เมตะฮิวริสติกส์สำหรับการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลในเขตพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย

Metaheuristics for Maintenance Planning of Sugarcane Harvester Technicians: A Case Study of the Sugarcane Industry in The Western Region of Thailand

ธนภูมิ เตรียมเวชวุฒิไกร (Thanapoom Triamwechwootikrai)* ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์ (Dr.Kanchana Sethanan)[1]**
ดร.ฐิติพงศ์ จำรัส (Dr.Thitipong Jamrus)*** ดร.ศิโรรัตน์ พัฒนไพโรจน์ (Dr.Sirorat Pattanapairoj)****

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย กรณีศึกษา อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลในเขตพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย เพื่อวางแผนสำหรับกำหนดวันบำรุงรักษารถตัดอ้อยแต่ละคัน การจัดตั้งกลุ่มให้กับพนักงานบำรุงรักษาโดยคำนึงถึงระดับความชำนาญของพนักงาน และการจัดเส้นทางของกลุ่มพนักงานบำรุงรักษารถตัดอ้อยในแต่ละวัน มีวัตถุประสงค์ให้เกิดต้นทุนในการเดินทางและต้นทุนการว่าจ้างพนักงานต่ำที่สุด ซึ่งรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาดเล็ก แต่เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเวลาในการประมวลผลจึงยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์จริงได้ จึงมีการพัฒนาวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์เพื่อใช้แก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบไปด้วย 3 วิธี ได้แก่ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO), วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และ วิธีเชิงพันธุกรรม (GA) สุดท้ายได้ทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์เทียบกับรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละวิธี โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าคำตอบสูงที่สุดคือวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

ABSTRACT

This research focuses on the maintenance planning of sugarcane harvester technicians: A case study of the sugarcane industry in the Western Region of Thailand. The objective of this research is to solve the problems involved in the service days planning for each harvester, the assignment of technicians into teams and transportation planning, with minimizing the total routing and operating costs. We propose a mathematical model to solve the small size problems, and three metaheuristics consist of Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution (DE) and Genetic Algorithm (GA) to solve realistic-sized problems. Finally, the numerical experiments are conducted to show the performance of the proposed metaheuristics. The results show that the Differential Evolution algorithm is most efficient technique than the others.

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางของพาหนะแบบเป็นช่วงคาบเวลา วิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์ การวางแผนซ่อมบำรุง

Keywords: Periodic vehicle routing problem, Meta-heuristic algorithm, Maintenance planning

[1]*Corresponding author: skanch@kku.ac.th, ksethanan@gmail.com*

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

***ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

****ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

*****อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

บทนำ

ในปัจจุบันอ้อยเป็นพืชที่มีปริมาณการเพาะปลูกสูงที่สุดในโลก [1] ซึ่งในรอบการผลิต ปี พ.ศ. 2561/2562 ประเทศไทยนั้นมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยทั่วประเทศจำนวน 12,236,074 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกอ้อยสำหรับส่งโรงงาน 11,957,201 ไร่ ได้อ้อยจำนวน 130,970,003.605 ตัน สำหรับส่งโรงงานและสามารถผลิตน้ำตาลได้ 14,580,670.601 ตัน [2] โดยประเทศไทยถือเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ของโลก คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 19.8 ของการส่งออกทั้งหมด ซึ่งเป็นอันดับ 2 รองจากประเทศบราซิล [3] ซึ่งสร้างรายได้จำนวนมหาศาลให้กับประเทศไทย โดยมีมูลค่าการส่งออกในปี พ.ศ.2562 สูงถึง 94,014.65 ล้านบาท [4] อีกทั้งอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลยังเป็นแหล่งสร้างงานและรายได้ให้กับเกษตรกรชาวไร่อ้อยและแรงงานเก็บเกี่ยวอ้อย รวมไปถึงแรงงานอีกจำนวนมากในอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม และ อุตสาหกรรมชีวภาพ เป็นต้น ทำให้อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลนั้นถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย

กระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อยเป็นหนึ่งในกิจกรรมสำคัญของห่วงโซ่อุปทานที่มีผลต่อต้นทุนรวม (Total Cost) และช่วงเวลานำ (Lead Time) ของการนำอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิต หากขาดการจัดการที่มีประสิทธิภาพอาจทำให้ระบบห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายขาดความต่อเนื่องได้ ในการเก็บเกี่ยวอ้อยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แบบใช้แรงงานคนตัดและแบบใช้รถตัด สำหรับแบบใช้แรงงานคนตัดนั้นพบว่าได้มีงานวิจัยบางส่วนทำการพัฒนาระบบตัดสินใจเพื่อช่วยบริหารจัดการแรงงานเก็บเกี่ยวอ้อยให้มีประสิทธิภาพ [5-6] แต่ปัจจุบันมีปัญหาการขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยวอ้อยอย่างมาก เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการเก็บเกี่ยวเกษตรกรชาวไร่อ้อยส่วนใหญ่จึงเลือกวิธีการตัดอ้อยไฟไหม้มากกว่าการตัดอ้อยสด ซึ่งขั้นตอนการเผาอ้อยเพื่อเตรียมสำหรับตัดอ้อยไฟไหม้นั้นก่อให้เกิดผลเสียมากมาย เช่น ดินสำหรับเพาะปลูกเสื่อมคุณภาพ อ้อยที่ตัดได้จะสูญเสียน้ำหนักรวมถึงคุณภาพความหวาน ทำให้เกิดค่าปรับเมื่อนำอ้อยไฟไหม้ไปขาย และเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) ในส่วนของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ของประเทศไทยมีค่าสูงผิดปกติ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว เกษตรกรรายใหญ่และโรงงานน้ำตาลบางแห่งรวมถึงโรงงานน้ำตาลกรณีศึกษาจึงเปลี่ยนมาใช้วิธีการตัดอ้อยแบบใช้รถตัด นอกจากนั้นการใช้รถตัดยังสามารถให้ผลผลิตที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบใช้แรงงานคนตัดอีกด้วย [7-8] แต่การจะนำรถตัดอ้อยเข้ามาใช้ในกระบวนการเก็บเกี่ยวจำเป็นต้องมีการลงทุนค่อนข้างสูง ดังนั้นควรนำรถตัดอ้อยมาใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพสูงสุด โดยจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น การปรับสภาพพื้นที่และการเว้นระยะห่างการปลูกอ้อยเพื่อให้รถตัดอ้อยสามารถวิ่งได้ และการวางแผนเพื่อบำรุงรักษารถตัดอ้อยให้มีความพร้อมสามารถใช้งานได้ตลอดเวลา เป็นต้น

การวางแผนบำรุงรักษาเป็นหนึ่งในกิจกรรมหลักที่สำคัญของการใช้รถตัดอ้อย ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกันการหยุดชะงักเนื่องจากรถตัดอ้อยชำรุด (Breakdown) รถตัดอ้อยจึงควรได้รับการดูแลบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) อย่างเหมาะสมและสม่ำเสมอ การบำรุงรักษาเชิงป้องกันคือกิจกรรมการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมเครื่องจักรตามรอบระยะเวลาที่กำหนดเพื่อป้องกันการหยุดชะงักของเครื่องจักรแบบฉุกเฉิน การซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกันของรถตัดอ้อยประกอบไปด้วย 3 ด้านหลัก ๆ ได้แก่ ด้านระบบไฟฟ้า ด้านระบบเครื่องกล และด้านระบบไฮดรอลิค โดยการซ่อมบำรุงแต่ละด้านจะมีระดับความชำนาญและจำนวนของพนักงานที่ใช้ในแต่ละระดับแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรุ่นของรถตัดอ้อยคันนั้น ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการว่าจ้างพนักงานของโรงงาน ในการวางแผนบำรุงรักษารถตัดอ้อยเชิงป้องกันนั้นพนักงานบำรุงรักษารถตัดอ้อยของทางโรงงานจะเป็นฝ่ายวางแผนจัดการ เริ่มจากพนักงานบำรุงรักษาจะทำการกำหนดวันสำหรับบำรุงรักษาให้กับรถตัดอ้อยแต่ละคันโดยอ้างอิงจากมาตรฐานจำนวน

ความถี่ในการรับบริการบำรุงรักษาที่ระบุไว้ตามคู่มือบำรุงรักษาจากบริษัทผู้ผลิตรถตัดอ้อยรุ่นนั้น ๆ ในแต่ละวันพนักงานบำรุงรักษาจะทำการจัดตั้งกลุ่มสำหรับซ่อมบำรุง และแต่ละกลุ่มจะทำการแบ่งหน้าที่เพื่อเดินทางไปให้บริการบำรุงรักษารถตัดอ้อยแต่ละคันโดยคำนึงถึงกรอบเวลาการทำงานของโรงงาน ส่วนการจัดตั้งกลุ่มซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยแต่ละกลุ่มจำเป็นต้องคำนึงถึงระดับความชำนาญของพนักงานภายในกลุ่มรวมไปถึงจำนวนของพนักงานที่ต้องใช้ในงานซ่อมบำรุงที่ได้รับมอบหมายด้วย โดยพนักงานซ่อมบำรุงที่มีระดับความชำนาญสูงจะมีค่าจ้างที่มากกว่าเมื่อเทียบกับพนักงานที่มีความชำนาญด้านเดียวกันที่ระดับต่ำกว่า และสามารถทำงานซ่อมบำรุงด้านนั้นแทนพนักงานที่ระดับความชำนาญต่ำกว่าได้ จากความซับซ้อนของปัญหาข้างต้น และทางโรงงานนั้นยังขาดเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพในการวางแผนสำหรับงานบำรุงรักษารถตัดอ้อย ทำให้เกิดปัญหารถตัดอ้อยบางส่วนไม่ได้รับการบำรุงรักษาตามมาตรฐานที่กำหนด พนักงานซ่อมบำรุงไม่สามารถทำงานได้เต็มความสามารถสูงสุด และเส้นทางที่ใช้ในการเดินทางของกลุ่มซ่อมบำรุงไปยังจุดรับบริการของรถตัดอ้อยไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ส่งผลให้ภาระค่าใช้จ่ายของทางโรงงานมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวการพัฒนาเครื่องมือเพื่อช่วยในการตัดสินใจในการวางแผนจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อโรงงานน้ำตาลกรณีศึกษา เกษตรกรรายใหญ่และโรงงานน้ำตาลแห่งอื่นที่มีการใช้รถตัดอ้อยอย่างยิ่ง

ปัญหาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน จำเป็นต้องพิจารณาเงื่อนไขหลายด้าน ได้แก่ (1) การวางแผนสำหรับการบำรุงรักษารถตัดอ้อยนั้นครอบคลุมหลายคาบเวลา (Multi-period) (2) จำนวนความถี่ในการรับบริการบำรุงรักษาตามมาตรฐานของรถตัดอ้อยแต่ละรุ่นมีความแตกต่างกัน (3) รถตัดอ้อยแต่ละคันจำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีความชำนาญในการซ่อมบำรุงด้านต่าง ๆ และจำนวนของพนักงานที่จำเป็นสำหรับการซ่อมบำรุงในด้านนั้นแตกต่างกัน และ (4) การจัดพนักงานเข้ากลุ่มอย่างเหมาะสมตามระดับความชำนาญที่จำเป็น จากความซับซ้อนและข้อจำกัดข้างต้นสามารถระบุปัญหานี้ได้ในรูปแบบปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งของพาหนะแบบเป็นช่วงคาบเวลา (Periodic Vehicle Routing Problem; PVRP) ซึ่งถูกกล่าวถึงครั้งแรกในงานวิจัยของ Beltrami และ Bodin [9] ปัญหา PVRP คือปัญหาที่พิจารณาการจัดเส้นทางขนส่งของยานพาหนะเกินหนึ่งคาบเวลา ปัญหาลักษณะนี้เกิดขึ้นมากมายในความเป็นจริง เช่น การเก็บขยะ การบริการซ่อมบำรุงเครื่องจักร บริการจัดส่ง และ การกระจายวัตถุดิบ โดยลูกค้าแต่ละรายจะมีความถี่ในการรับบริการ (จำนวนคาบเวลา) และความต้องการในแต่ละครั้งชัดเจน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดโดยทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่ำที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้จะมีความแตกต่างจากปัญหา PVRP ทั่วไปคือ มีการพิจารณาข้อจำกัดด้านความชำนาญของพนักงาน และข้อจำกัดด้านการจัดตั้งกลุ่มของพนักงานเข้าไปด้วย (Periodic Vehicle Routing Problem with Skills and Teaming constraints; PVRP-ST) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 1 พบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดพิจารณารูปแบบปัญหาและวิธีการแก้ปัญหามาก่อน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบสำหรับใช้ในการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย มีวัตถุประสงค์ให้เกิดต้นทุนรวมต่ำที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยต้นทุนในการเดินทางของพนักงานระหว่างโรงงานและรถตัดอ้อยแต่ละคัน และต้นทุนการว่าจ้างพนักงานตามระดับความชำนาญ โดยทำการศึกษาวิธีการหาคำตอบ 2 วิธี คือ (1) การสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับเป็นต้นแบบในการเปรียบเทียบการหาผลเฉลยในปัญหาขนาดเล็ก แต่เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความสามารถในการประมวลผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการหาผลเฉลยในปัญหาขนาดใหญ่อาจจำเป็นต้องใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน การจะนำไปประยุกต์ใช้กับทางโรงงานกรณีศึกษานั้นจำเป็นต้องมีการเผื่อเวลาสำหรับการติดต่อสื่อสารเพื่อประสานงานระหว่างแผนกต่าง ๆ ภายในโรงงาน โดยเวลาสำหรับการวางแผนสูงสุดที่ทางโรงงานยอมรับจะอยู่ที่ 6 ชั่วโมง

จึงมีการเสนอแนวทางแก้ปัญหาโดยการพัฒนาวิธีการขั้นต่อมา คือ (2) การพัฒนาวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์ (Meta-Heuristic) เพื่อแก้ปัญหาการวางแผนบำรุงรักษาให้กับพนักงานบำรุงรักษารถตัดอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์ที่ได้รับการยอมรับในด้านประสิทธิภาพในการหาคำตอบและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งของพาหนะประกอบไปด้วย 3 วิธีได้แก่ (2.1) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) (2.2) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution; DE) และ (2.3) วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ส่วนที่ 1 วิธีการวิจัย: แสดงรายละเอียดของวิธีการหาคำตอบที่พัฒนาขึ้น ส่วนที่ 2 ผลการวิจัย: แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์แต่ละวิธี และสุดท้ายส่วนที่ 3 อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย: จะเป็นการอภิปรายและสรุปผลการวิจัยที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อกำหนดวันบำรุงรักษารถตัดอ้อยแต่ละคันและวางแผนจัดเส้นทางให้กับพนักงงานบำรุงรักษารถตัดอ้อยในแต่ละวันได้อย่างเหมาะสมสอดคล้องกับมาตรฐานการบำรุงรักษาที่กำหนดไว้ โดยต้นทุนรวมในการเดินทางของพนักงานระหว่างโรงงานและรถตัดอ้อยแต่ละคัน และต้นทุนการว่าจ้างพนักงานตามระดับความชำนาญต่ำที่สุด

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ศึกษาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย โดยมีลักษณะของปัญหา สมมติฐานของปัญหา และ วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

1. ลักษณะของปัญหา

พนักงานซ่อมบำรุงแต่ละคนมีความสามารถในการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความชำนาญในแต่ละด้าน (Domain) และในแต่ละด้านสามารถแบ่งออกเป็นหลายระดับ (Level) ในงานวิจัยนี้จะแสดงข้อมูลระดับความชำนาญของพนักงานแต่ละคนโดยใช้เมทริกซ์ (Matrix) โดยกำหนดให้ขนาดของแถว (Row) แทนจำนวนด้านของความชำนาญที่พิจารณา และขนาดของหลัก (Column) แทนจำนวนของระดับความชำนาญในแต่ละด้าน สำหรับค่าในแต่ละตำแหน่งของเมทริกซ์จะมีเพียง 0 กับ 1 เมื่อมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงพนักงานมีความชำนาญในส่วนนั้น และหากมีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงพนักงานไม่มีความชำนาญในส่วนนั้น โดยระดับความชำนาญที่มีค่าสูงกว่าจะครอบคลุมระดับความชำนาญด้านเดียวกันที่มีระดับต่ำกว่า เช่น เมทริกซ์แสดงข้อมูลความชำนาญของพนักงานซ่อมบำรุงคนหนึ่งแบ่งออกเป็น 4 ด้าน 3 ระดับ แสดงดังภาพที่ 1(ก) หมายถึงพนักงานคนนี้มีความชำนาญในงานซ่อมบำรุงแต่ละด้าน ดังนี้ ด้านที่ 1 ระดับ 3 คือทำงานได้ทุกระดับ, ด้านที่ 2 ระดับ 1 คือทำได้เพียงระดับ 1, ด้านที่ 3 ระดับ 2 คือทำได้ทั้งระดับ 1และ ระดับ 2

ส่วนรถตัดอ้อยแต่ละคันต้องใช้ความชำนาญของพนักงานและจำนวนพนักงานที่จำเป็นต่อการซ่อมบำรุงในแต่ละด้านแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรุ่นของรถตัดอ้อยคันนั้น โดยจะใช้เมทริกซ์แสดงข้อมูลเงื่อนไขในการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยแต่ละด้านและแต่ละระดับลักษณะเดียวกันกับเมทริกซ์แสดงความชำนาญของพนักงานซ่อมบำรุงที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่มีความแตกต่างกันคือ ค่าแต่ละตำแหน่งในเมทริกซ์จะหมายถึงจำนวนพนักงานที่จำเป็นต่อการซ่อมบำรุงในแต่ละด้านและแต่ละระดับ และสามารถมีค่าได้มากกว่า 1 ซึ่งหมายถึงจำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีระดับความชำนาญในด้านนั้นมากกว่า 1 คน ส่วนถ้ามีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่าไม่จำเป็นต้องพิจารณาพนักงานที่มีความชำนาญในส่วนนั้นเลย โดย

