

วิธีอ้างอิงบทความนี้: สุภาพร คำเตจา, นคร ไชยวงศ์ศักดิ์, ศศิชา สุขกาย, ธนพล แสงสุวรรณ และ เสกสรรค์ วินยางค์กุล. (2569). การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา กรณีศึกษา: การจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะ. วารสารปฏิบัติการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน, 12(2), 7-26. <https://doi.org/10.53848/jlsc.v12i1.276371>

Received: July 06, 2025
Revised: September 29, 2025
Accepted: June 11, 2026

การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา กรณีศึกษา: การจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะ

สุภาพร คำเตจา¹, นคร ไชยวงศ์ศักดิ์², ศศิชา สุขกาย³, ธนพล แสงสุวรรณ⁴ และ เสกสรรค์ วินยางค์กุล^{5*}

บทคัดย่อ

จากสภาพปัญหาการดำเนินการจัดเส้นทางเก็บขยะที่ไม่มีประสิทธิภาพโดยการเก็บขยะเลือกเส้นทางเริ่มจากที่ไกลก่อน จึงส่งผลให้มีระยะทางรวมในการเก็บขยะที่สูงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองด้านน้ำมันเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมของวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา (Grey wolf optimizer: GWO) สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะที่มีรูปแบบเป็นปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถโดยมีข้อจำกัดของปริมาณการบรรทุกของรถ (The capacitated vehicle routing problem : CVRP) ซึ่งใช้ข้อมูลเก็บขยะกรณีศึกษาหมู่บ้านป่าห้าว หมู่บ้านสันต้นขาม และหมู่บ้านดาวดึงส์ ทั้งหมด 52 จุด ในการจัดเส้นทางโดยเปรียบเทียบกับวิธีการเดินรถแบบเดิมกับวิธีการฝูงหมาป่าสีเทาที่ได้พัฒนา และปรับปรุง ได้แก่ GWO แบบสองกลุ่ม (GWO2) และ GWO แบบสามกลุ่ม (GWO3) รวมถึง GWO แบบเดิม, วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential evolution optimization: DEO), วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization: PSO) ผลที่ได้จากการวิจัย จำนวนรอบการเก็บขยะเท่ากันคือ 4 รอบ พบว่าวิธีการเดินรถแบบเดิมมีระยะทาง 72,200 เมตร ขณะที่ DEO และ PSO ให้ระยะทางเฉลี่ย 62,970 และ 62,550 เมตร ตามลำดับ โดย GWO แบบเดิมสามารถลดระยะทางเหลือ 61,150 เมตร และ GWO2 ลดเหลือ 60,250 เมตร ส่วน GWO3 สามารถลดระยะทางได้มากที่สุดที่ 58,350 เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 19.183 นอกจากนี้ GWO3 ยังมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด แสดงถึงความสม่ำเสมอ และเสถียรของผลลัพธ์ จากผลการวิจัยพบว่า GWO3 มีความสามารถในการหาคำตอบได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในบรรดาอัลกอริธึมที่เปรียบเทียบกัน จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนเส้นทางเดินรถเก็บขยะ

คำสำคัญ: เมต้าฮิวริสติกส์, การพัฒนาและปรับปรุง, วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของฝูงหมาป่าสีเทา,

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ, การจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะ

ประเภทบทความ: บทความวิจัย

* ผู้รับผิดชอบงานหลัก

¹⁻⁵ อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

อีเมล: supaporn.kamt@cr.ru.ac.th, nakorn.cha@cr.ru.ac.th, jimmysasicha@gmail.com, thanapon.sae@cr.ru.ac.th, seksan.win@cr.ru.ac.th

ผ่านการรับรองคุณภาพจากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI.) อยู่ในกลุ่ม 2 สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

Development and Improvement of Optimal Solution Finding Efficiency Using the Grey Wolf Optimization: In Case Study of Waste Collection Route Planning

Supaporn Kamtaeja¹, Nakorn Chaiwongsakda², Sasicha Sukkay³, Thanapon Saengsuwan⁴
and Seksan Winyangkul^{5*}

Abstract

From the problem of inefficient waste collection routing operations due to starting from the farthest points, leading to Increased total travel distance and fuel consumption. This research aims to develop and enhance the solution-finding efficiency of the Grey Wolf Optimizer (GWO) for waste collection vehicle routing, formulated as a Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). The study employs waste collection data from three case study villages: Ban Pa Ha, Ban San Ton Kham, and Ban Daowadueng, comprising 52 nodes. The proposed improved GWO the two-group GWO (GWO2) and the three-group GWO (GWO3), are compared against the conventional routing method, the original GWO, Differential Evolution Optimization (DEO), and Particle Swarm Optimization (PSO). The experiments were conducted using the same number of waste collection rounds, set at four. The results showed that the traditional method produced a total distance of 72,200 m., while DEO and PSO yielded average distances of 62,970 and 62,550 m., respectively. The original GWO reduced the distance to 61,150 m., GWO2 further reduced it to 60,250 m., and GWO3 achieved the shortest distance of 58,350 m. or 19.183% compared to the traditional method. Moreover, GWO3 yielded the lowest standard deviation, indicating high consistency and stability in its results. Based on the findings, GWO3 demonstrates the fastest and most efficient convergence among all compared algorithms. Therefore, it is highly suitable for application in waste collection route planning.

Keywords: Meta-Heuristic, Development and improvement, Grey Wolf Optimizer (GWO), Vehicle routing problem, Waste collection route planning

Type of Article: Research Article

* Corresponding author

¹⁻⁵ Lecturer of Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University,

E-mail: supaporn.kamt@crru.ac.th, nakorn.cha@crru.ac.th, jimmysasicha@gmail.com, thanapon.sae@crru.ac.th, seksan.win@crru.ac.th

1. บทนำ

ระบบการจัดการขยะมูลฝอยของจังหวัดเชียงรายในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ การจัดการขยะต้นทาง กลางทาง และ ปลายทาง โดยการจัดการขยะ เป็นการจัดการขยะกลางทาง พบปัญหาสำคัญเกี่ยวกับ ประสิทธิภาพการเก็บโดยการ จัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะที่อาศัยความชำนาญ และ รูปแบบของจุดที่ไกลที่สุดในการจัดเก็บ ส่งผลให้เกิดความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย การเพิ่มประสิทธิภาพ การจัดเส้นทางด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้ วิธีเมตาฮิวริสติกส์ สามารถช่วยลดระยะทางขนส่ง ตลอดจนลดมลพิษและค่าใช้จ่ายได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการจัดการขยะกลางทางซึ่งมีปัญหามากที่สุด ซึ่ง การจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะโดยใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์ มาช่วยจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะของ จังหวัดเชียงราย โดยวิธีการที่นิยมได้แก่วิธีการ ผูกหมาป่าสีเทา (Mirjalili et al., 2014) เป็นหนึ่งใน อัลกอริทึมที่กำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยได้รับแรง บันดาลจากกิจกรรมการล่าของผูกหมาป่าสีเทาที่มักจะ อาศัยอยู่เป็นกลุ่ม อัลกอริทึม GWO ใช้กระบวนการ เดียวกันกับผูกหมาป่าสีเทาในการล่า โดยพิจารณา ลำดับความสำคัญในกลุ่มของผูกหมาป่าสีเทา โดย สมาชิกของกลุ่ม GWO ถูกจำแนกออกเป็นสี่ประเภท ตามชนิดของตำแหน่งของหมาป่าสีเทาที่ช่วยใน กระบวนการล่า แอลฟา, เบต้า, เดลต้า, และโอเมก้า เป็นสี่ระดับ โดยแอลฟาเป็นตัวที่ดีที่สุดในการล่า GWO ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพในการสำรวจปริภูมิของ คำตอบ (Solution space) อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ ยังมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่อย่างมีประสิทธิภาพ ระหว่างกระบวนการค้นหาด้วย และสามารถนำไป แก้ปัญหามานานทางวิศวกรรมได้หลายด้าน เช่น การวาง กำหนดการทำงาน (Komaki & Kayvanfar, 2015) การวางแผนเส้นทางขนส่ง (Jayabarathi et al., 2016) การควบคุมการใช้พลังงาน (Jayakumar et al., 2016) และการปรับปรุงวิธีการ GWO เพื่อใช้แก้ปัญหา

