

การจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ โดยใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง

สหฤทธิ์ สมน้อย¹ คณาวุฒินภาโชติ² โรจณี หอมชาลี^{3*}

^{1,2}หลักสูตรสาขาวิชาสถิติ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, ประเทศไทย

^{3*}ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : rojanee.h@msu.ac.th

รับต้นฉบับ : 26 มิถุนายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 22 กรกฎาคม 2567; ตอรับบทความ : 25 กรกฎาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะสำหรับหน่วยงานองค์การบริหารส่วนตำบล โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (Clarke-Wright Savings Algorithm: CW) และขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง (Modified CW) เพื่อให้ได้เส้นทางที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกของรถและเวลาในการทำงานของพนักงานต่อวัน แต่สามารถรวบรวมและขนส่งขยะของทุกหมู่บ้านในพื้นที่รับผิดชอบของหน่วยงานไปกำจัดได้ทั้งหมดในแต่ละสัปดาห์ ผลการวิจัย พบว่า ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ที่มีค่าพารามิเตอร์แลมบ์ดา ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 ให้ผลการจัดเส้นทางที่มีระยะทางรวมและค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา โดยใช้เวลาในการดำเนินงานทั้งหมดเพียง 4 วันทำการของสัปดาห์ มีระยะทางรวมลดลงร้อยละ 1 และค่าใช้จ่ายรวมลดลงร้อยละ 18.83 ทำให้หน่วยงานการศึกษาสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 1,805.99 บาทต่อสัปดาห์

คำสำคัญ : การรวบรวมและขนส่งขยะ ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด การจัดเส้นทางยานพาหนะ

Vehicle Routing for Garbage Collection and Transportation Using Saving Algorithm and Modified Saving Algorithm

Saharit Sameenoi¹ Khanawut Napachot² Rojanee Homchalee^{3*}

^{1,2}Program in Statistics, Department of Mathematics, Faculty of Science, Maharakham University,
Maha Sarakham, Thailand

^{3*}Department of Mathematics, Faculty of Science, Maharakham University, Maha Sarakham, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: rojanee.h@msu.ac.th

Received: 26 June 2024; Revised: 22 July 2024; Accepted: 25 July 2024

Published online: 27 June 2025

Abstract

This research aims to optimize the waste collection and transportation routes for a case study, a subdistrict administrative organization. The research employs two heuristic algorithms: the Clark-Wright Savings Algorithm (CW) and the Modified Clark-Wright Savings Algorithm (Modified CW). The goal is to determine efficient routes according to conditions of vehicle capacity and employee work hours constraints, while ensuring that all waste from every village within the organization's responsibility is collected for disposal each week. The results showed that the Modified CW with lambda of 0.1 to 0.9 provided the routes with the lowest total distance and transportation cost compared to the CW and the case study organization's current methods. These results show that it will also reduce the operating time to only four working days a week. Additionally, the total distance was reduced by 1% and the total cost was reduced by 18.83%. As a result, the case study saves costs up to 1,805.99 baht per week.

Keywords: Garbage collection and transportation, Modified saving algorithm, Saving algorithm, Vehicle routing

1) บทนำ

การขนส่ง (transportation) เป็นกิจกรรมที่สำคัญในการดำเนินธุรกิจ เพราะการขนส่งทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายวัสดุตั้งแต่ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำในห่วงโซ่อุปทานของธุรกิจ ในกรณีธุรกิจอุตสาหกรรม จะมีการขนส่งวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์หรือผู้ส่งมอบมายังโรงงานเพื่อใช้สำหรับการผลิตสินค้า และมีการขนส่งสินค้าไปยังผู้ซื้อหรือลูกค้า นอกจากนี้ ในธุรกิจที่มีขนาดใหญ่อาจมีการรวบรวมและขนส่งวัตถุดิบไปจัดเก็บที่โกดังก่อนขนส่งไปยังโรงงานผลิต รวมถึงอาจมีการขนส่งสินค้าไปจัดเก็บไว้ที่คลังสินค้าหรือศูนย์กระจายสินค้าก่อนส่งต่อไปยังลูกค้า เป็นต้น การขนส่งมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การขนส่งทางถนน (road transportation) การขนส่งทางราง (rail transportation) การขนส่งทางน้ำ (water transportation) การขนส่งทางอากาศ (air transportation) และการขนส่งทางท่อ (pipeline transportation) โดยการขนส่งทางถนนมีสัดส่วนสูงกว่ารูปแบบอื่น เพราะได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากการขนส่งที่สะดวก สามารถขนส่งถึงจุดหมายได้โดยไม่ต้องมีการขนถ่ายสินค้าจากการเปลี่ยนโหมดการขนส่งหรือพาหนะ มีความยืดหยุ่นด้านเวลาค่อนข้างสูงและสามารถควบคุมเวลาได้ดี แต่มีข้อเสียที่สามารถขนส่งสินค้าได้น้อยตามความจุของรถที่บรรทุก และเหมาะสำหรับการขนส่งในระยะทางที่ใกล้ถึงปานกลางเท่านั้น [1] แต่หากเป็นการขนส่งทางราง ทางน้ำ หรือทางอากาศ จำเป็นต้องมีการขนส่งต่อเนื่องด้วยรถบรรทุกอีกทอดเพื่อไปถึงจุดหมายของลูกค้า การขนส่งมีผลต่อต้นทุนรวมของสินค้า ดังนั้น การปรับปรุงประสิทธิภาพของการขนส่งจะก่อให้เกิดการประหยัดต้นทุนโดยรวมได้ [2]–[5]

สำหรับการขนส่งขยะมูลฝอย เป็นการนำเอาขยะจากแต่ละครัวเรือนในแต่ละชุมชนที่นำมาใส่ไว้ในถังขยะหรือวางไว้ที่หน้าบ้าน แล้วพนักงานของหน่วยงานที่รับผิดชอบมาเก็บรวบรวมใส่รถขนขยะเพื่อลำเลียงไปกำจัดต่อไป บางชุมชนหรือเทศบาลขนาดใหญ่อาจมีสถานีขนถ่ายหรือสถานีพักขยะ เพื่อรวบรวมและถ่ายเทขยะมูลฝอยจากรถเก็บขยะขนาดเล็กสู่รถบรรทุกขนาดใหญ่เพื่อลำเลียงไปยังสถานที่กำจัดต่อไป ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ [6] หรืออีกแนวทางหนึ่งคือ การแบ่งเขตเส้นทางการเก็บขนขยะ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพประหยัดทรัพยากร และค่าใช้จ่ายในการเก็บขนขยะ และเพื่อให้การปฏิบัติงานมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ [7]

มีการวิจัยเกี่ยวกับการรวบรวมและขนส่งขยะ เช่น Jampong [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการขยะขององค์การบริหารส่วนตำบล

สวนหลวง อำเภอมัฒนา จังหวัดสมุทรสงคราม โดยส่งเสริมนโยบายให้ชุมชนมีจิตสำนึกในการรักษาความสะอาด มีวิธีการที่เหมาะสมในการรวบรวมและคัดแยกขยะมูลฝอย รวมถึงการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยของชุมชน หรืองานวิจัยของ Sinlapajaroen [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการขยะอันตรายจากชุมชน ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้บริหารและพนักงานของเทศบาล และตัวแทนประชาชนในพื้นที่รวม 18 คน ซึ่งพบว่า มีประชาชนบางครัวเรือนไม่ใช้บริการจัดเก็บขยะมูลฝอยจากเทศบาล โดยนำขยะไปกำจัดเองหรือนำไปทิ้งในบริเวณที่สาธารณะ และการกำจัดขยะในบริเวณบ่อกำจัดยังขาดการบริหารจัดการที่ดี ทำให้เกิดปัญหาขยะตกค้าง และไม่มีการฝังกลบให้ถูกหลักสุขาภิบาล เป็นต้น

