

การจัดลำดับและตารางการผลิตสำหรับชิ้นส่วนคอยล์ของเครื่องปรับอากาศ Production Sequencing and Scheduling for Coil Assembly of Air Conditioner

รัตน์กมล ศิริทรัพย์ บรรพณู ลิลา* และ ฤฎวัลย์ จันทรส

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ. ชลบุรี 20131

E-mail: blila@eng.buu.ac.th*

Ratgamol Sirisapya Banhan Lila* and Ruephuwan Chantrasa

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Muang, Chonburi, 20130,

E-mail: blila@eng.buu.ac.th*

Received 30 Apr 2024; Revised 18 Sep 2024

Accepted 27 Dec 2024; Available online 30 Dec 2024

บทคัดย่อ

การจัดลำดับและตารางการผลิตของงานเป็นการวางแผนขั้นสุดท้ายก่อนการผลิตจริงให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาวิธีการจัดลำดับและการจัดตารางการผลิตชิ้นส่วนคอยล์สำหรับเครื่องปรับอากาศแต่ละชุดคำสั่งของโรงงานกรณีศึกษา มีโครงสร้างปัญหาเป็นแบบไหลเลื่อนผสม 2 ขั้นตอน แต่ละชุดคำสั่งประกอบด้วย N งาน ที่ต้องผ่านสถานี 1 ที่มีเครื่องจักรแบบขนาน 3 เครื่อง ก่อนส่งไปยังสถานี 2 ที่มีเครื่องจักร 1 เครื่อง ภายใต้เงื่อนไขเวลาการตั้งเครื่องจักรของทั้ง 2 สถานีขึ้นกับงานก่อนหน้า มีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการทำงานล่วงเวลาเนื่องจากต้องเร่งผลิตชิ้นส่วนให้ทันกำหนดส่ง ด้วยวิธีการจัดลำดับงานในชุดคำสั่งด้วยหลักการของปัญหาการเดินทางของพนักงานขายรวมกับการมอบหมายงาน เรียกว่า TSP-AH ซึ่งเมื่อประยุกต์กับปัญหาจำนวน 10 ชุดคำสั่ง เปรียบเทียบกับวิธี MinSetup ซึ่งเป็นวิธีเดิมที่โรงงานกรณีศึกษาใช้อยู่ พบว่าโดยเฉลี่ยต่อชุดคำสั่งมีเวลาปิดงานลดลงจาก 143 ชั่วโมง เหลือ 131.7 ชั่วโมง จำนวนงานที่เสร็จไม่ทันกำหนดลดลงจาก 9.5 งาน เป็น 7 งาน ส่งผลให้ต้นทุนการทำงานล่วงเวลาลดลงจาก 32,031.3 บาท เป็น 12,846.8 บาท คิดเป็นต้นทุนที่ลดลงได้ร้อยละ 59.9 ของต้นทุนเดิม จึงเห็นได้ว่าวิธี TSP-AH ที่ออกแบบขึ้นช่วยให้สามารถจัดลำดับงานและตารางการผลิตของปัญหาไหลเลื่อนผสมที่มีโครงสร้างสอดคล้องกับกรณีศึกษานี้เสร็จตามกำหนดส่งได้มากขึ้น และลดต้นทุนการทำงานล่วงเวลาได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำหลัก: การจัดลำดับงาน การจัดตารางการผลิต ปัญหาไหลเลื่อนผสม

Abstract

This research presents a study on job sequencing and production scheduling for coil components of the air conditioner production process. The problem structure is characterized as a hybrid flow shop with two stages. Each set of orders consists of N jobs that must go through station 1 with 3 parallel machines before proceeding to a single machine at station 2 under a condition of sequence-dependent setup times. The objective is to reduce overtime costs that are needed to avoid job tardiness. The TSP-AH heuristic is proposed utilizing the concept of the Traveling Salesman Problem (TSP) to sequence all jobs before assigning them to machines at stations 1 and 2 to minimize overtime. The TSP-AH was applied to 10 job sets and compared with the existing MinSetup method. The result indicated that the TPS-AH led to an average, of each order set, reduction of makespan from 143 to 131.7 hours. The number of job tardiness decreased from 9.5 to 7 jobs. Subsequently, overtime costs decreased significantly from 32,031.3 to 12,846.8 baht, or a 59.9% reduction of the existing method. The findings demonstrate that the TSP-AH effectively improves job sequencing and production scheduling for the 2-stages hybrid flow shop problems, leading to better on-time deliveries and substantial cost savings.

Keywords: Sequencing, Scheduling, Hybrid flow shop

1. ที่มาของปัญหา

การจัดลำดับงานเป็นการวางแผนที่ส่งผลต่อความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการของกระบวนการถัดไปหรือลูกค้าภายนอก [1,2] ความซับซ้อนของปัญหานี้ขึ้นอยู่กับจำนวนงานที่เข้ามาพร้อมกันในช่วงเวลาที่วางแผน จำนวนขั้นตอนหรือสถานีที่งานต้องผ่าน ความสามารถและจำนวนทรัพยากรซึ่งอาจหมายถึงพนักงาน เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ของแต่ละสถานี (Station) รวมถึงปัจจัยด้านกำหนดเวลาส่งงาน เวลาที่ต้องใช้ในการดำเนินการ ความพร้อมของทรัพยากรการผลิต เวลาในการปรับตั้งเมื่อมีการเปลี่ยนงาน [1,3] ในทางปฏิบัติลำดับงานมักจะถูกจัดโดยฝ่ายวางแผน หัวหน้างานหรือผู้รับผิดชอบหน่วยผลิต [1,2,4 และ 5] ตารางการผลิตเป็นการวางแผนกำหนดการเริ่มและเสร็จของแต่ละงานเมื่อมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรของแต่ละขั้นตอนตามเงื่อนไขการผลิตโดยอ้างอิงลำดับงานที่ได้จัดไว้

ผลลัพธ์ของการจัดลำดับและตารางการผลิตอาจประเมินด้วยดัชนีใดดัชนีหนึ่งหรือหลายดัชนีพร้อมกัน เช่นระยะเวลาปิดงาน (Makespan) ระยะเวลาที่งานอยู่ในระบบเฉลี่ย (Mean Flow Time) จำนวนงานส่งช้ากว่ากำหนด (Jobs Tardiness) เวลางานส่งช้ากว่ากำหนดรวม (Total Tardiness Time) เป็นต้น วิธีการจัดลำดับ

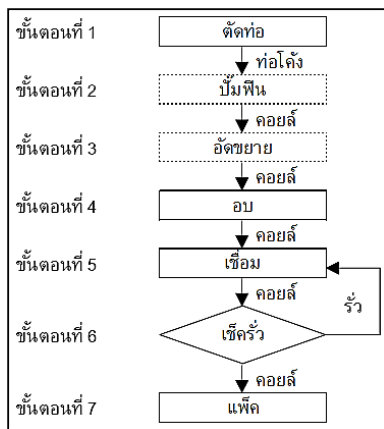
งานและการมอบหมายงานที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด หรืออย่างน้อยเป็นผลลัพธ์ที่ดีในระดับที่ยอมรับได้ ผู้วางแผนต้องเลือกหรือสร้างวิธีที่เหมาะสมกับโครงสร้างปัญหานั้นๆ กรณีการจัดลำดับงานของปัญหาประเภทไหลเลื่อน (Flow Shop) ที่ไม่ซับซ้อน (ปัญหา n Jobs/1 สถานี หรือ n Jobs/ 2 สถานี) การใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์หรืออิวิริสติกส์พื้นฐานสามารถใช้ได้ดี [2] แต่ในกรณีที่ปัญหามีโครงสร้างซับซ้อนอาจจำเป็นต้องใช้อิวิริสติกส์แบบ Constructive [6] และการจำลองปัญหาด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์ หรือการจำลองสถานการณ์ รวมถึง Metaheuristic [7,8] เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีเพียงพอ

ปัญหาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นกรณีที่งานจำนวน N งานจะต้องผ่าน 2 สถานีที่เป็นคอขวดของกระบวนการผลิต (แทนด้วยสถานี 1 และ 2) โครงสร้างปัญหาจึงเป็นแบบไหลเลื่อนผสมเช่นเดียวกับปัญหาของ Gupta และ คณะฯ [9] และเป็นตัวแทนปัญหาการจัดลำดับและตารางการผลิตของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนคอยล์สำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศ ซึ่งจะต้องทำงานล่วงหน้าเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเหตุการณ์ที่งานใด ๆ จะส่งไม่ทันกำหนด การวางแผนให้มีต้นทุนการทำงานล่วงเวลาของแต่ละชุดคำสั่งต่ำที่สุดจึงเป็น

เป้าหมายของการจัดลำดับและตารางการผลิต
คุณลักษณะของปัญหาจะอธิบายในหัวข้อที่ 2 ต่อไป

2. โครงสร้างปัญหาการจัดลำดับงาน

โครงสร้างของปัญหาซึ่งเป็นตัวแทนของ
กระบวนการผลิตชิ้นส่วนคล้ายสำหรับผลิตภัณฑ์
เครื่องปรับอากาศของสถานประกอบการกรณีศึกษาซึ่ง
ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนดังรูปที่ 1



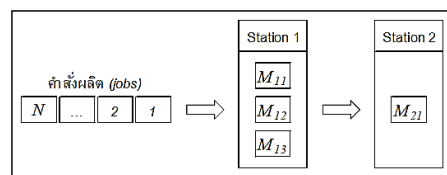
รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนคอยล์

ขั้นตอนการผลิตในรูปที่ 1 เริ่มจากการตัดท่อ
ทองแดงและตัดเป็นรูปตัวยู นำไปประกอบกับใบพินที่
บีมจากอลูมิเนียมในขั้นตอนที่ 2 ส่งไปอัดขยายใน
ขั้นตอนที่ 3 ก่อนนำไปอบไล่ไอน้ำใน เชื่อมวงจรถัดกับ
คอยล์ ตรวจสอบการรั่วและบรรจุเพื่อจัดส่งในขั้นตอนที่
4 ถึง 7 ตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่าคำสั่งผลิตจะมาถึงระบบเป็น
ชุด จากตัวอย่างคำสั่งผลิตจำนวน 10 ชุดพบว่าแต่ละชุด
จะประกอบด้วย 23-37 งาน แต่ละงานมีกำหนดส่ง (Due
Date) และเวลาในการผลิตแต่ละขั้นตอนที่กำหนดไว้
แล้ว การมอบหมายงานให้เครื่องจักรทำโดยหัวหน้างาน
ซึ่งจะมอบหมายงานโดยหลีกเลี่ยงการเสียเวลาปรับตั้ง
เครื่องจักรของขั้นตอนที่ 2 (ในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าวิธี
MinSetup) จากผลของการดำเนินการจริงของทั้ง 10
ชุดคำสั่งนี้พบว่ามีงานเสร็จไม่ทันกำหนดเฉลี่ยจำนวน
9.5 งานต่อชุด จึงทำให้ต้องเพิ่มเวลาทำงานเฉลี่ย 111.9
ชั่วโมงต่อชุด คิดเป็นต้นทุนการทำงานล่วงเฉลี่ย

32,031.3 บาทต่อชุด

จากการศึกษาพบว่าขั้นตอนที่ 2 และ 3 เป็นคอ
ขวดของกระบวนการทั้งหมด ถ้าสามารถจัดลำดับให้
งานที่ขั้นตอนทั้ง 2 นี้ไหลได้อย่างราบรื่นจะส่งผลดีต่อ
กระบวนการผลิตทั้งหมด งานวิจัยนี้จึงกำหนดกรอบของ
ปัญหาการจัดลำดับและตารางการผลิตให้กับขั้นตอนที่ 2
และ 3 เท่านั้น โดยจะแทนด้วยสถานี 1 และสถานี 2
ตามลำดับ และนำเสนอเป็นโครงสร้างของปัญหาแบบ
ผสมโดยสถานี 1 เป็นเครื่องจักรแบบขนานและสถานี 2
เป็น N Jobs/1 Machine ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างปัญหา

เมื่อ N แทนจำนวนงานในคำสั่งผลิตแต่ละชุด M_{11} , M_{12}
และ M_{13} แทน เครื่องจักรเครื่องที่ 1, 2 และ 3 ของสถานี
1 ตามลำดับ M_{21} แทนเครื่องจักรของสถานี 2 เวลาใน
การปรับตั้งเครื่องของทั้ง 2 ขั้นตอนขึ้นอยู่กับงานก่อน
หน้า (Sequence Dependence Setup Time)

3. การจัดลำดับงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวางแผนเพื่อจัดตารางการผลิตของ N งานที่
ต้องไหลผ่านกระบวนการผลิตที่มี 2 สถานีตามลำดับจะ
ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ 1) การลำดับว่าแต่ละงานจะ
ถูกดำเนินการที่แต่ละสถานีก่อน-หลัง อย่างไร (Job
Sequencing) และ 2) การมอบหมายงานให้กับ
เครื่องจักรและกำหนดการเริ่มและแล้วเสร็จของแต่ละ
งานที่แต่ละสถานี (Job Scheduling) หรือตารางการ
ผลิต [1,2] เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

Gozali และ คณะฯ [7] แบ่งปัญหาการจัดลำดับ
งานแบบไหลต่อเนื่องออกเป็น 4 กลุ่มตามเส้นทางการไหล
ของงาน ประกอบด้วย แบบไหลต่อเนื่องแท้ (Pure Flow
Shop, PFS) แต่ละงานผ่านสถานีที่มีเครื่องจักรเครื่อง
เดียวเริ่มจากสถานีแรกถึงสถานีสุดท้าย, แบบไหลต่อเนื่อง
ทั่วไป (General Flow Shop, GFS) แต่ละงานไม่
จำเป็นต้องผ่านทุกสถานีแต่ถ้าผ่านจะผ่านครั้งเดียวและ

ไม่จำเป็นต้องมีเส้นทางเหมือนกัน แต่ละสถานีมีเครื่องจักร 1 เครื่อง, แบบไหลเลื่อนผ่านซ้ำ (Reentrant Flow Shop, RFS) มีโครงสร้างเหมือนกับ GFS แต่งานสามารถผ่านแต่ละสถานีได้มากกว่า 1 ครั้ง และแบบไหลเลื่อนผสม (Hybrid Flow Shop, HFS) ซึ่งจะมีทั้งสถานีที่มีเครื่องจักร 1 เครื่อง และมากกว่า 1 เครื่องทำงานขนานกันทั้งแบบประสิทธิภาพเท่ากันและไม่เท่ากัน

Wojakowski และ Warzolek [10] แบ่งประเภทของปัญหาโดยใช้ 3 เกณฑ์ร่วมกันได้แก่เกณฑ์เวลาการดำเนินการที่เกี่ยวข้องของแต่ละงานคงที่ (Deterministic Time) และไม่คงที่ (Uncertain Time) ร่วมกับเกณฑ์ด้านโครงสร้างเครื่องจักรของแต่ละสถานีแบบเครื่องเดียว (Single Machine) และ เครื่องจักรขนาน (Parallel Machines) ประกอบกับเกณฑ์ลักษณะการไหลของงานแบบไหลเลื่อนเส้นทางเหมือนกันทุกงาน (PFS) หรือแบบ Job Shop [10] ซึ่งอาจเทียบได้กับแบบ GFS, RFS และ HFS ซึ่งทำให้สามารถแบ่งได้หลายกลุ่มมากยิ่งขึ้น

