ฮิวริสติกเพื่อลดจำนวนงานล่าช้าสำหรับปัญหาการจัดตารางการประกอบ 2 ระดับ

ณัฏฐากร พุทธสอน[1], ธนวัฒน์ วรุณโชติกุล[2], วิทิต จันทร์อินทร์[3] และ อณจ ชัยมณี[*4]
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตร์ศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Received: 31 January 2022; Revised: 21 March 2022; Accepted: 5 May 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการจัดตารางการประกอบสำหรับกระบวนการผลิตที่ประกอบด้วยงาน n งาน ระบบการประกอบมี 2 ระยะ ระยะแรกมีเครื่องจักรเดี่ยว m เครื่องที่เป็นอิสระต่อกันดำเนินการผลิตชิ้นส่วนประกอบของงาน เมื่อชิ้นส่วนประกอบทุกชิ้นของงานใดถูกผลิตเสร็จจะถูกนำมาประกอบกันเป็นชิ้นงานในระยะที่สอง วัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนงานล่าช้าในกระบวนการผลิต ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงคุณลักษณะของปัญหาและหาคำตอบที่ดีที่สุด กระบวนการหาคำตอบซึ่งถูกให้ชื่อว่าฮิวริสติก Nattakorn, Witid, Tanawat and Anot (NWTA) ถูกพัฒนาขึ้นอยู่บนพื้นฐานของกฎการจัดลำดับงานและแนวคิดของอัลกอริทึมมัวร์-ฮอดจ์สัน เพื่อใช้หาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหาดังกล่าว โดยพิจารณาหางานล่าช้าและหาตำแหน่งงานใหม่เพื่อปรับปรุงตารางการผลิตให้ดียิ่งขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกที่นำเสนอทำโดยนำคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์และคำตอบจากวิธีการเชิงพันธุกรรม ผลการศึกษา พบว่าจากปัญหาทดสอบทั้งหมด 30 ปัญหา ฮิวริสติก NWTA สามารถให้คำตอบที่ดีในเวลาการประมวลผลที่สมเหตุสมผล

คำสำคัญ: การจัดตารางการประกอบ, จำนวนงานล่าช้า, ฮิวริสติก

* Corresponding author. E-mail: fenganc@ku.ac.th
[1] นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2] นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[3] นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Heuristic to Minimize the Number of Tardy Jobs for 2-Stages Assembly Scheduling Problem

Nattakorn Puttasorn [1], Tanawat Varoonchotikul [2], Witid Junin[3] and Anot Chaimanee[*4]

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at **Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140**

Received: 31 January 2022; Revised: 21 March 2022; Accepted: 5 May 2022

Abstract

This research considers the assembly scheduling problem for a production process that consists of *n* jobs. The assembly system consists of 2 stages. In the first stage, there are *m* independent single machines that produce the components of a job, and when the components are finished, they are assembled into the work piece in the second stage. The research objective is to minimize the number of tardy jobs. The mathematical model is constructed to represent the problem characteristics and determine the optimal solution. Then, the solution procedure called heuristic Nattakorn, Witid, Tanawat, and Anot (NWTA) is developed based on the dispatching rule and the Moore-Hodgson Algorithm concept for determining a proper solution by considering tardy jobs and finding new positions to improve a production schedule. To evaluate the performance of the proposed heuristic, the solution obtained from the heuristic is compared with the optimal solution determined by the mathematical model and the solution found from the genetic algorithm. From the results of 30 problems, the heuristic NWTA can provide good solutions in a reasonable amount of time.

Keywords: assembly scheduling, tardy jobs, heuristic

* Corresponding author. E-mail: fenganc@ku.ac.th

[1]Student in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

[2]Student in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

[3]Student in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

[4]Assistant Professor in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

1. บทนำ

การจัดลำดับงานและตารางการผลิตเป็นกิจกรรมหนึ่งที่สำคัญของกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการจัดการการผลิต เกี่ยวข้องกับการจัดสรรทรัพยากรและกำหนดการผลิตงานเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถทำงานให้เสร็จได้ในเวลาที่เหมาะสม [1] ส่งผลให้กระบวนการผลิตเกิดประสิทธิภาพ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตทั้งในโรงงานขนานเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ มีการแข่งขันทางด้านการผลิตสูง จึงต้องการการวางแผนและควบคุมการผลิตที่มีประสิทธิภาพ การจัดลำดับงานและตารางการผลิตเป็นเครื่องมือหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการผลิต หากสามารถดำเนินการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างเต็มที่ จะเป็นการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันเมื่อเปรียบเทียบกับคู่แข่งที่ผลิตสินค้าในลักษณะเดียวกัน ซึ่งวัตถุประสงค์ที่สำคัญประการหนึ่งของการจัดตารางการผลิตและถูกใช้กับระบบการผลิตที่หลากหลาย คือ การลดความล่าช้าของงาน (Number of Tardy Jobs) [2], [4-11], [20] ซึ่งเมื่อมีงานล่าช้าเกิดในกระบวนการผลิตจะนำไปสู่การเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากค่าใช้จ่ายปกติ เช่น ค่าปรับจากลูกค้า อัตราค่าขนส่งพิเศษ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อภาพพจน์ของผู้ผลิตจนอาจสูญเสียโอกาสในการผลิตสินค้าครั้งต่อไป

การจัดตารางการผลิตมีหลายประเภท เช่น การจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรเดี่ยว (Single Machine) การจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop) การจัดตารางการผลิตแบบตามงาน (Job Shop) ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการผลิตนั้นว่ามีความสอดคล้องกับการจัดตารางการผลิตแบบใด นอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมที่เป็นการรวมคุณลักษณะการจัดตารางการผลิตหลายประเภทเข้าด้วยกัน ลักษณะการจัดตารางการผลิตประเภทหนึ่งที่น่าสนใจศึกษา คือ การจัดตารางการผลิตแบบเครื่องจักรเดี่ยวจำนวนหลายเครื่อง โดยแต่ละเครื่องจักรจะดำเนินการผลิตชิ้นส่วนประกอบ หลังจากนั้นจะนำชิ้นส่วนเหล่านั้นมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ การจัดตารางการผลิตในลักษณะดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นในอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ประกอบด้วย เครื่องจักรเดี่ยวหลายเครื่องที่เป็นอิสระต่อกัน เช่น โรงงานผลิตตุ๊กตา ที่ต้องตัดเย็บชิ้นส่วนต่างๆ แล้วนำชิ้นส่วนเหล่านั้นมาประกอบกันเป็นตุ๊กตาประเภทต่างๆ โรงงานผลิตอุปกรณ์พลาสติกกันกระแทก ที่ต้องทำการตัดชิ้นส่วนประกอบ แล้วนำชิ้นส่วนมาต่อเข้าด้วยกัน หรือแม้กระทั่งโรงงานขนาดเล็กในสถานศึกษา เป็นต้น กล่าวคือเครื่องจักรแต่ละเครื่องสามารถผลิตชิ้นส่วนประกอบโดยไม่ขึ้นกับเครื่องจักรอื่นๆ หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนที่ได้มาประกอบกันเป็นชิ้นงานต่อไป ทั้งนี้หากในกระบวนการผลิตมีผลิตภัณฑ์หลายประเภท และชิ้นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทมีเวลาการผลิตแตกต่างกัน อีกทั้งมีกำหนดส่งที่ไม่เหมือนกัน การจัดลำดับงานและตารางการผลิตของชิ้นส่วนประกอบบนแต่ละเครื่องจักรเพื่อนำมาประกอบกันเป็นผลิตภัณฑ์ให้ทันตามวันกำหนดส่งของลูกค้าแต่ละรายเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ถ้าตารางการผลิตไม่มีประสิทธิภาพ อาจทำให้เกิดงานล่าช้า ส่งผลให้เกิดข้อเสียเปรียบแก่ผู้ผลิตสินค้า

จากลักษณะของกระบวนการผลิตที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จะเสนอกระบวนการฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้จัดตารางการประกอบโดยชิ้นส่วนประกอบแต่ละชิ้นจะถูกผลิตบนเครื่องจักรหนึ่งเครื่องจากเครื่องจักรหลายเครื่องที่เป็นอิสระต่อกันในระยะที่หนึ่ง เมื่อผลิตชิ้นส่วนประกอบทุกชิ้นเสร็จ จะถูกนำมาประกอบกันเป็นผลิตภัณฑ์ในระยะที่สอง วัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนงานล่าช้าในระบบการผลิต โดยฮิวริสติกที่นำเสนอจะสามารถให้คำตอบที่ดีเวลาการประมวลผลที่สั้นและเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์การผลิตจริง

2. การทบทวนวรรณกรรม

ในอดีตมีผู้วิจัยหลายท่าน มุ่งเน้นพัฒนากระบวนการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดจำนวนงานล่าช้า เริ่มต้นจากงานวิจัยที่สำคัญ ซึ่งเสนออัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นโดยมัวร์ (J.M. Moore) เพื่อหาลำดับของงานที่ดีที่สุด (Optimal Sequence) ของปัญหาการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรเดี่ยวเพื่อลดจำนวนงานล่าช้า ในช่วงท้ายของบทความได้เสนออีกเวอร์ชันของกระบวนการหาคำตอบซึ่งถูกร่วมนำเสนอโดยฮอดก์สัน (T.E. Hodgson) [2-3] ถูกเรียกว่าอัลกอริทึมมัวร์-ฮอดจ์สัน (Moore-Hodgson Algorithm) ทั้งนี้ในช่วงหลายปีหลังยังมีผู้วิจัยสนใจศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรเดี่ยวเพื่อลดจำนวนงานล่าช้า [4] ได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้หาคำตอบของ

