

การจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาตั้งเครื่องจักรสำหรับ กระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์

จักรวาล คุณะติลก*¹ และ อารตา ไชยโคตร¹

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอมือ จังหวัดชลบุรี 20131

Received: 8 August 2021; Revised: 13 November 2021; Accepted: 16 November 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับการขึ้นรูปยางรถยนต์ที่มีเป้าหมายในการลดต้นทุนรวมจากค่าแรงงานและค่าไฟฟ้าในการเดินเครื่องจักร ระบบการผลิตนี้มีลักษณะเป็นแบบเครื่องจักรแบบขนานจำนวน 32 เครื่อง สำหรับผลิตงานประมาณ 80 รุ่นรวม 7,000 เส้นต่อวัน โดยที่เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นการผลิตขึ้นอยู่กับลำดับงานก่อนหน้า การจัดตารางการผลิตนี้เป็นกิจกรรมที่ทำประจำสัปดาห์ โดยนำปริมาณความต้องการยางรถยนต์แต่ละวันในหนึ่งสัปดาห์ข้างหน้าจากแผนการผลิตหลักมาสร้างเป็นตารางการผลิตรายวัน ปัญหานี้จึงเป็นปัญหาการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming, MILP) ที่สร้างขึ้นจากพื้นฐานของแบบจำลองปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถรับส่งนักเรียน โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขสำคัญด้านการทำงานล่วงเวลา และจุดตั้งต้นการทำงานของเครื่องจักรแต่ละเครื่องที่แตกต่างกัน การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง MILP เปรียบเทียบกับตารางการผลิตจริง 30 วันที่สร้างจากประสบการณ์ของผู้วางแผน พบว่าวิธีการที่เสนอสามารถสร้างตารางการผลิตที่เป็นไปได้ที่ทำให้ต้นทุนรวมลดลงเฉลี่ย 328,848 บาทต่อเดือน จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ลดลงเฉลี่ย 3.3 เครื่องต่อวัน เวลาตั้งเครื่องจักรลดลงเฉลี่ย 34.9 นาทีต่อวัน และเวลาการทำงานล่วงเวลาลดลงเฉลี่ย 6.3 ชั่วโมงต่อวัน

คำสำคัญ: เครื่องจักรขนาน เวลาตั้งเครื่องจักรที่ขึ้นอยู่กับลำดับงาน กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

* Corresponding author. E-mail: jakrawarn@eng.buu.ac.th

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Parallel machine scheduling with sequence dependent setup time for tire building process

Jakrawarn Kunadilok^{*1} and Arada Chaillacod¹

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University
Mueang, Chonburi 20131

Received: 8 August 2021; Revised: 13 November 2021; Accepted: 16 November 2021

Abstract

This research proposed a scheduling method for tire building machines with reducing total cost from labor cost and electrical cost as the goal. The production system in the tire building process consists of 32 parallel machines that responsible for producing 7,200 tires of 80 tire models per day, approximately. Each machine's setup time when changing the models in production depends on the tire model that produced previously. Production scheduling in this process is a weekly planning activity for generating daily production schedules that meet all demands for each day in one week indicated in the master production plan. Thus this scheduling problem is a parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup time as processing restriction and minimizing total cost as the objective. A mixed integer linear programming model (MILP) was developed to solve this problem. A school bus routing problem formulation was used as the prototype model in developing the proposed MILP that included an overtime constraint and possible different initial jobs on each machine. The performance of the proposed MILP was evaluated by comparing with the real production schedules of 30 days generated by experience of the planner. The results revealed that the proposed MILP was able to find all feasible solutions. The total cost was decreased by 328,848 baht per month. The average number of machine used for production was reduced by 3.3 machines per day. The average setup time was reduced by 34.9 minutes per day. The average hour of production in overtime was reduced by 6.3 hours per day.

Keywords: parallel machines, sequence-dependent setup time, mixed integer linear programming

^{*} Corresponding author. E-mail: jakrawarn@eng.buu.ac.th

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

1. บทนำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูง องค์กรต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับความต้องการของลูกค้าที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา นอกจากการปรับปรุงที่ตัวผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายแล้ว การปรับปรุงสภาพการดำเนินงานขององค์กรเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้องค์กรมีขีดความสามารถในการแข่งขันกับองค์กรอื่น ๆ การลดต้นทุนการดำเนินงานทุกส่วนในองค์กรเป็นกลยุทธ์สำคัญที่เพิ่มประสิทธิภาพขององค์กร การวางแผนการผลิตที่ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ การจัดการตารางการผลิตเป็นกิจกรรมสำคัญของกระบวนการผลิตยางรถยนต์ที่มีผลิตภัณฑ์หลากหลายรุ่น การใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยทำให้กระบวนการผลิตสามารถผลิตงานหลากหลายรุ่นได้บนสายการผลิตเดียวกันโดยการทำการกิจกรรมปรับตั้งเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นการผลิตด้วยเงื่อนไขการปรับตั้งเครื่องจักรนี้ทำให้จัดการตารางการผลิตที่มีประสิทธิภาพได้ยากมากขึ้น

ปัญหาการจัดการตารางการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อความยากนี้ประกอบด้วยลักษณะงานที่ทำการผลิต รูปแบบของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต เป้าหมายด้านประสิทธิภาพของตารางการผลิต และเงื่อนไขการผลิตอื่น ๆ เช่น เวลาปรับตั้งเครื่องจักรเปลี่ยนแปลงตามรุ่นการผลิตก่อนหน้านี้ในกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ที่ใช้การปรับตั้งแม่พิมพ์เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดขอบยาง หรือใช้การเปลี่ยนแม่พิมพ์เมื่อเปลี่ยนรุ่นยางที่ผลิต เป็นต้น การแก้ปัญหามานagementจัดการตารางการผลิตของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการอย่างง่าย เช่น กฎการจัดลำดับความสำคัญของงานแบบต่าง ๆ เป็นต้น หรือใช้ประสบการณ์และความชำนาญของผู้วางแผน [1-4] วิธีการเหล่านี้อาจทำให้เกิดความสูญเสียในการผลิตได้ เช่น จัดลำดับการผลิตไม่เหมาะสมส่งผลต่อการใช้เวลาในการตั้งเครื่องจักรมากเกินไป เป็นต้น ทำให้คุณภาพผลลัพธ์ที่เป็นเป้าหมายของการวางแผนการผลิต เช่น เวลาปิดงานของระบบ เป็นต้น ยังสามารถปรับปรุงได้โดยใช้วิธีการจัดการตารางการผลิตด้วยเมตาฮิวริสติกหรือวิธีการอื่นที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น [5-7]

งานวิจัยนี้พิจารณาปัญหาการจัดการตารางการผลิตของกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ที่มีรูปแบบการผลิตที่ใช้เครื่องจักรแบบขนานในสำหรับผลิตงานหลายรุ่น รูปแบบการผลิตนี้มักเกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรม [8-10] ที่ทำให้โรงงานมีกำลังการผลิตที่เพียงพอต่อปริมาณความต้องการของลูกค้า กระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์นี้ต้องจัดการตารางการผลิตรายวันสำหรับปริมาณการผลิตรวมประมาณ 7000 เส้นของรุ่นผลิตภัณฑ์ประมาณ 80 รุ่น บนเครื่องขึ้นรูปยางจำนวน 32 เครื่อง เครื่องจักรทุกเครื่องใช้เวลาการผลิตไม่ต่างกันในการขึ้นรูปยางรุ่นหนึ่ง ๆ แต่มีบางรุ่นที่มีขนาดขอบยางใหญ่สามารถผลิตได้เฉพาะบนเครื่องจักร 3 เครื่อง และเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นการผลิตต้องมีการปรับตั้งเครื่องจักรโดยเวลาที่ใช้ปรับตั้งเครื่องจักรขึ้นอยู่กับรุ่นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตก่อนหน้านี้ ปัญหาการจัดการตารางการผลิตนี้จัดเป็นปัญหาการจัดการตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาการตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) เมื่อเป้าหมายของการจัดการตารางการผลิตคือการทำให้เวลาปิดงานในระบบต่ำที่สุด [11]

