

ฮิวริสติกแบบสองเฟสสำหรับการจัดเส้นทางรถขนส่ง : กรณีศึกษาร้านขายส่งนมแห่งหนึ่ง ในจังหวัดกาฬสินธุ์

อนุชา ศรีบุรีรัมย์^{*1}, ไทยทัศน์ สุดสวนสี², วราภรณ์ วโรรส³ และ อามิณห์ หล้าวงศ์⁴

^{1,2,3,4} มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ 62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ. กาฬสินธุ์ 46000

Received: 21 July 2021; Revised: 21 January 2022; Accepted: 1 February 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอฮิวริสติก สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งแบบความจุของยานพาหนะจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แนวคิดของอัลกอริทึมฟิชเชอร์แอนด์ไจคุมาร์ (Fisher and Jaikumar Algorithm, FJA) สำหรับการหาผลเฉลยของปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะทางรวมต่ำสุด โดยขั้นตอนของฮิวริสติก FJA ที่นำเสนอแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 กำหนดจุดที่ตั้งของยานพาหนะ (Seed) ขั้นตอนที่ 2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปัญหาการมอบหมายงานทั่วไป (Generalized Assignment Problem, GAP) เพื่อจัดสรรลูกค้าให้แต่ละกลุ่ม และขั้นตอนสุดท้าย จัดลำดับการขนส่งสินค้าให้แต่ละกลุ่ม โดยใช้แบบจำลองปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem Model, TSP model) ผลการทดสอบพบว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพอยู่ระดับที่ดี สามารถลดระยะทางขนส่งรวมจากเดิม 1,093.4 กิโลเมตร ลดลงเหลือ 766.15 กิโลเมตร คิดเป็น 29.93 %

คำสำคัญ: อัลกอริทึมฟิชเชอร์แอนด์ไจคุมาร์, การจัดเส้นทางรถขนส่ง, ปัญหาการมอบหมายงานทั่วไป, ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย

* Corresponding author. E-mail: Anucha.sr@ksu.ac.th

^{1,2,3,4} อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

A Two-Phase Heuristic for Solving Vehicle Routing Problem: A Case Study of Snack Wholesale in Kalasin Province

Anucha Sriburum^{*1}, Thaithat Sudsuansee², Waraporn Waworot³ and Amin Lawong⁴

^{1,2,3,4} Kalasin University, 62/1 Kasetsoomboon Rd., Muang District, Kalasin 46000, Thailand

Received: 21 July 2021; Revised: 21 January 2022; Accepted: 1 February 2022

Abstract

This paper is to present a heuristic for solving the capacitated vehicle routing problem (CVRP). We apply the concept of Fisher and Jaikumar Algorithm (FJA) for solving CVRP in a case study. The objective of this case is to minimize total distance traveled. A variant FJA consists of three steps. The first step is to generate the seed vehicles. The second step is to formulate the Generalized Assignment Problem (GAP) to allocate customers into each group. The Final step is to generate the transport route using Travelling Salesman Problem Model (TSP model). The computational results showed that the proposed algorithm provided effective solutions. The total distance is decreased from 1,093.4 kilometers to 766.15 kilometers can be reduced to 29.93%.

Keywords: Fisher and Jaikumar algorithm, Vehicle routing problem, Generalized Assignment Problem, Heuristic, Travelling Salesman Problem

* Corresponding author. E-mail: Anucha.sr@ksu.ac.th

^{1,2,3,4} Lecturer in Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

1. บทนำ

ปัจจุบันองค์กรธุรกิจ ในภาคอุตสาหกรรมและบริการต่าง ๆ มีการแข่งขันสูง การที่องค์กรจะอยู่รอดในตลาดการแข่งขันที่นับวันสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง องค์กรจะต้องปรับตัวให้สามารถแข่งขันในตลาดการค้า ซึ่งการลดต้นทุนสินค้าและบริการ รวมถึงการสร้างความพึงพอใจสูงสุดให้แก่ลูกค้าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อความอยู่รอดขององค์กรธุรกิจ โดยต้นทุนการขนส่งเป็นหนึ่งในต้นทุนโลจิสติกส์ ที่มีความสำคัญต่อต้นทุนการผลิตสินค้า จากข้อมูลรายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทยประจำปี 2562 ของสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ [1] พบว่า ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าเป็นต้นทุนโลจิสติกส์ที่มีสัดส่วนมากที่สุดร้อยละ 49.7 รองลงมาคือ ต้นทุนการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง ร้อยละ 42.8 และต้นทุนการบริหารจัดการ ร้อยละ 7.5 โดยปัจจัยด้านราคาขายน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ทำให้ต้นทุนการขนส่งสูง เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ทำให้ธุรกิจและหน่วยงานต่าง ๆ ให้ความสำคัญเกี่ยวกับต้นทุนการขนส่งเพิ่มขึ้น หากองค์กรธุรกิจใดสามารถบริหารจัดการต้นทุนการขนส่งอย่างมีประสิทธิภาพ จะทำให้ต้นทุนของการผลิตสินค้าต่ำ ซึ่งหมายถึงองค์กรธุรกิจจะได้ผลกำไรเพิ่มขึ้น และธุรกิจจะมีความสามารถในการแข่งขันในตลาดการค้าได้ดียิ่งขึ้น

ปัญหาการจัดเส้นทางของการขนส่งถูกพัฒนามาจากปัญหาการจัดเส้นทางของพนักงานขาย (Travel Salesman Problem) โดยปัญหาการจัดเส้นทางของการขนส่งถูกศึกษาอย่างเป็นทางการครั้งแรกในงานวิจัยของ Dantzig and Ramser [2] ปัญหาการจัดเส้นทางของการขนส่ง (Vehicle Routing Problem, VRP) โดยปัญหา Classical VRP เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization problem) ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณ เนื่องจากปัญหา VRP เป็นปัญหาแบบ NP-hard ฌัฎฐ์ดนัย สุพัฒน์ธนานนท์ และปณิทร เรืองเชิงชุม [3] ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของปัญหา Classical VRP เป็นการจัดเส้นทางของการขนส่งยานพาหนะ ให้เกิดต้นทุนการขนส่งโดยรวมต่ำสุด หรือระยะทางโดยรวมต่ำสุด โดยมีข้อจำกัดดังนี้ (1) ยานพาหนะแต่ละคันจะเริ่มออกเดินทางจากศูนย์กระจายสินค้า (Depot) ไปยังกลุ่มลูกค้า (Customers) เพื่อให้บริการรับหรือส่งสินค้า

