

การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและขนส่งขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลนครสงขลา ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

GIS-Based Network Analysis for Enhancing Municipal Solid Waste Collection and Transportation Efficiency in Songkhla Municipality, Thailand

จิรวัด จันทองพูน* บุณยามิน โหดหมาน เอกรินทร์ หมะเห

ชนกันต์ หิมะหมัด และ ต่อลาก การปลื้มจิต

Jirawat Jantongpoon* Bunyameen Hodmarn Agkarin Mahe

Chonnakan Heemmamad and Torlap Kanplumjit

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประเทศไทย

Survey Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thailand

*E-mail: jirawat.j@rmutsv.ac.th Tel. (+66)971708437

(Received 15/02/2026, Revised 04/05/2026, Accepted 12/06/2026)

บทคัดย่อ

การจัดเก็บขยะมูลฝอยในเขตเมืองมักประสบปัญหาเส้นทางไม่มีประสิทธิภาพ เช่น การเดินทางซ้ำซ้อนและใช้เวลานานเกินความจำเป็น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางในการเก็บขนขยะในเขตเทศบาลนครสงขลา โดยประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการวิเคราะห์โครงข่ายและอัลกอริทึม Dijkstra ภายใต้ฟังก์ชันต้นทุนที่บูรณาการตัวแปรเชิงปฏิบัติการ ได้แก่ ระยะทาง เวลา ความเร็ว และระยะเวลาการจอดเก็บขยะ ข้อมูลประกอบด้วยจุดเก็บขยะ 599 จุด และเส้นทาง 10 เส้นทาง โดยพัฒนาโครงข่ายถนนในรูปแบบกราฟแบบมีทิศทาง พร้อมกำหนดข้อจำกัด เช่น ถนนทางเดียว ถนนที่มีเกาะกลาง และข้อจำกัดในการกลับรถ จากนั้นวิเคราะห์เส้นทางต้นทุนต่ำสุดและเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิม ผลการศึกษาพบว่า สามารถลดระยะทางรวมจาก 138.743 เป็น 118.629 กิโลเมตร (ลดลงร้อยละ 14.50) และลดระยะเวลารวมจาก 26 ชั่วโมง 35 นาที เป็น 20 ชั่วโมง 28 นาที (ลดลงร้อยละ 23.01) โดยมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และแสดงให้เห็นว่าเส้นทางที่เหมาะสมเชิงปฏิบัติไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเชิงเรขาคณิต ความใหม่ของงานวิจัยนี้อยู่ที่การบูรณาการข้อมูลภาคสนามและข้อจำกัดของโครงข่ายจริงเข้ากับแบบจำลอง ทำให้ผลลัพธ์มีความสมจริงและนำไปใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองยังจำกัดด้วยข้อมูลจราจรแบบคงที่ ในอนาคตควรพัฒนาโดยใช้ข้อมูลแบบเวลาจริงและแบบจำลองขั้นสูง เช่น VRP หรือ Geo-AI ผลการศึกษาสามารถใช้สนับสนุนการตัดสินใจของหน่วยงานท้องถิ่นในการวางแผนเส้นทางและบริหารจัดการขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์โครงข่าย ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ขยะมูลฝอย วิธีของไดคัสตรา

Abstract

Municipal solid waste collection in urban areas often suffers from inefficient routing, including overlapping routes and excessive travel time. This study aims to improve the efficiency of waste collection routes in Songkhla Municipality by integrating Geographic Information Systems (GIS) with network analysis and Dijkstra's algorithm. The cost function incorporates operational variables, including travel distance, time, speed, and stop time, to better reflect real-world conditions. The dataset consists of 599 waste collection points and 10 routes. The road network was modeled as a directed graph with constraints such as one-way streets, median-divided roads, and U-turn restrictions. Optimal routes were then computed and compared with the existing routes. The results show that the total travel distance was reduced from 138.743 to 118.629 km (14.50%), and

the total operation time was reduced from 26 h 35 min to 20 h 28 min (23.01%). These reductions were statistically significant ($p < 0.05$). The findings indicate that an operationally optimal route is not necessarily the geometrically shortest path. The novelty of this study lies in integrating field-based data and real-world network constraints into the model, enhancing both realism and practical applicability. However, the model is limited by the use of static traffic data. Future work should incorporate real-time traffic data and advanced approaches such as the Vehicle Routing Problem (VRP) and Geo-AI. The results can support decision-making for local authorities in route planning and waste management operations.

Keywords: Network analysis, Geographic information system, Garbage, Dijkstra's algorithm

1. บทนำ

ขยะมูลฝอยชุมชนเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของเมืองทั่วโลก โดยเฉพาะในพื้นที่เขตเมืองที่มีการขยายตัวของชุมชนและจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย การจัดเก็บและขนส่งขยะมูลฝอยจึงเป็นภารกิจสำคัญขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการรักษาความสะอาดของเมือง ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชาชน อย่างไรก็ตาม การจัดเก็บขยะมูลฝอยมักประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพการดำเนินงาน เช่น การเดินทางซ้ำซ้อน การใช้ระยะทางและเวลาเกินความจำเป็น การใช้เชื้อเพลิงในปริมาณสูง และต้นทุนการดำเนินงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการจัดการขยะมูลฝอยโดยรวม ดังนั้น การวางแผนเส้นทางการจัดเก็บและขนส่งขยะมูลฝอยให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในวงการวิชาการและการบริหารจัดการเมือง ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic information system: GIS) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการจัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยเฉพาะการวิเคราะห์โครงข่าย (Network analysis) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เส้นทางที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดต่าง ๆ ของโครงข่ายถนน เช่น ระยะทาง เวลาเดินทาง ทิศทางการจราจร และลักษณะทางกายภาพของถนน งานวิจัยในระยะแรกมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ GIS เพื่อสนับสนุนการวางแผนเชิงพื้นที่ด้านการจัดการขยะมูลฝอย เช่น การกำหนดตำแหน่งที่ตั้งถังขยะที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองเชิงเหมาะสม (Optimization models) และการวิเคราะห์พื้นที่ให้บริการ ซึ่ง Vijay et al. (2008) ได้ประยุกต์ใช้ GIS และแบบจำลอง p-median เพื่อกำหนดตำแหน่งที่ตั้งถังขยะให้สามารถรองรับการเข้าถึงของประชาชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในระยะดังกล่าวยังมุ่งเน้นการวางแผนเชิงพื้นที่เป็นหลัก และยังไม่ได้พิจารณาข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการปฏิบัติงาน

ต่อมา การวิเคราะห์โครงข่ายถนนด้วย GIS ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในบริบทที่หลากหลายมากขึ้น เช่น Das et al. (2019) ที่ศึกษาการวิเคราะห์โครงข่ายถนนในเมือง Guwahati ประเทศอินเดีย เพื่อประเมินความเชื่อมโยงของโครงข่ายและการเข้าถึงพื้นที่บริการ ขณะที่ Klawwikarn and Jirakajohnkool (2014) และ Nicoară and Haidu (2014) ได้นำ GIS Network Analysis และ Dijkstra's Algorithm มาใช้ในการวิเคราะห์การเข้าถึงบริการสาธารณะและสถานพยาบาลฉุกเฉินผ่านโครงข่ายถนนจริง ส่วน Ahmed et al. (2017) ได้ศึกษาการวิเคราะห์โครงข่ายถนนในเขตมหานครโคโรโดยเปรียบเทียบระหว่างเส้นทางที่สั้นที่สุดกับเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดตามเวลาเดินทาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำหนดต้นทุนของโครงข่ายจากข้อมูลการดำเนินงานจริงสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงได้มากกว่าการพิจารณาเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Prameshwari et al. (2021) และ Gagula et al. (2025) ยังได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ Dijkstra's Algorithm และ WebGIS ในการวิเคราะห์เส้นทางและการเข้าถึงพื้นที่บริการภายใต้สภาพแวดล้อมเชิงพื้นที่ที่ซับซ้อน สำหรับการจัดการขยะมูลฝอย โดยเฉพาะ งานวิจัยในประเทศไทยได้เริ่มประยุกต์ใช้ GIS Network Analysis ร่วมกับเทคนิคด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น Sirathammathorn et al. (2017) ได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์โครงข่ายรวมกับการวิเคราะห์หาที่ตั้งและการจัดสรร (Location-allocation analysis) และ Vehicle Routing Problem (VRP) เพื่อวางแผนการจัดเก็บและขนส่งขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลเมืองบางกรวย จังหวัดนนทบุรี โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บขยะและลดระยะเวลาในการ

ดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Rungrodchatchaval et al. (2016) และ Chaingam and Chaiyakarm (2020) ได้ประยุกต์ใช้แนวคิด Vehicle Routing Problem เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการขนส่งและลดต้นทุนการดำเนินงานภายใต้ข้อจำกัดด้านความจุและการจัดสรรยานพาหนะ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังอาศัยข้อมูลเชิงคงที่และสมมติฐานมาตรฐานของแบบจำลอง เช่น เวลาให้บริการคงที่ ความเร็วคงที่ หรือข้อมูลการปฏิบัติงานที่ไม่ได้มาจากการสำรวจภาคสนามโดยตรง ในระยะหลัง งานวิจัยได้เริ่มให้ความสำคัญกับการบูรณาการข้อมูลภาคสนามร่วมกับการวิเคราะห์โครงข่ายมากขึ้น โดย Das et al. (2024) ได้ใช้ข้อมูล GPS Tracking ข้อมูลภาคสนาม และข้อมูลจากผู้ปฏิบัติงานจริงในการปรับปรุงเส้นทางการจัดเก็บขยะ ส่งผลให้สามารถลดระยะทาง เวลา และต้นทุนเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าผลการศึกษาจะสะท้อนให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้ข้อมูลภาคสนาม แต่ยังคงมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพเส้นทางเป็นหลัก และยังไม่ได้บูรณาการตัวแปรเชิงปฏิบัติการอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดำเนินงานจริงอย่างครบถ้วน

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ยังมีช่องว่างทางการวิจัยที่สำคัญ คือ การขาดการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ร่วมกับตัวแปรเชิงปฏิบัติการ (Operational variables) ที่สะท้อนสภาพการดำเนินงานจริงของระบบจัดเก็บขยะมูลฝอยอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะข้อมูลระยะเวลาการจอดเก็บขยะ ความเร็วเฉลี่ยของรถเก็บขยะ ลักษณะจุดเก็บขยะ ข้อจำกัดด้านลำดับชั้นถนน ทิศทางการจราจร และพฤติกรรมปฏิบัติงานจริงของเจ้าหน้าที่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเส้นทางและต้นทุนการดำเนินงาน แต่ยังไม่ได้รับการพิจารณาอย่างเพียงพอในงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์เส้นทางเก็บขนขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลนครสงขลา จังหวัดสงขลา โดยประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับ Dijkstra's Algorithm ภายใต้การกำหนดค่าน้ำหนักของโครงข่ายจากข้อมูลภาคสนามจริง ได้แก่ ระยะทาง ความเร็วเฉลี่ย ระยะเวลาการจอดเก็บขยะ ลำดับชั้นถนน ทิศทางการจราจร และตำแหน่งจุดตั้งถังขยะ เพื่อให้แบบจำลองสามารถสะท้อนสภาพการปฏิบัติงานจริงได้มากที่สุด ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บขยะมูลฝอย ลดระยะทางและเวลาในการปฏิบัติงาน ลดต้นทุนการดำเนินงาน และสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น รวมทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบ WebGIS และ Geo-AI เพื่อรองรับการบริหารจัดการเส้นทางเก็บขยะมูลฝอยแบบอัจฉริยะในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์เส้นทางเก็บขนขยะมูลฝอย โดยบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) และข้อมูลภาคสนามจริง (Field data) ผ่านการวิเคราะห์โครงข่าย (Network analysis) ร่วมกับ Dijkstra's Algorithm เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจัดเก็บขยะให้สอดคล้องกับสภาพการปฏิบัติงานจริงในระดับเทศบาล

2.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้เห็นภาพรวมของกระบวนการศึกษาอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้ได้จัดทำแผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน (Flowchart) ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การกำหนดปัญหา การรวบรวมข้อมูล การเตรียมข้อมูล การสร้างแบบจำลองโครงข่าย การกำหนดตัวแปรต้นทุน การวิเคราะห์เส้นทาง การแสดงผล และการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

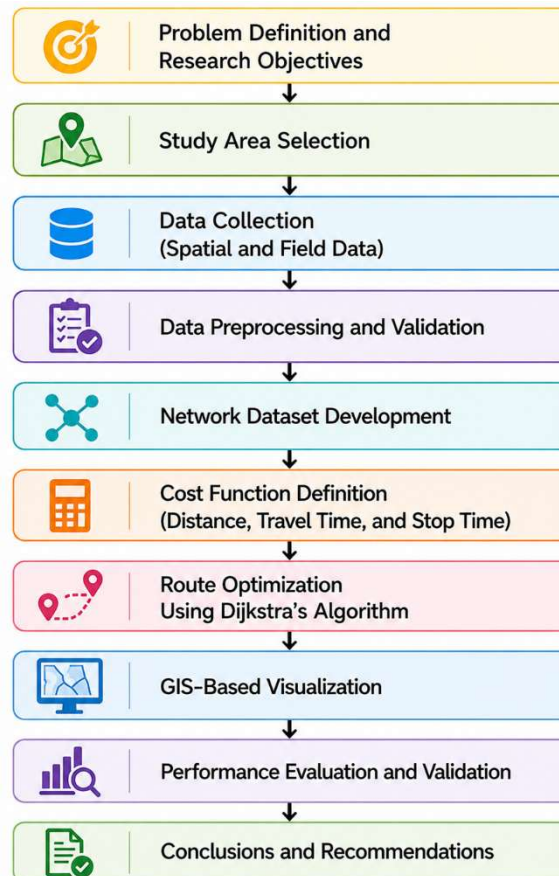


Figure 1 Workflow of the GIS-based network analysis for waste collection route optimization

2.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาคือครอบคลุมเขตเทศบาลนครสงขลา จังหวัดสงขลา มีพื้นที่ประมาณ 9.27 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุม 55 ชุมชน มีจุดเก็บขยะจำนวน 599 จุด และมีรถเก็บขยะจำนวน 10 คันที่ปฏิบัติงานในแต่ละวัน

2.3 การรวบรวมข้อมูล

โดยแบ่งการเก็บข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้อมูลปฐมภูมิ และข้อมูลทุติยภูมิ

