การจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ชนัญชิดา บุญคุ้ม

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยนเรศวร

การจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ชนัญชิดา บุญคุ้ม

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(GARBAGE TRUCK ROUTING PROBLEM USING MATHEMATICAL MODEL)”
นางสาวชนัญชิดา บุญคุ้ม
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชิระ วิจิตรพงษา)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ใกล้รุ่ง พรอนันต์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ไพศาลวิโรจน์รักษ์)

อนุมัติ

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ชมนาด อินทจามรรักษ์)
หัวหน้าภาควิชาภาษาศาสตร์ คติชนวิทยา ปรัชญาและศาสนา คณะมนุษยศาสตร์
รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
20 พ.ค. 2569

ชื่อเรื่อง การจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผู้วิจัย ชนัญชิดา บุญคุ้ม

ประธานที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ

ประเภทสารนิพนธ์ วิทยานิพนธ์ วท.ม. โลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2568

คำสำคัญ การจัดเส้นทางเดินรถ, การจัดเก็บขยะ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, วิธีการเชิงวิวัฒนาการ

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะในเขตเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี เพื่อแก้ไขปัญหาความซับซ้อนของเส้นทางและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ผ่านเครื่องมือ Microsoft Excel Solver ซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนามาจากอัลกอริทึมพันธุกรรม (Genetic Algorithm) มาใช้ในการประมวลผลเพื่อค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดในพื้นที่จริง ทั้งในด้านเวลาและลักษณะการปฏิบัติงานเพื่อให้แบบจำลองมีความสมจริง ผลการศึกษาจากการทดสอบแบบจำลองรถขยะจำนวน 4 คัน พบว่า รถทุกคันสามารถลดระยะทางการเดินรถลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิม โดยรถคันที่ 1 ระยะทางลดลงมากที่สุดในช่วงเช้า 7.42 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 25.85 และช่วงบ่ายลดลง 2.43 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 11.25 ส่วนรถคันที่ 2 ระยะทางลดลง 2.45 กิโลเมตร ในช่วงเช้า คิดเป็นร้อยละ 14.24 และ 6.60 กิโลเมตรในช่วงบ่าย คิดเป็นร้อยละ 23.66 สำหรับรถคันที่ 3 ระยะทางลดลง 4.29 กิโลเมตร ในช่วงเช้า คิดเป็นร้อยละ 20.93 และ 5.96 กิโลเมตร ในช่วงบ่าย คิดเป็นร้อยละ 22.84 ขณะที่รถคันที่ 4 ระยะทางลดลง 3.22 กิโลเมตร ในช่วงเช้า คิดเป็นร้อยละ 15.19 และ 2.04 กิโลเมตร ในช่วงบ่าย คิดเป็นร้อยละ 9.32 สรุปได้ว่าการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีเชิงวิวัฒนาการ สามารถช่วยลดความซับซ้อน และลดระยะทางในการจัดเก็บขยะได้เมื่อเทียบกับวิธีการเดิม ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานแล้ว ยังเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้หน่วยงานท้องถิ่นสามารถบริหารจัดการทรัพยากร และงบประมาณด้านโลจิสติกส์ได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืนอีกด้วย

Title GARBAGE TRUCK ROUTING PROBLEM USING MATHEMATICAL MODEL

Author Chananchida Bunkhum

Advisor Asst. Prof. Dr. Sirikarn Chansombat

Academic Paper M.S. Thesis in Logistics and Supply Chain - (Type A 2), Naresuan University, 2025

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

ABSTRACT

This research aims to develop a mathematical model for optimal waste collection vehicle routing in the Sukhothai municipality area in order to address route complexity and improve operational efficiency. This study applies an Evolutionary Method through Microsoft Excel Solver, which is based on the Genetic Algorithm approach. The results of four garbage trucks revealed that Truck 1 achieved the greatest reduction, with a decrease of 7.42 kilometers in the moring shift (25.85%) and 2.43 kilometers in the afternoon shift (11.25%). Truck 2 showed a 2.45 kilometers reduction in the morning shift (14.24%) and a 6.60 kilometers reduction in the afternoon shift. For Truck 3, the distance was reduced by 4.29 kilometers in the morning shift (20.93%) and 5.96 kilometers in the afternoon shift (22.84%). Meanwhile, Truck 4 achieved reductions of 3.22 kilometers in the morning shift (15.19%) and 2.04 kilometers in the afternoon shift (9.32%). In conclusion, the proposed mathematical model and Evolutionary Method were effective in reducing route complexity and minimizing waste collection travel distances compared to the conventional approach. In addition to improving efficiency, the proposed approach also provides an important guideline for local authorities to manage resources and budgets more cost-effectively and sustainably.

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และถ่ายทอดความรู้ความเข้าใจอันเป็นประโยชน์ยิ่งในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนดูแลแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ รวมถึงขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ที่ได้อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่ในการศึกษา และสนับสนุนข้อมูลสำคัญต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ชนัญชิดา บุญคุ้ม

สารบัญ

หน้า

ประกาศคุณูปการ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
ที่มาและความสำคัญ 1
วัตถุประสงค์ 2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
ขอบเขตการวิจัย 2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
การบริหารจัดการขยะ 3
ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) 4
วิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Methods) 7
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) 11
การค้นหาคำตอบด้วยการใช้ Microsoft Excel Solver 13
การตรวจสอบ (Verification) และการยืนยันความถูกต้อง (Validation) 16
การทบทวนวรรณกรรม 17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 27
ข้อมูลพื้นที่ศึกษา 27
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 29

หน้า

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 29
การเรียกใช้ Microsoft Excel Solver 32
บทที่ 4 ผลการวิจัย 33
ผลการศึกษาสภาพปัจจุบันของการจัดเก็บขยะกรณีศึกษา.....33
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 48
การประมวลผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....51
การเปรียบเทียบผลลัพธ์.....64
ผลลัพธ์ของเส้นทางการจัดเก็บขยะที่เหมาะสม 83
การคำนวณอัตราสิ้นเปลืองน้ำมัน 84
บทที่ 5 บทสรุป.....86
สรุปผลการวิจัย 86
สรุปผลการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ 86
สรุปผลงานวิจัยในส่วนของเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินรถจัดเก็บขยะ 87
ข้อเสนอแนะ.....92
บรรณานุกรม.....93
ภาคผนวก..... 102
ประวัติผู้วิจัย..... 114

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ประเภทของรูปแบบปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ....4
ตาราง 2 ลักษณะของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ....5
ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม....18
ตาราง 4 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 1....35
ตาราง 5 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 1....36
ตาราง 6 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 2....37
ตาราง 7 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 2....38
ตาราง 8 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 3....39
ตาราง 9 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 3....40
ตาราง 10 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 4....41
ตาราง 11 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 4....42
ตาราง 12 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงเช้า....43
ตาราง 13 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงบ่าย....44
ตาราง 14 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงเช้า....44
ตาราง 15 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงบ่าย....45
ตาราง 16 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงเช้า....45
ตาราง 17 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงบ่าย....46
ตาราง 18 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงเช้า....46
ตาราง 19 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงบ่าย....47

หน้า

ตาราง 20 ลำดับจุดระยะทางรวมเดิมของรถเก็บขยะทั้ง 4 คัน 48
ตาราง 21 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 1 52
ตาราง 22 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 2 56
ตาราง 23 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 3 59
ตาราง 24 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 4 61
ตาราง 25 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับผลลัพธ์ที่ได้จาก Solver.....65
ตาราง 26 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 1 67
ตาราง 27 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 1.....69
ตาราง 28 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 2 71
ตาราง 29 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 2.....73
ตาราง 30 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 3 75
ตาราง 31 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 3.....77
ตาราง 32 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 4 79
ตาราง 33 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 4.....81
ตาราง 34 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงเช้า..... 103
ตาราง 35 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงบ่าย..... 104
ตาราง 36 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงเช้า..... 105
ตาราง 37 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงบ่าย..... 106
ตาราง 38 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงเช้า..... 107
ตาราง 39 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงบ่าย..... 108

หน้า

ตาราง 40 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงเช้า..... 109

ตาราง 41 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงบ่าย..... 110

ตาราง 42 การคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้..... 111

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 การจัดเส้นทางเดินรถเพียง 1 เส้นทาง 6
ภาพ 2 การจัดเส้นทางการเดินรถแบบหลายเส้นทาง 7
ภาพ 3 การจำแนกประเภทวิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด 8
ภาพ 4 การตั้งค่า Parameters แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 13
ภาพ 5 การตั้งค่าพารามิเตอร์ 15
ภาพ 6 แผนที่อาณาเขตเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี 28
ภาพ 7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 31
ภาพ 8 Add-ins เพื่อทำการติดตั้ง Solver 32
ภาพ 9 รถบรรทุกขยะขนาด 6,000 กิโลกรัม 34
ภาพ 10 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 1 68
ภาพ 11 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 1 70
ภาพ 12 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 2 72
ภาพ 13 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 2 74
ภาพ 14 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 3 76
ภาพ 15 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 3 78

หน้า

ภาพ 16 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 4 80

ภาพ 17 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 4.....82

ภาพ 18 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 1 88

ภาพ 19 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 2 89

ภาพ 20 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 3.....90

ภาพ 21 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 4 91

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาขยะมูลฝอยในประเทศไทยถือเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ โดยมีหลายปัญหาที่เกี่ยวเนื่องกันไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมการอุปโภคบริโภค การคัดแยกขยะ รวมถึงการจัดการขยะที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งจากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2567 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอยรวมกันทั้งประเทศ 27.20 ล้านตัน หรือประมาณ 74,529 ตันต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2567) สาเหตุหนึ่งมาจากผู้บริโภคหรือประชาชนส่วนใหญ่ยังไม่ให้ความสำคัญกับการคัดแยกขยะ อีกทั้งหน่วยงานภาครัฐที่กำกับดูแลยังไม่สามารถกำจัดขยะและจัดเก็บขยะได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการตกค้างของขยะในแต่ละวัน เกิดเป็นแหล่งเชื้อโรคและเป็นพาหะนำโรคทำให้มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน อีกทั้งยังส่งกลิ่นรบกวนกับประชาชนในพื้นที่นั้น ๆ ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบจึงต้องมีการวางแผนจัดเก็บหรือกำจัดขยะ เพื่อจัดการกับปริมาณของขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้น นำมาซึ่งต้นทุนในการกำจัดขยะและจัดเก็บขยะ อาทิ ค่าแรงงาน ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าบำรุงรักษา เป็นต้น

ในการวางแผนจัดเส้นทางเดินรถ เป็นการวางแผนการทำงานของรถแต่ละคันโดยมีการกำหนดเส้นทางการเดินรถ และเวลาการเดินรถ ซึ่งต้องมีการจัดตารางการเดินรถเพื่อให้ง่ายต่อการบริหารจัดการ เนื่องจากเป็นการกำหนดตารางเวลาในการทำงานของรถแต่ละคัน กำหนดเที่ยวรถทั้งหมดที่ต้องให้บริการในแต่ละวัน กำหนดจำนวนพนักงานขับรถที่ต้องทำงานในแต่ละวัน รวมทั้งกำหนดช่วงเวลาในการทำงานของพนักงานแต่ละคนอีกด้วย ซึ่งในการกำหนดเส้นทางการเดินรถหรือการจัดเส้นทางเดินรถ เป็นปัญหาการตัดสินใจที่มีความซับซ้อน มีข้อจำกัดต่าง ๆ มากมาย และยังเป็นปัญหาของหลายองค์กรที่ต้องพบเจอ โดยปัญหาที่พบส่วนใหญ่ คือ ขาดการวางแผนที่เหมาะสม ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายจากการขนส่งมากเกินความจำเป็น รวมถึงองค์กรไม่มีการกำหนดแนวทางหรือเป็นรูปแบบที่ชัดเจนให้แก่พนักงานขับรถ อาศัยเพียงความคุ้นเคยของพนักงานซึ่งไม่ได้คำนึงถึงระยะทางที่มากขึ้น ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาหลายชั่วโมงต่อวันในการวิ่งรถ และส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองด้านน้ำมันเชื้อเพลิง รวมถึงเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังนั้น เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ จึงต้องมีการศึกษาและวางแผนเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ

ปัจจุบันเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี มีหน้าที่ในการจัดเก็บขยะในเขตพื้นที่ความรับผิดชอบไปยังสถานที่ฝังกลบขยะและนำรถกลับมายังจุดจอดรถบรรทุกขยะชุมชนวังหิน โดยรถบรรทุกขยะจะวิ่งตามเส้นทางที่ทางเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีจัดไว้ให้ ซึ่งปัญหาพบว่า เส้นทางการเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี พนักงานขับรถจะเป็นผู้ตัดสินใจและกำหนดจุดเก็บขยะว่าจะเก็บที่จุดใดก่อน ทำให้เกิดการวิ่งทับซ้อนเส้นทาง จึงอาจทำให้ใช้ระยะทางและระยะเวลามากในการขับรถ ส่งผลให้เกิดภาระค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจัดเก็บขยะมูลฝอยที่มากขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและวางแผนเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในการจัดเส้นทาง เนื่องจากมีการขนขยะปริมาณมากในทุก ๆ วัน เป็นผลต่อต้นทุนในการขนส่งที่สูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้มุ่งเน้นศึกษาปัญหาเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถเพื่อหาเส้นทางในการเดินรถจัดเก็บขยะที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ
2. เพื่อเสนอแนะเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะที่เหมาะสม สำหรับเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี
2. ทำให้การบริหารจัดการด้านจัดเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะในพื้นที่เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย โดยมุ่งเน้นการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ปริมาณขยะในช่วงวันเวลาปกติที่ไม่ใช่ช่วงเทศกาลหรือกิจกรรมพิเศษที่อาจทำให้ปริมาณขยะสูงผิดปกติ เพื่อสะท้อนสภาพการจัดเก็บที่เป็นกิจวัตรประจำวันของเทศบาล จากนั้นได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารวบรวมเนื้อหาจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาจากเอกสาร ตำราวิชาการ หนังสือ บทความ วารสาร และรายงานวิจัย เพื่อให้สามารถกำหนดกรอบแนวความคิด ที่จะนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาให้ครอบคลุม และชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยสรุปสาระสำคัญที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้ การบริหารจัดการขยะ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ วิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การค้นหาคำตอบด้วยการใช้ Microsoft Excel Solver การตรวจสอบและการยืนยันความถูกต้อง และการทบทวนวรรณกรรม มีรายละเอียดดังนี้

การบริหารจัดการขยะ

การบริหารจัดการขยะในเขตชุมชนเมืองมีความซับซ้อนตามการเติบโตของแต่ละเมือง โดยขยะมูลฝอยสามารถพบได้เกือบทุก ๆ จุดของเมือง ไม่ว่าจะเป็นสถานที่ราชการ ที่อยู่อาศัย ตลาด ห้างสรรพสินค้า สวนสาธารณะ ถนน หรือแม้แต่พื้นที่ว่างเปล่า ซึ่งการเก็บขยะในเขตชุมชนเมืองจะมีความแตกต่างกันไปตามสภาพท้องถิ่น โดยไม่สามารถนำรูปแบบการบริหารจัดการไปใช้ได้เหมือนกันทั้งหมด ดังนั้นการจัดระบบการเก็บขยะจึงต้องมีการวางแผนเพื่อความเป็นระเบียบเรียบร้อยและง่ายต่อการควบคุม สำหรับปริมาณขยะที่เกิดจากการดำรงชีวิตนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ลักษณะอุปนิสัยของประชาชนในท้องถิ่น ความถี่ของการบริการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย สถานการณ์การดำรงชีพของประชาชน รวมถึงกฎหมายหรือระเบียบข้อบังคับ เป็นต้น (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2541)

รูปแบบของการบริหารจัดการขยะมูลฝอย ที่ได้รับความนิยมมี 4 วิธี ได้แก่

1. หน่วยราชการท้องถิ่นลงทุนและบริหารกิจการเองทุกขั้นตอน
2. หน่วยราชการส่วนท้องถิ่นลงทุนและให้เอกชนเข้ามามีส่วนร่วมในการดำเนินการ

2.1 การว่าจ้าง หมายถึง ท้องถิ่นว่าจ้างให้เอกชนเข้ามาดำเนินการเก็บหรือกำจัดขยะมูลฝอย โดยจ่ายค่าจ้างเป็นการเหมาหรือจ่ายตามงานที่ทำ

2.2 การให้สัมปทาน หมายถึง ท้องถิ่นเป็นเจ้าของการลงทุนทำกิจการเก็บขนหรือกำจัดขยะมูลฝอยและมอบหมายให้เอกชนมีสัมปทาน

3. เอกชนลงทุนและบริหารจัดการเอง

4. หน่วยงานราชการส่วนท้องถิ่นและเอกชนร่วมลงทุนและบริหารกิจการโดยการจัดตั้งบริษัทจำกัด (นฤมล ด่านตระกูล, 2560)

เมื่อชุมชนมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่รับผิดชอบในการเก็บขยะมีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งถ้าองค์กรใดขาดการบริหารจัดการที่ดีหรือไม่ปรับปรุงเส้นทางการเก็บขยะใหม่ อาจทำให้รถเก็บขยะบางคัน ต้องรับภาระในพื้นที่และระยะทางเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าต้องใช้ระยะเวลาในการทำงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ขาดการสมดุลในการดำเนินงานหรือในบางกรณีรถเก็บขยะบางคันวิ่งทับเส้นทางกับรถคันอื่น ก็จะส่งผลทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดเส้นทางเก็บขยะ พนักงานทุกคนและรถทุกคันจะต้องมีเวลาในการทำงานในพื้นที่ที่รับผิดชอบเท่าเทียมกันหรือไม่ต่างกันมาก (กอบการ สมณะ และสิริณี เพ็งม่วง, 2557)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดในการวางแผนการจัดลำดับและเส้นทางการขนส่งสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อตอบสนองความต้องการและความพึงพอใจให้แก่ลูกค้า ซึ่งผู้ที่คิดค้นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะคนแรก คือ Dantzig and Ramser (1959) และในงานวิจัยของปัญญวัฒน์ จันทร์ชัยภักดิ์ (2561) ได้นำเสนอรูปแบบปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ แสดงตาราง 1

ตาราง 1 ประเภทของรูปแบบปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ

รูปแบบปัญหา	ชื่อย่อ	ความหมาย
Capacitated VRP	CVRP	ปัญหา VRP แบบมีข้อจำกัดเรื่องความจุของรถบรรทุก
VRP with Time Windows	VRPTW	ปัญหา VRP แบบมีกรอบเวลาในการจัดส่ง
VRP with Backhaul	VRPPB	ปัญหา VRP แบบมีการส่งกลับมายังคลังเดิม
VRP with Pickup and Delivery	VRPPD	ปัญหา VRP แบบมีการรับ-ส่งสินค้า
VRPPD with Time Windows	VRPPDTW	ปัญหา VRP แบบมีการรับ-ส่งสินค้าและมีกรอบเวลา
VRP with Multiple Depots	MDVRP	ปัญหา VRP แบบมีหลายคลังสินค้า
Periodic VRP	PVRP	ปัญหา VRP แบบมีช่วงเวลา
Split Delivery VRP	SDVRP	ปัญหา VRP แบบมีการแยกสินค้าออกส่งเป็นส่วน ๆ
Stochastic VRP	SVRP	ปัญหา VRP แบบมีความไม่แน่นอน

ที่มา: Toth & Vigo, 2002 อ้างอิงใน ปัญญวัฒน์ จันทร์ชัยภักดิ์, 2561

เนื่องจากปัญหาที่เกี่ยวกับการขนส่งมีขอบเขตที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการนำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละงาน การทำความเข้าใจจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะสามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยของ พลอยไพลิน ภูมิโคกรักษ์ (2560) ได้นำเสนอลักษณะเฉพาะของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะเพื่อแสดงความแตกต่างของปัญหา ดังตาราง 2

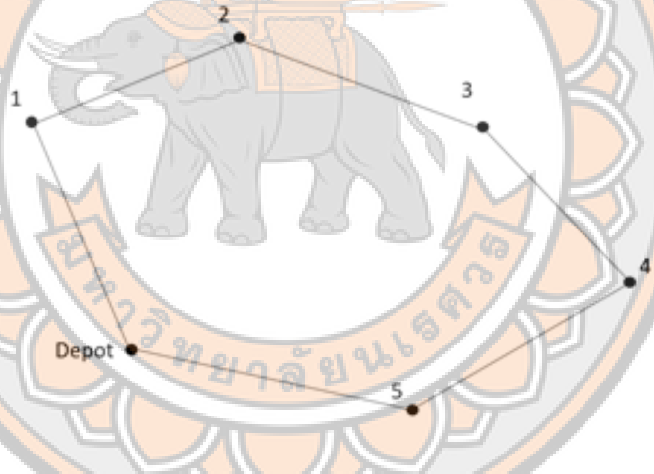
ตาราง 2 ลักษณะของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ

ลักษณะของปัญหา	ทางเลือกที่เป็นไปได้
1. จำนวนของยานพาหนะ (Fleet)	1. จำนวน 1 คัน
	2. จำนวนหลายคัน
2. ประเภทของยานพาหนะที่มี (Vehicle Type)	1. ประเภทเดียวกันหมด
	2. หลายประเภท
	3. ยานพาหนะแบบพิเศษ
3. คลังสินค้า (Depot/Warehouse)	1. คลังสินค้ากลาง 1 แห่ง
	2. คลังสินค้ากลางมากกว่า 1 แห่ง
4. ความต้องการในการขนส่ง (Transport Demand)	1. ความต้องการที่แน่นอน (Deterministic)
	2. ความต้องการที่ไม่แน่นอน (Stochastic)
	3. ขึ้นอยู่กับประเภทของบริการ (Dependent on service)
5. ตำแหน่งที่ตั้งลูกค้า (Demand Location)	1. ที่ตำแหน่ง (Node/Point)
	2. ที่เส้นทาง (Arc/Route)
	3. ที่ตำแหน่งและเส้นทาง (Mix)
6. ความจุของยานพาหนะ (Vehicle Capacity)	1. เท่ากันหมด
	2. ไม่เท่ากัน
7. เวลาในการขนส่งที่ยอมรับได้มากที่สุด (Maximum Route Time)	1. กำหนด (เท่ากันทุกเส้นทาง)
	2. กำหนด (ต่างกันตามเส้นทาง)
	3. ไม่กำหนด
8. ข้อจำกัดทางด้านเวลา (Time Windows)	1. แบบด้านเดียว (Single-Sided)
	2. แบบสองด้าน (Double-Sided)
9. ต้นทุน (Cost)	1. ต้นทุนผันแปรหรือต้นทุนตามระยะทาง
	2. ต้นทุนคงที่หรือต้นทุนยานพาหนะ
	3. ต้นทุนขนส่งรวมทั้งผันแปรและคงที่

ที่มา: พลอยไพลิน ภูมิโคกรักษ์, 2560

ในการวิเคราะห์ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งมีความซับซ้อนและแปรเปลี่ยนไปตามรายละเอียดขององค์ประกอบของปัญหา ดังนั้น จึงได้มีการแบ่งวิธีการจำลองปัญหาออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) การจัดเส้นทางการเดินรถเพียง 1 เส้นทาง (Traveling Salesman Problem: TSP) 2) การจัดเส้นทางการเดินรถแบบหลายเส้นทาง (Multiple Traveling Salesman Problem: MTSP) และ 3) ปัญหาการจัดเส้นทางแบบ (Classical Vehicle Routing Problem: Classical VRP) (ธเนศ ทักษิณวราจาร, 2543) โดยมีรายละเอียดดังนี้

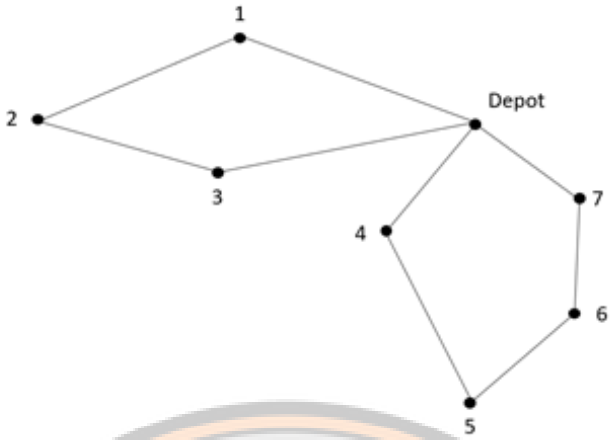
1. การจัดเส้นทางการเดินรถเพียง 1 เส้นทาง (Traveling Salesman Problem: TSP) เป็นปัญหาในระดับง่ายสุด เนื่องจากเป็นการจัดลำดับการขนส่งที่ใช้เส้นทางเดียวให้กับลูกค้าต่าง ๆ โดยออกจากศูนย์กระจายสินค้าเดียว ไม่มีข้อจำกัดด้านเวลาและความจุรถ โดยผลลัพธ์ของเส้นทางที่ได้จะเริ่มและสิ้นสุดที่ศูนย์กระจายสินค้าและผ่านลูกค้าแต่ละรายเพียงครั้งเดียว (ธเนศ ทักษิณวราจาร, 2543) แสดงดังภาพ 1



ภาพ 1 การจัดเส้นทางเดินรถเพียง 1 เส้นทาง

ที่มา: ธเนศ ทักษิณวราจาร, 2543

2. การจัดเส้นทางการเดินรถแบบหลายเส้นทาง (Multiple Traveling Salesman Problem: MTSP) เป็นปัญหาในการจัดลำดับการส่งสินค้าโดยใช้เส้นทางหลายเส้นทางให้กับลูกค้าโดยออกจากศูนย์กระจายสินค้าเดียวโดยไม่มีข้อจำกัดด้านเวลาและความจุรถ (ธเนศ ทักษิณวราจาร, 2543) แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 การจัดเส้นทางการเดินรถแบบหลายเส้นทาง

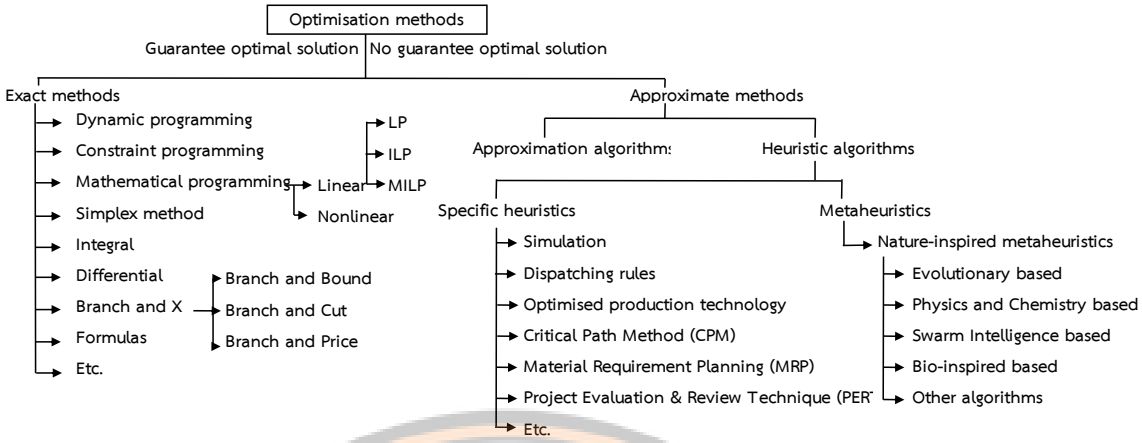
ที่มา: ธเนศ ทักษิณวราจาร, 2543

3. ปัญหาการจัดเส้นทางแบบ (Classical Vehicle Routing Problem: Classical VRP) ปัญหาในระดับนี้จะเป็นการหาจำนวนเส้นทางและลำดับในการส่งสินค้าของลูกค้าแต่ละราย ภายใต้ข้อจำกัดของรถซึ่งบรรทุกสินค้าไม่เกินความจุที่กำหนดไว้ (พลอยไพลิน ภูมิโคกรักษ์, 2560)

วิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Methods)

ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถเป็นปัญหาที่พบได้เป็นประจำ ซึ่งในแต่ละวันลูกค้ามีความต้องการปริมาณสินค้าแต่ละชนิดแตกต่างกันไป โดยปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ มักเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าให้ไวและรวดเร็วที่สุด ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเส้นทางการขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปยังความต้องการในจุดต่าง ๆ โดยมีเส้นทางรวมในการเดินทางที่สั้นที่สุดหรือมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น จำนวนยานพาหนะ เวลาในการดำเนินงาน เป็นต้น

สำหรับวิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Methods) คือ กระบวนการทำงานที่ใช้ในการตัดสินใจ โดยนำหลักเหตุผลมาช่วยในการเลือกวิธีการหรือขั้นตอนของกระบวนการทำงานต่าง ๆ เพื่อให้ได้รับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ วิธีการแม่นตรง (Exact Methods) และวิธีแบบประมาณค่า (Approximate Methods) (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561 อ้างอิงจาก Blum et al., 2011, Blum & Roli, 2003, Talbi, 2009) แสดงดังภาพ 3 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพ 3 การจำแนกประเภทวิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ที่มา: Blum et al., 2011, Blum & Roli, 2003, Talbi, 2009 อ้างอิงใน ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561

1. วิธีการแม่นตรง (Exact Methods)

วิธีการแม่นตรง (Exact Methods) เป็นวิธีการในการแก้ปัญหาหรือวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ สามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้คือคำตอบที่ดีที่สุด แต่ข้อจำกัดคือใช้ได้กับปัญหาที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถนำไปใช้จริงได้ วิธีการในกลุ่มนี้ที่เป็นที่รู้จัก เช่น วิธีซิมเพล็กซ์ การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเทคนิค Branch and Bound เป็นต้น (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561 อ้างอิงจาก Talbi, 2009)

2. วิธีแบบประมาณค่า (Approximate Methods)

เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการหาคาตอบที่ดี (Good) แต่เป็นวิธีที่ไม่สามารถรับประกันคำตอบที่ดีที่สุด แต่สามารถหาคำตอบที่ดีได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพภายในเวลาที่จำกัด เหมาะสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ วิธีการประมาณ (Approximation Algorithms) และวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristic Algorithms) (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561 อ้างอิงจาก Talbi, 2009) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 วิธีการประมาณ (Approximation Algorithms)

วิธีการประมาณเป็นแนวทางเชิงคณิตศาสตร์ที่มุ่งเน้นการหาคำตอบใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดในวงกว้าง (Global Optimum) โดยมุ่งเน้นไปที่การหาขอบเขตที่แย่ที่สุดที่เป็นไปได้ (Tight Worst-case Bound) เพื่อสร้างความเข้าใจในระดับความยากของปัญหา อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้มีข้อจำกัดในเชิงปฏิบัติ เนื่องจากมักเป็นวิธีที่ออกแบบมาเฉพาะเจาะจงกับปัญหาใดปัญหาหนึ่ง

อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้ยังคงเป็นค่าประมาณ ไม่ใช่คำตอบที่แน่นอน ทำให้วิธีการนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติ นอกจากนี้ ในบางกรณีอาจใช้ระยะเวลาในการประมวลผลนานจนไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง แม้ปัญหาดังกล่าวจะมีระดับความซับซ้อนทางเวลาเป็นแบบพหุนาม (Polynomial Time) ก็ตาม (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561 อ้างอิงจาก Talbi, 2009)

2.2 วิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristics Methods)

วิธีฮิวริสติกส์ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมภายในพื้นที่การค้นหา (Solution Search Space) สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีในปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน โดยวิธีการนี้จะมุ่งเน้นการหาคำตอบที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขและทรัพยากรที่มีอยู่ แม้จะไม่มีการการันตีถึงความเหมาะสมของคำตอบที่ได้รับ โดยทั่วไปวิธีฮิวริสติกส์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วิธีฮิวริสติกส์แบบเฉพาะเจาะจง (Specific Heuristics) และ วิธีการเมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561) สรุปได้ดังนี้

2.2.1 วิธีฮิวริสติกส์แบบเฉพาะ (Specific Heuristics)

วิธีการกลุ่มนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะด้าน โดยใช้แนวทางการสร้างคำตอบแบบคอนสตรัคทีฟ กล่าวคือ จะค่อย ๆ สร้างคำตอบทีละส่วนจนกระทั่งได้คำตอบที่สมบูรณ์ ตัวอย่างที่นิยมใช้ ได้แก่ กฎการจัดลำดับงาน (Dispatching Rules) การวางแผนความต้องการวัตถุดิบ (Material Requirement Planning: MRP) วิธีวิถีวิกฤต (Critical Path Method: CPM) และเทคนิคการประเมินและทบทวนแผนงาน (Programme Evaluation and Review Technique: PERT) เป็นต้น (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561)

2.2.2 วิธีการเมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristics)

เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นจากกลุ่มปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และการวิจัยการดำเนินงาน (Operations Research: OR) โดยได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน โดยเฉพาะปัญหาประเภท NP-Hard โดยวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์อาศัยหลักการประมาณค่าเพื่อค้นหาคำตอบที่ดี (Good Solution) ภายในเวลาที่เหมาะสม แม้จะไม่สามารถรับประกันได้ว่าคำตอบนั้นจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่ก็ถือว่าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา เช่น การออกแบบทางวิศวกรรม การจัดการห่วงโซ่อุปทาน และการจัดตารางการผลิต เป็นต้น (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561 อ้างอิงจาก Blum et al., 2011, Blum & Roli, 2003)

