บทความวิจัย

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับปัญหาการจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่างซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย

วรวีร์ ปัญญาคำ กาญจนา เศรษฐนันท์* และ กฤษณรัช นิติสิริ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1553 6429 อีเมล: skanch@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.02.003
รับเมื่อ 31 มีนาคม 2565 แก้ไขเมื่อ 18 พฤษภาคม 2565 ตอบรับเมื่อ 24 พฤษภาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 16 กุมภาพันธ์ 2566
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อวางแผนสำหรับการจัดตารางเวลา และกำหนดเส้นทางของทีมช่างซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย โดยพิจารณาการวางแผนรายวันสำหรับทีมช่างซ่อมบำรุงทั้ง 2 ระบบ ซึ่งประกอบด้วยระบบทางกลและไฮดรอลิก และระบบไฟฟ้า รถตัดอ้อยมีโอกาสที่จะได้รับบริการจากทั้ง 2 ระบบ ซึ่งการคิดเวลาแล้วเสร็จเหมือนกับการผลิตแบบเปิด (Open-shop Production) โดยปกติโรงงานที่มีอำนาจในการแข่งขันทางธุรกิจสูง จำเป็นต้องลดต้นทุนการผลิตให้มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการดำเนินงานให้ต่ำที่สุด ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการเดินทาง ค่าเสียโอกาสจากความล่าช้า ค่าล่วงเวลา และค่าจ้างผู้บริการภายนอก ขั้นตอนวิจัยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม จากนั้นนำเข้าข้อมูลพารามิเตอร์จากโรงงานกรณีศึกษา แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลของวิธีการวางแผนในปัจจุบัน ผลการวางแผนสำหรับการจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่างจากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมทำให้ต้นทุนการดำเนินงานเฉลี่ยลดลง 33.62 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับวิธีวางแผนในปัจจุบัน แบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานบริการอื่นๆ ที่ต้องเดินทางและใช้ทีมบริการ 1 ทีมขึ้นไปเพื่อให้บริการกับลูกค้าได้

คำสำคัญ: แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ การวางแผนซ่อมบำรุง การจัดตารางเวลาและกำหนดเส้นทาง

การอ้างอิงบทความ: วรวีร์ ปัญญาคำ, กาญจนา เศรษฐนันท์ และ กฤษณรัช นิติสิริ, "แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับปัญหาการจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่างซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1–12, เลขที่บทความ 241-135919, ม.ค.–มี.ค. 2567.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 34 ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2567
The Journal of KMUTNB., Vol. 34, No. 1, Jan.–Mar. 2024

Research Article

A Mixed Integer Linear Programming Model for Scheduling and Routing Problem of Sugarcane Harvester Technician Teams

Voravee Punyakum, Kanchana Sethanan* and Krisanarach Nitisiri
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1553 6429, E–mail: skanch@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.02.003
Received 31 March 2021; Revised 18 May 2022; Accepted 24 May 2022; Published online: 16 February 2023
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research proposed a mixed integer linear programming model for scheduling and route planning of sugarcane harvester technician teams. The daily planning involves activity scheduling for the two teams that provide field services in hydraulic-mechanical and electrical maintenance. It is highly probable that agricultural machinery repair and maintenance services are essential for harvesters. The completion time is calculated in the same way as the open-shop production scheduling. Typically, manufacturing companies with great business competitiveness need to reduce their manufacturing costs. Thus, the main objective of this research is to minimize the operating costs, including travel costs of technician teams, opportunity costs of delay, overtime and subcontracting costs. The research phase begins with the development of a mixed integer linear programming model, followed by the import of parameter data from the case study factory, and finally the comparison of the results with the current planning methods. According to the comparison between traditional planning and model-based method, the latter approach was found to lower operating costs by 33.62%. Thus the proposed programming model can be applied in a similar service scenario.

Keywords: Mathematical Programming Model, Maintenance planning, Scheduling and Routing

Please cite this article as: V. Punyakum, K. Sethanan, and K. Nitisiri, "A mixed integer linear programming model for scheduling and routing problem of sugarcane harvester technician teams," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–12, ID. 241-135919, Jan.–Mar. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

อ้อยเป็นหนึ่งในพืชเศษฐกิจที่สำคัญของโลกซึ่งสามารถแปรรูปให้เป็นอาหารและเชื้อเพลิง [1] พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2561 มีแนวโน้มการบริโภคอ้อยของประชากรโลกเพิ่มขึ้นทุกปี โดยใน พ.ศ. 2561/2562 ประเทศไทยส่งออกน้ำตาลเป็นอันดับ 2 ของโลก ดังนั้นจึงมีการจ้างงานในภาคอุตสาหกรรมน้ำตาลของไทยเป็นจำนวนมาก โดยมีจำนวนแรงงานทั้งหมด 927,447 คน ที่ทำงานในภาคเกษตรนี้ [2] ในแต่ละปีประเทศไทยมีการผลิตน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้แรงงานสำหรับการปลูกอ้อยไปจนถึงการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ปัจจุบันแรงงานในประเทศไทยมีไม่เพียงพอ ดังนั้นการใช้รถตัดอ้อยเพื่อมาแทนแรงงานจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการแก้ปัญหานี้ การเก็บเกี่ยวเป็นกระบวนการสำคัญของการผลิตน้ำตาลโดยต้นทุนการเก็บเกี่ยวในประเทศไทยคิดเป็น 35% ของต้นทุนทั้งหมด [3] การใช้รถตัดอ้อยสามารถลดต้นทุนการเก็บเกี่ยวได้ 10% เมื่อเทียบกับการเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคน [4] อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราการเก็บเกี่ยวให้สูงขึ้นซึ่งทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลมากขึ้นเนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวได้ตรงตามแผนที่วางไว้ นอกจากนี้รถตัดอ้อยยังสามารถตัดอ้อยที่ไม่เผาซึ่งเป็นการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