2.3.1 ข้อมูลปฐมภูมิ

เป็นข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วย 1) พิกัดจุดที่ตั้งถังขยะ ในเทศบาลนครสงขลา ได้ทำการเก็บค่าพิกัดตำแหน่งถังขยะเพื่อนำมาใช้ศึกษาตำแหน่งที่ตั้งปัจจุบันของถังขยะในเทศบาลนครสงขลา 2) เวลาจอด ระยะเวลาจอดเก็บถังขยะแต่ละจุด จะทำการจดบันทึกค่าโดยจับเวลาในแต่ละจุดเก็บ 3) ความเร็ว ความเร็วได้ทำการเฉลี่ยของการเดินทางทั้ง 10 เส้นทาง ความเร็วที่ใช้จะอยู่ที่ 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 4) ลำดับชั้นของถนน แบ่งลำดับชั้นถนน ดังนี้ 4.1) ถนนสายหลัก เชื่อมระหว่างจังหวัดหรือเชื่อมระหว่างอำเภอ 4.2) ถนนสายรอง เชื่อมภายในอำเภอ 4.3) ถนนในซอย ที่มีความกว้างถนนมากกว่า 3 เมตร และซอยที่รถเก็บขยะมูลฝอยจำเป็นต้องเข้า 4) ถนนในซอยแคบที่มีความกว้างถนนน้อยกว่า 3 เมตร รถเก็บขยะมูลฝอยไม่สามารถเข้าถึงได้เลย เพื่อใช้กำหนดในการวิเคราะห์เส้นทางในการเดินทางรถเก็บขยะมูลฝอยตามเงื่อนไขภายใต้สภาพแวดล้อมความเป็นจริงของรถเก็บขยะมูลฝอยที่สามารถขับผ่านได้เพียงแค่ว่า ถนนสายหลัก ถนนสายรอง ถนนในซอย 5) ประเภทของรถบรรทุกขยะ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท รถบรรทุกขยะแบบอัดท้ายใหญ่ ชนิดไม่น้อยกว่า 6 ล้อ และรถบรรทุกขยะแบบอัดท้ายเล็กเป็นรถยนต์บรรทุกขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ตัวรถชนิด 6 ล้อเครื่องยนต์ดีเซล 6) ข้อมูลเส้นทางการเดินทางรถเก็บขยะมูลฝอยในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา โดยเส้นทางการเก็บขยะมูลฝอยทั้งหมดภายในเทศบาลนครสงขลา ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 Waste collection routes of garbage trucks in Songkhla Municipality

2.3.2 ข้อมูลทุติยภูมิ

เป็นข้อมูลที่ได้จากแหล่งข้อมูลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูลในเทศบาลนครสงขลา ประกอบด้วยข้อมูล 1) ชั้นข้อมูลขอบเขตพื้นที่ เทศบาลตำบลบ่อทราย เทศบาลตำบลเกาะแก้ว (พื้นที่บ่อขยะ) อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 2) ชั้นข้อมูลเส้นโครงข่ายของถนน จากแหล่งข้อมูลศูนย์สารสนเทศภูมิศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม นำชั้นข้อมูลโครงข่ายที่ได้จากการสืบค้นมาทำการปรับแก้ไขข้อมูลเส้นโครงข่ายของถนนเพื่อให้มีความถูกต้องและเป็นปัจจุบัน สามารถนำไปวิเคราะห์โครงข่ายได้ 3) ข้อมูลบ่อขยะจังหวัดสงขลา มีขนาดพื้นที่โดยรวม 200 ไร่ เป็นสถานที่กำจัดขยะที่รถขนส่งขยะทั้ง 10 คันต้องนำขยะมาขนส่งมายังสถานที่นี้

2.4 การเตรียมและตรวจสอบข้อมูล

ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่ (Data validation) และปรับปรุงโครงข่ายถนนให้มีความสมบูรณ์ (Topology correction) เช่น การเชื่อมต่อถนน การกำหนดทิศทางจราจร และการตัดข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งจัดรูปแบบข้อมูลให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในระบบ GIS ทั้งนี้ การจัดเตรียมข้อมูลโครงข่ายถนนและการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงข่ายถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ ดังเช่นการศึกษาของ Klawwikarn and Jirakajohnkool (2014) ที่ประยุกต์ใช้ GIS Network Analysis เพื่อวิเคราะห์พื้นที่การให้บริการของศูนย์การแพทย์ฉุกเฉิน โดยให้ความสำคัญกับการปรับปรุงข้อมูลโครงข่ายถนนและการกำหนดคุณลักษณะของโครงข่ายก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเข้าถึงพื้นที่บริการ

2.5 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่าย

โครงข่ายถนนถูกกำหนดในรูปแบบกราฟ $G(N, E)$ โดย N คือ โหนด แทนตำแหน่งถังขยะและจุดตัดถนน และ E คือ เส้นเชื่อมแทนช่วงถนน กำหนดค่าน้ำหนักของเส้นทาง (Cost function) ดังสมการ (1)

$$C_{ij} = (d_{ij} / v) + s_j \quad (1)$$

กำหนดให้

C_{ij}	=	ต้นทุนรวมของเส้นทาง
d_{ij}	=	ระยะทาง
v	=	ความเร็วเฉลี่ย
s_j	=	ระยะเวลาการจอดเก็บขยะซึ่งสะท้อนทั้งเวลาเดินทางและเวลาให้บริการจริง

2.6 การพิจารณาข้อจำกัดเชิงปฏิบัติ

แบบจำลองได้พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้งานจริง ได้แก่ ทิศทางการจราจร (One-way / Two-way) ลำดับชั้นถนน ถนนแคบ (< 3 เมตร) ที่รถเข้าถึงไม่ได้ และข้อจำกัดของการกลับรถ (U-turn) นอกจากนี้ พฤติกรรมการเก็บขยะในระยะใกล้ เช่น การเดินเก็บถังขยะหลายจุดใกล้กัน ได้ถูกสะท้อนผ่านค่า stop time ที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม ซึ่งสามารถกำหนดค่า Parameter ในการสร้าง Network dataset ประกอบด้วย 1) การตั้งค่า Turn เพื่อจะต้องใช้ในการกำหนดจุดเลี้ยวของถนน 2) ตั้งค่าการเชื่อมกันของเส้น ใช้แบบ Any vertex เพราะต้องการให้ข้อมูลเส้นจะถูกแบ่งเป็นเส้นทางย่อย ๆ ที่จุดตัดของเส้นถนน 3) การตั้งค่าระดับความสูงจะกำหนดเป็น None เพราะในการวิเคราะห์จะไม่ใช้ค่าความสูงของเส้นถนน 4) กำหนดเงื่อนไขให้ตรงกับข้อมูลในตารางเชิงบรรยาย (Attribute) ของชั้นข้อมูลถนน ดังนี้ 4.1) Length ให้หน่วยเป็น Meter 4.2) seconds time ให้หน่วยเป็น Seconds 4.3) Roadclass จะมีค่าเป็น Integer กำหนดให้ ลำดับชั้นถนน มีเงื่อนไขดังนี้ ถนนสายหลักและถนนสายรองจะกำหนดให้อยู่ใน Primary roads และถนนในซอยกำหนดให้อยู่ใน Secondary Roads และถนนในซอยแคบกำหนดให้อยู่ใน Local Roads และ 4.4) one way มีค่าเป็นเงื่อนไขเฉพาะคือ Boolean โดยกำหนด Oneway โดยใส่ค่า TF หรือ T, FT หรือ F หรือถ้าไม่ใช่จะเป็น Two way (Esri, 2016)