วิธีการเมต้าฮิวริสติกส์เป็นแนวทางการหาคำตอบที่ดีสำหรับปัญหาที่ซับซ้อน โดยอาศัยหลักการประมาณค่าและการค้นหาเชิงชาญฉลาด แม้ไม่สามารถรับประกันคำตอบที่ดีที่สุด แต่ก็มีประสิทธิภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา อย่างไรก็ตาม ภายในกลุ่มวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์ยังมีแนวทางที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย นั่นคือ วิธีเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งจำลองกระบวนการที่ใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด มาช่วยให้การค้นหาคำตอบซึ่งมีความยืดหยุ่น สามารถปรับตัวและเพิ่มโอกาสในการได้คำตอบที่มีคุณภาพสูง ภายใต้ข้อจำกัดและทรัพยากรที่มีอยู่ โดยสามารถอธิบายกระบวนการวิธีเชิงวิวัฒนาการ ได้ดังนี้

วิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) เป็นเทคนิคการคำนวณเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมต้าฮิวริสติก (Metaheuristic Optimization) โดยเลียนแบบกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การสืบพันธุ์ การคัดเลือก และการกลายพันธุ์ กระบวนการจะเริ่มต้นจากการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้นขึ้นมา จากนั้นจะทำการประเมินความเหมาะสมของสมาชิกแต่ละตัว และวนซ้ำในขั้นตอนการคัดเลือกบรรพบุรุษ การผสมพันธุ์ (Recombination) การกลายพันธุ์ (Mutation) และการคัดเลือกผู้รอดชีวิตเพื่อเป็นประชากรรุ่นถัดไป จนกว่าจะบรรลุเงื่อนไขการหยุดที่กำหนดไว้ (ณัฐณพัชร์ กวิพรรธน์, 2557)

โดยกระบวนการแรกจะเริ่มต้นจากการสร้างประชากรเริ่มต้นและสุ่มชุดคำตอบที่เป็นไปได้ขึ้นมาจำนวนหนึ่งภายใต้ขอบเขตที่กำหนด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มประชากรรุ่นแรกในการค้นหาคำตอบ หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการประเมินความเหมาะสม (Evaluation) ซึ่งคำตอบแต่ละตัวจะถูกนำไปคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness Value) เพื่อวัดประสิทธิภาพว่าสามารถแก้ไขปัญหาได้ดีเพียงใดเมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ตั้งไว้ เมื่อประเมินเสร็จแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการการคัดเลือกบรรพบุรุษ (Parent Selection) โดยระบบจะเลือกสมาชิกที่มีค่าความเหมาะสมสูงให้มีโอกาสเป็นต้นแบบในการส่งต่อลักษณะเด่นไปยังรุ่นถัดไป จากนั้นจะใช้ ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operators) ซึ่งประกอบด้วย การผสมพันธุ์ (Crossover/Recombination) เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคู่บรรพบุรุษให้เกิดลูกผสมใหม่และการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยการสุ่มเปลี่ยนแปลงค่าบางส่วนเพื่อรักษาความหลากหลายทางพันธุกรรมและป้องกันไม่ให้คำตอบติดอยู่ที่จุดเหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) และสุดท้ายจะเป็นขั้นตอนการคัดเลือกผู้รอดชีวิต (Survivor Selection) เพื่อคัดเลือกเอาสมาชิกที่แข็งแกร่งที่สุดจากทั้งรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกมาจัดตั้งเป็นประชากรรุ่นใหม่ โดยกระบวนการทั้งหมดนี้จะวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งผลลัพธ์เกิดการลู่เข้า (Convergence) หรือบรรลุเงื่อนไขการหยุดที่กำหนดไว้ เช่น การไม่พบการพัฒนาของคำตอบที่ดีขึ้นในช่วงเวลาที่กำหนด (Maximum Time without Improvement) (ณัฐณพัชร์ กวิพรรธน์, 2557)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เป็นวิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอยู่ในกลุ่มของวิธีการแม่นตรง (Exact Method) เป็นวิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการใช้หรือจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้บรรลุถึงสมการความต้องการสุดท้ายที่วางไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสมการความต้องการสุดท้ายและสมการข้อจำกัดที่เกี่ยวกับการใช้งาน อาทิเช่น วัตถุดิบ ทรัพย์สิน เครื่องจักร กำลังคน เป็นต้น เป็นฟังก์ชั่นเชิงเส้นที่กำหนดในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชั่น โดยในการสร้างสมการจะต้องรวบรวมรายละเอียดทั้งหมดที่มีอยู่กำหนดปัญหาที่เกิดขึ้นให้ชัดเจน แล้วกำหนดสัญลักษณ์ไม่ทราบค่าหรือตัวแปรที่ต้องการทราบค่าความสัมพันธ์ (ทิวากร ทวีทรัพย์, 2561)

องค์ประกอบโดยทั่วไปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ทิวากร ทวีทรัพย์, 2561 อ้างอิงจาก วรรณสิริ พันธ์อุไร, ม.ป.พ) ประกอบด้วย

1. ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) เป็นตัวแปรที่ผู้ตัดสินใจเลือกได้ว่าจะให้มีค่าเท่าใด ค่าของตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวกำหนดต่อไป (ไม่ว่าทางตรงหรือทางอ้อม) ถึงผลลัพธ์ที่จะได้ เช่น จำนวนการผลิต ต้นทุน รายได้ ระยะทาง และเวลา เป็นต้น
2. ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่ต้องการให้ได้ค่าที่ดีที่สุดไม่ว่าจะเป็นค่าสูงสุด (Maximum) หรือค่าต่ำสุด (Minimum)
3. ข้อจำกัดหรือเงื่อนไข (Constraints) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ต้องทำตาม อาจเป็นเงื่อนไขด้านกายภาพ ด้านการเงิน ด้านการผลิต เงื่อนไขทางตรรกะ หรือเงื่อนไขด้านอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา ในการค้นหาค่าของตัวแปรตัดสินใจที่ทำให้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์มีค่าที่ดีที่สุดค่าที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับทั้งหมด จึงจะเป็นค่าตัวแปรตัดสินใจนั้นได้

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปมีขั้นตอนในการสร้างดังต่อไปนี้

1. กำหนดสัญลักษณ์ตัวไม่ทราบค่า หรือตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables)
2. สร้างสมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการทราบ กำหนดได้จากความต้องการสุดท้ายในการหาค่าสูงสุด (Maximum) หรือค่าต่ำสุด (Minimum)
3. เขียนสมการเงื่อนไขข้อจำกัด (Constraints) เนื่องจากรายละเอียดที่มีอยู่นั้นจะมีทางเลือกปฏิบัติได้หลายทาง ซึ่งประกอบด้วยทรัพยากรที่มีจำกัด เช่น วัตถุดิบมีจำกัด จำนวนชั่วโมงการทำงานมีจำกัด หรือแรงงานที่มีจำกัด เป็นต้น ต้องรวบรวมดูว่าปัญหาที่เกิดขึ้นมีข้อจำกัดอย่างไรบ้าง และนำข้อจำกัดนี้มาสร้างในรูปแบบสมการเส้นตรงหรืออสมการแบบเส้นตรง

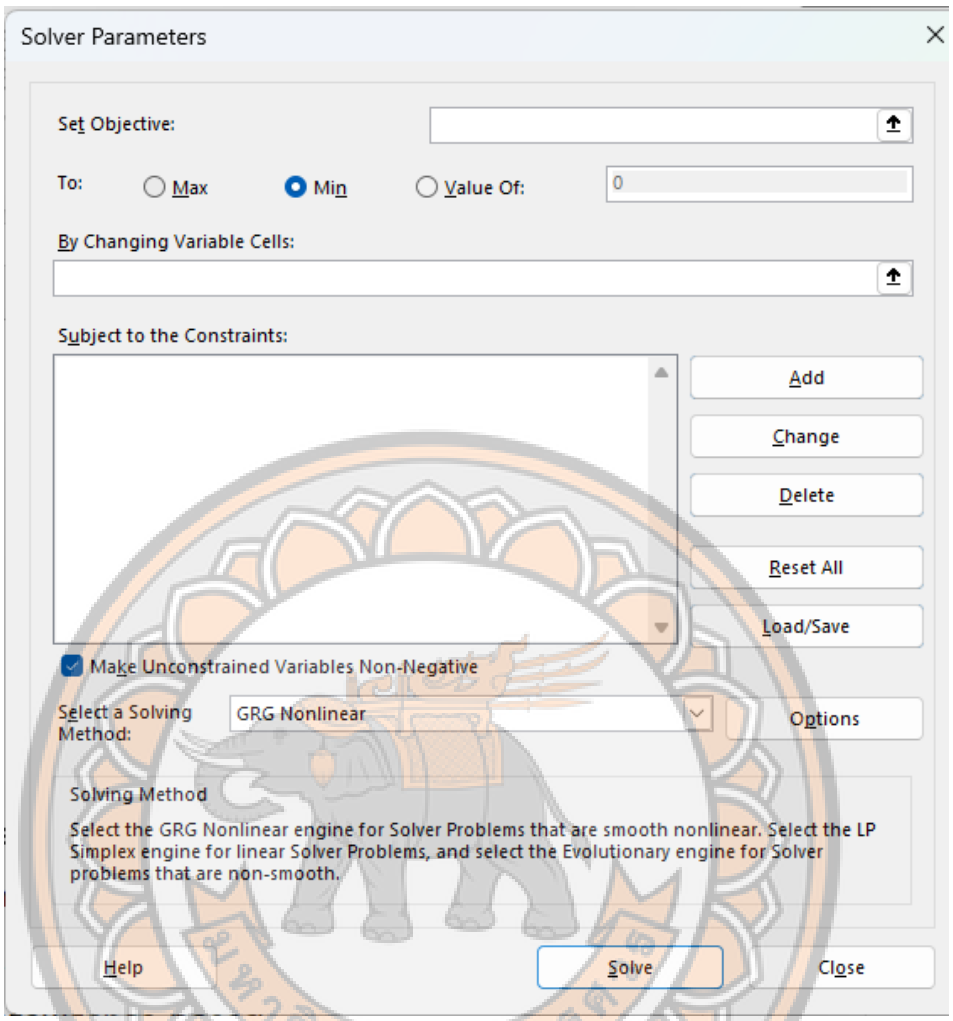
4. แก้สมการหรืออสมการที่สร้างขึ้นโดยค่าของตัวแปรทุกตัวจะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดทุกข้อ เมื่อนำค่าที่หาได้ไปแทนที่สมการหรืออสมการ แล้วทำให้สมการหรืออสมการนั้นเป็นจริง ด้วยวิธีการเขียนกราฟสำหรับปัญหาขนาดเล็ก หรือใช้คอมพิวเตอร์สำหรับปัญหาขนาดกลางไปถึงขนาดใหญ่ (ทิวากร ทวีทรัพย์, 2561)

ขั้นตอนการตั้งค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการประยุกต์ใช้ Microsoft Excel Solver เพื่อแก้ปัญหาการหาระยะทางสั้นที่สุด ขั้นตอนแรกคือการกำหนด Objective Cell หรือเซลเป้าหมาย ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแทนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยในกรณีนี้เซลเป้าหมายจะคำนวณผลรวมของระยะทางทั้งหมดที่รถเก็บขยะต้องวิ่งผ่านเส้นทางที่เลือกไว้ ข้อมูลระยะทางระหว่างจุดต่าง ๆ จะถูกบันทึกในตาราง และใช้สูตรรวมค่าเพื่อสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้น Solver จะถูกตั้งค่า Minimize ค่าในเซลนี้ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้คือระยะทางรวมที่สั้นที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ต่อมาเป็นการกำหนด Variable Cells หรือเซลตัวแปร ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables) ในแบบจำลอง โดยตัวแปรเหล่านี้อาจแทนการเลือกเส้นทาง เช่น การกำหนดว่ารถจะวิ่งจากจุด 1 ไป 2 หรือจาก 2 ไป 3 หรือแทนการตัดสินใจว่าจะใช้เส้นทางใดบ้างในการคำนวณระยะทางรวม Solver จะทำการปรับค่าของตัวแปรเหล่านี้โดยอัตโนมัติ เพื่อหาคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด

ขั้นตอนถัดไปคือการกำหนด Constraints หรือข้อจำกัด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำให้แบบจำลอง เช่น การกำหนดให้รถเก็บขยะต้องเข้าถึงทุกจุดที่กำหนดไว้และเส้นทางที่เลือกต้องไม่ซ้ำกัน ข้อจำกัดเหล่านี้จะถูกเพิ่มเข้าไปใน Solver ผ่านการคลิกปุ่ม Add และระบุเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น การบังคับให้ค่าตัวแปรต้องเป็นจำนวนเต็ม (Integer) หรือไม่ซ้ำกัน (AllDifferent) เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้จริงในเชิงปฏิบัติ

เมื่อได้กำหนด Objective Cell Variable Cells และ Constraints ครบถ้วนแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือการเลือก Solving Method ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์การหาระยะทางสั้นที่สุด ซึ่งมักเป็นปัญหาเชิงเส้น (Linear Programming) สามารถเลือกวิธี Simplex LP ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะกับการแก้โจทย์เชิงเส้นที่มีข้อจำกัดชัดเจน หากโจทย์มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น มีเงื่อนไขไม่เชิงเส้น ให้เลือก GRG Nonlinear หรือ Evolutionary แทน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Evolutionary ที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและนำไปปรับใช้กับสภาพพื้นที่ โดยแสดงหน้าต่างการตั้งค่า Solver Parameters ดังภาพ 4



ภาพ 4 การตั้งค่า Parameters แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

การค้นหาคำตอบด้วยการใช้ Microsoft Excel Solver

การค้นหาคำตอบด้วยการใช้ Microsoft Excel Solver เป็นการแก้ปัญหาที่มุ่งหาผลลัพธ์เชิงเหมาะสมที่สุดเป็นหัวใจสำคัญของการวิเคราะห์เชิงปฏิบัติและการวิจัยเชิงวิชาการ เนื่องจากลักษณะของแบบจำลองและข้อจำกัดที่กำหนด มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ เครื่องมือ Solver ใน Microsoft Excel จึงได้พัฒนาวิธีการแก้ปัญหาหลักไว้ 3 แนวทาง เพื่อรองรับความหลากหลายของปัญหาที่เกิดขึ้น ทั้งในเชิงเส้น ไม่เชิงเส้น และปัญหาที่ซับซ้อนหรือไม่ต่อเนื่อง โดยแต่ละวิธีมีคุณลักษณะเฉพาะที่ตอบสนองต่อรูปแบบของปัญหาแตกต่าง โดย พิศาล สีนวล (2559) ได้สรุปวิธีการแก้ปัญหาด้วย Solver ไว้ดังนี้

วิธีการแก้ปัญหาด้วย Solver สามารถแบ่งออกเป็น 3 แนวทางหลัก ได้แก่

1. วิธี Simplex LP สำหรับปัญหาเชิงเส้น (Linear Programming) รวมถึงกรณีที่ตัวแปรการตัดสินใจต้องเป็นจำนวนเต็มหรือเลขไบนารี

2. วิธี GRG Nonlinear สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น เหมาะสำหรับแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป

3. วิธี Evolutionary ใช้สำหรับปัญหาที่ซับซ้อนหรือไม่ต่อเนื่อง ซึ่งต้องการผลลัพธ์ที่ดีใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุดแม้ไม่สามารถหาคำตอบเชิงทฤษฎีที่แน่นอนได้

การเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วย Solver ไม่ว่าจะเป็น Simplex LP, GRG Nonlinear หรือ Evolutionary ล้วนมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการหาผลลัพธ์เชิงเหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพและคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการเลือกวิธีการเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการคำนวณและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ดังนั้น ขั้นตอนการตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameters) เพื่อควบคุมประสิทธิภาพและคุณภาพของผลลัพธ์จึงมีความสำคัญ และสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนสำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameters) เพื่อควบคุมประสิทธิภาพและคุณภาพของผลลัพธ์ (Frontline Systems, 2569) แสดงดังภาพ 5 มีดังนี้

1. Convergence (การลู่เข้า) ใช้กำหนดเกณฑ์ร้อยละของความแตกต่างในค่าเป้าหมายระหว่างประชากรส่วนใหญ่ หากความแตกต่างต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด Solver จะหยุดทำงานและรายงานว่าได้คำตอบที่ลู่เข้าแล้ว ค่าที่เล็กลงช่วยให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแต่ต้องใช้เวลามากขึ้น

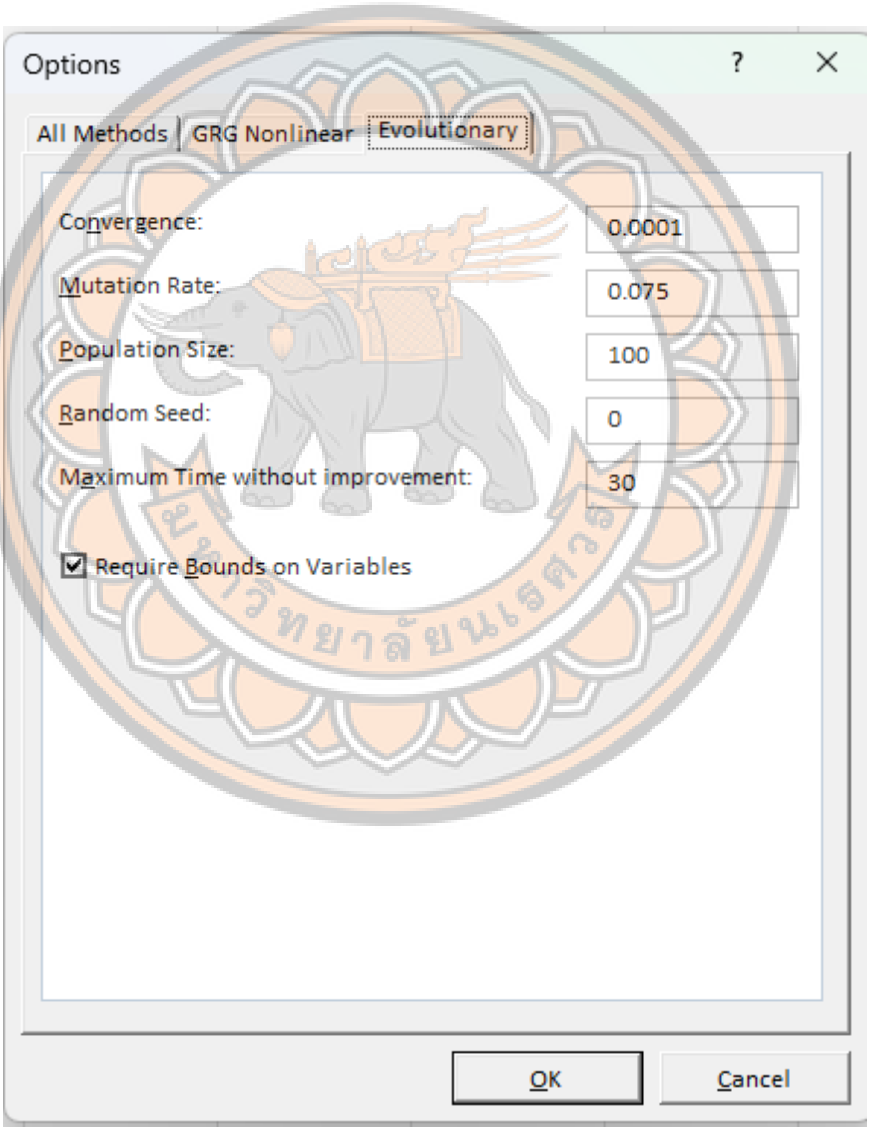
2. Mutation Rate (อัตราการกลายพันธุ์) เป็นค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ที่กำหนดความถี่ในการปรับเปลี่ยนสมาชิกบางส่วนของประชากรเพื่อสร้างคำตอบใหม่ อัตราที่สูงช่วยเพิ่มความหลากหลายและโอกาสในการค้นหาคำตอบที่ดีกว่า แต่ก็อาจทำให้เวลาในการหาคำตอบเพิ่มขึ้น

3. Population Size (ขนาดประชากร) กำหนดจำนวนสมาชิกในประชากรที่ Solver จะรักษาไว้ในแต่ละรอบการคำนวณ หากระบุค่าน้อยกว่า 10 หรือปล่อยว่าง Solver จะใช้ค่าเริ่มต้น คือ 10 เท่าของจำนวนตัวแปรตัดสินใจ แต่ไม่เกิน 200 ขนาดประชากรที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความครอบคลุมในการค้นหา แต่ก็ใช้ทรัพยากรมากขึ้น

4. Random Seed (ค่าตัวเลขสุ่มตั้งต้น) เป็นจำนวนเต็มบวกที่ใช้ควบคุมการสุ่มหากกำหนดค่าไว้ Solver จะให้ผลลัพธ์ที่สามารถทำซ้ำได้ทุกครั้ง แต่หากปล่อยว่างผลลัพธ์อาจแตกต่างกันไปในแต่ละครั้ง ซึ่งอาจนำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าหรือแย่กว่า

5. Maximum Time without Improvement (เวลาสูงสุดที่ไม่มีการปรับปรุง) กำหนดเวลาสูงสุดที่ Solver จะดำเนินการต่อไปโดยไม่มีการปรับปรุงที่มีนัยสำคัญในค่าเป้าหมาย หากเกินเวลาที่กำหนด Solver จะหยุดทำงานและรายงานว่าไม่สามารถปรับปรุงคำตอบได้

6. Require Bounds on Variables (การกำหนดขอบเขตของตัวแปร) หากเลือกตัวเลือกนี้ Solver จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีการกำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด การกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนจะช่วยให้วิธีเชิงวิวัฒนาการมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อขอบเขตแคบลง



ภาพ 5 การตั้งค่าพารามิเตอร์

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

การตรวจสอบ (Verification) และการยืนยันความถูกต้อง (Validation)

การตรวจสอบ (Verification)

การตรวจสอบ เป็นกระบวนการในการตรวจสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของการดำเนินการเพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาด และเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นควบคู่ไปกับการดำเนินการหรือดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ตลอดเวลา เพื่อเป็นการตรวจทานหรือเป็นการยืนยันให้มั่นใจว่าสิ่งที่ได้ดำเนินการไปนั้น มีความถูกต้องและเหมาะสม (ณรุทธ์ สุทธจิตต์, 2560)

ในการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำเป็นต้องดำเนินการเพื่อยืนยันความถูกต้องของโครงสร้างที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะ โดยมีเป้าหมายให้ผลลัพธ์ที่ได้สามารถสะท้อนสภาพการปฏิบัติจริงและมีความน่าเชื่อถือสำหรับการนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติ ทั้งนี้การตรวจสอบยังเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น มีความถูกต้องตามหลักการทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดไว้ เช่น การตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ ตรวจสอบว่า Objective Function และ Constraints ถูกต้องตามโจทย์ VRP หรือไม่ การตรวจสอบข้อมูลนำเข้า คือ ตรวจสอบข้อมูลจุดเก็บขยะ ปริมาณขยะ ระยะทางในเมตริกซ์ และการตรวจการตั้งค่าการทำงาน Solver คือการกำหนดพารามิเตอร์ใน Microsoft Excel Solver ให้สอดคล้องกับโจทย์ที่ต้องการแก้ไขหรือไม่เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาด

การยืนยันความถูกต้อง (Validation)

การยืนยันความถูกต้อง เป็นการตรวจข้อมูลให้เป็นไปตามเกณฑ์ของวัตถุประสงค์ โดยเป็นข้อมูลตรงตามที่ต้องการและขั้นตอนการยืนยันความถูกต้อง ต้องระบุรายละเอียดชัดเจน มีดังนี้

1. การอ่านและทำความเข้าใจข้อกำหนดหรือระเบียบการในส่วนของตัวแปร และข้อมูลที่พึงประสงค์ตามเกณฑ์ก่อนที่จะจัดการทำโครงสร้างฐานข้อมูล

2. การตรวจดูโครงสร้างของข้อมูลว่าเป็นตัวเลขหรือเป็นอักขระ ถ้าเป็นตัวเลขจะจัดเก็บตัวเลขกี่ทศนิยม ถ้าเป็นอักขระจัดช่องไฟและขนาดของตัวอักขระ โดยเฉพาะอักษรในภาษาอังกฤษต้องมีการจัดการอักษรตัวเขียนใหญ่กับอักษรตัวเขียนเล็ก ทั้งนี้เป็นการช่วยในเรื่องของการจัดรูปแบบก่อนที่จะบันทึกเข้าไปในฐานข้อมูล เพื่อลดปัญหาเมื่อมีการเรียกข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ (จรรยา ภัทรอาชาชัย, 2548)

สำหรับการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นขั้นตอนที่ประเมินว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพกว่าเส้นทางเดิม ขั้นตอนนี้เริ่มจากการเตรียมข้อมูล นำเส้นทางเดิมใช้เป็นฐานเปรียบเทียบ ทั้งระยะทางรวม เวลาการทำงานและปริมาณขยะที่จัดเก็บ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ Solver คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิม

เพื่อวิเคราะห์ว่ามีการลดลงของระยะทางและเวลามากน้อยเพียงใด เช่น รถคันที่ 1 ลดระยะทางได้ถึงร้อยละ 25.85 ในช่วงเช้า ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ดีกว่าเส้นทางเดิม

การทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรม บทความ หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้างานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งและการเก็บขยะมีความหลากหลายทั้งในด้านบริบท ปัญหาที่ศึกษา และเครื่องมือที่ใช้ ตั้งแต่วิธีการเชิงคณิตศาสตร์ เช่น Linear Programming และ Mixed Integer Linear Programming ไปจนถึงวิธีการเชิงอัลกอริทึมแบบฮิวริสติกส์และเมต้าฮิวริสติกส์ เช่น Ant Colony Optimization Tabu Search และ Genetic Algorithm เป็นต้น

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
Liu et al. (2026)	ใช้ทรัพยากรไม่เต็มที่ในระบบขนส่งแบบเดิมและขาดการเชื่อมโยงข้อมูล	- Integer Programming - Generation Algorithm - CPLEX
Zhang et al. (2026)	การจัดเส้นทางรถเก็บขยะภายใต้ความไม่แน่นอน ของปริมาณขยะ	- Fuzzy Programming - ALNS-TS
Meraliyev et al. (2025)	เส้นทางที่วางแผนไว้ไม่สามารถใช้ได้จริง ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น การส่งล่าช้า ความพึงพอใจของลูกค้าลดลง จำเป็นต้องพัฒนาแนวทางใหม่	- Metaheuristic Methods - Learning Methods - Adaptive Routing - Algorithms - Predictive Modeling
Zhou et al. (2025)	ระบบโลจิสติกส์แบบดั้งเดิมต้องใช้รถหลายประเภทก่อให้เกิดต้นทุนสูง มีข้อจำกัดด้านเวลาและความจุที่เปลี่ยนแปลงแบบคาดเดาไม่ได้	- Mixed Integer Linear rogramming - Tabu Search Algorithm
Leerojanaprapa et al. (2024)	เส้นทางเดิมของรถเก็บขยะยังไม่เหมาะสม ทำให้สิ้นเปลืองระยะทางและเวลาในการปฏิบัติงาน	- Linear Programming Method - Nearest Neighbor Algorithm - Saving Algorithm - Evolutionary Algorithm

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
Tanoumand et al. (2024)	ขาดการวางแผนเส้นทางและการจัดการทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด	- Heuristic method
Allahyari et al. (2021)	ขาดการวางแผนเส้นทางและการจัดการ ซึ่งดำเนินการตามประสบการณ์ของแต่ละบุคคล	- Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)
Duan et al. (2021)	หาวิธีวางแผนเส้นทางเรือเก็บขยะทะเลที่ตำแหน่งไม่คงที่ โดยต้องคำนึงถึงข้อจำกัดด้านเวลา ความจุเรือ และเชื้อเพลิง เพื่อให้ต้นทุนการปฏิบัติการต่ำที่สุด	- Adaptive Large-Scale Neighborhood Search (ALNS) - Wolf Pack Algorithm (WPA)
Ghiani et al. (2021)	หลุมฝังกลบอยู่ไกล ต้องถ่ายโอนขยะมูลฝอยจากรถเก็บขยะขนาดเล็กไปยังรถขนาดใหญ่ จึงต้องมีการกำหนดเส้นทางเก็บขยะและขนส่งขยะ	- Heuristic Method - Metaheuristic method
Wullapa Wongsinlatam and Ayuwat Thanasate-angkool (2020)	ขาดการวางแผนเส้นทางการเดินรถ ทำให้ต้นทุนในการเดินรถจัดเก็บขยะสูง	- Cuckoo Search Algorithm (CS)
Kyriakidis et al. (2020)	ค่าใช้จ่ายในการส่งสินค้าสูง	- Dynamic Programming - Equations
Lou et al. (2020)	ขาดการวางแผนเส้นทางที่เหมาะสม ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	- Graphical Model - Revised Traveling Salesman Problem (RTSP) - Nearest Neighbor Clustering

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
Sakthivel Madankumar and Chandrasekharan Rajendran (2019)	การจัดเส้นทางการขนส่งขาดประสิทธิภาพ ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งสูง	- Mixed Integer Linear Programming (MILP)
Taptajani et al. (2019)	ขาดประสิทธิภาพในการกำหนดเส้นทาง จากกจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย	- Saving Matrix Method
Abdelwali et al. (2019)	การจัดเส้นทางการขนส่งขาดประสิทธิภาพ ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งสูง	- Mathematical Model
Anagnostopoulou et al. (2017)	การหาวิธีออกแบบเส้นทางเก็บขยะที่มีข้อจำกัดหลายด้าน เพื่อให้ได้เส้นทางที่ลดระยะทางรวม ลดการใช้พลังงาน และลดการปล่อยมลพิษ	- Sequential Insertion Algorithm - Tabu Search Algorithm
Mariagrazia Dotoli and Nicola Epicoco (2017)	การหาวิธีวางแผนเส้นทางและตารางเวลาสำหรับการเก็บกากของเสียอันตรายที่มีข้อจำกัดหลายด้าน เพื่อให้ได้เส้นทางที่ลดต้นทุน	- Hazardous Waste Collection Vehicle Routing Problem With Multiple Time WiMetaheuristic Solution Approachndows
Mohammed et al. (2017)	ใช้ระยะเวลามากเกินความจำเป็น และสิ้นเปลืองต้นทุนการขนส่ง	- Genetic Algorithm
Kanza Belachgar (2017)	การกำหนดเส้นทางจากลูกค้าที่มีความต้องการแตกต่างกัน	- MATLAB

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
กุสุมา พิริยาพรรณ และ อภิญญา พงษ์ปรีชา (2568)	ใช้ระยะเวลามากเกินความจำเป็นและสิ้นเปลืองต้นทุนการขนส่ง	- Large Neighborhood Search
ขวัญข้าว สามารถกุล และคณะ (2568)	ต้นทุนการขนส่งสูงและขาดประสิทธิภาพ	- Saving Algorithm - Nearest Neighbor Method
นริสรา นาคะเมฆ และคณะ (2568)	ความล่าช้าในการส่งพัสดุและปริมาณพัสดุส่งไม่ทันตามกำหนด	- VRP Spreadsheet Solver
ปณิตา โสหา และคณะ (2568)	ต้นทุนค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายเกินความจำเป็น	- Heuristic Method - Saving Algorithm
สหฤทธิ์ สมีน้อย และคณะ (2568)	ระบบการขนส่งขยะของหน่วยงานยังไม่มีประสิทธิภาพ และพนักงานตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งขยะโดยอาศัยประสบการณ์	- Clarke-Wright Savings Algorithm Modified CW
สุภาพร คำเตจา และคณะ (2568)	เส้นทางเดิมขาดประสิทธิภาพการขนส่ง ใช้เวลานาน	- Fruit Fly Optimization Algorithm - 2-Opt - 3-Opt - Saving Method
กลวัชร จารุพัฒน์ (2567)	มีต้นทุนการขนส่งสูง ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ยานพาหนะและการบรรทุกสินค้าได้เต็มที่	- Sweep Heuristic - Nearest Neighbor Heuristic - Clarke-Wright Savings Heuristi

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
ณัฏฐ์พัชร์ วณิชย์กุล และ กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ (2567)	เส้นทางขนส่งน้ำดื่มไม่มีประสิทธิภาพ ใช้ความคุ้นเคยแทนการวางแผน	- Saving Algorithm - Nearest Neighbor Algorithm
ศักดิ์ดา คำจันทร์ และคณะ (2567)	ค่าใช้จ่ายการขนส่งสูง และเส้นทางซ้ำซ้อน	- Nearest Neighbor - Sweep Algorithm - Saving Algorithm - Tabu Search
ฉนิมนันท์ กล้วยไม้ (2566)	ใช้เวลานานในการจัดเก็บขยะและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	- Saving Algorithm
สุบัน อุดอนมีไช และ ไพโรจน์ เร้าธนชลกุล (2565)	ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าแรงสูง บางครั้งไม่สามารถ เก็บขยะได้ครบทุกจุดตามแผนที่วางไว้	- Saving Method - Nearest Neighbour - Max-Nearest Neighbour - Sweep Method
สุรัญญา สบู่หอม และคณะ (2564)	ปัญหาค่าใช้จ่ายสูงในการเดินรถ เนื่องจากไม่มีการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีเหมาะสมก่อให้เกิดต้นทุนศูนย์เปล่า	- Nearest Neighbor Algorithm
เกศินี สือนิ (2563)	ขาดการวางแผนการจัดส่งสินค้า ทำให้เกิดการจัดส่งสินค้าที่ล่าช้า	- Saving Algorithm - Nearest Neighbor Algorithm