การแบ่งประเภทของปัญหาที่พบได้ทั่วไปจะใช้เกณฑ์จำนวนงานและสถานี [2,3] แยกปัญหาอย่างง่ายได้เป็น 2 ประเภทคือ N Jobs/1 Station และ N Jobs/M Stations เมื่อ N แทนจำนวนงาน และ M แทนจำนวนสถานีงาน จำนวนเครื่องจักรของแต่ละสถานีแบ่งเป็น Single Machine และ Parallel Machines กรณี M Stations สามารถแยกเพิ่มเติมตามลักษณะการไหลเลื่อนเป็นแบบ PFS, HFS และ Job Shop (GFS, RFS) สุดท้ายปัญหาทุกประเภทจะแบ่งออกเป็นกรณีตามลักษณะเวลาดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับแบบคงที่ หรือ แบบไม่คงที่

กฎหรืออิวิริสติกส์พื้นฐานที่มักถูกประยุกต์เพื่อการจัดลำดับงานให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีสำหรับปัญหาไหลเลื่อนแบบ 1 Station ได้แก่ First Come First Serve (FCFS), Shortest Processing Time (SPT), Earliest Due Dates (EDD) และ Hodgson's Algorithm เป็นต้น

กรณีปัญหาไหลเลื่อนผ่าน 2 สถานี Russell และ Taylor [3] ระบุว่า Johnson's Rule ให้ผลลัพธ์ด้านเวลาปิดงานที่ดี และยังสามารปรับใช้ในรูปแบบอิวิริสติกส์ NEH [6] และ CDS [7] สำหรับกรณีมากกว่า 2 สถานี

ได้ด้วย

การสำรวจวรรณกรรมของ Xu และคณะฯ [11] ระบุว่าปัญหาการจัดลำดับงานสามารถสร้างในรูปของตัวแบบ (Model) ได้ 3 ประเภทได้แก่ โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming), กราฟและโครงข่าย (Graph and Network) และการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ประเมินผลลัพธ์ของตัวแบบแต่ละประเภทด้วย Exact Method เมื่อปัญหามีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนไม่มากนัก ใช้ Approximate Method เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น

การสำรวจงานวิจัยพบการประยุกต์หลักการจัดลำดับงานเพื่อแก้ปัญหาการจัดลำดับและตารางการผลิตทั้งในงานการผลิตสายพานรถยนต์ [4] กระบวนการบรรจุชิ้นส่วนรถมอเตอร์ไซด์ [5] อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กแผ่น [12] กระบวนการผลิตแบบทันเวลาพอดี [13] กระบวนการผลิตแบบ Flow Shop และ Job Shop ทั่วไป [14,15] จีราดา อนุชิตนันทน์ และ บรรพหลู ลีลา [4] แก้ปัญหาแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นภายใต้ข้อจำกัดของเครื่องที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายงานและความผันแปรของเวลาการทำงานของแต่ละสถานีโดยนำเสนออิวิริสติกส์ SPT-Mo และ NEH-Mo ซึ่งประยุกต์กฎ SPT ร่วมกับความพร้อมของเครื่องซึ่งจัดเป็นทรัพยากรรอง ประเมินผลด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม ARENA [4] เช่นเดียวกับ Nuntapon และ คณะฯ [14] ซึ่งใช้โปรแกรม ARENA สร้างและประเมินสมรรถนะการจัดลำดับงานของปัญหา Flow Shop และ Job Shop ซึ่งได้รายงานว่าสามารถได้ผลลัพธ์ของการจัดลำดับงานแต่ละชุดคำสั่งอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ติดนักเนื่องจากไม่ได้บูรณาการอิวิริสติกส์ที่เหมาะสมในการจำลองสถานการณ์ อัจฉญาพรณ์ เศวตสุจริตกุล [5] นำเสนอการแก้ปัญหาการส่งงานล่าช้าของกระบวนการไหลเลื่อนในการประกอบและบรรจุชิ้นส่วนรถมอเตอร์ไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญด้วยการประยุกต์กฎการจ่ายงานอย่างง่ายแบบ SPT และ EDD สัญจิตา ทองเกิด และ ชุติศักดิ์ พรสิงห์ [12] แก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตให้กับระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม 3 สถานีเพื่อเวลาปิดงาน และเวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ยต่ำที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม อดจ ชัยมณี และ วิสุทธิ สุพิทักษ์ [13] ประยุกต์กฎ Slack Time น้อยที่สุด

มาทำก่อน กับการจัดตารางการผลิตของปัญหาไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเวลาปรับตั้งเครื่องจักรที่ขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้าเพื่อลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของกระบวนการผลิต

จากตัวอย่างงานวิจัยจะเห็นได้ว่า ทางเลือกในการจัดลำดับงานและการมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรของปัญหาไหลเลื่อน และวิธีการประเมินผลลัพธ์ จะส่งผลต่อเป้าหมายการดำเนินการแตกต่างกัน ดังนั้นการประเมินทางเลือกของการจัดลำดับและตารางการผลิตจึงเป็นความท้าทายหลัก และงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจัดลำดับงานที่ได้สำรวจมาเป็นแนวทางในการออกแบบฮิวริสติกส์เพื่อให้มีต้นทุนการทำงานล่วงเวลาของปัญหากรณีศึกษาต่ำกว่าวิธีเดิม มีรายละเอียดดังอธิบายในหัวข้อที่ 4 และ 5 ต่อไป

4. วิธีการจัดลำดับงานและตารางการผลิต

ฮิวริสติกส์สำหรับการจัดลำดับงานและตารางการผลิตของปัญหาแบบไหลเลื่อน 2 ขั้นตอนแบบผสม (Two-stage Hybrid Flow Shop) ประกอบด้วยด้วย 3 ขั้นตอนได้แก่

- 1) การจัดลำดับงาน (Job Sequencing)
- 2) การจัดตารางการผลิต (Job Scheduling)
- 3) เลือกลำดับและตารางการผลิต

ขั้นตอน 1) เป็นการสร้างลำดับงาน (Sequence) ทางเลือกโดยใช้หลักการประเมินคำตอบที่เหมาะสม (Optimal Solution) ของ Travelling Salesman Problem (TSP) มีเป้าหมายให้ระยะทางหรือต้นทุนรวมของการเดินทางต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขของการเดินทางจาก Node ต้นทาง (i) ไปยังทุก Node (j's) ที่เหลือใน Network จนครบด้วยการ Visit แต่ละ Node j เพียง 1 ครั้งเท่านั้น [16] และเลือก Sequence ที่ทำให้ค่าคาดหวังของเวลาทำงานล่วงเวลา (Expected Total Overtime) ที่สถานี 1 ต่ำที่สุด อธิบายในหัวข้อ 4.2.1

ขั้นตอนที่ 2) จัดตารางการผลิตโดยมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรของ Station 1 และ Station 2 ซึ่งจะได้ตารางการผลิต 2 แบบตามวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 4.2.2

ขั้นตอนที่ 3) เลือกลำดับและตารางการผลิตโดยพิจารณาจากวิธีการที่ทำให้มีต้นทุนการทำงานล่วงเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงการส่งงานที่ช้ากว่ากำหนด อธิบายในหัวข้อ 4.2.3

ขั้นตอนโดยรวมเป็นการจัดลำดับของงานด้วยหลักการ TSP จากนั้นมอบหมายงานตามลำดับที่จัดไว้ให้กับเครื่องจักรของ สถานีที่ 1 และ 2 ด้วย Assignment Heuristic (AH) ที่ต้องการลดต้นทุนการทำงานล่วงเวลา จึงเรียกรวมวิธีการนี้ว่า TSP-AH การอธิบายขั้นตอนของฮิวริสติกส์จะใช้สัญลักษณ์และสมการในหัวข้อที่ 4.1 ดังนี้

