

ข้อเสนอโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102499

การแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่นด้วยการหาค่าเหมาะสมสุดแบบวิทยาการศึกษานี้ก
(Solving flexible job shop scheduling problem with heuristic optimization)

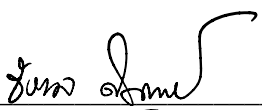
นายณัฐภาสพงษ์ กุลจรัสอำนวย เลขประจำตัว 6330171021

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ดร.ธีรพล ศิลาวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2566

ลงชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ลงชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ลงชื่อตัวแทนบริษัท
 (ดร.ธีรพล ศิลาวรรณ) วันที่ 25/4/67	 () วันที่	 () วันที่

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นเป็นปัญหาการตัดสินใจเกี่ยวกับการวางแผนการเลือกแต่ละงานเพื่อให้ใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามปัญหาในการจัดตารางงานจัดว่าเป็นปัญหาที่มีความยากระดับเอ็นพี (Non-deterministic Polynomial Hard) ซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้ในระยะเวลาพหุนาม ดังนั้นการที่จะแก้ปัญหานี้โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจึงใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบสูง จึงได้มีการนำคำตอบแบบประมาณหรือวิธีวิทยาการศึกษาสำนึกเข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ งานวิจัยนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีวิทยาการศึกษาสำนึกแบบใหม่ในการแก้ไขปัญหการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่นให้ใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าขั้นตอนวิธีที่เคยมี ผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีวิทยาการศึกษาสำนึกที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วิธีการหลอมรวมข้อมูลพบว่าระยะเวลาในการหาคำตอบที่ดีที่สุดใช้เวลาน้อยกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงเป็นอย่างมาก ผลงานวิจัยนี้ นำเสนอแนวทางใหม่ในการแก้ปัญหการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นให้สามารถใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบน้อยลง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการระบบการผลิตได้

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดตารางงาน, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, วิธีการหลอมรวมข้อมูล, วิธีการเอาแต่แรง, วิธีการเชิงพันธุกรรม

Abstract

Flexible job shop scheduling problem is a decision-making problem regarding the planning of selecting each task to minimize the total time used for all tasks. However, the flexible job shop scheduling is considered NP-hard, which cannot be solved in polynomial time. Therefore, finding the optimal solution requires a high computational time. As a result, approximation algorithms or heuristics have been developed to assist in finding solutions. This research presents a new heuristic approach to solving the flexible scheduling problem with a shorter computational time than existing methods. The results of the developed heuristic approach show that the computational time for finding the best solution is significantly reduced compared to genetic algorithms and brute force algorithms. This research proposes a new approach to solve flexible scheduling problems with reduced computational time, which can enhance production system management efficiency.

Keywords: Flexible job shop scheduling, Optimization, Data fusion, Brute force, Genetic algorithm

สารบัญ

สารบัญ.....	ค
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	1
1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน	2
1.5 องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมศาสตร์.....	2
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปัญหาการจัดตารางงาน (Job shop scheduling)	3
2.1.1 การจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่น (Flexible Job shop scheduling)	3
2.1.2 สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่นโดยที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานให้เสร็จสิ้นทั้งหมดน้อยที่สุด.....	4
2.2 ขั้นตอนวิธีการแตกกิ่งสาขา (Branch and Bound)	5
2.3 ขั้นตอนวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming)	6
2.4 วิธีการแก้ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเมต้าฮิวริสติก (Metaheuristic optimization).....	7
2.4.1 การจำแนกประเภทของขั้นตอนวิธีเมต้าฮิวริสติก.....	7
2.5 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)	9
2.6 วิธีการแก้ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฮิวริสติก.....	10
2.7 วิธีฮังกาเรียน	11
2.7.1 นิยาม	11
2.7.2 อธิบายขั้นตอนการใช้วิธีฮังกาเรียนในการแก้ปัญหา	11
2.7.3 ตัวอย่างขั้นตอนวิธีการใช้วิธีฮังกาเรียน	12
3. ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น	15
3.1 ขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)	15
3.2 ขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นด้วยการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังกาเรียน (Data fusion with method).....	18
3.3 ขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นด้วยวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	21
3.4 ขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง (Brute Force).....	23
3.5 การเปรียบเทียบคำตอบในแต่ละขั้นตอนวิธี	25

3.5.1	ผลลัพธ์ที่ได้การเปรียบเทียบในแต่ละขั้นตอนวิธี	30
3.5.2	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบของวิธีการหลอมรวมข้อมูล	32
4.	บทสรุป	35
4.1	สรุปผลการดำเนินการ	35
4.2	แผนการดำเนินงาน	35
4.3	ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข	36
5.	กิตติกรรมประกาศ	36
6.	เอกสารอ้างอิง	37
7.	ภาคผนวก	38
7.1	ภาคผนวก ก	38
7.2	ภาคผนวก ข	52

