

**การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ
เพื่อจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ**

**Development of a Mathematical Model and Application of Evolutionary
Method for Optimal Waste Collection Vehicle Routing**

ชญชิตา บุญคุ้ม และ ศิริกาญจน์ จันทน์สมบัติ*

Chananchida Boonkhum and Sirikarn Chansombat*

คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร เลขที่ 99 หมู่ 9 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University 99 Moo 9, Tha Pho, Mueang Phitsanulok, Phitsanulok,
Thailand 65000

*Corresponding author E-mail: sirikarn@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบของปัญหาและพัฒนาเส้นทางเดินรถเพื่อเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ด้วยการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) เพื่อหาเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะที่เหมาะสม การศึกษานี้ได้นำเส้นทางเดิมมาเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ได้จากแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า วิธีการเชิงวิวัฒนาการให้เส้นทางที่มีระยะทางที่เหมาะสมที่สามารถลดระยะทางในการเดินทางลงได้กว่าเส้นทางเดิม จากเส้นทางเดิมมีระยะทางเท่ากับ 28.70 กิโลเมตร และเส้นทางใหม่ที่ได้รับจากแบบจำลองมีระยะทางเท่ากับ 21.28 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางจากเดิมได้มากถึง 7.42 กิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 25.85 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการในการวางแผนเส้นทางอย่างเป็นระบบ สามารถช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานและเพิ่มคุณภาพของการบริการได้

คำสำคัญ : การจัดเส้นทางเดินรถ, การจัดเก็บขยะ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, วิธีการเชิงวิวัฒนาการ
ได้รับเมื่อ 3 ธันวาคม 2568; แก้ไขเมื่อ 14 มกราคม 2569; ตอรับการตีพิมพ์เมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2569

Abstract

This research aims to analyze the nature of the routing problem and develop an optimized waste collection routes for Sukhothai Thani Municipality, Mueang District, Sukhothai Province. This was achieved by presenting a mathematical model and applying an evolutionary method to identify the optimal waste collection routes. The study compared the existing municipal routes with the routes generated by the developed model. The results indicate that the evolutionary method yields a more optimal routing path, resulting in a significant reduction in total travel distance compared to the original route. Specifically, the original route had a total distance of 28.70 kilometers, while the new route derived from the model measured 21.28 kilometers. This represents a substantial distance reduction of 7.42 kilometers, or 25.85%. This finding underscores the effectiveness of utilizing systematic mathematical modeling and evolutionary method for route planning. The proposed approach offers practical implications for reducing operational costs and enhancing service efficiency in municipal waste collection systems.

Keywords: Vehicle Routing, Waste Collection, Mathematical Model, Evolutionary Method

Received: December 3, 2025; Revised: January 14, 2026; Accepted: February 13, 2025

1. บทนำ

การจัดเก็บขยะของหน่วยงานภาครัฐในประเทศไทย ถือว่าเป็นภารกิจที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพชีวิตของประชาชนและความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อม โดยองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นมีหน้าที่หลักในการรวบรวมคัดแยกและกำจัดขยะมูลฝอยอย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่มักพบคือ การบริหารจัดการจัดเก็บขยะที่ไม่เพียงพอหรือไม่ทันต่อปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการสะสมของขยะในพื้นที่สาธารณะ ซึ่งสร้างความไม่เป็นระเบียบและส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพของเมือง อีกทั้งยังนำไปสู่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเน่าเสีย การส่งกลิ่นเหม็น การแพร่กระจายของเชื้อโรคและสัตว์พาหะ รวมถึงการรั่วไหลของสารพิษสู่ดินและแหล่งน้ำได้อีกด้วย

สำหรับกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี จังหวัดสุโขทัย ปัจจุบันทางเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีมีภารกิจในการจัดเก็บขยะในพื้นที่รับผิดชอบ โดยรถบรรทุกขยะจะวิ่งตามเส้นทางที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบ คือ ไม่มีการวางแผนเส้นทาง การจัดเก็บขยะอย่างเป็นระบบ เนื่องจากพนักงานขับรถเป็นผู้กำหนดเส้นทางและลำดับจุดจัดเก็บขยะด้วยตนเอง ทำให้เกิดปัญหาการจัดเก็บขยะวิ่งซ้ำเส้นทาง

เดียวกันในบางพื้นที่ส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลา เชื้อเพลิง และงบประมาณโดยไม่จำเป็น ในขณะที่บางพื้นที่กลับถูกละเลยไม่ได้รับการจัดเก็บขยะตามกำหนด ก่อให้เกิดปัญหาการสะสมของขยะ ส่งกลิ่นเหม็น และสร้างความไม่พึงพอใจแก่ประชาชนในพื้นที่