หน่วยงานกรณีศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ คือ องค์การบริหารส่วนตำบลแห่งหนึ่ง ซึ่งมีการให้บริการรวบรวมขยะให้กับชุมชนทั้งหมด 16 หมู่บ้าน มีรถที่ใช้ในการบริการ 2 รูปแบบ คือ รถกระบะคอกและรถบรรทุกขยะ 4 ล้อ (ขนาดเล็ก) จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่า ระบบการรวบรวมและขนส่งขยะของหน่วยงานยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากพนักงานตัดสินใจเลือกเส้นทางในการรวบรวมและขนส่งขยะโดยอาศัยประสบการณ์ ซึ่งอาจทำให้ได้เส้นทางที่ไม่เหมาะสมและมีต้นทุนโดยรวมสูงเกินความจำเป็น ดังนั้นการประยุกต์ใช้หลักทางวิชาการด้านโลจิสติกส์ เช่น หลักการของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) จะทำให้ได้เส้นทางที่เหมาะสมและประหยัดต้นทุนโดยรวมในการดำเนินงานของหน่วยงานกรณีศึกษาได้

2) ทบทวนวรรณกรรม

2.1) การออกแบบการขนส่ง [1]–[4]

2.1.1) *Direct Shipment* คือ การขนส่งสินค้าจากโรงงานผู้ผลิตแบบเต็มคันรถ (full truck load) ไปยังลูกค้าแต่ละรายโดยตรงโดยไม่ผ่านคลังสินค้าหรือศูนย์กระจายสินค้า ใช้พาหนะเดี่ยวและไม่มีการเปลี่ยนพาหนะตลอดการขนส่ง

2.1.2) *Direct Shipment with Milk Runs* คือ การขนส่งทางตรงแบบไม่ต้องพักสินค้าที่คลังสินค้า และมีการใช้พื้นที่ของพาหนะอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1. การรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตหลายรายจนเต็มคันรถแล้วไปส่งยังลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Direct shipment with milk runs from multiple suppliers

2. การรวบรวมการสั่งซื้อจากลูกค้าหลายรายให้สินค้าเต็มคันรถ และขนส่งไปยังลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Direct shipment with milk runs to multiple customers

3. การรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตหลายรายจนเต็มคันรถ และไปกระจายสินค้าให้กับลูกค้าหลายราย เรียกว่า Direct shipment with milk runs from multiple suppliers to multiple customers

2.1.3) *Transportation with Cross Docking* คือ การขนส่งสินค้าที่มาจากโรงงานผู้ผลิตหลายราย มายังศูนย์กระจายสินค้า (Distribution Center: DC) เพื่อรวบรวมหรือคัดแยกสินค้า โดยใช้เวลากายในไม่เกิน 24 ชั่วโมงหรือ 1 วัน แล้วขนส่งสินค้าขึ้นพาหนะเปลี่ยนถ่ายเพื่อขนส่งไปยังลูกค้า โดยไม่มีการพักสินค้าไว้ที่ศูนย์กระจายสินค้า

2.1.4) *Cross Docking Shipment with Milk Runs* คือ การนำรูปแบบ cross docking และ milk runs มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยมี 2 รูปแบบ ได้แก่

1. การรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตหลายรายจนเต็มคันรถและขนส่งมายังศูนย์กระจายสินค้า เพื่อรวบรวมหรือคัดแยกสินค้าขึ้นรถบรรทุกที่เปลี่ยนถ่ายและขนส่งสินค้าไปให้ลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Cross docking shipment with milk runs from multiple suppliers

2. การบรรทุกสินค้าแบบเต็มคันรถจากผู้ผลิตมายังศูนย์กระจายสินค้า แล้วรวบรวมและคัดแยกสินค้าขึ้นรถบรรทุกที่เปลี่ยนถ่ายจนเต็มคันรถและไปส่งให้ลูกค้าแต่ละราย เรียกว่า Cross docking shipment with milk runs to multiple retailers

ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ มาจากปัญหาการขนส่งเพื่อตอบสนองความต้องการที่จุดบริการต่าง ๆ โดยไม่มีข้อจำกัดด้านระยะทางและปริมาณ การแก้ปัญหาดังกล่าวใช้แนวคิดแบบให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำสุดและมีเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสม ซึ่งเป็นแนวทางการแก้ปัญหาด้านการวิจัยดำเนินงาน (operations research) แต่ด้วยการปฏิบัติงานจริงย่อมมีข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ เช่น บางการขนส่งอาจจะใช้รถเพียงหนึ่งคัน หรือบางการขนส่งต้องใช้รถหลายคัน โดยจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดด้านความจุของรถ (Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP) หรือข้อจำกัดด้านเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Windows: VRPTW) รวมถึงข้อจำกัดอื่นๆ ทั้งนี้หากเป็นปัญหาขนาดใหญ่ เช่น จำนวนโหนดหรือจุดบริการมี

มาก เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นทวีคูณแบบเอกซ์โพเนนเชียล

2.2) *เทคนิคในการหาคำตอบของปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (VRP) [10]*

2.2.1) *วิธีแบบแม่นยำตรง (Exact Method)* เป็นการหาคำตอบที่จะได้คำตอบแบบเหมาะสมที่สุด (optimal solution) ด้วยการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นตรง การโปรแกรมจำนวนเต็มและวิธีการอื่น แต่จะแก้ปัญหาได้เฉพาะปัญหาที่มีขนาดเล็ก เพราะถ้าขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่จะทำให้ใช้เวลานานในการประมวลผล

2.2.2) *วิทยาการศึกษานานึก (Heuristics)* เป็นวิธีการหาคำตอบที่อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด หรือเรียกว่า คำตอบที่ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด (near optimal solution) มีทั้งวิทยาการศึกษานานึกที่พัฒนาขึ้นสำหรับแก้ปัญหาแบบเฉพาะอย่างและวิธีเมตาฮีริสติก (metaheuristics) เช่น วิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search: TS) วิธีอาณานิคมมด (Ant colony) วิธีจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ซึ่งกระบวนการคำนวณของวิทยาการศึกษานานึกเหล่านี้จะใช้เวลารวดเร็วและได้คำตอบที่แม่นยำสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่

2.2.3) *การจำลอง (Simulation)* เป็นการสร้างแบบจำลองกับปัญหา ส่วนใหญ่ใช้กับปัญหาที่มีความไม่แน่นอน เช่น ความต้องการไม่แน่นอน ระยะเวลาการบริการที่ไม่แน่นอน

2.3) *ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (Clarke-Wright Savings Algorithm: CW)*