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากกระบวนการผลิตภายในโรงงานมีความซับซ้อนและทรัพยากรทางเวลาเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอันดับต้นๆในระบบการผลิต กระบวนการผลิตในโรงงานทำงานที่ได้รับมาไม่สำเร็จตามเวลาที่กำหนด จึงก่อให้เกิดความไม่พึงพอใจ การทำลายภาพลักษณ์ของโรงงานและส่งผลกระทบต่อกระบวนการเงิน ดังนั้น กระบวนการผลิตใช้เวลาในการทำงานยิ่งน้อยยิ่งส่งผลดีต่อกระบวนการผลิต

จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการมีระบบช่วยตัดสินใจในการจัดตารางงานของเครื่องจักรในโรงงาน ระบบช่วยตัดสินใจในการจัดตารางงานของเครื่องจักรทั้งหลายในโรงงานไม่เพียงเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงาน แต่ยังช่วยลดต้นทุนทางเวลาในกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น การทำงานที่ได้รับมาทั้งหมดใช้ระยะเวลาที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามปัญหาในการจัดตารางงานจัดว่าเป็นปัญหาที่มีความยากระดับเอ็นพี (Non-deterministic Polynomial Hard) ซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้ในระยะเวลาพหุนาม ดังนั้นจึงได้มีการนำวิทยาการศึกษาคำนวณ (จากนี้ไปจะเรียกวิทยาการศึกษาคำนวณว่า “ฮิวริสติก”) ซึ่งเป็นวิธีหาคำตอบแบบประมาณที่พึงคิดค้นได้เมื่อไม่มีอัลกอริทึมที่ผ่านเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาคำนวณความยากระดับเอ็นพี

ในวิธีฮิวริสติกที่เคยนำมาแก้ปัญหการจัดตารางงาน เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) และขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีดังกล่าวมีการใช้ระยะเวลาในการแก้ปัญหการจัดตารางงานค่อนข้างสูง

ดังนั้นในโครงการนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาขั้นตอนวิธีแบบฮิวริสติกสำหรับแก้ปัญหการจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่นด้วยภาษาไพธอน โดยมีขั้นตอนวิธีฮิวริสติกที่ไม่ซับซ้อน เพื่อเพิ่มความเร็วในการแก้ปัญหการจัดตารางงาน

เมื่อโครงการนี้สำเร็จ ขั้นตอนวิธีที่น่าเสนอจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นให้มีความเร็วในการแก้ปัญหาที่เร็วยิ่งขึ้นในขณะที่ผลลัพธ์ยังสามารถใช้งานได้ทั้งทางปฏิบัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีแบบฮิวริสติกสำหรับแก้ปัญหการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นให้เร็วยิ่งขึ้นในขณะที่ผลลัพธ์ยังสามารถใช้งานได้ทั้งทางปฏิบัติ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. งานใดๆที่เครื่องจักรทำงานอยู่จะไม่สามารถเริ่มทำงานได้จนกว่างานก่อนหน้าสำหรับงานดังกล่าวจะเสร็จสมบูรณ์
2. เครื่องจักรแต่ละเครื่องจะทำงานได้ครั้งละหนึ่งงานเท่านั้น

3. เมื่อเครื่องจักรเริ่มต้นทำงานนั้นๆแล้วจะต้องทำงานดังกล่าวให้เสร็จเรียบร้อย
4. ในแต่ละงานจะไม่มีงานที่มีการใช้เครื่องจักรซ้ำกัน
5. ในกำหนดการของแต่ละงานจะต้องระบุอย่างชัดเจนว่าจะต้องใช้เครื่องจักรเครื่องไหนและมีระยะเวลาในการทำงานเท่าไร

1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

ขั้นตอนวิธีสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่พัฒนาสามารถแก้ไขปัญหาการจัดตารางงานได้เร็วมากขึ้นและได้รับผลลัพธ์ที่เหมาะสม

1.5 องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมศาสตร์

1. การหลอมรวมข้อมูลเพื่อจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่นของเครื่องจักรในโรงงานด้วยวิธีฮังการีและวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม
2. ปรับใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการจัดตารางงานด้วยวิธีฮังการีและวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