ให้กับลูกค้าทุกราย เมื่อรับหรือส่งสินค้าครบทุกรายแล้ว ยานพาหนะทุกคันจะต้องเดินทางกลับมายังศูนย์กระจายสินค้าเดิม (2) ลูกค้าแต่ละรายจะได้รับบริการจากยานพาหนะเพียงคันเดียวเท่านั้น (3) ลูกค้าแต่ละรายจะเป็นจุดของความต้องการ (Demand) สินค้าเหล่านี้จะถูกเก็บขนโดยใช้ยานพาหนะที่มีอยู่ ซึ่งปริมาณสินค้ารวมที่เก็บขนจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะนั้น จากการทบทวนงานวิจัยของ สุวิมล คำแสน และคณะ [4] และ นรงค์ วิชาพา และคณะ [5] พบว่าในการแก้ปัญหา VRPs สามารถจำแนกได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีแบบแม่นยำตรง (Exact Method) และวิธีเชิงฮิวริสติก (Heuristic/Meta-Heuristic) ข้อดีของวิธีแบบแม่นยำคือได้ผลเฉลยดีที่สุด (Optimal Solution) แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการประมวลผลนาน ถ้าหากปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นอาจไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมใช้วิธีเชิงฮิวริสติกในการแก้ปัญหา VRPs แม้ว่าจะไม่ยืนยันว่าผลเฉลยที่ได้จากวิธีเชิงฮิวริสติกเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ผลเฉลยที่ได้สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติหรือการใช้งานจริง ข้อดีที่สำคัญของวิธีเชิงฮิวริสติกได้แก่การใช้เวลาในการประมวลผลรวดเร็วกว่าวิธีแบบแม่นยำ และผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีแบบแม่นยำ ซึ่งอัลกอริทึมพีซเซอร์แอนต์ไจคัวร์เป็น ฮิวริสติกที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหา VRPs อย่างแพร่หลายในวรรณกรรม [6] จุดเด่นของอัลกอริทึมนี้มีขั้นตอนการคำนวณชัดเจน เข้าใจง่าย แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริงได้

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทที่ประกอบกิจการขนส่งสินค้าประเภทขนมซึ่งมีที่ตั้งอยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยมีลูกค้าจำนวน 180 ราย ครอบคลุมพื้นที่อำเภอภูพานรายณ์ นามน สมเด็จ กมลาไสย และเมืองกาฬสินธุ์ ซึ่งในปัจจุบันการจัดเส้นทางของการขนส่งของบริษัทยังไม่เป็นระบบ โดยยังคงใช้ประสบการณ์ของพนักงานขนส่งสินค้าในการวางแผนเส้นทางของการขนส่งในแต่ละวัน ทำให้บริษัทมีต้นทุนการขนส่งสูง และไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างทันเวลา

ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวคิดของอัลกอริทึมพีซเซอร์แอนต์ไจคัวร์ สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางของการขนส่งของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นบริษัทขายส่งขนมแห่งหนึ่ง ในจังหวัดกาฬสินธุ์ โดยมีวัตถุประสงค์ของ

งานวิจัยนี้เพื่อหาเส้นทางการขนส่งที่มีระยะทางการขนส่งโดยรวมต่ำสุด ภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าทันเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ผู้วิจัยเชื่อว่าวิธีการที่นำเสนอจะสามารถนำไปประยุกต์ร่วมกับวิธีอื่น เช่น การค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search) หรือวิธีเชิงฮิวริสติก (ฮิวริสติก และเมตาฮิวริสติก) อื่นได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีเชิงฮิวริสติก สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งแบบความจุของยานพาหนะจำกัด ดังต่อไปนี้

2.1 ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งแบบความจุของยานพาหนะจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP)

ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งแบบความจุของยานพาหนะจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP) โดยทั่วไปหมายถึงปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่ง (Vehicle Routing Problem, VRP) การจัดเส้นทางการขนส่งเป็นการกำหนดยานพาหนะให้เดินทางไปรับหรือส่งสินค้าไปยังลูกค้าตามปริมาณความต้องการของลูกค้าที่สั่งซื้อ โดยปริมาณความจุของยานพาหนะที่ใช้สำหรับการขนส่งสินค้ามีความจำกัด ยานพาหนะจะเริ่มออกเดินทางจากศูนย์กระจายสินค้า (Depot) ไปยังลูกค้าแต่ละรายตามคำสั่งซื้อ และเมื่อรับหรือส่งสินค้าครบทุกรายแล้ว ยานพาหนะจะเดินทางกลับมายังศูนย์กระจายสินค้าที่เดิม ปัญหา VRP เป็นปัญหาที่สำคัญในระบบโลจิสติกส์ของทุกประเทศ หากต้นทุนการขนส่งต่ำจะทำให้ความสามารถในการแข่งขันด้านการตลาดจะมีศักยภาพเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัญหา VRP เป็นปัญหาที่ยากต่อการคำนวณ หรือปัญหาแบบเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าวิธีแก้ปัญห VRPs แบ่งเป็น 2 ประเภท นักวิจัยกลุ่มแรกได้นำเสนอวิธีแบบแม่นยำ (Exact method) สำหรับการแก้ปัญห VRPs เช่น Hokama et al. [7] ใช้วิธี Branch and Cut Oppen et al. [8] ใช้วิธี Column Generation Yu et al. [9] ใช้วิธี Branch-and-price อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้สามารถแก้ปัญห VRPs

ได้อย่างจำกัด ถ้าปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นอาจไม่สามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมแก้ปัญห VRPs ด้วยวิธีการฮิวริสติก (Heuristic) เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหจริง เนื่องจากเวลาการประมวลผลรวดเร็ว และได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด จากวิธีแม่นยำ นำใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพจัดเส้นทางเดินรถกรณีศึกษา ที่เป็นปัญหาด้านขนส่งสินค้าที่ไม่เกินปริมาณความจุของรถและการกระจายสินค้าไปยังลูกค้าโดยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ตัวอย่างเช่น วิธีฟิชเชอร์แอนด์ไจคุมาร์ (Fisher and Jaikumar Algorithm) [10] อัลกอริทึมแบบกวาด (Sweep Algorithm) [11] อัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) [12] และ Hanafi et al. [11] นำเสนอวิธีการใช้ Sweep Algorithm กับปัญหา CVRP แบ่งขั้นตอนในการแก้ปัญหาเป็นสองเฟส (1) จัดกลุ่มลูกค้า และ (2) สร้างเส้นทางขนส่ง เพื่อหาจำนวนยานพาหนะที่จัดส่งสินค้าให้กับลูกค้า โดยมีระยะทางรวมในการจัดส่งสินค้าที่ต่ำสุด จูตินนที ศรีสุวรรณดี และระพีพันธ์ ปิตาคะโส [13] ได้ประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมมดและปรับปรุงคุณภาพคำตอบด้วยการย้ายลูกค้าระหว่างเส้นทาง (Crossover -Move) การสลับสองตำแหน่ง (2-opt) และการย้ายหนึ่งตำแหน่ง (One-Move) ในการแก้ปัญห VRP โดยมีความจุของยานพาหนะมีจำกัด และลูกค้าแต่ละรายมีความต้องการไม่แน่นอน Ombuki et al. [14] ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) นำมาแก้ปัญห VRP แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Problem) โดยการหาจำนวนรถขนส่งที่น้อยที่สุดและมีผลรวมต้นทุนการขนส่งหรือระยะทางที่สั้นที่สุด ภิกขญา คงแก้ว และธนัญญา วสุศรี [15] ได้นำเสนอวิธีการพัฒนาฮิวริสติกตามหลักการ Clarke and Wright Saving Algorithm โดยการเพิ่มกระบวนการเลือกยานพาหนะและปรับเปลี่ยนวิธีการเลือกลูกค้าลำดับถัดไป สำหรับการจัดสรรเส้นทางการรับและส่งสินค้าที่มีชนิดและน้ำหนักที่หลากหลาย กนกวรรณ สุภักดี และคณะ [16] นำเสนอการพัฒนาการประยุกต์ใช้วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างในการจัดเส้นทาง เพื่อการพัฒนาแบบแผนการจัดเส้นทางการขนส่งนภายใต้เงื่อนไขด้านเวลาและความจุของรถขนส่งโรงเรียน Gendreau et al. [17] นำเสนอวิธีการ Tabu search สำหรับการแก้ปัญห