การลดระยะทางในการขนส่ง (Muangkote et al., 2014; Shaheen et al., 2018) รวมถึงการวางแผน การผลิต (Song et al., 2015) และได้มีการพัฒนา GWO นำสนใจหลายด้าน (Kumar et al., 2021) เช่นการพัฒนาวิธีการแบบผสมผสาน (Hybrid GWO Algorithm) สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ แบบมีข้อจำกัดความจุ (CVRP) โดยการผสมผสานกลไก การค้นหาในพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งสามารถลดระยะทาง รวมได้ 12% เมื่อเทียบกับวิธี PSO รวมถึงการปรับปรุง แบบไบนารี (Modified binary GWO) (Chen & Wang, 2020) สำหรับการจัดเส้นทางเก็บขยะ ที่เน้น การปรับปรุงสมรรถนะการอัปเดตตำแหน่ง ส่งผลให้ ลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ถึง 18% สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางแบบหลายจุดจอด (Multi-depot VRP) (Zhang et al., 2019) โดยการประยุกต์ใช้ GWO แบบหลายสถานะ (Multi-phase GWO) กับ การขนส่ง ขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถลดจำนวนยานพาหนะ ที่ใช้ได้ 15% เมื่อเทียบกับวิธีทางพันธุกรรม รวมถึง การศึกษาเส้นทางเก็บขยะไร้เคิลด้วย Improved GWO (Ibrahim et al., 2022) ที่ผสมผสานร่วมกับ Tabu Search พบว่าสามารถลดเวลาเดินทางรวมได้ 22% ซึ่งการพัฒนาล่าสุดโดย (Li & Zhao, 2023) ได้รวมการเรียนรู้เสริมแรง (Reinforcement learning) เข้ากับ GWO สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางแบบ พลวัต (Dynamic VRP) ที่สามารถปรับตัวกับสภาพ การจราจรแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดระยะทางรวมได้ 14% ในสถานะที่เปลี่ยนแปลง ในการประยุกต์ GWO ไปใช้งาน สำหรับการจัดเส้นทาง ช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานได้ 20% รวมถึงการใช้ กับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะไฟฟ้า (Gupta & Sharma, 2022) โดยคำนึงถึงการบริโภคพลังงาน ส่งผลให้ลดการปล่อยคาร์บอนได้ถึง 25% และการ เลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมของ GWO สามารถเพิ่ม ศักยภาพในการแก้ปัญหา (Hu et al., 2020; Sopto et al., 2018) โดยรูปแบบการนำ GWO ไปใช้กับ

ปัญหาปัญหาพนักงานขาย (GWO-TSP), ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (GWO-VRP) (Diastivena et al., 2021) ในการศึกษาอื่นๆ ของวิธี GWO เพื่อแก้ปัญหา TSP และ VRP (Boualem et al., 2022; Huang et al., 2024) ซึ่งได้ปรับ GWO แบบเดิมโดยใช้ตัวดำเนินการสลับและลำดับสลับ ซึ่งผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ GWO-TSP,VRP นั้นสามารถแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย และการจัดเส้นทางยานพาหนะ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหา การหาค่าที่เหมาะสมที่มีความซับซ้อน จากงานวิจัยทั้งหมดพบว่าการพัฒนาวิธี GWO สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางมีแนวโน้มมุ่งไปสู่การผสมผสานกับเทคนิคอื่นๆ เช่น การปรับปรุงนี้อาจมีการเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนวิธีการสร้างคำตอบ วิธีการเลือกสมาชิกในการล่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง โดยเฉพาะปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะ และโลจิสติกส์ การพัฒนาดังกล่าวไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนและระยะทางเท่านั้น แต่ยังสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทบทวนวรรณกรรมเห็นได้ว่ายังขาดการศึกษาเฉพาะทางสำหรับปัญหาการเก็บขยะเฉพาะ และการแบ่งกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทาเป็น 2-3 กลุ่มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพซึ่งยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างเป็นระบบรวมถึงการเปรียบเทียบระหว่าง GWO แบบกลุ่มกับอัลกอริทึมอื่นๆ (เช่น DEO, PSO) ในบริบทการจัดเส้นทางเก็บขยะ ดังนั้นผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา สำหรับการปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถโดยมีข้อจำกัดของปริมาณการบรรทุกของรถ โดยพิจารณาถึงการแบ่งกลุ่มย่อย (Subgroups) ของฝูงหมาป่าสีเทาเพื่อ การแบ่งกลุ่มย่อยนี้สามารถช่วยให้มีการจัดการฝูงหมาป่าสีเทาให้มีประสิทธิภาพ และเป็นระบบ และ ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดเก็บและลำเลียงขยะของหมู่บ้านป่าห้า หมู่บ้านสันต้นขาม

และหมู่บ้านดาวตีส จากนั้นจะนำผลที่ได้ของเส้นทางและจำนวนรอบ มาเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิมที่ได้ดำเนินการอยู่รวมถึงนำมาเปรียบเทียบกับวิธี DEO และ PSO เพื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

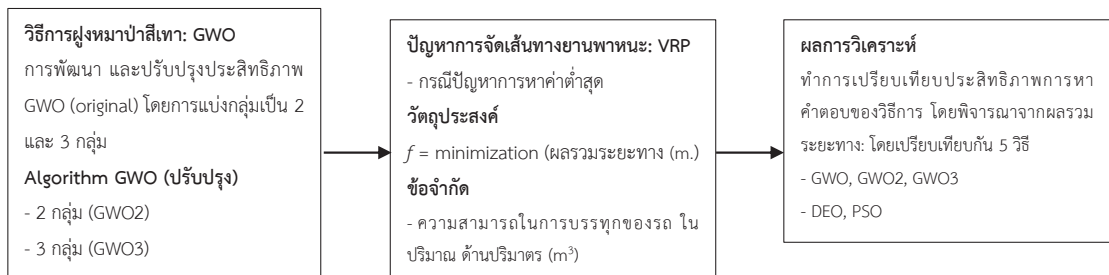
1. เพื่อทำการปรับปรุงการหาคำตอบที่เหมาะสม สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา จากการแบ่งกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทาเป็น 2-3 กลุ่ม
3. เพื่อวิเคราะห์หาเส้นทาง และจำนวนรอบขนส่งที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะ

3. กรอบแนวคิดการวิจัย

การพัฒนาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของฝูงหมาป่าสีเทา โดยการแบ่งกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็น 2 และ 3 กลุ่ม และนำมาใช้กับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ โดยการวิเคราะห์เส้นทางการเดินรถในการจัดเก็บขยะ ซึ่งพิจารณาเส้นทางที่น้อยที่สุด (m.) ภายใต้ข้อจำกัดของปริมาตรบรรทุก (m3) แล้วนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ กับรูปแบบเดิมในการเดินทางกับ วิธีการที่พัฒนาขึ้น ได้แก่ GWO2, GWO3 และวิธีการทางเมตาฮิวริสติกส์ตัวอื่นๆ ได้แก่ GWO (แบบเดิม), DEO และ PSO ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยทางผู้วิจัยได้ทดสอบตัวแบบปัญหาจากตัวแบบมาตรฐานจำนวน 13 ตัวแบบ แบบวัตถุประสงค์เดียว โดยมีปัญหา ได้แก่ uly16, ulysses22, Dantzig42, Att48, eil51 berlin52, st70, rd100, Lin105, bier127 และ ch130 (Reinelt, 1991) โดยใช้ GWO แบบเดิม และแบ่งกลุ่ม 2, 3, 4 และ 5 กลุ่มในการทดสอบ ผลเฉลี่ยที่ได้ของการแบ่งกลุ่ม 3, 4 และ 5 มีค่าผลเฉลี่ย (F_{min}) ไม่แตกต่างกัน แต่จะมีผลของเวลา

ที่ใช้ในการหาค่าตอบ (s/loops) ถ้ามีการแบ่งกลุ่ม ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการเลือก การแบ่งกลุ่มออกเป็น 2 และ 3 กลุ่ม

ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ (Winyangkul et al., 2025)



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual framework)

4. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem: VRP) (Dantzig & Ramser, 1959) เป็นปัญหาทางโลจิสติกส์โดยเป็นปัญหาการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดในการวางแผนการจัดลำดับและเส้นทางของการขนส่งสินค้าให้แก่ลูกค้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อตอบสนองความต้องการและความพึงพอใจของลูกค้า ปัญหา VRP จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถเป็นปัญหาด้านการขนส่ง และโลจิสติกส์รูปแบบหนึ่ง เพื่อลดต้นทุนทางด้านการขนส่ง และการลดค่าใช้จ่ายโดยงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ใช้วิธี VRP ที่ถูกค้นคว้าอย่างแพร่หลายที่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ เช่น รูปแบบการขนส่ง จำนวนจุด จำนวนยานพาหนะ ระยะทาง ระยะเวลาในการขนส่ง และปริมาณที่ขนส่ง โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดเส้นทางเดินรถให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้

1. ลดจำนวนยานพาหนะ หรือลดค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ที่เกิดขึ้นในการขนส่งแต่ละครั้งถ้าหากจำนวนยานพาหนะลดลงก็จำเป็นต้องมีการลดจำนวนพนักงานขับรถและพนักงานเก็บขยะลงไปด้วย

2. ลดระยะทาง หรือลดระยะเวลาในการเดินทางถ้าหากกระยะทาง และระยะเวลาลดลงจะทำให้ค่าใช้จ่ายต้นทุนแปรผัน (Variable cost) ที่เกิดจากการขนส่งแต่ละครั้งก็จะลดลงไปด้วย ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงค่าเปลี่ยนถ่าย เช่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันเกียร์ และน้ำมันเบรก เป็นต้น

จากการพิจารณาเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ เช่น เวลา ระยะทาง จำนวนของยานพาหนะ และความจุของยานพาหนะ เป็นต้น ประกอบด้วยพาหนะขนส่ง (Vehicle) เส้นทางขนส่ง (Routing) จุดศูนย์กลางกระจายสินค้า (Depot) และลูกค้า (Customer) โดยปัญหา VRP สามารถแสดงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาตรฐานได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้

$I =$ ลำดับของเมืองที่ i โดยที่ $I = 1, 2, \dots, n$

$J =$ ลำดับของเมืองที่ j โดยที่ $J = 1, 2, \dots, n$

$V =$ เซตของเมืองทั้งหมดที่พิจารณา โดยที่

$V = \{1, 2, \dots, n\}$

$S =$ สับเซตใดๆ ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของเซต

$V : S \subset V$ โดยที่ $S \neq \emptyset, S \neq V$

$|S|$ เป็นจำนวนสมาชิกของเซต S

ตัวแปรที่ทราบค่า (Parameter)

$C_{ij} =$ ระยะทางระหว่างเมืองที่ i ไปยังเมือง

ที่ j

ตัวแปรในการตัดสินใจ (Decision variables)

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ในกรณีที่มีการเดินทางจาก } i \text{ ไป } j \\ 0 & \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$\text{Min} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i=(1,2,\dots,n) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j=(1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset V \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i=(1,2,\dots,n) \quad (5)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (1) ต้องการหาเส้นทางเดินทางที่มีระยะทางรวมที่สั้นที่สุด ในการเดินทาง สมการข้อจำกัดที่ (2) และ (3) กำหนดให้พนักงานขายเดินทางให้ครบทุกเมืองและ สามารถเข้าออกแต่ละเมืองได้เพียงครั้งเดียว สมการข้อจำกัดที่ (4) สมการป้องกันการเกิดเส้นทางย่อย สมการข้อจำกัดที่ (5) คือการกำหนดตัวแปรการตัดสินใจ X_{ij} เป็นตัวแบบไบนารี ให้เป็นได้สองค่า 0 และ 1

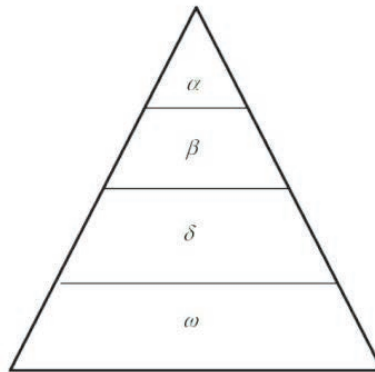
การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะมีลักษณะแตกต่างจากการวิเคราะห์โครงข่ายประเภทอื่น เนื่องจากการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดเพียงเส้นทางเดียว โดยพิจารณาให้มีระยะทางสั้นที่สุดหรือใช้เวลาน้อยที่สุด การแก้ปัญหาด้วยวิธีการที่เหมาะสม เช่น วิธีการเชิงเมตาฮิวริสติกส์ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาเส้นทางขนส่งสินค้าตามลำดับการสั่งซื้อ โดยคำนึงถึงเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง อาทิ ระยะทางและเวลา ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

ในการวางแผนเส้นทางการขนส่ง

เทคนิคปรับปรุงเมตาฮิวริสติกส์สามารถใช้ได้ในปัญหาต่างๆ การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการฝูงหมาป่าสีเทาแบบวัตถุประสงค์เดียว (Mirjalili et al., 2014) นั้นเป็นการแสดงคำตอบออกมาสำหรับวัตถุประสงค์เพียงด้านเดียวเท่านั้น เช่น การหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการเดินทางเพื่อให้ได้ระยะทางที่สั้นที่สุดหรือต้นทุนน้อยสุดมากที่สุด กำไรสูงสุด เป็นต้น การแก้ปัญหาทางด้านโลจิสติกส์ นั้นสำคัญมากเพื่อให้มีคุณภาพ มีประสิทธิภาพที่ยั่งยืน โดยการนำวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่เป็นวิธีการหาคำตอบที่มีความน่าเชื่อถือเหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดการโลจิสติกส์ ในการหาคำตอบของปัญหา การหาค่าที่เหมาะสมมีหลายวิธีซึ่งใช้วิธีการเมตาฮิวริสติกส์ซึ่งเป็นที่ยอมรับมากที่สุด โดยจะใช้วิธีการฝูงหมาป่าสีเทา มีขั้นตอนดังนี้

เพื่อที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลำดับชั้นทางสังคมของฝูงหมาป่าสีเทา เมื่อออกแบบ GWO เราจะพิจารณาการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด เช่น แอลฟา วิธีที่ดีที่สุดลำดับสองและสามคือ เบต้าและเดลต้า ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่วนที่เหลือของการแก้ปัญหาจะถือว่าเป็นโอเมก้า ในขั้นตอนวิธี GWO การล่าสัตว์ (การเพิ่มประสิทธิภาพ) เป็นแนวทางโดยหมาป่าสีเทา แอลฟา, เบต้า, เดลต้าและโอเมก้า

นอกเหนือจากลำดับชั้นทางสังคมของฝูงหมาป่าสีเทาแล้ว การล่าเหยื่อแบบกลุ่มเป็นอีกหนึ่งพฤติกรรมทางสังคมที่น่าสนใจโดยขั้นตอนการล่าเหยื่อของฝูงหมาป่าสีเทาจะเริ่มจากการติดตาม และการเข้าหาเหยื่อ จากนั้นจะไล่ตาม ล้อมเหยื่อ และก่อกวนเหยื่อจนกว่าเหยื่อจะหยุดเคลื่อนไหว และนำไปสู่การโจมตีเหยื่อ (Mirjalili et al., 2014) โดยมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 2 ลำดับชั้นของฝูงหมาป่าสีเทา
ที่มา: ดัดแปลงจาก Mirjalili et al. (2014)

1. การล้อมเหยื่อ (Encircling prey) พฤติกรรมการล้อมเหยื่อของฝูงหมาป่าสีเทาในทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (6)$$

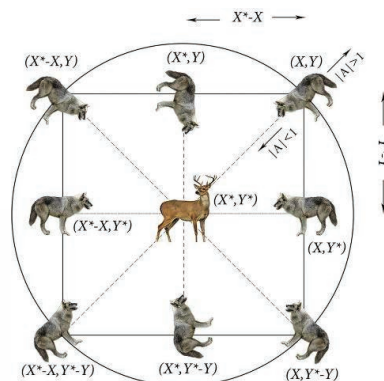
$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (7)$$

เมื่อ t คือจำนวนรอบการทำซ้ำปัจจุบัน $\vec{X}_p$ คือตำแหน่งของเหยื่อ $\vec{X}$ คือ ตำแหน่งของหมาป่าสีเทา $\vec{D}$ คือระยะทางระหว่างเหยื่อและหมาป่าสีเทา $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (8) และ (9) โดยที่ a คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในรอบการทำซ้ำ $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ คือ ค่าสุ่มในช่วง $[0,1]$

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r}_1 - a \quad (8)$$

$$\vec{C} = 2 \vec{r}_2 \quad (9)$$

หมาป่าสีเทาสามารถปรับปรุงตำแหน่งของมันเองรอบเหยื่อในตำแหน่งสุ่มใดๆ โดยใช้สมการที่ (6) และ (7) ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจรูปแบบของสมการมากขึ้น ตำแหน่งของหมาป่าสีเทา และตำแหน่งใกล้เคียงที่เป็นไปได้จะแสดงดังภาพที่ 3 เมื่อ (x, y) และ (x, y, z) คือตำแหน่งของหมาป่าสีเทาในปริภูมิการค้นหา 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับ



ภาพที่ 3 ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับการล้อมเหยื่อของหมาป่าสีเทาในปริภูมิ 2 มิติและ 3 มิติ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Mirjalili et al. (2014)

2. การล่าเหยื่อ (Hunting) หมาป่าสีเทาที่มีความสามารถในการระบุตำแหน่งของเหยื่อและ

ล้อมเหยื่อพวกนั้นไว้ โดยในการล่าแต่ละครั้งจะถูกรำนำโดยหมาป่าสีเทาแอลฟาและในบางครั้งหมาป่าสีเทาเบต้าและเดลต้าอาจจะมีส่วนร่วมด้วย และในการจำลองพฤติกรรมกรรมการล่าเหยื่อของฝูงหมาป่าสีเทาทางคณิตศาสตร์ จะสมมุติว่าหมาป่าสีเทาแอลฟา (คำตอบที่ดีที่สุด) เบต้า และ เดลต้า รู้ตำแหน่งของเหยื่อเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงทำการบันทึกคำตอบที่ดีที่สุดสามอันดับแรก และให้ตัวแทนการค้นหาอื่น (รวมถึงหมาป่าสีเทาโอเมก้า) ปรับปรุงตำแหน่งของตนตามตำแหน่งของตัวแทนการค้นหาที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10) ถึง (12)

$$\vec{X}_{(t+1)} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (10)$$

โดยที่

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha,$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta$$