วิธีการจัดการตารางการผลิตที่มีเงื่อนไขการผลิตด้านเวลาการตั้งเครื่องจักรมีการเสนอในงานวิจัยเป็นจำนวนมาก Allahverdi [12] ได้สำรวจว่าในช่วงกลางปี ค.ศ. 2006 ถึงปี ค.ศ. 2014 มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวม 82 งานวิจัยที่เสนอวิธีการจัดการตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่มีเวลาตั้งเครื่องจักรเป็นเงื่อนไขการผลิต งานวิจัยจำนวนมากได้ออกแบบวิธีการเมตาฮิวริสติกสำหรับแก้ปัญหามานagementจัดการตารางการผลิตนี้ ขณะที่ม้งานวิจัยมากกว่า 20 งานที่ใช้แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ปัญหาการจัดการตารางการผลิตเพื่อให้ผลรวมของเวลาปิดงานแบบถ่วงน้ำหนักต่ำที่สุดสามารถใช้แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ร่วมกับขั้นตอนวิธีแบบคอลัมน์ที่สามารถหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมการจัดการตารางการผลิต 60 งาน และ 10 เครื่องจักร ได้ในเวลาที่เหมาะสมกับขนาดปัญหา [13] เป็นต้น ผลการสำรวจงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Giard et al. [8] ที่ได้ทำการวิจัยประยุกต์ในการจัดการตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานของโรงงานผลิตปุ๋ยแห่งหนึ่ง พบว่างานวิจัยจำนวน 16 เรื่องเป็นปัญหาที่มีเงื่อนไขการผลิตที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาตั้งเครื่องจักรและใช้แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์

เป็นทางเลือกในการแก้ปัญหา Ruiz et al. [14] ใช้ชุดสมการข้อจำกัด MTZ สำหรับกำจัดเส้นทางย่อยจากปัญหาการเดินทางพนักงานขาย (Traveling salesman problem) ในแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กันที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาตั้งเครื่องจักรโดยมีเป้าหมายให้เวลาปิดงานต่ำที่สุด แบบจำลองที่เสนอสามารถจัดตารางการผลิตที่มีจำนวนงาน 200 งานโดยให้ผลลัพธ์เวลาปิดงานแตกต่างจากขอบเขตล่างของปัญหาโดยเฉลี่ย 1.98% เมื่อกำหนดเวลาประมวลผลสูงสุด 3 ชั่วโมง แบบจำลองนี้ถูกขยายผลไปใช้งานร่วมกับอัลกอริทึมในการหาผลลัพธ์ด้วยการจัดกลุ่มงานให้กับเครื่องจักรก่อน แล้วนำผลลัพธ์ไปจัดลำดับการผลิตบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องต่อไปโดยมีเป้าหมายให้ผลรวมเวลาเสร็จงานของทุกเครื่องจักรต่ำที่สุด พบว่าวิธีการนี้ทำให้ความแตกต่างโดยเฉลี่ยของเวลาปิดงานจากขอบเขตล่างมีค่าต่ำกว่า 0.5% สำหรับปัญหาที่มีจำนวนงาน 400 ถึง 1000 งาน

เป้าหมายการจัดตารางการผลิตที่ใช้เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของตารางการผลิตแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ ปริมาณผลผลิต การส่งมอบงาน และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการผลิต [11] ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่รวมการตัดสินใจเกี่ยวกับการทำงานล่วงเวลาเป็นปัญหาที่วัดสมรรถนะของตารางการผลิตด้วยค่าใช้จ่าย เช่น ต้นทุนต่ำที่สุด เป็นต้น Süer and K. Mathu [15] เสนอแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ในการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานร่วมกับการตัดสินใจเกี่ยวกับความต้องการในการทำงานล่วงเวลาที่มีอัตราค่าแรงล่วงเวลาต่างกันในช่วงวันธรรมดาและวันหยุดเพื่อให้กำไรสุทธิสูงสุด ความซับซ้อนของการตัดสินใจเกี่ยวกับลำดับการผลิตบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องและการทำงานล่วงเวลาเพื่อให้ผลิตงานได้ทันตามกำหนดส่งมอบทำให้ปัญหานี้เป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) แบบจำลองที่เสนอจึงถูกสร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขให้ลำดับงานบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องเรียงลำดับตามกฎกำหนดส่งมอบก่อนให้ผลิตก่อน (Earliest Due Date, EDD) และยอมให้มีการผลิตไม่ทันกำหนดส่งมอบ แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้สำหรับการตัดสินใจทำงานล่วงเวลาได้ทั้งแบบเต็มเวลาหรือบางส่วนเป็นเวลา และสามารถกำหนดให้เครื่องจักรทุกเครื่องจะต้องทำงานแบบล่วงเวลาในกะทำงานที่ต้องการได้

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประยุกต์การจัดตารางการผลิตสำหรับกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ในโรงงานกรณีศึกษาที่มีเงื่อนไขให้ปริมาณการผลิตในแต่ละวันต้องสอดคล้องเป็นไปตามที่กำหนดจากแผนการผลิตหลัก หากผู้วางแผนจัดตารางการผลิตในเวลางานปกติในเบื้องต้นแล้วพบว่าตารางการผลิตที่สร้างขึ้นยังไม่สามารถผลิตงานได้ตามปริมาณคำสั่งผลิต ผู้วางแผนจะพิจารณาเพิ่มจำนวนเครื่องจักรที่ยังไม่ได้กำหนดให้ผลิตงาน หรืออาจกำหนดให้มีการทำงานล่วงเวลาได้ 3 ระดับคือ 1 2 หรือ 3 ชั่วโมง จนสามารถผลิตงานได้ครบตามแผนการผลิตหลัก จำนวนเครื่องจักรที่ใช้และการทำงานล่วงเวลาที่มีอัตราค่าแรงสูงกว่าช่วงเวลางานปกติจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของงานที่ผลิตสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตและค่าแรงงานของพนักงานคุมเครื่องจักร

2. ข้อมูลของกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์

กระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ของโรงงานกรณีศึกษามีกำลังการผลิตสูงสุดประมาณ 80,000 ตัน/ปี ขั้นตอนการผลิตนี้เป็นการประกอบส่วนต่าง ๆ ของยางด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยให้เป็นโครงยางดิบ (Green tire) ชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางจะถูกนำมาประกอบในตำแหน่งที่ออกแบบไว้อย่างเที่ยงตรงเพื่อให้ได้ขนาดและคุณภาพของยางตามข้อกำหนดของรุ่นผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนประมาณ 200 รุ่น ยางแต่ละรุ่นจะมีการระบุขนาดขอบยาง (Rim size) ไว้ 4 ขนาด คือ 19 20 22 และ 24 นิ้ว เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปยางมีลักษณะเป็นเครื่องจักรแบบขนานรวมจำนวน 32 เครื่อง โดยมีข้อจำกัดสำหรับการผลิตยางรุ่นที่มีขนาดขอบยาง 24 นิ้วสามารถผลิตได้เฉพาะบนเครื่องจักร 3 เครื่องเท่านั้น เมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นการผลิตบนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ จะต้องมีการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นการผลิตจะขึ้นอยู่กับรุ่นผลิตภัณฑ์และขนาดขอบยางที่ผลิตก่อนหน้า การกระจายตัวของช่วงเวลาปรับตั้งเครื่องจักรของทุกลำดับการผลิตที่เป็นไปได้ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของเวลาการตั้งเครื่องจักรของทุกลำดับการผลิตที่เป็นไปได้