เป็นวิทยาการศึกษานานึกที่พัฒนาโดย Clark and Wright [11] นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติเพราะเป็นวิธีที่ง่ายแม้ว่าวิธีนี้จะไม่ได้ประกันถึงการให้คำตอบที่ดีที่สุด สำหรับปัญหาการตัดสินใจที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดยังคงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณหาคำตอบได้ด้วยเวลาที่รวดเร็ว โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกโหนดที่จะเป็นจุดเริ่มต้นหรือคลังสินค้า (depot)
2. เลือกโหนดใด ๆ จำนวน 2 โหนด โดยทั่วไปเป็นโหนดตำแหน่งของลูกค้า เพื่อเชื่อมโยงเส้นทางและคำนวณค่าประหยัดของระยะทางในการขนส่ง (S_{ij}) ดังสมการ (1)

$$S_{ij} = d_{iD} + d_{jD} - d_{ij} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ จุดเริ่มต้นในการขนส่งหรือคลังสินค้า (depot)

d_{iD} คือ ระยะทางระหว่างโหนด i กับ depot

d_{jD} คือ ระยะทางระหว่างโหนด j กับ depot

d_{ij} คือ ระยะทางระหว่างโหนด i กับ j

S_{ij} คือ ค่าประหยัดของระยะทางระหว่างโหนด i กับ j

3. เรียงลำดับค่า S_{ij} จากมากไปน้อย

4. เลือก 2 โหนดที่มีค่า S_{ij} มากที่สุด และทำการรวมโหนด i และ j ให้อยู่ในเส้นทางเดียวกัน โดยต้องไม่ทำให้เส้นทางที่ได้ขัดแย้งกับเงื่อนไขที่กำหนดของปัญหา เช่น น้ำหนักบรรทุกจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะ ระยะทางรวมของเส้นทางต้องไม่เกินค่าระยะทางที่กำหนด เวลารวมในการเดินทางแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินเวลาที่กำหนด จำนวนโหนดในเส้นทางต้องไม่เกินจำนวนโหนดมากที่สุดที่กำหนด เป็นต้น

5. ถ้ากำหนดให้โหนดรวมเข้าไปอยู่ในเส้นทางใด ๆ แล้วเกินความจุของยานพาหนะหรือเงื่อนไขที่กำหนด จะให้ยานพาหนะคันดังกล่าวเดินทางกลับมาที่ depot ทันที

6. รวมโหนด i และ j เข้าอยู่ในเส้นทางใหม่เดียวกัน และลบเส้นทางเดิม คือ $D-i-D$ และ $D-j-D$ ออก จะได้เส้นทาง $D-i-j-D$

7. ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 โดยเลือก 2 โหนดถัดไปที่มีค่า S_{ij} มากที่สุด

8. หยุดการทำงานเมื่อพบว่าค่า S_{ij} ที่เป็นบวก ถูกพิจารณาแล้วทั้งหมด

2.4) ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง (Modified Saving Algorithm หรือ Clarke-Wright Formula Modification Procedure: Modified CW)

เป็นการปรับเปลี่ยนสูตรของ Clarke-Wright สำหรับการแก้ปัญหา VRP โดยผู้เขียนหลายคนเสนอพารามิเตอร์ใหม่ที่น่าไปใช้กับขั้นตอนวิธี โดย Gaskell [12] และ Yellow [13] นำเสนอพารามิเตอร์เกี่ยวกับรูปร่างของเส้นทาง (λ) และค่าของค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ดังสมการ (2)

$$S_{ij} = d_{iD} + d_{jD} - \lambda d_{ij} \quad (2)$$

จากการศึกษาของ Altinel and Once [14] เสนอแนะค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสม ควรมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 2.0

ทั้งนี้ขั้นตอนในการหาเส้นทางโดยใช้ ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง จะดำเนินการเหมือนกับขั้นตอนวิธีแบบประหยัด แตกต่างเพียงการคำนวณค่า S_{ij} [15]

มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดในการหาเส้นทางขนส่ง เช่น Chaiwongsakda et al. [16] ได้ศึกษาการจัดเส้นทางขนส่ง กรณีศึกษาโรงงานน้ำดื่ม โดยเสนอการแบ่งพื้นที่ในการให้บริการ แล้วนำลูกค้าในแต่ละพื้นที่มาจัดเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัด หลังจากนั้นนำเส้นทางที่ได้มาจัดลำดับในการขนส่งใหม่โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้ปัญหามีขนาดเล็กลง สามารถแก้ปัญหาโดยใช้ Solver ใน Microsoft Excel ได้ โดยตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขายจะให้ระยะทางที่สั้นที่สุดในแต่ละเส้นทาง Cheewaworanontree and Boonrak [17] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางขนส่ง กรณีศึกษาบริษัทผู้จำหน่าย เพื่อปรับปรุงการจัดเส้นทางที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขขนาดของรถบรรทุกสินค้าโดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และทำการเปรียบเทียบเส้นทางใหม่กับเส้นทางปัจจุบัน โดยเส้นทางใหม่สามารถลดระยะทางได้ 38 กิโลเมตร และลดต้นทุนค่าขนส่งได้ 122.36 บาทต่อเดือน Chunchaiphak [18] ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางเดินรถรับ-ส่งนักเรียน กรณีศึกษาโรงเรียนประสิทธิ์ศึกษาสงเคราะห์ ซึ่งมีนักเรียนที่ต้องรับส่ง 1,137 คนต่อวัน จำนวนจุดรับส่ง 39 จุด มีรถสามประเภท ได้แก่ รถกระบะ รถหกล้อ และรถบัส จากการจัดเส้นทางใหม่โดยใช้ Clarke-Wright algorithm สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 134,817 บาทต่อเดือน และ Paphan and Kaewpradid [19] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดของโรงงานเม็ดพลาสติกกรณีศึกษา โดยใช้ข้อมูลย้อนหลัง 1 เดือน ซึ่งเดิมมีการขนส่งแบบไม่เต็มคันรถและใช้ประสบการณ์ของพนักงานในการตัดสินใจเป็นหลัก จึงแก้ปัญหาด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดเพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด พบว่าเส้นทางใหม่สามารถลดระยะทางในการขนส่งลงได้ 1,086.5 กิโลเมตร และจำนวนรถที่ใช้ลดลงจาก 7 คัน เหลือเพียง 5 คัน

สำหรับขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง มีนักวิจัย เช่น Pichpibul and Kawtummachai [15] ได้เสนอวิธีการศึกษาสำนักตามขั้นตอนวิธีของ Clarke-Wright เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบเปิด เป็นการกำหนดเส้นทางของรถขนส่งที่มีความจุและไม่จำเป็นต้องกลับไปที่คลัง โดยเสนอวิธีการ 4 วิธี ประกอบด้วย 1. วิธีแบบเดิม (CW) 2. วิธีปรับเปลี่ยนสูตรของ

CW (Modified CW) 3. วิธีแบบสองขั้นตอน 4. การคัดเลือกและการปรับปรุงเส้นทาง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า วิธี Modified CW และวิธีใหม่ที่เสนอ มีประสิทธิภาพสูงกว่า CW แบบเดิม และยังพบอีกว่า ได้คำตอบที่ดีที่สุดมากถึงร้อยละ 97 ของจำนวนสถานการณ์ทั้งหมด (60 จากทั้งหมด 62 สถานการณ์)

3) วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางการรวบรวมและขนส่งขยะของหน่วยงานองค์การบริหารส่วนตำบลแห่งหนึ่ง ผู้วิจัยได้สัมภาษณ์และเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานของหน่วยงานกรณีศึกษา และประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (CW) และขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง (Modified CW) ในการจัดเส้นทางการรวบรวมและขนส่งขยะ แล้วเปรียบเทียบระยะทางรวมและค่าใช้จ่ายรวมในการรวบรวมและขนส่งขยะระหว่างวิธีการปัจจุบันของกรณีศึกษากับวิธีการที่เสนอด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบ โดยกำหนดสถานการณ์และเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ประยุกต์ใช้หลักการแบบ CVRP ซึ่งเป็นปัญหาการกำหนดเส้นทางแบบมีเงื่อนไขเกี่ยวกับความจุของพาหนะและเวลาในการทำงาน