รถตัดอ้อยเป็นตัวเลือกที่ดีในการแก้ปัญหานี้แต่ก็มีข้อเสียคือการลงทุนที่สูงซึ่งคิดเป็น 75.51% ของต้นทุนระบบเครื่องจักรในกระบวนการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวอ้อยทั้งหมด [5] อีกทั้งรถตัดอ้อยจำเป็นต้องได้รับการซ่อมบำรุงจากช่างเทคนิคเพื่อให้มีความพร้อมเสมอสำหรับการเก็บเกี่ยว ต้นทุนสำหรับการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยมีต้นทุนที่สูงที่สุดของการใช้งานรถตัดอ้อยตลอดอายุการใช้งานคิดเป็น 40.41% [6] การแก้ปัญหาในระบบการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย Ramos และคณะ [7] ได้นำข้อมูลในอดีตของรถตัดอ้อยมาวิเคราะห์ในรูปแบบการแจกแจงแบบ Weibull เพื่อนำมาใช้ทำนายเวลาที่รถตัดอ้อยจะเกิดการชำรุด เมื่อทราบถึงเวลาที่รถตัดอ้อยชำรุดแล้วก็สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเพื่อป้องกันการชำรุดที่เกิดขึ้นได้ ต่อมา Faria และ Silva [8] ได้ทำการสร้างโปรแกรมเพื่อวางแผนสำหรับเติมน้ำมันเติมสารหล่อลื่นและเปลี่ยนใบมีดของรถตัดอ้อย เพื่อทำให้รถตัดอ้อยไม่หยุดชะงักและสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้น Rodrigues และคณะ [9] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อนำมาปรับปรุงระบบบำรุงรักษารถตัดอ้อย จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าการวางแผนการเดินทางสำหรับทีมซ่อมบำรุงที่ไม่ดีนั้น ทำให้รถตัดอ้อยที่ต้องการรับบริการรอเป็นเวลานาน จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ใช้วิธีการ Approximate Hypercube เพื่อแก้ปัญหา ใน พ.ศ. 2563 Afsharnia และคณะ [10] ได้นำการวิเคราะห์แบบ Bayes Networks and Fault Tree มาใช้กับรถตัดอ้อยเพื่อจัดตารางการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันให้เหมาะสมที่สุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสามารถลดปัญหาการชำรุดและการหยุดทำงานของรถตัดอ้อยได้

การเก็บเกี่ยวอ้อยเป็นกิจกรรมที่สำคัญสำหรับกระบวนการผลิตน้ำตาล เนื่องจากหากไม่สามารถเก็บเกี่ยวได้ตามแผนก็จะไม่สามารถส่งอ้อยเข้าไปในกระบวนการผลิตได้ตามที่วางแผนการผลิตไว้ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง ปัญหาหลักที่ทำให้การเก็บเกี่ยวอ้อยโดยใช้รถตัดอ้อยลดลงมาจากสาเหตุหลักดังนี้ การบำรุงรักษาเมื่อขัดข้อง (Breakdown Maintenance) การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง (Corrective Maintenance) โดยรถตัดอ้อยจำเป็นต้องหยุดเป็นระยะเพื่อได้รับการซ่อมบำรุงจากช่างเทคนิคตามสาเหตุข้างต้น รูปแบบการเสียของรถตัดอ้อยมีทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ ทางกล ไฮดรอลิก และไฟฟ้า [11] สำหรับการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยในฤดูเก็บเกี่ยว รถตัดอ้อยแต่ละคันจะตัดอ้อยตามแปลงอ้อยในพื้นที่ต่างๆ ตามแผนที่ได้วางไว้ ดังนั้นช่างเทคนิคจะต้องมีรถสำหรับเดินทางไปยังแปลงอ้อยที่มีรถตัดอ้อยที่ต้องการรับการซ่อมบำรุง ในรถที่ใช้สำหรับเดินทางไปซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยประกอบไปด้วยช่างซ่อมบำรุง อะไหล่และอุปกรณ์

ปัจจุบันของโรงงานน้ำตาลกรณีศึกษา ได้แยกหน่วยซ่อมบำรุงเป็นบริษัทย่อยเพื่อดูแลและจัดการงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย ในโรงงานน้ำตาลกรณีศึกษานี้ได้แบ่งระบบซ่อมบำรุงตามลักษณะงานและความเกี่ยวข้องกันเป็น 2 ระบบ

คือ ระบบทางกลและไฮดรอลิกซ่อมบำรุงรูปแบบทางกลและไฮดรอลิก และระบบไฟฟ้าซ่อมบำรุงรูปแบบไฟฟ้า เพื่อความสะดวกต่อการจัดเตรียมเครื่องมือ และอะไหล่ประจำวันของแต่ละระบบ รวมทั้งลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากเครื่องมืออะไหล่ที่มีขนาดใหญ่ของระบบทางกล และไฮดรอลิกที่จะกระทบต่อระบบไฟฟ้า โดยโรงงานมีแผนการซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้กับรถตัดอ้อย สำหรับแผนการจัดงานซ่อมบำรุงให้กับรถซ่อมบำรุงในแต่ละวันจะเลือกจากรถคันที่ว่างจากงานก่อนหน้าเร็วที่สุด รถตัดอ้อยอาจต้องรอนานถ้าช่างเทคนิคมีทักษะที่ไม่เพียงพอต่อปัญหาของรถตัดอ้อยที่ต้องการทักษะการซ่อมบำรุงที่สูงหรือช่างเทคนิคอาจอยู่ไกลจากรถตัดอ้อยที่ต้องการการซ่อมบำรุง ปัญหาเหล่านี้ทำให้รถตัดอ้อยไม่สามารถตัดอ้อยได้ซึ่งส่งผลให้โรงงานน้ำตาลต้องรอวัตถุดิบเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาคือการรักษาความสามารถในการเก็บเกี่ยวของรถตัดอ้อยให้ทำงานต่อเนื่องให้ได้นานที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการเสียเวลาจากอุปสรรคเหล่านี้ให้น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การลดการเสียเวลาจากการหยุดทำงานของรถตัดอ้อยหรือค่าเสียโอกาสจากการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยล่าช้า อาจทำให้ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ของบริษัทย่อยนั้นสูงขึ้นซึ่งอาจเกิดจากค่าเดินทาง [12] ค่าล่วงเวลาของช่างซ่อมบำรุงและค่าจ้างผู้ให้บริการภายนอก ดังนั้นเพื่อให้ต้นทุนการดำเนินงานของบริษัทย่อยมีค่าน้อยที่สุดจำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อจัดตารางงานและเส้นทางการเดินทางสำหรับรถซ่อมบำรุง