ปัญหาขนาดเล็ก แต่ไม่เหมาะกับการให้หาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ จึงได้พัฒนาฮิวริสติกส์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของอัลกอริทึมของมัวร์ (Moore's Algorithm) เพื่อใช้หาคำตอบในเวลาประมวลผลที่สมเหตุสมผล การศึกษางานในลักษณะเดียวกัน แต่เพิ่มข้อจำกัดด้านสภาพพร้อมใช้งาน (Availability Constraint) นั่นคือ มีช่วงเวลาที่เครื่องจักรเสียหรืออยู่ในช่วงบำรุงรักษา [5] กระบวนการฮิวริสติกและการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound) ถูกสร้างขึ้นเพื่อหาคำตอบของปัญหา วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการหาคำตอบที่ดีกว่าวิธีการอื่นใน [6] การจัดตารางการผลิตเพื่อลดจำนวนงานล่าช้าภายใต้เวลาการผลิตที่ไม่แน่นอนถูกศึกษาโดย [7] ในงานวิจัยได้พัฒนากระบวนการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขตเพื่อใช้ในการหาคำตอบ ผลการศึกษาพบว่าคำตอบที่ได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดหลังจากนั้น [8] ได้เพิ่มเงื่อนไขเรื่องช่วงเวลาซ่อมบำรุงที่ยืดหยุ่น (Flexible Maintenance) นั่นคือ ช่วงเวลาซ่อมบำรุงเป็นหนึ่งในตัวแปรตัดสินใจ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็กแต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้เวลาประมวลผลที่ยาวนาน จึงพัฒนาฮิวริสติกเพื่อใช้แก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ผลการทดลองพบว่าความผิดพลาดของคำตอบจากฮิวริสติกเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 10.93%

นอกจากการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรเดี่ยวยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการจัดตารางการผลิตในสภาวะอื่นๆ ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนงานล่าช้า [9] ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop) แบบ 2 เครื่องจักร โดยวันกำหนดส่งของแต่ละงานเป็นวันเดียวกัน วัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนงานล่าช้า กระบวนการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขตถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มและฮิวริสติกถูกพัฒนาโดย [10] เพื่อลดจำนวนงานล่าช้าของเครื่องจักรขนานที่มีเวลาการทำงานต่างกัน (Uniform Parallel Machines) โดยพิจารณาทรัพยากรในระบบการผลิต ผลการศึกษาจากการทดสอบ 2 แบบ คือ การเปรียบเทียบเทียบคำตอบที่ได้กับคำตอบที่ดีที่สุด และการเปรียบเทียบกันเองระหว่าง 5 ฮิวริสติก พบว่าฮิวริสติก 3 วิธีการ มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าฮิวริสติกอีก 2 วิธีการ [11] วิจัยเกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนานที่เหมือนกัน โดยช่วงเวลาซ่อมบำรุงถูกพิจารณาบนเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ในงานวิจัยได้เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์และกระบวนการฮิวริสติก เพื่อหาคำตอบของปัญหา ซึ่งพบคำตอบที่ดีที่สุด 19 ปัญหาจาก 54 ปัญหาทดสอบ

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตของชิ้นส่วนประกอบแล้วนำชิ้นส่วนเหล่านั้นมาประกอบเป็นชิ้นงาน เป็นสิ่งที่นักวิจัยหลายท่านสนใจศึกษาในสภาวะของปัญหาและวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อนสองระยะ (Two-Stage Flow Shop) ถูกศึกษาโดย [12] โดยชิ้นส่วนประกอบจะถูกผลิตบนเครื่องจักรในระยะที่หนึ่ง และถูกนำไปประกอบรวมกันบนเครื่องจักรในระยะที่สองเพื่อลดผลรวมของเวลาเสร็จงานที่มากที่สุด (Makespan) และความล่าช้าที่มากที่สุด (Maximum Lateness) ในงานวิจัยใช้การค้นหาคำตอบ 3 แบบ ผลการทดลองพบว่า วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีวิวัฒนาการผลต่างแบบปรับเองได้ (Self-Adaptive Differential Evolution; SDE) ให้ผลที่ดีกว่าการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search; TS) [13] ศึกษาปัญหาการจัดตารางการประกอบสำหรับเครื่องจักรสองเครื่องโดยมีข้อจำกัดด้านของคงคลัง วัตถุประสงค์เพื่อลดผลรวมช่วงเวลาล่าช้าของงานแบบถ่วงน้ำหนัก (Total Weight Tardiness) ผู้วิจัยเสนอกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer Programming; MIP) และกำหนดการข้อจำกัด (Constraint Programming; CP) ผลการทดลองพบว่า MIP ให้คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่มีเวลาการผลิตสั้น ในขณะที่ CP มีแนวโน้มจะให้คำตอบที่ดีกว่าสำหรับปัญหาที่มีเวลาการผลิตนาน [14] ศึกษาการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อนสองระยะ วัตถุประสงค์เพื่อลดผลรวมของช่วงเวลาล่าช้า (Total Tardiness) ผู้วิจัยนำเสนออัลกอริทึมใหม่สองวิธีการและปรับใช้อัลกอริทึมที่มีอยู่แล้วในการหาคำตอบของปัญหา ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมใหม่ที่นำเสนอสามารถลดค่าคำตอบจากการปรับใช้ อัลกอริทึมเดิม กระบวนการฮิวริสติกและวิธีการหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search Algorithm) เพื่อหาคำตอบของการจัดตารางการประกอบไหลเลื่อนสองระยะถูกสร้างขึ้น [15] เพื่อลดผลรวมเวลาเสร็จงาน (Total Completion Time) ผลการทดลองพบว่าฮิวริสติกที่เสนอให้ผลที่ดีกว่าฮิวริสติกของ [16-17] และการหาคำตอบ

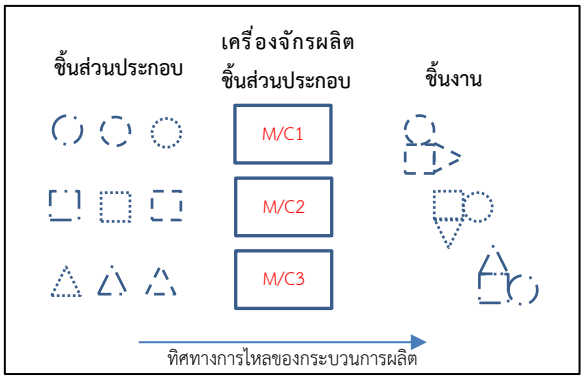
เฉพาะที่มีประสิทธิภาพการหาคำตอบดีกว่าเมตาฮิวริสติกของ [18]

ต่อมาการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้หาคำตอบสำหรับสภาวะการจัดตารางการผลิตลักษณะเดียวกันเพื่อลดผลรวมเวลาล่าช้าและต้นทุนการส่งสินค้าถูกสร้างโดย [19] แต่อย่างไรก็ตามตัวแบบนี้ไม่รับประกันการหาคำตอบในเวลาการประมวลผลที่สมเหตุสมผล ผู้วิจัยจึงได้นำเสนออัลกอริทึม ICA และ HICA มาใช้ในการหาคำตอบ ผลการทดลองพบว่า HICA ให้คำตอบที่ดีกว่า แต่เวลาประมวลผลนานกว่า CIA [20] ศึกษาสภาวะปัญหาในลักษณะเดียวกันแต่พิจารณาชิ้นส่วนประกอบที่มาจากลูกค้าแต่ละราย และมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลรวมต้นทุนของงานล่าช้าและการส่งสินค้า ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) และวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบสองระดับที่ถูกปรับปรุงเพิ่ม (Bi-level Improve Genetic algorithm; IGA) ถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผลการทดลองพบว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ประมวลผลหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วสำหรับปัญหาขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับ IGA แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นตัวแบบทางคณิตศาสตร์จะใช้เวลาการประมวลผลนานกว่า และ IGA มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบดีกว่า GA ปัญหาการจัดตารางการประกอบสองระดับยังถูกศึกษาโดย [21] วัตถุประสงค์เพื่อลดผลรวมเวลาเสร็จงาน ในงานวิจัยได้สร้างกระบวนการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต และฮิวริสติกเข้ามาใช้ในการหาคำตอบ ผลการทดลองพบว่ากระบวนการหาคำตอบทั้งหมดให้คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดในเวลาการประมวลผลที่เหมาะสม [22] ศึกษาปัญหาการประกอบแบบไหลเลื่อน (Assembly Flow Shop) วัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาเสร็จงานที่มากที่สุด ในงานวิจัยได้พัฒนาวิธีการหาคำตอบที่เรียกว่า BSIG ผลการทดสอบประสิทธิภาพพบว่า BSIG มีมีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการหาคำตอบเดิมที่มีอยู่แล้วของ [23]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตของชิ้นส่วนประกอบ บนเครื่องจักรหลายเครื่องที่เป็นอิสระต่อกัน เมื่อชิ้นส่วนประกอบของงานใดๆ ถูกผลิตครบแล้วจะถูกนำมาประกอบกันเป็นชิ้นงาน ซึ่งพบในอุตสาหกรรมขนาดเล็กดังที่กล่าวในบทนำ อีกทั้งพบในอุตสาหกรรมการผลิตสตั๊กเกอร์ฉลาก [19] และอุตสาหกรรมการประกอบเฟอร์นิเจอร์ [20] และยังเป็นลักษณะปัญหาที่พบในระบบจริง (Real Life Problem) โดยมีผู้วิจัยหลายท่าน [12-20] กล่าวถึง ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล [24] โรงงานประกอบเครื่องดับเพลิง [25] การจัดตารางแบบสอบถาม (Queries) ในระบบฐานข้อมูล [26] เป็นต้น ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงคุณลักษณะของปัญหาและใช้หาคำตอบที่ดีที่สุด หลังจากนั้นจะนำเสนอกระบวนการฮิวริสติกเพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาระบบงานจริงที่กล่าวข้างต้น วัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนงานล่าช้า ซึ่งไม่ใช่เป็นเพียงตัววัดประสิทธิภาพที่ได้รับความสนใจในแง่การศึกษาเท่านั้น แต่ยังเป็นวัตถุประสงค์ที่สำคัญในเชิงปฏิบัติจริงเนื่องจากสามารถบันทึกผลได้ง่าย [27] ฮิวริสติกที่นำเสนอจะช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมในเวลาประมวลผลที่สั้นกว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์