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาเกี่ยวกับการขนส่งและโลจิสติกส์รูปแบบหนึ่ง ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Dantzing et al. (1954) ซึ่งปัญหา VRP ได้พัฒนามาจากปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem: TSP) (Bazirha, 2025) โดยลักษณะของปัญหาเป็นการเดินทางของยานพาหนะจากจุดเริ่มต้น ไม่ว่าจะเป็นคลังสินค้า หรือ ศูนย์กระจายสินค้า เพื่อจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้าต่าง ๆ และจะเดินทางกลับมายังจุดเริ่มต้น เพื่อให้เกิดผลรวมของระยะทางหรือต้นทุนการเดินทางที่มีค่าน้อยที่สุด ด้วยความนิยมของปัญหา VRP จากนักวิจัย ทำให้มีการประยุกต์ใช้วิธีการในการค้นหาคำตอบของปัญหาดังกล่าวอย่างหลากหลาย สำหรับโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เป็นวิธีการแก้ปัญหานี้ที่มีประสิทธิภาพที่ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหา VRP

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการเพื่อแก้ปัญหาระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด ซึ่งถือได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะสามารถช่วยลดความสิ้นเปลืองทั้งด้านเวลา เชื้อเพลิง และงบประมาณ อีกทั้งยังสามารถสร้างความพึงพอใจแก่ประชาชนผู้ใช้บริการได้ รายละเอียดของบทความนี้ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ของการวิจัย การทบทวนวรรณกรรม วิธีดำเนินงานวิจัย ผลการวิจัย สรุปผลและอภิปรายผล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะกรณีศึกษาเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีเพื่อทำให้เกิดระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด

3. ทบทวนวรรณกรรม

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาเกี่ยวกับการขนส่งและโลจิสติกส์รูปแบบหนึ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดในการวางแผนการจัดลำดับและเส้นทางของการขนส่งสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ปัญหา VRP ถูกนำเสนอขึ้นโดย Dantzing et al. (1954) เป็นปัญหาที่ได้รับความนิยมในด้านการวิจัยดำเนินงาน (Operations Research) เป็นอย่างมากเพื่อตัดสินใจเลือกเส้นทางยานพาหนะเพื่อไปรับบริการลูกค้าในจุดต่าง ๆ ซึ่งเดินทางออกจากจุดเริ่มต้น 1 แห่งหรือมากกว่าไปยังจุดหมายปลายทางที่มีตำแหน่งแตกต่างกันออกไป โดยมีเงื่อนไขคือในแต่ละเส้นทางจะต้องมี

จุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดที่คลังสินค้า ปริมาณความต้องการของลูกค้าแต่ละรายต้องไม่เกินปริมาณความจุของรถขนส่งสินค้า และลูกค้าแต่ละรายจะได้รับการบริการเพียงแค่ครั้งเดียวเท่านั้น

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า มีงานวิจัยที่ได้ดำเนินการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น งานวิจัยของ กนกกรรณ์ ลีโรจนาประภา และคณะ (2567) ได้นำเสนอวิธีการในการจัดเส้นทางเพื่อจัดเก็บขยะมูลฝอย 4 วิธี ได้แก่ วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Algorithm) วิธีวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) และวิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ผลการศึกษาพบว่า วิธีโปรแกรมเชิงเส้นให้ผลการจัดเส้นทางที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด ระยะทางรวมทั้งหมดลดลงจาก 78.27 กิโลเมตร เหลือเพียง 46.37 กิโลเมตร หรือลดลงร้อยละ 40.76 งานวิจัยของ ณัฏฐพัชร์ วาณิชกุล และ กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ (2567) ได้ประยุกต์ใช้วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) และวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Algorithm) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดเส้นทางเดินรถขนส่งน้ำดื่ม ผลการศึกษาพบว่า วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) สามารถหาระยะทางรวมที่น้อยที่สุดได้เหมาะสมที่สุด เดิม 130.50 กิโลเมตร ลดเหลือ 121.10 กิโลเมตร ซึ่งลดระยะทางรวมได้มากถึง 9.40 กิโลเมตร งานวิจัยของ ปุณณวิชัย เศรษฐสมบูรณ์ และคณะ (2567) นำเสนอแบบจำลองเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อลดต้นทุนขนส่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ขนาดเล็กและขนาดกลาง ผลการศึกษาพบว่า สามารถลดต้นทุนขนส่งได้ร้อยละ 18.5 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีดำเนินการจริงของกรณีศึกษา งานวิจัยของชยากร พุทธกำเนิด และคณะ (2564) ทำการศึกษาจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะด้วยวิธีเคมินเพื่อจัดกลุ่มเส้นทางและจัดเส้นทางด้วยตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ผลการศึกษาพบว่า วิธีที่ได้ระยะทางสั้นที่สุด คือ K เท่ากับ 6 มีระยะทางที่สั้นกว่าวิธีปัจจุบัน 54.08 กิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 13.66 งานวิจัยของกรรณิการ์ ศรีพนมวรรณ และคณะ (2565) ได้พัฒนาเส้นทางเดินรถใหม่สำหรับการเก็บขยะมูลฝอยขององค์การบริหารส่วนตำบลหนองกบ อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ผลการศึกษาพบว่า เส้นทางใหม่ทำให้ระยะทางรวมลดลงจากเดิม 6.75 กิโลเมตรต่อสัปดาห์ งานวิจัยของ Shirali & Cemil (2025) นำเสนอการปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งที่มีข้อจำกัดด้านความจุ (Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงการคำนวณ (Computational Efficiency) และคุณภาพของคำตอบ (Solution Quality) ผลการศึกษาพบว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถค้นหาคำตอบที่มีต้นทุนใกล้เคียงกับวิธี Dynamic Programming ต่างกันเพียงร้อยละ 2-5 แต่มีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่า 3-4 เท่า งานวิจัยของ Ahmad et al. (2025) นำเสนอการแก้ปัญหา CVRP สำหรับบริษัทน้ำดื่ม ด้วยการนำเสนอวิธีการ ได้แก่ วิธี Saving Matrix Algorithm วิธี Nearest Insertion Heuristic และ วิธี Nearest Neighbor Algorithm ผลการศึกษาพบว่า วิธี Saving Matrix Algorithm เป็นวิธีที่ให้คำตอบได้ดีที่สุดที่

สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการกระจายสินค้าได้ สามารถช่วยประหยัดต้นทุนการขนส่งได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการทบทวนวรรณกรรมเห็นได้ว่า ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ มีวิธีการในการแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างหลากหลาย ทั้งกลุ่มของวิธีการแบบแม่นยำตรง (Exact Methods) ที่สามารถให้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีในกลุ่มนี้มักถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดเล็ก หากปัญหาที่มีขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ วิธีการในกลุ่มนี้จะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ภายในระยะเวลาการค้นหที่เหมาะสม (Nanasilp & Wisittipanich, 2020) สำหรับวิธีการแบบประมาณค่า (Approximate Methods) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดี (Good Solution) แต่ไม่มีการรับประกันว่าคำตอบที่ได้รับนั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุด วิธีการกลุ่มนี้สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในเวลาที่จำกัด (Talbi, 2009) ด้วยความซับซ้อนของปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ ซึ่งอยู่ในกลุ่มของปัญหา CVRP งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะกรณีศึกษาเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีเพื่อทำให้เกิดระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด และประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) ผ่านฟังก์ชัน Evolutionary ในเครื่องมือ Microsoft Excel Solver เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมในการกำหนดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ ซึ่งวิธีการเชิงวิวัฒนาการเป็นวิธีการแบบประมาณค่าที่ค้นหาคำตอบด้วยการสุ่ม

จากพื้นที่ค้นหาคำตอบของปัญหาขึ้นมา แล้วใช้ฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ประเมินค่าความเหมาะสมและคัดเลือกคำตอบบางส่วนที่ดีกว่าในแต่ละรอบการคำนวณไปเป็นประชากรรุ่นถัดไป ด้วยการสืบพันธุ์ การกลายพันธุ์ และการแลกเปลี่ยนองค์ประกอบในโครโมโซมเพื่อสร้างคำตอบรุ่นใหม่ กระบวนการนี้จะดำเนินการไปจนได้รับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือจนกว่าการคำนวณเป็นไปตามเงื่อนไขของการหยุดที่ได้กำหนดไว้

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะกรณีศึกษาเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีเพื่อทำให้เกิดระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด ภายใต้เงื่อนไขที่มีอยู่ รายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

4.1 ศึกษาสภาพปัจจุบันของการจัดเก็บขยะกรณีศึกษา

จากการลงพื้นที่สำรวจและสัมภาษณ์เชิงลึก ผู้วิจัยพบว่า ปัจจุบันเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีมีหน้าที่ในการจัดเก็บขยะในพื้นที่รับผิดชอบเพื่อนำขยะไปทิ้งยังโรงขยะเทศบาลสุโขทัย หลังจากเสร็จสิ้นภารกิจแล้วรถบรรทุกขยะจะถูกนำกลับมายังจุดจอดใกล้กับที่ทำการกองทุนชุมชนวังหิน โดยรถบรรทุกขยะจะวิ่งตาม

เส้นทางที่ทางเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีกำหนดไว้ และรับผิดชอบจัดเก็บขยะครอบคลุมพื้นที่ตำบลธานีทั้งหมด ซึ่งจะทำให้การจัดเก็บขยะวันละ 2 รอบ แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ตั้งแต่เวลา 03.00 ถึง 07.00 น. และ 14.00 ถึง 18.00 น. ใช้รถบรรทุกขยะแบบอัดท้ายขนาดบรรจุ 6,000 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 1 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะจุดเก็บขยะแบบรวบรวมนั้น ซึ่งมีจุดเก็บขยะทั้งสิ้น 33 จุด สำหรับการคำนวณปริมาณขยะในแต่ละจุด ด้วยข้อจำกัดด้านเวลาในการเก็บข้อมูล ทำให้ผู้วิจัยไม่สามารถชั่งน้ำหนักขยะจริงได้ในทุกจุดในวันที่ยังพื้นที่สำรวจและสัมภาษณ์เชิงลึก ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้การสุ่มค่าปริมาณขยะภายใต้ขอบเขตน้ำหนักต่ำสุดและสูงสุดที่สำรวจพบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าไปในแบบจำลอง โดยค่าของน้ำหนักขยะต่ำสุดที่กำหนด คือ 50 กิโลกรัมต่อจุด และค่าของน้ำหนักขยะสูงสุดที่กำหนด คือ 250 กิโลกรัมต่อจุด และสำหรับระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะแต่ละจุด ผู้วิจัยได้ใช้กูเกิ้ลเอิร์ธ (Google Earth) เพื่อหาระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะแต่ละจุด โดยเมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดใด ๆ แสดงดังตารางที่ 2 และสามารถสร้างเป็นแผนผังเส้นทางการจัดเก็บขยะแต่ละจุด แสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งมีระยะทางในการเดินทาง คือ 28.70 กิโลเมตร