2. พาหนะสำหรับการรวบรวมและขนส่งขยะ มี 2 คัน คือ รถกระบะคอก เป็นรถกระบะบรรทุก (ปีกอัพ 4x2) ความจุ 1,870 กิโลกรัม และรถบรรทุกขยะ 4 ล้อ (ขนาดเล็ก) ความจุ 1,200 กิโลกรัม โดยรถทั้งสองคันใช้น้ำมันเชื้อเพลิง Diesel B7 และมีอัตราสิ้นเปลือง 15 กิโลเมตรต่อลิตร

3. จัดเส้นทางแบบปิด คือ รถออกจากสำนักงานของ อบต. (โหนด D) ไปรวบรวมและขนส่งขยะจากหมู่บ้านในเส้นทาง (โหนด 1-16) และไปจุดกำจัดขยะ (โหนด P) แล้วกลับมาที่สำนักงาน อบต. (โหนด D)

4. ตำแหน่งของโหนดจะพิจารณาจากจุดศูนย์กลางโหนด เช่น ตำแหน่งหมู่บ้านพิจารณาจากจุดศูนย์กลางของหมู่บ้าน

5. พิกัดละติจูด (latitude) และลองจิจูด (longitude) ของแต่ละโหนด และหาระยะทางจริงจาก Google Map ระหว่างสองโหนดใด ๆ

6. พนักงานดำเนินงานรวบรวมและขนส่งขยะ ประกอบด้วย พนักงานขับรถ 2 คน และพนักงานจัดเก็บขยะ 4 คน โดยแบ่งพนักงานจัดเก็บขยะสำหรับประจำรถ คันละ 2 คน เท่ากัน

7. ทั้งพนักงานขับรถและพนักงานจัดเก็บขยะ เป็นพนักงานจ้างชั่วคราวรายวัน มีอัตราค่าจ้าง 300 บาทต่อคนต่อวัน

8. เวลาทำงานของพนักงานรวบรวมและขนส่งขยะทั้งหมด 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยมีเวลาพักกลางวัน 1 ชั่วโมง จึงคงเหลือเวลาทำงาน 7 ชั่วโมง ทั้งนี้เวลาในการรวบรวมและขนส่งขยะ ประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการเก็บขยะ 1 ถึงของแต่ละครัวเรือนเพื่อโหลดขึ้นรถขนส่งขยะเท่ากับ 30 วินาที เวลาที่ใช้ในการเดินทางตลอดเส้นทาง แตกต่างกันตามระยะทางรวมของเส้นทางและความเร็วในการเดินทางซึ่งเท่ากับ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และเวลาที่ใช้ในการโหลดขยะจากรถลงบ่อกำจัดขยะเท่ากับ 1 ชั่วโมงต่อคัน

9. หน่วยงานมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวบรวมและขนส่งขยะ ประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงาน และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง โดยค่าใช้จ่ายในการเดินทางคิดจากค่าน้ำมันเชื้อเพลิง Diesel B7 ราคาประมาณ 35 บาทต่อลิตร [20]

10. สำหรับการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ผู้วิจัยกำหนดพารามิเตอร์ $\lambda = 0.1, 0.2, \dots, 2.0$ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของเส้นทางที่อาจเป็นไปได้ของหน่วยงานกรณีศึกษาและสอดคล้องกับค่า $\lambda \in [0.1, 2.0]$ ที่แนะนำโดย Altinel and Once [14]

4) ผลการวิจัย

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากสำนักงาน อบต. เกี่ยวกับพิกัดละติจูดและลองจิจูดของสำนักงาน (D) จุดกำจัดขยะ (P) และหมู่บ้านทั้งหมด 16 หมู่บ้าน (1)-(16) พบว่า มีระยะห่างระหว่างแต่ละโหนดตั้งเมตริกระยะทาง d_{ij} ในตารางที่ 1 ทั้งนี้ ในตำบลมีจำนวนครัวเรือนทั้งสิ้น 2,548 ครัวเรือน และปริมาณขยะต่อสัปดาห์ของแต่ละหมู่บ้าน ดังตารางที่ 2 ซึ่งรวมทุกหมู่บ้านแล้วพบว่ามีปริมาณขยะทั้งหมด 13,430.67 กิโลกรัม

4.1) การจัดเส้นทางตามวิธีปัจจุบันของหน่วยงานกรณีศึกษา

ปัจจุบันหน่วยงานกรณีศึกษากำหนดเส้นทางในการเดินทางเพื่อรวบรวมและขนส่งขยะ โดยพบว่า มีการดำเนินงานโดยรวมทั้งหมด 5 วัน และบางเส้นทางมีการขนส่งขยะเกินความจุของรถบรรทุกขยะ เช่น เส้นทางการเดินทาง D-9-P-D ของวันจันทร์ ซึ่งหน่วยงานบรรทุกขยะ 2,108.42 กิโลกรัม เกินจากความจุรถ 1,870 กิโลกรัม เป็นต้น ทั้งนี้มีระยะทางรวมจากรถทั้งสองคันเท่ากับ 252.38 กิโลเมตร ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด 588.93 บาทต่อสัปดาห์ ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด 9,000 บาท

ต่อสัปดาห์ และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 9,588.93 บาทต่อสัปดาห์ ดังตารางที่ 3

4.2) ผลการจัดเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัด

จากเมตริกระยะทาง ในตารางที่ 1 ผู้วิจัยได้คำนวณค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ตามสมการ (1) ได้ค่า S_{ij} ของขั้นตอนวิธีแบบประหยัด ดังตารางที่ 4 จากการพิจารณาค่า S_{ij} และดำเนินการจัดเส้นทางตามขั้นตอนวิธีแบบประหยัด พบว่า ได้

เส้นทางสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ ดังตารางที่ 5 ทำให้ได้ระยะทางรวมจากรถทั้งสองคันเท่ากับ 262.92 กิโลเมตร ซึ่งมากกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา ค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด 613.48 บาทต่อสัปดาห์ ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด 7,200 บาทต่อสัปดาห์ น้อยกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา เนื่องจากใช้เวลาทำงานเพียง 4 วันทำงานต่อสัปดาห์ และทำให้ได้ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 7,813.48 บาทต่อสัปดาห์

ตารางที่ 1 : เมตริกระยะทาง d_{ij} (หน่วย : กิโลเมตร)

| dij | D | P | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|----|
| D | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | 10.84 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3.97 | 6.12 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 3.01 | 5.16 | 0.96 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 4.72 | 6.88 | 0.80 | 1.72 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0.56 | 8.49 | 3.64 | 2.69 | 4.40 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0.37 | 8.70 | 4.15 | 3.20 | 4.91 | 0.48 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0.37 | 8.70 | 3.77 | 2.81 | 4.53 | 0.19 | 0.28 | 0 | | | | | | | | | | |
| 7 | 2.27 | 8.50 | 2.49 | 1.53 | 3.25 | 1.94 | 2.45 | 2.07 | 0 | | | | | | | | | |
| 8 | 6.12 | 14.44 | 9.90 | 8.94 | 10.66 | 6.22 | 5.99 | 6.03 | 8.20 | 0 | | | | | | | | |
| 9 | 5.29 | 13.62 | 9.08 | 8.12 | 9.83 | 5.40 | 5.18 | 5.20 | 7.38 | 1.56 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 3.78 | 12.21 | 7.42 | 6.70 | 8.41 | 4.25 | 3.72 | 4.06 | 5.96 | 9.81 | 8.98 | 0 | | | | | | |
| 11 | 3.58 | 12.02 | 7.46 | 6.51 | 8.22 | 4.06 | 3.53 | 3.87 | 5.76 | 9.62 | 8.79 | 0.19 | 0 | | | | | |
| 12 | 4.12 | 6.27 | 0.19 | 1.11 | 0.80 | 3.80 | 4.31 | 3.92 | 2.64 | 10.05 | 9.23 | 7.81 | 7.62 | 0 | | | | |
| 13 | 5.79 | 14.12 | 9.57 | 8.62 | 10.33 | 5.89 | 5.67 | 5.70 | 7.87 | 5.36 | 2.38 | 9.48 | 9.29 | 9.73 | 0 | | | |
| 14 | 6.22 | 14.58 | 10.03 | 9.08 | 10.79 | 6.35 | 6.13 | 6.16 | 8.33 | 2.22 | 1.18 | 9.94 | 9.75 | 10.19 | 3.34 | 0 | | |
| 15 | 3.99 | 12.42 | 7.87 | 6.91 | 8.62 | 4.46 | 3.93 | 4.27 | 6.17 | 10.02 | 9.19 | 0.52 | 0.71 | 8.02 | 9.69 | 10.15 | 0 | |
| 16 | 2.96 | 7.97 | 4.30 | 3.34 | 5.06 | 3.24 | 3.15 | 3.15 | 1.81 | 8.89 | 8.07 | 6.65 | 6.45 | 4.45 | 8.56 | 9.02 | 6.85 | 0 |

