

การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และการวิเคราะห์ปัญหาการกำหนดเส้นทางของยานพาหนะเพื่อกำหนดเส้นทางของรถขนขยะและสนับสนุนการจัดการขยะ อัจฉริยะในเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา

วิภพ แพงวังทอง^{1*}, ภูวนเตร พลุคำ¹, จิราพร กุลสุนทรรัตน์¹ และ มนตรี พิมพิไจ²

Application of Geographic Information System and Vehicle Routing Problem

Analysis for Routing Garbage Trucks and Supporting Smart Waste Management in Maeka Sub-district Municipality, Muang District, Phayao Province

Wipop Paengwangthong^{1*}, Phoowanet Plukham¹, Jiraporn Kulsontrornrat¹ and Montree Pimjai²

¹ Research Unit of Spatial Innovation Development, School of Information and Communication Technology, University of Phayao, Phayao, 56000

² Program of Environmental and Natural Resource Management, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150

* Corresponding author: wipop_p@hotmail.com

Received: September 22, 2023; Revised: December 10, 2023; Accepted: December 13, 2023

บทคัดย่อ

การรวบรวมขยะนับว่าเป็นการจัดการของหน่วยงานในท้องถิ่นที่สำคัญ อีกทั้งเป็นการลดต้นทุนการขนส่งที่มีส่วนช่วยอย่างมากในการประหยัดงบประมาณของประเทศ การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และการวิเคราะห์ปัญหาการกำหนดเส้นทางของยานพาหนะเพื่อกำหนดเส้นทางรถขนขยะที่เหมาะสมในเขตเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ขึ้นข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับที่ตั้งบ่อฝังกลบขยะ โครงข่ายถนน ตำแหน่งของถังขยะและปริมาณขยะถูกปรับปรุงให้เป็นปัจจุบันจากการสำรวจภาคสนามที่ดำเนินการในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2566 แม้ว่าความสามารถในการบรรจุทุกมีเท่ากันแต่ภาระงานต่างกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของปริมาณขยะ ภายหลังจากแบ่งเป็น 3 เขตการจัดเก็บตามปริมาณขยะและกำหนดเส้นทางที่ประหยัดเชื้อเพลิงที่สุดจากทุกทางเลือกที่เป็นไปได้โดยใช้การวิเคราะห์ปัญหาการกำหนดเส้นทางของยานพาหนะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสิ้นเปลืองค่าน้ำมันเชื้อเพลิงน้อยลง รวมไปถึงระยะเวลาและระยะทางโดยรวมของรถขนขยะลดลงด้วย นอกจากนี้ผลลัพธ์เหล่านี้ยังสามารถใช้เป็นต้นแบบในการสร้างขั้นตอนการจัดการที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถประมวลผลผลการจัดเส้นทางได้อีกเป็นรายวันหรือในกรณีที่เกิดเงื่อนไขต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: การวิเคราะห์โครงข่าย, การรวบรวมขยะ, การวิเคราะห์ปัญหาการกำหนดเส้นทางของยานพาหนะ

¹ หน่วยวิจัยการพัฒนานวัตกรรมแข่งขันพื้นที่ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

² สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

Abstract

Waste collection is considered a critical aspect of local organizational management. Furthermore, it plays a pivotal role in reducing transportation costs, significantly contributing to the country's budget savings. Therefore, this research aimed to apply Geographic Information System (GIS) and Vehicle Routing Problem (VRP) Analysis to determine an appropriate waste collection route in the Maeka sub-district Municipality, Muang District, Phayao Province. GIS data layer for landfill site, road networks, garbage bins, and their volume were updated from field surveys conducted in June 2023. Although the load-carrying capacity is equal, the workload varies, especially in terms of garbage volume. After identifying three collection zones based on waste quantities and determining the most fuel-efficient routes from all possible options using VRP, the results showed a significant reduction in fuel consumption. Additionally, the overall time and distance traveled by waste collection vehicles decreased. These results can serve as a model for creating more efficient management processes and can be used for daily route optimization or in cases where conditions change.

Keywords: Network Analysis, Garbage Collection, Vehicle Routing Problem Analysis

บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญ (มีชัย วรสายัณห์, 2535) นับแต่อดีตเป็นต้นมา มีการรายงานว่าผลกระทบโดยตรงจากความต้องการความสะดวกสบายในด้านต่าง ๆ ของมนุษย์ กระตุ้นให้เกิดการพัฒนาความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และวิทยาการในการนำเอาทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2557) อีกทั้งการพัฒนาระบบการผลิตทางด้านอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสินค้าที่จำเป็นต่อมนุษย์ ซึ่งกระบวนการผลิตบางอย่างอาจก่อให้เกิดของเสียสู่สิ่งแวดล้อม และผลของการบริโภคทำให้เกิดของเสียกระจายสู่สิ่งแวดล้อมในรูปแบบของน้ำเสีย อากาศเป็นพิษ และขยะมูลฝอย

ปัญหาขยะมูลฝอยในประเทศไทย เฉพาะในปี พ.ศ.2564 ปริมาณขยะที่ไม่ถูกกำจัดอย่างถูกต้องมีมากถึง 7.81 ล้านตัน ซึ่งในปริมาณดังกล่าวนี้เป็นปริมาณขยะมูลฝอยตกค้าง (ไม่ได้รับการจัดเก็บ) เท่ากับ 7.50 ล้านตัน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และองค์การบริหารส่วนท้องถิ่นทั่วประเทศทั้ง 4,249 แห่ง กำลังประสบกับปัญหาวิกฤตขยะล้นเมือง เนื่องจากไม่มีการจัดเก็บรวบรวมขยะมูลฝอยหรือระบบการจัดการขยะที่ดีพอ

การรวบรวมขยะมูลฝอยเป็นหน้าที่ของหน่วยงานราชการส่วนท้องถิ่น เช่น กรุงเทพมหานคร เมืองพัทยา เทศบาล องค์การบริหารส่วนตำบล เป็นต้น การจัดการขยะขององค์กรเหล่านี้พบว่าการดำเนินการวางแผนจัดระบบและการตัดสินใจ กระทำโดยเจ้าหน้าที่หลายระดับ เช่น ระดับสำนักรักษาความสะอาดรับผิดชอบเรื่องกำหนดสถานที่ทิ้งและกำจัดขยะมูลฝอย ส่วนงานรักษาความสะอาดมีหน้าที่วางแผนกำหนดพื้นที่ที่รับผิดชอบของรถเก็บขนมูลฝอยแต่ละคัน และในส่วนของการเก็บขนมูลฝอยนั้น พนักงานขับรถจะเป็นผู้กำหนดและตัดสินใจว่าจะเข้าเก็บที่ตำแหน่งถึงขยะใดก่อนหรือหลัง จากการทำงานดังกล่าว จะเห็นได้ว่า การกำหนดเส้นทางเป็นการตัดสินใจโดยมนุษย์ซึ่งอาจทำให้เกิดการขับรถย้อนไปมาทำให้ต้องใช้ต้นทุนในการขนส่งทั้งเวลาและงบประมาณในการเก็บขนขยะมูลฝอยมาก ไม่สามารถทราบจุดปฏิบัติงานหรือเส้นทางที่แน่นอน