2.7 การวิเคราะห์เส้นทาง

ใช้ Dijkstra's Algorithm ในการค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยใช้ค่าน้ำหนักของโครงข่ายที่กำหนดจากข้อมูลจริง การเลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากเหมาะสมกับโครงข่ายที่มีค่าน้ำหนัก และสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าปัญหานี้สามารถขยายไปสู่ Vehicle Routing Problem (VRP) ได้ แต่ VRP ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ความจุรถ และปริมาณขยะ ซึ่งไม่พร้อมในบริบทนี้

2.8 เครื่องมือและการวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้ซอฟต์แวร์ ArcGIS Desktop (ArcMap) และเครื่องมือ Network Analyst ซึ่งใช้หลักการของ Dijkstra's Algorithm ในการวิเคราะห์เส้นทาง (Jirakajohnkool, 2017) โดยแนวทางดังกล่าวได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิเคราะห์เส้นทางและการเข้าถึงบริการสาธารณะ เช่น การวิเคราะห์เส้นทางเข้าถึงสถานพยาบาลฉุกเฉินของ Nicoară and Haidu (2014) ที่ใช้ ArcGIS Network Analyst ร่วมกับ Dijkstra's Algorithm เพื่อค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดของโครงข่ายถนนจริง

2.9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ดำเนินการตรวจสอบในหลายระดับ ได้แก่ ตรวจสอบโครงข่าย (Topology) ทดสอบเส้นทางตัวอย่างเปรียบเทียบกับเส้นทางจริง ตรวจสอบด้วย Google Earth และลงพื้นที่จริง

2.10 การประเมินประสิทธิภาพ

เปรียบเทียบเส้นทางเดิมและเส้นทางที่ได้จากแบบจำลอง โดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ ระยะทางรวม ระยะเวลา ต้นทุนเชื้อเพลิง และคำนวณร้อยละการปรับปรุง

2.11 ข้อสมมติฐานและข้อจำกัด

แบบจำลองนี้มีสมมติฐาน ได้แก่ ความเร็วคงที่ การจราจรคงที่ และไม่พิจารณาความจุรถ ข้อจำกัด ได้แก่ การไม่รวมความแปรผันของการจราจร และการไม่ใช้แบบจำลอง Vehicle Routing Problem (VRP) ซึ่งสามารถพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต โดยเฉพาะการพิจารณาข้อจำกัดด้านความจุรถ ปริมาณขยะ และการจัดสรรภาระงานของรถแต่ละคัน ดังเช่นแนวทางที่เสนอโดย Rungrodchatchaval et al. (2016) ในการประยุกต์ใช้ VRP สำหรับการเก็บขนขยะมูลฝอย

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การวิเคราะห์โครงข่ายของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการวางแผนการจัดการเส้นทางที่เหมาะสมในการเก็บขนขยะมูลฝอย โดยมีผลการดำเนินงานดังนี้

3.1 สภาพระบบการจัดเก็บขยะในปัจจุบัน

3.1.1 รูปแบบการจัดเส้นทางในการเก็บขนขยะในปัจจุบัน

จากการสำรวจภาคสนามในพื้นที่เทศบาลนครสงขลา พบว่ามีจุดตั้งถังขยะจำนวน 599 จุด ถังขยะที่ใช้มีทั้งหมด 3 ชนิด ถังขยะใหญ่ 240 ลิตร ถังขยะกลม 200 ลิตร และถังขยะเล็ก โดยถังขยะใหญ่และถังขยะกลมเป็นขนาดมาตรฐานที่ใช้ในเทศบาล และถังขยะเล็กขนาดใช้เป็น 1 ส่วน 3 ของถังขยะใหญ่ 240 ลิตร ดังแสดงใน Figure 3 กระจายอยู่ตามแนวถนนและชุมชนต่าง ๆ

จาก Figure 3 การวิเคราะห์เส้นทางเดิมพบลักษณะปัญหาสำคัญ ได้แก่ การเดินรถซ้ำซ้อน (overlapping routes) การย้อนกลับของเส้นทาง (backtracking) และการจัดลำดับจุดเก็บขยะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้เกิดระยะทางและระยะเวลาในการดำเนินงานสูงกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ยังพบว่าการปฏิบัติงานจริงมีการเก็บขยะข้ามฝั่งถนนในบางกรณี โดยเฉพาะในถนนที่มีเกาะกลาง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

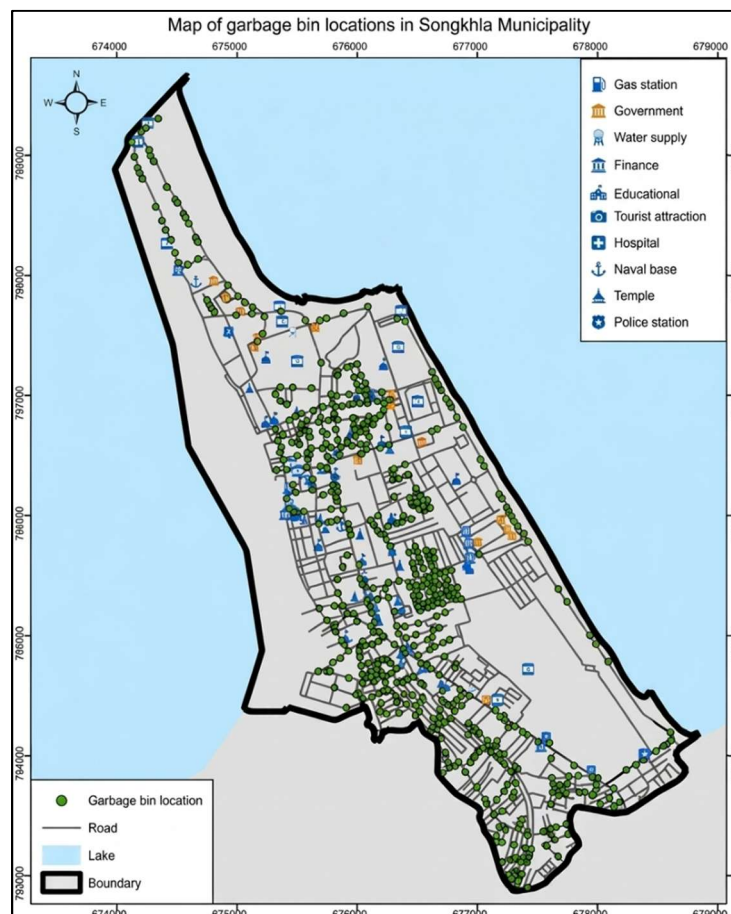


Figure 3 Map of garbage bin locations in Songkhla Municipality

3.1.2 รูปแบบการปฏิบัติงานและพฤติกรรมการเดินทางเก็บขยะในปัจจุบัน

รถจัดเก็บขยะของเทศบาลนครสงขลา มีทั้งหมด 10 คัน เป็นรถบรรทุกขนาดปริมาตร 12 ลูกบาศก์เมตร และรถบรรทุกขนาดปริมาตร 8 ลูกบาศก์เมตร ช่วงเวลาในการเดินทาง คือ หลังจาก 00.00 น. ของทุก ๆ วัน แต่ละคันจะเริ่มเก็บจากสำนักงานสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม และวนกลับมายังจุดเดิมเพื่อส่งพนักงาน ก่อนจะเดินทางไปยังจุดทิ้งขยะที่บ่อกำจัดขยะเทศบาลเมืองเกาะเต่า จากพฤติกรรมการเดินทางใน 1 เส้นทาง ที่เป็น 2 เลนจะทำการเก็บจุดตั้งถังขยะทั้ง 2 ฝั่ง เลนซ้ายและเลนขวา จุดตั้งถังขยะที่อยู่ในเส้นทางต้นจะทำการถอยหลังรถเข้าไปยังจุดตั้งถังขยะ ในเส้นทางปัจจุบันนั้นยังมีการเดินทางที่ทับซ้อนกัน