ตารางที่ 2 : หมู่บ้าน จำนวนครัวเรือน และปริมาณขยะต่อสัปดาห์

| หมู่บ้าน | จำนวนครัวเรือน | ปริมาณขยะต่อสัปดาห์ (กิโลกรัม) | หมู่บ้าน | จำนวนครัวเรือน | ปริมาณขยะต่อสัปดาห์ (กิโลกรัม) |
|-----------|----------------|--------------------------------|------------|----------------|--------------------------------|
| หมู่ที่ 1 | 216 | 1,138.55 | หมู่ที่ 9 | 305 | 1,607.67 |
| หมู่ที่ 2 | 274 | 1,444.27 | หมู่ที่ 10 | 130 | 685.24 |
| หมู่ที่ 3 | 212 | 1,117.47 | หมู่ที่ 11 | 178 | 938.25 |
| หมู่ที่ 4 | 153 | 806.47 | หมู่ที่ 12 | 184 | 969.88 |
| หมู่ที่ 5 | 182 | 959.33 | หมู่ที่ 13 | 67 | 353.16 |
| หมู่ที่ 6 | 205 | 1,080.57 | หมู่ที่ 14 | 95 | 500.75 |
| หมู่ที่ 7 | 42 | 221.38 | หมู่ที่ 15 | 126 | 664.15 |
| หมู่ที่ 8 | 132 | 695.78 | หมู่ที่ 16 | 47 | 247.74 |

ตารางที่ 3 : เส้นทางที่ใช้รวบรวมและขนส่งขยะโดยวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา

| รถกระบะคอก (ความจุ 1,870 กิโลกรัม) | | | | | | รถบรรทุกขยะ (ความจุ 1,200 กิโลกรัม) | | | | | |
|---|----------|---------------------|---------------|------------------------|------------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|---------------|------------------------|------------------|
| เส้นทาง | วันทำงาน | รูปแบบการ เดินรถ | เวลา (ชม.) | ปริมาณ ขยะ (กก.) | ระยะทาง (กม.) | เส้นทาง | วัน ทำงาน | รูปแบบการ เดินรถ | เวลา (ชม.) | ปริมาณ ขยะ (กก.) | ระยะทาง (กม.) |
| 1 | จันทร์ | D-9-P-D | 5.05 | 2,108.42 | 21.26 | 2 | จันทร์ | D-5-P-D | 3.18 | 959.33 | 19.91 |
| 3 | อังคาร | D-2-7-P-D | 4.43 | 1,665.66 | 23.88 | 4 | อังคาร | D-8-13-P-D | 3.87 | 1,048.94 | 36.44 |
| 6 | พุธ | D-9-14-P-D | 5.39 | 2,108.42 | 31.89 | 5 | พุธ | D-3-P-D | 3.52 | 1,117.50 | 22.44 |
| 9 | พฤหัสบดี | D-6-16-P-D | 3.84 | 1,328.31 | 22.32 | 7 | พฤหัสบดี | D-4-P-D | 2.94 | 806.47 | 19.89 |
| 10 | ศุกร์ | D-11-15-P-D | 4.45 | 1,602.40 | 27.55 | 8 | ศุกร์ | D-10-P-D | 2.98 | 685.24 | 26.82 |
| ระยะทางรวม (กิโลเมตร) | | | | | 126.9 | ระยะทางรวม (กิโลเมตร) | | | | | 125.5 |
| ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร) | | | | | | | | | | | 252.38 |
| ค่าใช้จ่ายในการเดินรถทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | | | | | | | | | | 588.93 |
| ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | | | | | | | | | | 9,000.00 |
| ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | | | | | | | | | | 9,588.93 |

ตารางที่ 4 : ค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ของขั้นตอนวิธีแบบประหยัด (หน่วย : กิโลเมตร)

| Sij | P | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|----|
| P | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8.68 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 8.69 | 6.02 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 8.68 | 7.89 | 6.01 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2.91 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 2.51 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.46 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2.51 | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 0.74 | 0.46 | 0 | | | | | | | | | | |
| 7 | 4.61 | 3.74 | 3.74 | 3.74 | 0.89 | 0.18 | 0.57 | 0 | | | | | | | | | |
| 8 | 2.51 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.46 | 0.50 | 0.46 | 0.19 | 0 | | | | | | | | |
| 9 | 2.51 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.46 | 0.48 | 0.46 | 0.18 | 9.85 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 2.41 | 0.32 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.43 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0 | | | | | | |
| 11 | 2.41 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.43 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 7.17 | 0 | | | | | |
| 12 | 8.69 | 7.90 | 6.03 | 8.05 | 0.89 | 0.18 | 0.57 | 3.74 | 0.19 | 0.18 | 0.09 | 0.09 | 0 | | | | |
| 13 | 2.51 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.46 | 0.49 | 0.46 | 0.18 | 6.55 | 8.70 | 0.09 | 0.09 | 0.18 | 0 | | | |
| 14 | 2.48 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.43 | 0.46 | 0.43 | 0.15 | 10.12 | 10.33 | 0.06 | 0.06 | 0.15 | 8.67 | 0 | | |
| 15 | 2.41 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.43 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 7.25 | 6.86 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0 | |
| 16 | 5.83 | 2.63 | 2.63 | 2.63 | 0.29 | 0.18 | 0.19 | 3.42 | 0.19 | 0.19 | 0.09 | 0.09 | 2.63 | 0.19 | 0.16 | 0.09 | 0 |