4.1 สัญลักษณ์

- N : จำนวนงาน (Job) ในชุดคำสั่ง
- M : จำนวนสถานี (stations) ทั้งหมด ($M = 2$)
- i, j : งาน (Job) ; $i = 1, 2, \dots, N$
- k : สถานี k; $k = 1$ และ 2
- SP_i : Starting Point ของ Sequence ด้วย job i
- G : จำนวน SP_i ทั้งหมดของแต่ละชุดคำสั่ง
- b_y : รุ่น (y) ของชิ้นส่วนคอยล์ที่มีการผลิต
- l : เครื่องจักร l ของสถานีที่ 1 ; $l = 1, 2, 3$
สถานีที่ 2 ; $l = 1$
- M_{kl} : เครื่องจักร l ของสถานี k
- $j_{[i]}$: ลำดับที่ของงานใน Sequence
- S_i, S_j : ลำดับงานจาก TPS เริ่มต้นที่ Node i, j
- t_{ik} : เวลาของงาน i ที่ Station k
- S_{ijk} : เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเมื่องาน j ทำต่อจากงาน i ที่ Station k
- MT_{ik} : เวลาเครื่องจักรสำหรับงาน i ที่ station k
- d_{ik} : กำหนดเสร็จของงาน i ที่ Station k
- C_{ik} : เวลาที่งาน i ถูกดำเนินการเสร็จ (Completion Time) ที่ Station k
- C_{jk_l} : เวลาที่งาน j ถูกดำเนินการเสร็จบนเครื่องจักร l ของ Station k
- L_{ik} : ค่าความเบี่ยงเบนระหว่าง C_{ik} และ d_{ik} ของงาน i ที่ Station k
- T_{ik} : เวลาที่งาน i เสร็จช้ากว่า d_{ik} ที่ Station k
- ST_{jk} : เวลาที่งาน j เริ่มดำเนินการที่ Station k
- TD_k : เวลาสำเร็จรวมของทุกงานที่ Station k
- MS_k : เวลาปิดงานของ Station k

E(TD_k) :ค่าคาดหวังของ TD_k

E(OT_j) :ค่าคาดหวังของเวลาทำงานล่วงเวลาของ
งาน j

OT_{cost} :ต้นทุนการทำงานล่วงเวลา

WR :ค่าแรงล่วงเวลา (บาท/คน/ชั่วโมง)

OP :จำนวนพนักงาน (คน)

ทั้งนี้ MT_{ik}, C_{ik}, t_{ik}, TD_k สามารถประเมินได้จากสมการ
ที่ (1) (2) (3) และ (4) ตามลำดับ

$$MT_k = t_{ik} + S_{ijk} \quad (1)$$

$$C_{ik} = ST_{jk} + MT_{ik} \quad (2)$$

$$T_{ik} = \max[C_{ik} - d_{ik}, 0] \quad (3)$$

$$TD_k = \sum_i T_{ik} \quad (4)$$

การจัดลำดับงานที่มาถึงระบบ ก่อนนำเข้าสถานี 1
ต้องการให้มีค่า E(TD₁) น้อยที่สุดเมื่อประเมินโดยมี
สมมติฐานว่าสถานี 1 มีเครื่องจักรเพียง 1 เครื่อง และ
เวลาที่เครื่องจักรต้องใช้เพื่อทำงาน i จะประเมินโดยปรับ
สมการที่ (1) เป็นสมการที่ (5) ซึ่งจะทำให้ประเมิน
E(TD₁) ได้จากสมการที่ (6) ตามลำดับ

$$MT_{i1} = \frac{(t_{i1} + S_{ij1})}{3} \quad (5)$$

$$E(TD_1) = \sum_i \max[C_{i1} - d_{i1}, 0] \quad (6)$$

การจัดลำดับงานก่อนมอบหมายงานให้เครื่องจักรที่
สถานี 1 ทำโดยกำหนดให้งาน i ใดๆ เป็น Node i แทน
จุดเริ่มต้นและงาน j ที่กำหนดให้ทำต่อจากงาน i บน
เครื่องจักรของสถานี 1 เป็น Node j เวลาที่เครื่องจักร
ต้องใช้เพื่อทำงาน j เท่ากับ MT_{ij} ดังสมการที่ (1) จึง
ประเมินเวลาปิดงานเบื้องต้น (Tentative Makespan)
ของสถานีที่ 1 และเวลาคาดหวังการทำงานล่วงเวลา
รวมเพื่อหลีกเลี่ยงการส่งงาน j ซ้ำกว่ากำหนดและต้นทุน
การทำงานล่วงเวลา ประเมินได้จากสมการที่ (7) (8)
และ (9)

$$MS_1 = \frac{\sum_{ij} [S_{ij1} + t_{ij1}]}{3} \quad (7)$$

$$E(OT_j) = \min[E(TD_j), MT_{j1}] \quad (8)$$

$$OT_{cost} = \sum_j E(OT_j) * WR * OP \quad (9)$$

อีวิริสติกส์สำหรับการจัดลำดับและตารางการผลิตของ
ปัญหาไหลเลื่อนผสมมีรายละเอียดดังอธิบายในหัวข้อที่
4.2

4.2 อีวิริสติกส์ TSP-AH

4.2.1 การจัดลำดับงาน (Sequencing)

จัดลำดับงานก่อนเข้าสถานี 1 โดยมีวัตถุประสงค์
ให้ค่าความหมายของเวลางานส่งช้ากว่ากำหนด
รวมต่ำที่สุด มีขั้นตอนดังนี้

4.2.1.1 List ลำดับงานตามกำหนดส่ง

4.2.1.2 จัดลำดับงานเพื่อนำเข้าสู่สถานี 1 ด้วยหลัก หลักการ TSP ดังนี้

- จัดงาน i,j ที่มีกำหนดส่ง d_{i1},d_{j1} เท่ากันเป็นกลุ่ม
เดียวกัน เลือกงานแรกของแต่ละกลุ่มเป็น Job (Node)
แรก (Starting Point, SP) ของ Sequence แต่ละ
ชุดคำสั่งจึงจะมีจำนวน G Sequence

- กำหนด Objective ของ TSP เป็น Minimize
Expected Total Overtime ที่สถานี 1 E(OT₁) ซึ่ง
ประเมินได้จากสมการที่ (8)

- ประเมินลำดับงานด้วยฟังก์ชัน Solver ของ MS
Excel จะได้ลำดับงานของแต่ละ Sequence

4.2.1.3 เลือกลำดับงานที่มี E(OT₁) ต่ำที่สุดจาก SP แบบ แทนลำดับงานนั้นด้วย S_i หรือ S_j

4.2.2 การจัดตารางการผลิต (Job Scheduling)

มอบหมายงานให้เครื่องจักรสถานี 1 และสถานี 2
ตามลำดับงานใน S_i หรือ S_j โดยแยกเป็น 2 วิธี ซึ่ง
เรียกว่า Assignment Heuristic 1 (AH₁) และ
Assignment Heuristic 2 (AH₂) มีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 AH₁ : กำหนด Tentative MS₁ ตามสมการที่ (7)

- มอบหมายงานให้กับเครื่องจักรของสถานีที่ 1
โดยเริ่มจาก M₁₁ ตามลำดับจาก j_[1],j_[2],...,j_[n] ใน S_i
หรือ S_j จนกระทั่ง Completion Time ของงาน j_[n+1]
มากกว่า Tentative MS₁

- มอบหมายงานลำดับ $j_{[n+1]}, j_{[n+2]}, \dots, j_{[n+x]}$ ใน S_i หรือ S_j ให้กับ M_{12} จนกระทั่ง Completion Time ของงาน $j_{[n+x+1]}$ มากกว่า Tentative MS_1

- มอบหมายงานที่เหลือใน S_i หรือ S_j ($j_{[n+x+1]}, \dots, j_{[N]}$) ให้กับ M_{13}

- ปรับเรียงภาระงานบนเครื่องจักร M_{11}, M_{12}, M_{13} โดยย้ายงานสุดท้ายของเครื่องจักรที่มี C_{j11} มากที่สุดไปต่อท้ายเครื่องที่มี C_{j11} ต่ำที่สุด จนแต่ละเครื่องมีเวลาปฏิบัติงานใกล้เคียงกันมากที่สุด