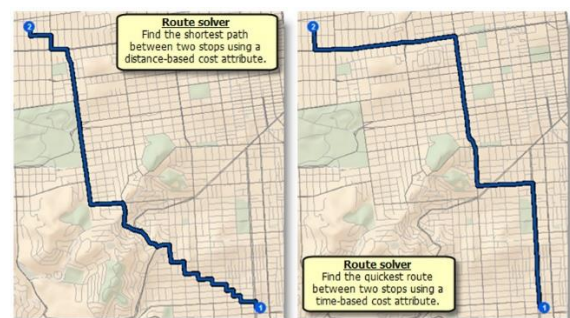
การตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมมีความซับซ้อนมากและมีปัญหาในหลายประเด็น ประเด็นแรก คือ การเรียงลำดับตำแหน่งถึงขยะก่อนหรือหลัง ยกตัวอย่างเช่น พนักงานขายตรงหรือเซลแมนที่ต้องเดินทางไปยังบ้านลูกค้า (รูปที่ 1 ก) หรือบุรุษไปรษณีย์ที่ต้องนำส่งพัสดุ 20 แห่ง หากประมวลผลความเป็นไปได้แล้วจะพบว่ามีรูปแบบของ

การเรียงลำดับ (Order) ก่อนหลังที่สามารถสลับหรือผสมผสานกันได้ (Combination) หรือมีความเป็นไปได้ทั้งหมด เท่ากับ แฟกทอเรียล 20 (Factorial 20) หรือ ประมาณ 2 ล้านล้านล้านรูปแบบ (2,432,902,008,176,640,000 รูปแบบ) (จิรวัดน์ ตั้งปณิธานนท์, 2565) อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาในประเด็นที่สอง คือ การกำหนดเส้นทาง (Route) ที่เป็นไปได้ ตัวอย่างเช่น การเดินทางระหว่างแต่ละลำดับมีเส้นทาง (Route) ที่เป็นไปได้อีกหลายรูปแบบด้วยเช่นกัน (รูปที่ 1 ข) ซึ่งจะทำให้ปัญหาที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นอีกหลายเท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางและความซับซ้อนของโครงข่ายถนน (Road network) ยิ่งไปกว่านั้น ประเด็นที่สาม ปริมาณขยะในแต่ละถังและจำนวนรอบที่ใช้ในการเดินทางของรถขยะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนของการขนส่งอีกด้วย เนื่องจากความจุของรถมีจำกัดและรถแต่ละคันอาจมีขนาดความจุหรือน้ำหนักบรรทุกไม่เท่ากัน ดังนั้นการประมวลผลเพื่อหาเส้นทางที่มีต้นทุนน้อยที่สุดและคิดโดยมนุษย์นั้นย่อมเป็นไปได้ยากหรือเป็นไปได้ยากยิ่ง รวมทั้งการพิจารณาหากมีรถหลายคันที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดหลายอย่างซึ่งเป็นสิ่งที่ยากหากใช้มนุษย์เป็นผู้คิดประมวลผล



ก. ปัญหาการเรียงลำดับที่ต้องเดินทางกลับบ้านลูกค้า

ที่มา (ดัดแปลงจาก): Sketchplanations (2022)



ข. เส้นทางที่เป็นไปได้ของการเดินทางระหว่างแต่ละตำแหน่ง

ที่มา: ESRI (2023)

รูปที่ 1 ปัญหาการเรียงลำดับของการไปบ้านลูกค้าของพนักงานขาย และเส้นทางที่เป็นไปได้

สภาพปัญหาในปัจจุบันของการรวบรวมขยะในพื้นที่เขตเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ที่ได้รับข้อมูลจากผู้ศึกษาสำรวจภาคสนามและสัมภาษณ์กับพนักงานของเทศบาลตำบลแม่กา (ไม่ประสงค์ออกนาม) พบว่า ยังไม่มีระบบสนับสนุนการจัดการขยะอัจฉริยะ และสถานการณ์ในปัจจุบันมีรถขนขยะจำนวน 3 คัน ซึ่งการแบ่งภาระงานของรถแต่ละคันจะเป็นการแบ่งความรับผิดชอบเป็นรายหมู่บ้าน ได้แก่ รถขนขยะคันแรก ดูแลรับผิดชอบเก็บขยะในพื้นที่หมู่ที่ 1 2 10 และ 16 เป็นต้น จะเห็นว่าในการกำหนดเส้นทางเดินรถเก็บขนมูลฝอยแต่ละคันนั้นจะรับผิดชอบและตัดสินใจโดยพนักงานขับรถ ซึ่งใช้วิจารณญาณ ความรู้ความสามารถและประสบการณ์ของแต่ละคน จากการสำรวจและสัมภาษณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไม่มีการนำเอาหลักเกณฑ์ที่เหมาะสมมาใช้ประกอบการจัดเส้นทาง รวมทั้งไม่ได้มีการจัดเก็บข้อมูลที่จำเป็นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์การจัดลำดับและค้นหาทางเลือกหรือเส้นทางที่เหมาะสม ดังนั้นเส้นทางที่ได้ อาจไม่ใช่เส้นทางที่ประหยัดที่สุดสำหรับต้นทุนการขนส่ง หรือแม้แต่ว่าจะเกิดปัญหาขยะเต็มรถและต้องวิ่งกลับไปเก็บขยะเป็นรอบที่สอง ซึ่งทำให้เสียเวลาและน้ำมันเชื้อเพลิงไปโดยใช่เหตุ

การจัดการขยะอัจฉริยะในปัจจุบันของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นระบบบริหารจัดการการเก็บขยะอัจฉริยะ (Traffic waste) ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่พัฒนาให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใช้งาน (NECTEC, 2017 และ Traffic, 2017) หรือ ระบบติดตามถังขยะอัจฉริยะ (ทิพานัน และคณะ, 2562) ล้วนแล้วแต่เป็นการจัดการขยะที่มีการอ้างอิงเชิงตำแหน่งของถังขยะและรถเก็บขยะ พร้อมทั้งการมีส่วนร่วมของประชาชนในการช่วยรายงานสภาพปัญหาขยะล้นถังได้ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทราบประวัติเส้นทางของรถเก็บขยะ

และสามารถติดตามตำแหน่งปัจจุบันของรถเก็บขยะได้ ทำให้สามารถสรุปเส้นทางและปริมาณเชื้อเพลิงเพื่อประกอบการตัดสินใจปรับเปลี่ยนเส้นทางรถเก็บขยะได้ จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าวจะเห็นได้ว่า การจัดการยังเป็นเพียงการจัดเส้นทางโดยเจ้าหน้าที่และมีข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจมากขึ้นเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามการประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์หรือมีระบบจัดการเส้นทางรถขนขยะ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการประยุกต์ใช้ข้อมูลในรูปแบบระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมขยะในพื้นที่ศึกษา โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analysis) และการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem Analysis: VRP) เพื่อใช้ในการจัดเส้นทางรวบรวมขยะตามศักยภาพที่มีของรถขนขยะทั้ง 3 คัน (รูปที่ 4) กับเงื่อนไขของการขนส่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประหยัดงบประมาณต้นทุนด้านเชื้อเพลิง และเสนอเป็นทางเลือกสนับสนุนการตัดสินใจของพนักงานผู้รับผิดชอบหรือผู้บริหารหน่วยงานราชการดังกล่าว นอกจากนี้เพื่อเป็นการสนับสนุนนโยบายการจัดการขยะอัจฉริยะให้เป็นจริงและสมบูรณ์แบบมากขึ้น