ภาพที่ 1 รถบรรทุกขยะแบบอัดท้าย ขนาด 6,000 กิโลกรัม

ตารางที่ 1 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุด (หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะ	จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะ
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	-	18	ปั๊มคาลเท็กซ์ สาขาโชคชัย	179
1	บริษัท โตโยต้าสุโขทัย	144	19	ซอยอินทรี	207
2	บริษัท อีซูซุ สุโขทัย	98	20	ซอยอินทรี3	143
3	ซอยข้างปั๊มเซลล์	193	21	ซอยอินทรีก้วยเตี่ยวบ้านนาย	126
4	สะพานศาลเจ้าพ่อคลองโพธิ์	157	22	ซอยบาลเมือง2	203
5	ซอยข้างร้าน EZ House & Café	118	23	ซอยบาลเมือง1	59
6	หน้าซอยชุมชนคลองโพธิ์	193	24	ซอยบาลเมือง1	75

ตารางที่ 1 (ต่อ)

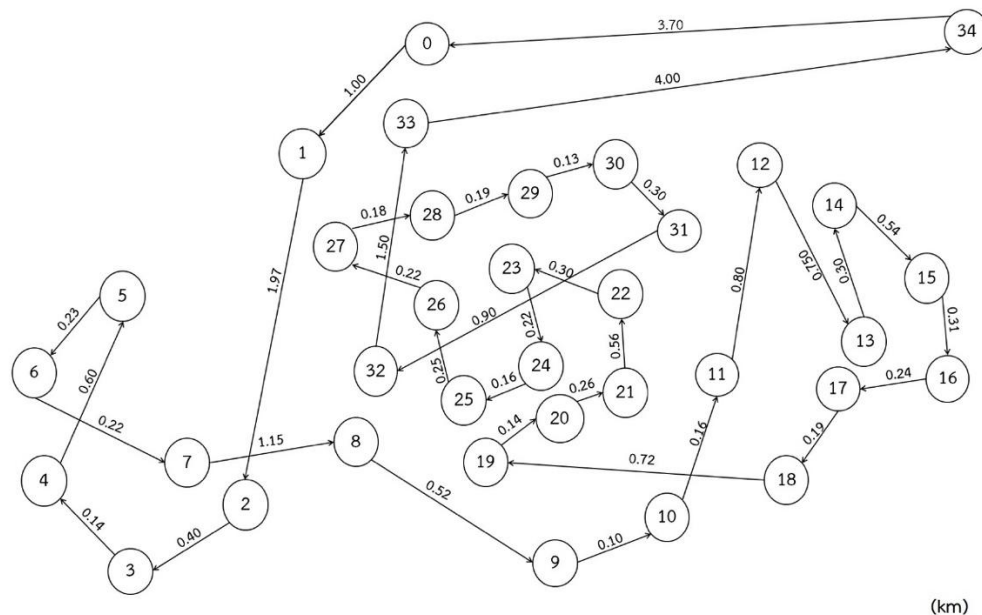
จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะ	จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะ
7	ร้าน SCG Home Saeng Uak	156	25	ซอยบาลเมือง1	219
8	หน้าร้าน VC meat สาขา สุโขทัย	157	26	ซอยบาลเมือง1	120
9	ข้างร้าน แม็คเวิร์ค	183	27	ศูนย์จราจรกลางเมือง สุโขทัย	250
10	หน้าธนาคารอาคารสงเคราะห์	206	28	ตรงข้ามร้านพรรณเพ็ญ อินเทอร์เน็ต	234
11	หน้าบริเวณ J&T Express	50	29	ตรงข้ามบริษัทหัตถิกร จำกัด (มหาชน)	173
12	ร้านอาหารครัวท้ายซอย	83	30	หน้าโรงเรียนสารสาสน์วิเทศ สุโขทัย	144
13	หน้าเบทาโกรสุโขทัย	78	31	บริษัท สิงห์สุโขทัย จำกัด	209
14	ซอยศรีอรุณ สวนกล้วย	220	32	ร้านไฮสคูลเครื่องเขียน	246
15	ซอยตาลเดี่ยว	198	33	บริษัท เอ พี เอส ฮอนด้า	109
16	หน้าบริษัทโชคชัยมอเตอร์ จำกัด	101	34	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	-
17	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา	235			