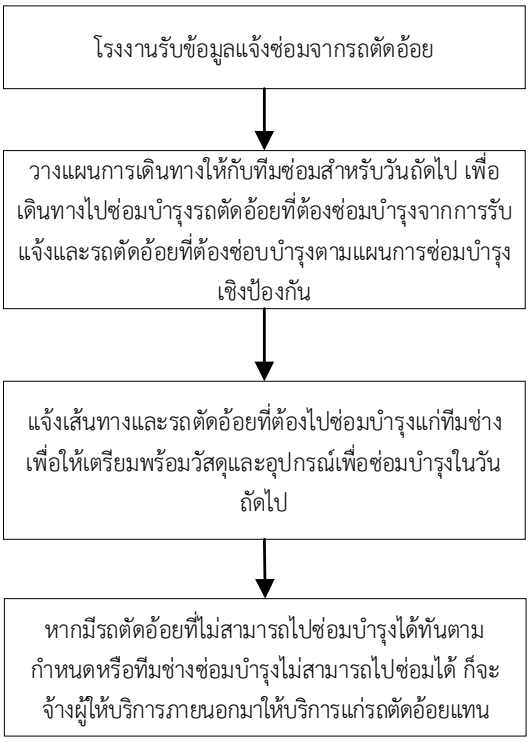
แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมได้นำมาแก้ปัญหากำหนดเส้นทาง ยศวังใจและคำเมือง [13] ได้นำแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งแบบพลวัต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดที่ประกอบด้วยต้นทุนการใช้ ยานพาหนะ ต้นทุนการเดินทางและค่าปรับการทดลองมีการแบ่งเป็น 2 กรณี คือเป็นพลวัตและไม่เป็นพลวัต ผลการทดลองพบว่า โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมของ กรณีที่ 1 ได้ 17 ราย และ กรณีที่ 2 ได้ 10 ราย และสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางเวลา Hossein และ Doulabi [14] ได้นำได้นำแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางงานแบบเปิด (Open-shop production) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าปรับจากการเสร็จก่อนและหลังเวลานัดส่ง ผลการทดลองพบว่า แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานแบบเปิดได้โดยไม่ใช้เวลานาน คือ 5 ขั้นตอนและ 3 งาน จากการทบทวนวรรณกรรมจึงสรุปได้ว่า กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมมีจุดเด่น คือ สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างแน่นอน แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าการซ่อมบำรุงของโรงงานกรณีศึกษามีจำนวนรถซ่อมบำรุงในแต่ละวันมีค่าเฉลี่ย 15.1 คันต่อวัน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.24 คันต่อวัน ซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมจึงเหมาะสมแก่การนำมาแก้ปัญหานี้

ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยเพื่อลดต้นทุนการดำเนินงาน ซึ่งผลที่จะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ การได้รับแผนการซ่อมบำรุงสำหรับมอบหมายรถซ่อมบำรุงให้กับรถตัดอ้อยและเส้นทางปฏิบัติงาน เป้าหมาย คือ แผนการซ่อมบำรุงที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำที่สุด นั่นคือ ต้นทุนการเดินทาง ค่าเสียโอกาสจากเวลารอของรถตัดอ้อย การทำงานล่วงเวลาของช่างเทคนิคและค่าจ้างผู้ให้บริการภายนอก

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ประยุกต์มาจากงานวิจัยของ Zamorano และ Stolletz [15] เพื่อให้รองรับเงื่อนไขการคิดเวลาแล้วเสร็จเหมือนกับการผลิตแบบเปิด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยเพื่อให้มีแผนการซ่อมบำรุงที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำที่สุด ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานซ่อมบำรุงดังรูปที่ 1

เงื่อนไขสำหรับการบำรุงรักษามีดังนี้ กรอบเวลาของรถตัดอ้อยจะรู้ล่วงหน้าจากตารางซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยและการคาดการณ์ล่วงหน้า รถตัดอ้อยสามารถรับการบริการ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานซ่อมบำรุง

ได้มากกว่าหนึ่งระบบ ในการซ่อมหากทีมช่างซ่อมไม่เสร็จตามเวลาที่กำหนดจะมีค่าเสียโอกาสตามเวลาที่เกิน ในบางกรณีที่รถตัดอ้อยต้องการการให้ซ่อมบำรุงจากทั้ง 2 ระบบ รถซ่อมบำรุงจำเป็นต้องไปให้บริการทั้ง 2 ระบบ จึงจะทำให้รถตัดอ้อยกลับมาทำงานได้ การคิดค่าเสียโอกาสในกรณีนี้จะคิดจากงานที่เสร็จช้าที่สุดเหมือนกับลักษณะการผลิตแบบเปิด ทั้งนี้รถตัดอ้อยต้องไม่รอทีมช่างซ่อมบำรุงเกินค่ารอสูงสุด ($TDmax$) หากเวลารอสูงสุดเกินทางโรงงานต้องจ้างผู้ให้บริการภายนอกเพื่อซ่อมบำรุงแทน โดยรถซ่อมบำรุงที่สามารถไปซ่อมรถตัดอ้อยได้นั้น ต้องมีจำนวนช่างเทคนิค ทักษะและระดับทักษะที่เพียงพอ โดยรถซ่อมบำรุงแต่ละคันต้องจัดอุปกรณ์และอะไหลให้เพียงพอต่อการบริการรถตัดอ้อยในหนึ่งวันก่อนออกจากโรงงานน้ำตาล เมื่อครบเวลาทำงานแต่ละทีมต้องกลับมาโรงงานน้ำตาล ในกรณีที่ช่างเทคนิคกลับมาช้ากว่าเวลาทำงาน ทางโรงงานน้ำตาลจะต้องจ่ายค่าโอทีให้กับช่างซ่อมบำรุง โดยมีการกำหนดเวลาล่วงเวลาสูงสูดไว้ด้วย หากงานใดไม่สามารถไปซ่อมบำรุงได้หรือไม่คุ้มกับค่าล่วงเวลา ทางโรงงานน้ำตาลจะจ้างผู้ให้บริการภายนอกมาให้บริการแก่รถตัดอ้อยแทน