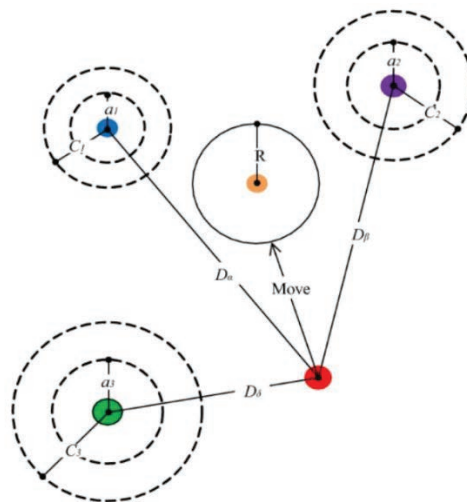
$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (11)$$

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|,$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|,$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (12)$$

ภาพที่ 4 แสดงการปรับปรุงตำแหน่งของตัวแทนการค้นหาตามหมาป่าสีเทาแอลฟา เบต้า และเดลต้าในปริภูมิการค้นหา 2 มิติโดยตำแหน่งของหมาป่าสีเทาโอเมก้าจะขยับเข้าหาเหยื่อ ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยตำแหน่งของหมาป่าสีเทา แอลฟา เบต้า และ เดลต้า



ภาพที่ 4 การปรับปรุงตำแหน่งของหมาป่าสีเทา

ที่มา: ดัดแปลงจาก Mirjalili et al. (2014)

3. การโจมตีเหยื่อ (Attacking prey) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น หมาป่าสีเทาจะโจมตีเหยื่อเมื่อเหยื่อหยุดเคลื่อนไหว และเพื่อให้หมาป่าสีเทาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อ จะทำการลดค่า

ของ $\vec{a}$ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ค่าความผันผวนของสัมประสิทธิ์ $\vec{A}$ ลดลงด้วย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ $\vec{A}$ คือค่าสุ่มในช่วง $[-2a, 2a]$ เมื่อ $\vec{a}$ คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในแต่ละรอบการทำซ้ำ และเมื่อ $\vec{A}$

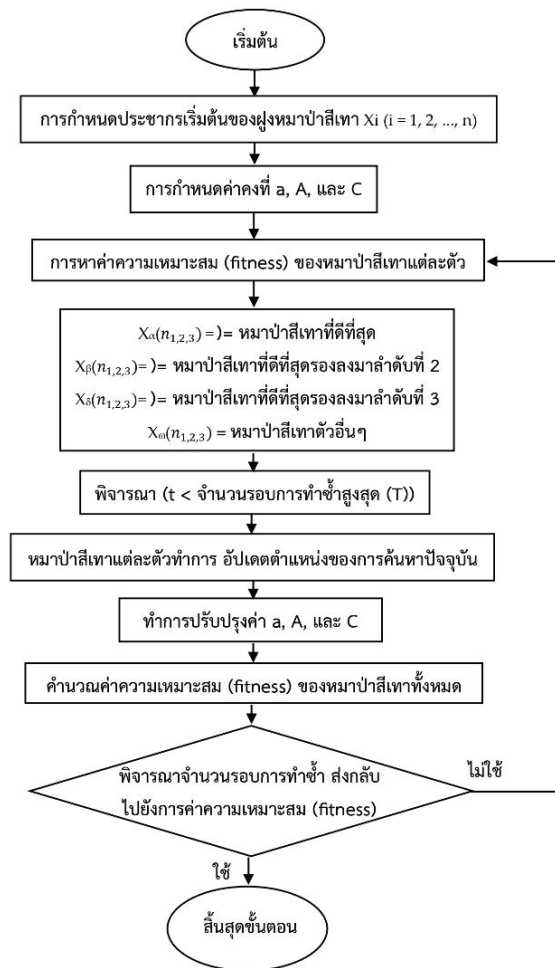
มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ตำแหน่งต่อไปของตัวแทนการค้นหาวางจะอยู่ตำแหน่งใดก็ได้ระหว่างตำแหน่งปัจจุบัน และตำแหน่งของเหยื่อ

4. การค้นหาเหยื่อ (Search for prey) หมาป่าสีเทาจะค้นหาตามตำแหน่งของ แอลฟา เบต้า และ เดลต้า ซึ่งพวกมันจะแยกกัน ไปค้นหาเหยื่อแล้วจะมารวมกันเพื่อโจมตีเหยื่อ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตัวแทนการค้นหาวางจะออกห่างจากเหยื่อเมื่อ A มีค่ามากกว่า 1 หรือน้อยกว่า -1 ส่วนประกอบของอัลกอริทึมฝูงหมาป่าสีเทาที่ช่วยในการค้นหาคือ เวกเตอร์ C เมื่อ C คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 2 ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (11) โดยส่วนประกอบนี้จะให้น้ำหนักกับเหยื่อโดยการสุ่ม ถ้า $C > 1$ จะให้น้ำหนักกับเหยื่อ แต่ถ้า $C < 1$ จะไม่ให้น้ำหนักกับเหยื่อ ซึ่งจะมีผลในการกำหนด ทิศทางดังสมการที่ (9) วิธีนี้จะทำให้ อัลกอริทึมหมาป่าสีเทามีพฤติกรรมแบบสุ่มเพื่อหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่งจากบทความที่ใช้วิธีการฝูงหมาป่าสีเทา สำหรับการแก้ปัญหาทางการดำเนินการนั้นเกิดปัญหาการติดอยู่ในค่าที่ไม่เหมาะสมเชิงเฉพาะที่ (Local optima) และ GWO มักมีแนวโน้มที่จะสำรวจพื้นที่คำตอบได้ไม่กว้างพอ ทำให้บางครั้งติดอยู่ในจุดที่ไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด โดยวิธีนี้ได้ ปรับปรุงขั้นตอนของ GWO โดยการแบ่งฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็น 2-3 กลุ่มย่อย แต่ละกลุ่มจะทำหน้าที่สำรวจพื้นที่ค้นหาที่ต่างกัน เพิ่มความหลากหลาย (Diversity) ของการค้นหาคำตอบ ลดโอกาสการติดกับใน Local Optima และเพิ่มความสามารถในการสำรวจ

กระบวนการลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา (GWO) สำหรับ VRP โดยลำดับขั้นตอนการทำงาน เริ่มจากการสร้างประชากรเริ่มต้นของหมาป่าสีเทา โดยแต่ละหมาป่าสีเทาแทนโอกาสในการแก้ปัญหา VRP จากนั้นกำหนดตำแหน่งของแต่ละหมาป่าสีเทาโดยสุ่มแทนการจัดลำดับของเมืองใน VRP จากนั้นทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ประเมินความพร้อมใช้งานของแต่ละหมาป่าสีเทา (Solution) ในประชากร ในกรณีของ VRP ความพร้อมใช้งานของแต่ละ Solution จะถูกกำหนดโดยระยะทางรวมที่เดินทางสำหรับแต่ละเส้นทาง จากนั้นทำการจัดลำดับหมาป่าสีเทา จัดลำดับหมาป่าสีเทาตามความพร้อมใช้งานของพวกเขา การจัดลำดับนี้กำหนดลำดับขั้นบันไดระหว่างหมาป่าสีเทา เช่น หมาป่าสีเทาแอลฟา เบต้า เดลต้า และโอเมก้า ในกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทา

ในการปรับปรุงตำแหน่งของหมาป่าสีเทาโดยอิงตามโครงสร้างลำดับขั้นการปรับปรุงในขั้นตอนนี้ รวมถึง การปรับปรุงหมาป่าสีเทาแอลฟา หมาป่าสีเทาแอลฟาแทน Solution ที่ดีที่สุดที่พบจนถึงตอนนี้ ปรับปรุงตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลของหมาป่าสีเทาแอลฟา และปรับปรุงหมาป่าสีเทาเบต้า หมาป่าสีเทาเบต้าแทน Solution ที่ดีที่สุดที่สอง ปรับปรุงตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลของหมาป่าสีเทาเบต้า ซึ่งการปรับปรุงหมาป่าสีเทาเดลต้าและโอเมก้า ปรับปรุงตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลของหมาป่าสีเทาเดลต้าและโอเมก้า หมาป่าสีเทาเหล่านี้จะสำรวจพื้นที่ของ Solution ที่กว้างขวางมากขึ้น โดยการสำรวจและการใช้ประโยชน์ สมดุลการสำรวจและการใช้ประโยชน์โดยการปรับพารามิเตอร์ เช่น อัตราการสำรวจและการใช้ประโยชน์ ซึ่งจะช่วยให้อัลกอริทึมสำรวจพื้นที่ใหม่ในขณะที่ใช้ประโยชน์จาก Solution ที่มีความเป็นมั่นใจ สำหรับการสิ้นสุดกำหนดเกณฑ์ในการสิ้นสุด ในที่ใช้จำนวนการทำซ้ำสูงสุด ซึ่งการเลือกผลของ Solution ที่ดีที่สุดได้จากการเลือก Solution ที่ดีที่สุด (เส้นทาง) ที่พบจากประชากรสุดท้ายของหมาป่าสีเทา เมื่อพิจารณาการประเมินประสิทธิภาพ ของอัลกอริทึมโดยใช้ผลรวมของระยะทางทั้งหมด จำนวนรอบ ของการเดินทางของคำตอบที่ได้โดยมีกระบวนการลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา สำหรับ VRP ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กระบวนการลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีการฝูงหมาป่าสีเทาในขั้นตอนต่าง ๆ