ตารางที่ 2 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดใด ๆ (หน่วยเป็นกิโลเมตร)

ไป จาก	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	34
0	0	1.00	2.90	3.30	3.30	3.50	3.75	3.10	2.30	2.80	...	3.70
1	1.00	0	1.97	2.37	2.37	2.57	2.82	2.17	1.37	1.87	...	4.30
2	2.90	1.97	0	0.40	0.40	0.60	0.85	0.20	0.85	1.40	...	6.27
3	3.30	2.37	0.40	0	0.14	0.26	0.59	0.20	1.25	1.80	...	6.67
4	3.30	2.37	0.40	0.14	0	0.60	0.45	0.67	1.30	1.85	...	6.72
5	3.50	2.57	0.60	0.26	0.60	0	0.23	0.45	1.45	2.00	...	6.87

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ไป จาก	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	34
6	3.75	2.82	0.85	0.59	0.45	0.23	0	0.22	1.40	1.95	...	6.82
7	3.10	2.17	0.20	0.20	0.67	0.45	0.22	0	1.15	1.70	...	6.57
8	2.30	1.37	0.85	1.25	1.30	1.45	1.40	1.15	0	0.52	...	5.58
9	2.80	1.87	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.52	0	...	6.50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
34	3.70	4.30	6.27	6.67	6.72	6.87	6.82	6.57	5.58	6.50	...	0



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงระยะทางและลำดับการเก็บขยะแต่ละจุด

4.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรียบร้อยแล้ว จึงได้นำข้อมูลที่ได้รับนั้นมาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เกิดระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

ข้อตกลงเบื้องต้น (Assumptions)

1. รถบรรทุกขยะมีความจุในการบรรทุกอย่างจำกัด

2. รถบรรทุกขยะจะเริ่มต้นและสิ้นสุดการเดินทางที่จุดจอดรถบรรทุกขยะ
3. แต่ละจุดเก็บขยะจะมีรถบรรทุกขยะเข้าไปเพื่อเก็บขยะวันละ 1 ครั้ง
4. ระยะทางของแต่ละจุดสามารถรู้ล่วงหน้าและแน่นอน

ดัชนี (Indices)

i, j คือ จุดเก็บขยะ i และ j ใด ๆ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

ตัวแปรทราบค่า (Parameters)

n คือ จำนวนจุดเก็บขยะทั้งหมด (จุด)

D_{ij} คือ ระยะทางจากจุดเก็บขยะ i ไปยังจุดเก็บขยะ j (กิโลเมตร)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

Y_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจประเภท Binary Variable มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการเลือกเส้นทางในการจัดเก็บขยะจากจุดเก็บขยะ i ใด ๆ ไปยังจุดเก็บขยะ j ใด ๆ และมีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีอื่น ๆ

Z_i คือ ตัวแปรตัดสินใจประเภทจำนวนเต็ม (Integer Variable) แทนลำดับการเดินทางจากจุดเก็บขยะ i ใดๆ

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

เงื่อนไขข้อบังคับ (Constraints)

$$\sum_{i=1}^n Y_{ij} = 1 \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} = 1 \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall i \quad (3)$$

$$Y_{ij} = 0 \quad \text{เมื่อ } i = j \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$Z_i - Z_j + (n - 1)Y_{ij} \leq n - 2 \quad \text{เมื่อ } 2 \leq i \leq n \text{ และ } 2 \leq j \leq n \quad (5)$$

$$Z_i = 1 \quad (6)$$

$$2 \leq Z_i \leq n \quad \text{เมื่อ } 2 \leq i \leq n \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{1j} \leq 1 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{i1} \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} \right) \leq Q \quad (10)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{เมื่อ } i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

ฟังก์ชันที่ (1) คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุด

สมการ (2) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับให้ผลรวมของตัวแปรตัดสินใจที่รถบรรทุกขยับออกเดินทางจากทุก ๆ จุดเก็บขยะ i ไปยังจุดเก็บขยะ j ใด ๆ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 กล่าวคือ การเดินทางจากจุดเก็บขยะ i ไปยังจุดเก็บขยะ j ใด ๆ จะมีจุดหมายปลายทางเพียงจุดเดียวเท่านั้น

สมการ (3) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับให้ผลรวมของตัวแปรตัดสินใจที่รถบรรทุกขยับออกเดินทางจากจุดเก็บขยะ i ใด ๆ ไปยังทุก ๆ จุดเก็บขยะ j ต้องมีค่าเท่ากับ 1 กล่าวคือ การเดินทางจากจุดเก็บขยะ i ใด ๆ ไปยังจุดเก็บขยะ j จะออกเดินทางได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

สมการ (4) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับให้ตัวแปรตัดสินใจ X_{ij} ใด ๆ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ i และ j มีค่าเท่ากัน