ช่วงเวลาการตั้งเครื่องจักร (นาที)	ร้อยละ
0 - 40	12
40 - 50	40
300 - 360	25
530 - 560	14
860 - 900	5
1300 - 1400	4

โรงงานกรณีศึกษาแบ่งการทำงานใน 1 วันออกเป็น 3กะการทำงาน มีชั่วโมงการทำงานต่อกะตามเวลาการทำงานปกติ 7 ชั่วโมง และการทำงานล่วงเวลา 1 ชั่วโมง อัตราค่าแรงงานพนักงานควบคุมเครื่องจักรในช่วงเวลาการทำงานล่วงเวลาคิดเป็น 1.5 เท่าของเวลาการทำงานปกติ การทำงานในแต่ละวันหากมีการใช้งานเครื่องจักรใด ๆ จะต้องทำการผลิตครบทั้ง 3 กะการทำงาน โดยคิดค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องจักรเฉพาะช่วงที่ทำการผลิตและปรับตั้งเครื่องจักรจากอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงคิดเป็น 0.4 เท่าของอัตราค่าแรงในช่วงเวลาการทำงานปกติ

กิจกรรมการจัดตารางการผลิตรายวันเริ่มจากการรับแผนการผลิตหลักที่แสดงปริมาณการผลิตที่ต้องการของยางแต่ละรุ่นล่วงหน้า 7 วัน จากนั้นผู้วางแผนจะทำการตัดสินใจว่างานรุ่นต่าง ๆ จะผลิตบนเครื่องจักรใด และเมื่อพิจารณาจากเวลาการผลิตที่รวมเวลาตั้งเครื่องจักรแล้วต้องมีการทำงานล่วงเวลาหรือไม่ การทำงานล่วงเวลาของแต่ละกะการทำงานของพนักงานควบคุมเครื่องจักรแต่ละเครื่องมีความเป็นอิสระต่อกัน ผู้วางแผนสามารถเลือกกะการทำงานและเครื่องจักรให้ทำงานล่วงเวลาได้ เพื่อจัดทำแผนสั่งผลิตรายวันใช้งานต่อไป การจัดตารางการผลิตด้วยประสบการณ์นี้อาจเกิดความสูญเสียเปล่าในการตั้งเครื่องจักรที่มีสาเหตุจากลำดับการผลิตงานได้ และอาจเกิดการแบ่งภาระงานบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องที่ไม่เหมาะสมทำให้มีเครื่องจักรใช้เวลาผลิตงานไม่เต็มเวลาการทำงานปกติ ขณะที่บางเครื่องใช้เวลาการผลิตมากกว่าเวลาการทำงานปกติได้ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นจากการทำงานล่วงเวลา หรืออาจทำให้ใช้จำนวนเครื่องจักรในการผลิตมากกว่าภาระงานที่ต้อง

ผลิตได้ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นจากค่าแรงพนักงานควบคุมเครื่องจักร

3. วิธีดำเนินการวิจัย

แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนาน [8, 12, 14] วิธีการนี้สามารถหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดหรือผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงได้ในการประยุกต์กับปัญหาจริงที่มีจำนวนงานไม่มากเกินไปและเวลาการประมวลผลเพียงพอ งานวิจัยนี้เสนอแบบจำลองกำหนดเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming, MILP) สำหรับการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาตั้งเครื่องจักรที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมจากค่าเดินเครื่องจักรและค่าแรงงานของพนักงานควบคุมเครื่องจักรให้มีค่าต่ำที่สุด

3.1 แนวคิดการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลอง MILP ที่เสนอถูกสร้างขึ้นจากการใช้พื้นฐานของแบบจำลองที่ใช้สูตรการไหล (Flow based formulation) สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถรับส่งนักเรียน (School bus routing problem, SBRP) [16-17] ปัญหา SBRP เป็นปัญหาการกำหนดจุดรับส่งนักเรียนของโรงเรียนแต่ละคันให้ครบทุกจุดรับส่ง โดยมีเป้าหมายให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมจากจำนวนรถรับส่งที่ใช้และปริมาณเชื้อเพลิงที่แปรผันตามระยะทางรวมมีค่าต่ำที่สุด การเปรียบเทียบความสอดคล้องและความแตกต่างระหว่างปัญหาการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานของงานวิจัยนี้กับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถรับส่งนักเรียนแสดงได้ดังตารางที่ 2

สูตรสมมูลการไหลเข้าและออกของรถรับส่งนักเรียน ณ จุดรับส่งแต่ละจุด สามารถนำมาเป็นแนวทางในการสร้างสมการข้อจำกัด (Constraint) สำหรับคำนวณจำนวนนักเรียน ระยะทาง และเวลาการเดินทางสะสมตามเส้นทางเดินรถของรถแต่ละคัน การใช้สมมูลการไหลร่วมกับการมอบหมายงานในการสร้างแบบจำลองทำให้สามารถกำหนดตัวแปรตัดสินใจแบบไบนารี (Binary) ที่เป็นแบบสองมิติได้ (x_{ij}) คือ ลำดับการเดินทางของเส้นทางรับส่งนักเรียนจากจุดรับส่งหนึ่ง (i) ไปสู่อีกจุดหนึ่ง (j) โดยสามารถลดมิติได้

ในด้านรถรับส่งนักเรียนแต่ละคันลงได้ ดังนั้นจำนวนตัวแปรตัดสินใจในปัญหาหนึ่ง ๆ จึงลดลงตามจำนวนเท่าตัวของจำนวนรถรับส่งนักเรียน ซึ่งจะช่วยให้ความสามารถของการประมวลผลแบบจำลองในด้านคุณภาพผลลัพธ์และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลได้

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบปัญหาของงานวิจัยกับ SBRP

ปัญหาของงานวิจัย	SBRP
ความสอดคล้อง	
จำนวนเครื่องจักร	จำนวนรถรับส่ง
จำนวนงานที่ต้องผลิต	จำนวนจุดที่รับส่งนักเรียน
เวลาการตั้งเครื่องจักรที่ผ่านแปรตามลำดับงานก่อนหน้า	เวลาการเดินทางระหว่างจุดรับส่ง
ค่าแรงพนักงานควบคุมเครื่องจักรในช่วงเวลาปกติ	ค่าใช้จ่ายคงที่เมื่อมีการใช้รถรับส่ง
ค่าไฟฟ้าในการเดินเครื่องจักร	ค่าเชื้อเพลิงของรถรับส่ง
งานสุดท้ายที่เครื่องจักรผลิตในรอบการผลิตก่อนหน้าเป็นตัวกำหนดจุดเริ่มต้นการทำงานของเครื่องจักร	มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเดินทางของรถรับส่งพนักงานอย่างละ 1 จุด
ความแตกต่าง	
มีเวลาในการผลิตงานแต่ละงาน	ไม่มีการกำหนดเวลาจอดรถส่งนักเรียนที่จุดรับส่งต่าง ๆ
พิจารณาเฉพาะเวลาการผลิตสูงสุดที่เป็นไปได้ของเครื่องจักรในแต่ละวัน	มีเงื่อนไขด้านความจุรถรับส่งและเวลาการเดินทางสูงสุดของรถรับส่งแต่ละคัน
อนุญาตให้ทำงานล่วงเวลาได้ เครื่องจักรละไม่เกิน 3 ชั่วโมง	เวลาการเดินรถสูงสุดเป็นค่าคงที่
การคำนวณค่าใช้จ่ายเมื่อเครื่องจักรถูกเลือกใช้งานจากค่าแรงพนักงานควบคุมเครื่องจักรซึ่งมีอัตราค่าแรงแบบขั้นบันได คือ ช่วงเวลาการทำงานปกติ 21 ชั่วโมง และเวลาการทำงานล่วงเวลาสามช่วง คือ 1 2 และ 3 ชั่วโมง	การคำนวณค่าเช่ารถแปรผันตามจำนวนรถรับส่งที่ใช้

ปัญหาของงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการจัดการตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่มีขนาดใหญ่โดยมีจำนวนงานที่ต้องจัดการตารางการผลิตประมาณ 80 งาน และจำนวนเครื่องจักรแบบขนาน 32 เครื่อง การสร้างแบบจำลอง MILP

ที่ใช้ตัวแปรตัดสินใจแบบไบนารีสองมิติดัชนี จึงเป็นแนวทางที่สามารถสร้างตารางการผลิตที่มีคุณภาพผลลัพธ์ที่ดีภายในเวลาประมวลผลที่จำกัดได้

3.2 แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

แบบจำลอง MILP ที่เสนอใช้ข้อมูลนำเข้าสำหรับการจัดการตารางการผลิต ได้แก่ กลุ่มงานที่ต้องการจัดการตารางการผลิตจำนวน n งาน จำนวนเครื่องจักรที่เป็นไปได้ในรอบการจัดการตารางการผลิต m เครื่อง เวลาในการผลิตงาน เวลาตั้งเครื่องจักรตามลำดับงานที่เป็นไปได้ทั้งหมด และงานสุดท้ายที่เครื่องจักรผลิตเสร็จในช่วงเวลาก่อนหน้ารายละเอียดของแบบจำลอง MILP ประกอบไปด้วย ดัชนีและเซต พารามิเตอร์ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับ ดังนี้

3.2.1 ดัชนีและเซต

i, j, p , และ k คือ ดัชนีของงาน

t คือ ดัชนีของเวลาการทำงานล่วงเวลา

เซต J คือ เซตของงาน เมื่อ $J = \{1, \dots, n\}$

เซต K คือ เซตของงานเทียม k ที่ใช้แสดงถึงการเริ่มต้นทำงานของเครื่องจักรหมายเลข $k-n-1$; $K = \{n+2, n+3, \dots, n+m, n+m+1\}$

เซต V คือ เซตของชั่วโมงการทำงานล่วงเวลา; $V = \{1, 2, 3\}$

3.2.2 พารามิเตอร์

S_{ij} คือ เวลาการตั้งเครื่องจักรเมื่อผลิตงาน j ต่อจากงาน i (นาที)

P_i คือ เวลาการผลิตงาน i (นาที)

L คือ ค่าแรงงานพนักงานควบคุมเครื่องจักร 1 เครื่องในช่วงเวลาทำงานปกติ 21 ชั่วโมงต่อวัน (บาท)

L_o คือ อัตราค่าแรงงานการทำงานล่วงเวลา (บาทต่อชั่วโมง)

E คือ อัตราค่าไฟฟ้าที่เกิดจากทำงานของเครื่องจักร (บาทต่อนาที)

Eff คือ ประสิทธิภาพของการผลิตที่เป็นค่าเพื่อเวลาสูญเสียของการทำงาน

T คือ เวลาการทำงานสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถจัดการตารางการผลิตได้ในหนึ่งวัน (นาที) สำหรับปัญหากรณีศึกษา

กำหนดประสิทธิภาพการผลิตต่ำกว่า 100% ทำให้ T มีค่าต่ำกว่า 24 ชั่วโมง หรือ 1,440 นาที

3.2.3 ตัวแปรตัดสินใจ

x_{ij} คือ ตัวแปรแบบไบนารี มีค่าเป็น 1 เมื่องาน j ผลิตต่อจากงาน i ไม่เช่นนั้นมีค่าเป็น 0

c_{ij} คือ เวลาผลิตเสร็จของงาน j (ผลิตต่อจากงาน i)

$o_{i,t}$ คือ ตัวแปรแบบไบนารี มีค่าเป็น 1 เมื่อผลิตงาน i ที่เป็นงานลำดับสุดท้ายบนเครื่องจักร ในระหว่างการทำงานช่วงเวลา t ชั่วโมง ไม่เช่นนั้นมีค่าเป็น 0

3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันจุดประสงค์ แสดงการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดจากค่าแรงงานกับค่าไฟฟ้า ที่มีเป้าหมายให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด รายละเอียดแสดงดังสมการ (1)

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z = & L \sum_{k \in K} x_{0,k} + L_0 \sum_{i \in J} \sum_{t \in V} o_{i,t} \\ & + \sum_{\substack{i \in J \cup K \\ i \neq j}} \sum_{j \in J} (s_{ij} + P_j) x_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

พจน์แรกเป็นค่าแรงงานพนักงานคุมเครื่องจักรในช่วงเวลาผลิตปกติ 21 ชั่วโมง ซึ่งเป็นข้อกำหนดของโรงงาน กรณีศึกษาว่าหากเครื่องจักรใด ๆ ถูกเลือกใช้งานแล้ว ต้องจัดให้มีพนักงานสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องจักรนั้นตลอดการทำงาน 3 กะของวันที่ทำการผลิต พจน์ที่สองแสดงการคำนวณค่าแรงงานเมื่อมีการทำงานล่วงเวลา และพจน์ที่สามแสดงการคำนวณค่าไฟฟ้าซึ่งคำนวณเฉพาะเวลาที่เครื่องจักรทำการผลิตและเวลาตั้งเครื่องจักร

3.2.5 เงื่อนไขบังคับ

แบบจำลอง MILP นี้กำหนดให้ใช้งานเทียมคือ งานที่ 0 เป็นตัวแทนของจุดเริ่มต้นการจัดตารางการผลิต และงานที่ $n+1$ เป็นตัวแทนของจุดสิ้นสุดการทำงานของเครื่องจักรทุกเครื่อง เงื่อนไขบังคับของตัวแบบ MILP ที่เสนอประกอบด้วยกลุ่มเงื่อนไขบังคับ 5 ด้าน คือ การใช้งานของเครื่องจักรดังชุดสมการ (2)-(4) การมอบหมายงานดังชุดสมการ (5)-(6) การคำนวณเวลาการผลิตดังชุดสมการ (7)-(10) การทำงานล่วงเวลาดังสมการ (11) และตัวแปรตัดสินใจดังชุดสมการ (12)-(14) มีรายละเอียดดังนี้

$$\sum_{k \in K} x_{0,k} \leq m \quad (2)$$

$$x_{0,k} - \sum_{j \in J} x_{k,j} = 0, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in J} x_{i,n+1} \leq m \quad (4)$$

$$\sum_{i \in J \cup K} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in J; i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J \cup \{n+1\}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in J; i \neq j \quad (6)$$

$$c_{ij} \geq (S_{ij} + P_i) x_{ij}, \quad \forall i \in J \cup K; j \in J \cup \{n+1\}; i \neq j \quad (7)$$

$$c_{ij} \leq x_{ij} T, \quad \forall i \in J \cup K; j \in J \cup \{n+1\}; i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{p \in J \cup K} c_{pi} + \sum_{j \in J \cup \{n+1\}} (S_{ij} + P_j) x_{ij} = \sum_{j \in J \cup \{n+1\}} c_{ij}, \quad \forall i \in J \quad (9)$$

$$c_{0,k} + \sum_{j \in J} (S_{kj} + P_j) x_{kj} = \sum_{j \in J} c_{kj}, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$\frac{C_{i,n+1}}{Eff} - (1200 + 60t) x_{i,n+1} \leq 180 o_{i,t}, \quad \forall i \in J; t \in V \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in K; j \in J \cup \{n+1\}, \text{ and } \quad \forall i \in \{0\}; j \notin K \quad (12)$$

$$c_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in K; j \in J \cup \{n+1\}, \text{ and } \quad \forall i \in \{0\}; j \notin K \quad (13)$$

$$o_{i,t} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in J; t \in V \quad (14)$$