- มอบหมายงานที่ออกจากสถานี 1 ให้กับเครื่องจักร M_{21} ของสถานีที่ 2 ตามลำดับ C_{j1} แบบออกมาก่อน มอบหมายงานก่อน (First Out First Assigned, FOFA) ถ้าเท่ากันให้ตัดสินจาก Due Date ถ้ายังเท่ากันอีกให้เลือกงานใดก็ได้ จากนั้นประเมินดัชนี

- 1) MS_2 แทนด้วย AH_1-MS_2
- 2) TD_2 แทนด้วย AH_1-TD_2
- 3) OT_{cost} แทนด้วย AH_1-OT_{cost}

4.2.2.2 AH_2

- มอบหมายงานให้กับ M_{11}, M_{12}, M_{13} ตามลำดับจาก $j_{[1]}, j_{[2]}, \dots, j_{[n]}$ ใน S_i หรือ S_j โดยพิจารณาจากเครื่องที่มีภาระงานน้อยที่สุดก่อนเสมอ ถ้าภาระงาน

เท่ากันให้เลือกตามลำดับเครื่องจักร เวลาปฏิบัติงานจะเท่ากับ $\max[C_{j11}, C_{j12}, C_{j13}]$ เมื่อ j เป็นงานลำดับสุดท้ายบนเครื่องจักร M_{11}, M_{12} และ M_{13} ตามลำดับ

- มอบหมายงานที่ออกจากสถานีที่ 1 ให้กับเครื่องจักร M_{21} ของสถานีที่ 2 ด้วยวิธีเดียวกับของ AH_1 จากนั้นประเมินดัชนี MS_2, TD_2 และ OT_{cost} แทนด้วย AH_2-MS_2, AH_2-TD_2 และ AH_2-OT_{cost} ตามลำดับ

4.2.3 เลือกลำดับและตารางการผลิต

ลำดับการผลิตจริงจะเลือกจากลำดับและตารางการผลิต ที่มีค่า AH_1-OT_{cost} และ AH_2-OT_{cost} ต่ำที่สุด ซึ่งประเมินจากต้นทุนการทำงานล่วงเวลาสามารถประเมินได้ดังสมการที่ (9)

5. การประยุกต์ TSP-AH กับชุดคำสั่งตัวอย่าง

โรงงานกรณีศึกษามีการผลิตชิ้นส่วนคอยล์จำนวน 11 รุ่น แทนด้วย $b_1, b_2, \dots, b_{11}$ ตามลำดับ คำสั่งผลิตจะมาถึงระบบผลิตเป็นชุดครอบครัวการวางแผนผลิต 2 สัปดาห์ แต่โดยปกติจะชุดคำสั่งจะประกอบด้วยชิ้นส่วนคอยล์ไม่ครบทั้ง 11 รุ่น เวลาการปรับตั้งเพื่อผลิตงานรุ่น b_j ใด ๆ ด้วยเครื่องจักรของสถานี 1 และ 2 ขึ้นกับลำดับของงานก่อนหน้าดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เวลาปรับตั้งเครื่องจักรของสถานี 1 (หน่วย: ชั่วโมง)

รุ่น	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}
b_1	0.00	0.32	0.32	0.00	0.32	1.87	2.25	2.25	2.25	2.30	2.27
b_2	0.35	0.00	0.00	0.35	0.00	1.75	2.15	2.15	2.15	2.27	2.15
b_3	0.35	0.00	0.00	0.35	0.00	1.75	2.15	2.15	2.15	2.30	2.15
b_4	0.00	0.32	0.32	0.00	0.32	1.87	2.25	2.25	2.25	2.25	2.27
b_5	0.35	0.00	0.00	0.35	0.00	1.75	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
b_6	1.87	1.75	1.75	1.87	1.75	0.00	0.22	0.22	0.22	0.28	0.28
b_7	1.73	1.62	1.62	1.73	1.62	0.22	0.00	0.00	0.00	0.27	0.27
b_8	1.73	1.62	1.62	1.73	1.62	0.22	0.00	0.00	0.00	0.27	0.27
b_9	1.73	1.62	1.62	1.73	1.62	0.22	0.00	0.00	0.00	0.27	0.27
b_{10}	1.82	1.68	1.68	1.82	1.68	0.28	0.27	0.27	0.27	0.00	0.00
b_{11}	1.82	1.68	1.68	1.82	1.68	0.28	0.27	0.27	0.27	0.00	0.00

ตารางที่ 2 เวลาปรับตั้งเครื่องจักรของสถานี 2 (หน่วย: ชั่วโมง)

รุ่น	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	b ₁₀	b ₁₁
b ₁	0.00	0.18	0.18	0.12	0.18	0.20	0.15	0.15	0.15	0.18	0.18
b ₂	0.18	0.00	0.08	0.18	0.00	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15
b ₃	0.18	0.08	0.00	0.18	0.08	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15
b ₄	0.12	0.18	0.18	0.00	0.18	0.20	0.15	0.15	0.15	0.18	0.18
b ₅	0.18	0.08	0.08	0.18	0.08	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15
b ₆	0.20	0.15	0.15	0.20	0.15	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20
b ₇	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.00	0.08	0.08	0.13	0.13
b ₈	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.08	0.00	0.08	0.13	0.13
b ₉	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.08	0.08	0.00	0.13	0.13
b ₁₀	0.18	0.15	0.15	0.18	0.15	0.20	0.13	0.13	0.13	0.00	0.08
b ₁₁	0.18	0.15	0.15	0.18	0.15	0.20	0.13	0.13	0.13	0.08	0.00

งานวิจัยนี้สุ่มชุดคำสั่งจำนวน 10 ชุดที่ได้มีการจัดการผลิตจริงแล้วด้วยวิธี MinSetup มาจัดลำดับและตารางการผลิตด้วยฮิวริสติกส์ TSP-AH แต่ละชุดคำสั่งมีจำนวนงาน และจำนวนรุ่นของชิ้นส่วนคอยล์ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนงานและรุ่นชิ้นส่วนคอยล์ของชุดคำสั่ง

ชุดคำสั่ง	จำนวนงาน	จำนวนรุ่นชิ้นส่วนคอยล์
1	27	6
2	28	3
3	23	1
4	33	4
5	24	4
6	37	4
7	27	3
8	33	3
9	27	6
10	28	3

ในคำสั่งชุดข้อมูล แต่ละชุดจะมีรายละเอียดข้อมูลเวลาในการผลิต (t_{ik}) และกำหนดส่ง (d_{ik}) ในหัวข้อนี้นี้จะใช้ข้อมูลชุดคำสั่งที่ 1 ซึ่งมีข้อมูลเพิ่มเติมดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลชุดคำสั่งที่ 1

งาน i, j	รุ่น	เวลาของงาน i (t_{ik} : ชั่วโมง)				กำหนดส่ง (d_{ik} : ชั่วโมง)	
		M ₁₁	M ₁₂	M ₁₃	M ₂₁	d ₁₁	d ₁₂
1	b ₁₀	15.0	15.0	15.0	5.4	53	34
2	b ₁₀	15.0	15.0	15.0	5.4	53	34
3	b ₁₀	15.0	15.0	15.0	5.4	53	34
4	b ₁₀	15.0	15.0	15.0	5.4	97	78

5	b ₁₀	15.0	15.0	15.0	5.4	97	78
.	.	.	.	.	.	.	.
9	b ₁₀	15.0	15.0	15.0	5.4	130	111
.	.	.	.	.	.	.	.
13	b ₁₁	15.0	15.0	15.0	5.4	86	67
14	b ₁₁	15.0	15.0	15.0	5.4	86	67
.	.	.	.	.	.	.	.
19	b ₁	6.7	6.7	6.7	2.6	240	237
20	b ₁	6.7	6.7	6.7	2.6	262	259
.	.	.	.	.	.	.	.
23	b ₂	6.1	6.1	6.1	2.2	328	322
24	b ₂	6.1	6.1	6.1	2.2	328	322
25	b ₃	6.1	6.1	6.1	2.2	75	69
26	b ₄	6.7	6.7	6.7	2.6	449	446
27	b ₄	6.7	6.7	6.7	2.6	449	446