เงื่อนไขของงานซ่อมบำรุงที่มีระดับสูงกว่าจะครอบคลุมงานซ่อมบำรุงในด้านเดียวกันที่มีระดับต่ำกว่า เช่น เมทริกซ์แสดงข้อมูลเงื่อนไขในการซ่อมบำรุงของรถตัดอ้อยคันหนึ่งแบ่งออกเป็น 4 ด้าน 3 ระดับ แสดงดังภาพที่ 1(ข) หมายถึง รถตัดอ้อยต้องการกลุ่มซ่อมบำรุงซึ่งประกอบไปด้วยพนักงานซ่อมบำรุงที่มีความชำนาญงานซ่อมบำรุงแต่ละด้านดังนี้ ด้านที่ 1 ระดับความชำนาญสูงกว่าหรือเท่ากับ 1 จำนวน 2 คน, ด้านที่ 2 ไม่จำเป็นต้องพิจารณาความชำนาญของพนักงาน, ด้านที่ 3 จำนวน 2 คน ประกอบไปด้วย ระดับความชำนาญสูงกว่าหรือเท่ากับ 1 จำนวน 1 คน กับ ระดับ 3 จำนวน 1 คน และสุดท้าย ด้านที่ 4 ความชำนาญระดับ 3 จำนวน 3 คน

ในหนึ่งรอบการวางแผน (Planning Horizon) รถตัดอ้อยแต่ละคันจะมีจำนวนความถี่ (Frequency) ของวันซ่อมบำรุงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรุ่นของรถตัดอ้อย โดยจะอ้างอิงจากคู่มือการซ่อมบำรุงของบริษัทผู้ผลิตรถตัดอ้อยรุ่นนั้น ๆ จากตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 2(ก) หมายถึงในรอบการวางแผน 5 วัน รถตัดอ้อยคันที่ 1 มีความถี่ในการรับบริการซ่อมบำรุงเท่ากับ 2 วัน และรถตัดอ้อยคันที่ 2 มีความถี่ในการรับบริการซ่อมบำรุงเท่ากับ 1 วัน

ในแต่ละรอบการวางแผนทางโรงงานจะมีแผนสำหรับการให้บริการรถตัดอ้อยอยู่ โดยประกอบไปด้วยแผนที่มีความถี่ของวันซ่อมบำรุงหลายแบบ ซึ่งในแผนแต่ละแบบจะมีการกำหนดวันสำหรับการให้บริการซ่อมบำรุง ส่วนแผนที่มีความถี่การให้บริการเท่ากันจะมีการกำหนดวันสำหรับการให้บริการแตกต่างกัน ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 2(ข) หมายถึงในรอบการวางแผน 5 วัน มีแผนอยู่ 3 แบบ คือแผนแบบที่ 1 มีความถี่ในการให้บริการซ่อมบำรุง 2 วัน โดยจะให้บริการในวันอังคารและวันพฤหัสบดี ส่วนแผนแบบที่ 2 นั้นมีความถี่ในการให้บริการซ่อมบำรุง 2 วัน เช่นเดียวกันกับแผนแบบที่ 1 แต่วันสำหรับให้บริการจะแตกต่างกัน โดยแผนแบบที่ 2 จะให้บริการในวันจันทร์และวันพุธ และสุดท้ายแผนแบบที่ 3 มีความถี่การให้บริการ 1 วัน โดยจะให้บริการในวันอังคารเท่านั้น

พนักงานซ่อมบำรุงมีหน้าที่ต้องกำหนดแผนสำหรับการซ่อมบำรุงให้กับรถตัดอ้อยแต่ละคันคันละ 1 แผน โดยที่จำนวนความถี่ในการรับบริการของรถตัดอ้อยแต่ละคันต้องมีค่าเท่ากันกับจำนวนความถี่ในการให้บริการของแผนที่พนักงานซ่อมบำรุงกำหนดให้ จากตัวอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้น แสดงดังภาพที่ 2(ก) และภาพที่ 2(ข) หมายถึง แผนที่มีความเหมาะสมกับรถตัดอ้อยคันที่ 1 ที่มีความถี่ในการรับบริการ 2 วัน คือแผนแบบที่ 1 หรือแผนแบบที่ 2 ในตัวอย่างนี้กำหนดว่าเลือกแผนแบบที่ 1 ให้กับรถตัดอ้อยคันที่ 1 ส่วนรถตัดอ้อยคันที่ 2 ซึ่งมีความถี่ในการรับบริการ 1 วันนั้น มีแผนที่เหมาะสมเพียงแผนเดียวคือแผนแบบที่ 3 ดังนั้นรถตัดอ้อยคันที่ 1 จะได้รับบริการซ่อมบำรุงในวันอังคารและวันพฤหัสบดี ส่วนรถตัดอ้อยคันที่ 2 จะได้รับบริการซ่อมบำรุงในวันอังคาร

ในแต่ละวันจะมีการแบ่งกลุ่มพนักงานซ่อมบำรุงก่อนออกเดินทางไปให้บริการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย และแบ่งหน้าที่บริการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยแต่ละคันที่มีกำหนดการซ่อมบำรุงในวันนั้นให้พนักงานซ่อมบำรุงแต่ละกลุ่ม โดยพนักงานซ่อมบำรุงแต่ละกลุ่มจะเริ่มเดินทางออกจากโรงงานไปให้บริการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยแต่ละคันที่ได้รับมอบหมายแล้วเดินทางกลับมายังโรงงาน ซึ่งต้องคำนึงถึงกรอบเวลาการทำงานของทางโรงงานในแต่ละวัน ระดับความชำนาญของกลุ่มพนักงาน และระดับความชำนาญของพนักงานที่จำเป็นต้องใช้ในการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย

2. สมมติฐานของปัญหา

พิจารณาให้จำนวนยานพาหนะสำหรับให้กลุ่มซ่อมบำรุงใช้ในการเดินทางมีไม่จำกัด โดยที่ยานพาหนะแต่ละคันมีที่นั่งเพียงพอสำหรับกลุ่มพนักงานซ่อมบำรุงแต่ละกลุ่ม และรถตัดอ้อยแต่ละคันต้องได้รับการบริการซ่อมบำรุงตามมาตรฐานที่คู่มือซ่อมบำรุงกำหนด โดยโรงงานต้องมีแผนสำหรับการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมกับรถตัดอ้อยแต่ละคันอย่างน้อย 1 แผน

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดต้นทุนในการเดินทางและบริหารจัดการพนักงานต่ำที่สุดโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed Integer Linear Programming; MILP) โดยตัวแปรที่ใช้และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 ส่วนรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์มีรายละเอียดดังนี้

สมการเป้าหมาย (Objective function)

$$Minimize \quad FC \cdot \sum_{i=0}^{n+1}\sum_{j=0}^{n+1}\sum_{k=1}^{K'}\sum_{d=1}^{D'} DI_{ij} \cdot X_{ij}^{kd} + \sum_{t=1}^{T'}\sum_{k=1}^{K'}\sum_{d=1}^{D'} TE_t^{kd} \cdot TC_t \tag{1}$$

สมการข้อจำกัด (Constraints)

$$Y_{ir} \cdot Fi_i = Y_{ir} \cdot Fp_r \qquad \forall\, i \in V', r \in R \tag{2}$$

$$\sum_{r=1}^{R'} Y_{ir} = 1 \qquad \forall\, i \in V' \tag{3}$$

$$\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{K'} X_{ij}^{kd} - \sum_{r=1}^{R'} a_r^d \cdot Y_{ir} = 0 \qquad \forall\ i \in V', d \in D \tag{4}$$

$$\sum_{i=0}^{n} X_{ih}^{kd} - \sum_{j=0}^{n} X_{hj}^{kd} = 0 \qquad \forall\ h \in V, k \in K, d \in D \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{0j}^{kd} \leq 1 \qquad \forall\ k \in K, d \in D \tag{6}$$

$$U_i^{kd} - U_j^{kd} + P \cdot X_{ij}^{kd} \leq P - 1 \qquad \forall\, i, j \in V', k \in K, d \in D; i \neq j \tag{7}$$

$$X_{ij}^{kd} = 0 \qquad \forall\, i, j \in V', k \in K, d \in D; i = j \tag{8}$$

$$SKR_i^{sl} \cdot Z_i^{kd} \leq \sum_{t=1}^{T'} SK_t^{sl} \cdot TE_t^{kd} \qquad \forall\, i \in V', k \in K, d \in D, l \in L, s \in S \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^{K'} TE_t^{kd} \leq NT_t \qquad \forall\, t \in T, d \in D \tag{10}$$

$$\sum_{j=0}^{n} X_{ij}^{kd} = Z_i^{kd} \qquad \forall\, i \in V', k \in K, d \in D \tag{11}$$

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n} DI_{ij} \cdot X_{ij}^{kd} + \sum_{h=1}^{n} St_h \cdot Z_h^{kd} \leq DT \qquad \forall\, k \in K, d \in D \tag{12}$$

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n} We_i \cdot X_{ij}^{kd} \leq Cap \qquad \forall\, k \in K, d \in D \tag{13}$$

$$X_{ij}^{kd}, Y_{ir}, Z_i^{kd} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i, j \in V, k \in K, d \in D, r \in R \tag{14}$$

สมการเป้าหมาย (1) ลดต้นทุนรวมให้มีค่าต่ำที่สุด ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายในการเดินทางและค่าจ้างพนักงานในแต่ละวัน สมการข้อจำกัดที่ (2) จำนวนวันในการซ่อมบำรุงของแผนซ่อมบำรุง r จะต้องเท่ากับจำนวนวันซ่อมบำรุงที่รถตัดอ้อยคันที่ i ต้องการ สมการข้อจำกัดที่ (3) รถตัดอ้อยแต่ละคันต้องได้รับการบริการตามจำนวนครั้งที่กำหนดไว้