3. คุณลักษณะของปัญหาและตัวแบบทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้สนใจปัญหาการจัดตารางการผลิตของงาน n งาน แต่ละงานมีชิ้นส่วนประกอบ m ชิ้น กล่าวคือ แต่ละชิ้นส่วนประกอบของงาน i ($i=1,2,...,n$) จะถูกผลิตบนเครื่องจักร k ($k=1,2,...,m$) ที่แตกต่างกัน ชิ้นส่วนประกอบที่ถูกผลิตบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีลำดับการผลิตที่ l ($l=1,2,...,L$) ลักษณะของกระบวนการแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งลำดับการผลิตของชิ้นส่วนประกอบบนแต่ละเครื่องจักรอาจเหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ (Permutation or Non-Permutation)



ภาพที่ 1 แสดงคุณลักษณะการผลิต

ทั้งนี้ปัญหาในงานวิจัยอยู่ภายใต้สมมติฐาน คือ

1) เมื่อเริ่มผลิตชิ้นส่วนประกอบใดแล้วจะต้องทำจนเสร็จสมบูรณ์โดยไม่มีการหยุดหรือนำชิ้นส่วนอื่นมาแทรก (No preemption)
2) พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาสำหรับการจัดตารางการผลิตของงานทุกงานเป็นค่าคงที่
3) เครื่องจักรพร้อมใช้งานตลอดเวลา ไม่พิจารณากรณีที่เครื่องจักรเสีย
4) ชิ้นส่วนประกอบใดๆ จะถูกกำหนดให้ผลิตได้บนเครื่องจักรเพียงหนึ่งเครื่อง
5) เมื่อชิ้นส่วนประกอบทุกชิ้นของงานใดๆ ถูกผลิตเสร็จสามารถดำเนินการประกอบได้ทันที (มีกำลังการผลิตเพียงพอ)

จากคุณลักษณะของปัญหาสามารถแสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

สัญลักษณ์

n = จำนวนงานทั้งหมดในระบบ

m = จำนวนเครื่องจักรทั้งหมดในระบบ

L = จำนวนลำดับงานทั้งหมดในตารางการผลิต

U = จำนวนงานล่าช้า

i, j = ดัชนีแสดงถึงงาน $;i=1,2,...,n$

l = ดัชนีแสดงถึงลำดับงาน $;l=0,1,...,L$

k = ดัชนีแสดงถึงเครื่องจักร $;k=1,2,...,m$

u = ดัชนีแสดงถึงงานล่าช้า ; $u=1,2,...,U$

d_i = วันกำหนดส่งของงาน i

P_{ik} = เวลาการผลิตชิ้นส่วนประกอบของงาน i บนเครื่องจักร k

As_i = เวลาการประกอบของงาน i

C_{ilk} = เวลาเสร็จงานของงาน i ในลำดับ l บนเครื่องจักร k

$C\max_i$ = เวลาที่สามารถนำชิ้นส่วนมาประกอบเป็นงาน i

T_i = จำนวนที่กำหนดความล่าช้าของงาน i

J_{ilk} = งาน i ลำดับ l บนเครื่องจักร k

$J^u_{i\in(1,...,n)}$ = งาน i ที่ถูกพิจารณาเป็นงานล่าช้า

$$X_{ilk} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้าชิ้นส่วนประกอบงาน } i \text{ อยู่ในลำดับ } l \text{ บนเครื่องจักร } k \\ 0 \text{ ถ้าชิ้นส่วนประกอบงาน } i \text{ อยู่ในตำแหน่งอื่นๆ บนเครื่องจักร } k \end{cases}$$

$$N_i^U = \begin{cases} 1 \text{ ถ้าชิ้นงาน } i \text{ เป็นงานล่าช้า} \\ 0 \text{ ในทางตรงข้าม} \end{cases}$$

M = จำนวนที่มีค่ามาก

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $Minimize\ U=\sum_{i=1}^{n} N_i^U$

$$\sum_{l=1}^{L} x_{ilk}=1 \quad ;i=1,2,...,n;\ k=1,2,...,m \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ilk}=1 \quad ;l=1,2,...,L;\ k=1,2,...,m \tag{2}$$

$$C_{ilk} \geq x_{ilk}P_{ik} \quad ;i=1,2,...,n;\ l=1,2,...,L;\ k=1,2,...,m \tag{3}$$

$$C_{ilk}-C_{j(l-1)k}+M(1-x_{ilk}) \geq P_{ik} \quad ;i=1,2,...,n;\ j=1,2,...,n\ (i\neq j);\ l=2,3,...,L;\ k=1,2,...,m \tag{4}$$

$$C\max_i \geq C_{ilk} \quad ;i=1,2,...,n;\ l=1,2,...,L;\ k=1,2,...m \tag{5}$$

$$T_i \geq C\max_i + As_i - d_i \quad ;i=1,2,...,n \tag{6}$$

$$T_i \leq M \cdot N_i^U \quad ;i=1,2,...,n \tag{7}$$

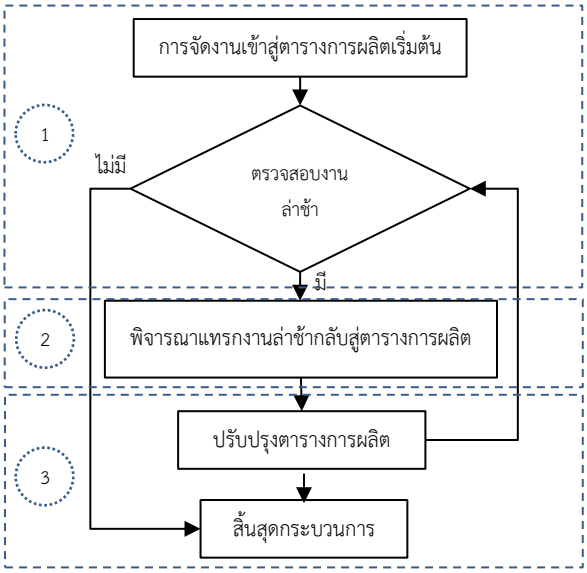
จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์**ฟังก์ชันวัตถุประสงค์**แสดงถึงผลรวมจำนวนงานล่าช้า **ข้อจำกัดที่ (1) และ (2)** เพื่อให้มั่นใจได้ว่าชิ้นส่วนประกอบของงาน i จะถูกจัดอยู่ในลำดับที่ l บนเครื่องจักร k ได้เพียงหนึ่งครั้ง **ข้อจำกัดที่ (3)** เพื่อให้เวลาเสร็จงานของชิ้นส่วนประกอบของงาน i ในตำแหน่งที่ l บนเครื่องจักร k ใดๆ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับเวลาการผลิตของมันเอง **ข้อจำกัดที่ (4)** เพื่อให้ชิ้นส่วนประกอบที่ผลิตต่อเนื่องกันบนเครื่องจักรเดียวไม่ซ้อนทับกัน **ข้อจำกัดที่ (5)** เพื่อกำหนดเวลาการเริ่มประกอบของงาน i ต้องมากกว่าหรือเท่ากับเวลาเสร็จงานของชิ้นส่วนประกอบทุกชิ้นของงานนั้นบนทุกเครื่องจักร **ข้อจำกัดที่ (6)** และ **ข้อจำกัดที่ (7)** เป็นการชี้ว่างาน i เสร็จหลังวันกำหนดส่งงานหรือไม่ และถ้าเสร็จงานหลังวันกำหนดส่งจะถูกระบุว่าเป็นงานล่าช้า