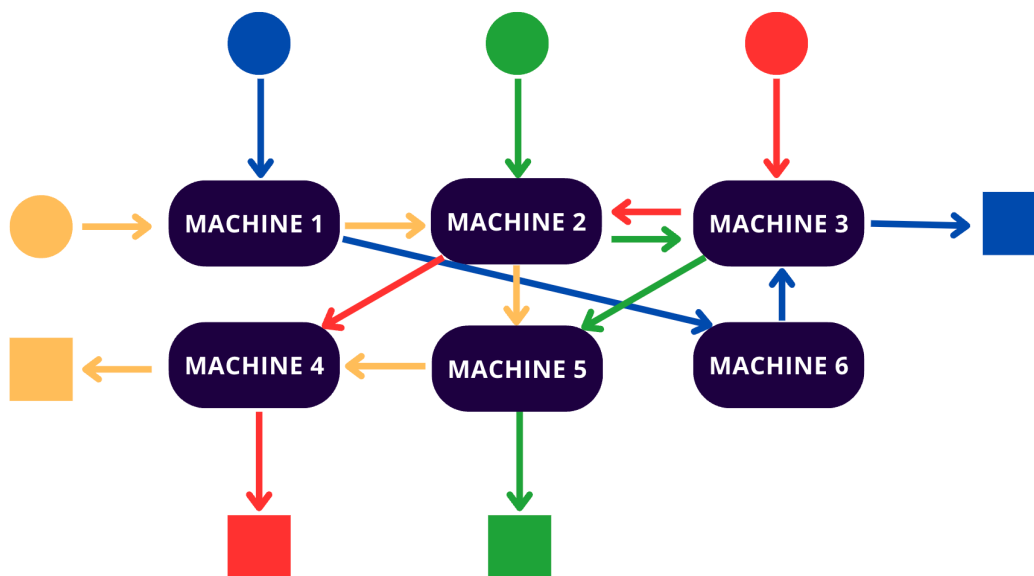
2.1 ปัญหาการจัดตารางงาน (Job shop scheduling)

2.1.1 การจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่น (Flexible Job shop scheduling)

ปัญหาการจัดตารางงานเป็นปัญหาการตัดสินใจเกี่ยวกับการวางแผนการเลือกแต่ละงานเพื่อให้ใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดน้อยที่สุด การจัดตารางงานมีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตและต้นทุนของระบบในการผลิต จึงทำให้ได้รับความสนใจในการวิจัยมานานมากกว่า 60 ปีเพื่อที่จะได้รับตารางงานที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานทั้งหมดน้อยที่สุด

เป้าหมายของการจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่น คือการหาลำดับของกระบวนการสำหรับงาน (J) จำนวน n งานบนเครื่องจักร (M) จำนวน m เครื่องจักร โดยมีเป้าหมายการจัดตารางงานที่ใช้เวลาในการทำงานให้เสร็จสิ้นเร็วที่สุดโดยประกอบไปด้วยเซตของ n งาน $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ และเซตของ m เครื่องจักร $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ และแต่ละงานจะต้องระบุกระบวนการที่ซึ่งต้องทำบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องจักรเป็นเวลาที่กำหนดมาแล้ว ยกตัวอย่างเช่น งานที่ 1 จะต้องทำงานที่เครื่องจักรที่ 1 เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเครื่องจักรที่ 2 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและเครื่องจักรที่ 3 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงตามลำดับ โดยจะใช้ $\sigma_{i,j}$ แสดงถึง การดำเนินงานของเครื่องจักรที่ i ในงานที่ j ยกตัวอย่างเช่น $\sigma_{2,1}$ จะมีค่าเป็น M_2 หรือเครื่องจักรที่ 2 และ $P_{j,\sigma_{i,j}}$ จะแสดงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานของงานที่ j ในเครื่องจักร $\sigma_{i,j}$ และ $S_{j,\sigma_{i,j}}$ จะแสดงถึงเวลาที่เริ่มต้นของการดำเนินงานของงานที่ j ในเครื่องจักร $\sigma_{i,j}$ โดยจะมีเงื่อนไขดังนี้ [1]

1. เวลาเริ่มต้นจะต้องเป็นศูนย์
2. งานใดๆที่เครื่องจักรทำงานอยู่จะไม่สามารถเริ่มทำงานได้จนกว่างานก่อนหน้านี้สำหรับงานดังกล่าวจะเสร็จสมบูรณ์
3. เมื่อเครื่องจักรเริ่มต้นทำงานนั้นๆแล้วจะต้องทำงานดังกล่าวให้เสร็จเรียบร้อย
4. เครื่องจักรแต่ละเครื่องจะทำงานได้ครั้งละหนึ่งงานเท่านั้น โดยที่เวลาที่ใช้ในการทำงานให้เสร็จสิ้นทั้งหมด