5.1 การจัดลำดับงาน (Sequencing)

การจัดลำดับงาน (Sequencing) ก่อนเข้าสถานี 1

5.1.1 List ลำดับงานตามกำหนดส่ง (d_{i1})

จากตารางที่ 4 สามารถแบ่งกลุ่มงานที่มี d_{i1} แตกต่างกันได้จำนวน $G = 9$ กลุ่ม ดังนี้ $SP_1: \{1,2,3\}$, $SP_4: \{4,5,6,7,8\}$, $SP_9: \{9,10,11,12\}$, $SP_{13}: \{13,14,15,16,17,18\}$, $SP_{19}: \{19\}$, $SP_{20}: \{20,21,22\}$, $SP_{23}: \{23,24\}$, $SP_{25}: \{25\}$ และ, $SP_{26}: \{26,27\}$

5.1.2 จัดลำดับงาน เพื่อนำเข้าสู่สถานี 1 ด้วยหลักการ TSP ดังนี้

- กำหนดให้ $i = 1,4,9,13,19,20,23,25$ และ 26 แทนงานที่เป็น Node เริ่มต้นของ Sequence ซึ่งจะประเมินด้วย TSP ตามลำดับ

- กำหนด Objective ของ TSP เพื่อ Minimize $E(OT_1)$ ตามสมการที่ (8)

- ประเมินลำดับงานด้วยฟังก์ชัน Solver ของ MS Excel แต่ละ Node เริ่มต้น ได้ผลดังตารางที่ 5

5.1.3 เลือกลำดับงานที่มี $E(OT_1)$ ต่ำที่สุด

สามารถเลือกลำดับงานที่ทำให้ค่า $E(OT_1)$ ต่ำที่สุด คือ ลำดับงานของ Node เริ่มต้น $i = 25$ ซึ่งมีค่า $E(OT_1)$ เท่ากับ 1.78 ชั่วโมง จึงมีลำดับงานก่อนเข้าสถานี 1 ดังนี้

$S_{25} = 25, 3, 13, 2, 1, 7, 5, 15, 16, 14, 17, 6, 8, 18, 4, 11, 20, 12, 10, 9, 22, 19, 27, 24, 21, 23, 26$

ตารางที่ 5 ผลการประเมินลำดับงานด้วย TPS

S_{ij}	ลำดับงาน	$E(OT_1)$
S_1	1,2,17,6,3,4,5,14,7,16,18,13,8,15,10,9,11,23,12,27,25,21,20,19,24,26,22	2.03
S_4	4,2,13,3,1,17,15,6,14,16,7,5,18,8,10,9,11,24,12,22,27,20,21,23,19,25,26	2.03
S_9	9,15,3,17,2,13,14,18,16,8,7,5,6,4,1,20,12,24,21,10,11,22,19,25,27,26,23	7.03
S_{13}	13,3,2,1,16,17,8,5,7,6,14,4,15,18,10,9,23,12,11,20,19,21,22,25,24,27,26	2.03
S_{19}	19,1,2,17,3,7,13,18,14,6,8,4,16,5,10,9,15,24,12,11,20,25,21,22,26,23,27	7.03
S_{20}	20,2,3,17,5,13,8,6,14,7,16,15,4,18,10,21,22,9,12,11,1,19,24,25,27,23,6	7.03
S_{23}	23,16,14,1,3,6,13,4,17,7,18,8,5,15,9,21,10,20,11,12,2,27,19,24,26,22,25	7.03
S_{25}	25,3,13,2,1,7,5,15,16,14,17,6,8,18,4,11,20,12,10,9,22,19,27,24,21,23,26	1.78
S_{26}	26,15,1,2,3,4,18,16,8,13,14,7,17,6,5,12,25,24,9,11,10,22,27,19,20,23,21	3.98

5.2 การจัดตารางการผลิต (Job Scheduling)

Assign งานให้เครื่องจักรสถานี 1 ตามลำดับงานใน S_{25}

แบบ AH_1 : กำหนด Tentative M_{s1} ด้วยสมการที่ (7)

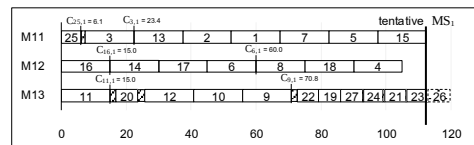
$$MS_1 = \frac{[S_{0,25,1} + t_{25,1}] + [S_{25,3,1} + t_{3,1}] + \dots + [S_{23,26,1} + t_{26,1}]}{3} = \frac{[0+6.1] + [2.3+15] + \dots + [0.35+6.7]}{3} = 112.69 \text{ ชั่วโมง}$$

จากลำดับงานใน S_{25} สามารถจัดตารางการผลิตของสถานี 1 ได้ดังรูปที่ 3 (ก) ก่อนการปรับเรียบ และ (ข) หลังการปรับเรียบ อธิบายได้ดังนี้

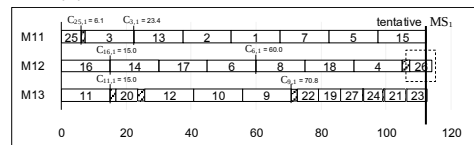
- มอบหมายงานให้กับ M_{11} ตามลำดับใน S_{25} จากงาน 25_[1], 3_[2], ..., 15_[8] เพราะ Completion Time ของงาน 16_[9] มากกว่า Tentative MS_1

- จึงนำงาน 16_[9] มอบหมายเป็นงานลำดับแรก ของ M_{12} ตามด้วย 14_[10], 17_[11], ..., 4_[15] เพราะ Completion Time ของงาน 11_[16] มากกว่า Tentative MS_1

- ปรับเรียบเพื่อให้เวลาปฏิบัติงานของ M_{11} , M_{12} และ M_{13} ใกล้เคียงกันโดยย้ายงาน 26_[27] จาก M_{13} ไปต่อท้ายงาน 4_[15]



(ก) ก่อนการปรับเรียบ



(ข) หลังการปรับเรียบ

☐ เวลาการผลิต ☒ เวลาการปรับตั้งเครื่องจักร

รูปที่ 3 แผนภาพแกนต์การมอบหมายงาน AH_1

จะได้งานของแต่ละเครื่องจักรสถานี 1 ตามลำดับดังนี้

M_{11} : 25,3,13,2,1,7,5,15

M_{12} : 16,14,17,6,8,18,4,26

M_{13} : 11,20,12,10,9,22,19,27,24,21,23

เวลาปฏิบัติงานที่สถานี 1 เท่ากับ $\max[MS_{15,1}, MS_{26,1}, MS_{23,1}]$ เท่ากับ 113.5 ชั่วโมง

- มอบหมายงานที่ออกจากสถานี 1 ให้กับเครื่องจักร M_{21} ของสถานีที่ 2 ตามลำดับ C_{j1} ได้ดังนี้

M_{21} : 25,16,11,3,20,14,13,12,17,2,10,6,1,9,8,22,7,18,19,5,4,27,24,21,23,15,26

ประเมินดัชนี AH₁-MS₂ ได้เท่ากับ 132.1 ชั่วโมง (C_{26,2}), AH₁-TD₂ เท่ากับ 141.09 ชั่วโมง และ AH₁-OT_{cost} ได้เท่ากับ 41,806.21 บาท

แบบ AH_2

- มอบหมายงาน S_{25} ให้กับเครื่องจักรของสถานี
1 (M_{11}, M_{12}, M_{13}) โดยพิจารณาจากเครื่องที่มีภาระงาน
น้อยที่สุดก่อนเสมอ จะได้ลำดับงานคือ

$$M_{11} = 25, 2, 5, 14, 8, 11, 10, 19, 23$$

$$M_{12} = 3, 1, 15, 17, 18, 20, 9, 24, 26$$

$$M_{13} = 13, 7, 16, 6, 4, 12, 22, 27, 21$$

และแสดงได้ดังรูปที่ 4

Figure 1 is a Gantt chart showing the scheduling of three machines (M1, M2, M3) over a 120-hour period. The chart displays the sequence of tasks and their durations. The tasks are numbered 1 through 27, and the machines are labeled M1, M2, and M3. The tasks are scheduled in a way that minimizes the makespan, with the total duration being 120 hours.