สมการข้อจำกัดที่ (4) รถตัดอ้อยคันที่ i ต้องได้รับบริการในวันที่ระบุไว้ในแผนซ่อมบำรุง r สมการข้อจำกัดที่ (5) เมื่อมีการเดินทางเข้ามาให้บริการรถตัดอ้อยคันที่ i จะต้องมีการเดินทางออกจากจุดนั้นด้วย สมการข้อจำกัดที่ (6) ในหนึ่งวันทีมซ่อมบำรุงแต่ละทีมเดินทางออกจากโรงงานได้สูงสุดเพียงหนึ่งรอบเท่านั้น สมการข้อจำกัดที่ (7-8) เพื่อป้องกันการเกิดทัวร์ย่อย สมการข้อจำกัดที่ (9) ระดับความชำนาญและจำนวนของพนักงานซ่อมบำรุงภายในทีมต้องมีความเหมาะสมกับระดับความยากของรถตัดอ้อยที่ได้รับมอบหมายให้กับทีมนั้น ๆ สมการข้อจำกัดที่ (10) การมอบหมายงานให้แก่พนักงานซ่อมบำรุงในแต่ละวันจะต้องไม่เกินจำนวนพนักงานซ่อมบำรุงแต่ละแบบที่มีอยู่ สมการข้อจำกัดที่ (11) เพื่อกำหนดทีมซ่อมบำรุงให้กับรถตัดอ้อยในแต่ละวัน สมการข้อจำกัดที่ (12) เพื่อป้องกันไม่ให้พนักงานซ่อมบำรุงทำงานเกินเวลาในการทำงานสูงสุดในแต่ละวัน สมการข้อจำกัดที่ (13) เพื่อไม่ให้น้ำหนักที่ยานพาหนะบรรทุกอยู่เกินความจุ และสุดท้ายสมการข้อจำกัดที่ (14) เพื่อกำหนดตัวแปรฐานสอง

4. วิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์

4.1 การออกแบบการเข้ารหัส (Encoding) และการถอดรหัส (Decoding)

4.1.1 การออกแบบการเข้ารหัส

ในส่วนของการเข้ารหัสนั้นจะกำหนดให้เป็นลักษณะของเวกเตอร์ (Vector) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง (0,1] แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เวกเตอร์การกำหนดแผนให้รถตัดอ้อยแต่ละคัน (Planning Vector) และเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการรถตัดอ้อยในแต่ละวัน (Routing Vector) จากตัวอย่างก่อนหน้าแสดงดังภาพที่ 2(ก) จะได้ขนาดของเวกเตอร์การกำหนดแผนและเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการของรถตัดอ้อย และมีค่าเวกเตอร์สุ่มเริ่มต้นของรถตัดอ้อย แสดงดังภาพที่ 3 โดยเวกเตอร์การกำหนดแผนจะมีขนาดของหลัก 2 หลักเท่ากับจำนวนรถตัดอ้อยที่พิจารณา ซึ่งหลักที่ 1 ใช้สำหรับกำหนดแผนของรถตัดอ้อยคันที่ 1 และหลักที่ 2 ใช้สำหรับกำหนดแผนของรถตัดอ้อยคันที่ 2 ส่วนเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการจะมีขนาดของหลักเท่ากับผลรวมของจำนวนความถี่ในการรับบริการของรถตัดอ้อยทุกคันที่พิจารณา เนื่องจากผลรวมความถี่ในการรับบริการของรถตัดอ้อยคันที่ 1 กับคันที่ 2 เท่ากับ 3 วัน ดังนั้นเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการจึงมีขนาดของหลักเท่ากับ 3 หลัก โดยหลักที่ 1 ใช้สำหรับการจัดลำดับการให้บริการรถตัดอ้อยคันที่ 1 ในวันรับบริการครั้งที่ 1 ส่วนหลักที่ 2 ใช้สำหรับการจัดลำดับการให้บริการรถตัดอ้อยคันที่ 1 ในวันรับบริการครั้งที่ 2 และหลักที่ 3 ใช้สำหรับการจัดลำดับการให้บริการรถตัดอ้อยคันที่ 2

4.1.2 การถอดรหัส

ในส่วนของการถอดรหัสนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1: การกำหนดแผนและวันบริการให้กับรถตัดอ้อยแต่ละคัน

การกำหนดแผนสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1) มีแผนที่เหมาะสมกับรถตัดอ้อยเพียง 1 แบบ

จะทำการกำหนดแผนนั้นให้กับรถตัดอ้อยคันนั้นเลย กรณีตัวอย่างดังภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) เนื่องจากแผนที่เหมาะสมกับรถตัดอ้อยคันที่ 2 มีเพียงแผนเดียวคือแผนแบบที่ 3 ดังนั้นจะให้บริการรถตัดอ้อยคันที่ 2 ในวันอังคาร

2) มีแผนที่เหมาะสมกับรถตัดอ้อยมากกว่า 1 แบบ

การแบ่งขอบเขตสำหรับการกำหนดแผนให้กับรถตัดอ้อยแต่ละคันพิจารณาจาก จำนวนขอบเขตของรถตัดอ้อยแต่ละคันจะเท่ากับจำนวนแผนที่เหมาะสมกับรถตัดอ้อยคันนั้น ๆ ซึ่งขอบเขตของรถตัดอ้อยแต่ละช่วงจะมีขนาดของช่วงเท่ากับ 1 หารด้วยจำนวนแผนที่เหมาะสมกับรถตัดอ้อยคันนั้น กรณีตัวอย่างดังภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) เนื่องจากแผนที่เหมาะสมกับความถี่ในการรับบริการของรถตัดอ้อยคันที่ 1 มี 2 แผน คือแผนแบบที่ 1 หรือแผนแบบที่ 2 ดังนั้นขอบเขตสำหรับการเลือกแผนของรถตัดอ้อยคันที่ 1 จะแบ่งออกเป็น 2 ขอบเขต โดยแต่ละขอบเขตมีขนาดเท่ากับ 1 หาร

ด้วย 2 เท่ากับ 0.5 หมายความว่า ขอบเขตที่ 1 สำหรับการกำหนดแผนแบบที่ 1 มีขนาดของช่วงเท่ากับ (0,0.5] และขอบเขตที่ 2 สำหรับการกำหนดแผนแบบที่ 2 มีขนาดของช่วงเท่ากับ (0.5,1] ดังนั้นจากกรณีตัวอย่างดังภาพที่ 3 จะได้ว่าค่าเวกเตอร์การกำหนดแผนของรถตัดอ้อยคันที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.2769 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตที่หนึ่งของรถตัดอ้อยคันที่ 1 (0,0.5] ดังนั้นจึงกำหนดแผนแบบที่ 1 ให้กับรถตัดอ้อยคันที่ 1 โดยวันให้บริการเป็นวันอังคารและวันพฤหัสบดี

ส่วนที่ 2: การกำหนดลำดับการบริการและการแบ่งกลุ่มในแต่ละวัน

ในส่วนของค่าเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการในแต่ละวันนั้นจะเรียงลำดับตามวันที่ไป จากขั้นตอนในส่วนที่ 1 และกรณีตัวอย่างดังภาพที่ 2(ก) ภาพที่ 2(ข) และ ภาพที่ 3 จะได้ว่ารถตัดอ้อยคันที่ 1 ได้รับบริการในวันอังคารและวันพฤหัสบดี โดยมีค่าเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการในแต่ละวันเป็น 0.0462 และ 0.3171 ตามลำดับ ส่วนรถตัดอ้อยคันที่ 2 นั้นมีค่าเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการเพียงค่าเดียวคือ 0.3816 ในวันอังคาร โดยในแต่ละวันจะมีขั้นตอนการจัดลำดับการให้บริการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ทำการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของรถตัดอ้อยแต่ละคันในวันนั้น ๆ จากค่าน้อยไปมาก (Rank Order Value: ROV) จากนั้นนำลำดับที่ได้ไปใช้เป็นลำดับในการเดินทางในวันดังกล่าว เช่น ตัวอย่างในส่วนที่ 1 ในวันอังคารมีการให้บริการรถตัดอ้อยคันที่ 1 กับ 2 โดยมีค่าเวกเตอร์การจัดลำดับการให้บริการเท่ากับ 0.0462 และ 0.3816 ตามลำดับ เมื่อผ่านขั้นตอน ROV จะได้ลำดับการเดินทางดังภาพที่ 4 คือ เริ่มเดินทางออกจากโรงงานไปยังรถตัดอ้อยคันที่ 1, เดินทางจากรถตัดอ้อยคันที่ 1 ไปยังรถตัดอ้อยคันที่ 2 และ เดินทางจากรถตัดอ้อยคันที่ 2 กลับมายังโรงงาน

ขั้นตอนที่ 2: แบ่งกลุ่มรถตัดอ้อยเริ่มที่กลุ่มที่ 1 โดยเริ่มจากการนำรถตัดอ้อยลำดับที่ 1 เข้ากลุ่มก่อน จากนั้นพิจารณาว่าหากนำรถตัดอ้อยลำดับถัดมาเข้ากลุ่มแล้วจะต้องไม่ผิดเงื่อนไขเรื่องเวลาการทำงานต่อวันของทางโรงงานและค่าน้ำหนักสูงสุดที่ยานพาหนะสามารถบรรทุกได้ ซึ่งสิ่งที่ต้องพิจารณาประกอบไปด้วย ระยะเวลาเดินทางจากโรงงานไปยังรถตัดอ้อยลำดับต่าง ๆ ที่อยู่ในกลุ่มจนกลับมายังโรงงาน และระยะเวลาที่ใช้ในการบำรุงรักษารถตัดอ้อยแต่ละคันในกลุ่ม รวมถึงจำนวนน้ำหนักรวมของอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยทุกคันในกลุ่ม ถ้าหากว่าผิดเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งจะนำรถตัดอ้อยลำดับปัจจุบันที่ทำให้ระยะเวลาหรือค่าน้ำหนักที่บรรทุกเกินไปเริ่มต้นใหม่ในกลุ่มถัดไป โดยจะทำวนซ้ำไปเรื่อย ๆจนแบ่งกลุ่มให้รถตัดอ้อยครบทุกคัน