วัตถุประสงค์

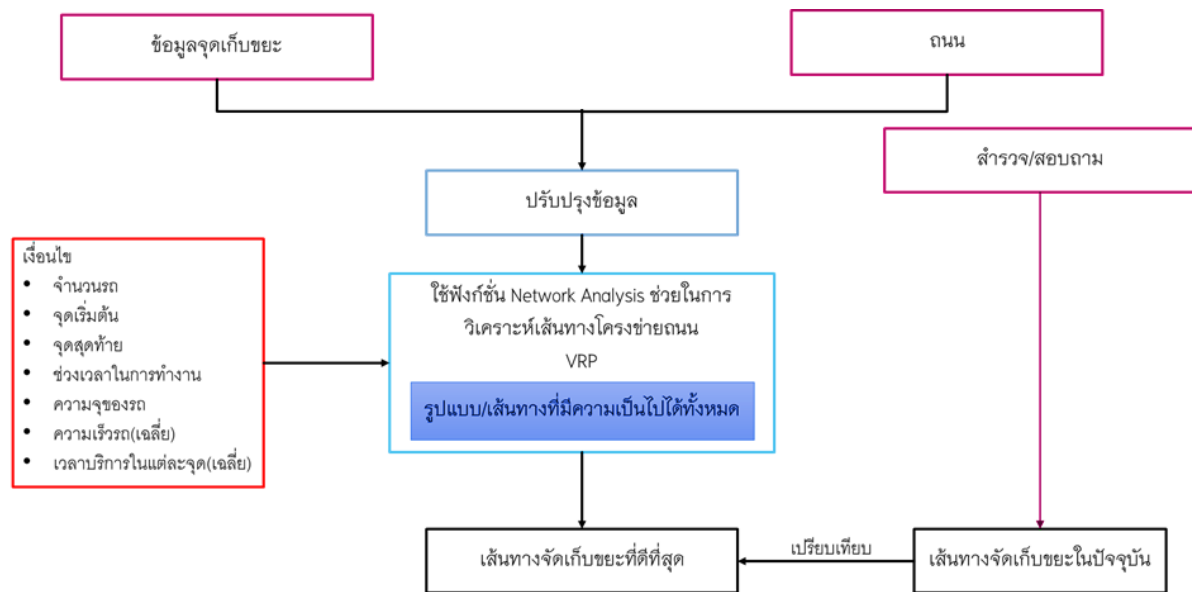
1. เพื่อสำรวจและปรับปรุงชั้นข้อมูลที่ตั้งบ่อฝังกลบขยะ โครงข่ายถนน ตำแหน่งของถังและปริมาณของขยะ
2. เพื่อกำหนดเส้นทางเดินรถเก็บขนขยะมูลฝอยที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของ

ยานพาหนะ

วิธีการดำเนินการวิจัย

กระบวนการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) เพื่อกำหนดเส้นทางเดินรถเก็บขนขยะมูลฝอยที่เหมาะสมด้านต้นทุนการขนส่ง สำหรับข้อมูลนำเข้ามีที่มาแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ข้อมูลกลุ่มแรก คือ ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของโลกจริง (Real world) หรือข้อมูลจากภาคสนาม ได้แก่ ชั้นข้อมูลถัง/จุดเก็บขยะ ชั้นข้อมูลโครงข่ายถนน และชั้นข้อมูลบ่อฝังกลบขยะ ข้อมูลกลุ่มที่สอง คือ การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) ด้วยเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์ ได้แก่ จำนวนรถ ช่วงเวลาในการทำงาน ความจุของรถ ความเร็วของรถ เวลาที่ใช้ในการเก็บขยะจากแต่ละถัง และตำแหน่งโรงรถและบ่อฝังกลบขยะ และข้อมูลกลุ่มที่สาม คือ เส้นทาง การจัดเก็บรวบรวมขยะเดิมที่ใช้ในปัจจุบันนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของการศึกษา

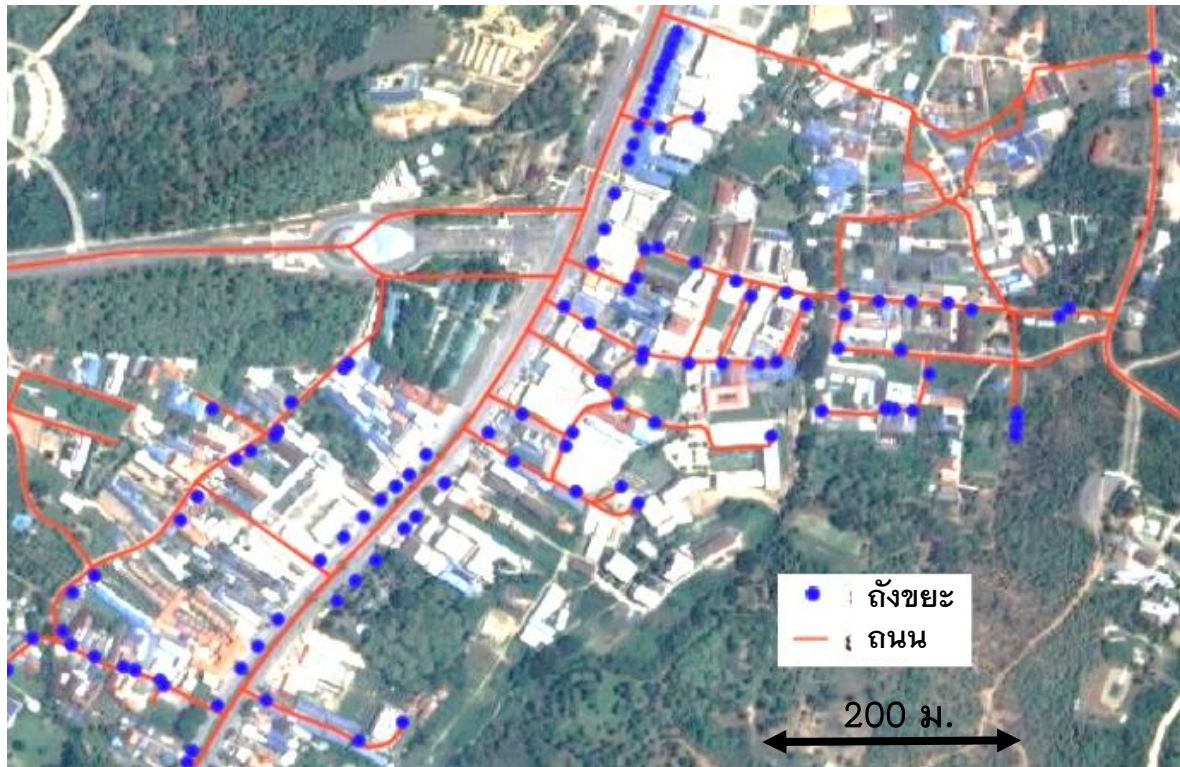
ขั้นตอนการศึกษา เริ่มต้นจากการปรับปรุงชั้นข้อมูลบ่อฝังกลบขยะ ถัง/จุดเก็บขยะ และชั้นข้อมูลโครงข่ายถนนให้เป็นปัจจุบัน หลังจากนั้นอาศัย Network Analysis และ VRP ประมวลผลภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดดังกล่าวข้างต้น เพื่อให้ได้รูปแบบ/เส้นทางจัดเก็บขยะที่ประหยัดต้นทุนการขนส่ง และหลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิมที่ใช้จัดเก็บในปัจจุบัน กรอบแนวคิดและขั้นตอนหลักมีรายละเอียดดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2 กรอบขั้นตอนการดำเนินงาน