ในการปรับปรุงขั้นตอนของฝูงหมาป่าสีเทา โดยการเพิ่มกลุ่มหมาป่าสีเทาออกเป็น 2-3 กำหนดในขั้นตอน Ranking Wolves ซึ่งแบ่งเป็น 2-3 กลุ่มจะทำการกำหนดให้ กลุ่ม แอลฟา $X_\alpha(n_1)$, $X_\alpha(n_2)$ และ 3 กลุ่ม $X_\alpha(n_3)$, กลุ่ม เบต้า $X_\beta(n_1)$, $X_\beta(n_2)$ และ 3 กลุ่ม $X_\beta(n_3)$ กลุ่ม เดลต้า $X_\delta(n_1)$, $X_\delta(n_2)$ และ 3 กลุ่ม $X_\delta(n_3)$ และในการดำเนินการในขั้นตอนที่ 4 การปรับปรุง

ตำแหน่งของหมาป่าสีเทาโดยอิงตามโครงสร้างลำดับขั้น ขั้นตอนนี้นั้นประกอบด้วย การปรับปรุงฝูงหมาป่าสีเทา (ตัวอย่างในการแบ่งเป็น 3 กลุ่ม) ของแต่ละกลุ่ม โดย $x_\alpha(n_i)$, $x_\beta(n_i)$ และ $x_\delta(n_i)$ ซึ่งอาจจะมีการช่วยกันกำหนดตำแหน่งจากหมาป่าสีเทาที่นำฝูงทุกตัว ดังแสดงในสมการที่ 13

$$x(t+1) = \frac{x\alpha(n_i) + x\beta(n_i) + x\delta(n_i)}{3} \quad (13)$$

โดย GWO โดยการแบ่งฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ใช้ $i=1, 2$ และ 3 กลุ่มย่อย ใช้ $i=1, 2, 3$

5. วิธีดำเนินการวิจัย

5.1 รูปแบบการวิจัย

การทำวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมของวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา โดยการแบ่งกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทาเป็น 2-3 กลุ่ม จากเดิมมีแค่กลุ่มเดียว รวมถึงการได้นำวิธี GWO ที่ปรับปรุงไปประยุกต์ใช้กับการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะกรณีศึกษาหมู่บ้านป่าห้าว หมู่บ้านสันต้นขามและหมู่บ้านดาวดิงส์โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการทางเมตาฮิวริสติกส์ได้แก่ วิธี DEO และวิธี PSO เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหาเส้นทาง เวลาและจำนวนรอบในการเดินทางที่เหมาะสม

5.2 ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดเส้นทางรถเก็บขยะและขนส่งขยะโดยยานพาหนะภายในเขตหมู่บ้านป่าห้าว หมู่บ้านสันต้นขามและหมู่บ้านดาวดิงส์ จำนวน 3 หมู่บ้าน และกำหนดจุดเก็บขยะเป็น 52 จุด ในการเก็บขยะ โดยผู้ที่สามารถอนุเคราะห์ข้อมูลให้ในครั้งนี้คือหัวหน้าตัวแทนผู้จัดเก็บขยะของหมู่บ้านป่าห้าว หมู่บ้านสันต้นขามและหมู่บ้านดาวดิงส์โดยทางผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งจัดเก็บขยะโดยการเก็บตำแหน่ง และปริมาณขยะ

5.3 เครื่องมือวิจัย

เครื่องมือวิจัย ประกอบด้วย Google Maps, MATLAB R2018b และข้อมูลพิกัด/ระยะทาง

5.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. กำหนดปัญหา และการแก้ปัญหา การดำเนินการในการจัดเส้นทาง การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการฝูงหมาป่าสีเทาแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single objective) โดยการเพิ่มกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็น 2-3 กลุ่ม จากเดิมเป็นฝูงหมาป่าสีเทาแค่กลุ่มเดียว เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและสามารถยอมรับได้

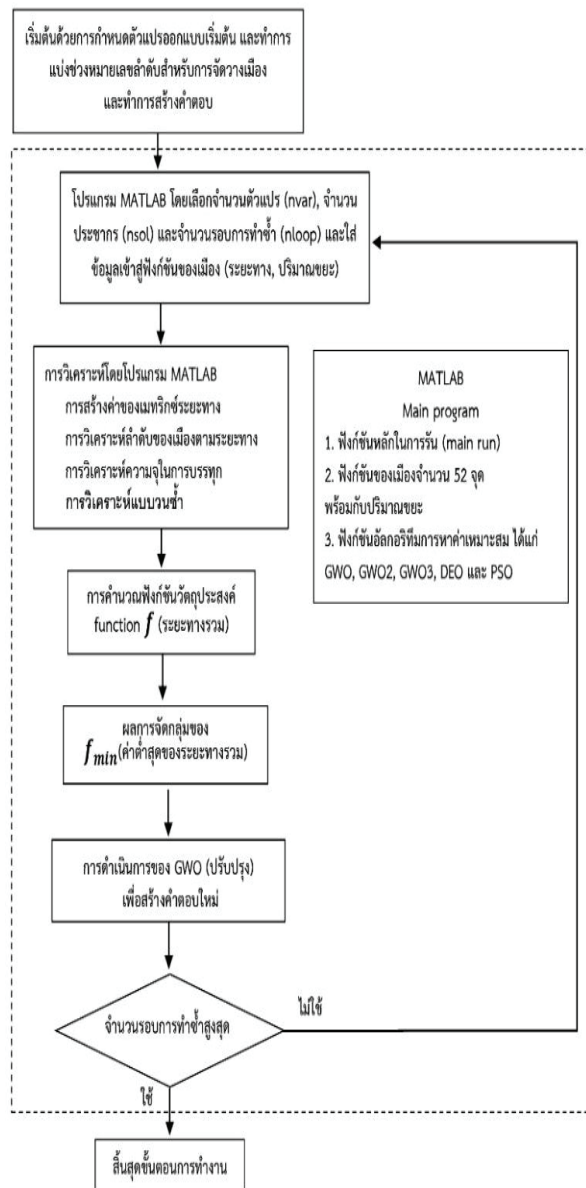
2. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ผู้วิจัยได้ทำการลงพื้นที่ในเขตหมู่บ้านป่าห้าว หมู่บ้านสันต้นขามและหมู่บ้านดาวดิงส์เพื่อทำการเก็บรวบรวม

ข้อมูลเส้นทาง เวลา จำนวนรอบการเก็บขยะของพนักงานเก็บขยะ และปริมาณของขยะที่ทำการเก็บในด้านปริมาตร โดยเส้นทางการเดินรถไปยังตำแหน่งต่างนั้น จะใช้เว็บไซต์ Google Maps เพื่อช่วยคำนวณหาระยะทางระหว่างจุดต่างๆ โดยทางผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบเส้นทาง และระยะที่ใช้ในการเดินรถจริงเทียบกับค่าที่ได้จาก Google Maps เป็นค่าที่ตรงกัน

3. สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะกรณีศึกษาหมู่บ้านป่าห้าว หมู่บ้านสันต้นขามและหมู่บ้านดาวดิงส์โดยประยุกต์ใช้วิธีการทางเมตาฮิวริสติกส์โดยพิจารณาระยะทางในการเดินทางน้อยที่สุด ระยะเวลาน้อยที่สุด และจำนวนรอบในการเก็บขยะน้อยที่สุด

5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ คอมพิวเตอร์ และโปรแกรม MATLAB Version R2018b สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยศึกษาขั้นตอนวิธีการฝูงหมาป่าสีเทาแบบวัตถุประสงค์เดียวในปัญหาทางการตัดสินใจดำเนินการ ได้แก่ ปัญหาการตัดสินใจโดยใช้วิธีการที่เหมาะสม การหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ จากนั้นเริ่มประชากรหมาป่าสีเทา เริ่มต้นโดยที่ a คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในรอบการทำงาน, $A \in [-1,1]$ และ $C = 2r$ เมื่อ $r \in [0,1]$ การคำนวณหาความเหมาะสมของตัวแทนการค้นหาแต่ละราย แบ่งกลุ่มเป็น 2-3 กลุ่ม โดยทำการวิเคราะห์หาผลเฉลยที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทาแบบเดิม และแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2-3 กลุ่ม รวมถึง วิธี DEO วิธี PSO แล้วทำการเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิมของการเดินรถเก็บขยะ ซึ่งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์และค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ขนาดประชากร ($nsol = 200$) จำนวนสูงสุดของการวนซ้ำ ($nloop = 1,000$) ซึ่งจำนวนผลในการประเมิน (Evaluation) อยู่ที่ 200,000 ครั้ง โดยมีกระบวนการในการหาค่าที่เหมาะสมในการหาผลเฉลยของดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนของโปรแกรมการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะ

6. ผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยการพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทาสำหรับการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะมีรายละเอียดดังนี้

6.1 การพิจารณาการแบ่งกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทา

ในการพิจารณาวิธีการ GWO นั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสามารถพิจารณาการปรับปรุง

ในวิธีฝูงหมาป่าสีเทาในส่วนของการทำงานที่เหมาะสมจากการพิจารณาถึงการแบ่งกลุ่มฝูงหมาป่าสีเทา 2-3 กลุ่ม โดยสามารถแบ่งพิจารณารูปแบบของสมการออกได้เป็น 3 รูปแบบได้แก่

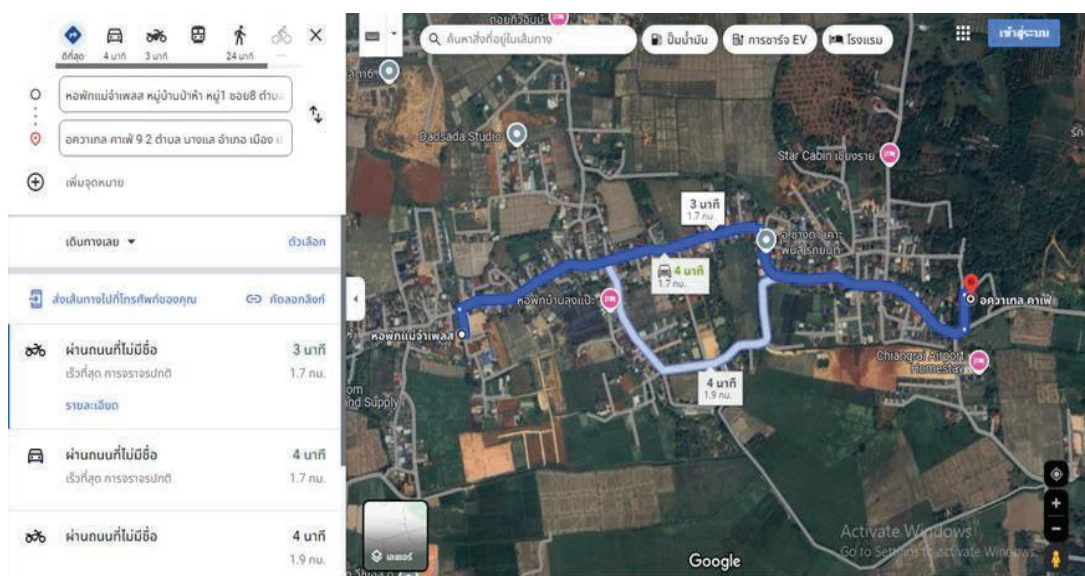
1. วิธีการ GWO แบบเดิม (มี 1 กลุ่ม)
2. วิธีการ GWO2 แบ่งกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่ม
3. วิธีการ GWO3 แบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม

โดยการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นได้แก่ Population size จำนวนประชากรฝูงหมาป่าสีเทา จำนวน 200 ตัว, Maximum number of iterations จำนวนรอบในการวนซ้ำสูงสุด จำนวน 1,000 รอบ และจำนวนตัวแปรออกแบบ (Number of dimensions or variables) ในรูปแบบของปัญหาเป็นแบบ VRP นั้นจำนวนของตัวแปรจะเท่ากับจำนวนเมือง และกำหนดจำนวนการทำซ้ำ (repetitions) 25 รอบ โดยได้ใช้กับวิธี DEO และ PSO เช่นเดียวกัน

6.2 ลักษณะการจัดการขยะมูลฝอยของหมู่บ้าน

โดยในปัจจุบัน ผู้จัดเก็บขยะของหมู่บ้านป่าห้าวหมู่บ้านสันตันขามและหมู่บ้านดาวดิงส์ ได้มีการจัดเก็บขยะมูลฝอย โดยมีพื้นที่ความรับผิดชอบในการจัดเก็บขยะทั้ง 3 หมู่บ้าน และกำหนดจุดเก็บขยะเป็น 52 จุด มีรถบรรทุกสำหรับบรรทุกขยะ จำนวน 1 คัน บรรทุกได้ 8.40 ลูกบาศก์เมตร มีการเก็บขยะทุกวันเสาร์ของแต่ละสัปดาห์ โดยเริ่มทำงานตั้งแต่ 7.00 น.

จนถึง 18.00 น. โดยการหาระยะทางในการจัดเก็บขยะในแต่ละจุดเพื่อนำมาสร้างเป็นเมตริกซ์ระยะทาง โดยผู้วิจัยได้ทำการสำรวจ และลงภาคสนามในการดำเนินงานจัดเก็บขยะของหมู่บ้านในแต่ละเส้นทางการเดินทาง และนำเว็บไซต์ Google Maps เพื่อช่วยคำนวณหาระยะทางระหว่างจุดต่างๆ ที่สำคัญในการจัดเก็บขยะดังภาพที่ 7 เมื่อคำนวณหาระยะทางตามจุดต่างๆ โดยการนำเอาข้อมูลนั้นมาสร้างเป็นเมตริกซ์ระยะทาง เพื่อนำไปคำนวณหาระยะทางระหว่างจุดต้องนำใช้ข้อมูลจากจุดพิกัดหรือหมุดในแผนที่โดยระยะทางแต่ละจุดแสดงในตาราง Distance metrix (Winyangkul et al., 2025) รวมถึงได้ได้ประมาณปริมาณขยะโดยเฉลี่ยในการเก็บแต่ละจุด และนำมารวมกันอยู่ที่ 21.84 ลูกบาศก์เมตร โดยการพิจารณาที่ปริมาตรของขยะแทนน้ำหนักเนื่องจากความสามารถในการบรรทุกของรถขยะจะถึงความสามารถด้านปริมาตรของรถก่อน



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการหาระยะทางด้วย Google Maps
ที่มา: Google Maps (2025)

6.3 ผลการจัดเส้นทางจัดเก็บขยะแบบเดิมและวิธีเมต้าฮิวริสติกส์

การจัดเส้นทางยานพาหนะในการจัดเก็บขยะ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดยานพาหนะในการปฏิบัติงาน โดยทางผู้จัดเก็บขยะทำการจัดเส้นทางยานพาหนะในการจัดเก็บขยะโดยอาศัยประสบการณ์ และความคุ้นเคยในการจัดเส้นทางยานพาหนะในการจัดเก็บขยะมูลฝอยแบบเดิมของหมู่บ้าน สังเกตได้ว่า การจัดเส้นทางเดินรถไม่เป็นระบบที่ชัดเจน ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้ นำเสนอการจัดเส้นทางยานพาหนะจัดเก็บขยะด้วยวิธีเมต้าฮิวริสติกส์ ได้แก่ การพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการ

ฝูงหมาป่าสีเทา 2-3 กลุ่ม รวมถึง GWO แบบเดิม และวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง รวมถึงวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค เพื่อทำการเปรียบเทียบหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับการจัดเส้นทาง การจัดเก็บขยะของหมู่บ้าน เพื่อนำไปปรับปรุงการดำเนินงานของหมู่บ้านในอนาคต และยังทำให้การวางแผนการจัดเส้นทางการจัดเก็บขยะที่ชัดเจนขึ้น ส่งผลให้ระยะทางในการขนส่งขยะลดลง และระยะเวลาในการดำเนินงานลดลงตามไปด้วย จากผลการวิเคราะห์ และทำการเปรียบเทียบ การจัดเส้นทางยานพาหนะในการจัดเก็บขยะมูลฝอยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบการจัดเส้นทางยานพาหนะในการจัดเก็บขยะ

	การเปรียบเทียบ					
	แบบเดิม	DEO	PSO	GWO	GWO2	GWO3
จำนวนรอบในการจัดเก็บขยะ(รอบ)	4	4	4	4	4	4
$f_{\min}$ ระยะทาง (เมตร)	72,200	62,970	62,550	61,150	60,250	58,350
$f_{\max}$ ระยะทาง (เมตร)	72,200	92,140	71,355	75,360	68,970	64,150
ค่าเฉลี่ย (เมตร)	72,200	76,850	65,581	69,187.5	64,112.5	61,852.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD.)	-	10,592.84	2,642.32	5,014.47	2,289.81	1,351.76
Confidence interval 95%	-	76,850 $\pm 4,152.39$	65,581 $\pm 1,035.79$	69,187.5 $\pm 1,965.67$	64,112.5 ± 897.61	61,852.4 ± 529.89

จากตารางที่ 1 พบว่า การจัดเส้นทาง การจัดเส้นทางเก็บขยะ โดยเปรียบเทียบระหว่าง วิธีแบบเดิม และ วิธีเมต้าฮิวริสติกส์ ได้แก่ DEO, PSO, GWO, GWO2 และ GWO3 ผลลัพธ์ที่ได้ของวิธีเมต้าฮิวริสติกส์ดีกว่าแบบเดิม โดยสามารถลดระยะทางเฉลี่ยในการเก็บขยะลงได้ โดยเฉพาะอัลกอริธึม GWO3 ที่ได้รับการพัฒนาให้แบ่งฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็นสามกลุ่ม ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ทั้งในด้านระยะทางต่ำสุด (58,350