3.1.3 ระยะเวลาในการจอดเก็บขยะ

บันทึกค่าระยะเวลาและนำมาเฉลี่ยในช่วงเวลาที่รถหยุดเก็บทุก ๆ จุดตลอดเส้นทาง และทำการจำแนกประเภทของถังขยะ ดังแสดงใน Table 1 โดยข้อมูลระยะเวลาจอดเก็บจะเพิ่มไปยังจุดที่ตั้งถังขยะ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางเดินทางในปัจจุบัน

Table 1 The number of waste bins categorized by type and the duration of stop time

Garbage collection route	Waste bin collection points (bin locations)	Large waste bins (bins)	Round waste bins (bins)	Small waste bins (bins)	Large pile (piles)	Middle Pile (piles)	Small pile (piles)	duration of stop time (min.)
1	73	98	12	5	1	5	-	95
2	59	111	-	-	5	2	-	102
3	61	102	-	-	-	-	-	85
4	50	82	-	-	-	-	-	68
5	57	104	-	-	-	-	-	86
6	65	98	-	41	1	1	-	97
7	59	64	43	8	5	1	2	87
8	27	34	31	1	2	1	1	48
9	67	28	16	6	36	7	-	94
10	82	56	-	188	-	-	-	109
Total	599	777	102	249	50	17	3	871

จาก Table 1 แยกประเภทของถังขยะแต่ละเส้นทาง เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณระยะเวลาในการเก็บจอด หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการคำนวณ คือ 1) ถังขยะใหญ่ ใช้เวลาเก็บขยะเฉลี่ย 50 วินาที ต่อจำนวน 1 ถัง 2) ถังขยะกลม ใช้เวลาเก็บขยะเฉลี่ย 30 วินาที ต่อจำนวน 1 ถัง 3) ถังขยะเล็กใช้เวลาเก็บขยะเฉลี่ย 20 วินาที ต่อจำนวน 1 ถัง 4) กองขยะขนาดเล็กปริมาณ 1/4 ของถังขยะใหญ่ ใช้เวลาเก็บขยะเฉลี่ย 30 วินาที ต่อจำนวน 1 กอง 5) กองขยะขนาดกลางปริมาณ 2/4 ของถังขยะใหญ่ ใช้เวลาเก็บขยะเฉลี่ย 1 นาที ต่อจำนวน 1 กอง 6) กองขยะขนาดใหญ่ปริมาณ 3/4 ของถังขยะใหญ่ ใช้เวลาในการเก็บขยะเฉลี่ย 1.30 นาที ต่อจำนวน 1 กอง โดยหนึ่งจุดจอดเก็บขยะ อาจมีจำนวนถังมากกว่า 1 ชนิด ทำให้แต่ละจุดจอดเก็บมีระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน

3.2 ผลการวิเคราะห์เส้นทางด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

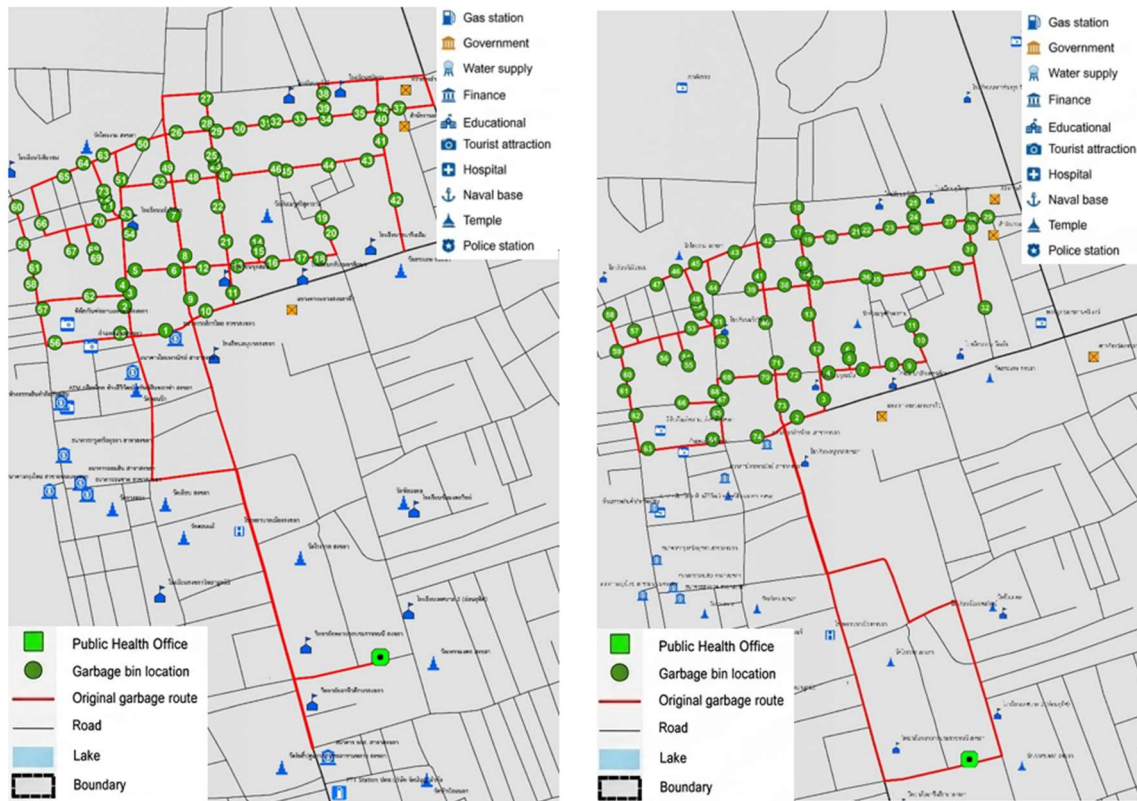
จากการวิเคราะห์โครงข่ายที่เป็นไปตามกฎจราจรและถูกต้องตามกฎหมาย พบว่า เส้นทางเดินทางที่ผ่านการวิเคราะห์มีระยะทางและเวลาที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางเดินทางปัจจุบัน ดังแสดงใน Table 2

จาก Table 2 เป็นผลการวิเคราะห์เส้นทางโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับ Dijkstra's Algorithm พบว่า ระยะทางรวมลดลงจาก 138.743 กิโลเมตร เหลือ 118.629 กิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 14.50 และระยะเวลารวมลดลงจาก 26 ชั่วโมง 35 นาที เหลือ 20 ชั่วโมง 28 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 23.01 เมื่อพิจารณาในระดับรายเส้นทาง พบว่า 9 จาก 10 เส้นทาง มีค่าระยะทางและเวลาลดลง ในขณะที่มี 1 เส้นทาง (เส้นทางที่ 2) ที่มีค่าระยะทางเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.64 และระยะเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.25 สามารถแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบเส้นทางการเดินทางใหม่ได้ดังแสดงใน Figure 4 และ 5