Machine	Task	Start Time	End Time	Duration
M1	25	0	10	10
M1	2	10	20	10
M1	5	20	30	10
M1	14	30	44	14
M1	8	44	55	11
M1	11	55	66	11
M1	10	66	76	10
M1	19	76	90	14
M2	3	0	10	10
M2	1	10	20	10
M2	15	20	35	15
M2	17	35	52	17
M2	18	52	70	18
M2	20	70	80	10
M2	9	80	90	10
M2	24	90	104	14
M3	13	0	10	10
M3	7	10	20	10
M3	16	20	36	16
M3	6	36	42	6
M3	4	42	54	12
M3	12	54	76	22
M3	22	76	90	14
M3	27	90	120	30

รูปที่ 4 แผนภาพแกนต์การมอบหมายแบบ AH_2

เวลาปิดงานที่สถานี 1 เท่ากับ $MS_{26,1}$ เท่ากับ 115.7 ชั่วโมง

- จากนั้นมอบหมายงานที่ออกจากสถานี 1 ให้กับ
เครื่องจักร M_{21} ของสถานี 2 ตามลำดับ C_{j1} ได้ดังนี้

$$M_{21} = 25, 3, 13, 2, 1, 7, 5, 15, 16, 14, 17, 6, 8, 18, 4, 11, \\ 20, 12, 10, 9, 22, 19, 27, 24, 21, 23, 26$$

ประเมินดัชนี AH_2-MS_2 ได้เท่ากับ 131.8 ชั่วโมง ($C_{26,2}$),

AH_2-TD_2 เท่ากับ 24.67 ชั่วโมง และ AH_2-OT_{cost} ได้เท่ากับ 5,753.18 บาท

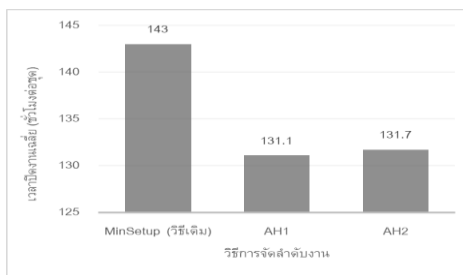
5.3 เลือกลำดับและตารางการผลิต

จากผลการจัดลำดับและตารางการผลิตดังแสดง
ในหัวข้อ 5.2 จะเลือกลำดับงานและการมอบหมายงาน
ของชุดคำสั่งที่ 1 แบบ AH_2 ซึ่งจะส่งผลให้สามารถปิด
งานได้ชั่วโมงที่ 131.8 และ OT_{cost} เท่ากับ 5,753.18 บาท

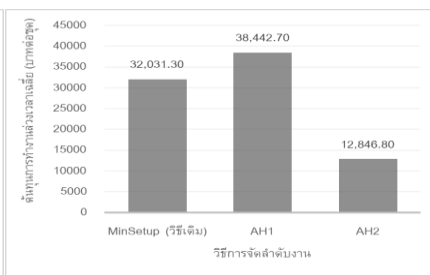
สำหรับชุดคำสั่งที่ 2 - 9 สามารถจัดลำดับและตารางการผลิตได้ในลักษณะเดียวกัน มีผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งเห็นได้ว่าผลลัพธ์จากการจัดลำดับและตารางการผลิตแต่ละชุดคำสั่งด้วย TSP-AH มีค่าเฉลี่ยของเวลาปิดงาน (MS_2) และค่าเฉลี่ยต้นทุนการทำงานล่วงเวลา (OT_{cost}) ที่ดีกว่าแบบ MinSetup ทุกชุดคำสั่ง ทั้งการมอบหมายงานแบบ AH_1 และ AH_2 (AH_1 และ AH_2 มีค่า MS_2 ใกล้เคียงกัน แต่ต้นทุนของ AH_2 ต่ำกว่า AH_1 ถึงร้อยละ 66.5 เนื่องจากการปรับเรียบของ AH_1 ส่งผลให้เวลางานส่งไม่ทันกำหนด TD_2 เพิ่มขึ้นจึงต้องการเวลาทำงานล่วงเวลามากขึ้น) ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 สำหรับเวลาปิดงานและต้นทุนการทำงานล่วงเวลาตามลำดับ การเปรียบเทียบจึงจะอ้างอิงระหว่าง MinSetup และ AH_2 โดยประเมินจากค่าเฉลี่ยต่อชุดคำสั่ง ดังแสดงใน รูปที่ 6 พบว่า AH_2 มี MS_2 เท่ากับ 131.7 ชั่วโมง ต่ำกว่าของ MinSetup 11.3 ชั่วโมง (ลดลงร้อยละ 7.9) งานส่งไม่ทันกำหนดเท่ากับ 3 งาน ลดลง 2 งาน (ลดลงร้อยละ 26.3) และ OT_{cost} เท่ากับ 12,846.8 บาท ลดจากของ MinSetup 19,184.5 บาท (คิดเป็นร้อยละ 59.9) ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการจัดลำดับและตารางการผลิตของ 10 ชุดคำสั่ง

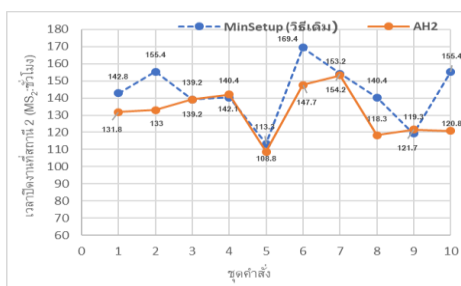
ชุดคำสั่ง	N	เวลาปฏิบัติงาน (MS: ชั่วโมง)			เวลาทำงานล่วงเวลารวม (ชั่วโมง)			จำนวนงานส่งไม่ทันกำหนด			ต้นทุนการทำงานล่วงเวลา (OT _{cost} : บาท)		
		Min Setup	TSP-AH		Min Setup	TSP-AH		Min setup	TSP-AH		Min	TSP-AH	
			AH ₁	AH ₂		AH ₁	AH ₂		AH ₁	AH ₂		AH ₁	AH ₂
1	27	142.8	132.1	131.8	162.4	141.1	24.7	12	7	5	45,614.9	41,806.2	5,753.2
2	28	155.4	132.9	133.0	83.1	133.4	79.6	10	11	9	24,283.6	39,162.9	23,080.2
3	23	139.2	139.2	139.2	220.1	224.0	143.0	15	14	15	62,609.2	64,556.8	37,390.7
4	33	140.4	140.5	142.1	28.6	105.9	15.2	4	9	5	7,590.5	30,700.1	3,074.1
5	24	113.3	104.8	108.8	70.1	75.4	21.3	5	6	4	19,833.4	21,882.7	4,996.3
6	37	169.4	144.9	147.7	118.5	152.5	27.6	11	13	4	34,916.0	44,931.5	7,990.5
7	27	154.2	153.9	153.2	141.2	195.7	97.9	12	13	15	39,596.5	56,737.2	24,637.4
8	33	140.4	120.2	118.3	108.7	128.4	30.4	12	16	6	31,321.2	36,774.6	7,923.0
9	29	119.3	118.8	121.7	51.9	41.9	8.2	4	3	2	14,823.8	12,379.5	1,695.5
10	26	155.4	123.6	120.8	134.9	122.2	42.8	10	11	5	39,723.7	35,495.6	11,927.2
สูงสุด	37	169.4	153.9	153.2	220.1	224.0	143.0	15	16	15	62,609.2	64,556.8	37,390.7
ต่ำสุด	23	113.3	104.8	108.8	25.9	41.89	8.2	4	3	2	7,590.5	12,379.5	1,695.5
เฉลี่ย	28.7	143.0	131.1	131.7	111.9	132.0	49.1	9.5	10.3	7	32,031.3	38,442.7	12,846.8