เมตร), ค่าเฉลี่ยระยะทางต่ำที่สุด (61,852.4 เมตร) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด (1,351.76 เมตร) และ Confidence interval ที่ 95% อยู่ที่ ± 529.89 แสดงถึงความสม่ำเสมอและความเสถียรของผลลัพธ์ที่ได้ GWO2 และ GWO ก็ให้ผลลัพธ์ที่ดีเช่นกัน ขณะที่ PSO และ DEO แม้จะสามารถหาคำตอบที่ดีกว่าแบบเดิมได้ แต่มีค่าความแปรผันค่อนข้างสูง โดยเฉพาะ DEO ที่มีค่าเบี่ยงเบนสูงถึง 10,592.84 เมตร

สะท้อนถึงความไม่น่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพ การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา โดยเฉพาะ GWO3 มีความเหมาะสมมากที่สุด ในการนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนเส้นทางเดินรถ เก็บขยะ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ผลลัพธ์

ที่มีความเสถียรและน่าเชื่อถือสูงกว่าวิธีอื่นๆ โดย ผลของการหาค่าเส้นทางเก็บขยะโดยวิธี GWO3 สามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 2 โดยจะแสดงเส้นทาง การเดินรถไปยังตำแหน่งที่เก็บขยะ จำนวนในการ บรรทุก ระยะทางเดินรถ ในแต่ละรอบ

ตารางที่ 2 ตารางเส้นทางที่ปรับปรุงด้วยวิธี GWO3

รอบที่	เส้นทางเดินรถ	จำนวนในการบรรทุก (ลูกบาศก์เมตร)	ระยะทาง เดินรถ (เมตร)
1	1-3-5-6-8-10-11-13-17-18-19-20-1	8.30	17,380
2	1-21-22-23-24-25-26-27-28-30-33-34- 36-37-38-39-40-41-42-43-47-48-1	8.34	16,580
3	1-49-50-29-31-32-9-16-15-14-44-35-45-46-1	8.29	13,850
4	1-52-2-4-7-12-51-1	6.83	10,540
รวมทั้งหมด		31.76	58,350

7. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยการพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพ การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการฝูงหมาป่าสีเทา สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะ โดยการ ปรับปรุงเพิ่มฝูงหมาป่าสีเทา โดยการเพิ่มกลุ่ม ฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็น 2-3 กลุ่ม แล้วนำมาประยุกต์ ใช้สำหรับโรงกำจัดขยะ ผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงอัลกอริธึม GWO โดยการแบ่ง ฝูงหมาป่าสีเทาออกเป็น 2-3 กลุ่มย่อย (GWO2 และ GWO3) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการหาคำตอบ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ GWO3 ที่สามารถ ลดระยะทางของการจัดเส้นทางเก็บขยะได้มากที่สุดถึง 19.18% ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม และภาพที่ 8 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเพิ่มความสามารถทั้งด้านการสำรวจ และการหาประโยชน์จาก คำตอบที่ดีแล้ว ของพื้นที่ค้นหา การค้นพบนี้สอดคล้อง กับงานของ Mirjalili et al. (2014) ที่อธิบายว่า GWO

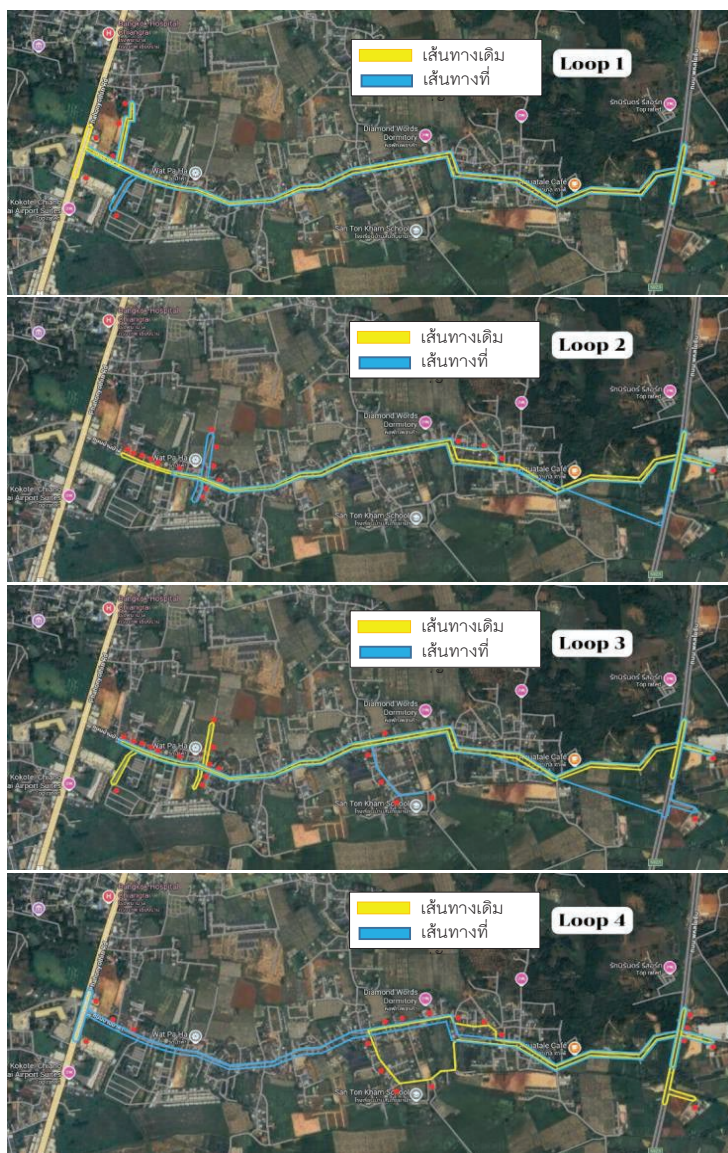
มีความสามารถในการสร้างสมดุลระหว่างการสำรวจ และการหาประโยชน์ แต่เมื่อโครงสร้างของอัลกอริธึม ถูกปรับให้มีหลายกลุ่มย่อย กระบวนการสำรวจ ยิ่งกระจายตัวได้ดีกว่าเดิม ส่งผลให้ลดโอกาสในการ ติดกับดักคำตอบเฉพาะที่

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า หลายงานได้เน้นการประยุกต์ใช้เมตาฮิวริสติกส์ เช่น PSO และ DEO สำหรับปัญหาการจัดเส้นทาง การขนส่ง ซึ่งแม้จะสามารถปรับปรุงผลลัพธ์ได้ แต่ก็มี ข้อจำกัดด้านความเสถียร และความสามารถในการ ลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีอย่างสม่ำเสมอ (Eberhart & Kennedy, 1995; Storn & Price, 1997) ตรงกันข้าม ผลการวิจัยนี้พบว่า GWO3 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัลกอริธึมอื่น ๆ ซึ่งสะท้อน ถึงความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพสูงกว่าในบริบทของ การจัดเส้นทางเก็บขยะ

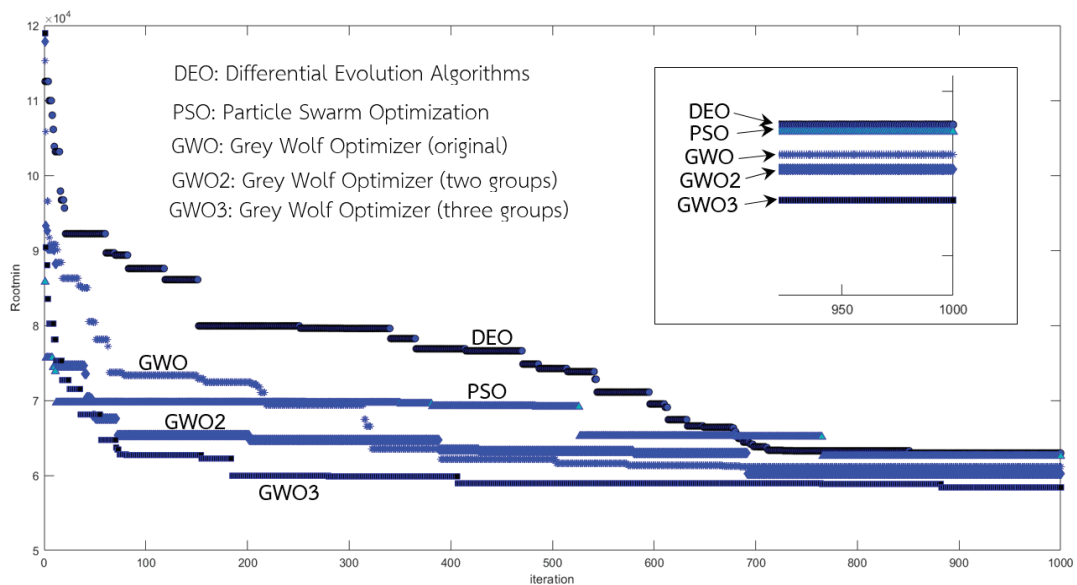
ผ่านการรับรองคุณภาพจากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI.) อยู่ในกลุ่ม 2 สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบระยะทางแบบเดิมกับเส้นทางที่ปรับปรุง