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
ขวัญชัย ชัยอุดม และ ธีรภัทร ขำศรี (2563)	เส้นทางเก็บขยะไม่มีประสิทธิภาพ ใช้การตัดสินใจของพนักงาน	- GIS - Best Routes Analysis
คลอเคลีย วจนะวิชากร และ กนกกาญจน์ ศรีสุรินทร์ (2563)	การจัดเส้นทางการขนส่งขาดประสิทธิภาพ ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งและรอบเวลาการเดินรถสูง	- Saving Algorithm
นันทวัฒน์ ธรรมสอน และ วรินทร์ วงษ์มณี (2563)	ต้นทุนค่าขนส่งสินค้าสูง เนื่องมาจากข้อจำกัดด้านเวลาของค่าสั่งซื้อและการรับสินค้าของลูกค้า	- Saving Algorithm
พรรัตน์ ธำรงวุฒิ และคณะ (2563)	เส้นทางการเดินรถที่มีค่าใช้จ่ายสูง	- Differential Evolution (DE) - LINGO
รัตนาพร บุญครอบ และ ชุลีกร ชูโชติถาวร (2563)	การจัดเส้นทางการขนส่ง มีค่าใช้จ่าย ในการขนส่งสูงเกินความจำเป็น ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการจัดส่งสินค้า	- Mathematical Model
วิภาวรรณ ด่านกาเนิด และ จิราวรรณ เนียมสกลุ (2563)	การขนส่งแต่ละครั้งไม่เต็มความจุบรรทุกของยานพาหนะ เกิดต้นทุนทางแรงงานที่ไม่จำเป็นและการขนส่งไม่ตรงตามเวลาที่กำหนด	- Mathematical Model
ศิรดา หัสนันท์ และคณะ (2563)	ขาดการวางแผนเส้นทางและตารางเวลาการขนส่งที่ชัดเจน อาศัยทักษะความเชี่ยวชาญที่เกิดจากประสบการณ์ของพนักงานเป็นหลัก	- Saving Algorithm - Traveling Salesman Problem (TSP)

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
ศิวพร สุกสี และ ธาริณี มีเจริญ (2562)	ต้นทุนเชื้อเพลิงสูงและปริมาณการขนส่ง ไม่แน่นอน จากการใช้เส้นทางการขนส่งแบบเดิม ทำให้บริษัทมีค่าใช้จ่ายรวมสูงและขาดประสิทธิภาพในการแข่งขัน	- Nearest Neighbor Heuristi - Saving Algorithm
อกนิษฐ์ สันธินาค และ ศิรวดี อรัญนารถ (2562)	ไม่สามารถส่งสินค้าได้ครบด้วยรถบรรทุกเพียงคันเดียว จึงต้องมีการจัดการรถขนส่งมากกว่าหนึ่งคัน	- Metaheuristic Method
น้ำฝน พาพันธ์ และ ภัทรานัษฐ์ แก้วประดิษฐ (2562)	การจัดเส้นทางแบบเดิมมีการขนส่งไม่เต็มคันรถ และใช้ประสบการณ์ของพนักงานเป็นหลักในการตัดสินใจ จึงทำให้ไม่มีประสิทธิภาพในการขนส่ง	- Saving Algorithm
ธนโชติ นาชัยพูล และ สุภาวดี สายสนิท (2562)	ขาดการวางแผนการขนส่งสินค้าที่เหมาะสม ทำให้พนักงานเดินรถขนส่งสินค้าต้องอาศัยประสบณ์การเป็นหลัก	- Mathematical Model
น้ำหวาน พลาก้านตง และ สมบัติ สินธุเชาวน์ (2561)	การจัดเส้นทางการขนส่งขาดประสิทธิภาพ ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งสูง	- Heuristics Method
วนัชพร จันทรักษา และ สรรวิทย์ เชื้อพิสุทธิ์กุล (2561)	ลูกค้ามีความต้องการปริมาณที่แตกต่างกัน จึงสร้างความยุ่งยากให้กับผู้ประกอบการที่ต้องจัดเตรียมตารางการขนส่ง	- Saving Algorithm
ปัญญวัฒน์ จันทร์ชัยภักดิ์ (2561)	การขนส่งในแต่ละเที่ยวมีต้นทุนสูง และใช้ระยะเวลาในการขนส่งมาก	- Metaheuristic Method

ตาราง 3 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ปัญหา	เครื่องมือวิจัย
นวรรณ สืบสายลา (2561)	ขาดประสิทธิภาพในการกำหนดเส้นทางส่งสินค้า ส่งผลให้เกิดต้นทุนการขนส่งที่สูง	- Mathematical Model
ภคพร ผงทอง (2561)	ไม่ทราบจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง และจำนวนสินค้าที่ขนส่งในแต่ละคัน	- Saving Algorithm
วรพนธ์ ชีววรนนท์ตรี และ ณัฐพล บุญรักษ์ (2561)	ไม่มีการพิจารณาเส้นทางที่เป็นมาตรฐาน ทำให้การจัดเส้นทางการขนส่งขาดประสิทธิภาพ	- Heuristic Method
ปุณยภา สุทธิจำนงค์ และ สุนาริน จันทะ (2560)	ปัญหาการจัดเส้นทางการอพยพผู้ประสบภัยออกจากพื้นที่เสี่ยงภัย ไปยังสถานที่ปลอดภัย เนื่องจากระดับน้ำที่ท่วมสูง	- Mathematical Model
ณัตพร ไชยเสนา (2560)	ขาดการจัดสรรเส้นทางการเดินรถ อาศัยเพียงความคุ้นเคยของพนักงาน และไม่ได้คำนึงถึงระยะทาง จำนวนสินค้าในแต่ละเที่ยว	- Metaheuristic Method
เพชรายุทธ แซ่หลี และคณะ (2560)	ขาดการวางแผนการจัดส่งที่เหมาะสม ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนส่งมากเกินความจำเป็น	- Mathematical Model
พลอยไพลิน ภูมิโคกรักษ์ (2560)	การจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าที่ไม่เหมาะสม และมีค่าใช่จ่ายจำนวนมาก	- Visual Basic for Application (VBA)
นฤมล ไชยโคตร และคณะ (2560)	การจัดเส้นทางการขนส่งขาดประสิทธิภาพ อาศัยการตัดสินใจและประสบการณ์ของพนักงานขับรถที่ทำงานมาเป็นเวลานาน	- Heuristic Method

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัญหาหลักของการจัดเส้นทางการขนส่งมักเกิดจากการวางแผนเส้นทางที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ใช้เวลาเกินความจำเป็น และจัดการทรัพยากรได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อมีข้อจำกัดด้านเวลา ความจุของรถ และความไม่แน่นอนของความต้องการลูกค้า นักวิจัยจึงพัฒนาแนวทางแก้ไขที่หลากหลาย ตั้งแต่วิธีการแม่นตรง (Exact Methods) เช่น Linear Programming และ Mixed Integer Linear Programming (MILP) ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองที่แม่นยำในการลดต้นทุนและระยะทาง วิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristics) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาได้รวดเร็วและเหมาะสมกับการใช้งานจริง เช่น Saving Algorithm, Nearest Neighbor และ Sweep Method และวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์ เช่น Genetic Algorithm, Tabu Search และ Ant Colony Optimization ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุดในปัญหาที่ซับซ้อนและมีข้อจำกัด

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ กรณีศึกษาเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี โดยมีเป้าหมายเพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมผ่านการประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) ด้วยฟังก์ชัน Evolutionary ใน Microsoft Excel Solver ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบแบบประมาณค่า โดยสุ่มคำตอบจากพื้นที่ค้นหาแล้วใช้ฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ประเมินและคัดเลือกคำตอบที่ดีกว่าในแต่ละรอบ เพื่อสร้างประชากรรุ่นใหม่ผ่านกระบวนการสืบพันธุ์ การกลายพันธุ์ และการแลกเปลี่ยนองค์ประกอบในโครโมโซม กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือจนถึงเงื่อนไขการหยุดที่กำหนดไว้

บทที่ 3

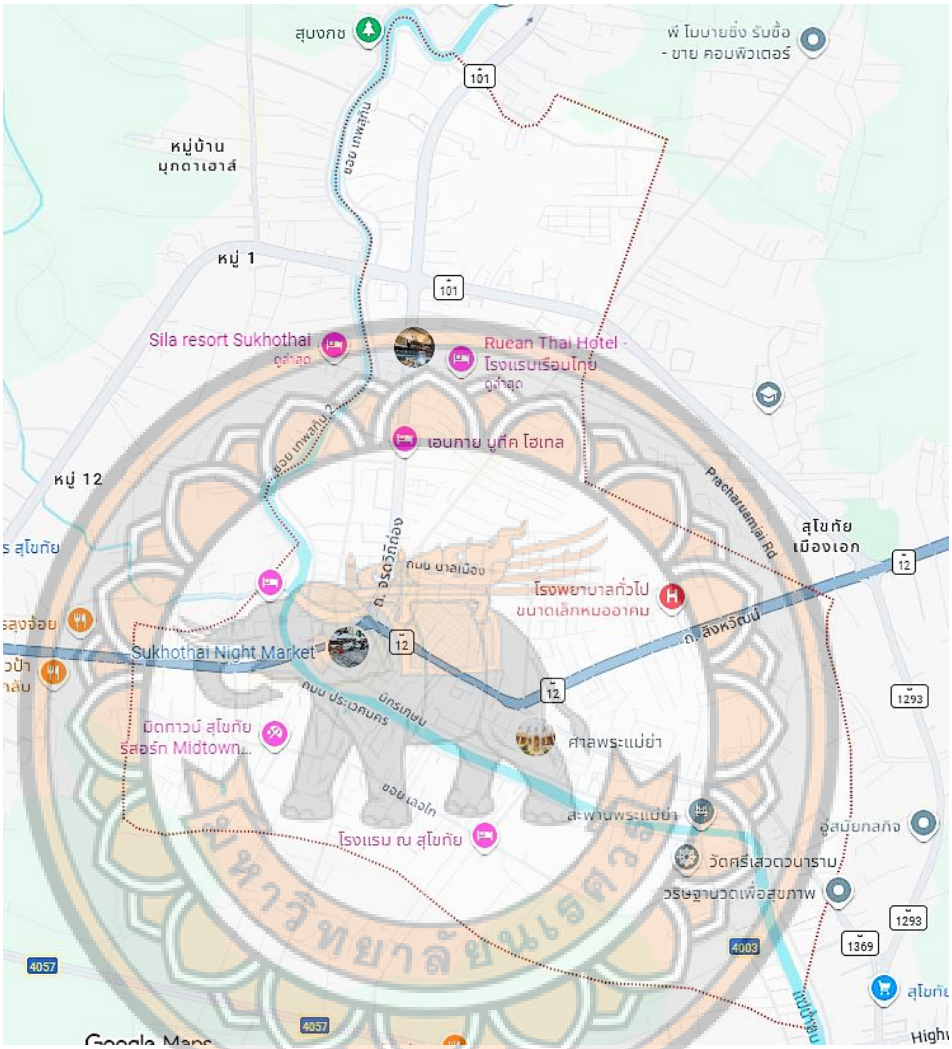
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะและเสนอแนะเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะ ประกอบด้วยข้อมูลพื้นที่ศึกษา เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และการเรียกใช้ Microsoft Excel Solver สามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อมูลพื้นที่ศึกษา

1. ที่ตั้ง

เทศบาลเมืองสุโขทัยธานีตั้งอยู่ในเขตตำบลธานี อำเภอเมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย มีพื้นที่ 3.5 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 2,187.50 อาณาเขตทิศเหนือติดต่อกับ อบต.ปากแคว ทิศใต้ติดต่อกับ อบต.ยางซ้าย ทิศตะวันออกติดต่อกับ อบต.บ้านหมุม และทิศตะวันตกติดต่อกับเทศบาลตำบลบ้านกล้วย มีจำนวนครัวเรือนทั้งหมด 7,206 ครัวเรือน และความหนาแน่นเฉลี่ย 3,825 คน/ตร.กม. (เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี, ข้อมูล ณ วันที่ 30 เมษายน 2569)



ภาพ 6 แผนที่อาณาเขตเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

2. ลักษณะภูมิประเทศ

เทศบาลเมืองสุโขทัยธานีมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม มีแม่น้ำยมไหลผ่านกลางเมืองจากทิศเหนือลงสู่ทิศใต้ สามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองฝั่ง ได้แก่ ฝั่งตะวันออกของแม่น้ำ ส่วนใหญ่เป็นสถานที่ตั้งของส่วนราชการ สถานศึกษา ย่านธุรกิจ และที่อยู่อาศัยของประชาชน พื้นที่ฝั่งตะวันตกของแม่น้ำส่วนใหญ่เป็นย่านที่อยู่อาศัยของประชาชนและย่านธุรกิจตามแนวยาวของถนน (เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี, ข้อมูล ณ วันที่ 24 มกราคม 2565)

3. การคมนาคม

การจัดการคมนาคมขนส่งการจราจรภายในเขตเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี ปัจจุบันค่อนข้างหนาแน่น โดยเฉพาะในช่วงเช้าและช่วงบ่ายถึงเย็น บริเวณหน้าสถานศึกษาและบริเวณศูนย์กลางพาณิชยกรรม กลางเมืองมีถนนสายหลักที่ใช้สำหรับการจราจรภายในเมือง และเชื่อมต่อกับอำเภอ ได้แก่ ถนนสิงหวัฒน์ ถนนจรดวิถีถ่อง และถนนสายรองเชื่อมต่อกับถนนสายหลัก จำนวน 16 สาย ได้แก่ ถนนนิกรเกษม ถนนประเวศนคร ถนนคูหาสุวรรณ ถนนราชธานี ถนนบาลเมือง ถนนวิเชียรจำนงค์ ถนนศรีอินทราทิตย์ ถนนเปรมประชา ถนนตรีโชติ ถนนประเสริฐพงษ์ ถนนประพันธ์บำรุง ถนนศรีสมบุญ ถนนราษฎร์อุทิศ ถนนทัศนาพานิช 1 ถนนทัศนาพานิช 2 ถนนทัศนาพานิช 3 รวมทั้งสิ้น 18 สาย นอกจากนี้ยังมีถนนตรอกซอยต่าง ๆ ในความรับผิดชอบเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงอีกเป็นจำนวนมาก (เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี, ข้อมูล ณ วันที่ 24 มกราคม 2565)

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

คอมพิวเตอร์แบบพกพา จำนวน 1 เครื่อง มีคุณสมบัติดังนี้ ตัวประมวลผลมีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel(R) Core(TM) i5-8250U ด้วยความถี่ 1.8 GHz และมีหน่วยความจำ (RAM) 8.00 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10 เพื่อนำมาใช้ในการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ ใช้ในการประมวลผลลัพธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ผ่านฟังก์ชัน Evolutionary ใน Microsoft Excel Solve เพื่อช่วยจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ กรณีศึกษาเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้เป็น 7 ขั้นตอน แสดงดังภาพ 7 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัญหา แนวคิด ทฤษฎี รวมถึงงานวิจัยต่าง ๆ จากข้อมูลทุติยภูมิ จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ทำให้ได้มาซึ่งหัวข้องานวิจัย คือ การจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้กรณีศึกษา เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนของการเก็บข้อมูลปฐมภูมิ เป็นข้อมูลรายละเอียดที่ได้จากการเก็บข้อมูลด้วยตนเอง จากการสัมภาษณ์เชิงลึก โดยผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจ (Survey) และสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเชิงปฏิบัติการจริงของการจัดเก็บขยะ ข้อมูลที่ได้

จากการสัมภาษณ์ประกอบด้วยตารางการเดินรถ จำนวนรถที่ใช้ ประเภทรถที่ใช้ ระยะเวลาในการเดินรถและเส้นทางการปฏิบัติงาน

ขั้นตอนที่ 3 นำข้อมูลที่รวบรวมได้มาเรียบเรียงและทำการวิเคราะห์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของข้อมูลทั้งหมด เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่นำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถปฏิบัติงานจริงได้อย่างครบถ้วน ทั้งนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มต้นด้วยการจัดหมวดหมู่ข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจและการสัมภาษณ์เชิงลึก โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกจัดระเบียบให้เป็นระบบ เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ในกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 4 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ผ่านฟังก์ชัน Evolutionary ใน Microsoft Excel Solver เพื่อช่วยในการหาค่าคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ภายใต้เงื่อนไขที่มีอยู่

ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบความถูกต้องแบบจำลอง นำผลลัพธ์จากแบบจำลองมาประเมินและตรวจสอบว่าเส้นทางที่ได้มีความสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางเดิม หากผลลัพธ์ไม่สมเหตุสมผลจำเป็นต้องย้อนกลับไปปรับแก้แบบจำลอง แต่หากผลลัพธ์มีความถูกต้องและสอดคล้องตามหลักการก็สามารถดำเนินเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปได้ทันที

ขั้นตอนที่ 6 เปรียบเทียบเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะในปัจจุบันกับเส้นทางที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นการนำผลลัพธ์จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ใช้จริงในปัจจุบันเพื่อดูว่ามีความแตกต่างอย่างไรในด้านระยะทางและเวลา

ขั้นตอนที่ 7 สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะแนวทางการจัดเส้นทางการเดินรถที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะพร้อมเสนอแนะแนวทางการนำไปใช้ในอนาคต

ภาพ 7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การเรียกใช้ Microsoft Excel Solver

การประยุกต์ใช้เครื่องมือ Add-in ที่มีอยู่ในโปรแกรม Microsoft Excel อย่าง Microsoft Excel Solver ซึ่งเป็นเครื่องมือ Add-in ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบแบบ What-If Analysis เพื่อช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีขั้นตอนการเรียกใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้ แสดงดังภาพ 8

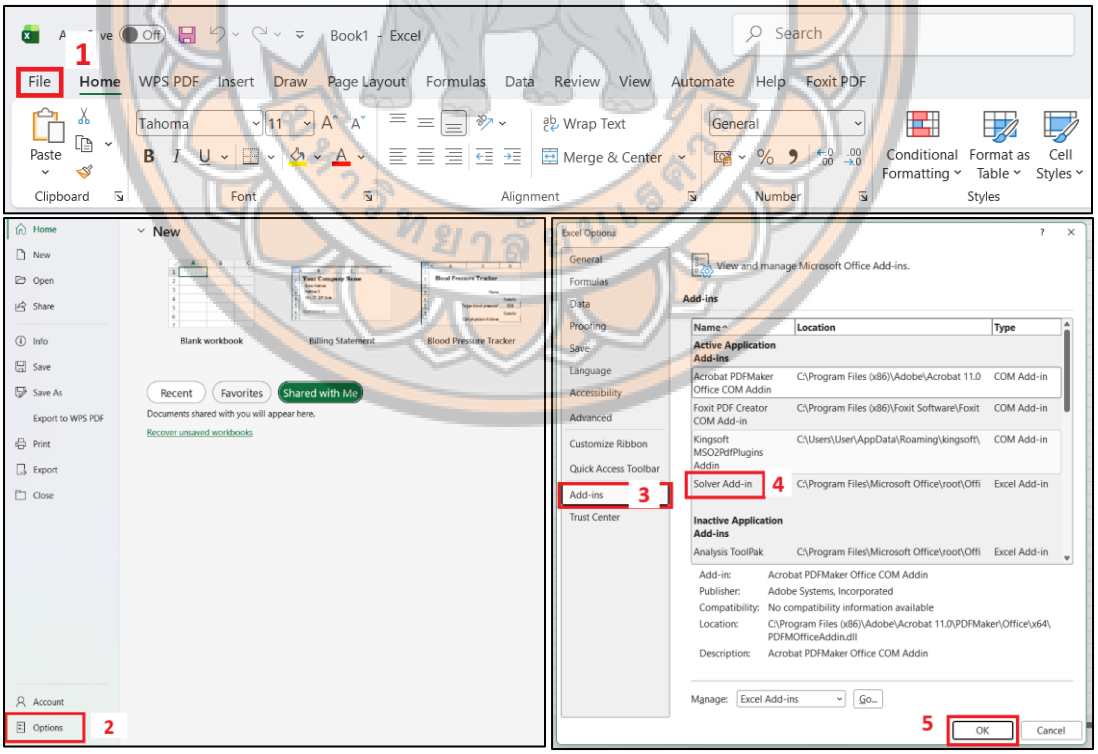
ขั้นตอนที่ 1 เมื่อเปิด Microsoft Excel ขึ้นมาจะเห็นหน้าต่างเริ่มต้น ให้คลิกไปที่ File

ขั้นตอนที่ 2 คลิกที่ Options จะปรากฏหน้าต่าง Excel Options ในแถบด้านซ้ายของหน้าต่างนี้ มีหมวดหมู่ต่าง ๆ เช่น General, Formulas, Data ฯลฯ ให้เลือกหมวด Add-ins

ขั้นตอนที่ 3 เลือกเมนู Add-ins ในหน้าต่าง Excel Options จะปรากฏหน้าต่างที่แสดงรายการ Add-ins ทั้งหมดที่มีอยู่ในโปรแกรม Excel

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบสถานะของ Solver Add-in ว่าถูกเปิดใช้งานหรือยัง หากยังไม่เปิดให้คลิกเลือก Solver Add-in

ขั้นตอนที่ 5 กด OK เพื่อเรียกใช้งาน เมื่อเปิดใช้งานแล้วจะสามารถเรียกใช้ Solver ได้จากเมนู Data บน Ribbon ของ Excel



ภาพ 8 Add-ins เพื่อทำการติดตั้ง Solver

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

บทที่ 4

ผลการวิจัย

สำหรับผลการวิจัยเรื่องการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัย ประกอบด้วย 1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ และ 2) เพื่อเสนอแนะเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะ รายละเอียดของผลการวิจัย ดังนี้

ผลการศึกษาสภาพปัจจุบันของการจัดเก็บขยะกรณีศึกษา

ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจและสัมภาษณ์เชิงลึก พบว่า ปัจจุบันเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีมีหน้าที่ในการจัดเก็บขยะในพื้นที่รับผิดชอบเพื่อนำขยะไปทิ้งยังโรงขยะเทศบาลสุโขทัย หลังจากเสร็จสิ้นภารกิจแล้ว รถบรรทุกขยะจะถูกนำกลับมายังจุดจอดใกล้กับที่ทำการกองทุนชุมชนวังหิน โดยรถบรรทุกขยะจะวิ่งตามเส้นทางที่ทางเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีกำหนดไว้ และรับผิดชอบจัดเก็บขยะครอบคลุมพื้นที่ตำบลธานีทั้งหมด โดยทางเทศบาลมีรถบรรทุกขยะแบบอัดท้าย จำนวน 4 คัน ประกอบด้วย รถยี่ห้อ Hino รุ่น FC8J 500 หมายเลขทะเบียน 82-3357 รถยี่ห้อ Isuzu Forward รุ่น FTR 240 หมายเลขทะเบียน 81-5701 และรถยี่ห้อ Isuzu Forward รุ่น FTR 195 หมายเลขทะเบียน 81-0197 และ 81-1953 ทั้งนี้ รถบรรทุกขยะแต่ละคันมีความจุขนาด 6,000 กิโลกรัม ดังแสดงภาพ 9 โดยมีรอบการจัดเก็บขยะแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาต่อวัน ได้แก่ ช่วงเช้า ตั้งแต่เวลา 03.00 น. ถึง 07.00 น. และ ช่วงบ่าย ตั้งแต่เวลา 14.00 น. ถึง 18.00 น.

ภาพ 9 รถบรรทุกขยะขนาด 6,000 กิโลกรัม

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพิจารณาการจัดเก็บขยะเฉพาะจุดเก็บขยะแบบรวบรวมเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดด้านเวลาในการเก็บข้อมูล ผู้วิจัยไม่สามารถดำเนินการชั่งน้ำหนักขยะจริงได้ครบทุกจุด จึงเลือกใช้วิธีการสุ่มค่าปริมาณขยะภายใต้ขอบเขตน้ำหนักต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากการสำรวจ เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในการทดสอบแบบจำลอง โดยกำหนดน้ำหนักขยะต่ำสุดที่ 50 กิโลกรัมต่อจุด และน้ำหนักขยะสูงสุดที่ 250 กิโลกรัมต่อจุด และเพื่อให้การสุ่มปริมาณขยะมีความสมบูรณ์และสามารถตรวจสอบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงได้ จึงได้ทำการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักขยะ ±10% จากค่าที่สุ่มได้ในแต่ละจุด

การสุ่มปริมาณขยะดำเนินการโดยอ้างอิงช่วงน้ำหนักต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งอยู่ระหว่าง 50–250 กิโลกรัมต่อจุด โดยใช้หลักการทางสถิติผ่านการเลือกแบบจำลองการแจกแจงที่เหมาะสม คือ การแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ซึ่งทุกค่าภายในช่วงที่กำหนดมีโอกาสเกิดขึ้นเท่าเทียมกัน เพื่อให้ผลการสุ่มไม่เกินขอบเขตที่พบในพื้นที่จริง การสุ่มดำเนินการด้วยสูตรในโปรแกรม Excel เช่น =RANDBETWEEN(50,250) และสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ โดยเปรียบเทียบค่าที่สุ่มได้กับช่วงน้ำหนักที่กำหนดไว้ เช่น จุดที่ 1 ในซอยตรงข้าม บริษัท โตโยต้าสุโขทัย มีช่วงน้ำหนักขยะ 50–250 กิโลกรัม ผลการสุ่มต้องอยู่ในช่วงดังกล่าวและมีการกระจายตามรูปแบบที่เลือกไว้ ซึ่งกระบวนการสุ่มนี้สามารถทำซ้ำได้และตรวจสอบได้อย่างชัดเจน รายละเอียดของจุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดสำหรับรถบรรทุกทั้ง 4 คัน ช่วงเช้าและช่วงบ่ายแสดงไว้ใน ตาราง 4 ถึงตาราง 11

ตาราง 4 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 1

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
1	ในซอยตรงข้าม บริษัท โตโยต้าสุโขทัย	164	148	180	17.020269,99.822193
2	บริษัท อีซูซุ สุโขทัย	122	110	134	17.00835,99.814061
3	ซอยข้างปั๊มเชลล์	197	177	217	17.008274,99.810413
4	สะพานศาลเจ้าพ่อคลองโพธิ์	233	210	256	17.008737,99.809692
5	ซอยข้างร้าน EZ House & Cafe	159	143	175	17.010545,99.810192
6	หน้าซอยชุมชนคลองโพธิ์	152	137	167	17.009032,99.809222
7	ร้าน SCG Home Saeng Uak	194	175	213	17.008855,99.811278
8	หน้าร้าน VC meat สาขาสุโขทัย	166	149	183	17.009313,99.821138
9	ข้างร้านแม็คเวิร์ค	202	182	222	17.007542,99.825602
10	หน้าธนาคารอาคารสงเคราะห์	204	184	224	17.007906,99.826531
11	หน้าบริเวณ J&T Express	110	99	121	17.00853,99.827579
12	ร้านอาหารครัวท้ายซอย	235	212	259	17.013081,99.830151
13	หน้าเบทาโกรสุโขทัย	164	148	180	17.009918,99.831773
14	ซอยศรีอรุณ สวนกล้วย	140	126	154	17.012065,99.830772
15	ซอยตาลเดี่ยว	188	169	207	17.010982,99.832676
16	หน้า บริษัทโชคชัยมอเตอร์ จำกัด	123	111	135	17.009988,99.83295
17	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา	143	129	157	17.009505,99.83114
18	ปั๊มคาลเท็กซ์ สาขาโชคชัย	132	119	145	17.008717,99.830548
19	ซอยอินทรีย์	175	158	193	17.00798,99.825215
20	ซอยอินทรีย์3	107	96	118	17.008754,99.825757
21	ซอยอินทรีย์ก๋วยเตี๋ยวบ้านทนาย	170	153	187	17.009448,99.826727
22	ซอยบาลเมือง2	159	143	175	17.010193,99.82624
23	ซอยบาลเมือง1	168	151	185	17.011111,99.824881
24	ซอยบาลเมือง1	105	95	116	17.010707,99.824765
25	ซอยบาลเมือง1	116	104	128	17.010138,99.823949
26	ซอยบาลเมือง1	191	172	210	17.011133,99.822532
27	ศูนย์จราจรกลางเมืองสุโขทัย	185	167	204	17.011881,99.821046
28	ตรงข้ามร้านพรรณเพ็ญอินเตอร์เน็ต	187	168	206	17.011628,99.822696

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 4 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 1 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
29	ตรงข้ามบริษัทฐิติกร จำกัด	144	130	158	17.011485,99.824436
30	หน้าโรงเรียนสารสาสน์วิเทศ	211	190	232	17.011327,99.82559
31	บริษัท สิงห์สุโขทัย จำกัด	155	140	171	17.01099,99.828368
32	ร้านไฮสคูลเครื่องเขียน	169	152	186	17.01046,99.821616
33	บริษัท เอ พี เอส ฮอนด้า	173	156	190	17.020834,99.823726
34	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 5 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 1

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
1	ในซอยตรงข้าม บริษัท โตโยต้า สุโขทัย	141	127	155	17.020269,99.822193
2	บริษัท อีซูซุ สุโขทัย	128	115	141	17.00835,99.814061
3	ซอยข้างปั๊มเชลล์	96	86	106	17.008274,99.810413
4	สะพานศาลเจ้าพ่อคลองโพธิ์	159	143	175	17.008737,99.809692
5	ซอยข้างร้าน EZ House & Cafe	177	159	195	17.010545,99.810192
6	หน้าซอยชุมชนคลองโพธิ์	189	170	208	17.009032,99.809222
7	ร้าน SCG Home Saeng Uak	127	114	140	17.008855,99.811278
8	หน้าร้าน VC meat สาขาสุโขทัย	115	104	127	17.009313,99.821138
9	ข้างร้านแม็คเวิร์ค	154	139	169	17.007542,99.825602
10	หน้าธนาคารอาคารสงเคราะห์	209	188	230	17.007906,99.826531

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 5 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 1 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
11	หน้าบริเวณ J&T Express	166	149	183	17.00853,99.827579
12	ร้านอาหารครัวท้ายซอย	174	157	191	17.013081,99.830151
13	หน้าเบทาโกรสุโขทัย	247	222	272	17.009918,99.831773
14	ซอยศรีอรุณ สวนกล้วย	89	80	98	17.012065,99.830772
15	ซอยตาลเดี่ยว	247	222	272	17.010982,99.832676
16	หน้า บริษัทโชคชัยมอเตอร์ จำกัด	203	183	223	17.009988,99.83295
17	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา	173	156	190	17.009505,99.83114
34	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 6 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 2

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
1	หอพักข้างที่ทำการกองทุนชุมชนวังหิน	245	221	270	17.026432,99.825112
2	ร้านอาหารตามสั่งหน้าการประปา	193	174	212	17.028095,99.824278
3	สนามเด็กเล่นชุมชนบางแก้ว	249	224	274	17.023178,99.820097
4	ซอยจุดสูบน้ำขวัญเรือน	225	203	248	17.022029,99.820319
5	สภ.อ. เมืองสุโขทัย หน่วยบริการ ปชช. บางแก้ว	233	210	256	17.021252,99.821244
6	7-Eleven สาขา แยกบางแก้ว (10608)	184	166	202	17.022172,99.821452
7	Lotus’s go fresh Sukhothai	248	223	273	17.025428,99.821841

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 6 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 2 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
8	ซอยข้างสำนักงานสรรพสามิตพื้นที่สุโขทัย	197	177	217	17.026353,99.82146
9	Ana Bouetique Mansion	222	200	244	17.027263,99.82285
10	หลัง TBL สุโขทัย	178	160	196	17.027921,99.822889
11	หน้า Hindo bike	248	223	273	17.028074,99.822124
12	ซอยเทศบาลดำริ 2	243	219	267	17.027994,99.821343
13	ซอยด้านหลัง Fuji Steak	153	138	168	17.027327,99.821718
14	ซอยข้าง ร้านกาแฟสด coffee445	239	215	263	17.027544,99.820846
15	โรงเรียนเทศบาลวัดไทยชุมพล	250	225	275	17.012489,99.820525
16	วัดไทยชุมพล จ.สุโขทัย	211	190	232	17.015862,99.820046
32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 7 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 2

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
17	ซอยประชาร่วมใจ	209	188	230	17.018043,99.822405
18	ซอยพัทรโชติ1	246	221	271	17.015459,99.825678
19	ซอยประชาร่วมมิตร	210	189	231	17.016745,99.82366
20	ซอยทองเนียม	177	159	195	17.015297,99.825187
21	ซอยมหาศรานนท์1	206	185	227	17.013936,99.825398
22	ซอยมหาศรานนท์2	244	220	268	17.013827,99.82469
23	ซอยประพันธ์วิทยา	143	129	157	17.013386,99.823395
24	ซอยสิริร่วมใจ	236	212	260	17.012803,99.82587
25	ถนนประชาสุข	237	213	261	17.015852,99.823357
26	ซอยอินแถม	169	152	186	17.014856,99.821989
27	ซอยเลอไท 1	190	171	209	17.006792,99.817046

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 7 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 2 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
28	ถนนเทศบาลพัฒนา1	137	123	151	17.005439,99.815436
29	ถนนเทศบาลพัฒนา2	120	108	132	17.005036,99.814932
30	ถนนเทศบาลพัฒนา5	222	200	244	17.004895,99.814073
31	The Nature Resort	168	151	185	17.006978,99.811384
32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 8 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 3

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
1	ปากซอยตรงข้ามบริษัท โตโยต้าสุโขทัย	224	202	246	17.020403,99.821572
2	ตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ครูสุโขทัย	175	158	193	17.019239,99.821271
3	โรงเรียนเทศบาลวัดไทยชุมพล	129	116	142	17.015331,99.820891
4	วัดไทยชุมพล จ.สุโขทัย	245	221	270	17.016224,99.820962
5	สำนักงานเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี	246	221	271	17.014209,99.821891
6	ร้านทัชชาภรณ์	204	184	224	17.012002,99.82078
7	โรงเรียนอุดมดรุณี	197	177	217	17.013807,99.820816
8	ตลาดสดเทศบาลเมืองสุโขทัย	250	225	275	17.010213,99.819607
9	เอ เอ เซ็นเตอร์	173	156	190	17.012004,99.820561
10	Blue House Sukhothai	212	191	233	17.009251,99.81414
11	หลังวัดคูหาสุวรรณ	207	186	228	17.009144,99.815211