เงื่อนไขบังคับสมการ (2) เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจำนวนเครื่องจักรที่จะใช้ในการผลิตต้องไม่เกินจำนวนสูงสุดของเครื่องจักรที่มีอยู่ในรอบการจัดตารางการผลิต สมการ (3) ทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องจักรจะถูกกำหนดให้เป็นเครื่องจักรที่มีการใช้งานเมื่อมีงานมอบหมายให้ผลิตบนเครื่องจักรนั้น สมการ (4) ทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องจักรที่เป็นไปได้ในรอบการจัดตารางการผลิตที่ถูกเลือกใช้งานจะสิ้นสุดการทำงานเมื่อผลิตงานสุดท้ายเสร็จ สมการ (5) และ (6) ทำให้มั่นใจได้ว่างานที่ต้องผลิตทุกงานจะต้องมีงานที่ผลิตก่อนหน้าและตามหลังจำนวน 1 งาน ตามลำดับ ซึ่งรวมถึงงานเทียมของเครื่องจักรในสมการ (5) และงานเทียมที่แสดงจุดสิ้นสุดการทำงานในสมการ (6)

สมการ (7) กำหนดเวลาการผลิตเสร็จขั้นต่ำที่อย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของเวลาการตั้งเครื่องจักรที่ขึ้นอยู่กับงานก่อนหน้ากับเวลาการผลิตของงานนั้น สมการ (8) กำหนดเวลาผลิตของงานต้องไม่เกินเวลาสูงสุดที่เป็นไปได้ และชุดสมการ (7)-(8) ทำให้มั่นใจได้ว่าเมื่องาน j ใด ๆ ไม่ได้ผลิตต่อจากงาน i ค่าตัวแปรตัดสินใจ C_{ij} จะเท่ากับ 0 ค่าเวลาผลิตเสร็จของงาน j ถูกนำไปใช้งานในชุดสมการสมดุลการไหลของเวลาการผลิตต่อไป

สมการ (9) เป็นสมการสมดุลการไหลของเวลาการผลิต ณ เวลาผลิตเสร็จของงาน i ใด ๆ สมการนี้ใช้ในการกำหนดเวลาผลิตเสร็จของงานที่ผลิตต่อจากงาน i โดยที่การไหลเข้า (Inflow) ของเวลาเกิดจากผลรวมของเวลาผลิตเสร็จของงาน i กับเวลาที่ใช้ผลิตงานต่อไป และการไหลออก (Outflow) ของเวลาคือเวลาผลิตเสร็จของงานถัดไป โดยพจน์แรกเป็นเวลาผลิตเสร็จของงาน i ที่คำนวณจากผลรวมของเวลาผลิตเสร็จของ i ของทุกงานก่อนหน้าที่เป็นไปได้ ซึ่งมีงานก่อนหน้าจริงเพียงหนึ่งงานเท่านั้นที่กำหนดเวลาผลิตเสร็จของงาน i ส่วนงานก่อนหน้าที่เป็นไปได้อื่นจะให้ผลเวลาผลิตเสร็จของงาน i เป็นศูนย์ตามที่อธิบายในชุดสมการ (7)-(8) พจน์ที่สองของสมการแสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตงานต่อไป ส่วนพจน์ด้านขวามือของสมการแสดงเวลาผลิตเสร็จของงานที่ผลิตต่อจากงาน i ซึ่งมีเพียงหนึ่งงานเท่านั้น เวลาผลิตเสร็จของงานนี้จะถูกคำนวณเพื่อให้สมการมีความสมดุล

สมการ (10) เป็นสมการสมดุลการไหลของเวลาการผลิตเช่นเดียวกันกับสมการ (9) แต่ใช้สำหรับกำหนดสมดุลที่งานเทียมที่แสดงถึงการเริ่มทำงานของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง สมการนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าเวลาตั้งเครื่องจักรขณะเริ่มผลิตงานแรกจะถูกคำนวณรวมในการจัดตารางการผลิตด้วย ชุดสมการ (9)-(10) นอกจากใช้กำหนดเวลาการผลิตเสร็จของงานแล้วยังใช้ในการป้องกันการเกิดลำดับย่อยของกลุ่มงานที่เกิดขึ้นได้จากชุดสมการ (7)-(8) เช่น ลำดับย่อยกลุ่มงาน 1-8-5-1 เป็นต้น ชุดสมการ (9)-(10) จะทำให้ลำดับย่อยนี้ไม่เกิดขึ้นเพราะเวลาการผลิตเสร็จของงานในลำดับหลังบนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ จะต้องมีความมากขึ้น จากตัวอย่างลำดับงานย่อย 1-8-5-1 เวลาผลิตเสร็จของงาน 1 ที่อยู่ลำดับสุดท้ายไม่สามารถทำให้สมการ (9) เป็นจริงได้

สมการ (11) ทำให้มั่นใจได้ว่ามีการคำนวณค่าล่วงเวลาตามจำนวนชั่วโมงที่ใช้ผลิตหลังช่วงเวลาทำงานปกติ

โดยพิจารณาจากเวลาผลิตเสร็จของงานสุดท้ายบนเครื่องจักร สมการ (12)-(14) แสดงเงื่อนไขตัวแปรตัดสินใจ

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การหาผลลัพธ์ของแบบจำลอง MILP ที่เสนอในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม OpenSolver เวอร์ชัน 2.9.0 [18] และตัวประมวลผล Gurobi เวอร์ชัน 7.5.2 ที่ติดตั้งในโปรแกรมโมโครซอฟท์เอ็กเซล 2016 แบบ 64 บิต บนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ Intel® Core™ i7-3520M CPU @ 2.90 GHz เป็น Processor และ RAM 8.0 GB การนำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบด้วยปัญหามาตรฐาน

ปัญหามาตรฐานจำนวน 15 ปัญหา สร้างจากการจัดกลุ่มรุ่นยางรถยนต์ที่มีขนาดขอบยางเท่ากันและเวลาตั้งเครื่องมีความผันแปรตามลำดับการผลิต มีจำนวนงานระหว่าง 6 ถึง 16 งาน และจำนวนเครื่องจักรอยู่ระหว่าง 2 ถึง 8 เครื่อง ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลอง MILP สามารถหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดได้ (Optimal solution) จำนวน 13 ปัญหา สำหรับปัญหาที่ไม่พบผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดคือปัญหามาตรฐานงาน 14 งาน 7 เครื่องจักร และ 15 งาน 3 เครื่องจักร แบบจำลอง MILP สามารถสร้างตารางการผลิตที่เป็นไปได้ด้วยค่าใช้จ่ายรวมที่แตกต่างจากขอบเขตล่างโดยเฉลี่ย 0.96% เมื่อกำหนดเวลาประมวลผลสูงสุด 1500 วินาที

4.2 ปัญหาทดสอบของโรงงานกรณีศึกษา

ปัญหาการจัดตารางการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาจำนวน 30 วันถูกนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง MILP ปัญหาทดสอบนี้มีปริมาณคำสั่งผลิตอยู่ระหว่าง 71 ถึง 86 รุ่นต่อวัน สามารถเลือกใช้เครื่องจักรได้ 32 เครื่อง จากการวิเคราะห์ข้อมูลคำสั่งผลิตนี้พบว่าในแต่ละวันจะมีการสั่งผลิตงานที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยงานที่ต้องใช้เวลาทั้งวันในการผลิตบนเครื่องจักรหนึ่งจำนวน 3-6 งาน กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยงานที่มีขอบยางขนาดใหญ่ที่สามารถผลิตได้เฉพาะบนเครื่องจักร 3 เครื่องจำนวน 4-7 งาน และมี 1 วันที่สั่งผลิตงานกลุ่มนี้ 14 งาน และกลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยงานที่สามารถผลิตได้บนทุกเครื่องจักร และสามารถมอบหมายให้