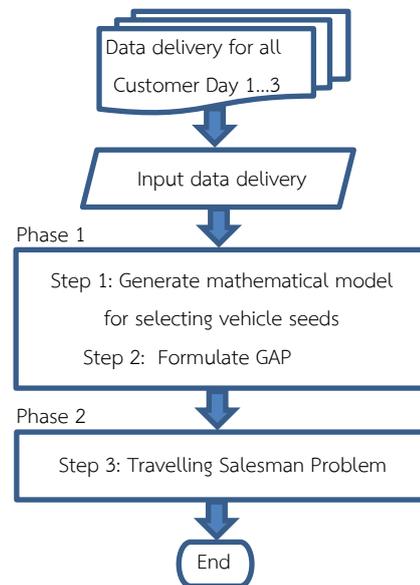
ยานพาหนะที่มีความแตกต่างกันโดยพิจารณาต้นทุนขนส่งที่ต่ำที่สุด Marinkis et al. [18] นำเสนอวิธี PSO สำหรับการแก้ปัญหา VRP โดยมีความต้องการไม่แน่นอน Chowmalia and Suktoa [19] ได้นำเสนออัลกอริทึมฟิชเชอร์แอนด์โจคูมาร์สำหรับการแก้ปัญหา MCVRP การจัดเส้นทางขนส่งแบบขยายพาหนะมีหลายช่องบรรจุ (Multi capacitated vehicle routing problem, MCVRP) สำหรับการขนส่งน้ำมันเพื่อจำหน่ายให้ลูกค้าในจังหวัดกาฬสินธุ์ ซึ่งมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้ (1) เลือกตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะ (Seed) (2) จัดกลุ่มลูกค้าโดยใช้แบบจำลองปัญหาการมอบหมายงานทั่วไป เพื่อจัดกลุ่มลูกค้าให้แต่ละยานพาหนะ และ (3) จัดเส้นทางขนส่งให้แต่ละกลุ่มหรือแต่ละยานพาหนะ Chowmalia and Suktoa [20] ได้นำเสนอฮิวริสติกแบบผสมผสานระหว่าง FJA และ Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) เพื่อปรับปรุงคำตอบของ FJA ให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นวิธี FJA เป็นหนึ่งในวิธีเชิงฮิวริสติกที่มีขั้นตอนที่ชัดเจน เข้าใจง่าย และมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง โดยทั่วไปวิธี Fisher and Jaikumar จะให้คุณภาพของคำตอบที่ดีกว่า ฮิวริสติกแบบประหยัด [10, 19-20] เนื่องจากขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งของ Seed จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของคำตอบ ดังนั้นขั้นตอนการเลือก Seeds จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธีนี้

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวคิดของ FJA มาประยุกต์ใช้กับบริษัทกรณีศึกษา โดยการปรับปรุงวิธีการเลือกตำแหน่งของ seed ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ที่สร้างขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคำตอบให้ดียิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้ เฟส 1) ประกอบด้วยการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะ (Seed) โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ เพื่อเลือกตำแหน่ง Seed และการจัดกลุ่มลูกค้าภายใต้ความจุของยานพาหนะจำกัด เฟส 2) การจัดเส้นทางขนส่งโดยใช้วิธี TSP

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยในบทความนี้จะเป็นการนำเสนอขั้นตอนการแก้ปัญหาการจัดส่งสินค้าประเภทนมในบริษัท

กรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฟิชเชอร์แอนด์โจคูมาร์ในการหาผลเฉลย โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีฟิชเชอร์แอนด์โจคูมาร์

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา

รวบรวมข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา โดยศึกษาการจัดส่งสินค้าและรวบรวมข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญ ประกอบด้วย จำนวนรถขนส่งสินค้า จุดที่ทำการส่งสินค้า ระยะทางการส่งสินค้า ความจุของรถส่งสินค้า ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าในปัจจุบัน โดยรวบรวมข้อมูลจำนวน 3 วัน

3.2 สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหา

สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหา VRP เริ่มจากการกำหนด ตัวดัชนี พารามิเตอร์ แปรตัดสินใจ สร้างสมการเป้าหมาย และข้อจำกัด ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

ดัชนี : กำหนดให้กราฟ $G = (V, A)$ โดย V แทนเซตของจุดทั้งหมด (nodes) ซึ่งประกอบด้วยจุดของศูนย์กระจายสินค้าและจุดของลูกค้า ซึ่ง $V = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ กำหนดให้จุดที่ 1 เป็นที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า ส่วนจุด $\{2, 3, 4, \dots, N\}$ แทนจุดของลูกค้า และ A แทนเซตของเส้นเชื่อมระหว่างจุดทั้งหมด ซึ่ง $(i, j) \in A$

พารามิเตอร์ : dt_{ij} แทนระยะทางการขนส่งจากจุด i ไปยังจุด j ; k แทนเซตของยานพาหนะ $k = \{1, 2, 3, \dots, k\}$; N แทนเซตของจุดทั้งหมด $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$; q_k แทนความจุของยานพาหนะคันที่ k

ตัวแปรตัดสินใจแบบไบนารี : x_{ijk} เท่ากับ 1 ถ้ามีการเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j โดยใช้ รถคันที่ k ; x_{ijk} เท่ากับ 0 ถ้าไม่มีการเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j โดยใช้รถคันที่ k ; Z_k เท่ากับ 1 ถ้ายานพาหนะคันที่ k มีการเดินทาง; Z_k เท่ากับ 0 ถ้ายานพาหนะคันที่ k ไม่มีการเดินทาง S จำนวนลูกค้าที่อยู่ในเส้นทาง และ V จำนวนลูกค้าทั้งหมด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:

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

ข้อจำกัด:

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

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

$$\sum_{i=1}^N x_{ipk} - \sum_{j=1}^N x_{jpk} = 0, \quad \forall k, \forall p \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1, i \neq j}^N x_{ijk} = 1, \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^N x_{ijk} = 1, \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N d_j x_{ijk} \leq q_k, \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i1k} = 1 \quad \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in S, i \neq j} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad S \subseteq V \setminus \{0\} \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$z_k \in \{0, 1\} \quad (11)$$

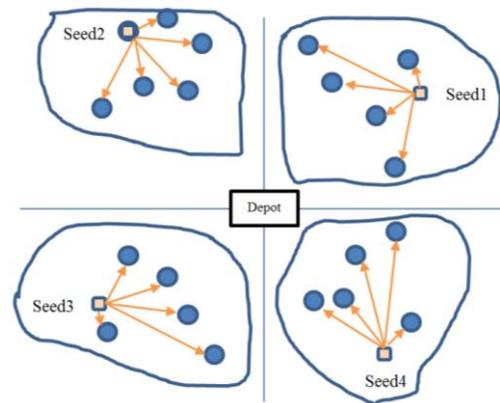
สมการที่ (1) เป็นสมการเป้าหมายระยะทางรวมต่ำสุด สมการที่ (2) เป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุด i และ j ซึ่งมีได้ไม่เกินจำนวนจุดทั้งหมด (N) เมื่อใช้ยานพาหนะ k โดย x_{ijk} จะมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อยานพาหนะคันที่ k ถูกใช้ สมการที่ (3) เป็นการประกันว่ายานพาหนะ k ไม่จำเป็นต้องออกจากที่ตั้งทุกคัน สมการที่ (4) เป็นการประกันว่าเมื่อยานพาหนะ k ไปรับสินค้าที่จุดใดแล้วต้องออกจากจุดนั้น สมการที่ (5) เป็นการประกันว่ายานพาหนะ k เดินทางเข้าไปรับสินค้าจากลูกค้า j ได้เพียง 1 รายเท่านั้น สมการที่ (6) เป็นการประกัน