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 8 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 3 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
12	ตำลาว Poo restaurant	121	109	133	17.008318,99.815164
13	หน้าวัดคูหาสุวรรณ	240	216	264	17.009442,99.816755
14	ห้องสมุดเฉลิมพระเกียรติ	228	205	251	17.00869,99.818279
15	ถนนประเสริฐพงษ์	199	179	219	17.008171,99.819578
16	สุโขทัยกระจกอลูมิเนียม	225	203	248	17.008195,99.820234
32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 9 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 3

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
17	หลังธนาคารไทยพาณิชย์	195	176	215	17.008988,99.820757
18	หน้าคลินิกหมอมาโนช	167	150	184	17.007778,99.820053
19	Sukhothai Night Market	172	155	189	17.00624,99.822665
20	ถนนสุวรรณเทวี	237	213	261	17.006626,99.824173
21	ถนนศรีจุฬาลักษณ์	107	96	118	17.005727,99.824972
22	สถานีตำรวจภูธรเมืองสุโขทัย	194	175	213	17.004019,99.828259
23	ซอยข้างสถานีตำรวจ	237	213	261	17.004257,99.829061
24	ซอยข้าง EMP Extraction yourself	161	145	177	17.003706,99.830189
25	ซอยชุมชนพระแม่ย่า	246	221	271	17.004208,99.830888
26	ซอยร้านเอส ซี มือถือ	141	127	155	17.003872,99.831366
27	ซอยเจ้าพ่อร่มขาว	149	134	164	17.004911,99.831763
28	ซอยรุ่งโรจน์	169	152	186	17.007715,99.831043

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 9 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 3 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
29	บ้านพักผู้บัญชาการเรือนจำ	191	172	210	17.004904,99.830037
30	สถาบันปะปัญญา สุโขทัย	232	209	255	17.006201,99.826745
31	ธนาคารกรุงเทพ	248	223	273	17.008601,99.822257
32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 10 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงเช้าของรถคันที่ 4

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
1	โรงเรียนกวางตง	242	218	266	17.013481,99.82095
2	ร้านทับเจริญแก๊ส	178	160	196	17.010926,99.820452
3	ซอยเลอไท	147	132	162	17.007006,99.815419
4	ซอยร้านสุรีรัตน์ Bakery	238	214	262	17.004843,99.81734
5	สุนทรีย์อพาร์ทเม้นท์	199	179	219	17.005569,99.817622
6	โรงเรียนเทศบาลเมืองสุโขทัย	247	222	272	17.004231,99.821033
7	ซอยประเวศนคร	201	181	221	17.002676,99.824005
8	ฟาร์มหนูพุกยักษ์สุโขทัย	212	191	233	17.00191,99.825443
9	วัดศรีเสวตวนาราม	236	212	260	17.00273,99.830684
10	เปรมสุขอพาร์ทเมนท์	208	187	229	17.004307,99.825492
11	ซอยสุกัญญา	215	194	237	17.003899,99.823641
12	ซอยสุกัญญา	218	196	240	17.004766,99.824228
13	ริมน้ำ การ์เด้น	126	113	139	17.00642,99.821087
14	Banthai Steak House & Homestay	186	167	205	17.007535,99.818318
15	ซอย TR Guesthouse	221	199	243	17.00828,99.816831
16	เทคนิคดีเซล สุโขทัย	243	219	267	17.008433,99.816073
33	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

ตาราง 11 จุดเก็บขยะและปริมาณขยะของแต่ละจุดช่วงบ่ายของรถคันที่ 4

จุดที่	พื้นที่	น้ำหนักขยะที่สุ่ม	-10%	+10%	พิกัด X,Y
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	0	17.026892,99.824627
17	ถนนราษฎร์อุทิศ	194	175	213	17.009369,99.819083
18	ถนนราชธานี	179	161	197	17.010486,99.818698
19	ถนนประพันธ์บำรุง	231	208	254	17.010549,99.817858
20	ซอยหลัง Café Amazon	167	150	184	17.010964,99.818005
21	ธนาคารอิสลามแห่งประเทศไทย	209	188	230	17.011056,99.818731
22	ร้านเฮงเจริญจักรยานเด็ก	221	199	243	17.011567,99.818164
23	บ้านไส้กรอกน้องหญิง สุโขทัย	213	192	234	17.013601,99.81704
24	ถนนวินิจฉัย	194	175	213	17.01504,99.819399
25	ถนนราษฎร์อุทิศ	246	221	271	17.01321,99.819266
26	ร้านเจริญการช่าง สุโขทัย	206	185	227	17.011397,99.818769
27	วัดคูหาสุวรรณ	222	200	244	17.008667,99.816939
28	ซอคูหาสุวรรณ	239	215	263	17.010848,99.816449
29	ซอยเทพสุทิน2	217	195	239	17.011658,99.817319
30	Sila Resort Sukhothai	240	216	264	17.016919,99.818723
31	ซอย Mr.James's Coffee	230	207	253	17.010739,99.812315
32	MG Guest House	201	181	221	17.010076,99.815401
33	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	0	0	0	17.035264,99.850685

หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวัน

เมื่อได้ข้อมูลจุดเก็บขยะแล้วขั้นตอนต่อมาคือการสร้างเมตริกซ์ระยะทาง โดยผู้วิจัยใช้โปรแกรมกูเกิ้ลเอิร์ธ (Google Earth) เพื่อหาระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะแต่ละจุดและจัดทำเป็นเมตริกซ์ระยะทาง (Distance Matrix) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) ช่วยให้สามารถคำนวณและเปรียบเทียบเส้นทางที่เหมาะสมได้อย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ ในการสร้างเมตริกซ์นักวิจัยใช้สมมติฐานสมมาตร (Symmetric Matrix) โดยกำหนดให้ระยะทางไป–กลับเท่ากันเพื่อความสะดวกในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติจริง ระยะทางไป–กลับอาจไม่เท่ากันจากข้อจำกัดของเส้นทาง เช่น ถนนวันเวย์ เส้นทางอ้อม หรือสภาพการจราจร จึงควรใช้เมตริกซ์ไม่สมมาตร (Asymmetric Matrix) เพื่อสะท้อนสภาพจริงได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยตารางเมตริกซ์ระยะทางของรถบรรทุกแต่ละคันทั้งช่วงเช้าและบ่าย แสดงในตาราง 12 ถึงตาราง 19

ตาราง 12 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	34
0	0	1.00	2.90	3.30	3.30	3.50	3.75	3.10	2.30	...	3.70
1	1.00	0	1.97	2.37	2.37	2.57	2.82	2.17	1.37	...	4.30
2	2.90	1.97	0	0.40	0.40	0.60	0.85	0.20	0.85	...	6.27
3	3.30	2.37	0.40	0	0.14	0.26	0.59	0.20	1.25	...	6.67
4	3.30	2.37	0.40	0.14	0	0.60	0.45	0.67	1.30	...	6.72
5	3.50	2.57	0.60	0.26	0.60	0	0.23	0.45	1.45	...	6.87
6	3.75	2.82	0.85	0.59	0.45	0.23	0	0.22	1.40	...	6.82
7	3.10	2.17	0.20	0.20	0.67	0.45	0.22	0	1.15	...	6.57
8	2.30	1.37	0.85	1.25	1.30	1.45	1.40	1.15	0	...	5.58
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
34	3.70	4.30	6.27	6.67	6.72	6.87	6.82	6.57	5.58	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 13 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	34
0	0	1.00	2.90	3.30	3.30	3.50	3.75	3.10	2.30	...	3.70
1	1.00	0	1.97	2.37	2.37	2.57	2.82	2.17	1.37	...	4.30
2	2.90	1.97	0	0.40	0.40	0.60	0.85	0.20	0.85	...	6.27
3	3.30	2.37	0.40	0	0.14	0.26	0.59	0.20	1.25	...	6.67
4	3.30	2.37	0.40	0.14	0	0.60	0.45	0.67	1.30	...	6.72
5	3.50	2.57	0.60	0.26	0.60	0	0.23	0.45	1.45	...	6.87
6	3.75	2.82	0.85	0.59	0.45	0.23	0	0.22	1.40	...	6.82
7	3.10	2.17	0.20	0.20	0.67	0.45	0.22	0	1.15	...	6.57
8	2.30	1.37	0.85	1.25	1.30	1.45	1.40	1.15	0	...	5.58
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
34	3.70	4.30	6.27	6.67	6.72	6.87	6.82	6.57	5.58	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 14 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	32
0	0	0.10	1.41	1.60	1.50	1.50	1.00	1.00	1.56	...	3.70
1	0.10	0	1.51	1.70	1.60	1.60	1.10	1.10	1.66	...	3.80
2	1.41	1.51	0	1.60	1.40	1.50	1.00	1.00	1.56	...	3.90
3	1.60	1.70	1.60	0	0.14	0.35	0.45	0.80	0.96	...	4.60
4	1.50	1.60	1.40	0.14	0	0.19	0.31	0.66	0.82	...	4.46
5	1.50	1.60	1.50	0.35	0.19	0	0.12	0.50	0.66	...	4.30
6	1.00	1.10	1.00	0.45	0.31	0.12	0	0.40	0.56	...	4.50
7	1.00	1.10	1.00	0.80	0.66	0.50	0.40	0	0.16	...	5.35
8	1.56	1.66	1.56	0.96	0.82	0.66	0.56	0.16	0	...	5.30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
32	3.70	3.80	3.90	4.60	4.46	4.30	4.50	5.35	5.30	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 15 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	17	18	19	20	21	22	23	24	...	32
0	0	1.30	1.90	1.88	1.87	2.15	2.00	2.00	2.40	...	3.70
17	1.30	0	0.55	0.55	0.55	0.80	0.80	0.85	1.20	...	5.50
18	1.90	0.55	0	0.27	0.24	0.50	0.50	0.50	0.90	...	4.60
19	1.88	0.55	0.27	0	0.26	0.55	0.55	0.55	0.90	...	4.60
20	1.87	0.55	0.24	0.26	0	0.45	0.45	0.45	0.85	...	4.60
21	2.15	0.80	0.50	0.55	0.45	0	0.40	0.45	0.80	...	5.90
22	2.00	0.80	0.50	0.55	0.45	0.40	0	0.35	0.72	...	5.90
23	2.00	0.85	0.50	0.55	0.45	0.45	0.35	0	0.50	...	5.70
24	2.40	1.20	0.90	0.90	0.85	0.80	0.72	0.50	0	...	5.90
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
32	3.70	5.50	4.60	4.60	4.60	5.90	5.90	5.70	5.90	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 16 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	32
0	0	1.00	2.20	1.70	1.80	1.80	1.90	2.10	2.20	...	3.60
1	1.00	0	1.20	0.75	0.85	0.80	0.95	1.10	1.20	...	5.60
2	2.20	1.20	0	1.10	1.20	1.10	1.20	1.50	1.60	...	4.40
3	1.70	0.75	1.10	0	0.10	1.50	1.70	1.90	2.00	...	4.90
4	1.80	0.85	1.20	0.10	0	1.40	1.60	1.80	1.90	...	4.80
5	1.80	0.80	1.10	1.50	1.40	0	0.35	0.55	0.65	...	5.10
6	1.90	0.95	1.20	1.70	1.60	0.35	0	0.21	0.30	...	5.20
7	2.10	1.10	1.50	1.90	1.80	0.55	0.21	0	0.70	...	5.00
8	2.20	1.20	1.60	2.00	1.90	0.65	0.30	0.70	0	...	5.70
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
32	3.60	5.60	4.40	4.90	4.80	5.10	5.20	5.00	5.70	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 17 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	17	18	19	20	21	22	23	24	...	32
0	0	2.50	2.70	3.00	2.90	3.00	3.60	3.40	3.80	...	3.60
17	2.50	0	0.40	0.75	1.25	1.05	1.40	1.50	1.60	...	5.70
18	2.70	0.40	0	0.35	0.55	0.65	1.00	1.10	1.20	...	6.00
19	3.00	0.75	0.35	0	0.23	0.30	0.65	0.75	0.85	...	6.30
20	2.90	1.25	0.55	0.23	0	0.17	0.60	0.70	0.80	...	6.20
21	3.00	1.05	0.65	0.30	0.17	0	0.45	0.55	0.65	...	6.60
22	3.60	1.40	1.00	0.65	0.60	0.45	0	0.10	0.20	...	6.90
23	3.40	1.50	1.10	0.75	0.70	0.55	0.10	0	0.18	...	6.70
24	3.80	1.60	1.20	0.85	0.80	0.65	0.20	0.18	0	...	6.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
32	3.60	5.70	6.00	6.30	6.20	6.60	6.90	6.70	6.87	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 18 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	33
0	0	1.80	2.10	2.90	3.40	3.30	3.50	3.90	4.10	...	3.80
1	1.80	0	0.29	1.10	1.58	1.50	1.70	2.10	2.30	...	5.40
2	2.10	0.29	0	0.80	1.30	1.20	1.40	1.80	1.98	...	5.70
3	2.90	1.10	0.80	0	0.45	0.35	0.75	1.10	1.30	...	6.20
4	3.40	1.58	1.30	0.45	0	0.08	0.50	0.90	1.10	...	6.60
5	3.30	1.50	1.20	0.35	0.08	0	0.42	0.82	1.02	...	6.52
6	3.50	1.70	1.40	0.75	0.50	0.42	0	0.35	0.55	...	6.80
7	3.90	2.10	1.80	1.10	0.90	0.82	0.35	0	0.18	...	7.15
8	4.10	2.30	1.98	1.30	1.10	1.02	0.55	0.18	0	...	7.33
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
33	3.80	5.40	5.70	6.20	6.60	6.52	6.80	7.15	7.33	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 19 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	17	18	19	20	21	22	23	24	...	33
0	0	2.30	2.40	2.50	2.50	2.30	2.40	2.30	1.80	...	3.80
17	2.30	0	0.13	0.23	0.28	0.20	0.30	0.60	0.65	...	5.60
18	2.40	0.13	0	0.10	0.15	0.06	0.18	0.50	0.50	...	5.60
19	2.50	0.23	0.10	0	0.04	0.15	0.12	0.40	0.60	...	5.70
20	2.50	0.28	0.15	0.04	0	0.10	0.07	0.35	0.55	...	5.60
21	2.30	0.20	0.06	0.15	0.10	0	0.13	0.40	0.45	...	5.60
22	2.40	0.30	0.18	0.12	0.07	0.13	0	0.28	0.50	...	5.60
23	2.30	0.60	0.50	0.40	0.35	0.40	0.28	0	0.45	...	5.50
24	1.80	0.65	0.50	0.60	0.55	0.45	0.50	0.45	0	...	5.10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	0	⋮
33	3.80	5.60	5.60	5.70	5.60	5.60	5.60	5.50	5.10	...	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

จากเมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะแต่ละจุด สามารถนำมาแสดงลำดับจุดและระยะทางโดยรวมการเดินทางในการจัดเก็บขยะของรถทั้ง 4 คันในแต่ละช่วงเวลา ดังตาราง 20 พบว่า คันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 (ช่วงเช้า) มีระยะทางไกลที่สุด คือ 28.70 กิโลเมตร รองลงมาคือ คันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 (ช่วงบ่าย) ระยะทาง 27.90 กิโลเมตร คันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 (ช่วงบ่าย) ระยะทาง 26.10 กิโลเมตร คันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 (ช่วงบ่าย) ระยะทาง 21.90 กิโลเมตร คันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 (ช่วงบ่าย) ระยะทาง 21.60 กิโลเมตร คันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 (ช่วงเช้า) ระยะทาง 21.20 กิโลเมตร คันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 (ช่วงเช้า) ระยะทาง 20.50 กิโลเมตร และคันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 (ช่วงเช้า) ระยะทาง 17.20 กิโลเมตร ตามลำดับ

ตาราง 20 ลำดับจุดระยะทางรวมเดิมของรถเก็บขยะทั้ง 4 คัน

รถคันที่	ลำดับจุดของการเก็บขยะ	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)
คันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 (ช่วงเช้า)	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>33>34>0	28.70
คันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 (ช่วงบ่าย)	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>34>0	21.60
คันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 (ช่วงเช้า)	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>32>0	17.20
คันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 (ช่วงบ่าย)	0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>0	27.90
คันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 (ช่วงเช้า)	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>32>0	20.50
คันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 (ช่วงบ่าย)	0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>0	26.10
คันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 (ช่วงเช้า)	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>33>0	21.20
คันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 (ช่วงบ่าย)	0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>33>0	21.90

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรียบร้อยแล้ว จึงได้นำข้อมูลที่ได้รับนั้นมาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ 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)

Q คือ ความจุของรถบรรทุก

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)

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

เงื่อนไขข้อบังคับ (Constraints)

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{i=1}^{n} Y_{i1} \leq 1 \tag{9}$$

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

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

ฟังก์ชันที่ (1) คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะทางรวมในการจัดเก็บขยะที่สั้นที่สุด

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

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

สมการ (4) เป็นเงื่อนไขข้อบังคับให้ตัวแปรตัดสินใจ 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 เที่ยวเท่านั้น 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 ใด ๆ ไปยังจุด j ใด ๆ

หลังจากที่มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เรียบร้อยแล้ว ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการแทนค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรทราบค่าเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่ามีความถูกต้องตรงกับเงื่อนไขข้อกำหนดหรือไม่ ผลลัพธ์ที่ได้มีการละเมิดเงื่อนไขข้อจำกัดหรือไม่ ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง และไม่มีการละเมิดเงื่อนไขข้อจำกัด

การประมวลผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ วิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ผ่านฟังก์ชัน Evolutionary ที่มีอยู่ในเครื่องมือ Microsoft Excel Solver เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะ โดยลักษณะของตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีความไม่ต่อเนื่อง (discrete) และมีการเปลี่ยนแปลงแบบกระโดด (discontinuous) จึงไม่สามารถใช้วิธีการเชิงเส้น (Linear Method) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงเลือกใช้ฟังก์ชัน Evolutionary ซึ่งได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจาก วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เพื่อรองรับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีคุณสมบัติในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแนวทางเชิงเส้นทั่วไป

การประมวลผลดำเนินการผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบขึ้น และทดสอบกับข้อมูลการเดินรถจัดเก็บขยะจำนวน 4 คัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงเช้าและช่วงบ่าย ทั้งนี้ได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 20 ครั้ง เพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งรายละเอียดผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

การเดินรถเพื่อจัดเก็บขยะของรถคันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 จากการประมวลผล พบว่า การเดินรถในช่วงเช้า มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 3 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 3, 4 และ 5 มีระยะทาง คือ 21.28 กิโลเมตร และช่วงบ่าย มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 4 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 2, 3, 17 และ 18 มีระยะทาง คือ 19.17 กิโลเมตร รายละเอียดดังตาราง 21

ตาราง 21 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 1

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 1	0>33>27>23>19>9>10>11>21>20>8>7>6>5>3>4>2>32>26>25>24>30>31>18>17>16>15>13>14>12>22>29>28>1>34>0	22.77	0>1>4>3>5>6>7>2>10>17>16>15>13>14>12>11>9>8>34>0	19.57
ครั้งที่ 2	0>33>27>23>19>9>10>11>21>20>8>7>6>5>3>4>2>32>26>25>24>30>31>18>17>16>15>13>14>12>22>29>28>1>34>0	22.77	0>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>2>7>6>5>3>4>1>34>0	**19.17***
ครั้งที่ 3	0>1>28>29>23>21>20>19>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>30>24>25>26>4>3>5>6>7>2>8>32>27>33>34>0	**21.28***	0>4>3>5>6>7>2>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>1>34>0	**19.17***
ครั้งที่ 4	0>1>28>29>23>21>20>19>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>30>24>25>26>4>3>5>6>7>2>8>32>27>33>34>0	**21.28***	0>1>7>6>5>3>4>2>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>34>0	19.32

ตาราง 21 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 1 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 5	0>1>28>29>23>21>20>19>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>30>24>25>26>4>3>5>6>7>2>8>32>27>33>34>0	**21.28***	0>1>10>11>17>16>15>13>14>12>9>8>2>7>6>5>3>4>34>0	19.66
ครั้งที่ 6	0>1>2>7>6>5>12>14>13>15>16>17>18>31>22>30>29>32>4>3>8>19>9>10>11>21>20>24>25>23>26>28>27>33>34>0	24.97	0>9>10>11>12>14>13>15>16>17>8>4>3>5>6>7>2>1>34>0	19.59
ครั้งที่ 7	0>1>28>29>22>31>13>12>11>21>24>32>2>7>6>5>3>4>8>20>19>9>10>18>16>15>14>17>30>23>25>26>27>33>34>0	23.54	0>1>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>4>3>5>6>7>2>34>0	19.29
ครั้งที่ 8	0>2>7>6>5>3>4>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>21>19>20>23>25>24>30>29>28>26>32>27>1>33>34>0	21.75	1>4>3>5>6>7>2>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>34>0	19.3
ครั้งที่ 9	0>12>15>16>31>23>24>20>19>21>25>26>28>22>29>2>7>6>5>3>4>8>9>10>11>14>13>17>18>30>32>27>1>33>34>0	24.94	0>1>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>4>3>5>6>7>2>34>0	19.29

ตาราง 21 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 1 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ลำดับจุดเก็บขยะ
ครั้งที่ 10	0>1>27>25>24>20>19>4>3>5>6>7>2>8>32>26>23>30>22>9>10>21>11>12>14>13>15>16>17>18>31>29>28>33>34>0	22.26	0>9>10>17>16>15>13>14>12>11>8>4>3>5>6>7>2>1>34>0	19.29
ครั้งที่ 11	0>27>29>30>31>18>17>16>15>13>14>12>11>10>9>21>24>25>26>32>8>4>3>5>6>7>2>23>20>19>22>28>1>33>34>0	22.4	0>1>10>17>16>15>13>14>12>11>9>8>2>7>6>5>3>4>34>0	19.66
ครั้งที่ 12	0>1>28>26>24>25>32>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>19>20>21>23>30>22>31>29>2>7>6>5>3>4>27>33>34>0	22.52	0>2>7>6>5>3>4>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>1>34>0	19.22
ครั้งที่ 13	0>1>22>31>17>18>19>9>10>14>15>16>13>12>11>21>20>30>24>25>23>29>28>26>8>4>3>5>6>7>2>32>27>33>34>0	22.95	0>17>16>15>14>13>12>11>10>9>4>3>5>6>7>2>8>1>34>0	19.52
ครั้งที่ 14	0>33>1>27>29>20>19>4>3>5>6>7>2>32>28>26>25>24>22>31>12>15>16>17>18>30>23>21>11>14>13>10>9>8>34>0	24.45	0>2>7>6>5>3>4>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>1>34>0	19.22

ตาราง 21 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 1 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 15	0>1>2>7>6>5>3>4>8>32>26>20>9>10>21>24>25>23>30>19>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>29>28>27>33>34>0	21.96	0>1>2>7>6>5>3>4>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>34>0	19.37
ครั้งที่ 16	0>1>7>6>5>13>14>15>16>12>8>3>4>2>32>27>28>26>25>24>23>30>22>18>17>11>21>20>19>9>10>31>29>33>34>0	26.84	0>1>7>6>5>3>4>2>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>34>0	19.3
ครั้งที่ 17	0>1>27>4>3>5>6>7>2>8>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>23>25>24>20>19>9>10>21>30>29>28>26>32>33>34>0	21.82	0>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>2>4>3>5>6>7>1>34>0	**19.17***
ครั้งที่ 18	0>1>27>28>26>32>4>3>5>6>7>2>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>19>20>21>23>29>22>31>30>24>25>33>34>0	22.1	0>7>6>5>3>4>2>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>1>34>0	**19.17***
ครั้งที่ 19	0>1>8>32>26>28>29>30>23>22>31>11>12>14>13>15>16>17>18>20>19>9>10>21>24>25>27>2>4>3>5>6>7>33>34>0	22.45	0>1>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>2>7>6>5>3>4>34>0	19.29
ครั้งที่ 20	0>33>29>20>9>10>21>23>30>19>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>24>25>7>6>5>3>4>2>8>32>26>28>27>1>34>0	22.76	0>2>7>6>5>3>4>8>9>10>11>12>14>13>15>16>17>1>34>0	19.22

การเดินรถเพื่อจัดเก็บขยะของรถคันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 จากการประมวลผล พบว่า การเดินรถในช่วงเช้า มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 13 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 1, 2, 3, 5, 7, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 และ 20 มีระยะทาง คือ 14.75 กิโลเมตร และช่วงบ่าย มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 1 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 5 มีระยะทาง คือ 21.30 กิโลเมตร รายละเอียดดังตาราง 22

ตาราง 22 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 2

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 1	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0>	**14.75***	0>23>18>22>24>29>27>21>20>19>17>28>30>31>25>26>32>0	23.19
ครั้งที่ 2	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0>	**14.75***	0>27>28>23>26>29>24>20>18>17>30>25>22>31>21>19>32>0	27.64
ครั้งที่ 3	0>1>15>16>3>4>5>6>9>10>11>12>13>14>8>7>2>32>0>	**14.75***	0>27>30>24>21>25>17>31>22>19>29>28>20>18>23>26>32>0	25.97
ครั้งที่ 4	0>1>2>7>8>14>13>12>11>10>9>6>3>4>5>15>16>32>0>	15.29	0>27>19>20>21>24>31>17>22>28>30>25>18>23>29>26>32>0	28.61
ครั้งที่ 5	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0>	**14.75***	0>17>25>23>31>29>27>28>26>20>30>24>22>21>18>19>32>0	**21.30***
ครั้งที่ 6	0>1>2>6>5>15>16>3>4>7>8>14>13>12>11>10>9>32>0>	15.18	0>25>20>21>23>24>29>28>26>19>22>27>17>18>31>30>32>0	25.26
ครั้งที่ 7	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0>	**14.75***	0>22>18>28>27>30>21>25>17>29>24>23>20>26>31>19>32>0	25.45

ตาราง 22 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 2 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 8	0>1>16>15>3>4>7>9>10>11>12>13>14>8>5>6>2>32>0>	15.42	0>23>18>19>29>30>24>20>28>27>22>25>21>26>17>31>32>0	26.03
ครั้งที่ 9	0>1>2>15>16>3>4>5>6>7>8>14>13>12>11>10>9>32>0>	15.01	0>25>19>21>24>29>27>31>23>17>26>22>28>30>18>20>32>0	22.35
ครั้งที่ 10	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0>	**14.75***	0>24>22>26>28>27>30>19>17>31>21>25>23>29>18>20>32>0	25.51
ครั้งที่ 11	0>1>6>3>4>7>8>14>13>12>11>10>9>5>15>16>2>32>0>	15.33	0>17>19>23>24>30>22>18>25>26>28>27>31>20>21>29>32>0	24.81
ครั้งที่ 12	0>1>15>6>3>4>5>6>9>10>11>12>13>14>8>7>2>32>0>	**14.75***	0>31>27>21>20>17>30>29>24>22>18>26>28>23>25>19>32>0	25.01
ครั้งที่ 13	0>1>15>16>3>4>5>6>9>10>11>12>13>14>8>7>2>32>0	**14.75***	0>29>26>18>17>30>24>19>21>27>23>25>22>31>28>20>32>0	28.16
ครั้งที่ 14	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0	**14.75***	0>21>22>23>18>26>24>28>30>29>20>31>27>25>19>17>32>0	23.71
ครั้งที่ 15	0>1>15>16>3>4>5>6>9>10>11>12>13>14>8>7>2>32>0	**14.75***	0>17>25>22>28>31>30>29>23>21>19>24>27>26>20>18>32>0	21.31
ครั้งที่ 16	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0	**14.75***	0>27>28>17>20>25>21>22>23>18>26>31>30>29>24>19>32>0	22.08
ครั้งที่ 17	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0	**14.75***	0>29>30>31>28>26>22>25>17>19>21>23>24>27>20>18>32>0	21.81

ตาราง 22 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 2 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 18	0>1>7>9>10>11>12>13>14>8>3>4>16>15>5>6>2>32>0	14.92	0>25>22>23>28>27>29>17>18>21>26>20>19>31>30>24>32>0	22.77
ครั้งที่ 19	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>3>4>16>15>5>6>2>32>0	14.92	0>24>23>18>20>29>28>31>21>19>17>25>22>27>30>26>32>0	23.31
ครั้งที่ 20	0>1>15>16>3>4>5>6>8>14>13>12>11>10>9>7>2>32>0	**14.75***	0>29>31>17>25>30>24>23>26>19>20>21>22>27>28>18>32>0	25.12

การเดินรถเพื่อจัดเก็บขยะของรถคันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 จากการประมวลผล พบว่า การเดินรถในช่วงเช้า มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 1 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 11 มีระยะทาง คือ 16.21 กิโลเมตร และช่วงบ่าย มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 1 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 6 มีระยะทาง คือ 20.14 กิโลเมตร รายละเอียดดังตาราง 23

ตาราง 23 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 3

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 1	0>5>9>8>13>10>11>12>14>16>15>6>7>1>3>4>2>32>0	16.71	0>17>28>30>22>31>20>26>24>25>29>21>23>27>18>19>32>0	21.64
ครั้งที่ 2	0>1>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>2>32>0	16.90	0>29>26>22>20>24>25>18>21>17>28>27>19>31>23>30>32>0	23.38
ครั้งที่ 3	0>1>8>12>10>11>13>14>16>15>9>6>7>5>4>3>2>32>0	16.41	0>22>25>27>29>24>18>17>31>19>26>30>23>28>21>20>32>0	20.69
ครั้งที่ 4	0>1>3>4>7>6>12>11>10>13>14>16>15>9>8>5>2>32>0	16.41	0>19>20>26>27>29>30>24>31>21>25>23>17>22>28>18>32>0	23.42
ครั้งที่ 5	0>1>9>15>16>14>13>11>10>12>8>6>7>5>4>3>2>32>0	16.41	0>18>19>21>22>27>25>20>26>17>31>24>28>23>30>29>32>0	21.86
ครั้งที่ 6	0>1>4>3>2>5>7>6>8>13>11>10>12>14>16>15>9>32>0	16.36	0>23>19>31>20>21>17>30>28>25>26>22>27>24>29>18>32>0	**20.14***
ครั้งที่ 7	0>1>3>4>5>13>10>11>12>14>16>15>9>8>6>7>2>32>0	16.46	0>19>27>21>18>24>30>17>23>20>26>28>22>31>29>25>32>0	25.11
ครั้งที่ 8	0>1>5>7>6>8>9>15>16>13>10>11>12>14>4>3>2>32>0	16.51	0>30>25>21>26>29>22>24>27>18>19>23>31>28>17>20>32>0	23.85
ครั้งที่ 9	0>1>7>6>9>15>16>14>12>10>11>13>8>5>4>3>2>32>0	16.41	0>26>31>20>29>27>21>17>19>24>30>25>23>28>22>18>32>0	23.29
ครั้งที่ 10	0>7>6>14>13>11>10>12>16>15>9>8>5>1>3>4>2>32>0	16.71	0>17>25>22>27>29>21>30>20>19>24>23>18>28>31>26>32>0	23.94

ตาราง 23 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 3 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 11	0>1>3>4>5>7>6>8>9>15>16>14>12>10>11>13>2>32>0	**16.21***	0>27>30>24>28>26>25>18>19>29>22>21>20>23>31>17>32>0	20.63
ครั้งที่ 12	0>1>3>4>5>7>6>13>10>11>12>14>16>15>9>8>2>32>0	16.41	0>26>24>31>27>19>29>20>21>18>17>22>28>23>30>25>32>0	24.52
ครั้งที่ 13	0>9>15>16>14>12>10>11>13>8>6>7>5>1>4>3>2>32>0	16.66	0>26>19>25>18>29>20>23>24>21>28>31>17>30>22>27>32>0	25.09
ครั้งที่ 14	0>1>3>4>5>7>6>12>11>10>13>14>16>15>9>8>2>32>0	16.41	0>25>26>27>23>20>30>29>22>28>21>17>31>19>24>18>32>0	21.46
ครั้งที่ 15	0>1>3>4>2>5>7>6>12>11>10>13>14>16>15>8>9>32>0	16.41	0>27>20>29>30>25>23>24>26>19>18>22>28>17>31>21>32>0	22.84
ครั้งที่ 16	0>1>3>4>8>9>15>16>14>13>11>10>12>6>7>5>2>32>0	16.41	0>17>25>28>27>19>26>18>24>20>23>21>29>31>22>30>32>0	24.50
ครั้งที่ 17	0>1>13>11>10>12>14>16>15>9>8>6>7>5>4>3>2>32>0	16.36	0>22>18>31>29>21>26>27>24>19>23>30>25>17>28>20>32>0	24.70
ครั้งที่ 18	0>7>6>12>11>10>13>14>16>15>9>8>5>1>3>4>2>32>0	16.61	0>30>27>18>28>24>23>25>21>22>20>29>26>31>17>19>32>0	22.74
ครั้งที่ 19	0>1>7>6>13>11>10>12>14>16>15>9>8>5>4>3>2>32>0	16.36	0>20>30>28>26>24>23>31>21>17>18>27>22>19>29>25>32>0	22.24
ครั้งที่ 20	0>1>7>6>8>9>15>16>14>13>11>10>12>5>4>3>2>32>0	16.41	0>31>18>25>29>27>22>19>24>28>26>21>30>20>23>17>32>0	20.54

การเดินรถเพื่อจัดเก็บขยะของรถคันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 จากการประมวลผล พบว่า การเดินรถในช่วงเช้า มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 1 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 5 มีระยะทาง คือ 17.98 กิโลเมตร และช่วงบ่าย มีเส้นทางที่สั้นที่สุด 1 เส้นทาง คือ ผลลัพธ์จากการประมวลผลครั้งที่ 12 มีระยะทาง คือ 19.86 กิโลเมตร รายละเอียดดังตาราง 24