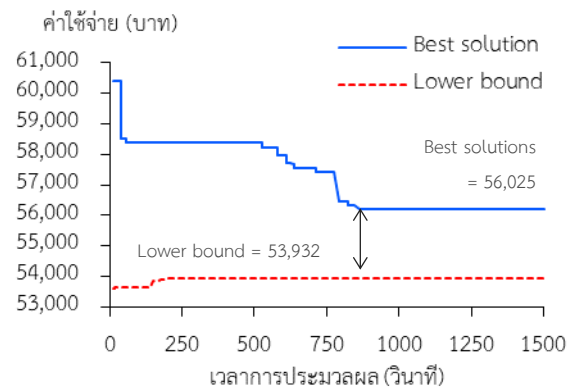
ผลิตร่วมกับงานอื่นบนเครื่องจักรเดียวกันได้ งานในกลุ่มนี้มีจำนวน 61-73 งาน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบปัญหาขนาดเล็ก

ขนาดปัญหา	จำนวนปัญหา	ผลการทดสอบ
6 งาน 2 เครื่องจักร	4	พบผลลัพธ์ที่เหมาะสมทุกปัญหา โดยใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่า 1 วินาที
12-13 งาน 3-8 เครื่องจักร	5	พบผลลัพธ์ที่เหมาะสมทุกปัญหา โดยใช้เวลาประมวลผลระหว่าง 2-10 วินาที
14-16 งาน 3-8 เครื่องจักร	6	พบผลลัพธ์ที่เหมาะสมจำนวน 4 ปัญหา โดยใช้เวลาประมวลผลระหว่าง 3-32 วินาที

4.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลแบบจำลอง

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการประมวลผลแบบจำลอง MILP ที่เสนอ เป็นการกำหนดเวลาสูงสุดที่ใช้ในการประมวลผล ค่าพารามิเตอร์นี้ถูกกำหนดจากการทดลองเปรียบเทียบเวลาการประมวลผลกับคุณภาพผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเทียบกับค่าขอบเขตล่างของผลลัพธ์ (Lower bound) ที่ได้จากรายงานผลการหาผลลัพธ์ของตัวประมวลผล Gurobi ผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการหาผลลัพธ์จากปัญหาการจัดตารางการผลิตสำหรับทดสอบที่มีจำนวนงานในกลุ่มที่ 3 สูงสุด 73 งาน การประมวลผลในช่วงต้น (0-100 วินาที) Gurobi สามารถหาผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง หลังการประมวลผล 850 วินาทีผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 56,205 บาท ซึ่งมีค่าสูงกว่า Lower bound เท่ากับ 2,273 บาท หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 4.0% หลังจากนั้นให้โปรแกรมประมวลผลไปจนครบ 3600 วินาที ไม่พบการปรับปรุงผลลัพธ์ งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ใช้เวลาประมวลผลสูงสุดเท่ากับ 1500 วินาที ที่คาดว่า การประมวลผลแบบจำลอง MILP จะสามารถสร้างตารางการผลิตที่มีคุณภาพผลลัพธ์ที่ดีแล้ว และยังเป็นเวลาที่ไม่สูงเกินไปสำหรับการจัดตารางการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา



รูปที่ 1 การปรับปรุงผลลัพธ์ระหว่างประมวลผลของปัญหาดูตัวอย่างขนาด 73 งาน 26 เครื่องจักร

4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

การสร้างตารางการผลิตของปัญหาสำหรับทดสอบด้วยแบบจำลอง MILP เริ่มจากการจัดตารางการผลิตของงานกลุ่มที่ 1 และ 2 หลังจากนั้นนำเครื่องจักรที่ยังไม่ถูกเลือกให้ผลิตมาทำการจัดตารางการผลิตงานในกลุ่มที่ 3 แล้วรวมผลลัพธ์ตารางการผลิตทั้งหมดให้เป็นตารางการผลิตรายวัน การแยกการจัดตารางการผลิตของงานกลุ่มที่ 1 ช่วยลดขนาดปัญหาการจัดตารางการผลิตงานกลุ่มที่ 3 ส่วนงานกลุ่มที่ 2 ที่ผลิตได้เฉพาะบนเครื่องจักร 3 เครื่องนั้น มีงานในกลุ่มนี้ผลิตต่อเนื่องทุกวัน การปรับตั้งเครื่องจักรให้สามารถผลิตงานกลุ่มอื่นได้ต้องใช้เวลามากกว่า 1 วัน การรวมงานกลุ่มที่ 2 กับ 3 จึงไม่สามารถปรับปรุงผลลัพธ์ของตารางการผลิตได้

การทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง MILP แยกเป็นสองส่วน ดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกับขอบเขตล่าง

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมของตารางการผลิตที่สร้างขึ้นกับขอบเขตล่างของปัญหาการจัดตารางการผลิตของงานในกลุ่มที่ 3 ที่ได้จาก Gurobi แสดงผลดังตารางที่ 4 ผลการทดสอบพบว่า แบบจำลอง MILP สามารถสร้างตารางการผลิตที่เป็นไปได้ทุกปัญหาที่มีจำนวนงาน 61-73 งาน และจำนวนเครื่องจักรที่เลือกใช้ผลิตได้ 25-27 เครื่อง แต่ไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดได้ ตารางการผลิตที่สร้างขึ้นมีค่าใช้จ่ายรวมแตกต่างจากค่าต่ำที่สุดที่เป็นไปได้โดย

เฉลี่ย 6.3% ซึ่งอธิบายได้ว่าปัญหาการจัดตารางการผลิตนี้ยังมีโอกาสที่จะจัดตารางการผลิตให้มีค่าใช้จ่ายรวมโดยเฉลี่ยต่ำลงได้ไม่เกิน 3,577 บาทต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบกับตารางการผลิตด้วยวิธี MILP ที่ประมวลผลภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้

4.4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพกับวิธีการเดิม

การเปรียบเทียบตารางการผลิตรายวันที่สร้างจากการรวมผลลัพธ์จากแบบจำลอง MILP ของทุกกลุ่มงาน กับตารางการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาในด้านต้นทุนการผลิต จำนวนเครื่องจักร เวลาตั้งเครื่องจักร และชั่วโมงการทำงานล่วงเวลา แสดงผลดังตารางที่ 5 ผลการทดสอบพบว่า การจัดตารางการผลิตด้วยแบบจำลอง MILP เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่สามารถลดต้นทุนการผลิตจากค่าแรงงานพนักงานควบคุมเครื่องจักรที่ถูกใช้งาน และค่าไฟฟ้าในการเดินเครื่องจักรระหว่างการตั้งเครื่องจักร และการผลิตได้เฉลี่ยวันละ 10,962 บาท หรือลดลงเท่ากับ 328,848 บาทต่อเดือน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 13.3

การลดลงของต้นทุนการผลิตนี้เกิดจากการกำหนดปริมาณงานและลำดับงานที่ผลิตบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องได้อย่างเหมาะสม ทำให้สามารถลดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตได้เฉลี่ย 3.3 เครื่องต่อวัน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 10.3 ผลรวมเวลาตั้งเครื่องจักรเฉลี่ยลดลง 34.9 นาทีต่อวัน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 2.3 และจำนวนเวลาการทำงานล่วงเวลาลดลงเฉลี่ย 6.3 ชั่วโมงต่อวัน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 61