การนำเข้าและปรับปรุงข้อมูลจากภาคสนาม

ชั้นข้อมูลถึง/จุดเก็บขยะ ชั้นข้อมูลถนน และชั้นข้อมูลบ่อฝังกลบขยะจากการศึกษาของ วิภพ และคณะ (2558) ถูกแก้ไขปรับปรุงให้เป็นปัจจุบันจากการสำรวจภาคสนามที่ดำเนินการในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2566 ดังตัวอย่างบางส่วนในพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 3 ก) การแก้ไขปรับปรุงดังกล่าวทำการปรับปรุงทั้งตำแหน่งของถังขยะและปริมาณขยะที่ถูกจัดเก็บในตารางคุณลักษณะ (Attribute table) (รูปที่ 3 ข) นอกจากนี้สำหรับชั้นข้อมูลถนนถูกแก้ไขปรับปรุงโดยอาศัยภาพถ่ายเทียมรายละเอียดสูงที่ให้บริการโดยกูเกิ้ลเอิร์ธเป็นแผนที่ฐาน สำหรับการอ้างอิงระบบพิกัด/ตำแหน่งนั้นอาศัยการดิจิไทซ์บนหน้าจอ (Digitize on screen) พร้อมทั้งใช้คำสั่ง Calculate Geometry เพื่อวัดความยาวถนน และทำการคูณกับความเร็วเฉลี่ยของรถเก็บขยะซึ่งกำหนดไว้ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง เพื่อใช้คำนวณเวลาที่ใช้เดินทางของรถในแต่ละส่วนถนน (Segment) และบันทึกลงในตารางคุณลักษณะ ดังตัวอย่างดังรูปที่ 3 ข



ก. ชั้นข้อมูลถึงขยะและถนนในบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา (บางส่วนของพื้นที่ศึกษา)

Bintype	Weight	Location	ServiceTim
ถึง	28	หลักกิโล	1
ถึง	28	ศาลาเหลือง	1
ถึง	35	ตึกเซียวโซเซฟ	1
ถึง	28	ร้านตะกั่วเงิน 2	1
ถึง	35	บ้านชมพู	1
ถึง	21	หอพักนา	1
ถึง	35	ล้าง อัด ดัด	1
ถึง	28	บ้านไม้ปูน	1

OBJECTID	Shape *	METERS	KPH	MINUTES
3	Polyline	167.09213	20	0.125319
4	Polyline	21.674875	20	0.016256
5	Polyline	8.587427	20	0.006441
6	Polyline	250.64778	20	0.187986
7	Polyline	999.31654	20	0.749487
8	Polyline	77.609824	20	0.058207
9	Polyline	448.41929	20	0.336314
10	Polyline	265.47588	20	0.199107
11	Polyline	19.716793	20	0.014788

ข. ตารางคุณลักษณะของชั้นข้อมูลถึงขยะและถนน

รูปที่ 3 ชั้นข้อมูลถึงขยะและถนน

การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) ด้วยเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์

ขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแปลงชั้นข้อมูลไปเป็นชุดข้อมูลโครงข่าย (Network dataset) และการตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ รายละเอียดแต่ละส่วนมีดังนี้

การแปลงทั้ง 3 ชั้นข้อมูล (บ่อฝังกลบขยะ ถึงขยะ และถนน) ไปเป็นชุดข้อมูลโครงข่าย เป็นกระบวนการที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูประบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcGIS เวอร์ชัน 10.2 ที่มีขั้นตอนดังนี้ การนำเข้าชั้นข้อมูลผ่านการปรับปรุงให้ทันสมัยแล้วถูกจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ Shapefile แปลงไปเป็น Feature class และ Feature dataset ที่อยู่ใน Geodatabase (ที่ได้เตรียมสร้างขึ้น รอไว้แล้ว) ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่า ชั้นข้อมูลบ่อฝังกลบขยะ และถึงขยะ

เป็นชั้นข้อมูลประเภทจุด (Point) แต่สำหรับชั้นข้อมูลถนนที่มีลักษณะเป็นชั้นข้อมูลประเภทเส้น (Line) นั้น ภายหลังจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดมีองค์ประกอบที่จำเป็นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เส้น (Edge) จุดเชื่อมต่อ (Junction) และการเลี้ยว (Turn) ซึ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์โครงข่าย (Network analysis) นอกจากนี้ สำหรับข้อมูลถนนยังต้องมีการตั้งค่าข้อมูลคุณลักษณะโครงข่าย (Network attribute) หรือกำหนดว่า สดมกัใดใช้เป็นแหล่งข้อมูลแสดงระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเดินทางในแต่ละส่วนถนน รวมถึงการกำหนดหน่วยของระยะทางและเวลาด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีการกำหนดรูปแบบการเดินรถในแต่ละส่วนถนนเป็นแบบเดินรถทางเดียวหรือแบบสวนกันได้

การตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) เป็นกระบวนการที่บรรจุอยู่ในชุดคำสั่ง Network analyst ของโปรแกรม ArcGIS สำหรับการใช้งาน VRP ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเข้าไปตั้งค่าต่างๆ เพื่อกำหนดเป็นเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์ ได้แก่ ตำแหน่งถึงขยะถูกกำหนดเป็น Order จำนวนรถถูกกำหนดเป็น Route และตำแหน่งบ่อฝังกลบขยะถูกกำหนดเป็น Depot (รูปที่ 5 ก ข และ ค) นอกจากนี้ สำหรับเงื่อนไขที่เกี่ยวกับ ช่วงเวลาในการทำงาน ความจุของรถ ความเร็วของรถ เวลาที่ใช้ในการยกหรือเทขยะจากถังใส่รถ สามารถกำหนดค่าได้ในหน้าต่างของ Properties – Routes (รูปที่ 5 ง) และหน้าต่างการวิเคราะห์ VRP ดังรูปที่ 6 โดยที่การใช้เงื่อนไข/ข้อจำกัดการวิเคราะห์สามารถสรุปดังตารางที่ 1



คันที่ 1 หมายเลขทะเบียน 81-0240 พะเยา

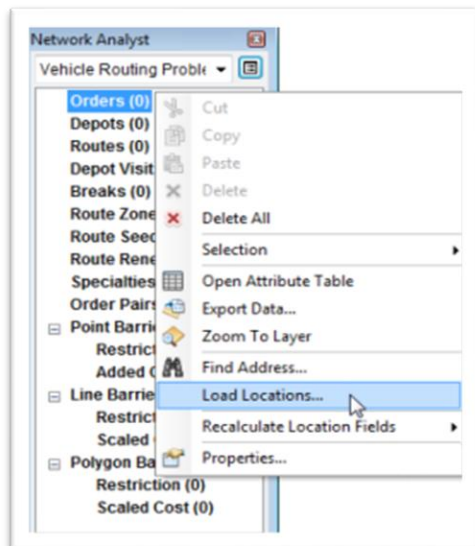


คันที่ 2 หมายเลขทะเบียน 80-9264 พะเยา

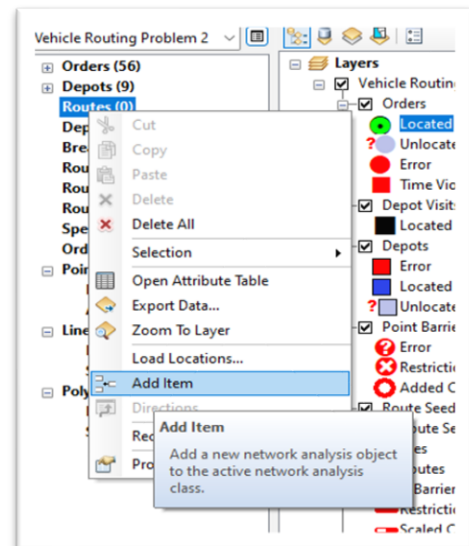


คันที่ 3 หมายเลขทะเบียน 80-7353 พะเยา

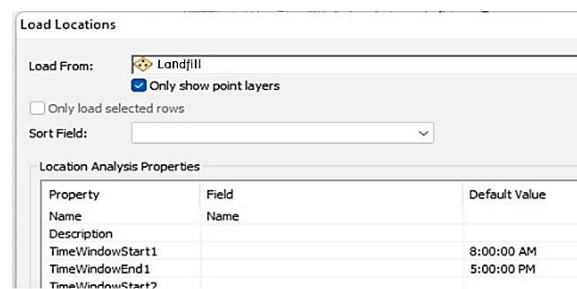
รูปที่ 4 ยานพาหนะที่ใช้ปฏิบัติงานเก็บรวบรวมขยะของเทศบาลตำบลแม่กา