ตาราง 24 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 4

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 1	0>1>25>26>21>18>3>5>4>6>8>7>11>12>9>10>13>14>15>16>17>2>22>19>20>23>24>33>0	18.37	0>20>30>21>19>25>18>26>22>31>28>27>23>24>32>29>17>33>0	21.77
ครั้งที่ 2	0>1>2>3>5>4>6>7>8>9>10>12>11>13>14>15>16>17>18>19>20>23>22>26>21>25>24>33>0	17.99	0>28>27>17>29>30>25>19>24>21>22>26>18>23>20>31>32>33>0	20.79
ครั้งที่ 3	0>1>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>2>33>0	19.01	0>29>17>25>31>21>32>28>18>23>19>27>26>20>22>30>24>33>0	23.13
ครั้งที่ 4	0>24>25>1>2>26>22>20>19>17>16>3>5>4>6>7>8>9>10>12>11>13>14>15>18>21>23>33>0	18.51	0>31>28>20>32>23>22>19>24>18>25>17>21>29>30>26>27>33>0	22.55
ครั้งที่ 5	0>1>2>17>16>15>14>13>12>10>9>8>7>11>6>4>5>3>18>21>20>19>23>22>26>25>24>33>0	**17.98***	0>17>24>27>19>31>22>23>26>28>21>25>20>18>29>32>30>33>0	22.68
ครั้งที่ 6	0>1>2>22>23>26>21>18>17>16>3>5>4>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>19>20>25>24>33>0	18.29	0>22>26>27>20>25>32>31>29>19>23>24>30>17>18>28>21>33>0	21.93

ตาราง 24 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 4 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 7	0>1>2>17>16>3>5>4>6>7>8>11>12>10>9>13>14>15>18>21>19>20>23>22>26>25>24>33>0	18.06	0>27>32>21>31>29>23>20>30>25>18>22>19>26>24>17>28>33>0	22.88
ครั้งที่ 8	0>1>2>14>13>11>12>10>9>8>7>6>4>5>3>16>15>17>18>21>20>19>23>22>26>25>24>33>0	18.17	0>21>19>26>23>25>31>20>17>29>32>18>30>22>27>28>24>33>0	22.46
ครั้งที่ 9	0>1>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>2>33>0	19.01	0>21>29>20>23>17>31>28>19>22>18>32>25>30>27>26>24>33>0	22.19
ครั้งที่ 10	0>1>2>17>16>3>5>4>6>11>7>8>9>10>12>13>14>15>23>22>26>21>18>19>20>25>24>33>0	18.28	0>24>26>20>32>23>25>19>17>30>31>28>21>22>18>27>29>33>0	20.87
ครั้งที่ 11	0>1>3>5>4>6>7>8>9>10>12>11>13>14>15>16>17>18>21>19>20>23>22>26>2>25>24>33>0	18.35	0>20>19>30>24>17>27>29>32>31>28>26>23>22>21>25>18>33>0	20.14
ครั้งที่ 12	0>1>2>3>5>4>6>7>8>9>10>12>11>13>14>15>16>17>18>19>20>23>22>26>21>25>24>33>0	17.99	0>26>20>22>19>21>30>27>31>28>23>24>25>18>17>29>32>33>0	**19.86***
ครั้งที่ 13	0>1>2>21>17>16>15>14>13>11>12>10>9>8>7>6>4>5>3>18>19>20>23>22>26>25>24>33>0	18.16	0>22>17>24>23>27>25>20>19>18>31>28>26>29>30>32>21>33>0	21.24

ตาราง 24 ลำดับการจัดเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถคันที่ 4 (ต่อ)

จำนวนรอบการประมวลผล	รอบเช้า		รอบบ่าย	
	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทาง (km)
ครั้งที่ 14	0>24>25>26>21>18>19>20>23>22>2>17>16>15>14>13>12>10>9>8>7>11>6>4>5>3>1>33>0	18.59	0>26>30>21>28>25>24>20>18>31>32>29>27>17>23>22>19>33>0	21.05
ครั้งที่ 15	0>1>3>5>4>6>11>7>8>9>10>12>13>14>15>16>17>2>26>22>23>20>19>18>21>25>24>33>0	18.28	0>31>23>18>24>26>27>25>17>30>28>22>20>19>29>21>32>33>0	23.7
ครั้งที่ 16	0>1>2>26>25>21>18>15>14>13>12>10>9>8>7>11>6>4>5>3>16>17>19>20>22>23>24>33>0	18.20	0>26>22>31>29>30>25>20>19>32>21>24>23>27>28>17>18>33>0	20.97
ครั้งที่ 17	0>24>23>22>20>19>15>14>13>12>10>9>8>7>11>6>4>5>3>16>17>18>21>26>2>1>25>33>0	18.40	0>21>19>27>30>24>18>26>32>31>28>25>22>23>17>29>20>33>0	21.57
ครั้งที่ 18	0>1>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>2>33>0	19.01	0>19>20>23>27>26>24>17>30>29>21>22>32>31>28>18>25>33>0	20.26
ครั้งที่ 19	0>1>25>26>2>15>14>13>11>12>10>9>8>7>6>4>5>3>16>17>18>21>20>19>22>23>24>33>0	18.22	0>26>20>17>29>25>24>23>18>31>27>21>22>19>30>28>32>33>0	20.95
ครั้งที่ 20	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>21>20>19>23>22>26>25>24>33>0	18.04	0>28>17>21>20>19>18>26>24>23>22>32>29>27>25>31>30>33>0	20.93

การเปรียบเทียบผลลัพธ์

ในส่วนนี้เป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยฟังก์ชัน Evolutionary ในเครื่องมือ Microsoft Excel Solver ซึ่งจะทำการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะเดิมของทางเทศบาลสุโขทัยธานี แสดงดังตาราง 25 มีรายละเอียดดังนี้

สำหรับรถเก็บขยะคันที่ 1 พบว่า การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาลในช่วงเช้ามีระยะทาง คือ 28.70 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 21.28 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 7.42 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 25.85 และสำหรับช่วงบ่าย การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาล มีระยะทาง คือ 21.60 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 19.17 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 2.43 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 11.25

สำหรับรถเก็บขยะคันที่ 2 พบว่า การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาลในช่วงเช้ามีระยะทาง คือ 17.20 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 14.75กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 2.45 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 14.24 และสำหรับช่วงบ่าย การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาล มีระยะทาง คือ 27.90 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 21.30 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 6.60 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 23.66

สำหรับรถเก็บขยะคันที่ 3 พบว่า การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาลในช่วงเช้ามีระยะทาง คือ 20.50 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 16.21กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 4.29 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 20.93 และสำหรับช่วงบ่าย การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาล มีระยะทาง คือ 26.10 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 20.14 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 5.96 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 22.84

สำหรับรถเก็บขยะคันที่ 4 พบว่า การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาลในช่วงเช้ามีระยะทาง คือ 21.20 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 17.98 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 3.22 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 15.19 และสำหรับช่วงบ่าย การเดินรถจัดเก็บขยะด้วยเส้นทางเดิมของทางเทศบาล มีระยะทาง คือ 21.90 กิโลเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver มีระยะทาง คือ 19.86 กิโลเมตร ซึ่งสามารถลดระยะทางลงได้ 2.04 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 9.32

ตาราง 25 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับผลลัพธ์ที่ได้จาก Solver

รถคันที่	เส้นทาง	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทางรวม (km)	ผลต่าง (km)	คิดเป็นร้อยละ
1 (ช่วงเช้า)	เดิม	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>33>34>0	28.70	7.42	25.85
	ผลจาก Solver	0>1>28>29>23>21>20>19>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>30>24>25>26>4>3>5>6>7>2>8>32>27>33>34>0	21.28		
1 (ช่วงบ่าย)	เดิม	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>34>0	21.60	2.43	11.25
	ผลจาก Solver	0>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>2>7>6>5>3>4>1>34>0	19.17		
2 (ช่วงเช้า)	เดิม	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>32>0	17.20	2.45	14.24
	ผลจาก Solver	0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0>	14.75		
2 (ช่วงบ่าย)	เดิม	0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>0	27.90	6.60	23.66
	ผลจาก Solver	0>17>25>23>31>29>27>28>26>20>30>24>22>21>18>19>32>0	21.30		

ตาราง 25 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับผลลัพธ์ที่ได้จาก Solver (ต่อ)

รถคันที่	เส้นทาง	ลำดับจุดเก็บขยะ	ระยะทางรวม (km)	ผลต่าง (km)	คิดเป็นร้อยละ
3 (ช่วงเช้า)	เดิม	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>32>0	20.50	4.29	20.93
	ผลจาก Solver	0>1>3>4>5>7>6>8>9>15>16>14>12>10>11>13>2>32>0	16.21		
3 (ช่วงบ่าย)	เดิม	0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>0	26.10	5.96	22.84
	ผลจาก Solver	0>23>19>31>20>21>17>30>28>25>26>22>27>24>29>18>32>0	20.14		
4 (ช่วงเช้า)	เดิม	0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>33>0	21.20	3.22	15.19
	ผลจาก Solver	0>1>2>17>16>15>14>13>12>10>9>8>7>11>6>4>5>3>18>21>20>19>23>22>26>25>24>33>0	17.98		
4 (ช่วงบ่าย)	เดิม	0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>33>0	21.90	2.04	9.32
	ผลจาก Solver	0>26>20>22>19>21>30>27>31>28>23>24>25>18>17>29>32>33>0	19.86		

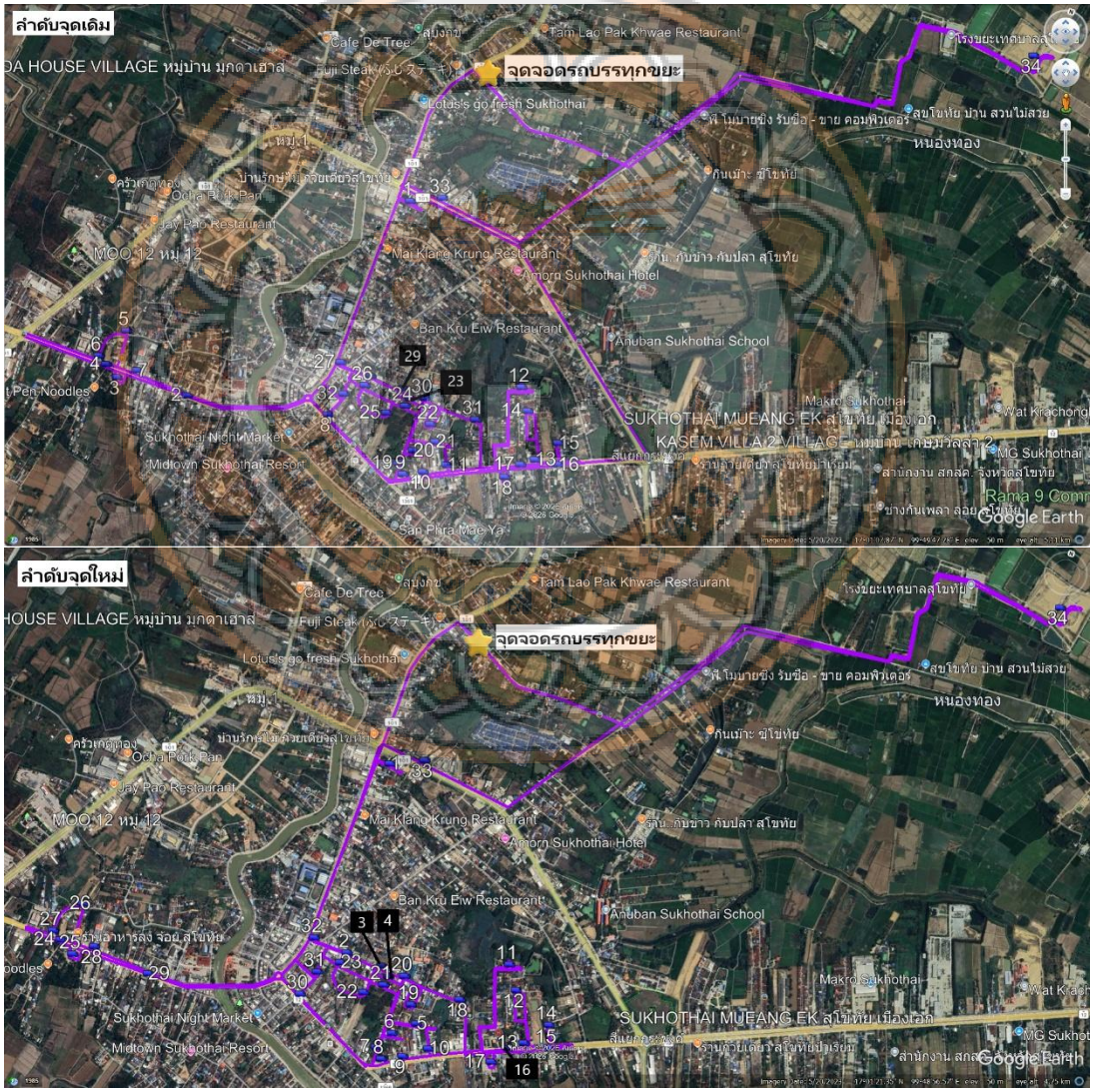
จากผลการวิเคราะห์ สามารถสร้างเส้นทางเพื่อเปรียบเทียบการเดินรถจัดเก็บขยะของเทศบาลในรูปแบบเดิมกับผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Solver โดยแสดงลำดับจุดเก็บขยะทั้ง 2 รูปแบบ แบ่งเป็นช่วงเช้าและบ่าย ดังในตาราง 26 ถึงตาราง 33 และภาพ 10 ถึงภาพ 17 ซึ่งช่วยให้เห็นความแตกต่างของลำดับการเก็บขยะ รวมถึงประสิทธิภาพของเส้นทางที่ได้รับการปรับปรุงอย่างชัดเจน

ตาราง 26 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 1

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	16	หน้า บริษัทโชคชัยมอเตอร์ จำกัด	16	15
1	ในซอยตรงข้าม บริษัทโตโยต้าสุโขทัย	1	1	17	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา	17	16
2	บริษัท อีซูซุ สุโขทัย	2	29	18	ปั๊มคาลเท็กซ์สาขาโชคชัย	18	17
3	ซอยข้างปั๊มเชลล์	3	25	19	ซอยอินทรีย์	19	7
4	สะพานศาลเจ้าพ่อคลองโพธิ์	4	24	20	ซอยอินทรีย์3	20	6
5	ซอยข้างร้าน EZ House & Cafe	5	26	21	ซอยอินทรีย์ ก๋วยเตี๋ยวบ้านทนาย	21	5
6	ปากซอยชุมชนคลองโพธิ์	6	27	22	ซอยบาลเมือง2	22	19
7	ร้าน SCG Home Saeng Uak	7	28	23	ซอยบาลเมือง1	23	4
8	หน้าร้าน VC meat สาขาสุโขทัย	8	30	24	ซอยบาลเมือง1	24	21
9	ข้างร้านแม็คเวิร์ค	9	8	25	ซอยบาลเมือง1	25	22
10	หน้าธนาคารอาคารสงเคราะห์	10	9	26	ซอยบาลเมือง1	26	23
11	หน้าบริเวณ J&T Express	11	10	27	ศูนย์จราจรกลางเมืองสุโขทัย	27	32
12	ร้านอาหารครัวท้ายซอย	12	11	28	ตรงข้ามร้านพรรณเพ็ญอินเตอร์เน็ต	28	2
13	หน้าเบทาโกรสุโขทัย	13	13	29	ตรงข้ามบริษัทฐิติกร จำกัด	29	3
14	ซอยศรีอรุณ สวนกล้วย	14	12	30	หน้าโรงเรียนสารสาสน์วิเทศ	30	20
15	ซอยตาลเดี่ยว	15	14	31	บริษัท สิงห์สุโขทัย จำกัด	31	18

ตาราง 26 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 1 (ต่อ)

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
32	ร้านไฮสคูลเครื่องเขียน	32	31	34	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	34	34
33	บริษัท เอ พี เอส ฮอนด้า	33	33				

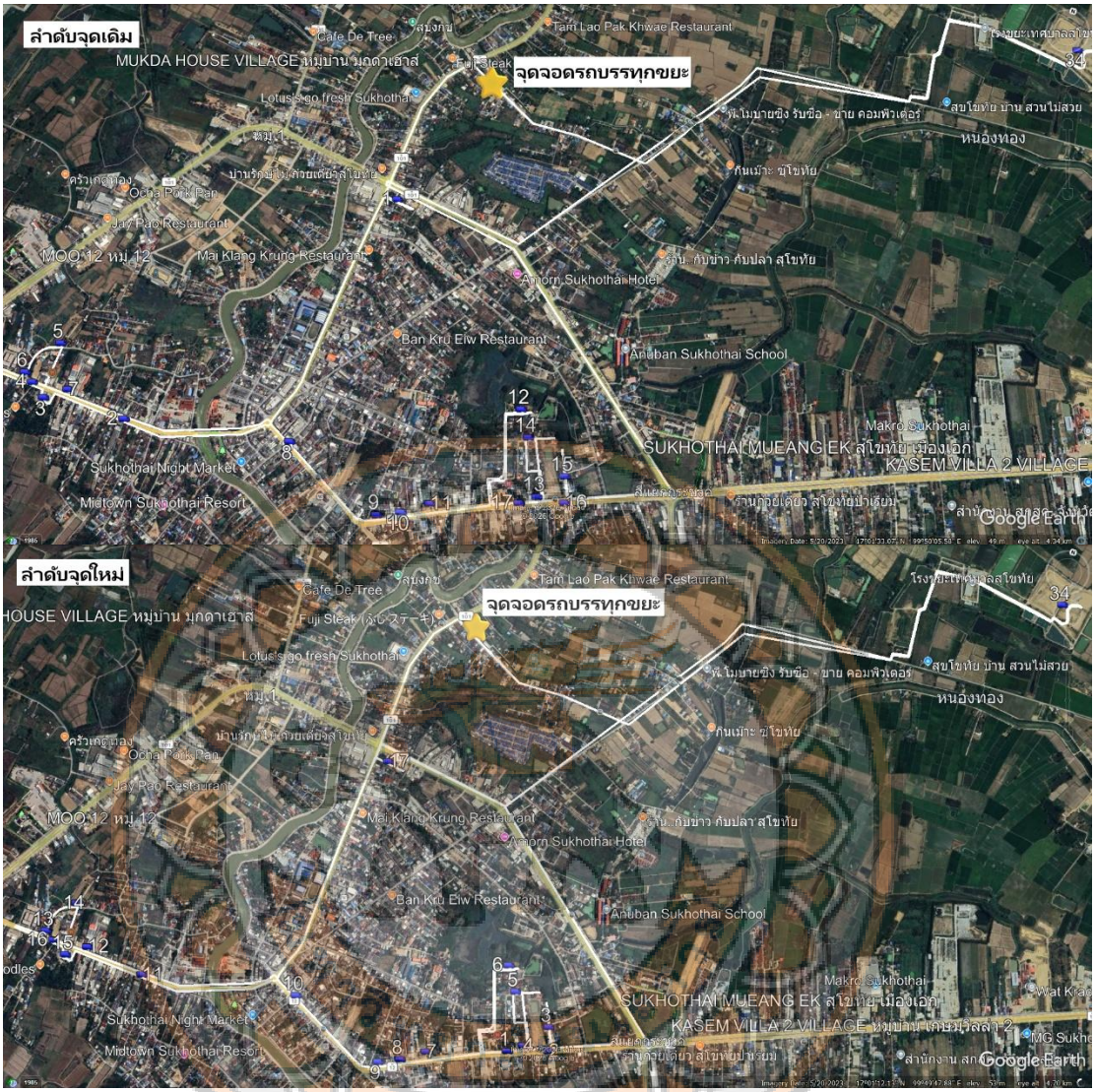


ภาพ 10 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 1

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 27 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 1

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	10	หน้าธนาคารอาคารสงเคราะห์	10	8
1	ในซอยตรงข้าม บริษัท โตโยต้าสุโขทัย	1	17	11	หน้าบริเวณ J&T Express	11	7
2	บริษัท อีซูซุ สุโขทัย	2	11	12	ร้านอาหารครัวท้ายซอย	12	6
3	ซอยข้างปั๊มเชลล์	3	15	13	หน้าเบทาโกร สุโขทัย	13	4
4	สะพานศาลเจ้าพ่อคลองโพธิ์	4	16	14	ซอยศรีอรุณ สวนกล้วย	14	5
5	ซอยข้างร้าน EZ House & Cafe	5	14	15	ซอยตาลเดี่ยว	15	3
6	หน้าซอยชุมชนคลองโพธิ์	6	13	16	หน้า บริษัทโชคชัยมอเตอร์ จำกัด	16	2
7	ร้าน SCG Home Saeng Uak	7	12	17	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา	17	1
8	หน้าร้าน VC meat สาขาสุโขทัย	8	10	34	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	34	34
9	ข้างร้านแม็คเวิร์ค	9	9				



ภาพ 11 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 1

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 28 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 2

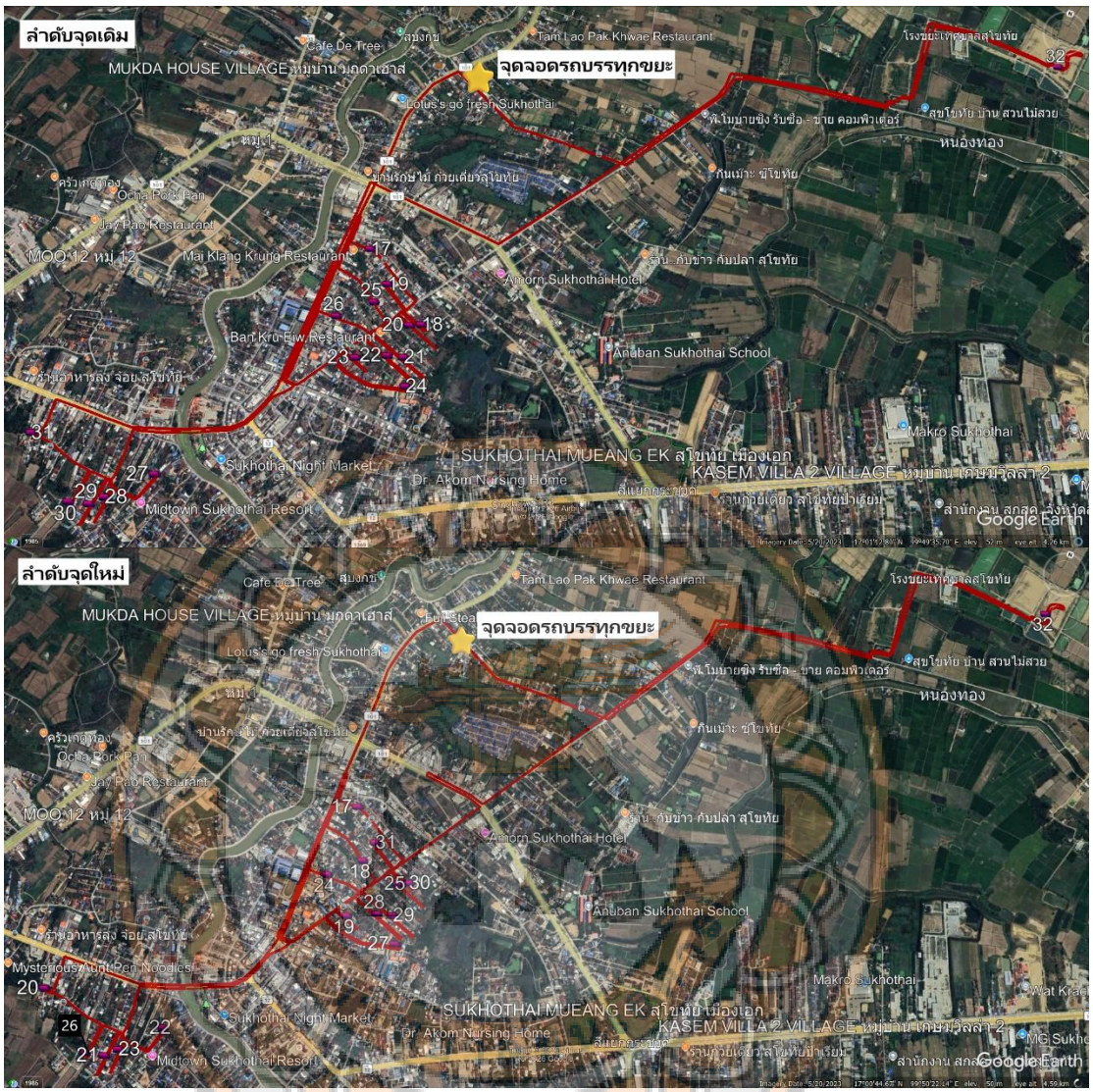
จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	9	Ana Bouetique Mansion	9	9
1	หอพักข้างที่ทำการกองทุนชุมชนวังหิน	1	1	10	หลัง TBL สุโขทัย	10	8
2	ร้านอาหารตามสั่งหน้าการประปา	2	16	11	หน้า Hindo bike	11	7
3	สนามเด็กเล่นชุมชนบางแก้ว	3	13	12	ซอยด้านหลัง Fuji Steak	12	6
4	ซอยจุดสูบน้ำขวัญเรือน	4	12	13	ซอยด้านหลัง Fuji Steak	13	5
5	สภ.อ. เมืองสุโขทัย หน่วยบริการ ปชช. บางแก้ว	5	11	14	ซอยข้าง ร้านกาแฟสด coffee445	14	4
6	7-Eleven สาขา แยกบางแก้ว (10608)	6	10	15	โรงเรียนเทศบาลวัดไทยชุมพล	15	15
7	Lotus’s go fresh Sukhothai	7	2	16	วัดไทยชุมพล	16	14
8	ซอยข้างสำนักงานสรรพสามิตพื้นที่สุโขทัย	8	3	32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	32	32

ภาพ 12 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 2

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 29 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 2

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	25	ถนนประชาสุข	25	18
17	ซอยประชาร่วมใจ	17	17	26	ซอยอินแถม	26	24
18	ซอยพัทรโชติ1	18	30	27	ซอยเลอไท 1	27	22
19	ซอยประชาร่วมมิตร	19	31	28	ถนนเทศบาลพัฒนา1	28	23
20	ซอยทองเนียม	20	25	29	ถนนเทศบาลพัฒนา2	29	21
21	ซอยมหาศรานนท์1	21	29	30	ถนนเทศบาลพัฒนา5	30	26
22	ซอยมหาศรานนท์2	22	28	31	The Nature Resort	31	20
23	ซอยประพันธ์วิทยา	23	19	32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	32	32
24	ซอยสิริร่วมใจ	24	27				

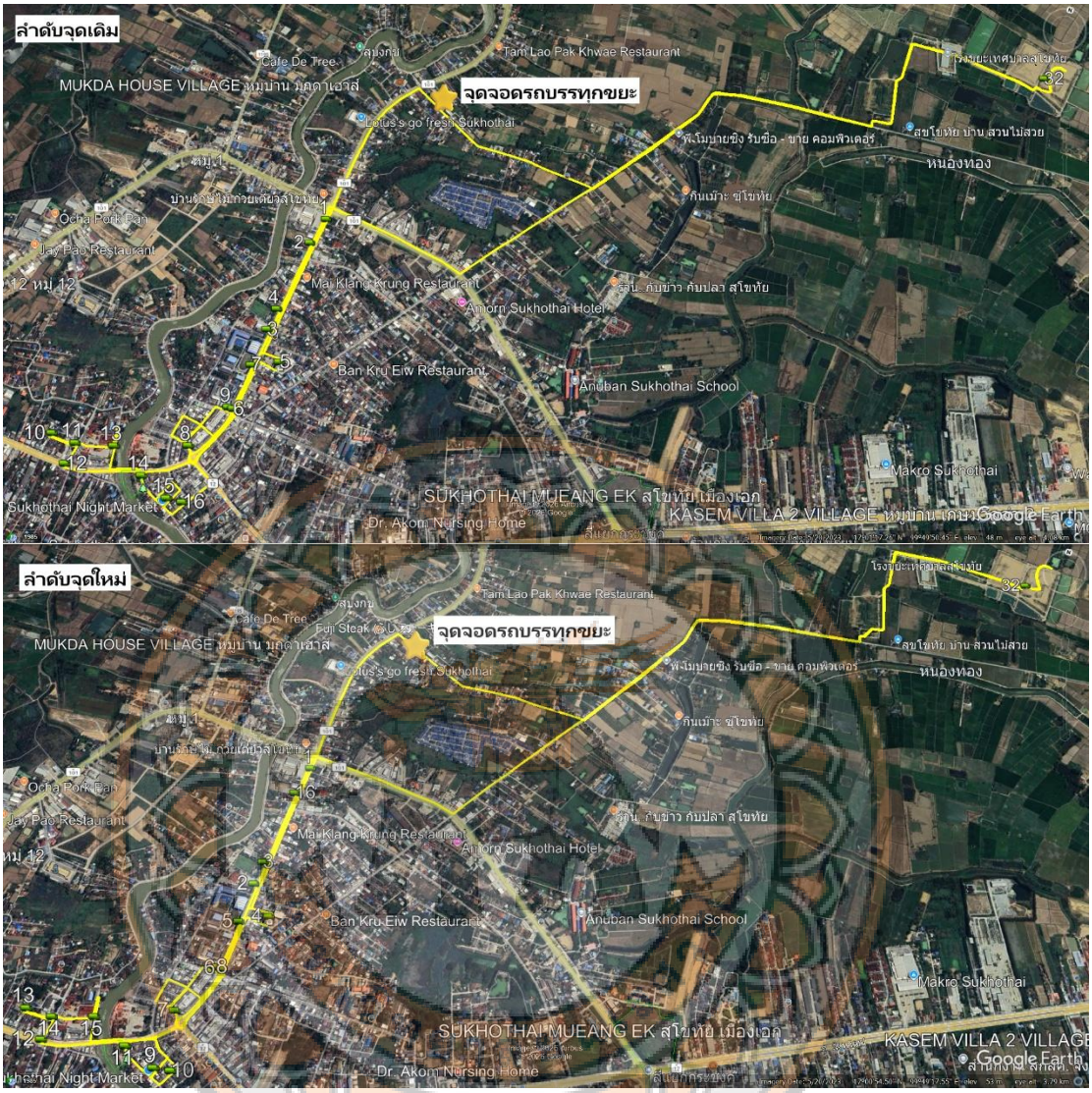


ภาพ 13 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 2

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 30 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 3

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	9	เอ เอ เซ็นเตอร์	9	8
1	บริษัท โตโยต้าสุโขทัย	1	1	10	Blue House Sukhothai	10	13
2	ตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ครูสุโขทัย	2	16	11	หลังวัดคูหาสุวรรณ	11	14
3	โรงเรียนเทศบาลวัดไทยชุมพล	3	2	12	ตำลาว Poo restaurant	12	12
4	วัดไทยชุมพล จ.สุโขทัย	4	3	13	หน้าวัดคูหาสุวรรณ	13	15
5	สำนักงานเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี	5	4	14	ห้องสมุดเฉลิมพระเกียรติ	14	11
6	ร้านทัชชาภรณ์	6	6	15	ถนนประเสริฐพงษ์	15	9
7	โรงเรียนอุดมดรุณี	7	5	16	สุโขทัยกระจกอลูมิเนียม	16	10
8	ตลาดสดเทศบาลเมืองสุโขทัย	8	7	32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	32	32

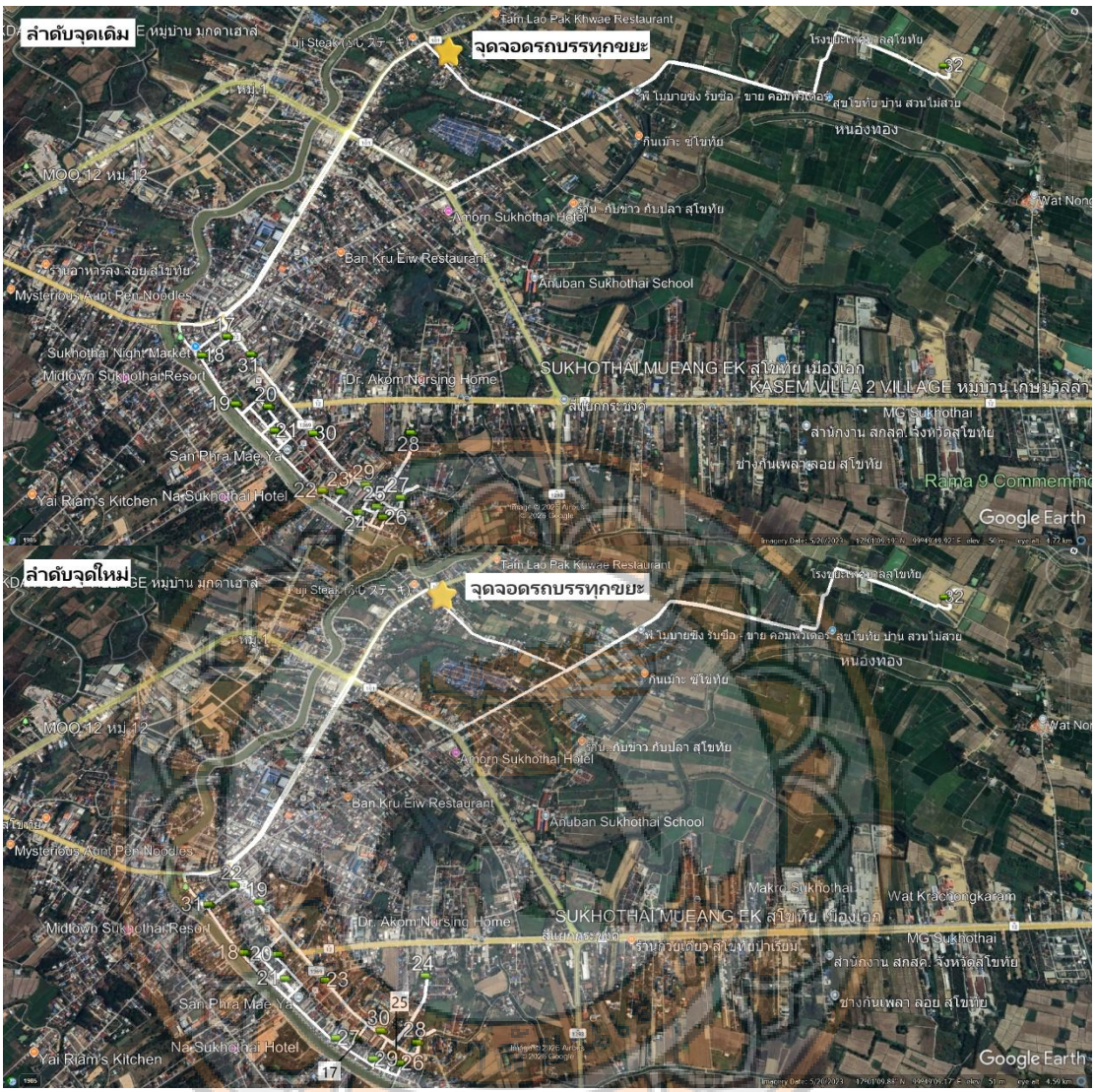


ภาพ 14 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 3

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 31 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 3