2.1 แบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย ซึ่งอ้างอิงกับรูปแบบการทำงานมาจากโรงงานกรณีศึกษา โดยมีสมมติฐานดังนี้

1) รถตัดอ้อยแต่ละรายจะได้รับบริการจากรถซ่อมบำรุงอย่างมากเพียงหนึ่งคันจากแต่ละระบบ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (2)

2) โรงงานน้ำตาลมีอุปกรณ์และอะไหล่สำรองไม่จำกัด (ไม่มีเรื่องเวลาของการจัดซื้อ) ซึ่งในแบบจำลองไม่มีข้อจำกัดบังคับ

3) ในแต่ละวันรถซ่อมบำรุงได้เตรียมอุปกรณ์และอะไหล่เพียงพอต่อการซ่อมทั้งวัน ซึ่งในแบบจำลองไม่มีข้อจำกัดบังคับ

4) รถตัดอ้อยแต่ละรายจะได้รับบริการจากรถซ่อมบำรุงเพียงพอตามจำนวนและความสามารถของช่างซ่อมบำรุงที่จำเป็น ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (13) และ (14)

5) ช่างเทคนิคแต่ละระบบได้ถูกจัดทีมให้ประจำรถซ่อมบำรุงตั้งแต่ก่อนเริ่มงาน โดย $g_{k,q,r}$ เป็นทักษะรวมของช่างเทคนิคที่อยู่ในรถคันนั้นๆ

6) รถซ่อมบำรุงมีขนาดเดียว (ค่าเดินทางเท่ากัน) ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (1)

7) ไม่สามารถแบ่งงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (2)

8) เมื่อสิ้นสุดการทำงานในแต่ละวัน รถซ่อมบำรุงจะต้องกลับมายังคลังสินค้า ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (4)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็ม ($X_{i,j,q,k}$) และจำนวนจริง ($s_{i,q,k}$) ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงเป็นแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของเซตและดัชนี พารามิเตอร์ ตัวแปรตัดสินใจ สมการเป้าหมายและข้อจำกัด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เซตและดัชนี

N คือ เซ็ตของรถตัดอ้อยและโรงงาน

N' คือ เซ็ตของรถตัดอ้อย

Q คือ เซ็ตของระบบซ่อมบำรุง

K_q คือ เซ็ตของทีมซ่อมบำรุงแต่ละระบบโดยที่ $q \in Q$

R_q คือ เซ็ตของทักษะของแต่ละระบบโดยที่ $q \in Q$

i,j คือ ดัชนีของรถตัดอ้อยและโรงงาน

q คือ ดัชนีของระบบซ่อมบำรุง

k คือ ดัชนีทีมซ่อมบำรุงของแต่ละระบบ

r คือ ดัชนีทักษะของแต่ละระบบ

พารามิเตอร์

$Tc_{i,j}$ คือ ค่าการเดินทางจากตำแหน่ง i ไปตำแหน่ง j (บาทต่อนาที)

TDc_i คือ ค่าเสียโอกาสจากความล่าช้าของรถตัดอ้อย i (บาทต่อนาที)

OSc_q คือ ค่าจ้างผู้ให้บริการภายนอก ที่ต้องซ่อมบำรุงด้วยระบบ q (บาทต่อนาที)

$OTc_{k,q}$ คือ ค่าล่วงเวลาของทีมซ่อมบำรุง ทีม k ระบบ q (บาทต่อนาที)

e คือ เวลาเริ่มงาน

f คือ เวลาเลิกงาน

a_i คือ เวลาเริ่มต้นของกรอบเวลาของรถตัดอ้อย i

b_i คือ เวลาแล้วเสร็จที่กำหนดของรถตัดอ้อย i

$t_{i,j}$ คือ เวลาเดินทางจากรถตัดอ้อย i ไป j (นาที)

$p_{i,q}$ คือ เวลาให้บริการรถตัดอ้อย i ระบบ q (นาที)

$g_{k,q,r}$ คือ ระดับทักษะ r ของทีมซ่อมบำรุง k ระบบ q

$u_{i,q,r}$ คือ ระดับทักษะ r ของระบบ q ที่จำเป็นที่ต้องใช้ซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย i เป็นอย่างน้อย

$V_{i,q}$ คือ เมื่อรถตัดอ้อย i ต้องการการซ่อมบำรุงจากระบบ q จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าไม่มีค่าเท่ากับ 0

n_q คือ จำนวนทีมซ่อมของแต่ละระบบ (ทีม)

$h_{k,q}$ คือ จำนวนช่างในทีมซ่อมของแต่ละทีม (คน)

$w_{i,q}$ คือ จำนวนช่างซ่อมบำรุงที่รถตัดอ้อย i ต้องการสำหรับระบบ q (คน)

M คือ จำนวนที่มีค่ามาก

$TDmax$ คือ ค่าความล่าช้าที่ยอมรับได้ (นาที)

$OTmax$ คือ ค่าล่วงเวลาที่ยอมรับได้ (นาที)

ตัวแปรตัดสินใจ

$X_{i,j,q,k}$ { 1 เมื่อ ระบบ q ทีม k เดินทางจากรถตัดอ้อย i ไปยังรถตัดอ้อย j ; 0 เมื่อเป็นกรณีอื่นๆ

$Y_{i,q,k}$ { 1 เมื่อ ระบบ q ทีม k มีงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย i ; 0 เมื่อเป็นกรณีอื่นๆ

$OS_{i,q}$ { 1 เมื่อให้ผู้ให้บริการภายนอกซ่อมบำรุงรถอ้อย i ที่ต้องซ่อมจากระบบ q ; 0 เมื่อเป็นกรณีอื่นๆ