Table 2 A comparison between the optimized route and the original route

Garbage route	Waste collection routes	Waste collection time	Percentage of time changed (%)	Distance traveled by garbage vehicle (km)	Percentage of distance changed (%)
1	Original Route	3 hrs. 24 mins.	-40.68	12.200	-27.42
	Optimized Route	2 hrs. 01 min.		8.855	
2	Original Route	2 hrs. 13 mins.	+2.25	10.963	+3.64
	Optimized Route	2 hrs. 16 min.		11.362	
3	Original Route	2 hrs. 33 mins.	-15.68	16.743	-12.32
	Optimized Route	2 hrs. 09 min.		14.681	
4	Original Route	2 hrs. 35 mins.	-34.19	13.888	-19.25
	Optimized Route	1 hr. 42 min.		11.214	
5	Original Route	2 hrs. 20 mins.	-10.00	15.019	-11.36
	Optimized Route	2 hrs. 06 min.		13.313	
6	Original Route	3 hrs. 13 mins.	-35.75	9.644	-5.70
	Optimized Route	2 hrs. 04 min.		9.094	
7	Original Route	2 hrs. 56 mins.	-37.50	10.043	-22.28
	Optimized Route	1 hr. 50 min.		7.805	
8	Original Route	1 hr. 38 mins.	-21.45	13.804	-29.33
	Optimized Route	1 hr. 17 min.		9.755	
9	Original Route	2 hrs. 57 mins.	-22.60	15.504	-9.87
	Optimized Route	2 hrs. 17 min.		13.974	
10	Original Route	3 hrs. 02 mins.	-8.79	20.935	-11.27
	Optimized Route	2 hrs. 46 min.		18.576	
Total	Original Route	26 hrs. 35 mins.	-23.01	138.743	-14.50
	Optimized Route	20 hrs. 28 min.		118.629	

จาก Figure 4 พบว่า เส้นทางการเดินทางเก็บขยะมูลฝอยปัจจุบันเส้นทางที่ 1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบแล้วพบว่า ระยะเวลาลดลงคิดเป็นร้อยละ 40.68 และระยะทางลดลงคิดเป็นร้อยละ 27.42 พบเส้นทางที่ถูกปรับเปลี่ยนบริเวณถนนรามวิถี ถนนชัย-เพชรมงคล รวมถึงการปรับลำดับการเก็บขยะแต่ละจุดใหม่ ตาม Figure 4(b) และจาก Figure 5 พบว่า ระยะเวลาลดลงคิดเป็นร้อยละ 35.75 และระยะทางลดลงคิดเป็นร้อยละ 5.70 ซึ่งมีการปรับลำดับการเก็บขยะใหม่แต่ละจุดใหม่ ดังแสดงใน Figure 5(b) ทำให้สามารถลดระยะทางและเวลา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บขยะมูลฝอย ทำให้สามารถลดต้นทุนด้านค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในหัวข้อถัดไป



a) Original Route (Truck 1)

b) Optimized Route (Truck 1)

Figure 4 Comparative analysis of garbage truck route 1 using GIS



a) Original Route (Truck 6)

b) Optimized Route (Truck 6)

Figure 5 Comparative analysis of garbage truck route 6 using GIS

เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ได้ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระยะทางและเวลาในแต่ละเส้นทาง พบว่าโดยเฉลี่ยระยะทางลดลงร้อยละ $14.52 \pm 10.13\%$ และระยะเวลาลดลงร้อยละ $22.44 \pm 14.42\%$ ดังแสดงรายละเอียดใน Table 3

Table 3 Statistical comparison of travel distance and time between original and GIS-optimized routes

Variable	Original Route (Mean $\pm$ SD)	Optimized Route (Mean $\pm$ SD)	Mean Reduction (Mean $\pm$ SD)	Paired t-test
Distance (km)	13.874 $\pm$ 3.430	11.863 $\pm$ 3.298	2.011 $\pm$ 1.283	t(9) = 4.958, p = 0.0008
Time (minutes)	161.10 $\pm$ 31.78	122.80 $\pm$ 23.55	38.30 $\pm$ 28.33	t(9) = 4.275, p = 0.0021

จาก Table 3 พบว่าเส้นทางเดิมมีระยะทางเฉลี่ย 13.874 $\pm$ 3.430 กิโลเมตร ขณะที่เส้นทางที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีระยะทางเฉลี่ย 11.863 $\pm$ 3.298 กิโลเมตร โดยมีระยะทางลดลงเฉลี่ย 2.011 $\pm$ 1.283 กิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 14.52 $\pm$ 10.13 ผลการทดสอบ Paired t-test พบว่าระยะทางหลังการวิเคราะห์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (t(9)=4.958, p=0.0008) สำหรับระยะเวลาเดินทาง พบว่าเส้นทางเดิมมีระยะเวลาเฉลี่ย 161.10 $\pm$ 31.78 นาที ขณะที่เส้นทางที่ผ่านการวิเคราะห์มีระยะเวลาเฉลี่ย 122.80 $\pm$ 23.55 นาที โดยลดลงเฉลี่ย 38.30 $\pm$ 28.33 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 22.44 $\pm$ 14.42 ผลการทดสอบ Paired t-test พบว่าระยะเวลาหลังการวิเคราะห์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (t(9)=4.275, p=0.0021) ผลดังกล่าวยืนยันว่า การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการวิเคราะห์โครงข่ายสามารถลดทั้งระยะทางและระยะเวลาในการจัดเก็บขยะได้อย่างมีนัยสำคัญ ไม่ใช่เพียงแนวโน้มนเชิงพรรณนา แต่เป็นผลลัพธ์ที่ได้รับการสนับสนุนด้วยหลักฐานเชิงสถิติ

3.3 การวิเคราะห์เชิงกลไกของแบบจำลองและการวิเคราะห์รูปแบบเส้นทาง (Pattern Analysis)

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการลดลงของระยะทางและเวลาไม่ได้เกิดจากการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการบูรณาการตัวแปรเชิงปฏิบัติการเข้าไปในแบบจำลอง ได้แก่ ระยะเวลาการจอดเก็บขยะ (Stop time) และข้อจำกัดของโครงข่ายถนน การรวม stop time ทำให้แบบจำลองสามารถจัดลำดับจุดเก็บขยะใหม่ โดยกระจายภาระงานให้สมดุลมากขึ้น ลดการหยุดรถในจุดที่มีการจราจรสูงในช่วงต้นของเส้นทาง นอกจากนี้ การใช้โครงข่ายแบบมีทิศทาง (Directed graph) และการพิจารณาข้อจำกัด เช่น one-way และ U-turn restriction ช่วยลดการย้อนกลับของเส้นทาง และทำให้เส้นทางมีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า “shortest path” ในเชิงเรขาคณิตไม่จำเป็นต้องเป็น “optimal path” ในเชิงปฏิบัติการ