แบบจำลอง MILP สามารถสร้างตารางการผลิตที่ทำให้เวลาการตั้งเครื่องจักรลดลงได้ อย่างไรก็ตามมีปัญหาทดสอบจำนวน 13 ปัญหาใช้เวลาตั้งเครื่องจักรสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากเป้าหมายในจัดตารางการผลิตที่ต้องการให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด โดยโครงสร้างการคำนวณต้นทุนที่สำคัญของโรงงานกรณีศึกษา คือ ค่าแรงงานของพนักงานควบคุมเครื่องจักรที่คิดค่าแรงเต็มเวลาการทำงาน 21 ชั่วโมงเมื่อเครื่องจักรถูกเลือกให้ผลิต การประมวลผลแบบจำลองจึงให้ความสำคัญกับการลดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้งานด้วยการจัดสรรงานให้เครื่องจักรทำการผลิตงานให้เต็มเวลาการทำงานให้มากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ต้องจัดสรรกลุ่มงานที่ผลิต

บนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ ที่ใช้เวลาตั้งเครื่องจักรสูงขึ้นตามการเปลี่ยนรุ่นการผลิต

ตารางที่ 4 ความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกับขอบเขตล่าง

ปัญหา	จำนวนงาน	จำนวนเครื่อง	BFS*	Lower bound	Diff**
1	70	26	59,962	56,334	6.1%
2	73	27	60,033	56,534	5.8%
3	71	26	57,855	54,508	5.8%
4	66	25	56,950	52,994	6.9%
5	66	25	55,887	52,837	5.5%
6	66	25	55,868	53,045	5.1%
7	67	25	57,945	54,629	5.7%
8	66	26	60,435	55,972	7.4%
9	63	26	53,364	50,629	5.1%
10	61	26	54,871	50,927	7.2%
11	61	26	53,591	51,067	4.7%
12	63	26	56,093	52,451	6.5%
13	64	26	57,163	53,683	6.1%
14	63	25	55,176	51,355	6.9%
15	63	25	56,861	53,021	6.8%
16	61	25	54,660	50,655	7.3%
17	62	26	58,465	55,038	5.9%
18	62	26	56,327	53,257	5.5%
19	62	26	59,269	54,634	7.8%
20	63	26	60,045	54,481	9.3%
21	62	26	57,466	52,687	8.3%
22	62	26	55,703	52,203	6.3%
23	65	27	59,143	56,075	5.2%
24	67	27	57,574	54,634	5.1%
25	70	27	57,113	53,824	5.8%
26	72	27	57,297	53,983	5.8%
27	71	27	59,458	55,708	6.3%
28	73	26	56,205	53,932	4.0%
29	72	26	56,964	53,586	5.9%
30	68	27	57,899	53,634	7.4%
เฉลี่ย			57,188	53,611	6.3%

หมายเหตุ *BFS คือ ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุด

** คำนวณจาก $100\% \times (BFS - \text{Lower bound}) / BFS$

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับวิธีการเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

ปัญหา	จำนวน งาน	ต้นทุนการผลิต (บาท)			จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ (เครื่อง)			เวลาดังเครื่องจักร (นาที)			การทำงานล่วงเวลา (ชั่วโมง)		
		วิธีเดิม	MILP	ลดลง*	วิธี เดิม	MILP	ลดลง*	วิธีเดิม	MILP	ลดลง*	วิธี เดิม	MILP	ลดลง*
1	80	82,549	74,510	8,039	32	29	3	1,545	1,503	42	6	2	4
2	82	83,795	72,358	11,437	32	29	3	1,693	1,574	119	17	2	15
3	81	83,454	72,662	10,792	32	29	3	1,572	1,538	34	13	4	9
4	77	85,422	74,406	11,016	32	30	2	2,579	1,530	1,049	22	2	20
5	77	83,276	73,100	10,176	32	28	4	1,672	1,559	113	10	2	8
6	86	83,251	73,051	10,200	32	29	3	1,623	1,468	155	10	6	4
7	77	83,340	72,732	10,608	32	30	2	1,491	1,640	-149	11	4	7
8	76	83,660	75,162	8,498	32	30	2	1,448	1,897	-449	13	5	8
9	73	81,391	68,158	13,233	32	27	5	1,503	1,395	108	5	6	-1
10	71	80,728	69,665	11,063	32	28	4	1,251	1,298	-47	3	4	-1
11	71	81,620	68,382	13,238	32	26	6	1,333	1,651	-318	7	20	-13
12	73	82,095	70,884	11,211	32	28	4	1,335	1,704	-369	8	8	0
13	74	82,682	71,954	10,728	32	29	3	1,268	1,370	-102	12	2	10
14	74	83,746	72,411	11,335	32	29	3	1,525	1,474	51	17	4	13
15	73	84,279	74,091	10,188	32	30	2	1,505	1,370	135	18	0	18
16	71	83,208	71,881	11,327	32	30	2	1,462	1,003	459	12	1	11
17	71	83,569	73,228	10,341	32	29	3	1,411	1,894	-483	14	6	8
18	71	82,249	71,090	11,159	32	27	5	1,310	1,329	-19	7	9	-2
19	71	83,304	73,898	9,406	32	30	2	1,815	1,221	594	11	1	10
20	72	82,483	74,673	7,810	32	30	2	1,411	1,251	160	7	7	0
21	71	82,031	72,094	9,937	32	29	3	1,473	1,533	-60	7	4	3
22	71	82,016	70,332	11,684	32	28	4	1,361	1,390	-29	8	6	2
23	73	81,909	71,328	10,581	32	29	3	1,439	1,315	124	7	0	7
24	74	82,041	69,759	12,282	32	28	4	1,448	1,369	79	8	2	6
25	78	81,422	69,298	12,124	32	28	4	1,467	1,470	-3	7	1	6
26	80	81,571	69,481	12,090	32	28	4	1,505	1,524	-19	6	1	5
27	78	81,934	69,461	12,473	32	28	4	1,516	1,507	9	6	0	6
28	81	82,834	70,705	12,129	32	28	4	1,518	1,473	45	12	7	5
29	80	82,894	71,407	11,487	32	29	3	1,493	1,411	82	14	0	14
30	75	82,111	69,856	12,255	32	29	3	1,337	1,602	-265	12	5	7
เฉลี่ยต่อวัน		82,695	71,734	10,962	32	28.7	3.3	1,510.3	1,475.4	34.9	10.3	4.0	6.3
ร้อยละการลดลง		13.3			10.3			2.3			61.0		

หมายเหตุ * ลดลง = วิธีเดิม – MILP

ตารางการผลิตที่สร้างจากแบบจำลอง MILP สามารถลดการทำงานล่วงเวลาได้ แต่ยังคงต้องใช้เวลาทำงานล่วงเวลาเฉลี่ย 4 ชั่วโมงต่อวันขณะที่มีเครื่องจักรว่างงาน

เฉลี่ย 3.3 เครื่องต่อวัน ซึ่งเกิดจากเหตุผลเดียวกันกับการใช้เวลาตั้งเครื่องจักรสูงขึ้นของบางปัญหาทดสอบ คือ แบบจำลอง MILP ให้ความสำคัญกับการลดจำนวน