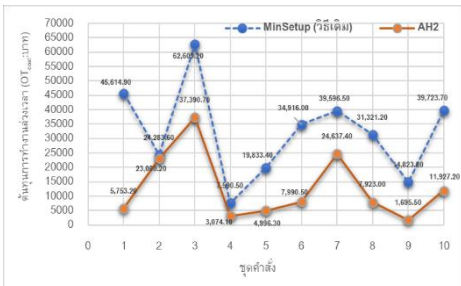
รูปที่ 4 เวลาปฏิบัติงานเฉลี่ย



รูปที่ 5 ต้นทุนการทำงานล่วงเวลาเฉลี่ย



รูปที่ 6 เวลาปฏิบัติงานของ 10 ชุดคำสั่ง



รูปที่ 7 ต้นทุนการทำงานล่วงเวลาของ 10 ชุดคำสั่ง

6. สรุปและอภิปรายผล

การทดสอบฮิวริสติกส์ TSP-AH ในการจัดลำดับและตารางการผลิตของปัญหาไหลเลื่อนผสม 2 สถานีภายใต้เงื่อนไขเวลาการตั้งเครื่องขึ้นกับงานก่อนหน้าเปรียบเทียบกับวิธี MinSetup โดย TSP-AH มีทางเลือกการมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรที่สถานี 1 แบบ AH₁

ซึ่งเน้นการลดเวลาปรับตั้งเครื่องจักรโดยมอบหมายให้เครื่องจักรที่ละเครื่อง และแบบ AH₂ พิจารณาจากภาระงานที่มีอยู่ของเครื่องจักร จากตัวอย่าง 10 ชุดคำสั่งพบว่าเมื่อพิจารณาจากเวลาปฏิบัติงานและต้นทุนการทำงานล่วงเวลา TSP-AH ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า MinSetup อย่างมีนัยสำคัญ โดยจากตัวอย่างงาน 10 ชุดคำสั่ง

พบว่าโดยเฉลี่ยต่อชุดคำสั่งมีเวลาปิดงานลดลงจาก 143 ชั่วโมง เหลือ 131.7 ชั่วโมง จำนวนงานที่เสร็จไม่ทันกำหนดจาก 9.5 งาน เป็น 7 งาน ส่งผลให้ต้นทุนการทำงานล่วงเวลาลดลงจาก 32,031.3 บาท เป็น 12,846.8 บาท

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ระหว่างการมอบหมายงานแบบ AH₁ และ AH₂ พบว่าโดยเฉลี่ยเวลาปิดงานของทั้ง 2 แบบ ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จำนวนงานที่ส่งไม่ทันกำหนดของ AH₂ จะน้อยกว่าของ AH₁ ส่งผลให้ต้นทุนการทำงานล่วงเวลาของ AH₂ ต่ำกว่าของ AH₁ จึงเชื่อได้ว่ารูปแบบการมอบหมายงานให้เครื่องจักรที่สถานี 1 ตามวิธี AH₁ ส่งผลให้มีโอกาสเกิดเหตุการณ์ที่งานส่งไม่ทันกำหนดได้มากกว่า

ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขของโครงสร้างปัญหานี้ TSP-AH แบบ AH₂ จึงเป็นวิธีการจัดลำดับและตารางการผลิตที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในขั้นตอนของการจัดลำดับงานก่อนมอบหมายให้กับเครื่องจักรที่สถานี 1 ด้วย TSP นั้นจะเลือกลำดับงานเพียง 1 แบบ จากจำนวน Starting Point ทั้งหมดของแต่ละชุดคำสั่งมาประเมินต่อเท่านั้น ในขณะที่บางลำดับงานที่เหลือน่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นลำดับงานที่ให้ผลลัพธ์ด้านต้นทุนการทำงานล่วงเวลาที่ดีขึ้น ดังนั้นการสร้างโปรแกรมที่สามารถประเมินผลลัพธ์จากการมอบหมายงานตามขั้นตอนของ TSP-AH จนครบทั้ง G แบบได้อย่างรวดเร็วจะทำให้บ่งชี้ลำดับงานซึ่งนำไปสู่ตารางการผลิตที่ดีที่สุดจากลำดับงานทั้ง G แบบได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บรรพัญญู ลีลา. การวางแผนและควบคุมการผลิต, กรุงเทพฯ: กรุงเทพฯ: นักพิมพ์ท็อป; 2553.
- [2] Bedworth DD, Bailey JE. Integrated Production Control Systems, New York: John Wiley & Sons; 1987.
- [3] Russell RS, Taylor III BW. Operations Management, New Jersey: John Wiley & Sons; 2011.
- [4] จีราดา อนุชิตนันทน์ และบรรพัญญู ลีลา. การศึกษาวิธีการจัดลำดับงานสำหรับกระบวนการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นภายใต้ข้อจำกัดทรัพยากร. วารสาร Thai VCML. 2558; 8(1):17-27.
- [5] อัจฉนาพรณ์ เทเวตสุจริตกุล. การจัดลำดับงานสำหรับกระบวนการบรรจุชิ้นส่วน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา. 2555.
- [6] Singhal E, Singh S, Dayma A. An improved heuristic for permutation flow shop scheduling (NEH ALGORITHM). International Journal of Computational Engineering Research. 2012; 2(6): 95-100.
- [7] Gozali L, Eliyanti V, Widodo L, Daywin FJ, Irawan AP, Tanujaya H, Siti RN. Flowshop production scheduling using CDS, Tabu Search, and Genetic Algorithm (Case Studies: CV. Mega Abadi). Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Indonesia. 2021; 41-54.
- [8] Shi Qiang L, Erhan K. A hybrid metaheuristic algorithm to optimize a real-world robotic cell. Computers and Operations Research. 2017; 84: 188-194.
- [9] Gupta JND, Hariri AMA, Potts CN. Scheduling a two-stage hybrid flow shop with parallel machines at the first stage. Annals of Operations Research. 1997; 69:171-191.
- [10] Wojakowski P, Warzolek D, The Classification of Scheduling Problems Under Production Uncertainty. Research in Logistics & Production, 2014; 4(3):245-255.

- [11] Xu W, Sun HY, Awaga AL, Yan Y, Cui YJ. Optimization approaches for solving production scheduling problem: A brief overview and a case study for hybrid flow shop using genetic algorithms. *Advances in Production Engineering & Management*. 2022; 17(1):45-56.
- [12] สัจจิตา ทองเกิด, ชุติศักดิ์ พรสิงห์, การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการจัดตารางการผลิตระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยนเรศวร*. 2563; 15(1): 33-44
- [13] อนุช ชัยมณี, วิสุทธิ์ สุพิทักษ์, การจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่น โดยมีเวลาปรับตั้งเครื่องจักรซึ่งขึ้นกับลำดับงานภายใต้นโยบายการผลิตแบบทันเวลาพอดี. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 2558; 25(2): 219-231
- [14] Nuntapon D, Nattapoom C, Pisut P, Flow-shop and job-shop scheduling problems solved by simulation models. *TNI Journal of Engineering and Technology*. 2015; 3(1): 11-17.
- [15] Shabtay D, Gerstl E, Coordinating scheduling and rejection decisions in a two-machine flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2024; 887-89
- [16] Bigras LP, Gamache M, Savard G, The time-dependent traveling salesman problem and single machine scheduling problems with sequence dependent setup times. *Discrete Optimization*. 2008; 5(4): 685-699.