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นใช้แสดงคุณลักษณะของปัญหา และถูกใช้ประมวลผลหาคำตอบที่ดีที่สุดของจัดตารางการผลิตในงานวิจัย

4. ฮิวริสติก Nattakorn, Witid, Tanawat and Anot (NWTA)

กระบวนการฮิวริสติกถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของกฎการจัดลำดับงานโดยงานที่มีกำหนดส่งเร็วที่สุดถูกผลิตก่อน (Earliest Due Date; EDD) เนื่องจากถูกใช้จัดลำดับงานสำหรับการวัดประสิทธิภาพแบบเรคกูลาร์ (Regular Performance Measure) เพื่อลดความล่าช้าของงานในหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เช่น ช่วงเวลาล่าช้าที่มากที่สุด

(Maximum Tardiness) [28] ความล่าช้าที่มากที่สุด (Maximum Lateness) และยังถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการหาคำตอบเพื่อลดจำนวนงานล่าช้าบนเครื่องจักรเดี่ยว [27-28] อีกทั้งฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นยังอ้างอิงแนวคิดของอัลกอริทึมมัวร์-ฮอดจ์สัน ที่ใช้ลดจำนวนงานล่าช้าบนเครื่องจักรเดี่ยว โดยการนำงานที่มีผลกระทบทำให้งานอื่นๆ ล่าช้าไปไว้ในลำดับสุดท้ายของตารางการผลิต [1] ฮิวริสติกที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยซึ่งถูกให้ชื่อว่า ฮิวริสติก Nattakorn, Witid, Tanawat and Anot (ฮิวริสติก NWTA) มีแนวคิดการค้นหางานที่อาจส่งผลกระทบทำให้งานอื่นล่าช้า แต่จะหาตำแหน่งใหม่ที่เหมาะสมกว่าและส่งผลทำให้ตารางการผลิตดีขึ้น ถ้าไม่มีตำแหน่งที่เหมาะสมจึงนำงานดังกล่าวไปไว้ในลำดับสุดท้ายของตารางการผลิต กรอบแนวคิดของอิวริสติก NWTA แสดงดังแผนภูมิการไหลดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดอิวริสติก NWTA

หมายเหตุ หมายเลขกำกับใช้แสดงการจับคู่กับขั้นตอนฮิวริสติก NWTA

การจัดงานเข้าสู่ตารางการผลิตเริ่มต้น เป็นการจัดงานเข้าสู่เซต FS งานใดที่มีวันกำหนดส่งก่อนจะถูกนำไปเข้าสู่ตารางการผลิตก่อน

$$FS=\left\{J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},l},J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},l+1},\ldots,J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},L}\right\} \quad (8)$$

ตรวจสอบงานล่าช้า พิจารณาตารางการผลิตเริ่มต้น หากงาน $J_{i,l}$ ใดๆ ประกอบเสร็จแล้วเวลาเสร็จงานมากกว่าวันกำหนดส่ง งาน $J_{i,l}$ จะถูกระบุเป็นกลุ่มงานล่าช้า $J^{u}_{i\in(1,\ldots,n)};u=1,2,\ldots,U$ แล้วเลือกงานที่อาจส่งผลกระทบทำให้งานอื่นๆ ล่าช้า เพื่อพิจารณาหาตำแหน่งใหม่ที่เหมาะสม

$$CS=\left\{J^{1}_{i\in(1,\ldots,n)},J^{2}_{i\in(1,\ldots,n)},\ldots,J^{U}_{i\in(1,\ldots,n)}\right\} \quad (9)$$

หลังจากนั้นงานล่าช้าอื่นๆ จะถูกพิจารณาอยู่ในตารางการผลิตตามลำดับงานใน FS ย้ายตำแหน่งงานทุกงานไปทางซ้ายจนเวลาเสร็จงานเป็นไปตามสมการที่ (10)

$$C_{i\in\{1,\ldots,n\},l,k}-P_{i,k}=C_{i\in\{1,\ldots,n\},l-1,k};k=1,\ldots,m;\ l=2,\ldots,L \quad (10)$$

พิจารณาแทรกงานล่าช้ากลับสู่ตารางการผลิต เป็นการหาตำแหน่งใหม่สำหรับงานที่ถูกเลือก โดยเริ่มจากการย้ายตำแหน่งงานในตารางงานผลิตไปทางขวา เริ่มจากงานลำดับสุดท้ายถึงงานในลำดับหลังตำแหน่งที่จะนำงานไปแทรกเพื่อให้เกิดช่องว่าง ระยะการย้ายตำแหน่งงานพิจารณา ดังนี้

ลักษณะการย้ายตำแหน่งแบบ 1 หากงานในตำแหน่ง $l=L$ ประกอบเสร็จก่อนวันกำหนดส่ง การย้ายตำแหน่งงานจะเป็นไปตามสมการที่ (11) และงานในตำแหน่ง $l=L-1,L-2,\ldots,1$ งานใดประกอบเสร็จก่อนวันกำหนดส่งจะย้ายตำแหน่งเป็นไปตามสมการที่ (12) แต่ถ้าประกอบเสร็จหลังวันกำหนดส่งการย้ายตำแหน่งจะเป็นไปตามสมการที่ (13)

$$C_{i,L,k}+As_i=d_i;\ \ k=1,2,\ldots,m \quad (11)$$

$$C_{i,l,k}=\min\left(d_i-As_i,C_{j,l+1,k}-P_{j,k}\right)\ ;k=1,2,\ldots,m \quad (12)$$

$$C_{i,l,k}=C_{j,l+1,k}-P_{j,k}\quad ;k=1,2,\ldots,m \quad (13)$$

ลักษณะการย้ายตำแหน่งงานแบบ 2 ถ้างานในตำแหน่ง $l=L$ ประกอบเสร็จหลังวันกำหนดส่งและพิจารณาต่องานตำแหน่งที่ $l=L-1$ ต่อด้วย $l=L-2$ ไปจนถึงตำแหน่ง $l=1$ โดยหากงานที่ต่อเนื่องกันยังเป็นงานที่ประกอบเสร็จล่าช้า การย้ายตำแหน่งงานจะเป็นไปตามสมการที่ (14) จนพบงานแรกที่ประกอบเสร็จก่อนกำหนดส่ง การย้ายตำแหน่งงานจะเป็นไปตามสมการที่ (15) หลังจากนั้นการย้ายตำแหน่งงานที่เหลือจะเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (12) หรือ (13)

$$C_{i,l,k}+As_i=\infty;\ \ l=L,L-1,\ldots,1;\ \ k=1,2,\ldots,m \quad (14)$$

$$C_{i,l\in\{1,\ldots,L-1\},k} + As_i = d_i;\ \ k = 1,2,\ldots,m \qquad (15)$$

หากหาตำแหน่งที่เหมาะสมไม่ได้ งานนั้นจะถูกจัดอยู่ในเซต TS ซึ่งจะถูกจัดเป็นงานในลำดับท้ายตารางการผลิต

$$TS = \left\{ J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},l}, J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},l+1}, \ldots, J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},L} \right\} \qquad (16)$$

ปรับปรุงตารางการผลิต ปรับปรุงลำดับงานในเซต FS ตารางการผลิตจะถูกปรับปรุง ไม่ว่าจะแทรกงานล่าช้าเข้าสู่ตำแหน่งใหม่ได้หรือไม่

สิ้นสุดกระบวนการ สรุปตารางการผลิตที่ได้และจำนวนงานล่าช้าทั้งหมด โดยลำดับงานจะเริ่มจากเซต FS แล้วตามด้วยงานในเซต TS

จากกรอบแนวคิดของฮิวริสติก NWTA สามารถแสดงกระบวนการทำงานได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนฮิวริสติก NWTA

ขั้นตอนที่ 1 จัดงานเข้าสู่เซต FS ตามเงื่อนไข $d_{i\in\{1,2,\ldots,n\}} \le d_{i\in\{1,2,\ldots,n\}} \le \ldots \le d_{i\in\{1,2,\ldots,n\}}$ เพื่อสร้างตารางการผลิตเริ่มต้น, $CS = \{\ \}$, $TS = \{\ \}$

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบงานล่าช้าในเซต FS จาก $\max_k(C_{i,l,k}) + As_i > d_i; \forall i$ พิจารณาจำนวนงานล่าช้าใน CS ถ้า $U \le 2$ ทำต่อ **ขั้นตอนที่ 3** แต่ถ้า $U > 2$ ทำต่อ**ขั้นตอนที่ 4** แต่ถ้า $U = 0$ ทำต่อ **ขั้นตอนที่ 9** (1)

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณางานล่าช้าแรก $J^{u=1}_{i\in(1,\ldots,n)}$ ย้ายตำแหน่งงานในเซต FS ไปทางซ้ายตามสมการที่ (10) ทำต่อ**ขั้นตอนที่ 5**

ขั้นตอนที่ 4 หางานล่าช้าใน CS ที่มีระยะเวลาดำเนินงานมากที่สุด $P_{i\in\{1,\ldots n\},k} = \max_k \left\{ P^{u\in\{1,\ldots,U\}}_{i\in\{1,\ldots n\},k} \right\}$ เพื่อพิจารณาหาตำแหน่งงานใหม่