ตารางที่ 5 : เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัด

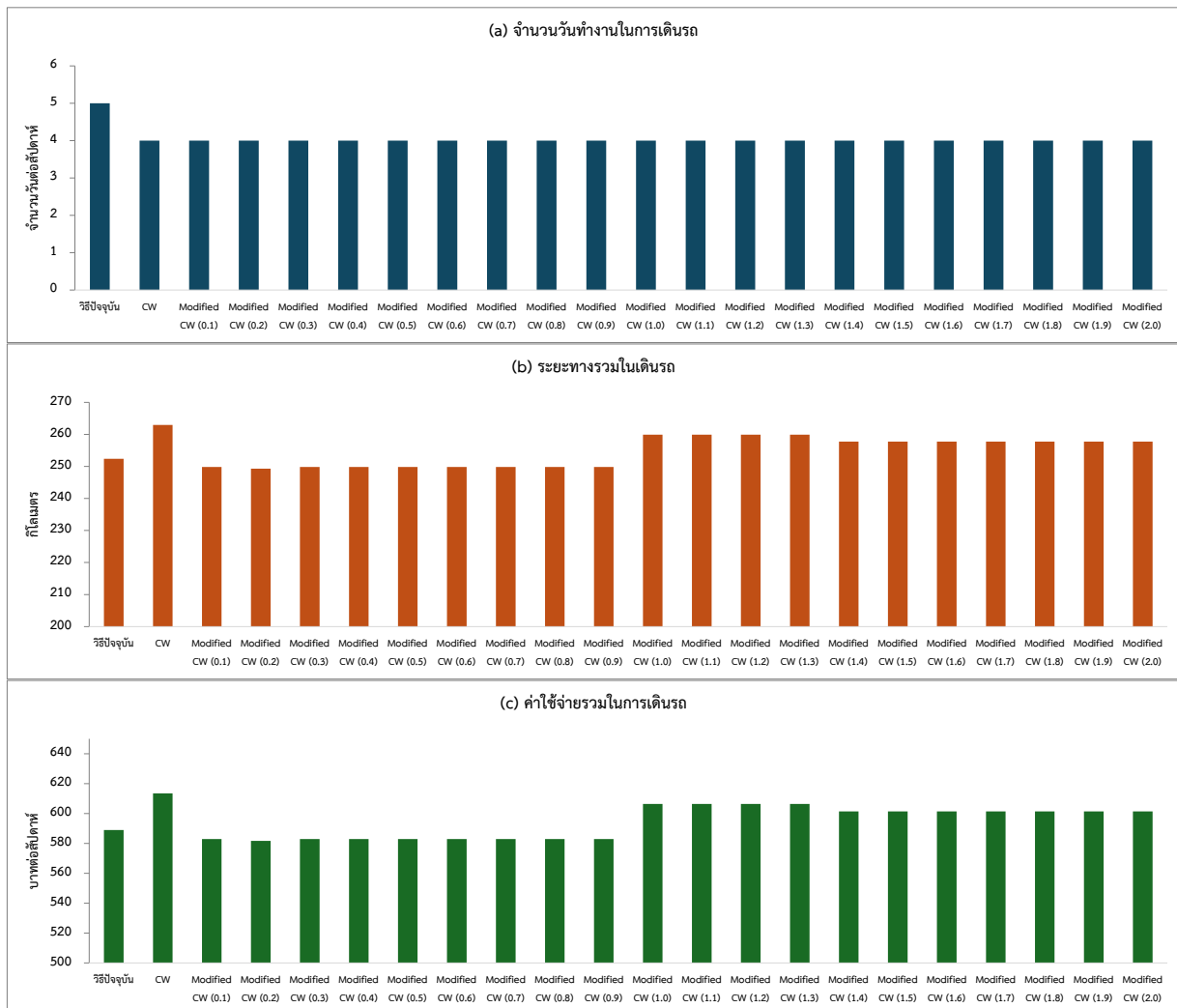
| รถกระบะคอก (ความจุ 1,870 กิโลกรัม) | | | | | | รถบรรทุกขยะ (ความจุ 1,200 กิโลกรัม) | | | | | |
|--------------------------------------|----------|--------------------|------------|-----------------|---------------|---|----------|--------------------|------------|-----------------|---------------|
| เส้นทาง | วันทำงาน | รูปแบบการเดินทางรถ | เวลา (ชม.) | ปริมาณขยะ (กก.) | ระยะทาง (กม.) | เส้นทาง | วันทำงาน | รูปแบบการเดินทางรถ | เวลา (ชม.) | ปริมาณขยะ (กก.) | ระยะทาง (กม.) |
| 1 | จันทร์ | D-9-P-D | 4.53 | 1,607.67 | 29.75 | 2 | จันทร์ | D-8-14-P-D | 4.02 | 1,196.53 | 33.75 |
| 4 | อังคาร | D-3-16-13-P-D | 5.16 | 1,718.37 | 43.29 | 3 | อังคาร | D-7-12-P-D | 3.61 | 1,191.26 | 22.01 |
| 5 | พุธ | D-15-10-P-D | 4.05 | 1,349.39 | 27.55 | 6 | พุธ | D-2-P-D | 3.91 | 1,444.27 | 19.01 |
| 7 | พฤหัสบดี | D-4-6-P-D | 4.64 | 1,887.04 | 20.29 | 8 | พุธ | D-11-P-D | 3.15 | 938.25 | 26.44 |
| | | | | | | 9 | พฤหัสบดี | D-5-P-D | 3.18 | 959.33 | 19.91 |
| | | | | | | 10 | พฤหัสบดี | D-1-P-D | 3.50 | 1,138.55 | 20.93 |
| ระยะทางรวม (กิโลเมตร) | | | | | 123.03 | ระยะทางรวม (กิโลเมตร) | | | | | 139.89 |
| ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์) | | | | | 287.07 | ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์) | | | | | 326.40 |
| | | | | | | ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร) | | | | | 262.92 |
| | | | | | | ค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | | | | 613.48 |
| | | | | | | ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | | | | 7,200.00 |
| | | | | | | ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | | | | 7,813.48 |

ตารางที่ 6 : ค่าประหยัดของระยะทาง (S_{ij}) ของขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง เมื่อ $\lambda = 0.1$ (หน่วย : กิโลเมตร)

| Sij | P | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|----|
| P | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 14.19 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 13.33 | 6.88 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 14.87 | 8.61 | 7.56 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 10.55 | 4.17 | 3.31 | 4.85 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 10.34 | 3.92 | 3.06 | 4.60 | 0.89 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 10.34 | 3.96 | 3.10 | 4.64 | 0.91 | 0.71 | 0 | | | | | | | | | | |
| 7 | 12.25 | 5.99 | 5.12 | 6.67 | 2.64 | 2.39 | 2.43 | 0 | | | | | | | | | |
| 8 | 15.51 | 9.10 | 8.24 | 9.78 | 6.06 | 5.89 | 5.89 | 7.57 | 0 | | | | | | | | |
| 9 | 14.77 | 8.35 | 7.49 | 9.03 | 5.32 | 5.14 | 5.14 | 6.82 | 11.26 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 13.39 | 7.00 | 6.12 | 7.66 | 3.92 | 3.77 | 3.74 | 5.45 | 8.92 | 8.17 | 0 | | | | | | |
| 11 | 13.22 | 6.80 | 5.94 | 7.49 | 3.74 | 3.60 | 3.57 | 5.27 | 8.74 | 8.00 | 7.34 | 0 | | | | | |
| 12 | 14.33 | 8.07 | 7.02 | 8.76 | 4.30 | 4.06 | 4.10 | 6.12 | 9.24 | 8.49 | 7.12 | 6.94 | 0 | | | | |
| 13 | 15.21 | 8.80 | 7.94 | 9.48 | 5.76 | 5.59 | 5.59 | 7.27 | 11.37 | 10.84 | 8.62 | 8.44 | 8.94 | 0 | | | |
| 14 | 15.60 | 9.18 | 8.32 | 9.86 | 6.15 | 5.97 | 5.97 | 7.65 | 12.12 | 11.39 | 9.00 | 8.83 | 9.32 | 11.67 | 0 | | |
| 15 | 13.58 | 7.17 | 6.31 | 7.85 | 4.10 | 3.96 | 3.93 | 5.64 | 9.11 | 8.36 | 7.71 | 7.50 | 7.30 | 8.81 | 9.19 | 0 | |
| 16 | 13.00 | 6.50 | 5.64 | 7.18 | 3.20 | 3.02 | 3.02 | 5.05 | 8.19 | 7.45 | 6.07 | 5.90 | 6.64 | 7.89 | 8.28 | 6.26 | 0 |