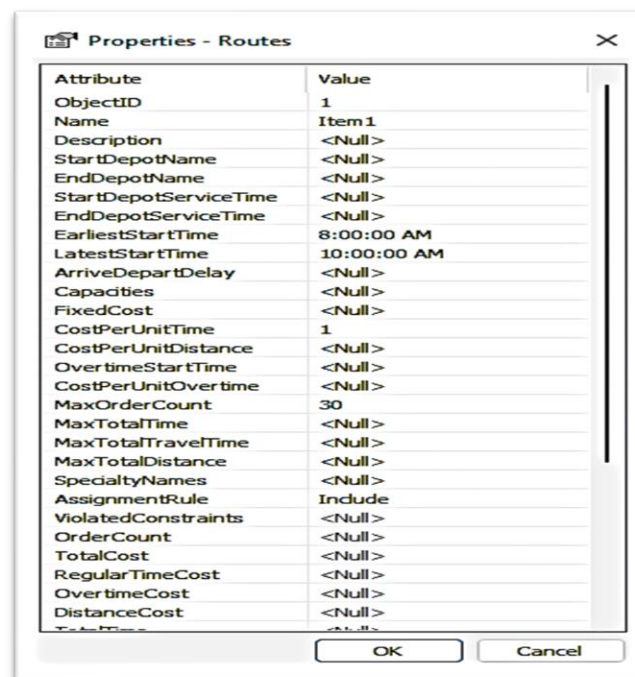
ก. การกำหนดตำแหน่งถังขยะเป็น Order



ข. การกำหนดจำนวนรถเป็น Route

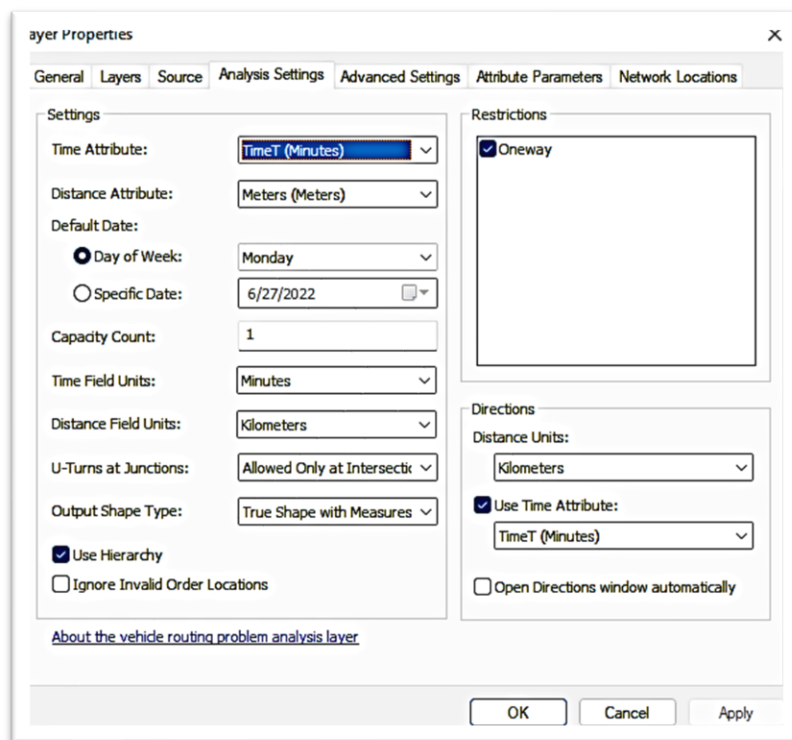
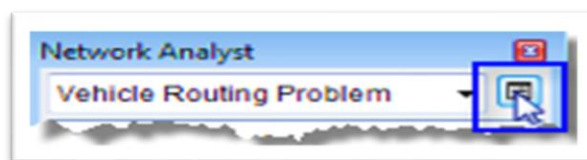


ค. การกำหนดบ่อฝังกลบขยะเป็น Depot



ง. การกำหนดเงื่อนไขในหน้าต่างของ Properties - Routes

รูปที่ 5 หน้าต่างสำหรับการตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ



รูปที่ 6 หน้าต่างการตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา

รถขนขยะ	รถคันที่ 1	รถคันที่ 2	รถคันที่ 3
เลขทะเบียนรถ	81-0240 พะเยา	80-9264 พะเยา	80-7353 พะเยา
ยี่ห้อ / รุ่น	ฮิซุซุ 6 ล้อใหญ่ รุ่น FTR 240 แรงม้า	ฮิซุซุ 6 ล้อเล็ก รุ่น NMR 130 แรงม้า	
อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	2.78 กิโลเมตร/ลิตร		6.50 กิโลเมตร/ลิตร
น้ำหนักบรรทุก (ก.ก.)	10,000	10,000	5,500
น้ำหนักรถ (ก.ก.)	5,000	5,000	2,500
รองรับน้ำหนักขยะ (ก.ก.)	5,000	5,000	3,000
จุดเริ่มต้น	โรงจอดรถขนขยะ (19.085419843422976, 99.9193580134063)		
จุดสุดท้าย	บ่อฝังกลบขยะ (19.04347732100367, 99.91143538430279)		
เวลาเริ่มงาน		6:00 น.	
เวลาเลิกงาน		16:00 น.	
ความเร็วของรถ (เฉลี่ย)		20 กิโลเมตร/ชั่วโมง	
เวลาที่ใช้ในการเก็บขยะแต่ละถัง/จุด		1 นาทีต่อถัง(จุด)	

การเปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บรวบรวมขยะที่ใช้ในปัจจุบันกับผลลัพธ์ของการศึกษา

เส้นทางที่ใช้ในปัจจุบันของการรวบรวมขยะในพื้นที่เขตเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ได้รับข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามผู้ศึกษาขับรถตามรถขนขยะและสัมภาษณ์กับพนักงานของเทศบาลตำบลแม่กา (ไม่ประสงค์ออกนาม) ลงรายละเอียดในระดับเส้นทางการเดินรถรวบรวมขยะที่ระบุว่าถังใดจะถูกเก็บใส่รถคันใด จากนั้นแจกแจงและจัดทำข้อมูลออกมาเป็นข้อมูลตารางและแผนที่เพื่อการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ VRP ทั้งในแง่ของจำนวนถังขยะ น้ำหนักรวม ระยะเวลา และระยะทางของรถแต่ละคัน นอกจากนี้ การคำนวณระยะทางโดยรวมและปริมาณเชื้อเพลิงขั้นต่ำที่ต้องใช้ของรถขนขยะ (รูปที่ 4) ยี่ห้อ อีซูซุ 6 ล้อใหญ่ รุ่น FTR 240 แรงม้า หมายเลขทะเบียน 81-0240 และ 80-9264 พะเยา ด้วยอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล 2.78 กิโลเมตร/ลิตร (องค์การบริหารส่วนตำบลโคกกลาง, 2560) และรถขนขยะ ยี่ห้อ อีซูซุ 6 ล้อเล็ก รุ่น NMR 130 แรงม้า หมายเลขทะเบียน 80-7353 พะเยา ด้วยอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล 6.50 กิโลเมตร/ลิตร (พันทิป.คอม, 2557) และราคาน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล 30 บาท/ลิตร

ผลการศึกษา

ผลการสำรวจและปรับปรุงชั้นข้อมูลที่ตั้งบ่อฝังกลบขยะ โครงข่ายถนน ตำแหน่งของถังและปริมาณของขยะ รวมถึงผลการกำหนดเส้นทางเดินรถเก็บขนขยะมูลฝอยที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ การดำเนินการแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