ว่ายานพาหนะ k จะออกเดินทางจากจุด i เข้าไปรับสินค้าจากลูกค้า j ได้เพียง 1 รายเท่านั้น สมการที่ (7) เป็นการประกันว่าปริมาณสินค้ารวมที่บรรทุกด้วยยานพาหนะ k ต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะนั้นด้วย สมการที่ (8) เป็นการประกันว่ายานพาหนะ k ที่ออกเดินทางต้องกลับมาถึงที่ตั้ง สมการที่ (9) ป้องกันไม่ให้เกิดทัวร์ย่อย (subtour) สมการที่ (10) ถึงสมการที่ (11) แสดงตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวเลขแบบไบนารี

3.3 อัลกอริทึมแบบสองเฟส (Two-phase heuristic)

อัลกอริทึมแบบสองเฟสที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือ อัลกอริทึมพีชเซอร์แอนด์ไจคูมาร์ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะ (Seed) ซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะจะถูกกำหนดไว้ที่จุดใด ๆ ของลูกค้า การกำหนดตำแหน่งของ Seed ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ทุก ๆ ลูกค้าเป็นแคนดิเดต Seed โดยแนวคิดการกำหนด Seed ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เลือกตำแหน่งที่ตั้งสมมุติ (Seed) ที่ตำแหน่งของลูกค้า

จากรูปที่ 2 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดตำแหน่งของ Seed ได้ดังนี้

ดัชนี: i แทนที่ตั้งของแคนดิเดต Seed, $i = 1, 2, 3, \dots, I$;

j เป็นตำแหน่งของลูกค้า $j = 1, 2, 3, \dots, J$

พารามิเตอร์: dt_{ij} แทนระยะทางการขนส่งจากจุด Seed i ไปยังจุดลูกค้า j ; d_j แทนความต้องการสินค้าแต่ละ

ลูกค้า; q_k แทนความจุของยานพาหนะคันที่ k ; nv แทนจำนวนยานพาหนะที่ต้องการใช้

ตัวแปรตัดสินใจแบบไบนารี: x_{ij} เท่ากับ 1 ถ้ามีการเดินทางจาก Seed i ไปยังลูกค้า j ; x_{ij} เท่ากับ 0 ถ้าไม่มีการเดินทางจาก Seed i ไปยังลูกค้า j ; y_{ik} เท่ากับ 1 ถ้ายานพาหนะคันที่ k ถูกกำหนดไว้ที่ Seed i ; y_{ik} เท่ากับ 0 ถ้ายานพาหนะคันที่ k ไม่ถูกกำหนดไว้ที่ Seed i

สมการเป้าหมาย:

$$\text{Min. } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J dt_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

ข้อจำกัด:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = 1, \quad \forall j=1,2,3,\dots,J \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} \leq 1, \quad \forall i=1,2,3,\dots,J \quad (14)$$

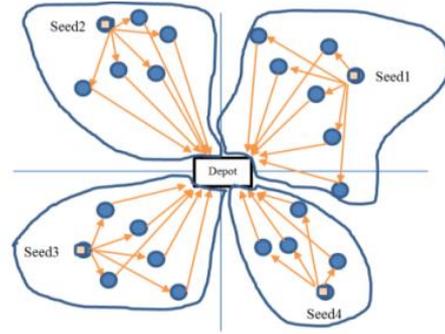
$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K y_{ik} = nv \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J d_j x_{ij} \leq \sum_{k=1}^K q_k y_{ik}, \quad \forall i \quad (16)$$

$$x_{ij}, y_{ik} \in \{0,1\} \quad (17)$$

สมการที่ (12) เป็นสมการวัตถุประสงค์เพื่อต้นทุนระยะทางโดยรวมต่ำสุด สมการที่ (13) ลูกค้าแต่ละรายจะได้รับบริการจาก seed (ยานพาหนะ) ได้เพียงหนึ่งคันเท่านั้น สมการที่ (14) ที่ตำแหน่ง Seed จะตั้งยานพาหนะ k ได้เพียงหนึ่งคันเท่านั้น สมการที่ (15) กำหนดจำนวนยานพาหนะ หรือจำนวน Seed ที่ต้องการติดตั้ง สมการที่ (16) ผลรวมความต้องการสินค้าที่ Seed ที่เปิดต้องน้อยกว่าความจุของยานพาหนะที่ติดตั้งที่ตำแหน่ง Seed นั้น สมการที่ (17) ตัวแปร x_{ij} และ y_{ik} เป็นตัวแปรแบบไบนารี

ขั้นตอนที่ 2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอบหมายงานทั่วไป (Generalized Assignment Problem model, GAP model) เพื่อจัดกลุ่มลูกค้าให้กับยานพาหนะแต่ละคัน (Seed) โดยแนวคิดของการจัดสรรลูกค้าให้กับแต่ละ Seed ดังแสดงในรูปที่ 3 และสามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ GAP ถูกสร้างขึ้นเพื่อจัดสรรลูกค้าให้แก่กลุ่มโดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3 การจัดกลุ่มลูกค้าโดยใช้ GAP model

ดัชนี: k เป็นตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะ k ; j เป็นตำแหน่งของลูกค้า $j = 1, 2, 3, \dots, J$

พารามิเตอร์: c_{kj} แทนต้นทุนแทรกจากจุด Seed k ไปยังจุดลูกค้า j ; d_j แทนความต้องการสินค้าแต่ละลูกค้า j ; cv_k แทนความจุของยานพาหนะคันที่ k

ตัวแปรตัดสินใจแบบไบนารี: y_{kj} เท่ากับ 1 ถ้ารถคันที่ k ถูกกำหนดให้บริการลูกค้า j ; y_{kj} เท่ากับ 0 ถ้ายานพาหนะคันที่ k ไม่ถูกกำหนดให้บริการลูกค้า j ; z_k เท่ากับ 1 ถ้ายานพาหนะคันที่ k ถูกใช้บริการ; z_k เท่ากับ 0 ถ้ายานพาหนะคันที่ k ไม่ถูกใช้บริการ

สมการเป้าหมาย:

$$\text{Min. } Z = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J c_{kj} y_{kj} \quad (18)$$

ข้อจำกัด:

$$\sum_{k=1}^K y_{kj} = 1, \quad \forall j=1,2,3,\dots,J \quad (19)$$

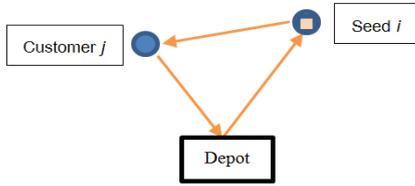
$$z_k \geq y_{kj}, \quad \forall k, \forall j \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^J d_j y_{kj} \leq q_k z_k, \quad \forall k \quad (21)$$

$$y_{kj}, z_k \in \{0,1\} \quad (22)$$

สมการที่ (18) เป็นสมการวัตถุประสงค์เพื่อต้นทุนแทรกโดยรวมต่ำสุด สมการที่ (19) ลูกค้าแต่ละรายจะได้รับบริการจากยานพาหนะเพียงหนึ่งคันเท่านั้น สมการที่ (20) ยานพาหนะ k จะให้บริการลูกค้า j ได้ก็ต่อเมื่อยานพาหนะ k ได้ถูกนำมาใช้แล้วเท่านั้น สมการที่ (21) แต่ละยานพาหนะ k จะบรรทุกสินค้าได้ไม่เกินความจุของตัวเอง สมการที่ (22) ตัวแปร y_{kj} และ z_k เป็นตัวแปรแบบไบนารี