ขั้นตอนที่ 4.1 หากไม่ใช่งาน $J^{U}_{i\in(1,\ldots,n)}$ พิจารณางานที่เหลือใน CS กลับสู่ตารางการผลิตตามลำดับงานใน FS ย้ายตำแหน่งงานไปทางซ้ายตามสมการที่ (10) แล้วไปทำใน**ขั้นตอนที่ 5**

ขั้นตอนที่ 4.2 หากเป็นงาน $J^{U}_{i\in(1,\ldots,n)}$ หางานที่ $P_{i\in\{1,\ldots n\},k} = \max_k \left\{ P^{u\in\{1,\ldots,U-1\}}_{i\in\{1,\ldots n\},k} \right\}$ เพื่อพิจารณาหาตำแหน่งงานใหม่ พิจารณางานที่เหลือใน CS กลับสู่ตารางการผลิตตามลำดับงานใน FS แล้วย้ายตำแหน่งงานไปทางซ้ายตามสมการที่ (10) แล้วไปทำใน**ขั้นตอนที่ 5** (2)

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณาเพื่อแทรกงานระหว่างคู่ลำดับในเซต FS โดยเรียงลำดับ $\left[(J_{i,l-1}, J_{i,l-2}), (J_{i,l-2}, J_{i,l-3}), \ldots, (J_{i,l=1}, J_{i,l=0}) \right]$ แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 6**

ขั้นตอนที่ 6 ย้ายตำแหน่งงานที่เหลือในเซต FS ไปทางขวาตามลักษณะการย้ายตำแหน่งงานแบบ 1 หรือลักษณะการย้ายตำแหน่งงานแบบ 2

ขั้นตอนที่ 7 พิจารณาแทรกงาน $J^{u}_{i\in(1,\ldots,n)}$ กลับสู่ตารางการผลิตเริ่มต้นตามลำดับงานในเซต FS ตามขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 7.1 งาน $J^{u}_{i\in(1,\ldots,n)}$ จะถูกแทรกบนแต่ละเครื่องจักรได้ถ้า $C_{i,l-a,k} - P_{i,k} - C_{i,l-b,k} \ge P^{u}_{i,k}$; $k = 1,2,\ldots,m$, [(a, b) = (1, 2), (2,3),...] แล้วไปทำ**ขั้นตอน 7.2** ในทางตรงข้ามต้องไปทำ**ขั้นตอนที่ 7.3**

ขั้นตอนที่ 7.2 ถ้า $C^{u}_{i,k} + As^{u}_{i} \le d^{u}_{i}$; $k = 1,2,\ldots,m$ ไปทำ**ขั้นตอนที่ 8** ในทางตรงข้ามไปทำ**ขั้นตอน 7.3**

ขั้นตอนที่ 7.3 หากคู่ลำดับที่พิจารณาเป็นคู่ลำดับสุดท้ายงาน $J^{u}_{i\in(1,\ldots,n)}$ จะถูกนำเข้าสู่เซต TS แล้วไปทำใน**ขั้นตอนที่ 8** ในทางตรงข้ามกลับไปทำ**ขั้นตอนที่ 5**

ขั้นตอนที่ 8 ปรับปรุงตารางการผลิตในเซต FS และทำต่อ **ขั้นตอนที่ 2**

ขั้นตอนที่ 9 สรุปตารางการผลิตโดยลำดับงานเริ่มจากงานในเซต $FS = \left\{ J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},1}, J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},2}, \ldots, J_{i\in\{1,2,\ldots,n\},l} \right\}$ และตามด้วยงานในเซต $TS = \left\{ J_{i\in(1,\ldots,n),l+1}, J_{i\in(1,\ldots,n),l+2}, \ldots, J_{i\in(1,\ldots,n),L} \right\}$ สิ้นสุดกระบวนการ (3)

หมายเหตุ หมายเลขกำกับใช้แสดงการจับคู่กับกรอบแนวคิดอิวริสติก NWTA ในภาพที่ 2

จากกระบวนการหาคำตอบ แสดงตัวอย่างการใช้งานได้ ดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 ระบบการผลิตประกอบด้วยงาน 5 งาน แต่ละงานมีชิ้นส่วนประกอบ 3 ชิ้น ถูกผลิตบนเครื่องจักร 3 เครื่อง ข้อมูลที่ใช้พิจารณาจัดตารางการผลิต แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาการผลิต เวลาการประกอบ และวันกำหนดส่ง

งาน i	P_{ik}			As_i	d_i
	เครื่องจักร1	เครื่องจักร2	เครื่องจักร3		
1	5	1	4	2	9
2	2	3	10	6	14
3	4	7	6	1	19
4	6	8	3	4	24
5	9	6	1	9	30

ขั้นตอนที่ 1 จัดงานเข้าสู่เซต $FS=\{J_{1,1},J_{2,2},J_{3,3},J_{4,4},J_{5,5}\}$ ตามเงื่อนไข $d_1\le d_2\le d_3\le d_4\le d_5$, สร้างตารางการผลิตเริ่มต้น $CS=\{\ \}$ และ $TS=\{\ \}$

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบงานล่าช้าในเซต FS

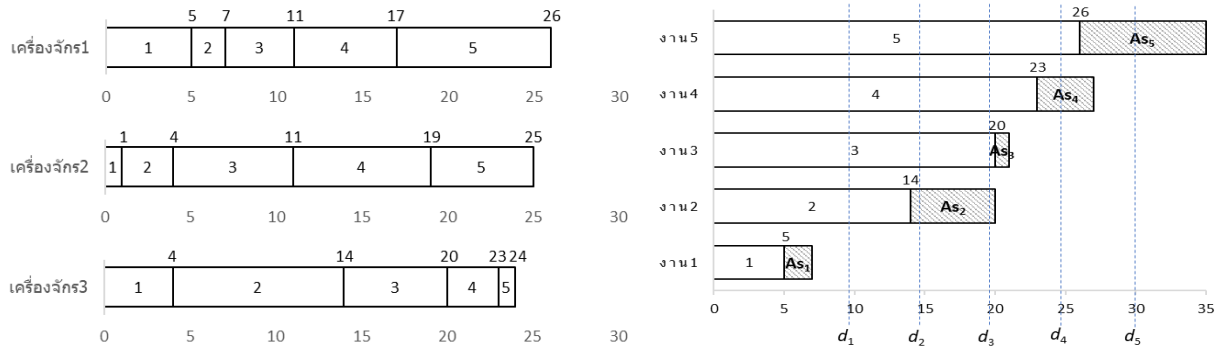
$\max_k(C_{2,2,k})+As_2>d_2$ = 14+6=20>14

$\max_k(C_{3,3,k})+As_3>d_3$ = 20+1=21>19

$\max_k(C_{4,4,k})+As_4>d_4$ = 23+4=27>24

$\max_k(C_{5,5,k})+As_5>d_5$ = 26+9=35>30

$CS=\left\{J_{i=2}^{u=1},J_3^2,J_4^3,J_5^{U=4}\right\}$ งานล่าช้า $U>2$ ทำต่อ **ขั้นตอนที่ 4**



ภาพที่ 3 ตารางการผลิตเริ่มต้นตามลำดับงานแบบงานที่มีกำหนดส่งเร็วที่สุดถูกผลิตก่อน

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณางานล่าช้าที่มีระยะเวลาดำเนินงานที่มากที่สุด $P_{i\in\{1,\dots n\},k}=\max_k\left\{P_{2,k}^{u=1},P_{3,k}^{u=2},P_{4,k}^{u=3},P_{5,k}^{U=4}\right\}=P_{2,3}=10$

ขั้นตอนที่ 4.1 พิจารณา $J_2^{u=1}$ เพื่อหาตำแหน่งใหม่ ย้ายตำแหน่งงานในตารางการผลิตตามลำดับงานใน FS ไปทางซ้าย

$C_{5,5,k}-P_{5,5,k}=C_{4,4,k};\forall k$

$C_{4,4,k}-P_{4,4,k}=C_{3,3,k};\forall k$

$C_{3,3,k}-P_{3,3,k}=C_{1,1,k};\forall k$

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณางานในคู่ลำดับ $(J_{i,l-1},J_{i,l-2})$ ในเซต FS แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 6**

ขั้นตอนที่ 6 ทำการย้ายงานในเซต FS ไปทางขวาตามลักษณะการย้ายตำแหน่งงานแบบ 2 แล้วทำ**ขั้นตอนที่ 7**

ขั้นตอนที่ 7 พิจารณาแทรกงาน J_2^u กลับสู่ตารางการผลิตในเซต FS

ขั้นตอนที่ 7.1 งาน J_2^u จะถูกแทรกงานบนแต่ละเครื่องจักรได้ถ้า

$C_{i,l-1,k}-P_{i,k}-C_{i,l-2,k}=7-5-0=2=2$ (ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k}-P_{i,k}-C_{i,l-2,k}=5-1-0=4>3$ (ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k}-P_{i,k}-C_{i,l-2,k}=7-4-0=3<10$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