ส่วนที่ 3: การจัดพนักงานเข้ากลุ่มซ่อมบำรุงในแต่ละวัน

จากขั้นตอนในส่วนที่ 2 จะได้กลุ่มสำหรับให้บริการรถตัดอ้อยในแต่ละวัน โดยค่าระดับความชำนาญที่จำเป็นของกลุ่มจะได้จากการพิจารณาจำนวนพนักงานสูงสุดที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยภายในกลุ่มแต่ละด้านและแต่ละระดับ ตัวอย่างระดับความชำนาญเริ่มต้นที่กลุ่ม A ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยรถตัดอ้อยคันที่ 1 กับ รถตัดอ้อยคันที่ 2 แสดงดังภาพที่ 5(ก) ส่วนขั้นตอนการจัดพนักงานเข้ากลุ่มซ่อมบำรุงในแต่ละกลุ่ม อ้างอิงจากงานวิจัยของ Cordeau et al. [18] มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณค่าคะแนนความครอบคลุม (Covering Score) ของพนักงานซ่อมบำรุงแต่ละแบบที่ยังว่างงานอยู่ โดยพิจารณาจากค่าความชำนาญในแต่ละด้านแต่ละระดับที่พนักงานมี แสดงดังภาพที่ 5(ข) สามารถครอบคลุมระดับความชำนาญที่กลุ่มปัจจุบันต้องการได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าคะแนนความครอบคลุมของพนักงานแบบที่ 1, 2 และ3 เทียบกับระดับความชำนาญที่ต้องการของกลุ่ม A ตอนเริ่มต้น จะมีค่าเท่ากับ 4, 4 และ 2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6(ก) จะเห็นว่าพนักงานแบบที่ 1 กับ 2 มีคะแนนเท่ากันและเป็นคะแนนที่สูงที่สุดในรอบนี้ ดังนั้นให้นำพนักงานทั้ง 2 แบบไปพิจารณาต่อในขั้นตอนที่ 2 เพื่อทำการตัดสิน (แต่ถ้าหากพนักงานที่มีค่าคะแนนความครอบคลุมสูงสุดมีเพียงแบบเดียวให้เลือกพนักงานดังกล่าวเข้ากลุ่มได้เลย จากนั้นข้ามไปทำขั้นตอนที่ 3)

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณค่าคะแนนความสูญเปล่า (Wasting Score) โดยพิจารณาจากความชำนาญที่เกินมาเมื่อเทียบกับระดับความชำนาญที่กลุ่มในปัจจุบันต้องการ จากนั้นทำการเลือกพนักงานที่มีค่าคะแนนความสูญเปล่าน้อยที่สุดเข้ากลุ่ม ซึ่งค่าคะแนนความสูญเปล่าของพนักงานแบบที่ 1 และ 2 เทียบกับระดับความยากของกลุ่ม A ตอนเริ่มต้น เท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6(ข) ดังนั้นจึงทำการเลือกพนักงานแบบที่ 1 เข้ากลุ่ม (แต่ถ้าหากยังมีค่าคะแนนความสูญเปล่าเท่ากันอีกให้ทำการเลือกพนักงานที่มีค่าจ้างถูกที่สุดเข้ากลุ่ม)

ขั้นตอนที่ 3: ทำการปรับปรุงค่าระดับความชำนาญที่กลุ่มต้องการใหม่ โดยการนำค่าความชำนาญของพนักงานที่ถูกเลือกมาลบออก ซึ่งค่าระดับความชำนาญที่กลุ่มต้องการในแต่ละด้านแต่ละระดับจะไม่ต่ำกว่า 0 หลังปรับค่าระดับความชำนาญที่กลุ่ม A ต้องการแล้วจะได้ค่าระดับความชำนาญที่กลุ่ม A ต้องการหลังปรับใหม่ แสดงดังภาพที่ 7 จากนั้นให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 จนกว่าค่าระดับความชำนาญที่กลุ่มต้องการจะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด

4.2 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีที่ถูกเสนอครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [19] มีแนวคิดการค้นหาคำตอบจากการเลียนแบบพฤติกรรมการเดินทางหรือหาอาหารของฝูงสัตว์ โดยเฉพาะฝูงนก ฝูงปลา ซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนซึ่งอธิบายโดยรหัสเทียม (Pseudo-Code) แสดงดังภาพที่ 8 และได้กำหนดค่าตัวแปรทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้ Cp (Cognitive Rate) = 1, Cg (Social rate) = 1, W (Inertia Weight) = 0.3 และ NP (Number of populations) = 800

4.3 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE)

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างเป็นวิธีที่ถูกเสนอครั้งแรกโดย Storn และ Price [20] โดยมีแนวคิดสมมุติฐานเชิงพันธุกรรมเช่นเดียวกับวิธีเชิงพันธุกรรม แต่มีข้อดีที่โดดเด่นกว่าคือ มีโครงสร้างของระเบียบวิธีที่ซับซ้อนน้อยกว่าและมีความยืดหยุ่น นอกจากนั้นยังสามารถใช้ค่าจำนวนจริงในการคำนวณโดยไม่จำเป็นต้องแปลงค่าตัวแปรตัดสินใจเป็นเลขฐานสอง จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ในการค้นหาคำตอบกว่าวิธีอื่น ซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนซึ่งอธิบายโดยรหัสเทียมแสดงดังภาพที่ 8 และได้กำหนดค่าตัวแปรทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้ Cr (Crossover Rate) = 0.8, F (Weighting Factor) = 0.3 และ NP(Number of populations) = 800

4.4 วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)

วิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีที่ถูกเสนอครั้งแรกโดย Holland [21] มีขั้นตอนการทำงานเลียนแบบทฤษฎีกระบวนการวิวัฒนาการจากชีววิทยา และ การคัดเลือกตามธรรมชาติ หรือก็คือ สิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุดถึงจะอยู่รอด ซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนซึ่งอธิบายโดยรหัสเทียมแสดงดังภาพที่ 8 และได้กำหนดค่าตัวแปรทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้ PC (Crossover Rate) = 0.8, PM (Mutation Rate) = 0.2 และ NP (Number of populations) = 800 ส่วนขั้นตอนการผสมข้ามพันธุ์ (Crossover) และขั้นตอนการกลายพันธุ์ (Mutation) นั้นผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการผสมข้ามพันธุ์แบบ 1 จุด (One-point Crossover) และวิธีการกลายพันธุ์แบบสลับ (Swap) ตามลำดับ

ผลการวิจัย

จากการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์และการพัฒนาวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์ จึงได้นำวิธีทั้ง 2 ประเภทไปทดสอบแก้ปัญหากับตัวอย่างที่สร้างขึ้นเพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์แต่ละแบบ โดยการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นจะมีความแตกต่างกันจำนวน 6 ขนาด โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนรถตัดอ้อย จำนวนวันที่พิจารณา และจำนวนของแผน สามารถแสดงดังตารางที่ 3 โดยแต่ละขนาดจะมีลักษณะแตกต่างกัน

ไปขนาดละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจากรูปแบบทางคณิตศาสตร์จะใช้ซอฟแวร์ Lingo V.16 ส่วนวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์นั้นจะเขียนบนซอฟแวร์ Matlab R2019b ทำการประมวลผลบนแล็ปท็อป Processor: Intel(R) Core(TM) i7-8750 CPU @ 2.2GHz. Installed memory (RAM): 16.0 GB. เพื่อให้เกิดความเท่าเทียมในการวัดประสิทธิภาพของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์แต่ละวิธี ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเวลาสูงสุดในการหาคำตอบของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์ (CPU Times) ของแต่ละกรณีศึกษาเอาไว้เพื่อใช้วัดประสิทธิภาพของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์แต่ละวิธี

ซึ่งผลการเปรียบเทียบคำตอบและเวลาในการหาคำตอบที่ได้จากวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์กับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจาก 30 ตัวอย่าง โดยใช้โจทย์ตัวอย่างที่มีค่าจำนวนรถตัดอ้อย 7 ถึง 20 คัน วันที่พิจารณา 3 ถึง 14 วัน และจำนวนแผนซ่อมบำรุง 3 ถึง 10 แผน แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4 และมีการทดสอบทางสถิติโดยใช้การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ (t-Test: Paired Two Sample for Means) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 9