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	25	ซอยชุมชนพระแม่ย่า	25	25
17	หลังธนาคารไทยพาณิชย์	17	22	26	ซอยร้านเอส ซี มือถือ	26	26
18	หน้าคลินิกหมอมาโนช	18	31	27	ซอยเจ้าพ่อร่มขาว	27	28
19	Sukhothai Night Market	19	18	28	ซอยรุ่งโรจน์	28	24
20	ถนนสุวรรณเทวี	20	20	29	บ้านพักผู้บัญชาการเรือนจำ	29	30
21	ถนนศรีจุฬาลักษณ์	21	21	30	สถาบันปะปัญญาสุโขทัย	30	23
22	สถานีตำรวจภูธรเมืองสุโขทัย	22	27	31	ธนาคารกรุงเทพ	31	19
23	ซอยข้างสถานีตำรวจ	23	17	32	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	32	32
24	ซอยข้าง EMP Extraction yourself	24	29				



ภาพ 15 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 3

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 32 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงเช้าของคันที่ 4

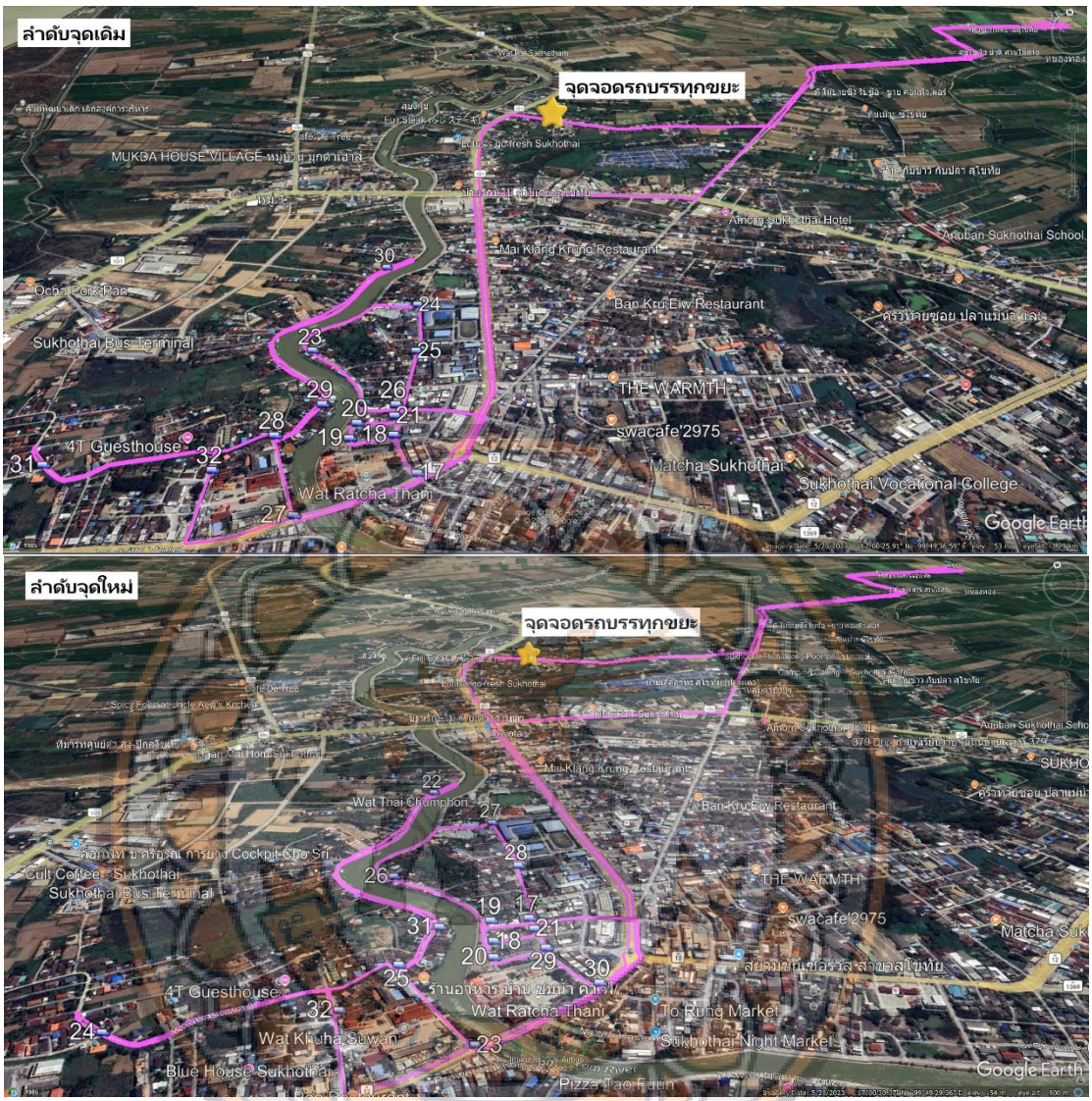
จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	14	Banthai Steak House & Homestay	14	6
1	โรงเรียนกวางตง	1	1	15	ซอย TR Guesthouse	15	5
2	ร้านทับเจริญแก๊ส	2	2	16	เทคนิคดีเซล สุโขทัย	16	4
3	ซอยเลอไท	3	17	17	ถนนราษฎร์อุทิศ	17	3
4	ซอยร้านสุรีรัตน์ Bakery	4	15	18	ถนนราชธานี	18	18
5	สุนทรีย์อพาร์ทเม้นท์	5	16	19	ถนนประพันธ์บำรุง	19	21
6	โรงเรียนเทศบาลเมืองสุโขทัย	6	14	20	ซอยหลัง Café Amazon	20	20
7	ซอยประเวศนคร	7	12	21	ธนาคารอิสลามแห่งประเทศไทย	21	19
8	ฟาร์มหนูพุกยักษ์สุโขทัย	8	11	22	ร้านเฮงเจริญจักรยานเด็ก	22	23
9	วัดศรีเสวตวนาราม	9	10	23	บ้านไส้กรอกน้องหญิง สุโขทัย	23	22
10	เปรมสุขอพาร์ทเมนท์	10	9	24	ถนนวินิจฉัย	24	26
11	ซอยสุกัญญา	11	13	25	ถนนราษฎร์อุทิศ	25	25
12	ซอยสุกัญญา	12	8	26	ร้านเจริญการช่างสุโขทัย	26	24
13	ริมน้ำ การ์เด้น	13	7	33	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	33	33

ภาพ 16 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงเช้าของรถคันที่ 4

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ตาราง 33 ลำดับจุดเก็บขยะแบบเดิมและแบบใหม่ช่วงบ่ายของคันที่ 4

จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่	จุดที่	พื้นที่	ลำดับจุดเดิม	ลำดับจุดใหม่
0	จุดจอดรถบรรทุกขยะ	0	0	25	ถนนราษฎร์อุทิศ	25	28
17	ถนนราษฎร์อุทิศ	17	30	26	ร้านเจริญการช่างสุโขทัย	26	17
18	ถนนราชธานี	18	29	27	วัดคูหาสุวรรณ	27	23
19	ถนนประพันธ์บำรุง	19	20	28	ซอคูหาสุวรรณ	28	25
20	ซอยหลัง Café Amazon	20	18	29	ซอยเทพสุทิน2	29	31
21	ธนาคารอิสลามแห่งประเทศไทย	21	21	30	Sila Resort Sukhothai	30	22
22	ร้านเฮงเจริญจักรยานเด็ก	22	19	31	ซอย Mr.James's Coffee	31	24
23	บ้านไส้กรอกน้องหญิงสุโขทัย	23	26	32	MG Guest House	32	32
24	ถนนวินิจฉัย	24	27	33	โรงขยะเทศบาลสุโขทัย	33	33



ภาพ 17 เปรียบเทียบเส้นทางการจัดเก็บขยะแบบเดิมกับเส้นทางใหม่ช่วงบ่ายของรถคันที่ 4

ที่มา: ผู้วิจัย, 2569

ผลลัพธ์ของเส้นทางการจัดเก็บขยะที่เหมาะสม

ผลลัพธ์ของเส้นทางการจัดเก็บขยะที่เหมาะสมของรถเก็บขยะทั้ง 4 คัน สามารถสรุปเส้นทางได้ดังนี้

รถเก็บขยะคันที่ 1 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 28.70 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>33>34>0 และระยะทางใหม่ 21.28 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>28>29>23>21>20>19>9>10>11>12>14>13>15>16>17>18>31>22>30>24>25>26>4>3>5>6>7>2>8>32>27>33>34>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 7.42 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 25.85 ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 21.60 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>34>0 ระยะทางใหม่ 19.17 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่0>17>16>15>13>14>12>11>10>9>8>2>7>6>5>3>4>1>34>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 2.43 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 11.25

รถเก็บขยะคันที่ 2 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 17.20 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>32>0 ระยะทางใหม่ 14.75 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>7>8>14>13>12>11>10>9>6>5>4>3>16>15>2>32>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 2.45 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 14.24 ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 27.90 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>0 ระยะทางใหม่ 21.30 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่0>17>25>23>31>29>27>28>26>20>30>24>22>21>18>19>19>32>0 ลดลงจากเส้นทางเดิม 6.60 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 23.66

รถเก็บขยะคันที่ 3 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 20.50 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>32>0 ระยะทางใหม่ 16.21 กิโลเมตร เส้นทางเริ่มจากจุด 0>1>3>4>5>7>6>8>9>15>16>14>12>10>11>13>2>32>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 4.29 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 20.93 ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 26.10 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>27>28>29>30>31>32>0 ระยะทางใหม่ 20.14 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>23>19>31>20>21>17>30>28>25>26>22>27>24>29>18>32>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 5.96 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 22.84

รถเก็บขยะคันที่ 4 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 21.20 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>2>3>4>5>6>7>8>9>10>11>12>13>14>15>16>17>18>19>20>21>22>23>24>25>26>33>0 ระยะทางใหม่ 17.98 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>1>2>17>16>15>14>13>12>10>9>8>7>11>6>4>5>3>18>21>20>19>23>22>26>25>24>33>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 3.22 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 15.19 ช่วงบ่าย ระยะทางเดิม 21.90 กิโลเมตร โดยเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>17>18>19>20>21>22>23>24>25>25>26>27>28>29>30>31>32>33>0 ระยะทางใหม่ 19.86 กิโลเมตร ซึ่งเส้นทางเริ่มจากจุดที่ 0>26>20>22>19>21>30>27>31>28>23>24>25>18>17>29>32>33>0 จากการจัดเส้นทางเดินรถเก็บขยะใหม่สามารถลดลงจากเส้นทางเดิม 2.04 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 9.32

การคำนวณอัตราสิ้นเปลืองน้ำมัน

จากการประมวลผลข้อมูลผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้กำหนดสถานการณ์ทดสอบโดยอ้างอิงจากข้อมูลการเดินรถจัดเก็บขยะจริงจำนวน 4 คัน ซึ่งแบ่งการปฏิบัติงานออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือช่วงเช้าและช่วงบ่าย โดยในการทดลองได้ดำเนินการประมวลผลซ้ำจำนวน 20 ครั้ง เพื่อให้นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาใช้เป็นฐานข้อมูลในการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงให้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือสูงสุด

สำหรับการคำนวณอัตราสิ้นเปลืองน้ำมัน ในข้อเท็จจริงรถบรรทุกขยะที่ใช้ปฏิบัติงานทั้ง 3 รุ่น ได้แก่ Isuzu FTR 240, Isuzu FTR 195 และ Hino FC8J จะมีสมรรถนะเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นทางขนส่งเป็นไปภายใต้เกณฑ์มาตรฐานเดียวกัน ผู้วิจัยจึงกำหนดให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 3 กิโลเมตรต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุกในเขตเมือง โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2563) เพื่อใช้เป็นตัวแปรคงที่ในการคำนวณเปรียบเทียบมูลค่าความประหยัดระหว่างเส้นทางปัจจุบันและเส้นทางใหม่ และใช้ราคาน้ำมันดีเซล 40.80 บาท/ลิตร โดยอ้างอิงจาก บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด ณ วันที่ 1 พฤษภาคม 2569 เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ผลครั้งนี้ ซึ่งจากการเปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลืองน้ำมัน สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

รถเก็บขยะคันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 รุ่น Hino FC8J 500 ช่วงเช้ามีระยะทางลดลงมากที่สุดถึง 5.85 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 1.95 ลิตร/วัน คิดเป็นต้นทุนที่ประหยัดได้ 79.50 บาท/วัน หรือ 23,849.64 บาท/ปี ช่วงบ่ายมีระยะทางลดลง 2.25 กิโลเมตร ประหยัดน้ำมันได้0.75 ลิตร/วัน คิดเป็นเงิน 30.54 บาท/วัน หรือ 9,161.64 บาท/ปี เมื่อรวมทั้งเช้าและบ่ายสามารถประหยัดได้ทั้งหมด 33,011.28 บาท/ปี

รถเก็บขยะคันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 รุ่น Isuzu Forward FTR 195 ช่วงเช้ามีระยะทางลดลง 2.31 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 0.77 ลิตร/วัน คิดเป็นต้นทุนที่ประหยัดได้ 31.40 บาท/วัน หรือ 9,420.72 บาท/ปี ช่วงบ่ายมีระยะทางลดลง 3.43 กิโลเมตร ประหยัดน้ำมันได้ 1.14 ลิตร/วัน คิดเป็นเงิน 46.65 บาท/วัน หรือ 13,994.40 บาท/ปี เมื่อรวมทั้งเช้าและบ่ายสามารถประหยัดได้ทั้งหมด 23,415.12 บาท/ปี

รถเก็บขยะคันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 รุ่น Isuzu Forward FTR 240 ช่วงเช้ามีระยะทางลดลง 4.02 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 1.34 ลิตร/วัน คิดเป็นต้นทุนที่ประหยัดได้ 54.71 บาท/วัน หรือ 16,413.84 บาท/ปี ช่วงบ่ายมีระยะทางลดลง 3.27 กิโลเมตร ประหยัดน้ำมันได้ 1.09 ลิตร/วัน คิดเป็นเงิน 44.49 บาท/วัน หรือ 13,345.68 บาท/ปี เมื่อรวมทั้งเช้าและบ่ายสามารถประหยัดได้ทั้งหมด 29,759.52 บาท/ปี

รถเก็บขยะคันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 รุ่น Isuzu Forward FTR 195 ช่วงเช้ามีระยะทางลดลง 2.85 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 0.95 ลิตร/วัน หรือคิดเป็นต้นทุนที่ประหยัดได้ 38.82 บาท/วัน หรือ 11,646.36 บาท/ปี ช่วงบ่ายมีระยะทางลดลง 0.30 กิโลเมตร ประหยัดน้ำมันได้ 0.10 ลิตร/วัน คิดเป็นเงิน 4.13 บาท/วัน หรือ 1,240.32 บาท/ปี เมื่อรวมทั้งเช้าและบ่ายสามารถประหยัดได้ทั้งหมด 12,886.68 บาท/ปี

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ 2 ส่วนประกอบ คือ 1) สรุปผลการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ และ 2) สรุปผลการวิจัยในส่วนของเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดเก็บขยะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

สรุปผลการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ

สรุปผลการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการผ่านฟังก์ชัน Evolutionary ที่อยู่ในเครื่องมือ Microsoft Excel Solver เพื่อประมวลผลหาเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ ซึ่งฟังก์ชัน Evolutionary ได้พัฒนามาจากวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง โดยการจัดลำดับการเดินรถเก็บขยะและระยะทางรวมแต่ละเส้นทางของรถเก็บขยะจำนวน 4 คัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงเช้าและช่วงบ่าย โดยมีรายละเอียดดังนี้

รถเก็บขยะคันที่ 1 มีการประมวลผลหาเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ โดยระยะทางใหม่ที่ได้จากการ Solver ทั้งหมด 20 เส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่สั้นที่สุดช่วงในเช้า และช่วงบ่าย พบว่า ช่วงเช้ามี 3 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 3, 4 และ 5 มีระยะทาง 21.28 กิโลเมตร ช่วงบ่ายมี 4 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 2 3 17 และ 18 มีระยะทาง 19.17 กิโลเมตร

รถเก็บขยะคันที่ 2 มีการประมวลผลหาเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ โดยระยะทางใหม่ที่ได้จากการ Solver ทั้งหมด 20 เส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่สั้นที่สุดในช่วงเช้า และช่วงบ่าย พบว่า ช่วงเช้ามี 13 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 1, 2, 3, 5, 7, 10, 12, 13, 14, 15,16, 17 และ 20 มีระยะทาง 14.75 กิโลเมตร ช่วงบ่าย มี 1 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 5 ระยะทาง 21.30 กิโลเมตร

รถเก็บขยะคันที่ 3 มีการประมวลผลหาเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ โดยระยะทางใหม่ที่ได้จากการ Solver ทั้งหมด 20 เส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่สั้นที่สุดในช่วงเช้า และช่วงบ่าย พบว่า ช่วงเช้า

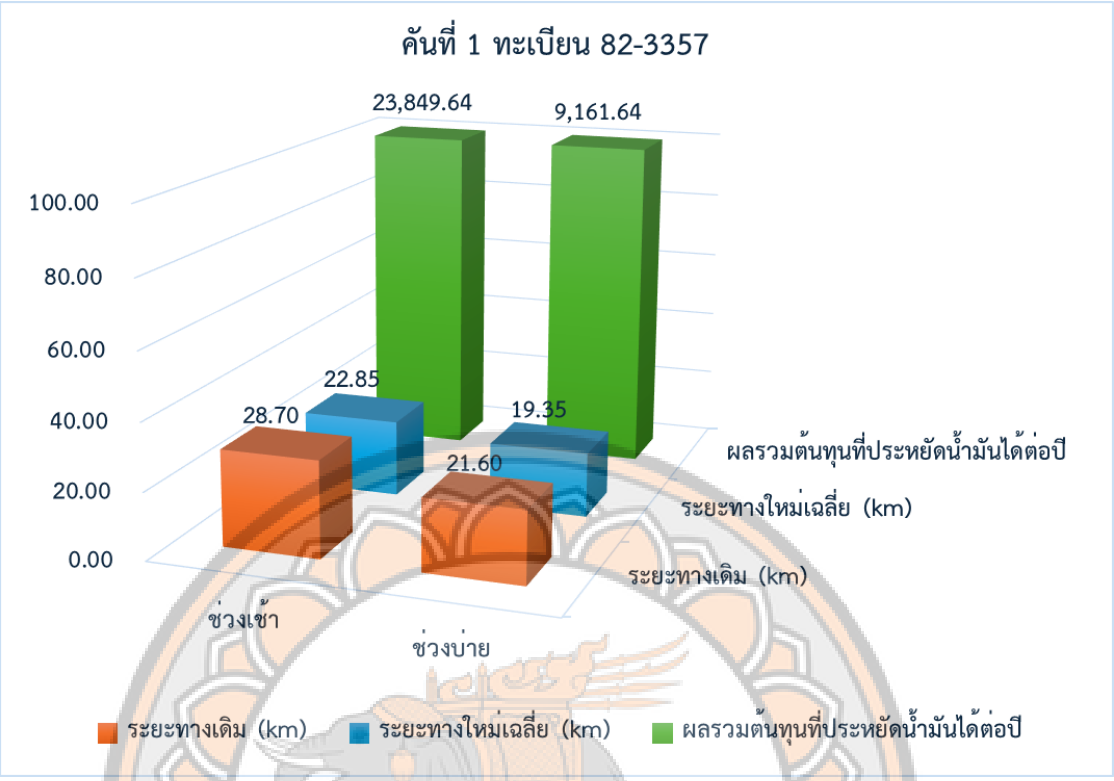
มี 1 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 11 มีระยะทาง 16.21 กิโลเมตร ช่วงบ่าย มี 1 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 6 ระยะทาง 20.14 กิโลเมตร

รถเก็บขยะคันที่ 4 มีการประมวลผลหาเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ โดยระยะทางใหม่ที่ได้จากการ Solver ทั้งหมด 20 เส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่สั้นที่สุดในช่วงเช้า และช่วงบ่าย พบว่า ช่วงเช้า มี 1 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 5 มีระยะทาง 17.98 กิโลเมตร ช่วงบ่าย มี 1 เส้นทาง คือ การประมวลผลครั้งที่ 12 ระยะทาง 19.86 กิโลเมตร

จากผลงานวิจัยในส่วนของการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น ทำให้ทราบถึงระยะทางการดำเนินงานของรถเก็บขยะทั้ง 4 คัน โดยผู้วิจัยมีการปรับข้อตกลงเบื้องต้นเพื่อให้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความสมจริง ซึ่งจากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถช่วยลดความซับซ้อน และลดระยะทางการจัดเก็บขยะได้มากขึ้น

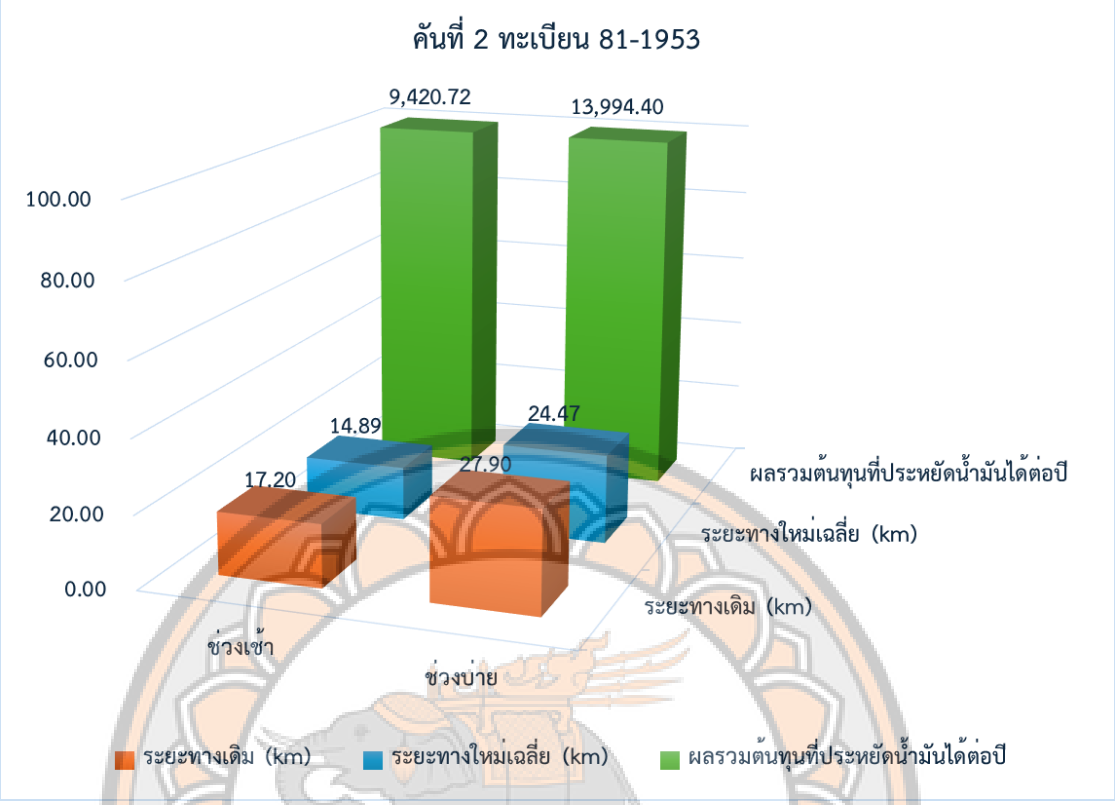
สรุปผลงานวิจัยในส่วนของเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินรถจัดเก็บขยะ

สรุปผลงานวิจัยในส่วนของเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินรถจัดเก็บขยะ จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม Solver ซึ่งเป็น Add-in ที่มีอยู่ใน Microsoft Excel โดยสามารถนำมาใช้ในการประมวลผลค้นหาคำตอบ ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมกับผลลัพธ์ที่ได้จาก Microsoft Excel Solver โดยมีรายละเอียดดังนี้



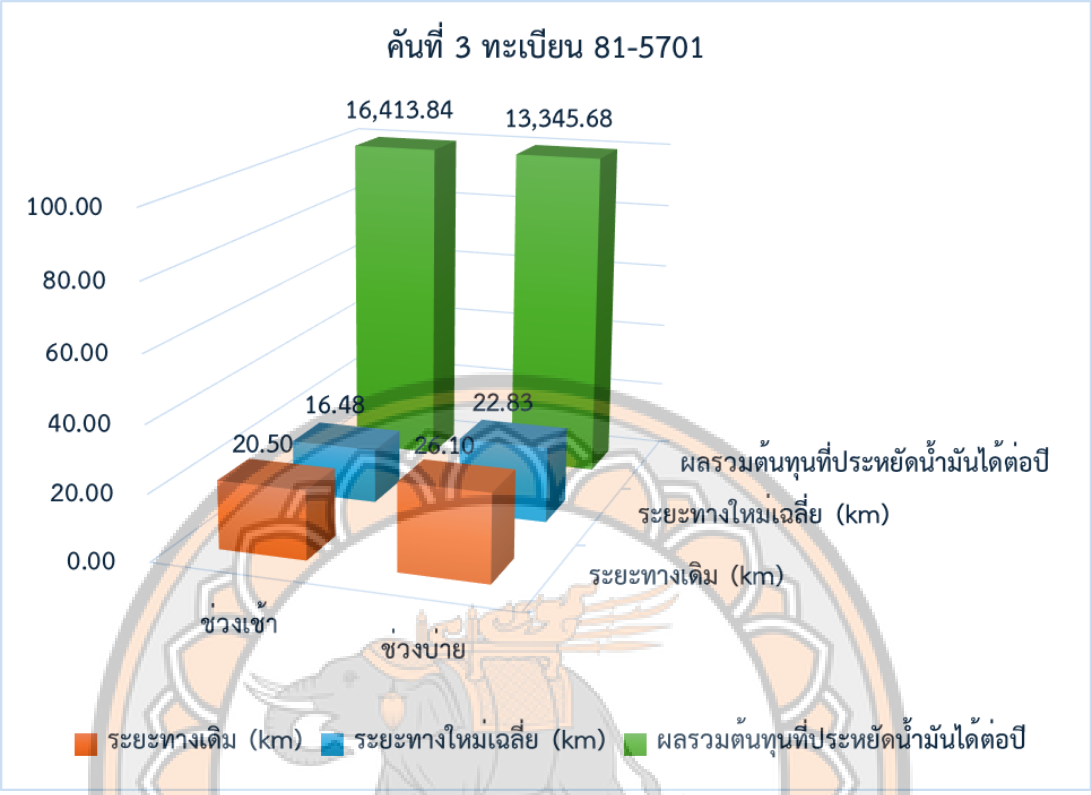
ภาพ 18 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 1

จากภาพ 18 แสดงการเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิม และจากการประมวลผลด้วย Solver ของรถเก็บขยะคันที่ 1 ทะเบียน 82-3357 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 28.70 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 22.85 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 5.85 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 79.50 บาท/วัน คิดเป็น 23,849.64 บาท/ปี ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 21.60 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 19.35 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 2.25 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 30.54 บาท/วัน คิดเป็น 9,161.64 บาท/ปี ซึ่งเมื่อรวมทั้งช่วงเช้าและช่วงบ่ายจะสามารถประหยัดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ทั้งหมด 33,011.28 บาท/ปี จากการศึกษาหากใช้เส้นทางจากการประมวลผลด้วย Solver จะส่งผลให้ใช้ระยะทางสั้นลง และการจัดเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น



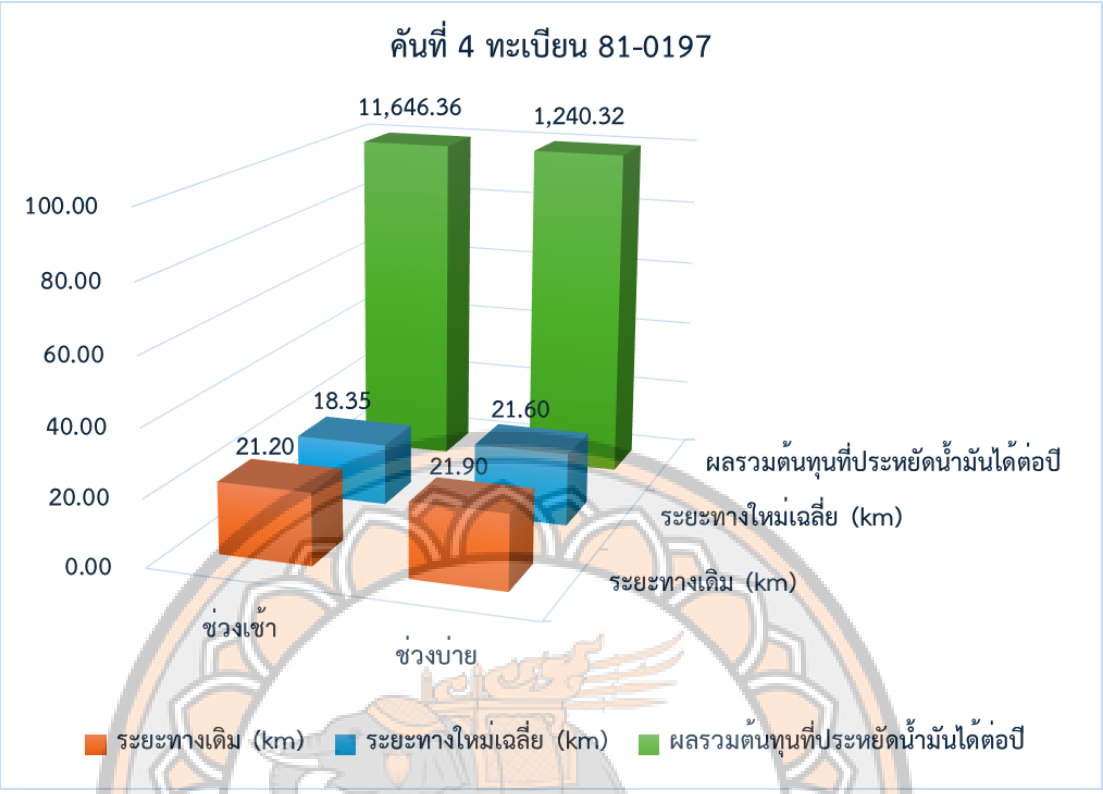
ภาพ 19 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 2

จากภาพ 19 แสดงการเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิม และจากการประมวลผลด้วย Solver ของรถเก็บขยะคันที่ 2 ทะเบียน 81-1953 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 17.20 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 14.89 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 2.31 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 31.40 บาท/วัน คิดเป็น 9,420.72 บาท/ปี ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 27.90 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 24.47 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 3.43 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 46.65 บาท/วัน คิดเป็น 13,994.40 บาท/ปี ซึ่งเมื่อรวมทั้งช่วงเช้าและช่วงบ่ายจะสามารถประหยัดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ทั้งหมด 23,415.12 บาท/ปี จากการศึกษาหากใช้เส้นทางจากการประมวลผลด้วย Solver จะส่งผลให้ใช้ระยะสั้นลง ซึ่งจะช่วยให้การจัดเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีมีประสิทธิภาพ และจัดเก็บขยะได้รวดเร็วขึ้น



ภาพ 20 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 3

จากภาพ 20 แสดงการเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิม และจากการประมวลผลด้วย Solver ของรถเก็บขยะคันที่ 3 ทะเบียน 81-5701 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 20.50 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 16.48 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 4.02 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 54.71 บาท/วัน คิดเป็น 16,413.84 บาท/ปี ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 26.10 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 22.83 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 3.27 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 44.49 บาท/วัน คิดเป็น 13,345.68 บาท/ปี ซึ่งเมื่อรวมทั้งช่วงเช้าและช่วงบ่ายจะสามารถประหยัดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ทั้งหมด 29,759.52 บาท/ปี จากการศึกษาหากใช้เส้นทางจากการประมวลผลด้วย Solver จะช่วยให้การจัดเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีมีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพ 21 การเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิมและระยะทางใหม่ของรถเก็บขยะคันที่ 4

จากภาพ 21 แสดงการเปรียบเทียบระยะทางการเดินรถจัดเก็บขยะแบบเดิม และจากการประมวลผลด้วย Solver ของรถเก็บขยะคันที่ 4 ทะเบียน 81-0197 พบว่า ช่วงเช้าระยะทางเดิม 21.20 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 18.35 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 2.85 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 38.82 บาท/วัน คิดเป็น 11,646.36 บาท/ปี ช่วงบ่ายระยะทางเดิม 21.90 กิโลเมตร ระยะทางจากการประมวลผลด้วย Solver โดยเฉลี่ย 21.60 กิโลเมตร ลดลงจากเส้นทางเดิม 0.30 กิโลเมตร ช่วยประหยัดน้ำมันได้ 4.13 บาท/วัน คิดเป็น 1,240.32 บาท/ปี ซึ่งเมื่อรวมทั้งช่วงเช้าและช่วงบ่ายจะสามารถประหยัดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ทั้งหมด 12,886.68 บาท/ปี ส่งผลให้ใช้ระยะสั้นลงและการจัดเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานีสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ช่วงเวลา

จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม Solver เพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินรถจัดเก็บขยะของรถทั้ง 4 คัน ของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี ผู้วิจัยได้สรุปเส้นทางที่มีความเหมาะสม โดยรถเก็บขยะทุกคันมีระยะทางในการจัดเก็บขยะที่ลดลง ส่งผลให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น เส้นทางการเดินรถมีความต่อเนื่อง ไม่ซ้ำซ้อน และใช้เวลาในการจัดเก็บรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยในภาพรวมเมื่อนำเส้นทางใหม่ไปปรับใช้ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิงได้รวมทั้งสิ้น 99,072 บาทต่อปี ซึ่งถือเป็นการยกระดับการบริหารจัดการทรัพยากรและงบประมาณภาครัฐได้อย่างเป็นรูปธรรม

สำหรับการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากอ้างอิงข้อมูลจากการลงพื้นที่จริงในการปฏิบัติงานของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี ผลลัพธ์ที่ได้จึงสามารถนำมาเป็นข้อเสนอแนะในการปรับปรุงการดำเนินงานให้มีความเหมาะสมกับบริบทของพื้นที่ได้ โดยแบบจำลองนี้ไม่เพียงแต่ทำให้ทราบถึงเส้นทางการเดินรถที่เหมาะสมที่สุด แต่ยังช่วยให้การบริหารจัดการด้านการจัดเก็บขยะของเทศบาลเมืองสุโขทัยธานี ดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในระยะยาว

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษานี้ ผู้วิจัยมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการจัดเก็บข้อมูลน้ำหนักขยะที่เกิดขึ้นจริง จึงจำเป็นต้องใช้การสุ่มค่าปริมาณขยะภายใต้ขอบเขตน้ำหนักต่ำสุดและสูงสุดที่สำรวจพบเป็นข้อมูลนำเข้า ซึ่งอาจส่งผลให้ผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนหากสถานการณ์จริงมีปริมาณขยะนอกเหนือจากช่วงที่กำหนด นอกจากนี้ แบบจำลองยังไม่ได้พิจารณาปัจจัยด้านความหนาแน่นของการจราจร การปิดปรับปรุงเส้นทาง และระยะเวลาในการปฏิบัติงานในแต่ละจุด (Service Time) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของระยะทางและเวลาเดินทาง หากสามารถจัดเก็บและนำข้อมูลเหล่านี้มาประกอบการวิเคราะห์ในอนาคต จะช่วยให้การวางแผนทรัพยากรและการประเมินประสิทธิภาพการปฏิบัติงานมีความสมบูรณ์และสะท้อนสภาพความเป็นจริงได้ดียิ่งขึ้น

ในอนาคตจึงควรบูรณาการเทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณขยะแบบเรียลไทม์เข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับเส้นทางตามสถานการณ์จริง พร้อมทั้งขยายผลการศึกษาโดยนำแนวทางวิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Method) ไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นหรือเพิ่มเงื่อนไขที่มีความซับซ้อน เช่น การจัดการเส้นทางสำหรับยานพาหนะหลายคัน หรือการบริหารจัดการขยะแยกประเภท เพื่อรับมือกับปัญหาที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเส้นตรงได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ควรมีมาตรการส่งเสริมให้พนักงานขับรถนำผลลัพธ์ไปปรับใช้ผ่านการอบรมให้ความรู้ถึงประโยชน์ด้านการลดความเหนื่อยล้าและความปลอดภัยในการใช้เส้นทางที่เหมาะสม เพื่อให้งานวิจัยนี้ถูกนำไปปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรม โดยผลลัพธ์ที่นำเสนอในปัจจุบันถือเป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดลองรันซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้เส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่มีอยู่

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กุสุมา พิริยาพรรณ และ อภิญญา พงษ์ปรีชา. (2568). การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการวางแผนจัดเส้นทางเดินรถจัดเก็บขยะด้วยวิธี Vehicle Routing Problem (VRP): กรณีศึกษาเทศบาลตำบลท่าข้าม จังหวัดฉะเชิงเทรา. วารสารศรีปทุมปริทัศน์ มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, 25(1), 153–156.