เครื่องจักรที่ใช้งานที่เป็นสัดส่วนหลักในโครงสร้างต้นทุนการผลิตของปัญหากรณีศึกษา เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในปัญหาที่ 9-11 และ 18 ตารางการผลิตที่สร้างจากแบบจำลอง MILP มีจำนวนชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาสูงกว่าวิธีการเดิม แต่จำนวนเครื่องจักรที่ใช้งานลดลงอย่างน้อย 4 เครื่อง โดยที่ปัญหาที่ 11 ให้ผลลัพธ์การใช้งานเครื่องจักรลดลงได้สูงสุด 6 เครื่อง และมีจำนวนชั่วโมงการทำงานล่วงเวลาเพิ่มขึ้นสูงสุด 13 ชั่วโมง ขณะที่สามารถลดต้นทุนการผลิตได้สูงสุด 13,238 บาทต่อวัน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบวิธีการสร้างตารางการผลิตรายวันของกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ในโรงงานแห่งหนึ่งที่มีระบบการผลิตเป็นเครื่องจักรแบบขนาน และเงื่อนไขการผลิตที่เวลาตั้งเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นงานขึ้นอยู่ กับลำดับงานที่ผลิตก่อนหน้า การจัดการตารางการผลิตรายวัน ต้องผลิตงานให้ครบตามปริมาณคำสั่งผลิตในแผนการผลิตหลัก โดยใช้เวลาผลิตในช่วงการทำงานล่วงเวลาได้ 3 ระดับ คือ 1 2 หรือ 3 ชั่วโมง แบบจำลอง MILP ถูกสร้างมาใช้สำหรับจัดการตารางการผลิตนี้โดยมีเป้าหมายในการลดต้นทุนการผลิตที่เกิดจากค่าแรงงานพนักงานควบคุมเครื่องจักรที่มี อัตราค่าแรงในช่วงเวลาทำงานปกติและล่วงเวลาที่แตกต่างกัน และค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องจักร

แบบจำลอง MILP ที่เสนอถูกพัฒนาจากแบบจำลองสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถรับส่งนักเรียน โดยใช้ตัวแปรตัดสินใจหลักเป็นลำดับการผลิตสองงานต่อเนื่องกัน และใช้สมการสมมูลการไหลของเวลาการผลิตของงานลำดับที่ 2 จากลำดับงานสามงานต่อเนื่องกันเป็นสมการข้อจำกัดสำหรับกำจัดเส้นทางย่อย ผลการทดสอบสรุปได้ว่าแบบจำลอง MILP สามารถสร้างตารางการผลิตที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุดได้อย่างรวดเร็วสำหรับขนาดปัญหาไม่เกิน 16 งาน ส่วนขนาดปัญหา 80 งาน และ 32 เครื่องจักรของกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์นี้ แบบจำลอง MILP สามารถสร้างตารางการผลิตที่ลดต้นทุนการผลิตลงได้ 328,848 บาทต่อเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเดิม และมีจำนวนการใช้งานของเครื่องจักรลดลงทุกปัญหาที่ทดสอบ ดังนั้นภายใต้ปริมาณคำสั่งผลิตตามแผนการผลิตหลักของโรงงาน

กรณีศึกษา ตารางการผลิตสร้างด้วยแบบจำลอง MILP จะมีเครื่องจักรว่างงาน ซึ่งช่วยให้โรงงานกรณีศึกษาสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ และวางแผนการซ่อมบำรุงได้ง่ายขึ้น

แบบจำลอง MILP ที่เสนอสามารถนำไปเป็นแนวทางในสร้างแบบจำลองสำหรับจัดการตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาการตั้งเครื่องจักรที่มีวัตถุประสงค์อื่น เช่น เวลาปิดงานต่ำที่สุด เป็นต้น โดยใช้สมการข้อจำกัด (2-10) สำหรับจัดลำดับงานบนเครื่องจักรและคำนวณเวลาการผลิตเสร็จของงาน แล้วเพิ่มฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการข้อจำกัดอื่นตามวัตถุประสงค์การจัดการตารางการผลิตที่ต้องการศึกษา

แบบจำลอง MILP ที่เสนอสามารถหาผลลัพธ์ที่มีความแตกต่างโดยเฉลี่ยจากขอบเขตล่างเท่ากับ 6.3% ซึ่งไม่สามารถยืนยันได้ว่าเป็นผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นวิธีการเมตาฮิวริสติกที่สามารถหาผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีในแก้ปัญหา SBSP หรือปัญหาการจัดการตารางการผลิตที่มีโครงสร้างปัญหาและวัตถุประสงค์คล้ายกัน ควรถูกนำมาประยุกต์สำหรับแก้ปัญหานี้เพื่อเป็นทางเลือกในการจัดการตารางการผลิตที่อาจปรับปรุงคุณภาพผลลัพธ์ให้เข้าใกล้กับขอบเขตล่างมากขึ้น หรืออาจหาผลลัพธ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันโดยใช้เวลาประมวลผลเร็วขึ้นซึ่งทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการตารางการผลิตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลนำเข้าได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาหมายเลข 55/2552

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ทิตยา วาปีเน และ กัญชลลา สุดตาชาติ, “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกฎการจัดลำดับงานสำหรับงานสั่งผลิตเมื่อมีเงื่อนไขเวลาการขนส่ง,” *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, น. 11-21, 2560.
- [2] ประพัฒน์ รัตนยานนท์, “การจัดการตารางการผลิตโรงพ่นสีรถจักรยานยนต์,” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2551.

- [3] กัญชลลา สุดตาชาติ, “อิวริสติกสำหรับการผลิตเครื่องจักรขนาน กรณีมีเวลาติดตั้งเครื่องจักรและมีข้อจำกัดของเครื่องจักร,” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, น. 77-88, 2552.
- [4] Wanlapa Kowmanee, “Job-Shop scheduling by using heuristic method for FIFO management system development,” Master of Engineering, Manufacturing Engineering, University of Malaya, 2014.
- [5] ทวีพร ขำดี, “การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนานแบบหลายจุดประสงค์,” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยบูรพา*, 2554.
- [6] พรไพบุลย์ ปุષปาคม, “การจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตขวดพลาสติกแบบที่มีการพิมพ์สี,” *วารสารบริหารธุรกิจเทคโนโลยีมหานคร*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, น. 27-42, 2557.
- [7] วิจิตรา กิจชัยนุกูล และ วิชัย รุ่งเรืองอนันต์, “อัลกอริธึมเชิงพันธุกรรมสำหรับแบบจำลองการจัดตารางการผลิตแบบตามสั่งในโรงงานตู้ปาเป้าอิเล็กทรอนิกส์,” *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, น. 25-40, 2556.
- [8] V. Giard, A. Azzamouri and I. Essaadi, “A DSS Approach for Heterogeneous Parallel Machines Scheduling with Due Windows, Processor-& Sequence Dependent Setup and Availability Constraints,” in *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, France, 2016.
- [9] ณัฐวุฒิ เหลียวอินทร์, “การจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนานที่แตกต่างกันของแผนกบรรจุ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตยาแห่งหนึ่ง,” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร*, 2560.
- [10] ขาตินันท์ แสงสว่าง และ กาญจนา เศรษฐนันท์, “การจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกันภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของประเทศไทย,” *วารสารวิจัย มช. (บค.)*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, น. 14-21, 2553.
- [11] M. L. Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, 5th ed., New York: Springer, 2016.
- [12] A. Allahverdi, “The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs,” *European Journal of Operational Research*, vol. 246, pp. 354-378, 2015.
- [13] B. Fan and G. Tang, “A column generation for a parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times,” *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, vol. 34, no. 5, pp. 680-683, 2006.
- [14] R. Ruiz, L. Fanjul-Peyró and F. Perea, “Exact Methods for Large Unrelated Parallel Machine Scheduling Problems with Sequence Dependent Setup Times,” in *the 16th International Conference on Project Management and Scheduling*, Italy, 2018.
- [15] G. A. Süer and K. Mathu, “Mathematical models to simultaneously determine overtime requirements and schedule cells,” *Engineering*, vol. 7, pp. 58-72, 2015.
- [16] T. Bektas and S. Elmastaş, “Solving school bus routing problems through integer programming,” *Journal of Operational Research Society*, vol. 58, pp. 1599-1604, 2007.
- [17] E. Demir and I. Kara, “Formulations for School Bus Routing Problems,” in *The 21st Conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization*, Croatia, 2008.
- [18] A. J. Mason, “OpenSolver-An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel,” in *International Conference on Operations Research*, Switzerland, 2011.