3.3.1 การคำนวณต้นทุนแทรก (Insertion Cost)
การคำนวณต้นทุนแทรก ดังแสดงในรูปที่ 4 และสมการที่ 23

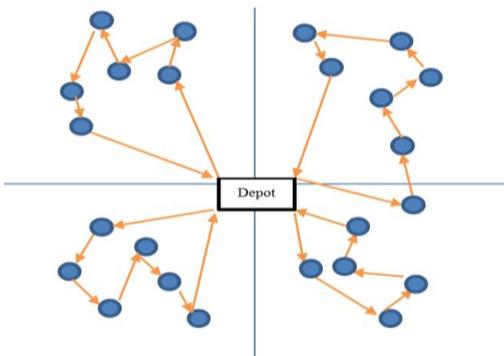


รูปที่ 4 แนวคิดการคำนวณต้นทุนแทรก (c_{kj})

$$c_{kj} = dt_{sj} + dt_{j0} - dt_{0s} \quad (23)$$

เมื่อ c_{kj} คือต้นทุนแทรก, dt_{sj} คือระยะทางจาก seed ไปยังลูกค้า j , dt_{j0} คือระยะทางจากลูกค้า j ไปยัง depot และ dt_{0s} คือระยะทางจาก depot ไปยัง seed

ขั้นตอนที่ 3 จัดลำดับการขนส่งสินค้าให้แก่กลุ่มในบทความนี้จะใช้ TSP model [21] โดยแนวคิดของ TSP แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 จัดลำดับการขนส่งโดยใช้ TSP Model

สำหรับตัวแบบ TSP สามารถค้นหาได้ในวรรณกรรมทั่วไป [21] จากนั้นนำตัวแบบนี้มาเขียนและประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Lingo

4. การประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษา

ผลการศึกษาที่ได้จากระเบียบวิธีวิจัยในครั้งนี้จะเป็นการนำเสนอหัวข้อสำคัญที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจข้อมูลที่เกี่ยวข้องโดยการสัมภาษณ์เจ้าของสถานประกอบการ 1 คน และพนักงานจัดส่งสินค้าจำนวน 3 คน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้อ (1) รายชื่อและจำนวนลูกค้าที่ขนส่งในแต่ละวัน (2) ปริมาณสินค้าที่สั่งซื้อในแต่ละวัน (3) จำนวนและความจุของรถ (4) เส้นทางในการเดินรถในแต่ละวันการเก็บรวบรวมข้อมูลในครั้งนี้เป็นการเก็บข้อมูลในช่วง เดือนธันวาคม 2562 จำนวน 3 วันต่อเนื่อง จากนั้นนำข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดมาสร้างเมทริกซ์ระยะทางใน Excel ดังแสดงในภาคผนวก

4.2 ผลเฉลยของฮิวริสติกพีชเซอร์แอนโจคูมาร์สำหรับปัญหาของบริษัทกรณีศึกษา

ฮิวริสติกพีชเซอร์แอนโจคูมาร์ในหัวข้อที่ 3.3 สามารถนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งในแต่ละวันได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณวันที่ 1 เริ่มจากขั้นตอนที่ 1 เลือกตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะ (Seed) โดยใช้สมการที่ (11) ถึง (16) โดยกำหนดข้อมูลดังนี้ 1. สร้างเมทริกซ์ระยะทาง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีข้อมูล dt_{ij} , d_j , cv_k และ nv โดยกำหนด $nv = 3$ คัน และ $cv_1=600$ กิโลกรัม, $cv_2 =600$ กิโลกรัม และ $cv_3 =600$ กิโลกรัม หลังจากนั้นใช้ซอฟต์แวร์ Lingo ในการประมวลผล ซึ่งผลเฉลยจากการคำนวณได้ตำแหน่งของ seed ที่ C5, C6 และ C12 (เป็นตำแหน่งที่ตั้งของยานพาหนะคันที่ 1 คันที่ 2 และคันที่ 3 ตามลำดับ) จากนั้นคำนวณค่าต้นทุนแทรกโดยใช้สมการที่ (23) โดยตัวอย่างการคำนวณแสดง ดังนี้ $c_{s_1c_1} = dt_{s_1c_1} + dt_{c_10} - dt_{0s_1} = 39.6 + 11.1 - 21.1 = 29.6$ ส่วนรายละเอียดต้นทุนแทรกอื่นแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณต้นทุนแทรก

ต้นทุนแทรก	C5 (S_1)	C6 (S_2)	C12 (S_3)
C1	29.6	45.6	37.7
C2	43.9	64	71.1
C3	42	62.1	66.5
C4	62.3	52	82.9
C5	37.4	62.4	65.8
C6	67.2	54.4	88.1
C7	64.6	60.9	89.6

ต้นทุนแทรก	C5 (S ₁)	C6 (S ₂)	C12 (S ₃)
C8	63.3	88.6	91.6
C9	68.1	93.5	96.5
C10	75.3	84.6	69.2
C11	76.6	88.9	55.9
C12	78.6	89.6	55.6
C13	79	96.5	49
C14	92.6	114.4	62.6
C15	83	100.5	53.6
C16	25.1	46.9	19.4

หลังจากได้ตารางต้นทุนแทรกแล้วนำข้อมูลเหล่านี้ใส่ในตัวแทนทางคณิตศาสตร์ GAP Model ดังแสดงในสมการที่ (18) ถึง (22) จะได้ผลการจัดกลุ่มลูกค้าดังนี้ seed 1 ประกอบด้วยลูกค้า C2, C3, C5, C8, C9, C16 seed 2 ประกอบด้วยลูกค้า C1, C4, C6, C7 และ seed 3 ประกอบด้วยลูกค้า C10, C11, C12, C13, C14, C15

หลังจากการจัดกลุ่มให้แต่ละ seed แล้ว จากนั้นนำข้อมูลของแต่ละกลุ่มไปจัดลำดับการขนส่งโดยใช้ตัวแทนทางคณิตศาสตร์ TSP Model โดยรายละเอียดการคำนวณของวันที่ 2 และวันที่ 3 ใช้ขั้นตอนเดียวกันกับวันที่ 1 ซึ่งได้ผลการจัดเส้นทางขนส่งดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการจัดเส้นทางขนส่งโดยใช้อัลกอริทึมฟิชเซอร์แอนด์โจคูมาร์

วันที่ 1	เส้นทางขนส่ง (กิโลเมตร)
รถคันที่ 1	R1: D-C2-C3-C5-C8-C9-C16-D 18.2+0.35+3.2+14.6+5.1+37.8+27.6 = 106.85 กิโลเมตร
รถคันที่ 2	R2: D-C4-C6-C7-C1-D 19.4+8.7+4.9+16.8+18.5=68.30 กิโลเมตร
รถคันที่ 3	R3: D-C14-C15-C13-C12-C11-C10-D 19.8+15.6+1.6+6.8+1.3+16.9+7.4 = 69.40 กิโลเมตร
ระยะทางรวม	244.55 กิโลเมตร
วันที่ 2	เส้นทางขนส่ง (กิโลเมตร)
รถคันที่ 1	R1: D-C3-C2-C5-C4-D 59.9+1.8+3.8+0.5+58.8 =124.30 กิโลเมตร
รถคันที่ 2	R2: D-C15-C7-C14-C13-D 73.9+5.6+3.2+4+70.9=157.60 กิโลเมตร