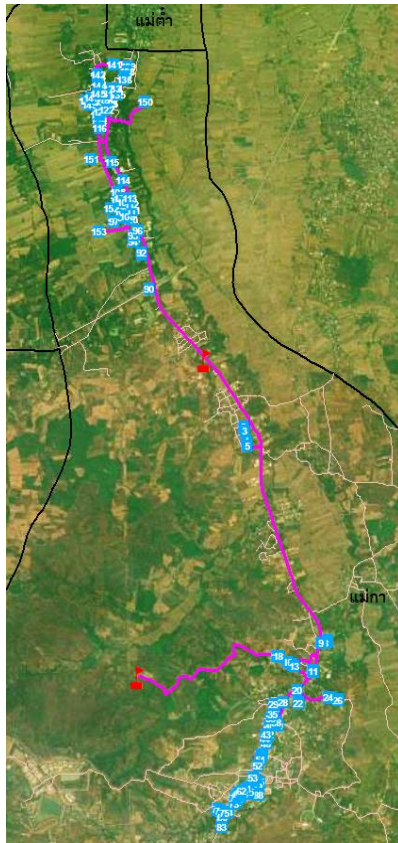
ผลการนำเข้าและปรับปรุงข้อมูลจากภาคสนาม

การนำเข้าและปรับปรุงชั้นข้อมูลถัง/จุดเก็บขยะ ชั้นข้อมูลถนน และชั้นข้อมูลบ่อฝังกลบขยะในพื้นที่ศึกษา พบว่ามีจำนวนถังขยะหรือจุดเก็บขยะทั้งหมดเท่ากับ 417 ถัง/จุด คิดเป็นปริมาณขยะรวมทั้งหมดเท่ากับ 12,390 กิโลกรัม โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณขยะต่อถัง เท่ากับ 30 กิโลกรัมต่อถัง ดังรูปที่ 7 และ 8

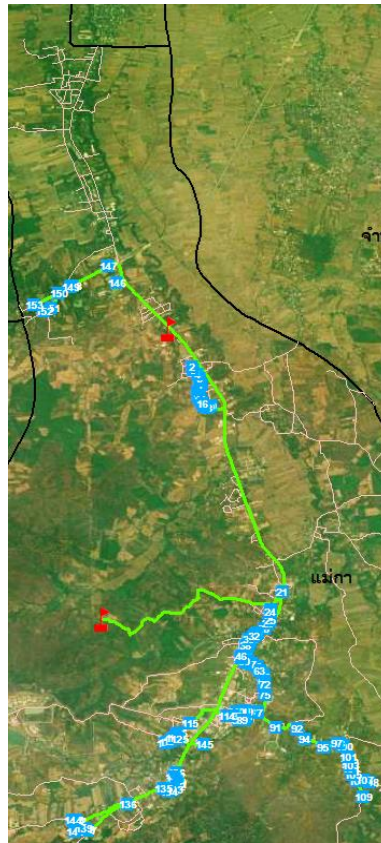
การแก้ไขปรับปรุงดังกล่าวทำการปรับปรุงทั้งตำแหน่งของถังขยะและปริมาณของขยะถูกซึ่งจัดเก็บในตารางคุณลักษณะ (Attribute table) (รูปที่ 3 ข) นอกจากนี้สำหรับชั้นข้อมูลถนนถูกแก้ไขปรับปรุงโดยการสำรวจภาคสนามและอาศัยภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูงที่ให้บริการโดยกูเกิ้ลเอิร์ธเป็นแผนที่ฐานเพื่ออ้างอิงระบบพิกัด/ตำแหน่งพร้อมทั้งอาศัยการดิจิไทซ์บนหน้าจอ (Digitize on screen) และคำสั่ง Calculate Geometry เพื่อวัดความยาวถนน และทำการคูณกับความเร็วเฉลี่ยของรถเก็บขยะซึ่งกำหนดไว้ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง เพื่อการคำนวณระยะเวลาในการเดินทางของรถในแต่ละส่วนถนน (Segment) และบันทึกลงในตารางคุณลักษณะ ตัวอย่างดังรูปที่ 3 ข

ผลการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) ด้วยเงื่อนไขการจำลองสถานการณ์

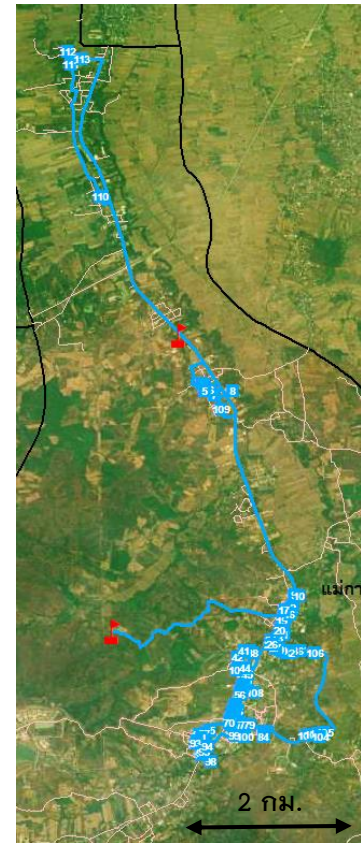
ภายหลัง การแปลงชั้นข้อมูลไปเป็นชุดข้อมูลโครงข่าย (Network dataset) และการตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) ที่บรรจุอยู่ในชุดคำสั่ง Network analyst ของ ArcGIS เพื่อจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 5 และ 6 พร้อมทั้งระบุเงื่อนไขดังตารางที่ 1 ผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่า สามารถจัดเส้นทางรวบรวมขยะของรถทั้ง 3 คันได้ดังรูปที่ 7 และข้อมูลถูกสรุปในตารางที่ 2



เส้นทางรวบรวมขยะของรถขยะคันที่ 1
(หมายเลขทะเบียน 81-0240 พะเยา)



เส้นทางรวบรวมขยะของรถขยะคันที่ 2
(หมายเลขทะเบียน 80-9264 พะเยา)