จากการวิเคราะห์รูปแบบเส้นทาง พบว่าเส้นทางที่ได้จากระบบ GIS มีลักษณะการจัดกลุ่มจุดเก็บขยะตามพื้นที่ (Spatial clustering) มากขึ้น และลดการเคลื่อนที่ข้ามพื้นที่ที่ไม่จำเป็น ในบางกรณี เช่น เส้นทางที่ 1 พบว่ามีลักษณะเส้นทางแบบแตกกิ่ง (Branching pattern) เข้าไปยังจุดเก็บขยะแล้วกลับเข้าสู่เส้นทางหลัก ซึ่งเกิดจากการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ผู้ขับรถมักหลีกเลี่ยงการกลับรถหรือจอดรถในพื้นที่แคบ ประเด็นดังกล่าวสะท้อนให้เห็นช่องว่างระหว่าง “mathematically optimal routing” และ “operationally feasible routing” ซึ่งสามารถนำไปปรับปรุงแบบจำลองในอนาคตโดยเพิ่มค่าปรับ (Penalty) สำหรับการกลับรถหรือการเข้าออกเส้นทางย่อย

สำหรับเส้นทางที่ 2 ซึ่งพบว่าระยะทางและเวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สามารถอธิบายได้จากข้อจำกัดของโครงข่าย เช่น การกำหนดทิศทางจราจร และข้อจำกัดในการกลับรถ เส้นทางที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางกฎหมายและสภาพถนนจริงมากกว่า แม้ว่าจะมีระยะทางเพิ่มขึ้นในเชิงเรขาคณิต ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าเป็น “practical optimal route” มากกว่าเส้นทางเดิม

การพิจารณาถนนที่มีเกาะกลางจากการวิเคราะห์พบว่าถนนบางสายมีเกาะกลาง ซึ่งทำให้ต้องพิจารณาโครงข่ายเป็นแบบแยกทิศทาง (Divided network) โดยไม่สามารถใช้เส้นทางร่วมกันได้โดยตรง แบบจำลอง GIS ได้แยกเส้นทางตามทิศทาง การจราจรอย่างถูกต้อง ส่งผลให้การเก็บขยะต้องดำเนินการแยกฝั่งถนน ซึ่งแตกต่างจากการปฏิบัติงานเดิมในบางกรณีที่มีการเก็บขยะข้ามเลน การพิจารณาปัจจัยดังกล่าวช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความสมจริงของแบบจำลอง

3.4 ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงเส้นทางการเดินรถเก็บขนขยะปัจจุบัน

ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงเส้นทางการเดินรถเก็บขนขยะปัจจุบัน กับเส้นทางการเดินรถเก็บขนขยะผ่านวิเคราะห์ โดยมีข้อกำหนดเงื่อนไข ดังแสดงใน Table 4 และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการเดินเก็บขนขยะมูลฝอยเทศบาลนครสงขลา

Table 4 Terms and Conditions for Waste Collection System Budget Calculation

Criteria for Calculating Waste Collection Fees in Songkhla Municipality	
Specifications and requirements	Details
Waste collection frequency	Daily
Garbage truck	A vehicle with a maximum engine power of 130 horsepower.
Garbage truck route length	Before and after analysis
Fuel prices	40.80 baht per liter (3 May 2026)
Average rate of fuel consumption	9 km/liter

จาก Table 4 เป็นการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงเส้นทางการจัดเก็บขยะก่อนและหลังทั้ง 10 เส้นทาง พบว่า มีระยะทางลดลงทั้ง 10 เส้นทาง 20.114 กิโลเมตร ลดค่าน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 33,373.15 บาทต่อปี ทั้งนี้จะมีการเสื่อมสภาพของรถหรือค่าความสูญเสียค่าใช้จ่ายในการใช้งานรถโดยจะสามารถนำมาคิดเป็นราคาได้

3.5 การเชื่อมโยงกับงานวิจัยที่ผ่านมา

จากผลการศึกษา พบว่าเส้นทางการเก็บขนขยะใน 1 วันมีจำนวน 10 เส้นทาง โดยเส้นทางปัจจุบันมีระยะทางรวม 138.743 กิโลเมตร และใช้เวลารวม 26 ชั่วโมง 35 นาที ขณะที่เส้นทางที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีระยะทางรวม 118.629 กิโลเมตร และใช้เวลารวม 20 ชั่วโมง 28 นาที แม้ว่าในบางเส้นทาง ระยะเวลาจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการนำข้อจำกัดด้านกฎจราจรมาพิจารณา แต่เมื่อพิจารณาภาพรวม พบว่าสามารถลดระยะทางลงได้ 20.114 กิโลเมตร (ร้อยละ 14.50) และลดระยะเวลาได้ 6 ชั่วโมง 7 นาที (ร้อยละ 23.01) การปรับปรุงดังกล่าวเกิดจากการจัดลำดับจุดเก็บขยะใหม่ โดยเน้นการเข้าถึงจุดที่อยู่ใกล้กันและเลือกเส้นทางที่เหมาะสมตามหลักการค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดของ Dijkstra (1959) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดเก็บขยะได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Das et al. (2024) ที่รายงานว่าการประยุกต์ใช้ GIS สามารถลดต้นทุนการจัดเก็บขยะได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังสอดคล้องกับแนวคิดของ Vehicle Routing Problem (VRP) ที่เน้นการบูรณาการข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการเข้าไปในแบบจำลอง นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสอดคล้องกับ Ahmed et al. (2017) ที่ศึกษาการวิเคราะห์โครงข่ายถนนในเขตมหานครไคโร ประเทศอียิปต์ โดยเปรียบเทียบระหว่างเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest route) และเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดตามเวลาเดินทาง (Best route) ภายใต้เงื่อนไขของโครงข่ายถนนและข้อมูลการจราจรจริง ผลการศึกษาพบว่าเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดไม่ได้เป็นเส้นทางที่ใช้เวลาเดินทางน้อยที่สุดเสมอไป โดยเส้นทางที่พิจารณาปัจจัยด้านเวลาและสภาพการจราจรสามารถลดเวลาเดินทางได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่า การกำหนดต้นทุนของโครงข่ายจากตัวแปรเชิงปฏิบัติการ เช่น ระยะเวลาการจอดเก็บขยะ ข้อจำกัดด้านทิศทางการจราจร และลักษณะของโครงข่ายถนน สามารถให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติงานจริงมากกว่าการพิจารณาระยะทางเพียงอย่างเดียว และยังสอดคล้องกับ Chaingam and Chaiyakarm (2020) ที่ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์โครงข่ายร่วมกับ VRP เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการขนส่งสินค้าเกษตรในจังหวัด

ร้อยละ โดยพบว่าสามารถลดระยะทางการขนส่ง ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ GIS Network Analysis สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการเส้นทางขนส่งได้ในหลากหลายบริบท โดยเฉพาะการขนส่งสินค้าเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการจัดเก็บและขนส่งขยะมูลฝอยในเขตเมืองอีกด้วย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานที่ผ่านมา โดยใช้ข้อมูลภาคสนามจริง เช่น ระยะเวลาการจอดเก็บขยะ (stop time) และพฤติกรรมการปฏิบัติงาน ซึ่งช่วยเพิ่มความสมจริงของแบบจำลองมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ แนวคิดการใช้ GIS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เส้นทางยังสอดคล้องกับงานของ Injoho and Chaiyakarm (2019) และ Prameshwori et al. (2021) ที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ GIS ในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการเชิงพื้นที่ในบริบทเมือง

4. สรุปผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและขนส่งขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลนครสงขลา โดยประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการวิเคราะห์โครงข่ายและ Dijkstra's Algorithm ภายใต้การกำหนดฟังก์ชันต้นทุนจากข้อมูลภาคสนามจริง ผลการศึกษายืนยันว่าแบบจำลองสามารถลดระยะทางและระยะเวลาในการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่กับข้อมูลเชิงปฏิบัติการสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจัดเก็บขยะได้อย่างเป็นระบบ ข้อค้นพบเชิงวิชาการที่สำคัญของงานวิจัยนี้ได้แก่ การที่เส้นทางที่สั้นที่สุดในเชิงเรขาคณิต (Shortest path) ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในเชิงปฏิบัติการ (Optimal path) โดยการพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ระยะเวลาการจอดเก็บขยะ (Stop time) และข้อจำกัดของโครงข่ายถนน มีบทบาทสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพของเส้นทาง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงช่องว่างระหว่างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และพฤติกรรมการปฏิบัติงานจริง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองในอนาคต

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ (1) การใช้ข้อมูลจราจรแบบคงที่ซึ่งไม่สะท้อนความแปรผันของสภาพจราจรจริง (2) การไม่พิจารณาความจุของรถและปริมาณขยะในแต่ละจุด (3) การไม่แยกพฤติกรรมการเก็บขยะระยะใกล้ (Walking collection) ออกจากการเคลื่อนที่ของรถ และ (4) การกำหนดค่าพารามิเตอร์บางตัวเป็นค่าคงที่ เช่น ความเร็วเฉลี่ยและ stop time ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมความแปรผันในสภาพจริง

ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมจริงและยืดหยุ่นมากขึ้น โดยเฉพาะ (1) การบูรณาการข้อมูลจราจรแบบเวลาจริง (Real-time traffic data) จาก GPS หรือ IoT เพื่อปรับปรุงต้นทุนเส้นทางแบบ dynamic (2) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง Vehicle Routing Problem (VRP) เพื่อพิจารณาความจุของรถและข้อจำกัดด้านเวลา (3) การพัฒนาแบบจำลองเชิงพฤติกรรมเพื่อสะท้อนการทำงานของเจ้าหน้าที่ในพื้นที่ (4) การใช้เทคนิคขั้นสูง เช่น Machine Learning หรือ Geo-AI เพื่อทำนายปริมาณขยะและปรับเส้นทางอัตโนมัติ และ (5) การพัฒนาแพลตฟอร์ม WebGIS เพื่อสนับสนุนการใช้งานในระดับปฏิบัติการ

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังมีความใหม่ (novelty) ในเชิงการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ (1) การบูรณาการข้อมูลภาคสนามจริง เช่น ระยะเวลาการจอดเก็บขยะ (stop time) เข้าไปในฟังก์ชันต้นทุนของแบบจำลอง (2) การพัฒนาโครงข่ายถนนในรูปแบบกราฟแบบมีทิศทาง (directed graph) โดยคำนึงถึงข้อจำกัดจริง เช่น one-way ถนนที่มีเกาะกลาง และข้อจำกัดในการกลับรถ (3) การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างเส้นทางเชิงคณิตศาสตร์และเส้นทางที่สามารถใช้งานได้จริง (operational feasibility) และ (4) การเสนอแนวทางปรับปรุงแบบจำลองโดยอิงพฤติกรรมการปฏิบัติงานจริง

ในด้านการนำไปใช้ประโยชน์ ผลการศึกษานี้สามารถสนับสนุนการตัดสินใจของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เช่น เทศบาลนครสงขลา สำหรับการวางแผนเส้นทางและการบริหารทรัพยากร หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการพัฒนานโยบายการจัดการขยะ และหน่วยงานด้านผังเมืองและจราจรสำหรับการวิเคราะห์โครงข่ายในพื้นที่เมือง รวมถึงสามารถต่อยอดไปสู่ระบบ WebGIS หรือ Geo-AI เพื่อรองรับการใช้งานแบบเวลาจริงในอนาคต

โดยสรุป การบูรณาการระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับข้อมูลภาคสนามสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจัดเก็บขยะได้อย่างมีนัยสำคัญ และเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบจัดการขยะอัจฉริยะในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณนายสมศักดิ์ เรืองเกียรติและหน่วยงานเทศบาลนครสงขลา ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและสถานที่ในการศึกษาครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, S., Ibrahim, R. F., & Hefny, H. A. (2017). GIS-based network analysis for the roads network of the Greater Cairo area. In *Proceedings of the International Conference on Applied Research in Computer Science and Engineering (ICAR'17)*, Lebanon. <https://ceur-ws.org/Vol-2144/paper2.pdf>
- Chaingam, A., & Chaiyakarm, T. (2020). IS-based network analysis for vehicle routing problem management of the jasmine rice transportation route: A case study of Roi Et Province. *Thai Journal of Science and Technology*, 9(5), 617–629. <https://doi.org/10.14456/tjst.2020.66> [in Thai].
- Das, D., Ojha, A. K., Kramsapi, H., Baruah, P. P., & Dutta, M. K. (2019). Road network analysis of Guwahati city using GIS. *SN Applied Sciences*, 1, 906. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0907-4>
- Das, S., Baral, A., Rafizul, I. M., & Berner, S. (2024). Efficiency enhancement in waste management through GIS-based route optimization. *Cleaner Engineering and Technology*, 21, 100775. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100775>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Esri. (2016). Algorithms used by the ArcGIS Network Analyst extension. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guidebooks/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>
- Gagula, A. C., Demata, J. T., & Fortun, I. N. D. (2025). A GIS-based network analysis in finding optimal route on accessing tourist places in Siargao Island, Philippines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1489(1), 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1489/1/012065>
- Injoho, U., & Chaiyakarm, T. (2019). A GIS-based network analysis for finding suitable locations for waste receptacle spots in the city-municipality of Nakhon- Nakhon Ratchasima. *Thai Journal of Science and Technology*, 8(3), 226–237. <https://doi.org/10.14456/tjst.2019.32> [in Thai]
- Jirakajohnkool, S. (2017). *Learning geographic information systems with ArcGIS Desktop 10.5 for Desktop A.P.* Graphic Sign & Printing Co., Ltd. [in Thai]
- Klawwikam, P., & Jirakajohnkool, S. (2014). Application of geographic information systems for service area analysis of emergency medical service centers in Loei Province. *Thai Journal of Science and Technology*, 3(3). <https://doi.org/10.14456/tjst.2014.8> [in Thai]
- Nicoară, P.-S., & Haidu, I. (2014). A GIS-based network analysis for the identification of shortest route access to emergency medical facilities. *Geographia Technica*, 9(2), 60–67.
- Prameshwori, T., Wangshimenla, J., Surjit, L., & Ramananda, L. (2021). GIS-based route network analysis for tourist places: A case study of Greater Imphal. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 8(2), 233–238. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET218229>

- Rungrodchatchaval, N., Sriswang, I., & Kongkaew, W. (2016). Application of the vehicle routing problem for solid waste collection: A case study of Prince of Songkla University, Hat Yai Campus. *Thai Journal of Operations Research*, 4(2), 18–31. [in Thai]
- Sirathammathorn, T., Sukitpaneen, M., & Cheewinsiriwat, P. (2017). A GIS-based network analysis for solid waste collection and transportation planning: A case study of Bangkraui Municipality, Nonthaburi Province. *Srinakharinwirot Social Sciences Journal*, 20, 53–63. [in Thai]
- Vijay, R., Gautam, A., Kalamdhad, A., Gupta, A., & Devotta, S. (2008). GIS-based locational analysis of collection bins in municipal solid waste management systems. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 7(1), 39–43. <https://doi.org/10.1139/S07-033>