รถคันที่ 3	R3: D-C11-C10-C12-C9-C8-C6-C1-D 69.8+1.9+1.7+0.8+0.35+0.65+54.9+39.6 =169.70 กิโลเมตร
ระยะทางรวม	451.60 กิโลเมตร
วันที่ 3	เส้นทางขนส่ง (กิโลเมตร)
รถคันที่ 1	R1: D-C5-C2-C8-C11-C9-C10-C16-C17-D 1.2+1+11.8+16.8+8.2+3.8+6.4+3.4+1.9 = 54.50 กิโลเมตร
รถคันที่ 2	R2: D-C15-C3-C12-C4-C7-C18-D 4+2.8+0.35+0.15+0.19+0.13+1 = 8.62 กิโลเมตร
รถคันที่ 3	R3: D-C6-C14-C13-C20-C1-C21-C19-D 1.5+0.35+0.9+0.5+0.95+0.7+0.28+1.7 = 6.88 กิโลเมตร
ระยะทางรวม	70.00 กิโลเมตร
รวมระยะเดินทางทั้ง 3 วัน มีระยะทางโดยรวม 766.15 กิโลเมตร	

4.3 การเปรียบเทียบอัลกอริทึมฟิชเซอร์และโจคูมาร์

ผลการเปรียบเทียบผลการจัดเส้นทางขนส่ง 3 วิธี ประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อัลกอริทึมฟิชเซอร์แอนด์โจคูมาร์ และประสบการณ์ของคนขับ ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 6

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบเส้นทางขนส่งทั้ง 3 วิธี

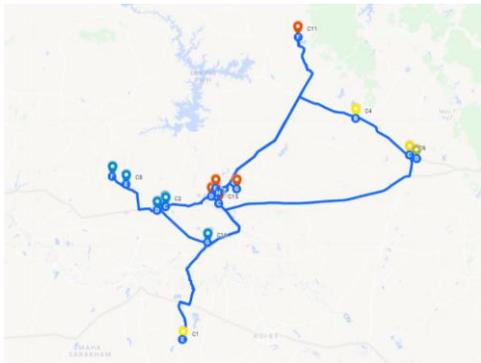
วันที่	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (กิโลเมตร)	อัลกอริทึมฟิชเซอร์แอนด์โจคูมาร์ (กิโลเมตร)	ประสบการณ์ของคนขับ (กิโลเมตร)
1	242.45*	244.55	362.9
2	451.65*	451.60	601.7
3	69.51*	70.00	128.8
รวม	763.61	766.15	1,093.40

* เวลาในการประมวลผลด้วย Lingo เท่ากับ 48 ชั่วโมง



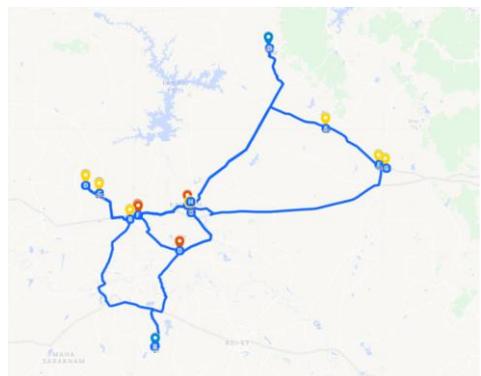
รูปที่ 6 เปรียบเทียบระยะทางการขนส่งของทั้ง 3 วิธี

ผลการจัดเส้นทางของวันที่ 1 ด้วยอัลกอริทึมพิชเซอร์แอนด์โจคูมาร์ และประสบการณ์ของคนขับ ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ตัวอย่างเส้นทางวันที่ 1 ด้วยอัลกอริทึมพิชเซอร์แอนด์โจคูมาร์

การจัดเส้นทางของการขนส่งของวันที่ 1 โดยใช้ อัลกอริทึมพิชเซอร์แอนด์โจคูมาร์



รูปที่ 8 ตัวอย่างเส้นทางวันที่ 1 ด้วยประสบการณ์ของคนขับ

การจัดเส้นทางของการขนส่งของวันที่ 1 โดยใช้ ประสบการณ์ของคนขับ

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองปัญหา CVRP พบว่าการใช้ซอฟต์แวร์ Lingo ได้ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ใช้เวลาในการประมวลผลประมาณ 48 ชั่วโมง ซึ่งไม่สามารถใช้สำหรับการวางแผนจัดเส้นทาง การขนส่งในทางปฏิบัติได้ เพราะการจัดส่งสินค้าเป็นแบบ รับคำสั่งซื้อแบบสั่งวันนี้ต้องได้รับสินค้าในวันพรุ่งนี้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมพิชเซอร์แอนด์โจคู มาร์จึงมีความเหมาะสมกว่าวิธีแมนตรงที่ต้องใช้เวลานานใน การประมวลผล โดยผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมที่นำเสนอ สามารถลดระยะทางขนส่งโดยรวม จากเดิมที่ใช้ ประสบการณ์คนขับรถ 1,093.40 กิโลเมตร ลดลงเหลือ 766.15 กิโลเมตร คิดเป็น 29.93% ซึ่งผลการจัดเส้นทาง การขนส่ง ดังนี้ วันที่ 1: ระยะทางการขนส่งโดยรวม เท่ากับ 244.55 กิโลเมตร ; วันที่ 2 : ระยะทางการขนส่งโดยรวม เท่ากับ 451.60 กิโลเมตร ; วันที่ 3 : ระยะทางการขนส่ง โดยรวม เท่ากับ 70.00 กิโลเมตร

จากผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมพิชเซอร์แอนด์โจคู มาร์ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามในอนาคต สามารถนำอัลกอริทึมนี้ไปบูรณาการร่วมกับวิธีการอื่น เช่น GA, SA และ วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search) เพื่อให้คุณภาพของคำตอบดีขึ้น หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการ นำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปใช้ในกรณีศึกษาอื่น ๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัย ภาพสินธุ์ และขอขอบคุณสถานประกอบการที่ให้ข้อมูล และ สุดท้ายเข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ข้อเสนอแนะ งานวิจัยฉบับนี้ในศึกษาครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทยประจำปี 2562, “สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและ สังคมแห่งชาติ,” [ออนไลน์]. ที่มา:

- https://www.nesdc.go.th/more_news.php?cid=717&filename=. [วันที่เข้าถึง 16 กรกฎาคม 2564].
- [2] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, “The truck dispatching problem,” *Management Science.*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.
- [3] ณัฏฐ์ดนัย สุพัฒน์ธนานนท์ และ ปณัฑพร เรืองเชิงชุม, “การเลือกรูปแบบการกระจายสินค้าที่เหมาะสมด้วยตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม: กรณีศึกษาธุรกิจกระจายสินค้าเครื่องดื่ม,” *วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.*, ปีที่ 12, น. 37-50, 2563.
- [4] สุวิมล คำแสน, อธิวัฒน์ บุญมี และ อัมภิกา บุญมี, “การวางแผนเส้นทางการเยี่ยมชมจุดท่องเที่ยวภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลาโดยประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรม: กรณีศึกษาเมืองจำลอง จังหวัดชลบุรี,” *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน.*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, น. 1-12, 2561.
- [5] นรงค์ วิชาภา, ไทยทัศน์ สุดสวนสี และ พรเทพ ขอบขจายเกียรติ, “การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งแบบมีกรอบเวลาโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบผสมผสานด้วยฮิวริสติกแบบแทรกไปข้างหน้าและวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, น. 4-13, 2562.
- [6] T. Sultana, M. A. H. Akhand and M. M. Hafizur Rahman, “A Variant Fisher and Jaikumr Algorithm to Solve Capacitated Vehicle Routing Problem,” in *8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, Jordan, 2017.
- [7] P. Hokama, F. K. Miyazawa and E. C. Xavier, “A branch – and – cut approach for the vehicle routing problem with loading constraints,” *Expert Systems with Applications.*, vol. 47, pp. 1-13, 2016.
- [8] J. Oppen, A. Løkketangen and J. Desrosiers, “Solving a rich vehicle routing and inventory problem using column generation,” *Computer & Operations Research.*, vol. 37, no. 7, pp. 1308 -1317, 2010.
- [9] Y. Yu, S. Wang, J. Wang and M. Huang, “A branch-and-price algorithm for the heterogeneous fleet green vehicle routing problem with time windows,” *Transportation Research Part B.*, vol. 122, pp. 511-527, 2019.
- [10] M. L. Fisher and R. Jaikumar, “A generalized assignment heuristic for vehicle routing,” *Networks and International journal.*, vol. 11, no. 2, pp. 109–124, 1981.
- [11] R.Hanafi, Rusma, F. Mardin, S.M. Parenreng and A. Azzali, “Distribution Route Optimization of a Capacitated Vehicle Routing Problem by Sweep Algorithm,” in *EICSE (Third EPI International Conference on Science and Engineering)*, 2019.
- [12] N.Wichapa and P.Khokhajaikiat, “Solving a multi-objective location routing problem for infectious waste disposal using hybrid goal programming and hybrid genetic algorithm,” *International Journal of Industrial Engineering Computations.*, vol. 9, no. 1, pp. 75–98, 2018.
- [13] จิตินันท์ ศรีสุวรรณดี และ ระพีพันธ์ ปีตาเคโส, “การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งยานพาหนะด้วยวิธีการอามานิคมมตรณศึกษาบริษัทเจียรนัยน้ำดื่ม,” *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 15, น.706-714, 2012.
- [14] B. Ombuki, B. J. Ross and F. Hranshar, “Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows,” *Applied Intelligence.*, vol.24, no. 1, pp.7-30, 2006.
- [15] ภิกขญา คงแก้ว และ ธัญญา วสุศรี, “การพัฒนาฮิวริสติกเพื่อการจัดสรรเส้นทางการรับและส่งสินค้าที่มีชนิดและน้ำหนักที่หลากหลาย,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, น.111-123, 2560.
- [16] กนกวรรณ สุภักดี, ภัทรา สวนโสภะเชือก, เกียรติศักดิ์พระเนตร และ รัชดา โคตรมงคล, “การพัฒนาแบบการจัดเส้นทางรถขนส่งนมโรงเรียนในจังหวัดอุบลและศรีสะเกษ,” *วารสารข่าวงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย.*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, น.59-65, 2562.

- [17] M. Gendreau, G. Laporte, C. Musaraganyi And E. D. Taillard, "A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers and Operations Research.*, vol. 26, no. 12, pp. 1153-1173. 1999.
- [18] Y. Marinkis, G. R. Ordanidou and M. Marinaki, "Particle swarm optimization for the vehicle routing problem with stochastic demands," *Journal of Applied Soft Computing.*, vol.13, no. 4, pp. 1693-1704, 2013.
- [19] W. Chowmalia and S. Suktoa, "A novel two-phase approach for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles: a case study on fuel delivery," *Decision Science Letters.*, vol.9, no. 1, pp. 77-90, 2020.
- [20] W. Chowmalia and S. Suktoa, "A hybrid FJA-ALNS algorithm for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles for the fuel delivery problem," *Decision Science Letters.*, vol.10, no. 4, pp. 497-510, 2021.
- [21] Applegate and et al, "On the solution of travelling salesman problems," *Documenta Mathematica.*, vol. 3, pp. 645- 656, 1998.

7. ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงเมตริกซ์ระยะทางของลูกแก้วที่ 1

ID	D	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	d_j
D	0	18.5	18.2	18.5	19.4	21.1	15	19.8	35.7	40.4	7.4	15.4	15.1	21.9	19.8	22.9	27.6	0
C1	18.5	0	10.6	10.5	27.2	11.1	21	16.8	25.7	30.4	23.2	18.6	19.8	20	33.9	20.9	9.4	168
C2	18.2	10.6	0	0.35	23.1	2.9	16.9	12.6	17.5	22.1	23.9	29.6	28	30.9	44.9	31.9	22.1	75
C3	18.5	10.5	0.35	0	23.4	3.2	17.2	13	17.8	22.5	24.2	27.2	28.3	28.5	42.4	29.5	17.9	82
C4	19.4	27.2	23.1	23.4	0	25.1	8.7	12.9	39.7	44.3	35	40	39.7	46.5	60.4	47.5	40.2	75
C5	21.1	11.1	2.9	3.2	25.1	0	18.9	14.7	14.6	19.2	25.9	27.9	29	29.2	43.1	30.2	18.6	123
C6	15	21	16.9	17.2	8.7	18.9	0	4.9	33.8	38.5	29.1	34.1	33.9	40.6	58.8	41.6	34.3	145
C7	19.8	16.8	12.6	13	12.9	14.7	4.9	0	69.4	74.1	42.4	41.6	41.4	40.5	28.5	42.2	54.2	83
C8	35.7	25.7	17.5	17.8	39.7	14.6	33.8	69.4	0	5.1	40.4	42.4	43.6	43.7	57.7	47.8	33.2	85
C9	40.4	30.4	22.1	22.5	44.3	19.2	38.5	74.1	5.1	0	45	47	48.2	48.4	62.3	49.4	37.8	125
C10	7.4	23.2	23.9	24.2	35	25.9	29.1	42.4	40.4	45	0	16.9	16.7	20.6	34.5	24.4	26.4	87
C11	15.4	18.6	29.6	27.2	40	27.9	34.1	41.6	42.4	47	16.9	0	1.3	8	21.8	9	12.4	98
C12	15.1	19.8	28	28.3	39.7	29	33.9	41.4	43.6	48.2	16.7	1.3	0	6.8	21.1	10.9	13.5	130
C13	21.9	20	30.9	28.5	46.5	29.2	40.6	40.5	43.7	48.4	20.6	8	6.8	0	13.9	1.6	13.7	105
C14	19.8	33.9	44.9	42.4	60.4	43.1	58.8	28.5	57.7	62.3	34.5	21.8	21.1	13.9	0	15.6	15.6	83
C15	22.9	20.9	31.9	29.5	47.5	30.2	41.6	42.2	47.8	49.4	24.4	9	10.9	1.6	15.6	0	14.6	93
C16	27.6	9.4	22.1	17.9	40.2	18.6	34.3	54.2	33.2	37.8	26.4	12.4	13.5	13.7	15.6	14.6	0	95