ไปทำ**ขั้นตอนที่ 7.3**

ขั้นตอนที่ 7.3 $J_2^{u=1}$ ถูกนำเข้าสู่เซต $TS=\{J_{2,l=5}\}$ แล้วไปทำใน**ขั้นตอนที่ 8**

ขั้นตอนที่ 8 อัพเดตตารางการผลิตตามลำดับงานในเซต $FS=\{J_{1,1},J_{3,2},J_{4,3},J_{5,4}\}$ แล้วทำต่อใน **ขั้นตอนที่ 2**

ขั้นตอนที่ 2 ทำการตรวจสอบงานล่าช้าในเซต FS

$\max_k(C_{5,4,k})+As_5>d_5$ = 24+9=33>30

$CS=\left\{J_5^U\right\}$ งานล่าช้า $U\le 2$ ทำต่อ **ขั้นตอนที่ 3**

ขั้นตอนที่ 3 ย้ายตำแหน่งงานในเซต FS ไปซ้ายมือทำต่อ**ขั้นตอนที่ 5**

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณางานในคู่ลำดับ $(J_{i,l-1},J_{i,l-2})$ ในเซต FS แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 6**

ขั้นตอนที่ 6 ทำการย้ายงานในเซต FS ไปทางขวาตามลักษณะการย้ายตำแหน่งแบบ 1 แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 7**

ขั้นตอนที่ 7 พิจารณาแทรกงาน J_5^U กลับสู่ตารางการผลิตในเซต FS

ขั้นตอนที่ 7.1 งาน J_5^U จะถูกแทรกงานบนแต่ละเครื่องจักรได้ถ้า

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 20-6-9 = 5 < 9$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 20-8-8 = 4 < 6$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 20-3-10 = 7 > 1$ (ตรงตามเงื่อนไข)

ขั้นตอนที่ 7.3 ยังไม่ใช่คู่ลำดับสุดท้ายงาน กลับไปทำ**ขั้นตอนที่ 5**

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณางานที่ละคู่ลำดับ $(J_{i,l-2}, J_{i,l-3})$ ในเซต FS แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 6**

ขั้นตอนที่ 6 ทำการย้ายงานในเซต FS ไปทางขวาตามลักษณะการย้ายตำแหน่งแบบ 1 แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 7**

ขั้นตอนที่ 7 พิจารณาแทรกงาน J_5^U กลับสู่ตารางการผลิตในเซต FS

ขั้นตอนที่ 7.1 งาน J_5^U จะถูกแทรกงานบนแต่ละเครื่องจักรได้ถ้า

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 14-4-5 = 5 < 9$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 12-7-1 = 4 < 6$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 17-6-4 = 7 > 1$ (ตรงตามเงื่อนไข)

ขั้นตอนที่ 7.3 ยังไม่ใช่คู่ลำดับสุดท้ายงาน กลับไปทำ**ขั้นตอนที่ 5**

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณางานที่ละคู่ลำดับ $(J_{i,l-3}, J_{i,l-4})$ ในเซต FS แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 6**

ขั้นตอนที่ 6 ทำการย้ายงานในเซต FS ไปทางขวาตามลักษณะการย้ายตำแหน่งแบบ 1 แล้วไปทำ**ขั้นตอนที่ 7**

ขั้นตอนที่ 7 พิจารณาแทรกงาน J_5^U กลับสู่ตารางการผลิตในเซต FS

ขั้นตอนที่ 7.1 งาน J_5^U จะถูกแทรกงานบนแต่ละเครื่องจักรได้ถ้า

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 7-5-0 = 2 < 9$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 5-1-0 = 4 < 6$ (ไม่ตรงตามเงื่อนไข)

$C_{i,l-1,k} - P_{i,k} - C_{i,l-2,k} = 7-4-0 = 3 > 1$ (ตรงตามเงื่อนไข)

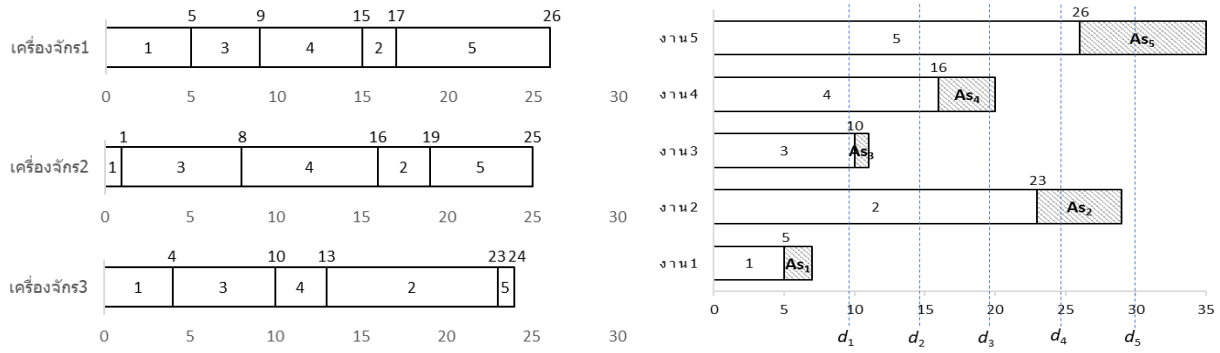
ขั้นตอนที่ 7.3 J_5^U ถูกนำเข้าสู่เซต $TS = \{J_{2,l=5}\}$ แล้วไปทำใน**ขั้นตอนที่ 8**

ขั้นตอนที่ 8 ปรับปรุงตารางการผลิตตามลำดับงานในเซต $FS = \{J_{1,1}, J_{3,2}, J_{4,3}\}$ แล้วทำต่อใน **ขั้นตอนที่ 2**

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบงานล่าช้าในเซต FS ได้ $U = 0$

ขั้นตอนที่ 9 สรุปตารางการผลิตโดยลำดับงานเริ่มจากงานในเซต $FS = \{J_{1,1}, J_{3,2}, J_{4,3}\}$ ต่อด้วยงานในเซต $TS = \{J_{2,4}, J_{5,5}\}$

จากการจัดตารางการผลิตโดยใช้ฮิวริสติก NWTA มีงานล่าช้าเท่ากับ 2 งาน สรุปเป็นตารางการผลิตได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตารางการผลิตจากฮิวริสติก NWTA

5. การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการฮิวริสติก

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติก NWTA เปรียบเทียบกับการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้ยังนำวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) เข้ามาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบอีกด้วย โดยกำหนดจำนวนประชากร คือ 100 โครโมโซม ความน่าจะเป็นการไขว้สายพันธ์ (p_c) และความน่าจะเป็นการกลายพันธุ์ (p_m) เท่ากับ 0.8 และ 0.1 ตามลำดับ อ้างอิงจาก [29] การดำเนินการเชิงพันธุกรรม ใช้การไขว้สายพันธุ์แบบยูนิฟอร์ม ออเดอร์ เบส (Uniform Order Based Crossover) ซึ่งถูกเสนอแนะโดย [30] ว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับการจัดลำดับงาน และใช้การกลายพันธุ์แบบแลกเปลี่ยน (Swapping Mutation) เงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria) ได้แก่ คำตอบของการประมวลผล 100 รุ่นที่ต่อเนื่องกันไม่ถูกปรับปรุง หรือประมวลผลครบ 1000 รุ่น ทั้งนี้ ฮิวริสติกและกระบวนการเชิงพันธุกรรม ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB R2021a ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ถูกเขียนบน GAMs Studio ทั้งสามกระบวนการหาคำตอบถูกประมวลผลผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU@2.50GHz RAM 8.00 GB

การทดลองมีตัวแปรนำเข้าแสดงดัง ตารางที่ 2 โดยเวลาการผลิตชิ้นส่วนและเวลาการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกันถูกกำหนดมาจากเลขสุ่มที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ซึ่งอ้างอิงจาก [6], [13] และเป็นการแจกแจงแบบเอกรูปเพื่อให้ครอบคลุมเวลาการทำงานของการผลิตที่หลากหลาย ทั้งนี้วันกำหนดส่งมาจากแนวคิดว่าไม่ว่างานใดๆ จะถูกกำหนดอยู่ลำดับใดบนตารางการผลิต ตั้งแต่ลำดับแรกจนลำดับสุดท้าย งานนั้นมีโอกาสจะถูกผลิตเสร็จทันกำหนดส่งงาน การทดลองสนใจปัจจัยจำนวนงาน (3 ระดับ) จำนวนเครื่องจักร (2 ระดับ) จากระดับของปัจจัยสามารถสร้างกลุ่มปัญหาทดสอบได้ 6 กลุ่ม (6 Combinations) และทำการประมวลผลกลุ่มปัญหาละ 5 การทำซ้ำ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ตัวแปรนำเข้าสำหรับสร้างปัญหาทดสอบ

ตัวแปรนำเข้า	การกำหนดค่า
จำนวนงาน (n)	5,8,10
จำนวนเครื่องจักร (m)	3,5
เวลาการผลิต (P_{ik})	Discrete Uniform [1,10]
เวลาการประกอบ (As_i)	Discrete Uniform [1,10]
วันกำหนดส่งงาน (d_i)	Discrete uniform $[\max_k(P_{ik}+As_i),(\sum_i\sum_k P_{ik}/m)+\sum_i As_i]$