จากผลการทดลองพบว่าปัญหาขนาดใหญ่ที่สุดที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถให้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คือ กรณีศึกษา E แต่หากพิจารณาถึงระยะเวลาการวางแผนที่ทางโรงงานยอมรับ (6 ชั่วโมง หรือ 21,600 วินาที) จะพบว่าปัญหาขนาดใหญ่ที่สุดที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถให้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คือ กรณีศึกษา D ส่วนผลที่ได้จากวิธี PSO, DE และGA สามารถให้ค่าคำตอบเท่ากับค่าผลเฉลยที่เหมาะที่สุด 12, 20, 9 ตัวอย่าง ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.67, 0.58, 0.99 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทำงานของ วิธี PSO, DE และGA อยู่ในเกณฑ์ที่ดี นอกจากนี้ผลการทดสอบทางสถิติบ่งชี้ว่าค่าคำตอบที่ได้จากวิธี PSO และDE นั้นไม่มีความแตกต่างจากค่าคำตอบของรูปแบบทางคณิตศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย กรณีศึกษา อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลในเขตพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย สำหรับแก้ปัญหาในลักษณะ PVRP-ST ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่พิจารณารูปแบบปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาในลักษณะ PVRP-ST ในกรณีศึกษาอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ดังนั้นงานวิจัยนี้พิจารณาการวางแผนสำหรับกำหนดวันบำรุงรักษารถตัดอ้อยแต่ละคัน การจัดตั้งกลุ่มให้กับพนักงานบำรุงรักษา และการจัดเส้นทางของกลุ่มพนักงานบำรุงรักษารถตัดอ้อยในแต่ละวัน โดยมีวัตถุประสงค์ให้เกิดต้นทุนในการเดินทางและต้นทุนการว่าจ้างพนักงานตามระดับความชำนาญต่ำที่สุด ซึ่งรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาดเล็ก แต่เนื่องจากการหาผลเฉลยในปัญหาขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้เวลานานเกินกว่าเวลาการวางแผนสูงสุดที่ทางโรงงานยอมรับ จึงมีการพัฒนาวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์เพื่อแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบไปด้วย 3 วิธี ได้แก่ (1) วิธี PSO (2) วิธี DE และ (3) วิธี GA

โดยผู้วิจัยได้กำหนดเวลาสูงสุดในการหาคำตอบของวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์ ในแต่ละกรณีศึกษาเอาไว้เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธี ซึ่งในกรณีศึกษา A และ B กำหนดเวลาสูงสุดไว้เท่ากับ 10 วินาที กรณีศึกษา C กำหนดเวลาสูงสุดไว้เท่ากับ 60 วินาที กรณีศึกษา D และ E กำหนดเวลาสูงสุดไว้เท่ากับ 120 วินาที และกรณีศึกษา F กำหนดเวลาสูงสุดไว้เท่ากับ 300 วินาที ผู้วิจัยได้กำหนดเวลาในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษาเอาไว้เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเมื่อตั้งค่าเวลาประมวลผลให้มีค่าสูงกว่าเวลาที่กำหนดเอาไว้ในแต่ละกรณีศึกษานั้นไม่ส่งผลต่อ

การพัฒนาคำตอบ ผลการวิจัยจากกรณีศึกษาพบว่าวิธี DE สามารถหาค่าคำตอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ในกรณีศึกษา A, B, C และD วิธี PSO สามารถหาค่าคำตอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ในกรณีศึกษา AและB ส่วนวิธี GA สามารถให้คำตอบที่มีค่าเท่ากับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเพียงกรณีศึกษา A เท่านั้น โดยวิธี PSO, DE และGA มีค่าเฉลี่ยร้อยละของความแตกต่างของคำตอบจากทุกตัวอย่างเท่ากับ 0.67, 0.58 และ 0.99 ตามลำดับ และจากผลการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่าคำตอบที่ได้จากวิธี DE และ PSO นั้นไม่มีความแตกต่างจากค่าคำตอบของรูปแบบทางคณิตศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการหาคำตอบเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่าในกรณีศึกษา F ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ที่สุด จำนวน 5 ตัวอย่าง วิธี DE มีแนวโน้มในการใช้เวลาเพื่อพัฒนาคำตอบสูงที่สุด คิดเป็นค่าเฉลี่ย 54.95 วินาที ตามด้วยวิธี GA ค่าเฉลี่ย 21.14 วินาที และวิธี PSO ใช้เวลาน้อยที่สุด คิดเป็นค่าเฉลี่ย 16.04 วินาที ส่วนค่าคำตอบที่ได้นั้น วิธีDE เป็นวิธีที่ให้ค่าคำตอบดีที่สุด โดยคำตอบจากวิธีDE มีค่าดีกว่าคำตอบที่ได้จากวิธีGA และวิธีPSO คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.18 และ 1.01 ตามลำดับ

สรุปได้ว่าในการหาค่าคำตอบวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือวิธี DE เนื่องจากให้ค่าคำตอบที่ดีกว่าหรือเท่ากับวิธี PSO และGAในทุกตัวอย่าง ส่วนวิธีที่ใช้เวลาในการพัฒนาค่าคำตอบเร็วที่สุดคือวิธี PSO โดยค่าคำตอบที่ได้นั้นแม้จะไม่ดีเท่ากับค่าคำตอบที่ได้จากวิธี DE แต่ก็ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งทั้งสองวิธีสามารถนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหาการวางแผนการทำงานของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยในกรณีศึกษา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีลักษณะใกล้เคียงได้อีกด้วย สำหรับการนำงานวิจัยนี้ไปต่อยอดในอนาคต ทางผู้วิจัยจะทำการพิจารณาข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ เพิ่มเติม ซึ่งประกอบไปด้วย ข้อจำกัดด้านกรอบเวลารับบริการซ่อมบำรุงของรถตัดอ้อยแต่ละคันในแต่ละวัน (Time Windows) และการพิจารณาให้กิจกรรมซ่อมบำรุงของรถตัดอ้อยแต่ละรุ่นมีจำนวนกิจกรรมมากกว่า 1 อย่าง เพื่อให้มีความเสมือนปัญหาจริงมากขึ้นและมีความสมบูรณ์แบบที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. World food and agriculture: statistical pocketbook 2019. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2019.
2. Office of the Cane and Sugar Board. The annual report of sugarcane plantation and sugar production in 2018/2019 [Internet]. 2019 [cited 2020 Jan 31]. Available from: http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/923-9040.pdf
3. USDA Economics, Statistics and Market Information System [Internet]. 2019 [cited 2020 Jan 31]. Available from: https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/z029p472x?locale=en
4. Crystal Reports Viewer [Internet]. 2019 [cited 2020 Jan 31]. Available from: http://www.ops3.moc.go.th/export/recode_export_rank/report.asp
5. Chaibung N, Sethanan K. Development of Decision-Making System for Allocating Cane Harvesting Laborers In Inbound Logistics of Sugar Cane and Sugar Industry. Engineering and Applied Science Research. 2011; 38(3): 275-284.
6. Sethanan K, Neungmatcha W. A cane cutter allocation correspond planned sugar cane harvest scheduling to maximize total sugar yield. Asia-Pacific Journal of Science and Technology. 2012; 17(1): 45-57.

7. Capaz RS, Carvalho VSB, Nogueira LAH. Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. Appl Energy. 2013; 102: 220–228.
8. Ahmed AE, Alam‐Eldin AOM. An assessment of mechanical vs manual harvesting of the sugarcane in Sudan – The case of Sennar Sugar Factory. J Saudi Soc Agric Sci. 2015 Jun 1; 14(2): 160–166.
9. Beltrami EJ, Bodin LD. Networks and vehicle routing for municipal waste collection. Networks [Internet]. 1974 [cited 2020 Feb 2]; 4(1): 65–94. Available from: http://doi.wiley.com/10.1002/net.3230040106
10. Gaudioso M, Paletta G. Heuristic for the periodic vehicle routing problem. Transp Sci. 1992; 26(2): 86–92.
11. Nguyen PK, Crainic TG, Toulouse M. A hybrid generational genetic algorithm for the periodic vehicle routing problem with time windows. J Heuristics. 2014; 20(4): 383–416.
12. Yu B, Yang ZZ. An ant colony optimization model: The period vehicle routing problem with time windows. Transp Res Part E Logist Transp Rev. 2011; 47(2): 166–181.
13. Michallet J, Prins C, Amodeo L, Yalaoui F, Vitry G. Multi‐start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. Comput Oper Res. 2014; 41(1): 196–207.
14. Norouzi N, Sadegh‐Amalnick M, Alinaghiyan M. Evaluating of the particle swarm optimization in a periodic vehicle routing problem. Meas J Int Meas Confed. 2015; 62: 162–169.
15. Cantu‐Funes R, Angélica Salazar‐Aguilar M, Boyer V. Multi‐depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows. J Oper Res Soc. 2018 Feb 1; 69(2): 296–306.
16. Panggabean EM, Mawengkang H, Azis Z, Filia Sari R. Periodic Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Driver Scheduling. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing; 2018.
17. Rodríguez-Martín I, Salazar-González JJ, Yaman H. The periodic vehicle routing problem with driver consistency. Eur J Oper Res. 2019 Mar 1; 273(2): 575–584.
18. Cordeau JF, Laporte G, Pasin F, Ropke S. Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company. J Sched. 2010 Aug; 13(4): 393–409.
19. Kennedy J, Eberhart R. Prognostic evaluation of abdominal echography in typhoid fever. G Mal Infett Parassit [Internet]. 1994 [cited 2020 Feb 5]. Available from: http://web.archive.org/web/20120623142529/ http://www.engr.iupui.edu/~shi/Coference/psopap4.html
20. Storn R, Price K. Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [Internet]. 1995 [cited 2020 Feb 8]. Available from: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.1.9696
21. Holland J. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. Ann Arbor, Mich; 1975.