อสมการ (5) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับเพื่อกำจัดทัวร์ย่อย เป็นการจัดเรียงลำดับในการจัดเก็บขยะให้ครบทุกจุดก่อนที่จะกลับมายังจุดจอดรถบรรทุกขยะ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น

สมการ (6) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับที่กำหนดให้ลำดับการเดินทางจัดเก็บขยะ (Z_i) มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกำหนดให้จุดที่ 1 ($i = 1$) เป็นจุดจอดรถบรรทุกขยะ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น

อสมการ (7) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับที่กำหนดให้ลำดับการเดินทางจัดเก็บขยะ (Z_i) ของแต่ละจุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ n เมื่อ $2 \leq i \leq n$

อสมการ (8) – (9) เป็นการประกันว่าจะมีรถ 1 คันเท่านั้น ที่ออกเดินทางจากจุดจอดรถบรรทุกขยะเพื่อไปเก็บขยะที่จุดต่าง ๆ และเดินทางกลับมายังจุดจอดรถบรรทุกขยะเมื่อทำการเก็บขยะครบทุกจุดแล้ว

อสมการ (10) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับให้รถเก็บขยะต้องรับน้ำหนักขยะไม่เกินความสามารถที่รับได้

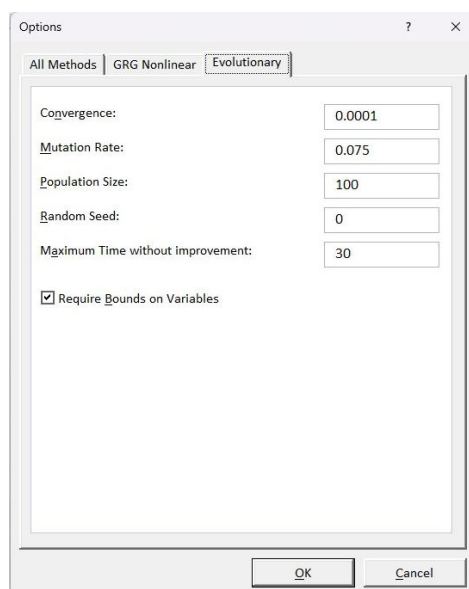
ข้อจำกัด (11) การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรตัดสินใจ Y_{ij} มีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น (Binary) โดย $Y_{ij} = 0$ คือ ไม่เลือกจัดเก็บขยะจากจุด i ไปยังจุด j และ $Y_{ij} = 1$ คือ เลือกจัดเก็บขยะจากจุด i ไปยังจุด j ใด ๆ

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยการแทนค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรทราบค่าเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่ามีความถูกต้องตรงกับเงื่อนไขข้อกำหนดหรือไม่ ผลลัพธ์ที่ได้มีการละเมิดเงื่อนไขข้อกำหนดหรือไม่

4.4 การประมวลผลหาผลลัพธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ผ่านฟังก์ชัน Evolutionary ในเครื่องมือ Microsoft Excel Solver เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมในการกำหนดเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะ เนื่องจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่องและมีความกระโดด ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีการเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ฟังก์ชัน Evolutionary ซึ่งได้รับการพัฒนาต่อยอดจากวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เพื่อรองรับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน Evolutionary ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน Evolutionary

4.5 สรุปและอภิปรายผล

เป็นการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้มาสรุปและแปลผลเพื่อให้สามารถเป็นข้อมูลป้อนกลับไปยังกรณีศึกษา คือ เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้ต่อไป

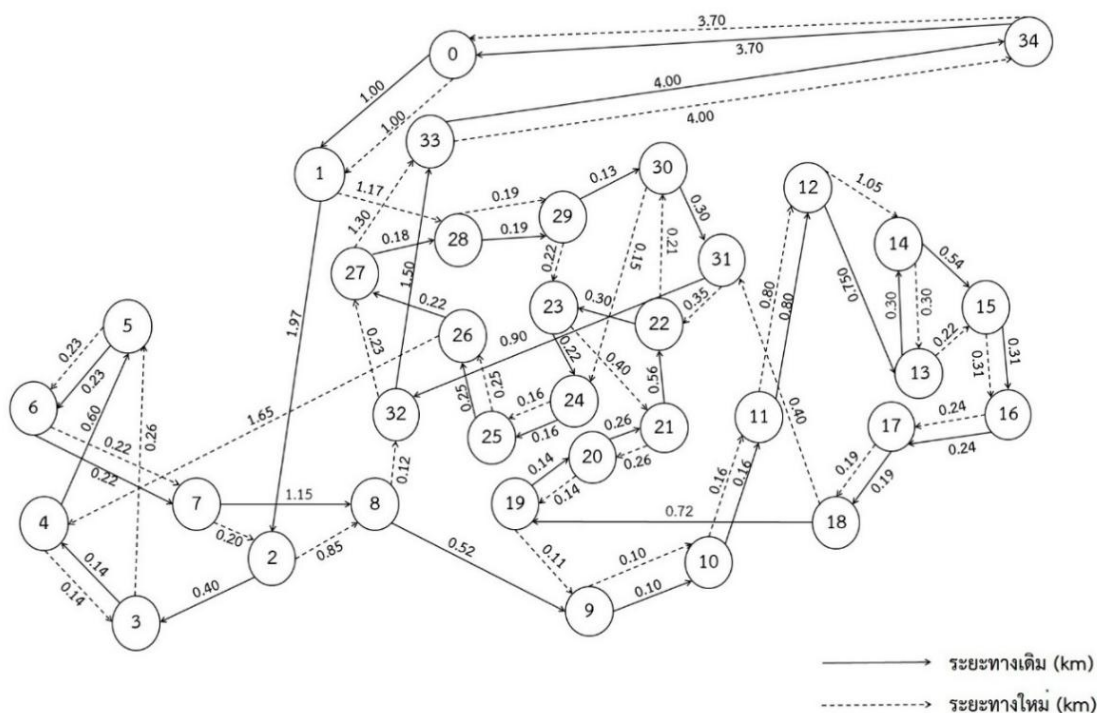
5. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Solver ซึ่งเป็น Add-in ที่มีอยู่ใน Microsoft Excel สามารถนำมาใช้ในการประมวลผลค้นหาคำตอบได้ จากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel(R) Core(TM) i5-8250U ด้วยความถี่ 1.8 GHz และมีหน่วยความจำ (RAM) 8.00 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10 ด้วยการเลือกวิธีแก้ปัญหาแบบ Evolutionary ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ระยะทาง