ตารางที่ 3 ผลการทดลองของ 6 กลุ่มปัญหาทดสอบ

		Group1 (m =3, n =5)				Group2 (m =5, n =5)				Group3 (m =3, n =8)				Group4 (m =5, n =8)				Group5 (m =3, n =10)				Group6 (m =5, n =10)			
		NWTA		GA		NWTA		GA		NWTA		GA		NWTA		GA		NWTA		GA		NWTA		GA	
		Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]	Gap[C]	U[D]
		0	2	0	2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	2	2	3	0	1	0	1
		0	1	0	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	1	0	1	0	2	0	2	0	1	1	2
		0	1	0	1	0	3	0	3	0	1	0	1	0	2	0	2	0	1	1	2	0	2	0	2
		0	1	0	1	0	2	0	2	0	3	0	3	1	2	0	1	0	1	0	1	0	1	1	2
		0	2	0	2	0	1	0	1	0	2	1	3	0	2	1	3	0	1	1	2	1	3	1	3
Average		0	-	0		0	-	0		0	-	0.2		0.2	-	0.2		0.2	-	0.8		0.2	-	0.6	
Number of OPT found		-	5		5	-	5		5	-	5		4	-	4		4	-	4		2	-	4		2
CPU time (Sec)	Heuristic[E](GA[E])	0.017		0.026		0.037		0.028		0.03		0.036		0.041		0.034		0.032		0.035		0.054		0.036	
	Math Model[F]	0.166				0.49				13.3				14.78				1377.99				6163.22			

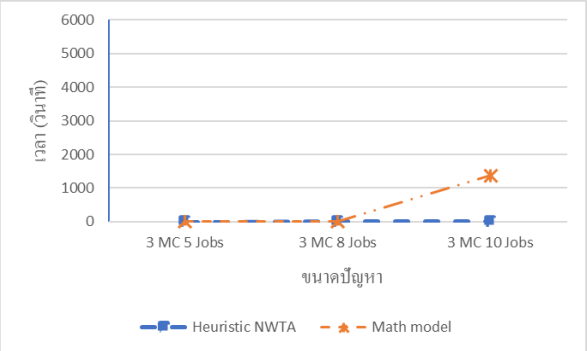
[C] ผลต่างระหว่างคำตอบที่ได้จากฮิวริสติก NWTA (หรือ GA) และตัวแบบทางคณิตศาสตร์, [D] จำนวนงานล่าช้าที่ได้จากฮิวริสติก NWTA (หรือ GA), [E] เวลาการประมวลผลโดยเฉลี่ยในหน่วย วินาที ของฮิวริสติก NWTA (หรือ GA), [F] เวลาการประมวลผลโดยเฉลี่ยในหน่วย วินาที ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์จากฮิวริสติก NWTA เปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดคือ 0.2 ในกลุ่มปัญหาที่ 4 กลุ่มปัญหาที่ 5 และกลุ่มปัญหาที่ 6 ทั้งสามกลุ่มพบคำตอบที่ดีที่สุด 4 จาก 5 ปัญหาทดสอบ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการหาคำตอบจากฮิวริสติกที่นำเสนอเปรียบเทียบกับ GA พบว่า ฮิวริสติก NWTA ให้คำตอบที่ดีกว่า โดยเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้น GA มีจำนวนปัญหาที่พบคำตอบเทียบเท่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์น้อยลง กลุ่มปัญหาที่ 3 และ 4 พบคำตอบที่ดีที่สุด 4 จาก 5 ปัญหาทดสอบ โดยกลุ่มปัญหาที่ 5 และ 6 แต่ละกลุ่มปัญหาเจอคำตอบเทียบเท่ากับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ 2 จาก 5 ปัญหาทดสอบ ค่าเฉลี่ยความแตกต่างมากที่สุดระหว่างผลลัพธ์จาก GA เปรียบเทียบกับคำตอบจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ คือ 0.8

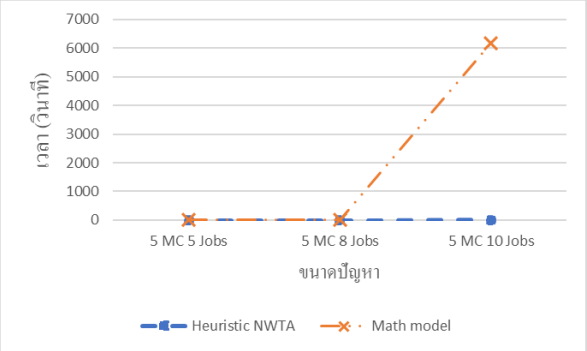
เมื่อพิจารณาเวลาประมวลผลเฉลี่ยของฮิวริสติก NWTA และ GA มีค่าน้อยตั้งแต่ปัญหาขนาดเล็กจนเมื่อขนาดปัญหาใหญ่ขึ้น แต่ตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีเวลาการประมวลผลที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้จำกัดเวลาการประมวลผลของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ คือ 10800 วินาที ซึ่งจากตารางที่ 3 พบว่าในกลุ่มปัญหาที่ 6 ซึ่งมีขนาดปัญหาใหญ่สุดมีเวลาการประมวลผลเฉลี่ยของตัวแบบคณิตศาสตร์นานที่สุด

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการหาตารางการผลิตสำหรับปัญหาขนาดเล็กที่มีจำนวนงานหรือเครื่องจักรไม่มาก ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เหมาะสำหรับการ



ภาพที่ 5 เวลาการประมวลผลกรณีเครื่องจักร 3 เครื่อง



ภาพที่ 6 เวลาการประมวลผลกรณีเครื่องจักร 5 เครื่อง

ใช้หาคำตอบ แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นฮิวริสติก NWTA เหมาะกับการใช้หาคำตอบทั้งในด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาการประมวลผล ทั้งนี้สามารถพิจารณาการเพิ่มขึ้นของเวลาประมวลผลเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้นจากกราฟในภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกลุ่มปัญหาที่มีขนาดเล็กเวลาการประมวลผลของฮิวริสติก NWTA ใกล้เคียงกับเวลาการประมวลหาคำตอบจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ นั่นหมายถึงประสิทธิภาพด้านความเร็วในการหาคำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดี แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นฮิวริสติก NWTA จะให้คำตอบที่เหมาะสมในเวลาการประมวลผลที่สั้นกว่าการหาคำตอบจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาการลดจำนวนงานล่าช้าสำหรับปัญหาการจัดตารางการประกอบที่มีงาน n งาน แต่ละงานมีชิ้นส่วนประกอบ m ชิ้น ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงถึงคุณลักษณะของปัญหาและหาคำตอบที่ดีที่สุด งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนากระบวนการทางฮิวริสติกซึ่งถูกให้ชื่อว่า ฮิวริสติก NWTA ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของกฎการจัดลำดับงาน และแนวคิดของอัลกอริทึมมัวร์-ฮอดจ์สัน ฮิวริสติกที่นำเสนอมีขั้นตอนการหางานที่ส่งผลกระทบทำให้ตารางการผลิตขาดประสิทธิภาพ แต่ก่อนที่จะตัดสินว่างานนั้นควรถูกจัดเป็นงานล่าช้าในระบบการผลิตหรือไม่ จะมีการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของงานใหม่ โดยคาดหวังว่าตารางการผลิตจะถูกปรับปรุงตามวัตถุประสงค์ ก่อนที่จะตัดสินกำหนดงานนั้นให้อยู่ในลำดับท้ายของตารางการผลิต

หลังจากพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์และฮิวริสติก NWTA แล้ว จึงทำการจัดตั้งปัญหาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการฮิวริสติก โดยการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกกับคำตอบที่ดีที่สุดจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และคำตอบที่ได้จาก GA จากผลการทดลอง ทั้งหมด 30 ปัญหา พบว่าค่าเฉลี่ยมากที่สุดของความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์จากฮิวริสติกเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด คือ 0.2 ส่วนกระบวนการ GA พบจำนวนปัญหาที่ให้คำตอบเท่ากับตัวแบบทางคณิตศาสตร์น้อยลงเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้น และประสิทธิภาพการหาคำตอบยังด้อยกว่าฮิวริสติก NWTA ทั้งนี้เวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของฮิวริสติก NWTA กระบวนการ GA มีค่าน้อยตั้งแต่กลุ่มปัญหาขนาดเล็กถึงกลุ่มปัญหาขนาดใหญ่ ส่วนตัวแบบทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาการประมวลผลที่ยาวนานขึ้นเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้น

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปัญหาที่มีขนาดเล็ก เวลาการประมวลผลของตัวแบบทางคณิตศาสตร์แตกต่างจากฮิวริสติกและกระบวนการเชิงพันธุกรรมเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นจะเห็นได้ว่าเวลาในการประมวลผลของตัวแบบทางคณิตศาสตร์นั้นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนกระบวนการเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพการหาคำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ฮิวริสติก NWTA เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการหา

คำตอบที่เหมาะสมภายในระยะเวลาประมวลผลที่สมเหตุสมผล

7. ข้อเสนอแนะและสิ่งที่สนใจจะวิจัยต่อในอนาคต

จากการศึกษาพบว่าการใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบมีระยะเวลาการประมวลผลนานเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่วิธีการฮิวริสติกมีระยะเวลาในการประมวลผลที่เร็วกว่า และมีประสิทธิภาพการหาคำตอบที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชิงพันธุกรรม การนำฮิวริสติกที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้หาคำตอบสามารถช่วยลดเวลาในการจัดตารางการผลิตให้น้อยลงและได้คำตอบที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามจากการทดสอบประสิทธิภาพพบว่ากระบวนการฮิวริสติกยังไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ในทุกปัญหาทดสอบ และหากพิจารณาเวลาการประมวลผลที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของตัวแบบทางคณิตศาสตร์หากปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ตัวแบบทางคณิตศาสตร์จึงมีแนวโน้มที่จะไม่สามารถหาคำตอบในเวลาที่ยอมรับได้หากปัญหามีขนาดใหญ่มาก จากผลการทดลองจึงพบประเด็นที่น่าสนใจและพัฒนาต่อ คือ

1) การพัฒนากระบวนการฮิวริสติกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือการสร้างกระบวนการหาคำตอบร่วมกับกระบวนการเชิงพันธุกรรมเป็นกระบวนการเชิงพันธุกรรมแบบผสม (Hybrid Genetic Algorithm) เพื่อให้สามารถพบจำนวนปัญหาที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Number of OPT found) เพิ่มมากขึ้น

2) การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการหาคำตอบในงานวิจัยนี้ค่อยๆ เพิ่มขนาดปัญหาไปเรื่อยๆ จนพบว่ามีบางปัญหา ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาประมวลผลถึงขีดจำกัดที่กำหนด จึงกำหนดเป็นขนาดของปัญหาที่ใหญ่ที่สุดในงานวิจัย ดังนั้นการทดลองประมวลผลสำหรับขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้นกว่าปัญหาที่ถูกทดสอบในงานวิจัยนี้ เพื่อหาขีดความสามารถของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษา

3) นำฮิวริสติกที่ได้พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบจากวิธีการหาคำตอบแบบอื่นๆ เช่น PSO, DE, TS เป็นต้น

4) การเพิ่มสภาวะของปัญหาก็เป็นอีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจ เช่น การเพิ่มขีดจำกัดของสถานีประกอบ ภายใต้ข้อจำกัดของจำนวนเครื่องจักรหรือจำนวนคนงานซึ่งมีหน้าที่ประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

สี่ประเด็นน่าสนใจข้างต้นเป็นการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและหาขีดจำกัดของกระบวนการหาคำตอบ อีกทั้งการเพิ่มความซับซ้อนของปัญหา ยังเป็นการเพิ่มขอบเขตการนำไปใช้งานในสถานการณ์การทำงานที่หลากหลายมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าศึกษาและวิจัยต่อในอนาคต

8. เอกสารอ้างอิง

[1] E. M. Morton, and D. W. Pentico, Heuristic Scheduling System with Applications to Production System and Project Management, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1993.

[2] J. M. Moore, “An *n* job, one machine sequencing algorithm for minimizing the number of late Jobs,” *Management Science*., vol.15, no.1, pp.102–109. 1968.

[3] J. Cheriyan, R. Ravi, and M. Skutella, “A simple proof of the Moore-Hodgson Algorithm for minimizing the number of late jobs,” *Operation Research Letters*., vol.49, pp. 842-843. 2021.

[4] J. Y. Lee and Y. D. Kim, “Minimizing the number of tardy jobs in a single-machine scheduling problem with periodic maintenance,” *Computer & Operations Research*., vol. 39, pp. 2196-2205. 2021.

[5] E. Molaee and G. Moslehi, “Minimizing the number of tardy jobs on a single machine with an availability constraint,” *Journal of Industrial Engineering*., vol.14, pp. 1-13. 2014.

[6] W. J. Chen, “Minimizing number of tardy jobs on a single machine subject to periodic maintenance,” *Omega*., vol. 37, no. 3, pp. 591–599, 2009.

[7] A. Aydileka, H. Aydilek, and A. Allahverdi, “Algorithms for minimizing the number of tardy jobs for reducing production cost with uncertain

processing times," *Applied Mathematical Modelling*., vol. 45, pp. 982 – 996, 2017.

[8] F. Ganji, and A. Jamali, "Minimizing the number of tardy jobs on single machine scheduling with flexible maintenance Time", *Journal of Algorithms and Computation*., vol. 50, no. 2, pp. 103 -119. 2018.

[9] F. D. Croce, N. D. Gupta, and R. Tadei, "Minimizing tardy jobs in flow shop with common due date," *European Journal of Operational Research*., vol. 120, pp. 375-381. 2000.

[10] A. J. Ruiz-Torres, F. J. Lo´pez, J. C. Ho, "Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs," *European Journal of Operational Research*., vol.179, pp. 302–315. 2007.

[11] A. Najat, C. Yuan., S. Gursel., and Y. Tao, "Minimizing the Number of Tardy Jobs on Identical Parallel Machines Subject to Periodic Maintenance," in *Proceeding of 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019)*, Limerick, Ireland, June 24-28, 2019, pp. 1409-1416.

[12] F. S. Al-Anzi and A. Allahverdi, "Heuristics for a two-stage assembly flowshop with bicriteria of maximum lateness and makespan," *Computers & Operations Research*., vol. 36, No. 9, pp. 2682-2689. 2009.

[13] D. Terekhov, M. K. Dogru, U. Özen, and J. Christopher Beck," Solving two-machine assembly scheduling problems with inventory constraints," *Computers & Industrial Engineering*., vol.63 , pp.120-134, 2012.

[14] A. Allahverdi, H. Aydilek, and A. Aydilek, "Two-stage assembly scheduling problem for minimizing total tardiness with setup times," *Applied Mathematical Modelling*., vol. 40, pp. 7796-7815, 2016.

[15] J. M. Framinan and P. Perez-Gonzalez," The 2-stage assembly flowshop scheduling problem with total completion time: efficient constructive heuristic and metaheuristic," *Computers and Operations Research*., vol. 88, pp. 237-246, 2017.

[16] A. Tozkapan, Ö. Kirca, and C. S. Chung, "A branch and bound algorithm to minimize the total weighted flowtime for the two-stage assembly scheduling problem," *Computer and Operation Research*., vol.30, no. 2, 309–320. 2003.

[17] F. S. Al-Anzi and A. Allahverdi, "A hybrid tabu search heuristic for the two-stage assembly scheduling problem," *International Journal of Operations Research*., vol. 3, no. 2, pp. 109–119. 2006.

[18] F. S. Al-Anzi and A. Allahverdi, "An artificial immune system heuristic for two-stage multi-machine assembly scheduling problem to minimize total completion time," *Journal of Manufacturing System*., vol. 32, no. 4, pp. 825–830. 2013.

[19] H. Kazemi, M. M. Mazdeh, and M. Rostami. "The two stage assembly flow-shop scheduling problem with batching and delivery," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 63 , pp. 98-107, 2017.

[20] S. A. Basir, M. M. Mazdeh, and M. Namakshenas, "Bi-level genetic algorithms for a two-stage assembly flow-shop scheduling problem with batch delivery system," *Computers & Industrial Engineering*., vol.126, pp. 217-231, 2018.

[21] I. S. Lee, "Minimizing total completion time in the assembly scheduling problem," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*., vol.122, pp. 211-218, 2018.

[22] H. Ochia and O. B. Drissb, "Scheduling the distributed assembly flowshop problem to minimize the makespan," *Procedia Computer Science.*, vol.164, pp.471-477, 2019.

[23] S. Hatami, R. Ruiz, and C. Andres-Romano, "The distributed assembly permutation flowshop scheduling problem," *International Journal of Production Research*., vol. 51, no. 17, pp. 5292-5308, 2013.

[24] C. N. Potts, S. V. Sevast'janov, V. A. Strusevich, LN. Van Wassenhove, and CM. Zwaneveld, "The two-stage assembly scheduling problem: complexity and approximation," *Operations Research*., vol.43, no.2, pp. 346-355, 1995.

[25] C. Y. Lee, T. C. E. Cheng, B. T. M. Lin, "Minimizing the makespan in the 3-machine assembly-type flowshop scheduling problem," *Management Science*., vol.39, pp.616-625, 1993.

[26] A. Allahverdi, F. S. Al-Anzi, "Evolutionary heuristics and an algorithm for the two-stage assembly scheduling problem to minimize makespan with setup times," *International Journal of Production Research*., vol.44, pp.4713-4735, 2006.

[27] M. Pinedo,. "SCHEDULING: Theory, Algorithms, and Systems," 4th edition. Prentice Hall, New Jersey, 2012.

[28] K. R. Baker and D. Trietsch, Principles of Sequencing and Scheduling, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

[29] A. Chaimanee and W. Supithak "A memetic algorithm to minimize the total sum of earliness tardiness and sequence dependent setup costs for flow shop scheduling problems with job distinct due windows," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*., vol. 40, no. 5, pp.1203 1218, 2018.

[30] C. Y. Lee and J. Y. Choi, "A genetic algorithm for job sequencing problems with distinct due dates and general early-tardy penalty weights," *Computers and Operations Researches*., vol.22, no. 8, pp.857-869, 1995.