TD_i คือ เวลาล่าช้าในการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย i

$OT_{q,k}$ คือ เวลาล่วงเวลาของทีมซ่อมบำรุง k ระบบ q

$s_{i,q,k}$ คือ เวลาเริ่มต้นการทำงานของทีมซ่อม k ระบบ q บนรถตัดอ้อย i

แบบจำลอง

$$\begin{aligned} Min\, Z = & \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{q\in Q}\sum_{k\in K_q} X_{i,j,q,k}\cdot t_{i,j}\cdot Tc_{i,j} \\ & + \sum_{i\in N} TD_i \cdot TDc_i \\ & + \sum_{q\in Q}\sum_{k\in K_q} OT_{q,k}\cdot OTc_{k,q} \\ & + \sum_{i\in N}\sum_{q\in Q} OS_{i,q}\cdot OSc_q \cdot p_{i,q} \end{aligned} \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$\sum_{k\in K_q} Y_{i,q,k} + OS_{i,q} = V_{i,q} \qquad \forall i \in N', q \in Q \quad (2)$$

$$\sum_{j\in N'} X_{i,j,q,k} = Y_{i,q,k} \qquad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q; i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{j\in N'} (X_{i,j,q,k} - X_{j,i,q,k}) = 0 \qquad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q; i \neq j \quad (4)$$

$$(s_{i,q,k} + p_{i,q} + t_{i,j}) \cdot Y_{i,q,k} - M(1 - X_{j,i,q,k}) \le s_{j,q,k} \quad \forall i \in N, j \in N', q \in Q, k \in K_q; i \neq j \quad (5)$$

$$s_{i,q,k} \ge a_i \cdot Y_{i,q,k} \quad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q \quad (6)$$

$$s_{i,q,k} - (b_i - p_{i,q}) \cdot Y_{i,q,k} \le TD_i \quad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q \quad (7)$$

$$TD_i \le TDmax \quad \forall i \in N' \quad (8)$$

$$s_{j,q,k} \ge (e + t_{0,j}) \cdot X_{0,j,q,k} \quad \forall j \in N', q \in Q, k \in K_q \quad (9)$$

$$s_{i,q,k} - OT_{i,k,q} + (t_{i,0} + p_{i,q}) \cdot X_{i,0,q,k} \le f \quad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} OT_{i,q,k} \le OTmax \quad q \in Q, k \in K_q \quad (11)$$

$$\sum_{j=N'} \sum_{k \in K_q} X_{0,j,q,k} \le n_q \quad \forall q \in Q \quad (12)$$

$$w_{i,q} \cdot Y_{i,q,k} \le h_{k,q} \quad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q \quad (13)$$

$$u_{i,q,r} \cdot Y_{i,q,k} \le g_{k,q,r} \quad \forall i \in N', q \in Q, k \in K_q, r \in R_q \quad (14)$$

สมการที่ (1) หาค่าผลเฉลยที่มีต้นทุนการดำเนินการรวมน้อยที่สุด ซึ่งประกอบด้วย ค่าเดินทาง ค่าเสียโอกาสจากความล่าช้า ค่าล่วงเวลาของทีมซ่อมบำรุงและค่าจ้างผู้ให้บริการภายนอก สมการที่ (2) รับประกันว่ารถตัดอ้อย i ที่ต้องซ่อมบำรุงด้วยระบบ q จะได้รับบริการจากทีมซ่อม k หรือผู้ให้บริการภายนอก สมการที่ (3) รับประกันว่ารถตัดอ้อย i ที่ต้องซ่อมบำรุงด้วยระบบ q จะได้รับบริการจากทีมซ่อม k สมการที่ (4) ข้อกำหนดการเดินรถทีมซ่อมบำรุง เมื่อรถทีมซ่อมบำรุงเข้าไปให้บริการรถตัดอ้อยนั้น ต้องออกจากรถตัดอ้อยคันเดิมเท่านั้น สมการที่ (5) ข้อจำกัดเกี่ยวกับเวลาที่ทีมซ่อมบำรุงเดินทางจากรถตัดอ้อย i ไปยังรถตัดอ้อย j โดยที่เวลาแล้วเสร็จรวมกับเวลาเดินทางของรถตัดอ้อยก่อนหน้าต้องไม่มากกว่ารถตัดอ้อยที่ต้องซ่อมคันถัดไป สมการที่ (6) ทีมซ่อมบำรุงไม่สามารถเริ่มงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยก่อนเวลาที่กำหนดได้ สมการที่ (7) เกิดเวลาล่าช้าขึ้นหากทีมซ่อมไม่สามารถซ่อมได้ตามเวลาที่กำหนด สมการที่ (8) เวลาที่ซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยต้องล่าช้าไม่เกินที่กำหนดไว้ สมการที่ (9) เวลาเริ่มซ่อมรถตัดอ้อยต้องมากกว่าเวลาที่ทีมซ่อมเริ่มทำงานในวันนั้น รวมกับเวลาเดินทาง สมการ (10) หากทีมซ่อมกลับถึงโรงงานช้ากว่าเวลาที่กำหนดจะทำให้เกิดเวลาล่วงเวลา สมการที่ (11) เวลาล่วงเวลาของแต่ละทีมซ่อมบำรุงในแต่ละวันจะไม่มากเกินที่กำหนดไว้ สมการที่ (12) ทีมที่ออกไปซ่อมบำรุงในแต่ละวันต้องไม่เกินจำนวนที่มีในแต่ละระบบ สมการที่ (13) จำนวนช่างซ่อมบำรุงในทีมต้องมีเพียงพอกับการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย สมการที่ (14) ระดับทักษะที่มีและระดับของทักษะต้องเพียงพอต่อการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย

2.2 ตัวอย่างการคำนวณ

เนื้อหาในหัวข้อนี้แสดงตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมจากหัวข้อที่ 2.1 เพื่อหาคำตอบ โดยข้อมูลต่างๆ ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบกับแบบจำลองนี้ ตัวอย่างนี้มีรถตัดอ้อยทั้งหมด 15 คัน ที่ต้องได้รับการบริการจากทีมช่างเทคนิค ซึ่งมีเวลาเดินทางจากรถตัดอ้อย i ไปยังรถตัดอ้อย j ($t_{i,j}$) ดังรูปที่ 2 รถตัดอ้อยแต่ละคันมีกรอบเวลา (a_i, b_i) เวลาในการรับบริการ ($p_{i,q}$) ความต้องการรับบริการ ($v_{i,q}$) และจำนวนคนอย่างน้อยที่ต้องให้บริการ ($w_{i,q}$) ดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าเสียโอกาสจากการทำงานล่าช้า (TDc_i) ระดับทักษะ r ของระบบ q ที่จำเป็นที่ต้องใช้ซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย i ($u_{i,q,r}$) ดังแสดงในตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของทีมช่างเทคนิคประกอบด้วย ระดับทักษะ r ของทีมซ่อมบำรุง k ระบบ q โดยระดับทักษะ r จำแนกได้ดังนี้ 0 คือ ไม่มีทักษะ 1 คือ มีทักษะระดับพื้นฐาน 2 คือ มีทักษะระดับปานกลาง และ 3 คือ มีทักษะระดับเชี่ยวชาญ ($g_{k,q,r}$) จำนวนช่างในทีมซ่อมของแต่ละทีม ($h_{k,q}$) และค่าล่วงเวลาของทีมซ่อมบำรุงทีม k ระบบ q ($OTc_{k,q}$) ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยช่างเทคนิคในแต่ละระบบจะมีจำนวนทีมเท่ากับ 4 และ 2 ทีม เวลาเริ่มงานที่นาทีที่ 0 (e) จนเลิกงานในนาทีที่ 480 (f) เวลาล่าช้า

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0		29	31	26	28	25	29	26	28	30	27	30	48	41	49	46
1	29		12	14	13	14	15	15	17	17	20	20	36	34	39	38
2	31	12		15	14	16	15	16	17	17	21	20	35	34	37	37
3	26	14	15		12	11	14	12	14	16	17	18	35	32	38	36
4	28	13	14	12		13	12	13	14	14	17	17	34	31	36	35
5	25	14	16	11	13		14	12	15	16	17	18	36	32	38	37
6	29	15	15	14	12	14		13	12	12	16	15	32	29	34	33
7	26	15	16	12	13	12	13		13	14	15	16	34	30	36	34
8	28	17	17	14	14	15	12	13		12	14	13	31	27	33	32
9	30	17	17	16	14	16	12	14	12		15	13	30	27	32	31
10	27	20	21	17	17	17	16	15	14	15		13	31	26	33	31
11	30	20	20	18	17	18	15	16	13	13	13		29	24	31	29
12	48	36	35	35	34	36	32	34	31	30	31	29		20	13	17
13	41	34	34	32	31	32	29	30	27	27	26	24	20		20	15
14	49	39	37	38	36	38	34	36	33	32	33	31	13	20		15
15	46	38	37	36	35	37	33	34	32	31	31	29	17	15	15	

รูปที่ 2 เวลาเดินทางจากรถตัดอ้อย i ไปยังรถตัดอ้อย j

ที่จะซ่อมรถตัดอ้อยสูงสุดไม่เกิน 30 นาที ($TDmax$) การทำงานล่วงเวลากำหนดให้ไม่เกิน 120 นาที ($OTmax$) ค่าใช้จ่ายสำหรับการเดินทางเท่ากับ 3 บาทต่อนาที ($Tc_{i,j}$) และค่าใช้จ่ายสำหรับจ้างผู้ให้บริการภายนอกทั้ง 2 ระบบเท่ากับ 20 บาทต่อนาที (OSc_q)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของรถตัดอ้อย

รถตัดอ้อยคันที่	a_i	b_i	$p_{i,1}$	$p_{i,2}$	$V_{i,1}$	$V_{i,2}$	$w_{i,1}$	$w_{i,2}$
1	315	525	150	0	1	0	2	0
2	350	500	90	90	1	1	2	2
3	15	180	75	0	1	0	2	0
4	150	330	120	0	1	0	1	0
5	200	410	0	150	0	1	0	1
6	300	480	120	0	1	0	2	0
7	100	220	60	0	1	0	2	0
8	200	350	90	0	1	0	1	0
9	50	185	0	60	0	1	0	1
10	0	420	360	0	1	0	2	0
11	30	150	45	0	1	0	2	0
12	150	300	90	0	1	0	2	0
13	60	180	60	0	1	0	1	0
14	125	305	0	120	0	1	0	1
15	180	315	75	0	1	0	2	0

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายและทักษะที่ต้องการของรถตัดอ้อย

รถตัดอ้อยคันที่	TDc_i	$u_{i,1,1}$	$u_{i,1,2}$	$u_{i,2,1}$	$u_{i,2,1}$
1	7	0	2	0	0
2	5	2	2	1	2
3	3	2	3	0	0
4	7	3	2	0	0
5	5	0	0	0	2
6	5	2	0	0	0
7	5	2	2	0	0
8	3	2	2	0	0
9	7	0	0	3	0
10	7	3	3	0	0
11	5	2	2	0	0
12	5	2	0	0	0
13	5	2	2	0	0
14	3	0	0	2	2
15	5	2	2	0	0

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของทีมช่างเทคนิค

ทีมช่างที่	$g_{k,1,1}$	$g_{k,1,2}$	$g_{k,2,1}$	$g_{k,2,1}$	$h_{k,1}$	$h_{k,2}$	$OTc_{i,1}$	$OTc_{i,2}$
1	2	2	2	2	2	1	6	5
2	2	3	3	3	2	2	8	8
3	3	2	-	-	2	-	8	-
4	3	3	-	-	2	-	8	-

ผลจากการหาคำตอบของปัญหาตัวอย่างได้ผลการจัดเส้นทางของทีมช่างที่ไปให้บริการรถตัดอ้อย ดังตารางที่ 4 ทำให้ได้ค่าใช้จ่ายดำเนินการรวมที่ต่ำที่สุดคือ 1,940 บาท โดยมีต้นทุนการเดินทาง 1,683 บาท ค่าเสียโอกาสจากเวลารอของรถตัดอ้อย 85 บาท ค่าการทำงานล่วงเวลาของช่างเทคนิค 172 บาท และค่าจ้างผู้ให้บริการภายนอก 0 บาท