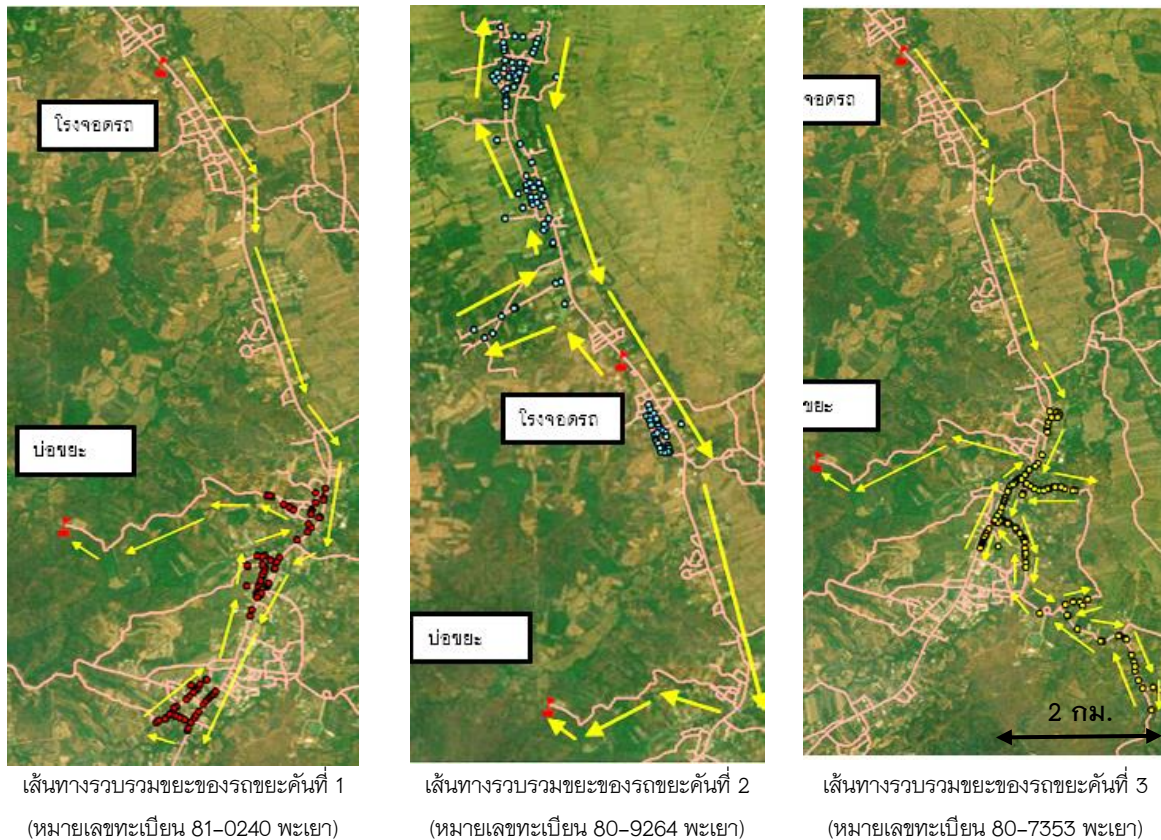


เส้นทางรวบรวมขยะของรถขยะคันที่ 3
(หมายเลขทะเบียน 80-7353 พะเยา)

รูปที่ 7 ผลการจัดเส้นทางของยานพาหนะโดยใช้ VRP และข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ผลการเปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บรวบรวมขยะที่ใช้ในปัจจุบันกับผลลัพธ์ของการศึกษา

ผลการสำรวจเส้นทางรวบรวมขยะเดิมของเทศบาลตำบลแม่กาที่ได้รับข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามและสัมภาษณ์กับพนักงานลงรายละเอียดในระดับเส้นทางการรวบรวมขยะในแต่ละคันนั้นจะถูกเก็บใส่รถคันใด พบว่า รถขยะแต่ละคันมีเส้นทางดังนี้ รถขยะคันที่ 1 (หมายเลขทะเบียน 81-0240 พะเยา) ออกจากโรงจอดรถเพื่อรวบรวมขยะในพื้นที่ หมู่ 1, 10 และบางส่วนของ หมู่ 2, 16 และสิ้นสุดที่บ่อขยะ รถขยะคันที่ 2 (หมายเลขทะเบียน 80-9264 พะเยา) ออกจาก โรงจอดรถเพื่อรวบรวมขยะในพื้นที่ หมู่ 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17, หมู่บ้านนวโชติ1, นวโชติ2, กุลสิริ, ภูฟ้าธารา, ภูอากา, ศูนย์พัฒนาฝีมือแรงงาน และสิ้นสุดที่บ่อขยะ รถขยะคันที่ 3 (หมายเลขทะเบียน 80-7353 พะเยา) ออกจากโรงจอดรถเพื่อรวบรวมขยะในพื้นที่ หมู่ 2 และ 16 และเข้าไปที่เส้นทางเข้าอ่างเก็บน้ำแม่ต้า และสิ้นสุดที่บ่อขยะ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 8 การจัดเส้นทางแบบเดิมของยานพาหนะ

ผลการเปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บรวบรวมขยะที่ใช้ในปัจจุบันกับผลลัพธ์ของการศึกษา พื้นที่เทศบาลตำบลแม่กา พบว่ามีเส้นทางที่ทับซ้อนกันบางส่วนระหว่างเส้นทางเดิมและใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถนนหลวงหมายเลข 1 พหลโยธิน และถนนทางเข้าบ่อขยะซึ่งถูกใช้เป็นเส้นทางหลักของการสัญจรในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ทำการแจกแจงรายละเอียดการรวบรวมขยะออกมาเป็นข้อมูลตารางและแผนที่เพื่อการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ VRP ทั้งในแง่ของจำนวนถังขยะ น้ำหนักรวม ระยะเวลา และระยะทางของรถแต่ละคัน ผลการศึกษาพบว่า การรวบรวมขยะของรถขนขยะทั้ง 3 คัน มีระยะเวลาลดลงจากเดิม 798 นาที ลงเหลือเพียง 778 นาที และมีระยะทางลดลงจากเดิม 135.17 กิโลเมตร เหลือเพียง 125.67 กิโลเมตร นอกจากนี้ หากคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ของรถขนขยะทั้ง 3 คัน แล้วพบว่า ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อวัน ลดลงจาก 40.13 ลิตร เหลือเพียง 37.87 ลิตร และค่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อวัน ลดลงจากเดิม 1,241.34 บาท เหลือเพียง 1,136.16 บาท ยิ่งไปกว่านั้น หากพิจารณาเป็นรายเดือนหรือรายปี จะพบว่า สามารถประหยัดเงินได้ เท่ากับ 3,155.21 บาท/เดือน หรือ 38,388.39 บาท/ปี รายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบระหว่างเส้นทางการจัดเก็บรวบรวมขยะแบบเดิมและใหม่(จากผลการศึกษา)

คัน ที่	เลข ทะเบียน	จุดเก็บขยะ		น้ำหนัก (กิโลกรัม)		ระยะเวลา (นาท)		ระยะทาง (กิโลเมตร)		น้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร)		ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท)	
		เดิม	VRP	เดิม	VRP	เดิม	VRP	เดิม	VRP	เดิม	VRP	เดิม	VRP
1	81-0240	107	152	2,971	4,991	224	270	44.16	45.89	15.88	16.51	476.55	495.22
2	80-9264	231	152	6,610	4,361	379	268	55.82	44.16	20.08	15.88	602.37	476.55
3	80-7363	80	114	2,767	2,996	195	240	35.19	35.62	5.41	5.48	162.42	164.40
รวม		418	418	12,348	12,348	798	778	135.17	125.67	41.38	37.87	1,241.34	1,136.16

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะเพื่อกำหนดเส้นทางเดินรถเก็บขนขยะมูลฝอยที่ประหยัดต้นทุนการขนส่งของรถขนขยะในเขตเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ข้อมูลและกระบวนการส่วนใหญ่อาศัยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นหลักในการทำงาน ชั้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องมีทั้งหมด 3 ชั้นข้อมูล ได้แก่ ชั้นข้อมูลถึง/จุดเก็บขยะ ชั้นข้อมูลโครงข่ายถนน และชั้นข้อมูลบ่อฝังกลบขยะ นอกจากนี้ อาศัยเงื่อนไขการวิเคราะห์ VRP ได้แก่ จำนวนรถ ช่วงเวลาในการทำงาน ความจุของรถ ความเร็วของรถ เวลาที่ใช้ในการเก็บขยะจากแต่ละถัง และตำแหน่งโรงรถและบ่อฝังกลบขยะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงเส้นทางรวบรวมขยะที่ใช้งบประมาณค่าน้ำมันเชื้อเพลิงจากเดิม 453,087.73 บาท/ปี เหลือเพียง 414,699.35 บาท/ปี นอกจากนี้ ผลการศึกษาจะถูกนำเสนอกับผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการขยะของเทศบาลตำบลแม่กาเพื่อการสนับสนุนการวางระบบการจัดการขยะอัจฉริยะในอนาคตต่อไป ยิ่งไปกว่านั้น หากมีการขยายพื้นที่ศึกษาไปยังองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นจะสามารถช่วยประหยัดงบประมาณด้านนี้ได้อย่างมากอีกด้วยทั้งในระดับจังหวัด ระดับภาค หรือแม้แต่ว่าระดับประเทศ