ตารางที่ 1 แสดงข้อจำกัดของปัญหาในงานวิจัยต่าง ๆ

ลำดับ	งานวิจัย	ข้อจำกัด			วิธีแม่นตรง	วิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์
		การจัดตั้งกลุ่มพนักงาน (Teaming)	ความชำนาญของพนักงาน (Skills)	อื่น ๆ		
1	งานวิจัย	✓	✓		✓	PSO, DE, GA
2	[10]			การเว้นช่วงวันให้บริการ (Spaced Visit Time)	✓	
3	[11]				✓	HGA
4	[12]				✓	IACO
5	[13]			ช่วงเวลาสำหรับบริการมีการกระจาย (Time Spread)	✓	MILS
6	[14]				✓	PSO
7	[15]			มีวันนัดหมาย, หลายโรงงาน (Due Dates, Multiple Depots)	✓	
8	[16]			ยานพาหนะมีหลายแบบ (Heterogeneous Fleet)	✓	
9	[17]			พนักงานเป็นคนเดิม (Driver Consistency)	✓	

ตารางที่ 2 แสดงชนิดของตัวแปร และความหมาย

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ความหมาย
ดัชนี	i,j	ดัชนีของรถตัดอ้อยและโรงงาน $i,j \in V$ โดยที่ $V = \{0,\dots,n\}$
		ดัชนีของรถตัดอ้อย $i,j \in V'$ โดยที่ $V' = \{1,\dots,n\}$, ดัชนีของโรงงาน $i,j = \{0\}$
	k	ดัชนีของยานพาหนะ $k \in K$ โดยที่ $K = \{1,\dots,K'\}$
	d	ดัชนีของวันที่รถตัดอ้อยได้รับบริการบำรุงรักษา $d \in D$ โดยที่ $D = \{1,\dots,D'\}$
	r	ดัชนีของแผน $r \in R$ โดยที่ $R = \{1,\dots,R'\}$
	s	ดัชนีของงานซ่อมบำรุง $s \in S$ โดยที่ $S = \{1,\dots,S'\}$
	l	ดัชนีของระดับความสามารถในงานซ่อมบำรุง $l \in L$ โดยที่ $L = \{1,\dots,L'\}$
	t	ดัชนีของพนักงานซ่อมบำรุง $t \in T$ โดยที่ $T = \{1,\dots,T'\}$
ตัวแปรทราบค่า	DI_{ij}	เวลาเดินทางจากตำแหน่งของจุด i ไปยังตำแหน่งของจุด j
	FC	ค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่อหน่วยเวลา
	a_r^d	เมื่อมีค่าเป็น 1 แสดงว่าวันที่ d อยู่ในแผน r และ เมื่อมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ
	TC_t	ค่าจ้างของพนักงานซ่อมบำรุงแบบที่ t
	P	จำนวนที่สามารถให้บริการรถตัดอ้อยสูงสุดในแต่ละกลุ่มในแต่ละวัน
	St_i	เวลาสำหรับให้บริการซ่อมบำรุงรักษารถตัดอ้อยคันที่ i
	Fi_i	จำนวนวันสำหรับการซ่อมบำรุงที่รถตัดอ้อยคันที่ i ต้องการ
	Fp_r	จำนวนวันในการซ่อมบำรุงของแผน r
	NT_t	จำนวนพนักงานซ่อมบำรุงแบบที่ t
	We_i	ค่าน้ำหนักของอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยคันที่ i
	Cap	ค่าความจุน้ำหนักของยานพาหนะสำหรับการบรรทุกอุปกรณ์ซ่อมบำรุง
	DT	เวลาในการทำงานสูงสุดในแต่ละวันของพนักงานซ่อมบำรุง
ตัวแปรทราบค่า	SK_t^{sl}	ความชำนาญด้านที่ s ระดับที่ l ของพนักงานซ่อมบำรุงแบบที่ t
	SKR_i^{sl}	ความยากในการซ่อมบำรุงด้านที่ s ระดับที่ l ของรถตัดอ้อยคันที่ i
ตัวแปรตัดสินใจ	U_i^{kd}	ค่าตัวแปรตัดสินใจเพื่อป้องกันการเกิดทัวร์ย่อย (Subtour)
	TE_t^{kd}	จำนวนพนักงานแบบที่ t ถูกจัดเข้ากลุ่ม k ในวันที่ d
	X_{ij}^{kd}	เมื่อมีค่าเป็น 1 มีการเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j โดยยานพาหนะคันที่ k ในวันที่ d, เมื่อมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ
	Y_{ir}	เมื่อมีค่าเป็น 1 มีการให้บริการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยคันที่ i โดยใช้ แผน r, เมื่อมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ
	Z_i^{kd}	เมื่อมีค่าเป็น 1 มีการให้บริการซ่อมบำรุงรถตัดอ้อยคันที่ i โดยยานพาหนะคันที่ k ในวันที่ d, เมื่อมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ

ตารางที่ 3 แสดงจำนวน รถตัดอ้อย วันที่พิจารณา และ จำนวนแผน ในกรณีศึกษาแต่ละขนาด

กรณีศึกษา	จำนวนรถตัดอ้อย (คัน)	จำนวนวันที่พิจารณา (วัน)	จำนวนแผน (แบบ)
A	7	3	3
B	7	4	4
C	9	4	4
D	9	5	5
E	10	5	5
F	20	14	10

ตารางที่ 4 ค่าคำตอบและระยะเวลาการหาคำตอบของรูปแบบทางคณิตศาสตร์และวิธีการทางเมตะฮิวริสติกส์

ตัวอย่าง	คำตอบ (บาท)				ค่าความแตกต่าง (%)			เวลาในการพบคำตอบที่ดีที่สุด (วินาที)				CPU TIME (วินาที)
	Optimal	DE	GA	PSO	DE	GA	PSO	MILP	DE	GA	PSO	
A1	2,800.80	2,800.80	2,800.80	2,800.80	0.00	0.00	0.00	5.96	0.75	0.64	0.38	
A2	3,509.35	3,509.35	3,509.35	3,509.35	0.00	0.00	0.00	24.81	1.59	0.74	0.78	
A3	2,795.79	2,795.79	2,795.79	2,795.79	0.00	0.00	0.00	38.24	1.69	6.81	0.83	
A4	2,707.28	2,707.28	2,707.28	2,707.28	0.00	0.00	0.00	17.63	1.12	2.51	0.86	
A5	2,850.90	2,850.90	2,850.90	2,850.90	0.00	0.00	0.00	14.66	0.72	1.50	0.83	
B1	2,782.43	2,782.43	2,782.43	2,782.43	0.00	0.00	0.00	4.41	0.56	0.91	0.46	10.00
B2	4,657.11	4,657.11	4,657.11	4,657.11	0.00	0.00	0.00	85.31	0.52	0.39	0.65	
B3	3,569.47	3,569.47	3,569.47	3,569.47	0.00	0.00	0.00	17.82	1.07	3.33	0.78	
B4	3,989.11	3,989.11	3,989.11	3,989.11	0.00	0.00	0.00	79.70	1.07	0.68	0.74	
B5	3,527.72	3,527.72	3,539.41	3,527.72	0.00	0.33	0.00	18.97	1.73	2.74	0.78	
C1	4,749.43	4,749.43	4,767.80	4,751.10	0.00	0.39	0.04	6,154.12	34.94	18.47	2.28	
C2	5,411.22	5,411.22	5,424.58	5,414.56	0.00	0.25	0.06	161.30	6.05	0.49	1.28	
C3	4,209.55	4,209.55	4,231.26	4,216.23	0.00	0.52	0.16	120.60	9.26	2.44	0.72	60.00
C4	4,117.70	4,117.70	4,129.39	4,117.70	0.00	0.28	0.00	333.86	33.72	41.12	32.87	
C5	4,112.69	4,112.69	4,131.06	4,122.71	0.00	0.45	0.24	185.02	17.32	11.65	23.63	
D1	4,751.10	4,751.10	4,781.16	4,774.48	0.00	0.63	0.49	13,401.43	21.69	9.40	1.77	
D2	5,046.69	5,046.69	5,075.08	5,060.05	0.00	0.56	0.26	1,310.15	43.40	39.31	1.81	
D3	4,209.55	4,209.55	4,234.60	4,211.22	0.00	0.60	0.04	135.97	46.75	19.93	1.84	
D4	4,117.70	4,117.70	4,177.82	4,122.71	0.00	1.46	0.12	309.27	38.99	58.91	2.42	
D5	4,132.73	4,132.73	4,194.52	4,132.73	0.00	1.50	0.00	732.47	55.77	24.44	26.88	
E1	5,557.78	5,562.79	5,594.52	5,562.79	0.09	0.66	0.09	39,630.58**	17.19	1.72	1.65	120.00
E2	5,881.76	5,913.49	5,933.53	5,916.83	0.54	0.88	0.60	55,557.09**	43.72	22.51	2.28	
E3	5,378.02	5,657.98	5,699.73	5,681.36	5.21	5.98	5.64	41,563.73**	56.29	6.37	15.26	
E4	5,409.75	5,609.55	5,654.64	5,619.57	3.69	4.53	3.88	36,208.69**	45.21	55.98	17.01	
E5	5,304.54	5,562.79	5,612.89	5,572.81	4.87	5.81	5.06	40,142.83**	57.84	47.97	21.00	
F1	22,130.90*	16,964.52	17,573.94	17,043.68	*	*	*	>56,000.00**	84.96	37.27	20.70	
F2	16,982.40*	13,991.91	15,078.95	14,193.58	*	*	*	>56,000.00**	60.16	21.42	11.20	
F3	19,983.00*	17,379.75	17,983.09	17,384.76	*	*	*	>56,000.00**	45.13	1.58	14.75	300.00
F4	22,702.60*	16,972.07	17,141.81	17,121.77	*	*	*	>56,000.00**	38.46	5.29	17.98	
F5	22,214.00*	18,895.18	19,856.37	19,317.96	*	*	*	>56,000.00**	46.02	40.13	15.59	
		ค่าเฉลี่ย			0.58	0.99	0.67					