ตารางที่ 1 แสดงเมตริกซ์ระยะทางของลูกแก้วที่ 2

ID	D	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	d_j
D	0	39.6	62.1	59.9	58.3	58.5	69.4	71	69.8	70	70.5	69.8	70.7	70.9	70.6	73.9	0	70.9
C1	39.6	0	78.3	76.9	77.3	75	54.9	56.5	55.3	55.5	56	57.7	56.2	56.4	56.1	59.4	60	56.4
C2	62.1	78.3	0	1.8	6.2	3.8	23.6	25.7	23.5	23.7	24.1	24.9	23.5	25.7	25.3	31.4	66	25.7
C3	59.9	76.9	1.8	0	2.1	2.1	21.9	24	21.8	22	22.4	23.2	21.8	23.3	23.6	29.7	111	23.3
C4	58.3	77.3	3.8	2.1	0	0.5	20.4	22.5	20.3	20.4	20.8	21.6	20.3	21.8	22	28.1	85	21.8
C5	58.5	75	3.8	2.1	0.5	0	20.4	22.5	20.3	20.4	20.8	21.6	20.3	21.8	22	28.1	107	21.8
C6	69.4	54.9	23.6	21.9	20.4	20.4	0	2.2	0.65	0.55	1.6	3.3	1.3	2.1	1.8	7.9	54	2.1
C7	71	56.5	25.7	24	22.5	22.5	2.2	0	2.8	2.6	3.9	5.6	3.4	3.6	3.2	5.6	106	3.6
C8	69.8	55.3	23.5	21.8	20.3	20.3	0.65	2.8	0	0.35	1.1	2.7	1.1	3	2.9	8.8	69	3
C9	70	55.5	23.7	22	20.4	20.4	0.55	2.6	0.35	0	1.3	3.1	0.8	3.4	2.6	8.7	132	3.4
C10	70.5	56	24.1	22.4	20.8	20.8	1.6	3.9	1.1	1.3	0	1.9	1.7	3.8	3.4	9.5	77	3.8
C11	69.8	57.7	24.9	23.2	21.6	21.6	3.3	5.6	2.7	3.1	1.9	0	3.4	5.5	5.2	11.3	107	5.5
C12	70.7	56.2	23.5	21.8	20.3	20.3	1.3	3.4	1.1	0.8	1.7	3.4	0	4.4	7.9	12.3	89	4.4
C13	70.9	56.4	25.7	23.3	21.8	21.8	5.6	2.1	3.6	3	3.4	3.8	5.5	4.4	0	4	11.6	98
C14	70.6	56.1	25.3	23.6	22	22	5.6	1.8	3.2	2.9	2.6	3.4	5.2	7.9	4	0	7.6	109
C15	73.9	59.4	31.4	29.7	28.1	28.1	59.4	7.9	5.6	8.8	8.7	9.5	11.3	12.3	11.6	7.6	0	11.2

ตารางที่ 1 แสดงเมตริกซ์ระยะทางของลูกแก้วที่ 3

ID	D	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	d_j
D	0	2.2	1.5	1.3	1.4	1.2	1.5	1.2	1.28	6	9.2	10	1.2	2.3	1.8	4	4	1.9	1	1.7	2.1	1.9	0
C1	2.2	0	1.5	1.6	1.4	1.7	1.8	1.3	1.33	6.8	9.9	10.7	1.5	1.2	1.8	4.1	5.5	3.8	1.1	1.2	0.95	0.7	0.9
C2	1.5	1.5	0	1.6	1	1.7	1.4	1.18	5.3	8.4	13.3	1.3	1.9	1.9	4.3	4.8	3.6	0.9	1.2	2.4	1.8	1.9	0.78
C3	1.3	1.6	1.6	0	0.5	0.55	0.2	0.7	1.33	7.8	10.9	1.58	0.35	1.7	0.55	2.8	4.2	3	0.65	0.95	1.8	1.9	1.12
C4	1.4	1.4	1	0.5	0	0.3	0.7	0.19	1.29	5.8	8.9	1.38	0.15	1.3	1.2	3.0	3.9	2.8	1.3	0.65	1	0.9	0.74
C5	1.2	1.7	1	0.55	0.3	0	0.7	0.5	1.24	5.5	8.6	1.35	1.3	1.9	1.4	3.6	4.1	2.9	0.6	1.4	1.8	1.8	0.90
C6	1.5	1.8	1.7	0.2	0.7	0.7	0	1	1.31	7.6	10	1.56	0.8	1.3	0.95	2.6	4	2.9	1.3	1.1	1.1	1.1	1.18
C7	1.2	1.3	1.4	0.7	0.19	0.5	1	0	1.29	5.9	9	1.39	0.35	1.5	1.4	3.7	4.1	2.9	0.13	0.85	1.3	1.3	0.63
C8	1.28	1.33	1.18	1.33	1.29	1.24	1.31	1.29	0	10.9	13.9	1.68	1.31	1.38	1.30	1.91	1.83	1.50	1.26	1.31	1.42	1.42	0.87
C9	6	6.8	5.3	7.8	5.8	5.5	7.6	5.9	10.9	0	3.8	8.2	6.5	7.1	6.6	9	8.2	5.2	5.8	6.5	6.9	6.9	6.9
C10	9.2	9.9	8.0	10.9	8.9	8.6	10	9	13.9	3.8	0	11.7	9.6	11.3	10.6	12	6.0	8.2	8.9	9.5	11.0	10	8.1
C11	10	14.7	13.3	15.8	13.8	13.5	15.6	13.9	16.8	8.2	11.7	0	11.8	13.5	12.8	14.2	13.4	10.8	11.1	11.7	13.6	21	5.2
C12	1.2	1.5	1.3	0.35	0.15	1.3	0.8	0.35	1.31	6.5	9.6	1.18	0	1.4	0.9	3.1	3.6	2.4	0.28	0.8	1.2	1.1	0.74
C13	2.3	1.2	1.9	1.7	1.3	1.9	1.3	1.5	1.38	7.1	11.3	1.35	1.6	0	0.9	3.2	4.6	2.7	1.6	1.4	1	1	0.88
C14	1.8	1.8	1.9	0.55	1.2	1.4	0.35	1.4	1.34	6.6	10.6	1.28	0.9	0.9	0	2.4	3.8	4.2	4.3	4.1	3.6	3.7	8.7
C15	4	4.1	4.3	2.8	3.4	3.6	2.6	3.7	19.1	9	12	10.2	3.1	3.2	2.4	0	3	3.4	4.3	4.2	4.7	4.7	5.7
C16	4	5.5	4.8	4.2	3.9	4.1	4	4.1	18.3	8.2	6.4	13.4	3.6	4.6	3.8	3	0	0	2.7	3.3	3.8	3.6	6.0
C17	1.9	3.8	3.6	3	2.8	2.9	2.9	2.9	13.6	5.2	8.2	10.0	2.6	3.5	2.7	0.2	3.0	2.7	0	0.75	1.2	1	7.0
C18	1	1.1	1.2	0.95	1.3	0.6	1.3	0.13	1.26	5.8	8.9	11.1	0.28	1.7	1.6	4.3	3.3	0.75	0	0.5	0.28	0.7	8.7
C19	1.7	1.2	0.95	0.65	1.4	1.1	0.85	1.31	6.5	9.5	11.7	0.8	1.1	1.4	4.1	4.3	3.8	1.2	0.5	0	0.23	0.4	
C20	2.1	0.95	2.4	1.8	1	1.8	1.1	1.3	14.2	6.9	11.4	1.36	1.2	0.5	1	3.6	4.7	3.6	1	0.28	0.23	0	8.6
C21	1.9	0.7	1.8	1.9	0.9	1.4	1.1	1.1	13.6	8.3	11.5	2.1	1.1	0.7	1	3.7	4.7	2.7	1.6	1.4	1	1	8.8