กอบการ สมณะ และสิริณี เพ็งม่วง. (2557). การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS)เพื่อการกุหนดเส้นทางเดินรถเก็บขนขยะมูลฝอย ในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก. (วท.บ.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.

กรมการปกครอง. (2566). สถิติการทะเบียนราษฎร. สถิติการทะเบียนราษฎร กรมการปกครอง. เข้าถึงจาก https://stat.bora.dopa.go.th/stat/statnew/statMenu/newStat/home.php

กรมควบคุมมลพิษ. (2565). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2563. Retrieved from https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2021/08/pcdnew-2021-08-27_07-41-26_374623.pdf

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). รายงานเกณฑ์มาตรฐานการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและไฟฟ้าสำหรับหน่วยงานภาครัฐ. กระทรวงพลังงาน. https://www.dede.go.th

กลวัชร จารุพัฒน์. (2567). การเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเส้นทางเดินรถส่งของด้วย Vehicle Routing Problem กรณีศึกษา บริษัทกรอบประตูหน้าต่าง (วท.ม.). มหาวิทยาลัยบูรพา, คณะโลจิสติกส์.

เกศินี สือนิ. (2563). การจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าโดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีเซฟวิ่งอัลกอริทึมและวิธีขั้นตอนวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดอัลกอริทึม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก.

ขวัญข้าว สามารถกุล และคณะ. (2568). การเปรียบเทียบการจัดเส้นทางการขนส่งด้วยวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัดและวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด: กรณีศึกษาโรงน้ำดื่มภูเพชร อำเภอภูกระดึง จังหวัดเลย. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, 3(1), 30–41.

ขวัญชัย ชัยอุดม และ ธีรภัทร ขำศรี. (2563). การวิเคราะห์เส้นทางการขนส่งขยะมูลฝอยด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ กรณีศึกษาเทศบาลเมืองเขาสามยอด จังหวัดลพบุรี. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 15(2), 157–166.

คลอเคลีย วจนะวิชากร และ กนกกาญจน์ ศรีสุรินทร์. (2563). วิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางรถเก็บขยะมูลฝอย: กรณีศึกษา เทศบาลตำบลอุบล จังหวัดอุบลราชธานี. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 11(2), 41–55.

จรรยา ภัทรอาชาชัย. (2548). Data validation and verification. วารสาร DMBNJ, 1(2), 35–40.

ณรุทธ์ สุทธจิตต์. (2560). การทวนสอบ (Verification). เอกสารประกอบการศึกษา. คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัตพร ไชยเสนา. (2560). การจัดเส้นทางการขนส่งด้วยวิธีเมต้าฮิวริสติกส์ กรณีศึกษา บริษัทผู้ให้บริการขนส่งทางด้านโลจิสติกส์. มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์.

ณัฐณพัชร์ กวิพรรธน์. (2557). การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการสำหรับการวิเคราะห์และลดปริมาณรูพรุนในการหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม (วศ.ม), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฏฐ์พัชร์ วณิชย์กุล และ กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ. (2567). การปรับปรุงประสิทธิภาพการขนส่งน้ำดื่มสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ กรณีศึกษา โรงงานน้ำดื่มดีซี. วารสารสหศาสตร์ศรีปทุม ชลบุรี, 10(3), 46–51.

ถนิมนันท์ กล้วยไม้. (2566). การจัดเส้นทางการเดินรถขนส่งสำหรับการเก็บขนขยะมูลฝอย กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลเขาคันทรง จังหวัดชลบุรี. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ทิวากร ทวีทรัพย์. (2561). การศึกษาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางเดินรถดับเพลิงจากสถานีดับเพลิงถึงที่เกิดเหตุ กรณีศึกษา องค์กรบริหารส่วนตำบลดูกอึ่ง อำเภอหนองฮี จังหวัดร้อยเอ็ด. (วศ.ม.), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เทศบาลเมืองสุโขทัยธานี. (2565). สภาพทั่วไป. Retrieved from https://www.sktmun.go.th/condition2.php

ธนโชติ นาชัยพูล และ สุภาวดี สายสนิท. (2562). การปรับปรุงเส้นทางการเดินรถขนส่งครีมบำรุง กรณีศึกษา บริษัท ABC (ประเทศไทย) จำกัด. การประชุมวิชาการ การยกระดับงานวิจัยเพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน ปี 2562 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจักรพงษภูวนารถ.

ธเนศ ทักษิณวราจาร. (2543). การจัดเส้นทางเดินรถด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการกระจายสินค้า [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. คลังปัญญาจุฬาฯ. https://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2000.1099

นริสรา นาคะเมฆ และคณะ. (2568). การจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดส่งพัสดุด้วยโปรแกรม VRP Spreadsheet Solver ของบริษัทกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, 7(1), 31–37.

นฤมล ไชยโคตร และคณะ. (2560). การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฮิวริสติกส์ในการจัดการ การขนส่งสำหรับโรงงาน กรณีศึกษา โรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า. วรสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 12(2).

นฤมล ด่านตระกูล. (2560). พฤติกรรมการจัดการขยะมูลฝอยของประชาชนในองค์การบริหารส่วนตำบลขนงพระ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา. (ร.ม.), มหาวิทยาลัยบูรพา, กลุ่มวิชาการจัดการภาครัฐและภาคเอกชน วิทยาลัยการบริหารรัฐกิจ มหาวิทยาลัยบูรพา.

นวรรณ สืบสายลา. (2561). การจัดเส้นทางการขนส่งปุ๋ยเคมีชีวภาพ โดยใช้ตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขายและปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่ง กรณีศึกษาบริษัท ABC. มหาวิทยาลัยศรีปทุม ขอนแก่น.

นันทวัฒน์ ธรรมสอน และ วรินทร์ วงษ์มณี. (2563). การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งสินค้า กรณีศึกษา บริษัท จำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาทูน่า. การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.

น้ำฝน พาพันธ์ และ ภัทรานัษฐ์ แก้วประดิษ. (2563). การจัดเส้นทางการขนส่งโดยวิธีอัลกอรึทึมแบบประหยัด กรณีศึกษา โรงงานเม็ดพลาสติก. (วศ.ม.), มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

น้ำหวาน พลาก้านตง และ สมบัติ สินธุเชาวน์. (2561). ฮิวริสติกส์สำหรับการจัดเส้นทางการขนสงผลิตภัณฑ์นมโฟร์โมส กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด บ้านแพ้วกรุ๊ป จังหวัดอุบลราชธานี. การประชุมวิชาการขายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2561 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 23-26 กรกฎาคม 2561 อุบลราชธานี.

ปัญญวัฒน์ จันทร์ชัยภักดิ์. (2561). การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถรับส่งนักเรียน กรณีศึกษาโรงเรียนประสิทธิ์ศึกษาสงเคราะห์. (วศ.ม.), มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ปณิตา โสหา และคณะ. (2568). การจัดเส้นทางเดินรถด้วยวิธีฮิวริสติก กรณีศึกษาบริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ เบญจมิตรวิชาการ ครั้งที่ 15. มหาวิทยาลัยธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ปุณยภา สุทธิจำนงค์ และ สุนาริน จันทะ. (2560). การจัดเส้นทางเดินรถขนส่งในการอพยพเมื่อเกิดอุทกภัย โดยการพิจารณาประเภทของผู้ประสบภัย. การจัดเส้นทางเดินรถขนส่งในการอพยพเมื่อเกิดอุทกภัย โดยการพิจารณาประเภทของผู้ประสบภัย, 27(2).

พลอยไพลิน ภูมิโคกรักษ์. (2560). การพัฒนาระบบการจัดเส้นทางการเดินรถขนส่งสินค้าปลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง. (วศ.ม.), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เพชรายุทธ แซ่หลี และคณะ. (2560). การจัดเส้นทางการขนส่งน้ำดื่มโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal.

พรรัตน์ ธำรงวุฒิ และคณะ. (2563). การประยุกต์ใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างกับปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ โดยมีข้อจำกัดด้านกรอบเวลาและความต้องการที่หลากหลาย. RMUTI Journal Science and Technology, 13(1), 75–79.

พิศาล สีนวล. (2559). การใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาจัดสรรทรัพยากรเพื่อลดเวลาในการวางแผนการผลิต (วศ.ม.), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ภคพร ผงทอง. (2561). การวางแผนเส้นทางการขนส่งโดยใช้เซฟวิ่งอัลกอริทึม กรณีศึกษา เส้นทางการขนส่งขยะ เภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี. มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์,

รัตนาพร บุญครอบ และ ชุลีกร ชูโชติถาวร. (2563). การออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเส้นทางการขนส่งตู้แช่เย็น: กรณีศึกษาบริษัท ธัญญทิพย์ เอ็กซ์เพลส จำกัด. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58 สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ, 161–164.

วนัชพร จันทรักษา และ สรรวิทย์ เชื้อพิสุทธิ์กุล. (2561). โปรแกรมจัดเส้นทางขนส่งโดยวิธีแบบประหยัด กรณีศึกษา การขนส่งอาหารทะเลสดไปจุดจำหน่ายตามแหล่งท่องเที่ยวในกรุงเทพฯ และปริมณฑล. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วรพนธ์ ชีววรนนท์ตรี และ ณัฐพล บุญรักษ์ (2561). วิธีฮิวริสติกส์สำหรับการจัดเส้นทางพาหนะเพื่อลดต้นทุนการขนส่ง กรณีศึกษา บริษัทผ้าม่าน. มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร.

วรัทภพ ชัยเนตร. (2556). การออกแบบเส้นทางยานพาหนะ กรณียานพาหนะมีหลายขนาดและหลายเงื่อนไข ด้วยวิธีเมต้าฮิวริสติคส์. (ปร.ด.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.

วิภาวรรณ ด่านกำเนิด และ จิราวรรณ เนียมสกุล. (2563). การวางแผนการขนส่งผลิตภัณฑทางการแพทย์ในโรงพยาบาล กรณีศึกษาโรงพยาบาลรัฐขนาดใหญ่แห่งหนึ่งของประเทศไทย. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุมวิทยาเขตชลบุรี. doi:10.14416

ศักดิ์ดา คำจันทร์ และคณะ. (2567). การจัดเส้นทางและตารางเวลาเดินรถสำหรับการจัดส่งไข่ไก่. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มรภ.พิบูลสงคราม, 6(3), 395–400.

ศิรดา หัสนันท์ และคณะ. (2563). การจัดเส้นทางการเดินรถ กรณีศึกษาบริษัทแปรรูปอาหารทะเล. การประชุมวิชาการระดับนานาชาติและระดับชาติด้านบริหารธุรกิจและการบัญชี 2563.

ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ. (2561). การจัดตารางการผลิตและการบำรุงรักษาสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนด้วยวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์. (ปร.ด.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. (2541). การป้องกันและควบคุมมลพิษ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิวพร สุกสี และ ธาริณี มีเจริญ. (2562). การลดต้นทุนการขนส่งโดยการประยุกต์ใช้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถ: กรณีศึกษา บริษัทจำหน่ายอุปกรณ์ประดับยนต์. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, 9(1), 69–75.

สำนักงานส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นจังหวัดสุโขทัย. (2564). แผนปฏิบัติการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน. Retrieved from http://www.sukhothailocal.go.th/files/com_order/2021-04_37f11a06b051ece.pdf

สุรัญญา สบู่หอม และคณะ. (2564). การจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าโดยใช้วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด กรณีศึกษา การขนส่งแก๊ส LPG แบบบรรจุถัง. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.

สุบัน อุดอนมีไช และ ไพโรจน์ เร้าธนชลกุล. (2565). การจัดเส้นทางยานพาหนะในการจัดเก็บของเสียภายในเขตเทศบาลนครไกสอนพมวิหาน แขวงสะหวันนะเขต สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว. วารสารวิชาการศรีปทุม ชลบุรี, 18(4), 140–145.

สหฤทธิ์ สมีน้อย และคณะ. (2568). การจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง. Journal of Engineering and Digital Technology, 13(1), 98–101.

สุภาพร คำเตจา และคณะ. (2568). การปรับปรุงประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการแมลงวันผลไม้สำหรับการเดินทางของพนักงานขาย. Journal of Logistics and Digital Supply Chain, 3(2), 107–110.

อกนิษฐ์ สันธินาค และ ศิรวดี อรัญนารถ. (2562). การจัดเส้นทางการขนส่งแบบแบ่งส่งสินค้าและรถหลายขนาดด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง กรณีศึกษาบริษัทขนส่งเครื่องดื่ม. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 42(2).

Abdelwali, H. A., Rafik El Shiaty, & Murad, M. M. (2019). Solving a transportation problem: Actual problem.

Allahyari, S., Yaghoubi, S., & Van Woensel, T. (2021). The secure time-dependent vehicle routing problem with uncertain demands. Computers & Operations Research, 131, 105253.

Anagnostopoulou, A., Boile, M., Papargyri, E., & Poulou, M. (2017). An advanced solution approach for energy efficient garbage collection service. Transportation Research Procedia, 24, 362–369.

Bangchak Corporation. (2024). Historical oil prices. Bangchak Corporation. Retrieved May 1, 2026, from https://www.bangchak.co.th/th/oilprice/historical

Belachgar, K. (2017). Vehicle routing problem with distance constraints and clustering (Capstone project final report). School of Science and Engineering, Al Akhawayn University, Morocco.

Blum, C., Puchinger, J., Raidl, G. R., & Roli, A. (2011). Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. Applied Soft Computing, 11(6), 4135–4151.

Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. ACM Computing Surveys, 35(3), 268–308.

Dotoli, M., & Epicoco, N. (2017). A vehicle routing technique for hazardous waste collection. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 9694–9699.

Duan, G., Fan, T., Chen, X., Chen, L., & Ma, J. (2021). A hybrid algorithm on the vessel routing optimization for marine debris collection. Expert Systems with Applications, 182, 115198.

Frontline Systems, Inc. (2026). Excel Solver – Change options for evolutionary solving method. Solver. Retrieved February 19, 2026, from https://www.solver.com/excel-solver-change-options-evolutionary-solving-method

Ghiani, G., Manni, A., Manni, E., & Moretto, V. (2021). Optimizing a waste collection system with solid waste transfer stations. Computers & Industrial Engineering, 161, 107618.

Hino Motors. (2024). Hino 500 FC8J specifications and fuel efficiency. Hino Thailand. Retrieved from https://www.hinothailand.com

Isuzu Motors. (2024). Isuzu Forward FTR 240 specifications and fuel efficiency. Isuzu Thailand. Retrieved from https://www.isuzu.co.th

Isuzu Motors. (2024). Isuzu Forward FTR 195 specifications and fuel efficiency. Isuzu Thailand. Retrieved from https://www.isuzu.co.th

Kyriakidis, E. G., Dimitrakos, T. D., & Karamatsoukis, C. C. (2020). A stochastic single vehicle routing problem with a predefined sequence of customers and

collection of two similar materials. Methodology and Computing in Applied Probability, 22(4), 1559–1582.

Leerojanaprapa, K., Thongmak, J., Disada, T., & Sirikasemsuk, K. (2024). Truck routing for waste collection: A case study of Tha Ruea District, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province. Journal of Science Ladkrabang, 33(1), 79–102. Retrieved from https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science_kmitl/article/view/259221

Lou, C. X., Shuai, J., Luo, L., & Li, H. (2020). Optimal transportation planning of classified domestic garbage based on map distance. Journal of Environmental Management, 254, 109781.

Liu, D., Li, M., Lei, Y., Yu, P., Li, B., & Tang, S. (2026). Research on joint vehicle routing optimization considering multiple distribution centers. PLOS ONE, 21(1), e0331578.

Madankumar, S., & Rajendran, C. (2019). A mixed integer linear programming model for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup by heterogeneous vehicles, and constrained by time windows. Sadhana, 44(2).

Meraliyev, M., Turan, C., Kadyrov, S., & Sadyk, U. (2025). A comprehensive survey of methods and challenges of vehicle routing problem with uncertainties. Mathematics, 13(23), 3782.

Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ahmad, M. S., & Ibrahim, D. A. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution. Journal of Computational Science, 21, 255–262.

Tanoumand, N., & Unluyurt, T. (2021). An exact algorithm for the resource constrained home health care vehicle routing problem. Annals of Operations Research, 304(1–2), 397–425.

Taptajani, D. S., Aulawi, H., Mauluddin, Y., & Cahyadi, U. (2019). Optimization analysis of route determination and trash distribution policy in Garut City. Journal of Physics: Conference Series, 1402(2), 022039.

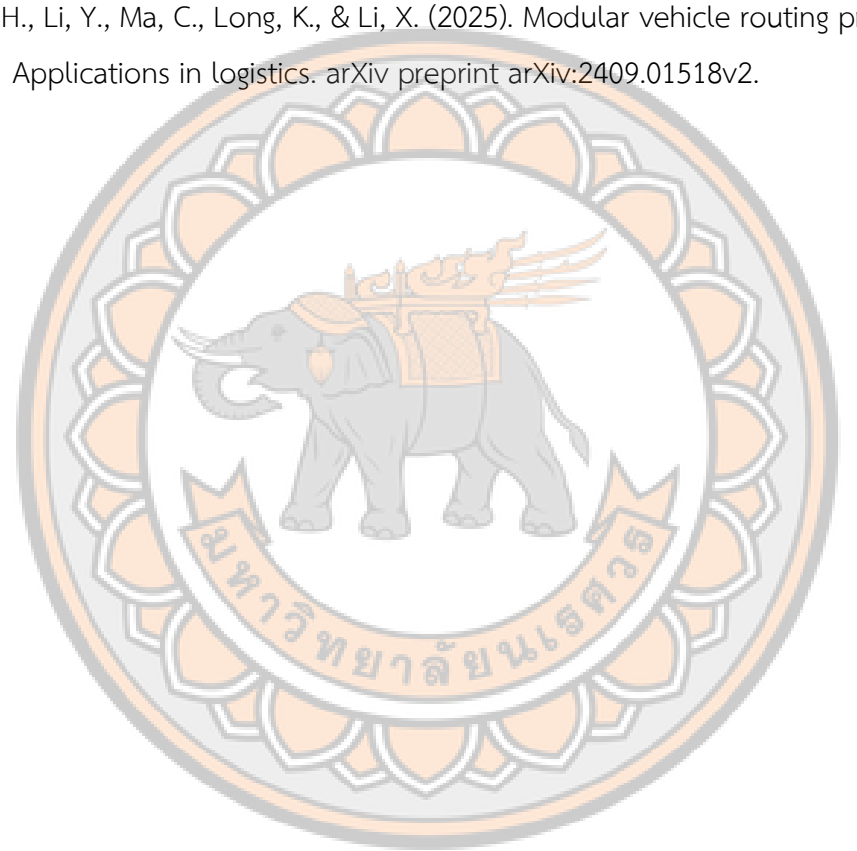
Talbi, E. G. (2009). Metaheuristics: From design to implementation. Wiley.

Toth, P., & Vigo, D. (2002). The vehicle routing problem. Philadelphia: SIAM.

Wongsinlatam, W., & Thanasate-angkool, A. (2020). Finding the shortest route of waste collection by metaheuristic algorithms using SCILAB. Paper presented at the 2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE).

Zhang, Y., Wei, Y., Zhang, B., Wu, Y., & Pan, S. (2026). Fuzzy optimization of municipal solid waste collection routing under uncertain emissions. Scientific Reports, 16, 4857.

Zhou, H., Li, Y., Ma, C., Long, K., & Li, X. (2025). Modular vehicle routing problem: Applications in logistics. arXiv preprint arXiv:2409.01518v2.