ในการเดินทางจัดเก็บขยะที่สั้นที่สุด คือ 21.28 กิโลเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางในการเดินทางจัดเก็บขยะที่มีลำดับการจัดเก็บตามข้อมูลที่ได้รับจากการสัมภาษณ์และได้นำข้อมูลดังกล่าวมาหาระยะทางด้วยการใช้กูเกิ้ลเอิร์ธ คือ 28.70 กิโลเมตร ซึ่งมีลำดับของการจัดเก็บขยะแต่ละจุดและระยะทางรวม แสดงดังตารางที่ 3 และสามารถสร้างเป็นแผนผังเพื่อเปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแต่ละจุด ระหว่างเส้นทางเดิมที่ได้รับข้อมูลมาจากการสัมภาษณ์กับเส้นทางที่ได้ผลลัพธ์จาก Solver แสดงดังภาพที่ 4

ตารางที่ 3 ลำดับการจัดเก็บขยะแต่ละจุดและระยะทางรวมของแต่ละเส้นทาง

เส้นทาง	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (กิโลเมตร)
เส้นทางเดิม	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>	28.70
	17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30	
	>31>32>33>34>0	
เส้นทางที่ได้จาก Solver	0>1>28>29>23>21>20>19>9>10>11>12>14>13>15	21.28
	>16>17>18>31>22>30>24>25>26>4>3>5>6>7>2>8	
	>32>27>33>34>0	



ภาพที่ 4 แผนผังเปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับผลลัพธ์ที่ได้จาก Solver

6. สรุปและอภิปรายผล

ผลการวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับ

วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ในการแก้ปัญหการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ ซึ่งถือเป็นการประยุกต์แนวคิดของ Vehicle Routing Problem (VRP) เข้าสู่บริบทการจัดการขยะมูลฝอยในระดับเทศบาล

ผลการศึกษาพบว่า เส้นทางใหม่ที่ได้จากแบบจำลองสามารถลดระยะทางจากเดิม 28.70 กิโลเมตร เหลือเพียง 21.28 กิโลเมตร ลดลงถึง 7.42 กิโลเมตร หรือร้อยละ 25.85 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า การวางแผนเส้นทางอย่างเป็นระบบสามารถช่วยลดต้นทุนเวลา เชื้อเพลิง และงบประมาณ ได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซและการใช้ทรัพยากรโดยไม่จำเป็น ในกรณีศึกษาครั้งนี้ วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ได้จริงกับสภาพพื้นที่ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเชิงวิวัฒนาการกับวิธีอื่น ๆ จากการทบทวนวรรณกรรม จะเห็นได้ว่า วิธี Saving Algorithm แม้จะเป็นวิธีที่หาระยะทางรวมที่น้อยที่สุดได้เหมาะสมที่สุด แต่วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method)

ในงานวิจัยนี้พิสูจน์แล้วว่าสามารถแก้ปัญหา VRP ในบริบทของการเดินรถจัดเก็บขยะระดับเทศบาลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน วิธี Genetic Algorithm เป็นวิธีที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงซึ่งสอดคล้องกับการเลือกใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ใน Microsoft Excel Solver ที่พัฒนาต่อยอดมาจากวิธีนี้และวิธี Linear Programming ที่ให้คำตอบที่สั้นที่สุดในบางกรณี แต่ยังมีข้อจำกัดในการจัดการตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องอาจทำให้การคำนวณไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ โดยงานวิจัยนี้ยืนยันว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ สามารถลดระยะทางและต้นทุนได้จริง อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาการจัดการขยะที่พบในปัจจุบัน และมีศักยภาพในการต่อยอดไปสู่การจัดการขยะในพื้นที่อื่น ๆ เพื่อสร้างระบบที่ยั่งยืนและตอบสนองต่อความต้องการของประชาชนได้ดียิ่งขึ้น