รูปที่ 1 ปัญหาการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่น

2.1.2 สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่นโดยที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานให้เสร็จสิ้นทั้งหมดน้อยที่สุด

$$\text{Minimize: } C_{max} = \max_{j \in [1, n]} \{S_{j, \sigma(i, j)} + P_{j, \sigma(i, j)}\} \quad (1)$$

Subject to:

$$S_{j, \sigma(i, j)} \geq 0 \quad (2)$$

$$S_{j, \sigma(i, j)} + P_{j, \sigma(i, j)} \leq S_{p, \sigma(i+1, j)} ; 1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq m - 1 \quad (3)$$

$$S_{j, \sigma(i, j)} + P_{j, \sigma(i, j)} \leq S_{p, \sigma(k, j)} \text{ or } S_{p, \sigma(k, p)} + P_{p, \sigma(k, p)} \leq S_{p, \sigma(i, j)} \quad (4)$$

$$j, p \in [1, n], i, k \in [1, m], \sigma(i, j) = \sigma(k, p) \quad (4)$$

โดยที่ความหมายของตัวแปรจะแสดงในตารางที่ 1

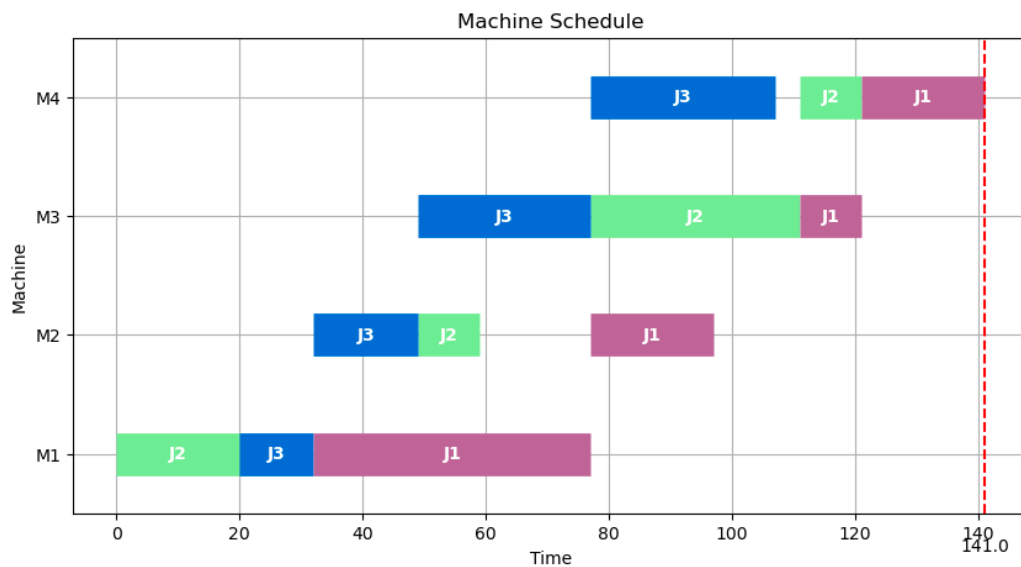
ตารางที่ 1 ตารางตัวแปรสำหรับสมการที่ (1) ถึง (4)

C_{max}	เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด
$\sigma(i, j)$	การดำเนินงานของเครื่องจักรที่ i ในงานที่ j
$P_{j, \sigma(i, j)}$	ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานของงานที่ j ในเครื่องจักร $\sigma(i, j)$
$S_{j, \sigma(i, j)}$	เวลาที่เริ่มต้นของการดำเนินงานของงานที่ j ในเครื่องจักร $\sigma(i, j)$

สมการที่ (1) จะเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ การคำนวณเวลาในการทำงานให้เสร็จสิ้นทั้งหมด คือต้องการระยะเวลาในการทำงานให้เสร็จสิ้นทั้งหมดน้อยที่สุด สมการที่ (2) คือการให้เวลา

ที่เริ่มต้นไม่เป็นจำนวนลบ สมการที่ (3) คือ การกำหนดให้เครื่องจักรเริ่มทำงานใดๆจะต้องทำงานให้เสร็จสิ้นและสมการที่ (4) คือ การกำหนดไม่ให้แต่ละงานใช้เครื่องจักรเครื่องพร้อมกัน [5]