การจัดเส้นทาง	ระยะทาง
แบบเดิม	72,200
GWO3	58,350
ผลต่าง	13,850
คิดเป็นร้อยละ	19.18



ภาพที่ 8 เส้นทางรถเก็บขยะแบบเดิม เทียบกับแบบที่ปรับปรุง (โดยแสดงเป็นเส้นทางทั้งหมด 4 เส้นทาง โดยเส้นสีเหลืองคือเส้นทางเดิม และเส้นสีฟ้าคือเส้นทางที่ปรับปรุงที่ได้จาก GWO3)
ที่มา: Google map (2568)



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่ใช้ในการจัดเส้นทางเก็บขยะ
 (nsol=200, nvar=51, nloop=1,000)

การวิเคราะห์ความสามารถในการหาคำตอบโดย GWO3 มีการหาคำตอบเร็วที่สุดภายในประมาณ 200–300 iteration ดังแสดงในภาพที่ 9 และมีระยะทางลดลงต่อเนื่อง และคงที่เร็วโดยค่าคำตอบต่ำสุด และเสถียรที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงทั้งในด้านความเร็วและความแม่นยำในการหาคำตอบ ผลของความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของอัลกอริธึมโดยพิจารณาจาก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (STD) จะเห็นว่า GWO3 มีค่า STD ต่ำที่สุดบ่งชี้ว่าคำตอบที่ได้มีการกระจายตัวน้อย ไม่แกว่งมากมีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังสอดคล้องกับแนวคิดทางทฤษฎีของงานโดย Yang (2010) ที่อธิบายว่า อัลกอริธึมเชิงเมตาฮิวริสติกส์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ต่อเมื่อสามารถรักษาสมดุลระหว่างการสำรวจพื้นที่ใหม่และการหาประโยชน์จากพื้นที่ที่พบแล้ว การแบ่งฝูงหมาป่าออกเป็นหลายกลุ่มช่วยให้การสำรวจครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขึ้น ขณะที่ยังคงรักษาความเข้มข้นในการหาคำตอบที่มีคุณภาพสูงในบางพื้นที่ จึงอธิบายได้ว่าทำไม GWO3 จึงสามารถ

หาคำตอบได้เร็วและเสถียรมากกว่า เมื่อพิจารณาในเชิงการประยุกต์ใช้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบดั้งเดิมที่ไม่ได้ใช้กระบวนการปรับปรุงอัลกอริธึมก่อให้เกิดความเสี่ยงทั้งด้านระยะทางและต้นทุนโลจิสติกส์ การปรับใช้ GWO ที่ได้รับการพัฒนาจึงไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพเชิงคำนวณ แต่ยังมี ความหมายในเชิงปฏิบัติการที่สามารถช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระบบการจัดการขยะ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Toth และ Vigo (2014) ที่เน้นว่าการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดค่าใช้จ่าย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาโครงสร้างอัลกอริธึม GWO ให้มีความยืดหยุ่นและสามารถสำรวจพื้นที่ค้นหาได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ระบุไว้เกี่ยวกับการติดกับดักคำตอบเฉพาะที่ และความไม่เสถียรของผลลัพธ์ที่ได้จากเมตาฮิวริสติกส์อื่น ๆ และเมื่อพิจารณาถึงการลดระยะทางในการเก็บ

ขยะไม่เพียงช่วยประหยัดต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าบำรุงรักษายานพาหนะ แต่ยังเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลาและการจัดการทรัพยากร ซึ่งมีผลโดยตรงต่อเศรษฐกิจท้องถิ่น เนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นและเพิ่มความคุ้มค่าในการดำเนินงาน ขณะเดียวกัน การลดระยะทางยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมในระยะยาว แนวทางนี้สอดคล้องกับหลักการที่เน้นทั้งความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ และการรักษาสิ่งแวดล้อม

8. ข้อเสนอแนะ

8.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

การประยุกต์ใช้ในระบบบริหารจัดการขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หน่วยงานภาครัฐ หรือเทศบาลที่มีหน้าที่จัดเก็บขยะ สามารถนำอัลกอริธึม GWO3 ไปใช้ในการวางแผนเส้นทางเดินรถ

เก็บขยะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานทางด้านการประมาณการปริมาณขยะที่อาจคลาดเคลื่อนในทางปฏิบัติ จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการบรรทุกตังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณขยะรายวันที่แตกต่างกันภายในจุดเดิมในปริมาณที่มากจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงมาดำเนินการในการจัดเส้นทางใหม่

8.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในด้านรายละเอียดของปริมาณขยะ ระยะเวลาในการดำเนินการ รวมถึงข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง
2. ควรมีการวิเคราะห์ให้ครอบคลุมถึงเรื่องค่าใช้จ่าย และต้นทุนการขนส่งขยะมูลฝอยเพิ่มด้วย เพื่อช่วยวิเคราะห์ต้นทุน และค่าใช้จ่ายด้านการจัดเก็บขยะของหมู่บ้านได้ชัดเจนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Abdollahzadeh, B., Soleimanian Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(10), 5887–5958.
- Boualem, S. M., Meftah, B., & Debbat, F. (2022). Solving travelling salesman problem using a modified grey wolf optimizer. In M. Hatti (Ed.), *Artificial intelligence and heuristics for smart energy efficiency in smart cities* (Vol. 361, pp. 708–716). Springer.
- Chen, Y., & Wang, J. (2020). A modified binary grey wolf optimizer for the hazardous waste collection vehicle routing problem. *Waste Management*, 106, 213–226.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91.
- Diastivena, D., Wahyuningsih, S., & Satyananda, D. (2021). Grey Wolf Optimizer algorithm for solving the multi depot vehicle routing problem and its implementation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1872(1), 012001.

- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, (pp. 39–43). IEEE.
- Gupta, S., & Sharma, R. (2022). An enhanced grey wolf optimizer for electric vehicle routing problem with time windows considering battery consumption. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129858.
- Hu, P., Pan, J.-S., & Chu, S.-C. (2020). Improved Binary Grey Wolf Optimizer and Its application for feature selection. *Knowledge-Based Systems*, 195, 105746.
- Huang, G., Qi, Y., Cai, Y., Luo, Y., & Huang, H. (2024). A Grey Wolf Optimizer Algorithm for Multi-Objective Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem Considering Operation Time. *Biomimetics*, 9(6), 331.
- Ibrahim, A. M., Tawhid, M. A., & Won, D. (2022). A hybrid grey wolf optimizer and tabu search algorithm for the recyclable waste collection routing problem. *Applied Soft Computing*, 119, 108585.
- Jayabarathi, T., Raghunathan, T., Adarsh, B. R., & Suganthan, P. N. (2016). Economic dispatch using hybrid grey wolf optimizer. *Energy*, 111, 630–641.
- Jayakumar, N., Subramanian, S., Ganesan, S., & Elanchezhian, E. B. (2016). Grey wolf optimization for combined heat and power dispatch with cogeneration systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 252–264.
- Komaki, G. M., & Kayvanfar, V. (2015). Grey Wolf Optimizer algorithm for the two-stage assembly flow shop scheduling problem with release time. *Journal of Computational Science*, 8, 109–120.
- Kumar, V., Kalra, M., & Singh, D. (2021). A hybrid grey wolf optimizer with local search for capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 173, 114659.
- Li, X., & Zhao, Y. (2023). Grey wolf optimizer with reinforcement learning for dynamic waste collection vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 175, 108853.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61.
- Muangkote, N., Sunat, K., & Chiewchanwattana, S. (2014). An improved grey wolf optimizer for training q-Gaussian Radial Basis Functional-link nets. *2014 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 209–214.
- Reinelt, G. (1991). TSPLIB—A traveling salesman problem library. *ORSA Journal on Computing*, 3(4), 376–384.
- Shaheen, A., Sleit, A., & Al-Sharaeh, S. (2018). A solution for traveling salesman problem using grey wolf optimizer algorithm. *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, 96(18), 6256–6266.

- Song, X., Tang, L., Zhao, S., Zhang, X., Li, L., Huang, J., & Cai, W. (2015). Grey Wolf Optimizer for parameter estimation in surface waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75, 147–157.
- Sopto, D. S., Ayon, S. I., Akhand, M. A. H., & Siddique, N. (2018). Modified Grey Wolf Optimization to Solve Traveling Salesman Problem. *2018 International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)*, 1–4.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications* (2nd ed.). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Winyangkul, S., Kamtaeja, S., Chaiwongsakda, N., Sukkay, S., & Saengsuwan, T. (2025, September 5). *Data grey wolf optimization algorithm*. Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University. https://www.ind.crru.ac.th/data/Data_GreyWolfOptimization.pdf
- Yang, X. S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms* (2nd ed.). Frome, UK: Luniver Press.
- Zhang, G., Li, Y., & Zhang, W. (2019). A multi-phase grey wolf optimizer for multi-depot vehicle routing problem in e-waste collection. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1188-1201.a