23.22	824.03	4.57%	97.25	24.57
B-n41-k6	829	955.73	15.29%	77.60	869.74	4.91%	92.95	31.69	873.95	5.42%	92.73	28.96
B-n45-k5	751	813.87	8.37%	74.05	819.02	9.06%	77.64	35.45	-	-	-	-
B-n51-k7	1032	1212.81	17.52%	74.80	1207.31	16.99%	78.33	41.76	-	-	-	-
B-n66-k9	1316	1560.56	18.58%	69.84	1465.46	11.36%	90.93	93.39	1447.63	10.00%	92.31	98.06
B-n78-k10	1221	1460.05	19.58%	67.70	1381.47	13.14%	94.61	124.37	1370.54	12.25%	93.98	207.43
E-n22-k4	375	381.27	1.67%	92.82	381.58	1.75%	92.67	14.09	381.31	1.68%	92.80	13.80
E-n23-k3	569	590.60	3.80%	89.41	570.80	0.32%	99.61	14.44	570.83	0.32%	99.59	14.09
E-n33-k4	835	939.25	12.49%	82.16	882.27	5.66%	98.90	26.44	881.08	5.52%	98.46	21.54
E-n76-k10	830	889.66	7.19%	77.92	926.26	11.60%	81.90	138.18	927.79	11.78%	84.20	376.11
F-n45-k4	724	773.30	6.81%	75.51	753.16	4.03%	89.14	44.46	751.70	3.83%	87.85	45.21
F-n72-k4	237	267.88	13.03%	76.13	253.33	6.89%	89.15	95.76	255.13	7.65%	91.58	94.39
F-n135-k7	1162	1288.17	10.86%	87.13	1282.40	10.36%	86.34	846.89	1281.76	10.31%	92.91	961.58
M-n101-k10	820	965.53	17.75%	79.92	905.68	10.45%	89.80	160.50	906.20	10.51%	89.28	228.21
M-n121-k7	1034	1067.01	3.19%	72.50	1108.21	7.18%	82.16	429.17	1108.23	7.18%	85.95	437.58
P-n19-k2	212	217.49	2.59%	90.10	217.43	2.56%	90.29	12.09	217.51	2.60%	90.24	12.27
P-n55-k7	568	596.60	5.04%	87.16	595.99	4.93%	96.45	45.88	596.97	5.10%	96.98	49.73
P-n60-k15	968	1067.24	10.25%	81.50	1039.34	7.37%	92.27	59.59	1049.82	8.45%	90.75	58.27
P-n76-k5	627	637.23	1.63%	80.98	662.64	5.68%	85.56	105.83	663.61	5.84%	88.92	113.27
P-n101-k4	681	682.66	0.24%	98.27	700.67	2.89%	97.85	214.22	703.24	3.27%	95.72	199.24
ค่าเฉลี่ย			**10.00%**			**7.33%**		**116.48**		**6.84%**		**160.27**

6. เอกสารอ้างอิง

1. Bertsimas, D.J., 1992, "A Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand," *Operation Research Society of America*, 40 (3), pp. 574-585.

2. Marinkis, Y., Iordanidou, G.R. and Marinaki, M., 2013, "Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands," *Journal of Applied Soft Computing*, 13, pp. 1693-1704.

3. Laporte, G., Louveaux, F.V. and Hamme, L.V., 2002, "An Integer L-Shaped Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands," *European Journal of Operation Research*, 50, pp. 415-423.

4. Gendreau, M., Laporte, G. and Seguin, R., 1996, "Stochastic Vehicle Routing," *European Journal of Operations Research*, 88, pp. 3-12.

5. Gendreau, M., Jabali, O. and Rei, W., 2016, "50th AnniversaryInvited Article, Future Research Directions in Stochastic Vehicle Routing," *Journal of Transportation Science*, 50 (4), pp. 1163-1173.

6. Zhang, C., Dellaert, N.P., Zhao, L., Woensel, T.V. and Sever, D., 2013, "Single Vehicle Routing with Stochastic Demands: Approximate Dynamic Programming," *Journal of Transportation Science, BETA Publicatie: Working Papers*, 425, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

7. Yang, W.H., Mathur, K. and Ballou, R.H., 2000, "Stochastic Vehicle Routing Problem with Restocking," *Journal of Transportation Science*, 34 (1), pp. 99-112.

8. Ak, A. and Erera, A.L., 2007, "A Paired-Vehicle Recourse Strategy for The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands," *Journal of Transportation Science*, 41 (2), pp. 222-237.

9. Ishigaki, A., 2016, "An Application to Stochastic Vehicle Routing Problem in a Waste Collection," *5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics*, pp. 1151-1156.

10. Oyola, J., Arntzen, H. and Woodruff, D.L., 2016, "The Stochastic Vehicle Routing Problem, A Literature Review, Part II: Solution Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg and EURO," *European Operational Research Societies*, Springer.

11. Zanakis, S.H. and Evans, J.R., 1981, "Heuristic Optimization: Why, When, and How to Use It," *Journal of Heuristics*, 11 (5), pp. 84-91.

12. Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colornu, A., 1996, "Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents," *Proceeding of IEEE Transportations on System*, pp. 29-41.

13. Bullnheimer, B., Hartl, R.F. and Strauss, C., 1998, "Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem," in S. Voss, S. Martello, I.H. Osman and C. Roucairol (Eds.) *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, Kluwer, Boston.

14. Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P., 1979, "The Vehicle Routing Problem," in N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth and C. Sandi, (Eds.) *Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester.

15. Bullnheimer, B., Hartl, R.F. and Strauss, C., 1999, "An Improved Ant System Algorithm for the Vehicle Routing Problem," *Annals of Operations Research*, 89, pp. 319-328.

16. Bin, Y., Zhong, Z.Y. and Baozhen, Y., 2009, "An Improved Ant Colony Optimization for Vehicle Routing Problem," *European Journal of Operational Research*, 196 (1), pp. 171-176.

17. Rego, C. and Roucairol, C., 1996, "A Parallel Tabu Search Algorithm Using Ejection Chains for the Vehicle Routing Problem," in I. Osman and Kelly, J. (Eds.) *Meta-Heuristics : Theory and Applications*, Kluwer, Boston.

18. Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G., 1994, "A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing

Problem," *Management Science*, 40, pp. 1276-1290.

19. Osman, I., 1993, "Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem," *Annals of Operations Research*, 41, pp. 421-451.

20. Christiansen, C.H. and Lysgaard, J., 2007, "A Branch-and-Price Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands," *Operations Research Letters*, 35, pp. 773-781.

21. Goodson, J.C., Ohlmann, J.W. and Thomas, B.W., 2012, "Cyclic-Order Neighborhoods with Application to the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand," *European Journal of Operations Research*, 217, pp. 312-323.

22. Reimann, M., 2005, "Analyzing a Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands Using Ant Colony Optimization," in A. Jaszkiewicz, M. Kaczmarek, J. Zak, and M. Kubiak, (Eds.) *Advanced OR and AI Methods in Transportation*, Poznan University of Technology, pp. 764-769.

23. Bertazzi, L. and Secomandi, N., 2018, "Faster Rollout Search for The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Restocking," *European Journal of Operations Research*, 000, pp. 1-11.

24. Clarke, G. and Wright, J.W., 1964, "Scheduling of Vehicle from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Journal of Operations Research*, 12, pp. 568-581.

25. Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., Poggi De Aragao, M., Reis, M., Uchoa, E. and Werneck, R.F, 2006, "Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem," *Mathematical Programming*, 106 (3), pp. 491-511.