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการสำรวจและรวบรวมข้อมูล ทำให้ไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลน้ำหนักขยะที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละจุดได้ ผู้วิจัยจึงใช้การสุ่มค่าปริมาณขยะภายใต้ขอบเขตน้ำหนักต่ำสุดและสูงสุดที่สำรวจพบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลอาจมีความคลาดเคลื่อนหากสถานการณ์จริงมีปริมาณขยะอยู่นอกเหนือช่วงค่าที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ ในสภาวะการดำเนินงานจริงอาจมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่นของสภาพการจราจรหรือการปิดปรับปรุงเส้นทาง ที่ส่งผลกระทบต่อระยะทางและเวลาการเดินทางจริง ดังนั้น ในอนาคตจึงควรมีการบูรณาการเทคโนโลยีระบบเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณขยะแบบเรียลไทม์ (Real-time IoT Waste Level Sensors) เข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนเส้นทางให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริง ตลอดจนสามารถขยายผลการศึกษา โดยนำแนวทางการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ไปทดลองใช้ในเขตพื้นที่อื่นหรือเพิ่มเงื่อนไขที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การจัดการเส้นทางสำหรับยานพาหนะหลายคัน หรือการบริหารจัดการขยะแยกประเภท เพื่อสร้างระบบการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสูงสุด และเนื่องจากวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) อาศัยหลักการทางสถิติและการสุ่มค้นหาคำตอบ เพื่อจัดการกับปัญหาที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเส้นทางตรง (Non-linear) ผลลัพธ์ที่ได้จึงอาจมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในการประมวลผลแต่ละครั้ง อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ถือเป็นคำตอบที่ดีที่สุด จากการทดลองรันซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้เส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการศึกษากิจการวิจัยจากคณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร และหน่วยวิจัย ASEAN Logistics Academic Network (ALA) และขอขอบคุณเทศบาล

เมืองสุโขทัยธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย กรณีศึกษาที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- กนกกรรณ์ ลีโรจนาประภา, จินณพัต ทองมาก, ธนภรณ์ ดิษฐา, และ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข. (2567). การจัดเส้นทางรถเก็บขยะ กรณีศึกษาเทศบาลตำบลท่าเรือ อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 33(1), 79-102.
- กรรณิการ์ ศรีพนมวรรณ, พงษ์เทพ ภูเดช, และ ชนิชา หมอยาดี. (2565). การแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางรถเก็บขยะมูลฝอย ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อการตัดสินใจด้วยไมโครซอฟต์แวร์เอ็กเซล โซลเวอร์: กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลหนองกบ อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี. *วารสารวิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน*, 8(1), 62-73.
- ชยากร พุทธกำเนิด, เสกสรรค์ วินยางค์กุล, ประเวศ อนันต์เอื้อ, และ นคร ไชยวงศ์ศักดิ์. (2564). การจัดเส้นทางเดินรถเดินรถเก็บขยะโดยวิธีเคมินและตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย กรณีศึกษาเทศบาลตำบลบ้านดู่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย. *เทปสตรี I-TECH*, 16(2), 127-135.
- ณัฐพัชร์ วาณิชกุล และ กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ. (2567). การปรับปรุงประสิทธิภาพการขนส่งน้ำดื่มสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ กรณีศึกษา โรงงานน้ำดื่มดีซี. *วารสารสหศาสตร์ศรีปทุม ชลบุรี*, 10(3), 46-61.
- บุญญวิทย์ เศรษฐ์สมบูรณ์, กาญจนา เศรษฐ์นันท์, และ กฤษณรัช นิตินิธิ. (2567). การจัดเส้นทางเดินรถแบบผสมผสานระหว่างภารกิจการรับและส่ง ร่วมกับการใช้บริการรถเช่า กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์. *Engineering and Technology Horizons*, 41(3), 410304.
- Ahmad, S., Ni, M., & Putu, D. (2025). Optimization of the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) and Distribution Costs in a Drinking Water Company. *Journal Penelitian Sekolah Tinggi Transportasi Darat*, 16(1), 80-96
- Bazirha, M. (2025). A novel MILP formulation and an efficient heuristic for the vehicle routing problem with lunch break. *Annals of Operations Research*, 351(1), 253-278.
- Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4), 393-410.

- G. B., Dantzig, & J. H., Ramser, (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91.
- Nanasilp S. & Wisittipanich W. (2020). A mathematical model for pollution travelling salesman problem. *Thai Journal of Operations Research*, 8(1): 20-25.
- Shirali, K. & Cemil, T., (2025). Route splitting and adaptive mutation in genetic algorithms for the capacitated vehicle routing problem. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 14(6), 4769-4785.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics From Design to Implementation*. Canada : John Wiley and Sons.