ตารางที่ 7 : เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะโดยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง เมื่อ $\lambda = 0.1$

| รถกระบะคอก (ความจุ 1,870 กิโลกรัม) | | | | | | รถบรรทุกขยะ (ความจุ 1,200 กิโลกรัม) | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|------------------|------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|----------|------------------|------------|---|---------------|----------|
| เส้นทาง | วันทำงาน | รูปแบบการเดินทาง | เวลา (ชม.) | ปริมาณขยะ (กก.) | ระยะทาง (กม.) | เส้นทาง | วันทำงาน | รูปแบบการเดินทาง | เวลา (ชม.) | ปริมาณขยะ (กก.) | ระยะทาง (กม.) | |
| 1 | จันทร์ | D-8-14-P-D | 4.02 | 1,196.53 | 33.75 | 2 | จันทร์ | D-9-13-P-D | 5.19 | 1,960.84 | 32.62 | |
| 3 | อังคาร | D-3-P-D | 3.52 | 1,117.47 | 22.44 | 5 | อังคาร | D-15-10-7-P-D | 4.47 | 1,570.78 | 29.79 | |
| 4 | อังคาร | D-1-P-D | 3.50 | 1,138.55 | 20.93 | 6 | พุธ | D-2-P-D | 3.91 | 1,444.27 | 19.01 | |
| 7 | พุธ | D-16-12-P-D | 3.75 | 1,217.62 | 24.52 | 8 | พฤหัสบดี | D-11-4-P-D | 4.66 | 1,744.72 | 26.97 | |
| 9 | พุธ | D-5-P-D | 3.18 | 959.33 | 19.91 | | | | | | | |
| 10 | พฤหัสบดี | D-6-P-D | 3.37 | 1,080.57 | 19.90 | | | | | | | |
| ระยะทางรวม (กิโลเมตร) | | | | | 141.44 | ระยะทางรวม (กิโลเมตร) | | | | | 108.39 | |
| ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์) | | | | | 330.03 | ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (บาท/สัปดาห์) | | | | | 252.91 | |
| | | | | | | | | | | ระยะทางรวมทั้งหมด (กิโลเมตร) | | 249.84 |
| | | | | | | | | | | ค่าใช้จ่ายในการเดินทางทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | 582.94 |
| | | | | | | | | | | ค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | 7,200.00 |
| | | | | | | | | | | ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท/สัปดาห์) | | 7,782.94 |



รูปที่ 1 : ผลการเปรียบเทียบการจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะ โดยวิธีปัจจุบันของหน่วยงานกรณีศึกษากับขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง

4.3) ผลการวัดเส้นทางด้วยขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง

สำหรับการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ได้กำหนดพารามิเตอร์ $\lambda = 0.1, 0.2, \dots, 2.0$ โดยเริ่มจากเมื่อกำหนด $\lambda = 0.1$ สามารถคำนวณค่าประหยัดของระยะทาง (S_j) ได้ดังตารางที่ 6 และจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะตามขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ได้ดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่าเส้นทางที่จัดได้ทำให้ระยะทางรวมจากระยะทางทั้งสองคันเท่ากับ 249.84 กิโลเมตร ซึ่งน้อยกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา และขั้นตอนวิธีแบบประหยัด มีค่าใช้จ่ายในการเดินทาง 582.94 บาทต่อสัปดาห์ และค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงาน 7,200 บาทต่อสัปดาห์ ซึ่งน้อยกว่าวิธีการปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา รวมเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 7,782.94 บาทต่อสัปดาห์

ส่วนกรณี $\lambda = 0.2, \dots, 2.0$ สามารถดำเนินการตามขั้นตอนของวิธี Modified CW ได้เช่นเดียวกับกรณี $\lambda = 0.1$ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลลัพธ์จากการจัดเส้นทาง โดยเปรียบเทียบทั้งจำนวนวันทำงานในการเดินทาง ระยะทางรวม และค่าใช้จ่ายรวมในการเดินทางระหว่างวิธีการปัจจุบันของนักศึกษา กับวิธีการที่เสนอด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบ ดังรูปที่ 1

5) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะสำหรับองค์การบริหารส่วนตำบลกรณีสึกษา โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง เพื่อให้ได้เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะที่สั้นที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความจุของรถและเวลาในการทำงาน แต่สามารถรวบรวมและขนส่งขยะของทุกหมู่บ้านไปกำจัดได้ทั้งหมดในแต่ละสัปดาห์ ผลการวิจัยพบว่า ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ($\lambda = 0.1$ ถึง $\lambda = 0.9$) ให้ผลการจัดเส้นทางที่มีระยะทางรวมและค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ($\lambda = 1.0$ ถึง $\lambda = 2.0$) ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา โดยมีระยะทางรวมเพียง 249.83 กิโลเมตร ค่าใช้จ่ายรวมในการเดินทาง 582.94 บาทต่อสัปดาห์ และค่าใช้จ่ายรวมในการจ้างพนักงาน 7,200 บาทต่อสัปดาห์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 7,782.94 บาทต่อสัปดาห์ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระยะทางรวมลดลงร้อยละ 1 และค่าใช้จ่ายรวมลดลงร้อยละ 18.83 เมื่อเทียบกับวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา อีกทั้งใช้เวลาในการรวบรวมและขนส่งขยะเพียง 4 วันทำการของสัปดาห์

6) อภิปรายผลการวิจัย

จากการที่องค์การบริหารส่วนตำบลกรณีสึกษาจัดเส้นทางเดินทางในการรวบรวมและขนส่งขยะโดยอาศัยเพียงประสบการณ์ของพนักงาน ทำให้ได้เส้นทางที่มีระยะทางมากเกินไป และมีการเก็บขยะเกินความจุของรถ อีกทั้งใช้เวลาในการดำเนินงานมาก จึงทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงเกินความจำเป็น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง จึงทำให้ได้เส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะที่เหมาะสมมากกว่าเป็นไปตามเงื่อนไขความจุของรถและใช้เวลาในการทำงานต่อวันที่คุ้มค่า ซึ่งสอดคล้องกับผลงานของ Cheewaworanontree and Boonrak [17] ที่วิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางกรณีสึกษาบริษัทผู้ค้า เพื่อปรับปรุงการจัดเส้นทางที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด และทำการเปรียบเทียบเส้นทางใหม่กับเส้นทางที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งได้ข้อสรุปว่า เส้นทางใหม่สามารถลดระยะทางได้ 38 กิโลเมตร และลดต้นทุนค่าขนส่งได้ 122.36 บาทต่อเดือน หรืองานวิจัยของ Paphan and Kaewpradid [19] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการจัดเส้นทางกรณีสึกษา ซึ่งเดิมมีการขนส่งโดยที่น้ำหนักไม่เต็มคันและใช้ประสบการณ์ของพนักงานในการตัดสินใจเป็นหลัก จึงแก้ปัญหาด้วยการใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด เพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด และได้ข้อสรุปว่า สามารถลดระยะทางลงได้ 1,086.50 กิโลเมตร และใช้รถเพียง 5 คัน จากเดิมที่ใช้ทั้งหมด 7 คัน นอกจากนี้ Pichpibul and Kawtummachai [15] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิทยาการศึกษานักหรือฮิวริสติก ที่พัฒนาจาก Clarke-Wright algorithm กับปัญหาการจัดเส้นทางแบบเปิด ได้ให้ข้อสรุปว่า ขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุงให้ผลลัพธ์ในการจัดเส้นทางที่เหมาะสมกว่าขั้นตอนวิธีแบบประหยัด ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่สรุปได้จากงานวิจัยในครั้งนี้เช่นเดียวกัน