ตารางที่ 4 เส้นทางของทีมช่างที่วางแผนด้วยแบบจำลอง

	เส้นทาง
ทีมที่ 1 ระบบที่ 1	0 → 13 → 12 → 15 → 2 → 0
ทีมที่ 2 ระบบที่ 1	0 → 3 → 7 → 8 → 6 → 0
ทีมที่ 3 ระบบที่ 1	0 → 11 → 4 → 1 → 0
ทีมที่ 4 ระบบที่ 1	0 → 10 → 0
ทีมที่ 1 ระบบที่ 2	0 → 5 → 0
ทีมที่ 2 ระบบที่ 2	0 → 9 → 14 → 2 → 0

3. ผลการทดลอง

การทดสอบแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

แบบผสมเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ AMD® Ryzen 5 4500U CPU @ 2.38 กิกะเฮิรตซ์, 8 G-Byte of RAM โดยใช้โปรแกรม Lingo 16 ในการคำนวน ซึ่งโปรแกรม Lingo นั้นใช้วิธีการขยายและจำกัดเขต (Branch-and-bound) ในการหาคำตอบ การเขียนโปรแกรม Lingo สามารถศึกษาได้ที่ www.lindo.com/downloads/PDF/LINGO.pdf

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมจะถูกเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายรวมที่คำนวนจากวิธีการวางแผนในปัจจุบัน ซึ่งแผนในปัจจุบันจะจัดเรียงรถตัดอ้อยที่สามารถทำได้เร็วที่สุดมาก่อน โดยจะให้ทีมที่ว่างให้บริการก่อน หากมีทีมที่ว่างมากกว่าหนึ่งทีมจะเลือกทีมที่มีทักษะกับจำนวนคนน้อยที่สุดที่เพียงพอให้บริการก่อน ในกรณีที่ไม่มีทีมที่ว่างสำหรับรถตัดอ้อยจะทำการจ้างผู้ให้บริการภายนอก ดังแสดงตัวอย่างเส้นทางที่จัดด้วยวิธีในปัจจุบันในกรณีเดียวกันกับหัวข้อที่ 2.2 ดังตารางที่ 5 ทำให้ได้ค่าใช้จ่ายดำเนินการรวมที่ต่ำที่สุดคือ 2,641 บาท โดยมีต้นทุนการเดินทาง 1,794 บาท ค่าเสียโอกาสจากเวลารอของรถตัดอ้อย 249 บาท ค่าการทำงานล่วงเวลาของช่างเทคนิค 598 บาท และค่าจ้างผู้ให้บริการภายนอก 0 บาท

ตารางที่ 5 เส้นทางของทีมช่างที่วางแผนด้วยวิธีการในปัจจุบัน

	เส้นทาง
ทีมที่ 1 ระบบที่ 1	0 → 10→ 2 → 0
ทีมที่ 2 ระบบที่ 1	0 → 3 → 11 → 7 → 8 → 6 → 0
ทีมที่ 3 ระบบที่ 1	0 → 13 → 4 → 1 → 0
ทีมที่ 4 ระบบที่ 1	0 → 12 → 15 → 0
ทีมที่ 1 ระบบที่ 2	0 → 5 → 0
ทีมที่ 2 ระบบที่ 2	0 → 9 → 14 → 2 → 0

การทดสอบปัญหานี้ใช้พารามิเตอร์เดียวกันกับหัวข้อที่ 2.2 ผู้วิจัยได้สร้างชุดข้อมูลเพื่อทดสอบกับแบบจำลองข้างต้นดังต่อไปนี้

1) ตำแหน่งรถตัดอ้อยสุ่มเลือกอยู่ในช่วงพิกัด [0, 0] ถึง [100, 100] กิโลเมตร

2) ระยะเวลาในการให้บริการอยู่ในช่วง [30, 360] นาที

3) จำนวนครั้งทั้งหมดที่ต้องการการรับบริการของรถตัดอ้อยอยู่ในช่วง [11,26] ครั้ง

4) ทักษะที่ต้องการทีมช่างน้อยที่สุดของรถตัดอ้อย อยู่ระหว่าง [0,3] และจำนวนช่างที่รถตัดอ้อยต้องการน้อยที่สุดสำหรับบริการอยู่ระหว่าง [0,2] คน

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมและแผนในปัจจุบัน สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความต่างด้านค่าใช้จ่ายได้ดังสมการที่ (15)

$$\frac{\text{ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติในปัจจุบัน} - \text{ค่าใช้จ่ายแบบจำลอง}}{\text{ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติในปัจจุบัน}} \times 100 \quad (15)$$

ผลการทดลองการจัดเส้นทางสำหรับรถตัดอ้อยจำนวน 10–25 คัน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมและแผนในปัจจุบันมีเปอร์เซ็นต์ความต่างด้านค่าใช้จ่ายเฉลี่ยอยู่ที่ 33.62 เปอร์เซ็นต์ โดยแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสามารถหาคำตอบสำหรับการจัดเส้นทางเพื่อให้บริการรถตัดอ้อยไม่เกิน 25 คัน ได้ภายใน 358.4 วินาที จากผลการทดลองตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าจำนวนรถตัดอ้อยเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในบางกรณีที่จำนวนรถตัดอ้อยที่เพิ่มขึ้นแต่ค่าใช้จ่ายลดลง เกิดจากกรณีที่รถตัดมีกรอบเวลาที่ไม่ชนกัน จึงทำให้รถตัดอ้อยถูกจัดให้รับบริการได้โดยไม่เกิดค่าล่วงเวลา ค่าเสียโอกาสจากความล่าช้าหรือค่าจ้างผู้บริการภายนอก

การวิเคราะห์ T-Test ได้ค่าดังตารางที่ 7 จากตาราง p-value < 0.05 ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าแตกต่างกับแผนในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสามารถนำไปช่วยจัดตารางเวลาและกำหนดเส้นทางของทีมช่างเทคนิคเพื่อลดต้นทุนการดำเนินงานได้