หมายเหตุ *: รูปแบบทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ภายในระยะเวลา 56,000 วินาที

**: ระยะเวลาในการประมวลผลเกินกว่าระยะเวลาที่ทางโรงงานยอมรับ (21,600 วินาที)

(ก) $\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ (ข) $\begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 \end{vmatrix}$

ภาพที่ 1 (ก) แสดงตัวอย่างระดับความชำนาญของพนักงานซ่อมบำรุงรถตัดอ้อย 4 ด้าน 3 ระดับ และ (ข) แสดงตัวอย่างระดับความยากในการซ่อมบำรุงของรถตัดอ้อย 4 ด้าน 3 ระดับ

(ก)

รถตัดอ้อย	จำนวนความถี่ในการรับบริการ (วัน/รอบการวางแผน)
1	2
2	1

(ข)

แผน	วัน					ความสามารถให้บริการ
	จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	
1		1		1		2
2	1		1			2
3		1				1

ภาพที่ 2 เงื่อนไขในการวางแผนซึ่งครอบคลุม 5 วัน (ก) แสดงจำนวนความถี่ในการรับบริการของรถตัดอ้อยแต่ละคัน และ (ข) แสดงวันให้บริการของแผนแต่ละแบบ

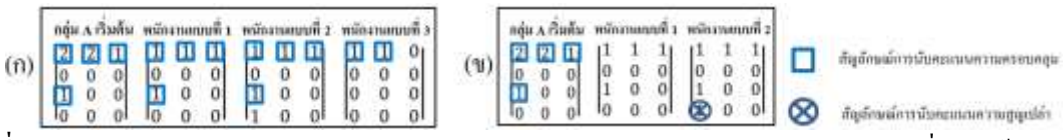
ภาพที่ 3 แสดงค่าเวกเตอร์สำหรับการกำหนดแผนและเวกเตอร์สำหรับการจัดลำดับการให้บริการในแต่ละวันของรถตัดอ้อยคันที่ 1 และ 2

ภาพที่ 4 แสดงลำดับการเดินทางไปให้บริการรถตัดอ้อยในวันอังคารและวันพฤหัสบดี

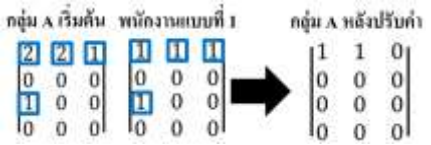
(ก) $\begin{vmatrix} 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ ⇒ $\begin{vmatrix} 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$

(ข) $\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$

ภาพที่ 5 (ก) ระดับความต้องการของรถตัดอ้อยคันที่ 1 กับ 2 และกลุ่ม A เริ่มต้น และ (ข) ระดับความชำนาญของพนักงาน



ภาพที่ 6 (ก) การนับค่าคะแนนความครอบคลุมของพนักงานแต่ละแบบเทียบกับระดับความชำนาญที่รถตัดอ้อยกลุ่ม A ต้องการตอนเริ่มต้น และ (ข) การนับค่าคะแนนความสูญเปล่าของพนักงานแบบที่ 1 และพนักงานแบบที่ 2



ภาพที่ 7 แสดงระดับความขำนาญที่กลุ่ม A ต้องการหลังปรับค่า

Pseudocode of Particle Swarm Optimization (PSO)

Input: $cp = 1, cg = 1, w = 0.3$, Number of iterations, Number of populations
Output: $min\ f(p_g)$

Generate initial population
For $i = 1$: Maximum iteration
  For $j = 1$: Number of populations
    If $f(x_{j,d}(i)) < f(p_j)$
      $p_j = x_{j,d}(i)$
    End If
    If $f(p_j) < f(p_g)$
      $f(p_g) = f(p_j)$
      $p_g = p_j$
    End If
    For $d = 1$: size of dimension
      $rp, rg = rand[0,1]$
      $v_{j,d}(i+1) = W \cdot v_{j,d}(i) + cp \cdot rp \cdot (p_j - x_{j,d}(i)) + cg \cdot rg \cdot (p_g - x_{j,d}(i))$
      $x_{j,d}(i+1) = x_{j,d}(i) + v_{j,d}(i+1)$
      While $x_{j,d}(i+1) > 1$
        $x_{j,d}(i+1) = x_{j,d}(i+1) - 1$
      End While
      While $x_{j,d}(i+1) < 1$
        $x_{j,d}(i+1) = x_{j,d}(i+1) + 1$
      End While
    End For
  End For
End For

Pseudocode of Differential Evolution (DE)

Input: $CR = 0.8, F = 0.3$, Number of iterations, Number of populations
Output: $min\ f(v_{j,d})$

Generate initial population
$f(v_{j,d}) = \min(\text{Evaluate } f(v_{j,d}(i)))$
For $i = 1$: Number of iterations
  For $j = 1$: Number of populations
    Select randomly $r_1 \neq r_2 \neq r_3$
    For $d = 1$: size of dimension
      If $(rand_j[0,1] < CR)$
        $t_{j,d}(i) = v_{r_3,d}(i) + F \cdot (v_{r_1,d}(i) - v_{r_2,d}(i))$
      Else
        $t_{j,d}(i) = v_{j,d}(i)$
      End If
      While $t_{j,d}(i) > 1$
        $t_{j,d}(i) = t_{j,d}(i) - 1$
      End While
      While $t_{j,d}(i) < 1$
        $t_{j,d}(i) = t_{j,d}(i) + 1$
      End While
    End For
    If $f(t_{j,d}(i)) < f(v_{j,d}(i))$
      $v_{j,d}(i+1) = t_{j,d}(i)$
    Else
      $v_{j,d}(i+1) = v_{j,d}(i)$
    End If
    If $f(v_{j,d}(i+1)) < f(v_{j,d})$
      $f(v_{j,d}) = f(v_{j,d}(i+1))$
    End If
  End For
End For

Pseudocode of Genetic Algorithm (GA)

Input: $PC = 0.8, PM = 0.2$, Number of iterations, N = Number of populations
Output: $min\ f(P)$

Generate initial population
$f(P) = \min(\text{Evaluate } f(Pa))$
For $i = 1 : N$
//Crossover process (based on One-point Crossover) with probability PC:
  For $j = 1 : N/2$
    $Rc = rand[0,1]$
    If $Rc \leq PC$
      $Cpoint = randi[2, \text{size of dimension}]$
      For $k = 1 : Cpoint - 1$
        $Pb_{2j-1,k} = Pa_{2j,k}$
        $Pb_{2j,k} = Pa_{2j-1,k}$
      End For
      For $k = Cpoint$: size of dimension
        $Pb_{2j-1,k} = Pa_{2j,k}$
        $Pb_{2j,k} = Pa_{2j-1,k}$
      End For
    Else
      $Pb_{2j-1,k} = Pa_{2j-1,k}$
      $Pb_{2j,k} = Pa_{2j,k}$
    End If
  End For
//Mutation process (based on Swap Mutation) with probability PM:
  For $j = 1 : N$
    $Rm = rand[0,1]$
    If $Rm \leq Pm$
      Select randomly $S1 \neq S2$
      $Dummy = Pb_{jS1}$
      $Pb_{jS1} = Pb_{jS2}$
      $Pb_{jS2} = Dummy$
    End If
  End For
  For $k = 1 : N$
    Evaluate $f(Pb_j)$
    If $f(Pb_k) < f(P)$
      $f(P) = f(Pb_k)$
    End If
  End For
//Selection process (based on Roulette wheel method):
    For $m = 1 : N$
      $evas_m = f(Pb_m) / \sum_{i=1}^{N} f(Pb_j)$
    End For
    For $m = 1 : N$
      $Rs = rand[0,1]$
      $Range = 0$
      $n = 1$
      While $Rs > Range$
        $Range = Range + evas_n$
        If $Rs \leq Range$
          $Pa_m = Pb_n$
        End If
        $n = n + 1$
      End While
    End For
End For

ภาพที่ 8 แสดงรหัสเทียม (Pseudo-Code) ของวิธี PSO, DE และ GA

	Optimal	*PSO*	*Optimal*	*DE*	*Optimal*	*GA*
Mean	4223.2068	4258.6724	4223.2068	4254.1968	4223.2068	4273.7692
Variance	963014.946	1052182.29	963014.9462	1044677.09	963014.946	1069368.92
Observations	2	3	25	5	2	3
Pearson Correlation	25	25	0.997463115	25	25	25
Hypothesized Mean Difference	0.99728127		0		0.99706016	
df	1		24		7	
t Stat	0		-1.885915121		0	
P(T<=t) one-tail	24		0.035733146		24	
t Critical one-tail	-2.05486854		1.71088208		-2.70246956	
P(T<=t) two-tail	0.02546634		0.071466292		0.00621803	
t Critical two-tail	6		2.063898562		1.71088208	
	1.71088208				0.01243605	
	0.05093269				9	
	2				2.06389856	
	2.06389856				2	
	2					

ภาพที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบทางสถิติของคำตอบที่ได้จากวิธี PSO, DE และ GA เทียบกับรูปแบบทางคณิตศาสตร์