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ พบว่า การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีแบบประหยัด แม้จะให้ระยะทางโดยรวมสูงกว่าวิธีปัจจุบันของหน่วยงานการศึกษา แต่ใช้เวลาทำงานเพียง 4 วัน ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่า ส่วนขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งสองวิธี และเป็นขั้นตอนวิธีที่ไม่ซับซ้อน สามารถประยุกต์ใช้ได้ดีทั้งกับปัญหาขนาดเล็กและขนาดปานกลางหรือปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นหากหน่วยงานกรณีสึกษานำไปประยุกต์ใช้ จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้ 1,805.99 บาทต่อสัปดาห์ ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 18.83

7) ข้อเสนอแนะ

นอกจากการนำขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ไปประยุกต์ใช้กับหน่วยงานกรณีศึกษาแล้ว ยังสามารถขยายผลเพื่อนำแนวทางดังกล่าวไปใช้กับพื้นที่กรณีศึกษาอื่นหรือขอบเขตพื้นที่ที่กว้างขึ้น เช่น การจัดเส้นทางรวบรวมและขนส่งขยะของทุกสำนักงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในอำเภอ หรือแม้กระทั่งนำไปประยุกต์ใช้กับการจัดเส้นทางเดินรถของหน่วยงานภาครัฐอื่นหรือภาคธุรกิจที่มีขอบเขตพื้นที่และจำนวนโหนดบริการไม่มาก

ทั้งนี้เนื่องจากการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถสำหรับยานพาหนะสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายวิธี ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตเกี่ยวกับการจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับรวบรวมและขนส่งขยะ ยังสามารถประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (mathematical programming) โดยพัฒนาตัวแบบและกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุดหรือระยะทางรวมต่ำที่สุด ร่วมกับการกำหนดสมการหรือสมการข้อจำกัด (constraints) เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกของรถและเวลาในการทำงานต่อวัน หรือเงื่อนไขอื่น ๆ การใช้วิธีแบบแมนตรงนี้ แม้จะให้คำตอบแบบเหมาะสมที่สุด (optimal solution) แต่จะแก้ปัญหาได้เฉพาะปัญหาที่มีขนาดเล็ก เพราะถ้าเป็นปัญหาขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการประมวล สำหรับวิธีวิทยาการศึกษาสำนึก (heuristics) ที่นอกเหนือจากขั้นตอนวิธีแบบประหยัดและขั้นตอนวิธีแบบประหยัดที่ปรับปรุง ยังมีอีกหลายวิธีโดยเฉพาะวิธีเมตา-ฮิวริสติก เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีวิวัฒนาการผลต่าง เป็นต้น ซึ่งประยุกต์ใช้ได้ดีกับปัญหาขนาดใหญ่ สามารถให้คำตอบได้รวดเร็ว แม้จะเป็นเพียงคำตอบแบบใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด (near optimal solution) ดังนั้นในการประยุกต์ใช้วิธีแบบแมนตรงเทียบกับวิธีวิทยาการศึกษาสำนึกภายใต้ขอบเขตปัญหาขนาดเดียวกัน นอกจากการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้แล้ว จึงควรเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลด้วย

นอกจากนี้ หากปัญหามีความซับซ้อนมากและพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความไม่แน่นอน การประยุกต์ใช้แนวทางการจำลอง จะทำให้สามารถจำลองปัญหาสำหรับกรณีวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า เช่น แบบจำลองด้วยโปรแกรม Arena แบบจำลองด้วยโปรแกรม FlexSim หรือแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางด้าน GIS เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้บริหารและบุคลากรหน่วยงานองค์การบริหารส่วนตำบลกรณีศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นสถานที่วิจัยและให้ข้อมูลประกอบการวิจัยจนแล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์

REFERENCES

- [1] K. Apiprachyasakul, *Transportation Management*, 2nd ed. Bangkok, Thailand: Focus Media and Publishing (in Thai), 2008.
- [2] E. J. Bardi, J. J. Coyle, and R. A. Novack, *Management of Transportation*, 6th ed. Mason, OH, USA: Thomson/South-Western, 2006.
- [3] D. J. Bowersox and D. J. Closs, *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [4] D. M. Lambert, J. R. Stock, and L. M. Ellram, *Fundamentals of Logistics Management*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1998.
- [5] M. Lamanee, S. Kaensing, and R. Homchalee, "The development of logistics performance index for transportation services providers," (in Thai), *Suranaree J. Soc. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 50-72, 2020.
- [6] G. M. Monzambe, K. Mpofo, and I. A. Daniyan, "Optimal location of landfills and transfer stations for municipal solid waste in developing countries using non-linear programming," *Sustain. Futures*, vol. 3, 2021, Art. no. 100046.
- [7] Health Impact Assessment Division, Department of Health, Ministry of Public Health. *Manual: Health impact assessment in the case of solid waste management for local administrative organizations* (in Thai). (2021). [Online]. Available: <https://hia.anamai.moph.go.th/th/publications/2887#wow-book/>
- [8] P. Jeamponk, "The Study of household behavior on solid waste and wastewater management at Bangnanglee sub-district, Amphawa district, Samut Songkram province," (in Thai), *Res. Develop. J. Suan Sunandha Rajabhat Univ.*, vol. 3 no. 1, pp. 4-13, 2011.
- [9] P. Sinlapajaroen, "Household hazardous waste management of Nakhon Pathom City Municipality," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Public Private Manage., Silpakorn Univ., Phetchaburi, Thailand, 2019.



- [10] R. Pitakaso, *Metaheuristic Methods for Solving Production Planning and Logistics Management Problems*. Bangkok, Thailand: Technology Promotion Association (Thailand-Japan) (in Thai), 2011.
- [11] G. Clarke and J. W. Wright, "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points," *Operations Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, 1964.
- [12] T. J. Gaskell, "Bases for vehicle fleet scheduling," *OR*, vol. 18, no. 3, pp. 281–295, 1967.
- [13] P. C. Yellow, "A computational modification to the savings method of vehicle scheduling," *Oper. Res. Quart. (1970-1977)*, vol. 21, no. 2, pp. 281–283, 1970.
- [14] I. K. Altinel and T. Öncan, "A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 56, no. 8, pp. 954–961, Aug. 2005.
- [15] T. Pichpibul and R. Kawtummachai, "A heuristic approach based on Clarke-Wright algorithm for open vehicle routing problem," *Scientific World J.*, vol. 2013, Dec. 2013, Art. no. 874349.
- [16] N. Chaiwongsakda *et al.*, "Vehicle routing by using a saving algorithm and the traveling salesman problem: A case study of a drinking water factory," (in Thai), *Thai J. Oper. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 51–61, 2015.
- [17] W. Cheewawanontree and N. Boonrak, "A heuristic method for vehicle routing problem to reduce transportation cost, case study: Curtain manufacturer," (in Thai), *Adv. Sci. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 76–90, 2018.
- [18] P. Chunchaiphak, "School bus routing: A case study of Prasitsuksasongkroh School," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Ubon Ratchathani Univ., Ubon Ratchathani, Thailand, 2016.
- [19] N. Paphan and P. Kaewpradid, "The application of saving algorithms for vehicle routing problem: A case study of plastic beads factory," (in Thai), B.S. project, Dept. Manage. Logistics Eng., Dhurakij Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2020.
- [20] Energy Policy and Planning office (EPPPO), "Oil Price," Ministry of Energy, Thailand, Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/petroleum/>