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายแผนในปัจจุบันและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ชุดข้อมูล	จำนวนรถตัดอ้อย (คัน)	แผนในปัจจุบัน	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์		% ความต่างของค่าใช้จ่าย
		ค่าใช้จ่าย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	เวลาคำนวณ (วินาที)	
1	10	1,455.00	1,250.00	0.61	14.08
2	12	2,187.00	1,448.00	0.71	33.79
3	15	2,641.00	1,940.00	3.38	26.54
4	17	3,704.29	3,165.57	4.14	14.54
5	19	4,918.78	2,607.11	9.68	46.99
6	20	7,203.16	5,285.94	26.83	26.61
7	21	9,143.60	4,117.99	47.59	54.96
8	23	10,160.52	5,015.68	127.06	50.63
9	25	15,717.00	10,300.70	358.40	34.46
				ค่าเฉลี่ย	33.62

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ T-Test

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean	T-value	*p*-value
แผนในปัจจุบัน	9	6348	4676	1559	3.38	0.010
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	9	3903	2812	937		

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาการจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่างในแต่ละวัน ซึ่งพิจารณาการวางแผนสำหรับทีมช่างทั้ง 2 ระบบ โดยรถตัดอ้อยมีโอกาสที่ต้องการรับบริการจากทั้ง 2 ระบบ วัตถุประสงค์สำหรับงานวิจัยนี้ คือ ทำให้เกิดต้นทุนในการเดินทาง ค่าเสียโอกาสจากความล่าช้า ค่าล่วงเวลา และค่าจ้างผู้บริการภายนอก การแก้ปัญหาสำหรับงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่าง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจำนวนรถตัดอ้อยเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการบริการของทีมช่างที่ไม่เพียงพอต่อรถตัดอ้อย ทำให้เกิดค่าล่วงเวลา ค่าเสียโอกาสจากความล่าช้าและค่าจ้างผู้บริการภายนอก ผลการวางแผนสำหรับการจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่างจากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมทำให้ต้นทุนการดำเนินงานเฉลี่ยลดลง 33.62 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแผนในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถหาคำตอบสำหรับรถตัดอ้อยไม่เกิน 25 คัน ได้ภายใน 358.4 วินาที

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาโรงงานที่มีจำนวนรถตัดอ้อยน้อยและการวางแผนรายวัน ดังนั้นการวางแผนสำหรับการจัดตารางเวลาและการกำหนดเส้นทางของทีมช่างจากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมจึงมีความเหมาะสม แต่ในกรณีที่เป็นการวางแผนเป็นรายอาทิตย์หรือมีรถตัดอ้อยจำนวนมาก แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมอาจต้องใช้เวลาในการคำนวนเป็นเวลานาน ในอนาคตสามารถพัฒนาต่อยอดแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมให้สามารถวางแผนเป็นรายอาทิตย์ในปัญหาขนาดเล็ก และพัฒนาเมตาฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดกลางและใหญ่เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมภายในระยะเวลาที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Sriwongras, S. Sayasoonthorn, S. Maneewan, and N. Bhuwakiatkhamjorn, “Development of

a novel sugar cane planter for bud chip as planting material," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 1, pp. 4–15, 2020 (in Thai).

[2] K. Worasan, K. Sethanan, R. Pitakaso, K. Moonsri, and K. Nitisiri, "Hybrid particle swarm optimization and neighborhood strategy search for scheduling machines and equipment and routing of tractors in sugarcane field preparation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 178, 2020, Art. no. 105733.

[3] K. Sethanan and W. Neungmatcha, "Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field operations," *European Journal of Operational Research*, vol. 252, no. 3, pp. 969–984, 2016.

[4] A. E. Ahmed and A. O. Alam-Eldin, "An assessment of mechanical vs manual harvesting of the sugarcane in Sudan–The case of sennar sugar factory," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 14, no. 2, pp. 160–166, 2015.

[5] N. B. Dos Santos, "Economic performance of motor graders in sugarcane (*Saccharum* spp.) processing plants," *Energia na Agricultura*, vol. 32, no. 3, pp. 209–214, 2017.

[6] N. B. Santos, R. P. Silva, and C. D. Gadanha Junior, "Economic analysis for sizing of sugarcane (*Saccharum* spp.) mechanized harvesting," *Engenharia Agrícola*, vol. 34, pp. 945–954, 2014.

[7] P. L. Ramos, D. C. Nascimento, C. Cocolo, M. J. Nicola, C. Alonso, L. G. Ribeiro, A. Ennes, and F. Louzada, "Reliability-centered maintenance: Analyzing failure in harvest sugarcane machine using some generalizations of the Weibull distribution," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2018, 2018.

[8] L. F. Faria and J. E. Silva, "Effects of maintenance management procedures in sugarcane mechanic harvesting system equipment," *Engenharia Agricola*, vol. 35, no. 6, pp. 1187–1197, 2015.

[9] L. F. Rodrigues, R. Morabito, F. Y. Chiyoshi, A. P. Iannoni, and C. Saydam, "Analyzing an emergency maintenance system in the agriculture stage of a Brazilian sugarcane mill using an approximate hypercube method," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 151, pp. 441–452, 2018.

[10] F. Afsharnia, A. Marzban, M. Asoodar, and A. Abdeshahi, "Preventive maintenance optimization of sugarcane harvester machine based on FT-Bayesian network reliability," *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2020.

[11] P. Najafi, M. Asoodar, A. Marzban, and M. Hormozi, "Reliability analysis of agricultural machinery: A case study of sugarcane chopper harvester," *Agricengint: CIGR Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 158–165, 2015.

[12] R. Taengphukieo, N. Issarapong, P. Khamla, and P. To-on, "A guideline of to reduce transportation cost: A case study of a transport Co., Ltd.," *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 18, no. 2, pp. 69–76, 2020 (in Thai).

[13] S. Yodwangjai and K. Khammuang, "A mixed integer programming model for dynamic vehicle routing problem," *The Journal of KMUTNB*, vol. 26, no. 2, pp. 223–238, 2016 (in Thai).

[14] S. H. H. Doulabi, "A mixed integer linear formulation for the open shop earliness-tardiness scheduling problem," *Applied Mathematical Sciences*, vol. 4, no. 35, pp. 1703–1710, 2010.

[15] E. Zamorano and R. Stolletz, "Branch-and-price approaches for the multiperiod technician routing and scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 257, no. 1, pp. 55–68, 2017.