ภาคผนวก

ตาราง 34 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
0	0	1.00	2.90	3.30	3.30	3.50	3.75	3.10	2.30	2.80	2.90	3.10	3.55	3.50	3.82	3.76	3.40	3.20	3.20	2.80	2.80	2.80	2.60	2.40	2.40	2.40	2.20	1.90	2.10	2.30	2.40	2.70	2.20	1.10	3.70
1	1.00	0	1.97	2.37	2.37	2.57	2.82	2.17	1.37	1.87	1.97	2.17	2.62	2.57	2.89	2.83	2.47	2.27	2.27	1.87	1.87	1.87	1.67	1.47	1.47	1.47	1.27	0.97	1.17	1.37	1.47	1.77	1.27	0.40	4.30
2	2.90	1.97	0	0.40	0.40	0.60	0.85	0.20	0.85	1.40	1.50	1.66	2.46	2.10	2.42	2.31	2.50	2.17	2.36	1.40	1.54	1.70	1.70	1.40	1.40	1.40	1.20	1.00	1.20	1.30	1.50	1.80	1.00	2.37	6.27
3	3.30	2.37	0.40	0	0.14	0.26	0.59	0.20	1.25	1.80	1.90	2.06	2.86	2.50	2.82	2.71	2.90	2.57	2.76	1.80	1.94	2.10	2.10	1.80	1.80	1.80	1.60	1.40	1.60	1.70	1.90	2.20	1.40	2.77	6.67
4	3.30	2.37	0.40	0.14	0	0.60	0.45	0.67	1.30	1.85	1.95	2.11	2.91	2.55	2.87	2.76	2.95	2.62	2.81	1.85	1.99	2.15	2.15	1.85	1.85	1.85	1.65	1.45	1.65	1.75	1.95	2.25	1.45	2.82	6.72
5	3.50	2.57	0.60	0.26	0.60	0	0.23	0.45	1.45	2.00	2.10	2.26	3.06	2.70	3.02	2.91	3.10	2.77	2.96	2.00	2.14	2.30	2.30	2.00	2.00	2.00	1.80	1.60	1.80	1.90	2.10	2.40	1.60	2.97	6.87
6	3.75	2.82	0.85	0.59	0.45	0.23	0	0.22	1.40	1.95	2.05	2.21	3.01	2.65	2.97	2.86	3.05	2.72	2.91	1.95	2.09	2.25	2.25	1.95	1.95	1.95	1.75	1.55	1.75	1.85	2.05	2.35	1.55	2.92	6.82
7	3.10	2.17	0.20	0.20	0.67	0.45	0.22	0	1.15	1.70	1.80	1.96	2.76	2.40	2.72	2.61	2.80	2.47	2.66	1.70	1.84	2.00	2.00	1.70	1.70	1.70	1.50	1.30	1.50	1.60	1.80	2.10	1.30	2.67	6.57
8	2.30	1.37	0.85	1.25	1.30	1.45	1.40	1.15	0	0.52	0.62	0.78	1.58	1.22	1.54	1.43	1.62	1.29	1.48	0.52	0.66	0.82	0.95	0.62	0.57	0.57	0.32	0.40	0.37	0.57	0.72	1.02	0.12	1.68	5.58
9	2.80	1.87	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.52	0	0.10	0.26	1.06	0.70	1.02	0.91	1.10	0.77	0.96	1.40	1.30	0.40	1.00	1.10	1.10	1.30	1.40	1.50	1.30	1.11	1.00	0.65	1.50	2.60	6.50
10	2.90	1.97	1.50	1.90	1.95	2.10	2.05	1.80	0.62	0.10	0	0.16	0.96	0.60	0.92	0.81	1.00	0.67	0.86	1.30	1.20	0.30	0.90	1.00	1.00	1.20	1.30	1.40	1.20	1.01	0.90	0.55	1.40	2.67	6.57
11	3.10	2.17	1.66	2.06	2.11	2.26	2.21	1.96	0.78	0.26	0.16	0	0.80	0.44	0.76	0.65	0.84	0.51	0.70	1.14	1.04	0.14	0.74	0.84	0.84	1.04	1.14	1.24	1.04	0.85	0.74	0.39	1.24	2.51	6.41
12	3.55	2.62	2.46	2.86	2.91	3.06	3.01	2.76	1.58	1.06	0.96	0.80	0	0.75	1.05	0.95	1.10	0.87	1.07	1.22	1.35	1.55	1.25	1.30	1.35	1.55	1.62	1.75	1.52	1.30	1.20	0.90	1.75	2.95	6.95
13	3.50	2.57	2.10	2.50	2.55	2.70	2.65	2.40	1.22	0.70	0.60	0.44	0.75	0	0.30	0.22	0.38	0.14	0.35	0.87	1.00	1.20	0.90	0.95	1.00	1.20	1.27	1.40	1.17	0.95	0.85	0.55	1.40	2.40	6.80
14	3.82	2.89	2.42	2.82	2.87	3.02	2.97	2.72	1.54	1.02	0.92	0.76	1.05	0.30	0	0.54	0.70	0.46	0.67	1.19	1.32	1.52	1.22	1.27	1.32	1.52	1.59	1.72	1.49	1.27	1.17	0.87	1.72	2.72	7.12
15	3.76	2.83	2.31	2.71	2.76	2.91	2.86	2.61	1.43	0.91	0.81	0.65	0.95	0.22	0.54	0	0.31	0.51	0.79	1.31	1.44	1.64	1.34	1.39	1.44	1.64	1.71	1.84	1.61	1.39	1.29	0.99	1.84	2.36	6.76
16	3.40	2.47	2.50	2.90	2.95	3.10	3.05	2.80	1.62	1.10	1.00	0.84	1.10	0.38	0.70	0.31	0	0.24	0.45	0.97	1.10	1.30	1.00	1.05	1.10	1.30	1.37	1.50	1.27	1.05	0.95	0.65	1.50	2.55	6.80
17	3.20	2.27	2.17	2.57	2.62	2.77	2.72	2.47	1.29	0.77	0.67	0.51	0.87	0.14	0.46	0.51	0.24	0	0.19	0.74	0.87	1.07	0.77	0.82	0.87	1.07	1.14	1.27	1.04	0.82	0.72	0.42	1.27	2.63	6.63
18	3.20	2.27	2.36	2.76	2.81	2.96	2.91	2.66	1.48	0.96	0.86	0.70	1.07	0.35	0.67	0.79	0.45	0.19	0	0.72	0.85	1.05	0.75	0.80	0.85	1.05	1.12	1.25	1.02	0.80	0.70	0.40	1.25	2.61	6.61
19	2.80	1.87	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.52	0.11	0.22	0.35	1.22	0.87	1.19	1.31	0.97	0.74	0.72	0	0.14	0.30	0.40	0.40	0.40	0.55	0.70	0.85	0.70	0.50	0.35	0.70	1.00	2.10	6.20
20	2.80	1.87	1.54	1.94	1.99	2.14	2.09	1.84	0.66	0.25	0.35	0.51	1.35	1.00	1.32	1.44	1.10	0.87	0.85	0.14	0	0.26	0.55	0.40	0.35	0.50	0.60	0.85	0.65	0.45	0.35	0.65	0.95	2.10	6.10
21	2.80	1.87	1.70	2.10	2.15	2.30	2.25	2.00	0.82	0.40	0.50	0.30	1.55	1.20	1.52	1.64	1.30	1.07	1.05	0.30	0.26	0	0.56	0.40	0.35	0.50	0.60	0.85	0.70	0.50	0.35	0.65	0.95	2.20	6.10
22	2.60	1.67	1.70	2.10	2.15	2.30	2.25	2.00	0.95	0.50	0.60	0.55	1.25	0.90	1.22	1.34	1.00	0.77	0.75	0.40	0.55	0.56	0	0.30	0.36	0.52	0.60	0.70	0.50	0.30	0.21	0.35	0.80	2.00	6.00
23	2.40	1.47	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.62	1.10	1.00	0.84	1.30	0.95	1.27	1.39	1.05	0.82	0.80	0.40	0.40	0.40	0.30	0	0.22	0.22	0.30	0.45	0.40	0.22	0.10	0.40	0.50	1.80	5.70
24	2.40	1.47	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.57	1.10	1.00	0.84	1.35	1.00	1.32	1.44	1.10	0.87	0.85	0.40	0.35	0.35	0.36	0.22	0	0.16	0.25	0.45	0.35	0.28	0.15	0.45	0.45	1.70	5.80
25	2.40	1.47	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.57	1.30	1.20	1.04	1.55	1.20	1.52	1.64	1.30	1.07	1.05	0.55	0.50	0.50	0.52	0.22	0.16	0	0.25	0.45	0.35	0.43	0.30	0.60	0.45	1.70	5.80
26	2.20	1.27	1.20	1.60	1.65	1.80	1.75	1.50	0.32	1.40	1.30	1.14	1.62	1.27	1.59	1.71	1.37	1.14	1.12	0.70	0.60	0.60	0.60	0.30	0.25	0.25	0	0.22	0.10	0.29	0.40	0.70	0.21	1.50	5.50
27	1.90	0.97	1.00	1.40	1.45	1.60	1.55	1.30	0.40	1.50	1.40	1.24	1.75	1.40	1.72	1.84	1.50	1.27	1.25	0.85	0.85	0.85	0.70	0.45	0.45	0.45	0.22	0	0.18	0.35	0.50	0.80	0.23	1.30	5.30
28	2.10	1.17	1.20	1.60	1.65	1.80	1.75	1.50	0.37	1.30	1.20	1.04	1.52	1.17	1.49	1.61	1.27	1.04	1.02	0.70	0.65	0.70	0.50	0.40	0.35	0.35	0.10	0.18	0	0.19	0.30	0.60	0.27	1.50	5.50
29	2.30	1.37	1.30	1.70	1.75	1.90	1.85	1.60	0.57	1.11	1.01	0.85	1.30	0.95	1.27	1.39	1.05	0.82	0.80	0.50	0.45	0.50	0.30	0.22	0.28	0.43	0.29	0.35	0.19	0	0.13	0.40	0.45	1.60	5.70
30	2.40	1.47	1.50	1.90	1.95	2.10	2.05	1.80	0.72	1.00	0.90	0.74	1.20	0.85	1.17	1.29	0.95	0.72	0.70	0.35	0.35	0.35	0.21	0.10	0.15	0.30	0.40	0.50	0.30	0.13	0	0.30	0.60	1.80	5.80
31	2.70	1.77	1.80	2.20	2.25	2.40	2.35	2.10	1.02	0.65	0.55	0.39	0.90	0.55	0.87	0.99	0.65	0.42	0.40	0.70	0.65	0.65	0.35	0.40	0.45	0.60	0.70	0.80	0.60	0.40	0.30	0	0.90	2.10	6.10
32	2.20	1.27	1.00	1.40	1.45	1.60	1.55	1.30	0.12	1.50	1.40	1.24	1.75	1.40	1.72	1.84	1.50	1.27	1.25	1.00	0.95	0.95	0.80	0.50	0.45	0.45	0.21	0.23	0.27	0.45	0.60	0.90	0	1.50	5.50
33	1.10	0.40	2.37	2.77	2.82	2.97	2.92	2.67	1.68	2.60	2.67	2.51	2.95	2.40	2.72	2.36	2.55	2.63	2.61	2.10	2.10	2.20	2.00	1.80	1.70	1.70	1.50	1.30	1.50	1.60	1.80	2.10	1.50	0	4.00
34	3.70	4.30	6.27	6.67	6.72	6.87	6.82	6.57	5.58	6.50	6.57	6.41	6.95	6.80	7.12	6.76	6.80	6.63	6.61	6.20	6.10	6.10	6.00	5.70	5.80	5.80	5.50	5.30	5.50	5.70	5.80	6.10	5.50	4.00	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 35 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 1 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	34
0	0	1.00	2.90	3.30	3.30	3.50	3.75	3.10	2.30	2.80	2.90	3.10	3.55	3.50	3.82	3.76	3.40	3.20	3.70
1	1.00	0	1.97	2.37	2.37	2.57	2.82	2.17	1.37	1.87	1.97	2.17	2.62	2.57	2.89	2.83	2.47	2.27	4.30
2	2.90	1.97	0	0.40	0.40	0.60	0.85	0.20	0.85	1.40	1.50	1.66	2.46	2.10	2.42	2.31	2.50	2.17	6.27
3	3.30	2.37	0.40	0	0.14	0.26	0.59	0.20	1.25	1.80	1.90	2.06	2.86	2.50	2.82	2.71	2.90	2.57	6.67
4	3.30	2.37	0.40	0.14	0	0.60	0.45	0.67	1.30	1.85	1.95	2.11	2.91	2.55	2.87	2.76	2.95	2.62	6.72
5	3.50	2.57	0.60	0.26	0.60	0	0.23	0.45	1.45	2.00	2.10	2.26	3.06	2.70	3.02	2.91	3.10	2.77	6.87
6	3.75	2.82	0.85	0.59	0.45	0.23	0	0.22	1.40	1.95	2.05	2.21	3.01	2.65	2.97	2.86	3.05	2.72	6.82
7	3.10	2.17	0.20	0.20	0.67	0.45	0.22	0	1.15	1.70	1.80	1.96	2.76	2.40	2.72	2.61	2.80	2.47	6.57
8	2.30	1.37	0.85	1.25	1.30	1.45	1.40	1.15	0	0.52	0.62	0.78	1.58	1.22	1.54	1.43	1.62	1.29	5.58
9	2.80	1.87	1.40	1.80	1.85	2.00	1.95	1.70	0.52	0	0.10	0.26	1.06	0.70	1.02	0.91	1.10	0.77	6.50
10	2.90	1.97	1.50	1.90	1.95	2.10	2.05	1.80	0.62	0.10	0	0.16	0.96	0.60	0.92	0.81	1.00	0.67	6.57
11	3.10	2.17	1.66	2.06	2.11	2.26	2.21	1.96	0.78	0.26	0.16	0	0.80	0.44	0.76	0.65	0.84	0.51	6.41
12	3.55	2.62	2.46	2.86	2.91	3.06	3.01	2.76	1.58	1.06	0.96	0.80	0	0.75	1.05	0.95	1.10	0.87	6.95
13	3.50	2.57	2.10	2.50	2.55	2.70	2.65	2.40	1.22	0.70	0.60	0.44	0.75	0	0.30	0.22	0.38	0.14	6.80
14	3.82	2.89	2.42	2.82	2.87	3.02	2.97	2.72	1.54	1.02	0.92	0.76	1.05	0.30	0	0.54	0.70	0.46	7.12
15	3.76	2.83	2.31	2.71	2.76	2.91	2.86	2.61	1.43	0.91	0.81	0.65	0.95	0.22	0.54	0	0.31	0.51	6.76
16	3.40	2.47	2.50	2.90	2.95	3.10	3.05	2.80	1.62	1.10	1.00	0.84	1.10	0.38	0.70	0.31	0	0.24	6.80
17	3.20	2.27	2.17	2.57	2.62	2.77	2.72	2.47	1.29	0.77	0.67	0.51	0.87	0.14	0.46	0.51	0.24	0	6.63
34	3.70	4.30	6.27	6.67	6.72	6.87	6.82	6.57	5.58	6.50	6.57	6.41	6.95	6.80	7.12	6.76	6.80	6.63	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 36 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	32
0	0	0.10	1.41	1.60	1.50	1.50	1.00	1.00	1.56	1.82	1.97	1.75	1.80	1.67	1.75	2.00	1.90	3.70
1	0.10	0	1.51	1.70	1.60	1.60	1.10	1.10	1.66	1.92	2.07	1.85	1.90	1.77	1.85	2.10	2.00	3.80
2	1.41	1.51	0	1.60	1.40	1.50	1.00	1.00	1.56	1.82	1.97	1.75	1.80	1.67	1.75	2.00	1.90	3.90
3	1.60	1.70	1.60	0	0.14	0.35	0.45	0.80	0.96	1.05	1.15	1.15	1.20	1.07	1.15	1.50	1.30	4.60
4	1.50	1.60	1.40	0.14	0	0.19	0.31	0.66	0.82	0.91	1.01	1.01	1.06	0.93	1.01	1.36	1.16	4.46
5	1.50	1.60	1.50	0.35	0.19	0	0.12	0.50	0.66	0.75	0.85	0.85	0.90	0.77	0.85	1.10	1.00	4.30
6	1.00	1.10	1.00	0.45	0.31	0.12	0	0.40	0.56	0.65	0.75	0.75	0.80	0.67	0.75	1.45	1.35	4.50
7	1.00	1.10	1.00	0.80	0.66	0.50	0.40	0	0.16	0.25	0.35	0.35	0.40	0.27	0.35	2.25	2.15	5.35
8	1.56	1.66	1.56	0.96	0.82	0.66	0.56	0.16	0	0.26	0.35	0.35	0.40	0.28	0.35	2.20	2.10	5.30
9	1.82	1.92	1.82	1.05	0.91	0.75	0.65	0.25	0.26	0	0.15	0.24	0.35	0.35	0.45	2.00	1.90	4.00
10	1.97	2.07	1.97	1.15	1.01	0.85	0.75	0.35	0.35	0.15	0	0.09	0.20	0.19	0.29	2.05	1.95	4.00
11	1.75	1.85	1.75	1.15	1.01	0.85	0.75	0.35	0.35	0.24	0.09	0	0.10	0.10	0.20	2.14	2.04	4.09
12	1.80	1.90	1.80	1.20	1.06	0.90	0.80	0.40	0.40	0.35	0.20	0.10	0	0.10	0.22	2.25	2.15	4.20
13	1.67	1.77	1.67	1.07	0.93	0.77	0.67	0.27	0.28	0.35	0.19	0.10	0.10	0	0.10	2.24	2.14	4.19
14	1.75	1.85	1.75	1.15	1.01	0.85	0.75	0.35	0.35	0.45	0.29	0.20	0.22	0.10	0	2.30	2.20	4.30
15	2.00	2.10	2.00	1.50	1.36	1.10	1.45	2.25	2.20	2.00	2.05	2.14	2.25	2.24	2.30	0	0.50	5.20
16	1.90	2.00	1.90	1.30	1.16	1.00	1.35	2.15	2.10	1.90	1.95	2.04	2.15	2.14	2.20	0.50	0	4.90
32	3.70	3.80	3.90	4.60	4.46	4.30	4.50	5.35	5.30	4.00	4.00	4.09	4.20	4.19	4.30	5.20	4.90	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 37 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 2 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
0	0	1.30	1.90	1.88	1.87	2.15	2.00	2.00	2.40	1.60	1.70	3.20	3.07	3.10	3.20	3.30	3.70
17	1.30	0	0.55	0.55	0.55	0.80	0.80	0.85	1.20	0.55	0.60	2.15	1.97	2.00	2.15	2.24	5.50
18	1.90	0.55	0	0.27	0.24	0.50	0.50	0.50	0.90	0.35	0.50	2.05	1.87	1.90	2.05	2.14	4.60
19	1.88	0.55	0.27	0	0.26	0.55	0.55	0.55	0.90	0.35	0.50	2.05	1.87	1.90	2.05	2.14	4.60
20	1.87	0.55	0.24	0.26	0	0.45	0.45	0.45	0.85	0.27	0.40	1.95	1.77	1.80	1.95	2.04	4.60
21	2.15	0.80	0.50	0.55	0.45	0	0.40	0.45	0.80	0.40	0.40	1.95	1.77	1.80	1.95	2.04	5.90
22	2.00	0.80	0.50	0.55	0.45	0.40	0	0.35	0.72	0.40	0.35	1.85	1.67	1.70	1.85	1.94	5.90
23	2.00	0.85	0.50	0.55	0.45	0.45	0.35	0	0.50	0.40	0.40	1.65	1.47	1.50	1.65	1.74	5.70
24	2.40	1.20	0.90	0.90	0.85	0.80	0.72	0.50	0	0.80	0.75	1.85	1.67	1.70	1.85	2.04	5.90
25	1.60	0.55	0.35	0.35	0.27	0.40	0.40	0.40	0.80	0	0.40	1.95	1.77	1.80	1.95	2.04	5.50
26	1.70	0.60	0.50	0.50	0.40	0.40	0.35	0.40	0.75	0.40	0	1.75	1.57	1.60	1.75	1.84	5.10
27	3.20	2.15	2.05	2.05	1.95	1.95	1.85	1.65	1.85	1.95	1.75	0	0.30	0.45	0.55	0.70	6.50
28	3.07	1.97	1.87	1.87	1.77	1.77	1.67	1.47	1.67	1.77	1.57	0.30	0	0.28	0.40	0.55	6.40
29	3.10	2.00	1.90	1.90	1.80	1.80	1.70	1.50	1.70	1.80	1.60	0.45	0.28	0	0.40	0.60	6.40
30	3.20	2.15	2.05	2.05	1.95	1.95	1.85	1.65	1.85	1.95	1.75	0.55	0.40	0.40	0	0.50	6.50
31	3.30	2.24	2.14	2.14	2.04	2.04	1.94	1.74	2.04	2.04	1.84	0.70	0.55	0.60	0.50	0	6.60
32	3.70	5.50	4.60	4.60	4.60	5.90	5.90	5.70	5.90	5.50	5.10	6.50	6.40	6.40	6.50	6.60	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 38 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	32
0	0	1.00	2.20	1.70	1.80	1.80	1.90	2.10	2.20	2.50	2.90	2.80	2.70	2.60	2.40	2.50	2.70	3.60
1	1.00	0	1.20	0.75	0.85	0.80	0.95	1.10	1.20	1.50	1.90	1.80	1.70	1.60	1.50	1.50	1.70	5.60
2	2.20	1.20	0	1.10	1.20	1.10	1.20	1.50	1.60	1.90	2.30	2.20	2.10	1.80	1.80	1.80	2.00	4.40
3	1.70	0.75	1.10	0	0.10	1.50	1.70	1.90	2.00	2.30	2.70	2.60	2.50	2.40	2.20	2.20	2.50	4.90
4	1.80	0.85	1.20	0.10	0	1.40	1.60	1.80	1.90	2.20	2.60	2.50	2.40	2.30	2.10	2.20	2.40	4.80
5	1.80	0.80	1.10	1.50	1.40	0	0.35	0.55	0.65	1.00	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	1.00	1.10	5.10
6	1.90	0.95	1.20	1.70	1.60	0.35	0	0.21	0.30	0.60	1.00	0.90	0.80	0.70	0.55	0.55	0.80	5.20
7	2.10	1.10	1.50	1.90	1.80	0.55	0.21	0	0.70	1.00	1.40	1.30	1.20	1.10	0.90	0.90	1.20	5.00
8	2.20	1.20	1.60	2.00	1.90	0.65	0.30	0.70	0	0.30	0.75	0.65	0.55	0.45	0.30	0.35	0.65	5.70
9	2.50	1.50	1.90	2.30	2.20	1.00	0.60	1.00	0.30	0	1.05	0.95	0.85	0.75	0.55	0.55	0.80	5.30
10	2.90	1.90	2.30	2.70	2.60	1.40	1.00	1.40	0.75	1.05	0	0.12	0.20	0.30	0.55	0.72	0.81	6.20
11	2.80	1.80	2.20	2.60	2.50	1.30	0.90	1.30	0.65	0.95	0.12	0	0.10	0.20	0.45	0.62	0.71	6.10
12	2.70	1.70	2.10	2.50	2.40	1.20	0.80	1.20	0.55	0.85	0.20	0.10	0	0.28	0.35	0.52	0.61	6.00
13	2.60	1.60	1.80	2.40	2.30	1.10	0.70	1.10	0.45	0.75	0.30	0.20	0.28	0	0.25	0.42	0.51	5.90
14	2.40	1.50	1.80	2.20	2.10	1.00	0.55	0.90	0.30	0.55	0.55	0.45	0.35	0.25	0	0.17	0.26	5.80
15	2.50	1.50	1.80	2.20	2.20	1.00	0.55	0.90	0.35	0.55	0.72	0.62	0.52	0.42	0.17	0	0.12	5.90
16	2.70	1.70	2.00	2.50	2.40	1.10	0.80	1.20	0.65	0.80	0.81	0.71	0.61	0.51	0.26	0.12	0	5.80
32	3.60	5.60	4.40	4.90	4.80	5.10	5.20	5.00	5.70	5.30	6.20	6.10	6.00	5.90	5.80	5.90	5.80	0

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 39 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 3 ช่วงบ่าย

จาก \ ไป	0	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
0	10,000	2.50	2.70	3.00	2.90	3.00	3.60	3.40	3.80	3.50	3.60	3.60	3.80	3.40	3.00	2.40	3.60
17	2.50	10,000	0.40	0.75	1.25	1.05	1.40	1.50	1.60	1.70	1.70	1.90	1.60	1.20	0.40	0.21	5.70
18	2.70	0.40	10,000	0.35	0.55	0.65	1.00	1.10	1.20	1.30	1.30	1.50	1.70	1.20	2.00	0.40	6.00
19	3.00	0.75	0.35	10,000	0.23	0.30	0.65	0.75	0.85	1.00	1.00	1.20	1.50	0.90	0.60	0.45	6.30
20	2.90	1.25	0.55	0.23	10,000	0.17	0.60	0.70	0.80	1.00	1.00	1.10	1.10	0.75	0.45	0.40	6.20
21	3.00	1.05	0.65	0.30	0.17	10,000	0.45	0.55	0.65	0.80	0.80	1.00	1.10	0.65	0.29	0.55	6.60
22	3.60	1.40	1.00	0.65	0.60	0.45	10,000	0.10	0.20	0.35	0.35	0.50	0.85	0.30	0.50	0.95	6.90
23	3.40	1.50	1.10	0.75	0.70	0.55	0.10	10,000	0.18	0.30	0.35	0.45	0.60	0.21	0.50	1.00	6.70
24	3.80	1.60	1.20	0.85	0.80	0.65	0.20	0.18	10,000	0.13	0.15	0.30	0.50	0.17	0.55	1.10	6.87
25	3.50	1.70	1.30	1.00	1.00	0.80	0.35	0.30	0.13	10,000	0.15	0.20	0.40	0.16	0.55	1.10	6.90
26	3.60	1.70	1.30	1.00	1.00	0.80	0.35	0.35	0.15	0.15	10,000	0.15	0.50	0.25	0.70	1.20	7.00
27	3.60	1.90	1.50	1.20	1.10	1.00	0.50	0.45	0.30	0.20	0.15	10,000	0.50	0.24	0.65	1.20	7.00
28	3.80	1.60	1.70	1.50	1.10	1.10	0.85	0.60	0.50	0.40	0.50	0.50	10,000	0.40	0.85	1.40	7.10
29	3.40	1.20	1.20	0.90	0.75	0.65	0.30	0.21	0.17	0.16	0.25	0.24	0.40	10,000	0.45	0.95	6.70
30	3.00	0.40	2.00	0.60	0.45	0.29	0.50	0.50	0.55	0.55	0.70	0.65	0.85	0.45	10,000	0.65	6.00
31	2.40	0.21	0.40	0.45	0.40	0.55	0.95	1.00	1.10	1.10	1.20	1.20	1.40	0.95	0.65	10,000	5.80
32	3.60	5.70	6.00	6.30	6.20	6.60	6.90	6.70	6.87	6.90	7.00	7.00	7.10	6.70	6.00	5.80	10,000

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 40 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงเช้า

จาก \ ไป	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	33
0	10,000	1.80	2.10	2.90	3.40	3.30	3.50	3.90	4.10	4.40	3.80	3.80	3.70	3.30	3.00	2.80	2.70	2.30	2.40	2.50	2.50	2.30	2.40	2.30	1.80	2.00	2.30	3.80
1	1.80	10,000	0.29	1.10	1.58	1.50	1.70	2.10	2.30	2.60	2.00	2.00	1.90	1.50	1.20	1.00	0.90	0.55	0.60	0.70	0.70	0.85	0.55	1.10	0.70	0.40	0.50	5.40
2	2.10	0.29	10,000	0.80	1.30	1.20	1.40	1.80	1.98	2.30	1.70	1.70	1.53	1.13	0.83	0.64	0.60	0.24	0.30	0.35	0.40	0.30	0.25	0.60	0.40	0.35	0.20	5.70
3	2.90	1.10	0.80	10,000	0.45	0.35	0.75	1.10	1.30	2.00	1.40	1.10	1.20	0.85	0.50	0.35	0.25	0.60	0.70	0.80	0.88	0.80	0.90	1.20	1.25	1.05	0.85	6.20
4	3.40	1.58	1.30	0.45	10,000	0.08	0.50	0.90	1.10	1.70	1.10	0.85	1.00	0.65	0.45	0.65	0.70	1.00	1.13	1.23	1.28	1.20	1.30	1.60	1.65	1.45	1.25	6.60
5	3.30	1.50	1.20	0.35	0.08	10,000	0.42	0.82	1.02	1.62	1.02	0.77	0.92	0.57	0.37	0.57	0.62	0.92	1.05	1.15	1.20	1.12	1.22	1.52	1.57	1.37	1.17	6.52
6	3.50	1.70	1.40	0.75	0.50	0.42	10,000	0.35	0.55	1.20	0.60	0.35	0.45	0.75	0.60	0.75	0.85	1.20	1.33	1.43	1.48	1.40	1.50	1.80	1.85	1.65	1.45	6.80
7	3.90	2.10	1.80	1.10	0.90	0.82	0.35	10,000	0.18	0.90	0.29	0.19	0.30	0.75	0.95	1.10	1.20	1.55	1.68	1.78	1.83	1.75	1.85	2.15	2.20	2.00	1.80	7.15
8	4.10	2.30	1.98	1.30	1.10	1.02	0.55	0.18	10,000	0.95	0.45	0.37	0.48	0.93	1.13	1.28	1.38	1.73	1.86	1.96	2.01	1.93	2.03	2.33	2.38	2.18	1.98	7.33
9	4.40	2.60	2.30	2.00	1.70	1.62	1.20	0.90	0.95	10,000	0.60	0.90	0.75	1.10	1.40	1.60	1.70	2.05	2.18	2.28	2.33	2.25	2.35	2.65	2.70	2.50	2.30	7.70
10	3.80	2.00	1.70	1.40	1.10	1.02	0.60	0.29	0.45	0.60	10,000	0.29	0.17	0.55	0.85	1.00	1.10	1.45	1.58	1.68	1.73	1.65	1.75	2.05	2.10	1.90	1.70	7.10
11	3.80	2.00	1.70	1.10	0.85	0.77	0.35	0.19	0.37	0.90	0.29	10,000	0.12	0.50	0.85	1.00	1.10	1.45	1.58	1.68	1.73	1.65	1.75	2.05	2.10	1.90	1.70	7.10
12	3.70	1.90	1.53	1.20	1.00	0.92	0.45	0.30	0.48	0.75	0.17	0.12	10,000	0.40	0.70	0.90	1.00	1.35	1.48	1.58	1.63	1.55	1.65	1.95	2.00	1.80	1.60	7.00
13	3.30	1.50	1.13	0.85	0.65	0.57	0.75	0.75	0.93	1.10	0.55	0.50	0.40	10,000	0.30	0.50	0.60	0.95	1.08	1.18	1.23	1.15	1.25	1.55	1.60	1.40	1.20	6.60
14	3.00	1.20	0.83	0.50	0.45	0.37	0.60	0.95	1.13	1.40	0.85	0.85	0.70	0.30	10,000	0.19	0.27	0.62	0.75	0.85	0.90	0.82	0.92	1.22	1.27	1.07	0.87	6.27
15	2.80	1.00	0.64	0.35	0.65	0.57	0.75	1.10	1.28	1.60	1.00	1.00	0.90	0.50	0.19	10,000	0.08	0.43	0.56	0.66	0.71	0.63	0.73	1.03	1.08	0.88	0.68	6.08
16	2.70	0.90	0.60	0.25	0.70	0.62	0.85	1.20	1.38	1.70	1.10	1.10	1.00	0.60	0.27	0.08	10,000	0.35	0.48	0.58	0.63	0.55	0.65	0.95	1.00	0.80	0.60	6.00
17	2.30	0.55	0.24	0.60	1.00	0.92	1.20	1.55	1.73	2.05	1.45	1.45	1.35	0.95	0.62	0.43	0.35	10,000	0.13	0.23	0.28	0.20	0.30	0.60	0.65	0.45	0.25	5.60
18	2.40	0.60	0.30	0.70	1.13	1.05	1.33	1.68	1.86	2.18	1.58	1.58	1.48	1.08	0.75	0.56	0.48	0.13	10,000	0.10	0.15	0.06	0.18	0.50	0.50	0.30	0.12	5.60
19	2.50	0.70	0.35	0.80	1.23	1.15	1.43	1.78	1.96	2.28	1.68	1.68	1.58	1.18	0.85	0.66	0.58	0.23	0.10	10,000	0.04	0.15	0.12	0.40	0.60	0.40	0.19	5.70
20	2.50	0.70	0.40	0.88	1.28	1.20	1.48	1.83	2.01	2.33	1.73	1.73	1.63	1.23	0.90	0.71	0.63	0.28	0.15	0.04	10,000	0.10	0.07	0.35	0.55	0.35	0.14	5.60
21	2.30	0.85	0.30	0.80	1.20	1.12	1.40	1.75	1.93	2.25	1.65	1.65	1.55	1.15	0.82	0.63	0.55	0.20	0.06	0.15	0.10	10,000	0.13	0.40	0.45	0.25	0.06	5.60
22	2.40	0.55	0.25	0.90	1.30	1.22	1.50	1.85	2.03	2.35	1.75	1.75	1.65	1.25	0.92	0.73	0.65	0.30	0.18	0.12	0.07	0.13	10,000	0.28	0.50	0.28	0.06	5.60
23	2.30	1.10	0.60	1.20	1.60	1.52	1.80	2.15	2.33	2.65	2.05	2.05	1.95	1.55	1.22	1.03	0.95	0.60	0.50	0.40	0.35	0.40	0.28	10,000	0.45	0.65	0.35	5.50
24	1.80	0.70	0.40	1.25	1.65	1.57	1.85	2.20	2.38	2.70	2.10	2.10	2.00	1.60	1.27	1.08	1.00	0.65	0.50	0.60	0.55	0.45	0.50	0.45	10,000	0.21	0.40	5.10
25	2.00	0.40	0.35	1.05	1.45	1.37	1.65	2.00	2.18	2.50	1.90	1.90	1.80	1.40	1.07	0.88	0.80	0.45	0.30	0.40	0.35	0.25	0.28	0.65	0.21	10,000	0.21	5.30
26	2.30	0.50	0.20	0.85	1.25	1.17	1.45	1.80	1.98	2.30	1.70	1.70	1.60	1.20	0.87	0.68	0.60	0.25	0.12	0.19	0.14	0.06	0.06	0.35	0.40	0.21	10,000	5.50
33	3.80	5.40	5.70	6.20	6.60	6.52	6.80	7.15	7.33	7.70	7.10	7.10	7.00	6.60	6.27	6.08	6.00	5.60	5.60	5.70	5.60	5.60	5.60	5.50	5.10	5.30	5.50	10,000

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 41 เมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดเก็บขยะ รถคันที่ 4 ช่วงบ่าย

ไป / จาก	0	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
0	10,000	2.30	2.40	2.50	2.50	2.30	2.40	2.30	1.80	2.00	2.30	2.60	2.80	3.00	3.75	3.30	3.00	3.80
17	2.30	10,000	0.13	0.23	0.28	0.20	0.30	0.60	0.65	0.45	0.25	0.24	0.49	0.64	1.34	0.99	0.64	5.60
18	2.40	0.13	10,000	0.10	0.15	0.06	0.18	0.50	0.50	0.30	0.12	0.40	0.65	0.80	1.50	1.15	0.80	5.60
19	2.50	0.23	0.10	10,000	0.04	0.15	0.12	0.40	0.60	0.40	0.19	0.50	0.75	0.90	1.60	1.25	0.90	5.70
20	2.50	0.28	0.15	0.04	10,000	0.10	0.07	0.35	0.55	0.35	0.14	0.55	0.80	0.95	1.65	1.30	0.95	5.60
21	2.30	0.20	0.06	0.15	0.10	10,000	0.13	0.40	0.45	0.25	0.06	0.45	0.70	0.85	1.55	1.20	0.85	5.60
22	2.40	0.30	0.18	0.12	0.07	0.13	10,000	0.28	0.50	0.28	0.06	0.55	0.80	0.95	1.65	1.30	0.95	5.60
23	2.30	0.60	0.50	0.40	0.35	0.40	0.28	10,000	0.45	0.65	0.35	0.85	1.10	1.25	1.95	1.60	1.25	5.50
24	1.80	0.65	0.50	0.60	0.55	0.45	0.50	0.45	10,000	0.21	0.40	0.90	1.15	1.30	2.00	1.65	1.30	5.10
25	2.00	0.45	0.30	0.40	0.35	0.25	0.28	0.65	0.21	10,000	0.21	0.70	0.95	1.10	1.80	1.45	1.10	5.30
26	2.30	0.25	0.12	0.19	0.14	0.06	0.06	0.35	0.40	0.21	10,000	0.50	0.75	0.90	1.60	1.25	0.90	5.50
27	2.60	0.24	0.40	0.50	0.55	0.45	0.55	0.85	0.90	0.70	0.50	10,000	0.25	0.40	1.10	0.75	0.40	5.80
28	2.80	0.49	0.65	0.75	0.80	0.70	0.80	1.10	1.15	0.95	0.75	0.25	10,000	0.14	0.90	0.50	0.23	6.05
29	3.00	0.64	0.80	0.90	0.95	0.85	0.95	1.25	1.30	1.10	0.90	0.40	0.14	10,000	0.75	0.60	0.35	6.20
30	3.75	1.34	1.50	1.60	1.65	1.55	1.65	1.95	2.00	1.80	1.60	1.10	0.90	0.75	10,000	1.40	1.10	6.90
31	3.30	0.99	1.15	1.25	1.30	1.20	1.30	1.60	1.65	1.45	1.25	0.75	0.50	0.60	1.40	10,000	0.40	6.60
32	3.00	0.64	0.80	0.90	0.95	0.85	0.95	1.25	1.30	1.10	0.90	0.40	0.23	0.35	1.10	0.40	10,000	6.20
33	3.80	5.60	5.60	5.70	5.60	5.60	5.60	5.50	5.10	5.30	5.50	5.80	6.05	6.20	6.90	6.60	6.20	10,000

หน่วยเป็นกิโลเมตร

ตาราง 42 การคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้

รถ		ระยะทางเดิม (km)	ระยะทางใหม่เฉลี่ย (km)	ผลต่าง (km)	รุ่นรถ	อัตราสิ้นเปลืองเฉลี่ย (กิโลเมตร/ลิตร)	คำนวณปริมาณน้ำมันที่ประหยัดได้ (ลิตร/วัน)	คำนวณต้นทุนที่ประหยัดได้ (บาท/วัน)	ผลรวมต้นทุนที่ประหยัดได้/ปี	ผลรวมต้นทุนที่ประหยัดได้/ปีของรถแต่ละคัน
คันที่ 1 82-3357	เช้า	28.70	22.85	5.85	Hino FC8J 500	3	5.85/3 =1.95	1.95*40.80 =79.50	79.50*300 =23,849.64	23,849.64+9,161.64 =33,011.28
	บ่าย	21.60	19.35	2.25			0.75	30.54	9,161.64	
คันที่ 2 81-1953	เช้า	17.20	14.89	2.31	Isuzu Forward FTR 195	3	0.77	31.40	9,420.72	23,415.12
	บ่าย	27.90	24.47	3.43			1.14	46.65	13,994.40	
คันที่ 3 81-5701	เช้า	20.50	16.48	4.02	Isuzu Forward FTR 240	3	1.34	54.71	16,413.84	29,759.52
	บ่าย	26.10	22.83	3.27			1.09	44.49	13,345.68	
คันที่ 4 81-0197	เช้า	21.20	18.35	2.85	Isuzu Forward FTR 195	3	0.95	38.82	11,646.36	12,886.68
	บ่าย	21.90	21.60	0.30			0.10	4.13	1,240.32	

หมายเหตุ: คำนวณโดยอ้างอิงรอบการทำงาน 300 วันต่อปี

ภาคผนวก ก หนังสือขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

ที่ อว ๐๖๐๓.๐๒/๒๕๙๕

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก
จังหวัดพิษณุโลก ๖๕๐๐๐

๒๘ สิงหาคม ๒๕๖๖

เรื่อง ขออนุญาตเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

เรียน นายกเทศมนตรีเมืองสุโขทัยธานี

สิ่งที่ส่งมาด้วย โครงการวิจัย จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย นางสาวชนัญชิดา บุญคุ้ม รหัสประจำตัวนิสิต ๖๓๐๖๔๐๑๖ นิสิตระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน สังกัดบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การจัดเส้นทางการเดินรถจัดเก็บขยะโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์" โดยมี ดร.ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ เป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ดังกล่าว นิสิตมีความจำเป็นต้องขอเก็บข้อมูลจากหน่วยงานของท่าน บัณฑิตวิทยาลัย จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดอนุญาตให้นิสิตดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล และอำนวยความสะดวกให้แก่นิสิตดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อไป หากมีข้อสงสัยประการใด สามารถสอบถามเพิ่มเติมได้ที่ นางสาวชนัญชิดา บุญคุ้ม หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘ ๒๖๑๕ ๘๗๘๗ ทั้งนี้ บัณฑิตวิทยาลัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดี จึงขอขอบคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อนามัย นาอุดม)
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติราชการแทน
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

งานวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
โทร. ๐ ๕๕๙๖ ๘๗๐๓
โทรสาร ๐ ๕๕๙๖ ๘๘๒๖

คำถามสัมภาษณ์เพื่อใช้เก็บข้อมูลการวิจัย

1. ข้อมูลทั่วไปของหน่วยงาน/ผู้ให้ข้อมูล
    - หน่วยงานที่รับผิดชอบการจัดเก็บขยะคืออะไร
    - จำนวนรถเก็บขยะที่มีอยู่ในปัจจุบัน
    - จำนวนพนักงานที่ปฏิบัติงานต่อวัน
2. ข้อมูลเส้นทางและการปฏิบัติงาน
    - ปัจจุบันมีการกำหนดเส้นทางเก็บขยะอย่างไร (เช่น ตามเขต/ตามถนนหลัก)
    - ระยะเวลาเฉลี่ยในการเก็บขยะต่อรอบ
    - ปัญหาที่พบในการปฏิบัติงาน เช่น รถติด, ถนนแคบ, จุดพักขยะไม่เพียงพอ
3. ปริมาณและลักษณะขยะ
    - ปริมาณขยะเฉลี่ยที่เก็บได้ต่อวัน/ต่อเส้นทาง
    - จุดที่มีปริมาณขยะมากผิดปกติ
4. การบริหารจัดการและต้นทุน
    - ค่าใช้จ่ายหลักในการดำเนินงาน (เชื้อเพลิง, ค่าแรง, ค่าซ่อมบำรุง)
    - วิธีการบันทึกและติดตามข้อมูลการเก็บขยะ
    - ความคาดหวังต่อการปรับปรุงระบบเส้นทาง (เช่น ลดต้นทุน, เพิ่มประสิทธิภาพเวลา)
5. ข้อเสนอแนะ
    - หากมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยปรับเส้นทาง คิดว่าจะเกิดประโยชน์อย่างไร
    - ปัญหาที่อยากให้แก้ไขเป็นอันดับแรก
    - ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากประสบการณ์จริง