การเปรียบเทียบการศึกษานี้กับการศึกษาที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการศึกษาของวิภพและคณะ (2558) ซึ่งมีพื้นที่ศึกษาเดียวกันยังคงเป็นเพียงการจัดเส้นทางรวบรวมขยะโดยใช้การวิเคราะห์โครงข่ายอย่างง่ายร่วมกับการตัดสินใจของคนเท่านั้น มิได้ใช้การวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (VRP) ซึ่งอาจทำให้เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาอย่างครบถ้วนเพื่อค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีวิธีการที่ใกล้เคียงกันกับการศึกษาของ ESRI (2008) และ Heather Moe (2019) ในการจัดเส้นทางเดินรถเพื่อการกระจายสินค้าในซานฟรานซิสโก และภัทร์ศิริ พลายนะหาร (2562) ในการจัดเส้นทางเดินรถขนขยะในตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งข้อมูลปริมาณขยะแต่ละถังนั้นเป็นข้อมูลที่สมมุติขึ้น ต่างจากการศึกษานี้ที่มีการเก็บข้อมูลจริงภาคสนามในช่วงเวลาสถานการณ์ปกติ ซึ่งเทคนิค VRP นั้นสามารถที่จะนำไปใช้ในการช่วยค้นหาหรือออกแบบเส้นทางที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตาม ยังมีฟังก์ชันหรือเงื่อนไขอื่นอีกของ VRP ที่การศึกษานี้ยังไม่ได้ใช้งาน เช่น การกำหนดและคิดค่าจ้างของพนักงานประจำรถเป็นรายชั่วโมง เพื่อแสดงถึงต้นทุนของการขนส่งและข้อจำกัดที่สมจริงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพื้นที่ศึกษาไม่มีความซับซ้อนมากจึงไม่ได้ใช้งานข้อจำกัดดังกล่าวและเงื่อนไขอื่น ได้แก่ ห้ามเลี้ยวซ้ายหรือห้ามเลี้ยวขวา หรือห้ามกลับรถ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาค้างถัดไป ประการแรก เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณขยะแต่ละถังนั้นมีผลต่อการจัดเส้นทางด้วย และการศึกษานี้ไม่พิจารณารวมไปถึงการกำหนดจุดเก็บขยะที่เหมาะสมด้วย เนื่องจากงบประมาณและเวลามีจำกัด ดังนั้นสำหรับการศึกษาค้างถัดไปควรพิจารณาสัดส่วนของขยะ เช่น อาจเพิ่มปริมาณขยะขึ้นอีกร้อยละ 25 จากเดิม สำหรับกรณีช่วงเทศกาลที่มีปริมาณขยะมากกว่าวันธรรมดา และควรเพิ่มการศึกษาตำแหน่งของ

ถังขยะที่เหมาะสมด้วย ประการที่สอง หากมีการเพิ่มจำนวนรถขยะ หรือเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขใด ควรทำการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสถานการณ์หรือเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ประการที่สาม ปริมาณขยะในการศึกษานี้ กำหนดในรูปแบบค่าน้ำหนักหน่วยเป็นกิโลกรัม อย่างไรก็ตามการกำหนดปริมาณขยะในรูปแบบปริมาตรหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ยังควรถูกพิจารณาสำหรับบางพื้นที่ศึกษาและลักษณะของรถเก็บขยะที่ไม่สามารถบีบอัดขยะได้ รวมถึงเซนเซอร์ตรวจจับปริมาณขยะในถังด้วยที่ตรวจวัดขยะในรูปแบบปริมาตรหรือความสูงของขยะภายในถัง ดังเช่นในการศึกษาของทิพานัน และคณะ (2562) ประการสุดท้าย ข้อมูลความเร็วและอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ ยังเป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น เพราะฉะนั้นหากมีข้อมูลทีละเคาะจะดีกว่านี้จะทำให้ผลการศึกษาดูต้องสมจริงมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาขอขอบคุณพนักงานของเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ที่ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษากิจการจัดเส้นทางรวบรวมขยะในพื้นที่ศึกษา ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารวิชาการเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่สำหรับข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงการเผยแพร่ผลงานนี้ให้เป็นประโยชน์ในวงวิชาการและการพัฒนาเชิงพื้นที่

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2564). ระบบสารสนเทศด้านการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน ข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ.ศ.2564. สืบค้นจาก <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2564>.
- จิรวัดณ์ ตั้งปณิธานนท์. (2565, 1 สิงหาคม). ควอนตัมคอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีทำลายโลก?. *beartai 7 HD*. สืบค้นจาก <https://www.youtube.com/watch?v=bhPm54B1FCc>.
- ทิพานัน พงษ์สุวรรณ, อนุพงษ์ ติตะ และภาณุวัตร อุทัยบาล. (2562). ระบบติดตามถังขยะอัจฉริยะ (Smart Trash Tracking System). *PULINET Journal*, Vol 6(2) 41-50.
- พันทิป.คอม. (2557). อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกสี่ล้อใหญ่ หกล้อเล็ก จากการใช้งานจริงได้กี่กิโลเมตรต่อลิตร. สืบค้นจาก <https://pantip.com/topic/32804783>.
- ภัทร์ศรี พลาลัยหาร. (2562). การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเส้นทางเก็บขยะ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก (วิทยาสตรมหาบัณฑิต). สาขาภูมิสารสนเทศศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- มีชัย วรสายัณห์. (2535). ปัญหาสิ่งแวดล้อมและการป้องกันแก้ไข. *วารสารภูมิศาสตร์*, 17(1), 33-47.
- วิภาพ แสงวังทอง, กรองกาญจน์ โลหะเจริญสุข, ชิตารัตน์ เครื่องสนุก, สิริภาภรณ์ ดวงศิริ และสุริรัตน์ พรหมศิริ. (2558). การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการจัดเส้นทางรถขยะของเทศบาลตำบลแม่กา. *การประชุมทางวิชาการระดับชาติ (Abstract) “พะเยาวิจัย ครั้งที่ 4”, วันที่ 29 – 30 มกราคม 2558*. พะเยา: มหาวิทยาลัยพะเยา.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2557). *วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน*. สืบค้นจาก <http://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2014/20140404-sustainable-development.pdf>.

องค์การบริหารส่วนตำบลโคกกกลาง. (2560). *ประกาศองค์การบริหารส่วนตำบลโคกกกลาง เรื่อง การกำหนดหลักเกณฑ์การใช้เส้นเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิงของรถส่วนกลาง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561*. สืบค้นจาก <http://www.khokyanglocal.go.th/khokyanglocal/mainfile/jOTfkxLEm6Yw.pdf>.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2008). *ArcGIS Network Analyst Tutorial*. Retrieved from https://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/pdf/Network_Analyst_Tutorial.pdf.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2023). *Types of network analysis layers*. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/types-of-network-analyses.htm>.

Heather Moe. (2019). *Fleet Routing with the VRP Solver: Balancing Workloads*. Retrieved from <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/transportation/transportation/fleet-routing-with-the-vrp-solver-balancing-workloads/>.

National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC). (2017). *Traffy Waste: ระบบจัดการการเก็บขยะอัจฉริยะ*. สืบค้นจาก <https://www.nectec.or.th/innovation/innovation-software/traffywaste.html>

Sketchplanations. (2022). *The travelling salesman problem*. Retrieved from <https://sketchplanations.com/the-travelling-salesman-problem>.

Traffy. (2017). *Traffy* Waste ระบบบริหารจัดการการเก็บขยะ*. สืบค้นจาก https://www.traffy.in.th/?page_id=1550.