เนื่องจากการจัดตารางงานเป็นปัญหาที่มีความยากระดับเอ็นพี (Non-deterministic Polynomial Hard) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดได้น้อยที่สุดในเวลาพหุนามสำหรับการแก้ปัญหา [2] การจัดตารางนี้จะสามารถแก้ได้โดยใช้สมการ(2) ,(3) ,และ(4) วิธีการในการแสดงผลการจัดตารางงานจะแสดงออกมาในรูปแบบของแผนภูมิแกนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลลัพธ์การจัดตารางงานของ 3 งาน และ 4 เครื่องจักร

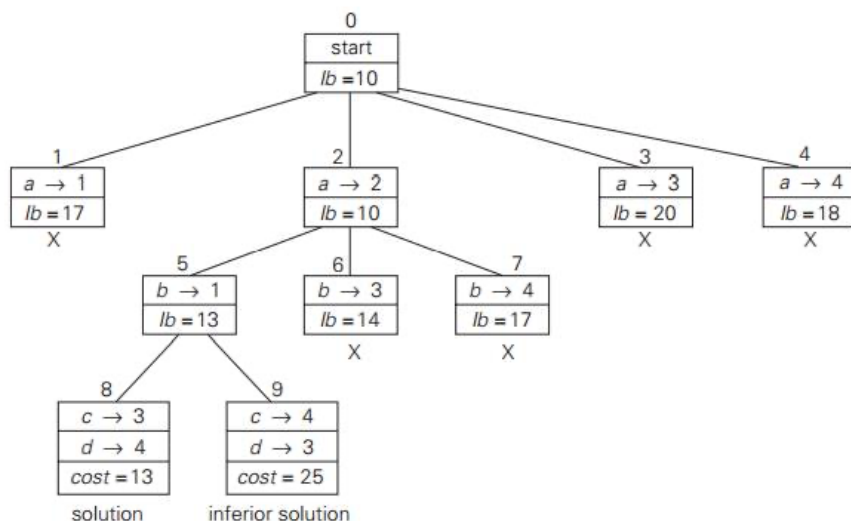
2.2 ขั้นตอนวิธีการแตกกิ่งสาขา (Branch and Bound)

ขั้นตอนวิธีการแตกกิ่งสาขาเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งมักจะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุด โดยขั้นตอนวิธีจะมีวิธีดังนี้

1. แบ่งปัญหาหลักออกเป็นปัญหาย่อยที่เล็กกว่าและง่ายต่อการแก้ปัญหาซึ่งจุด จะแทนถึงปัญหาย่อยและจะมีทางแยกของตัวแปรที่ทำการแตกกิ่ง (Branching)

2. การตัดแต่งกิ่งซึ่งก็คือการเปรียบเทียบขอบเขตของปัญหาย่อยกับคำตอบที่พบจนถึงตอนนี้ หากขอบเขตของปัญหาย่อยแย่กว่าคำตอบในปัจจุบัน จะทำการละเลยกิ่งย่อยทั้งหมดทั้งเพราะว่าปัญหาย่อยนี้ไม่สามารถนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้

3. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 และ 2 ไปจนพบคำตอบที่ดีที่สุด ข้อดีของขั้นตอนวิธีการแตกกิ่งสาขา คือขั้นตอนวิธีนี้สามารถหาคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ แต่ข้อเสียของขั้นตอนการแตกกิ่งสาขา คือใช้ทรัพยากรในการคำนวณสูงและใช้เวลานานในการหาคำตอบโดยจะแสดงขั้นตอนวิธีการแตกกิ่งสาขา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 3 ขั้นตอนวิธีการแตกกิ่งสาขา (ที่มา: brainkart.com)

2.3 ขั้นตอนวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming)

การแก้ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มเป็นประเภทของปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดที่ผสมผสานองค์ประกอบของการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมเชิงเส้นและโปรแกรมจำนวนเต็มเข้าด้วยกัน และวิธีกำหนดการเชิงเส้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะต้องเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น และตัวแปรบางตัวแปรจะต้องเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับสถานการณ์ที่ตัวแปรแสดงถึงสิ่งต่างๆ เช่น จำนวนคน

ตัวอย่างโจทย์ เช่น มีบริษัทรับเหมาก่อสร้างกำลังดำเนินการ 3 โครงการ บริษัทจำเป็นต้องจัดสรรทรัพยากรเช่น แรงงาน เครื่องจักร และวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพโดยต้องการผลกำไรสูงสุดโดยคำนึงถึงทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละโครงการและใช้ไม่เกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่ดังนั้นบริษัทควรที่จะเลือกทำโปรเจกไหนและจำนวนเท่าใด โดยที่บริษัทมีข้อมูลทรัพยากรที่มีอยู่และข้อมูลแต่ละโปรเจกดังนี้

ทรัพยากร	จำนวนที่มี
แรงงาน	500 ชั่วโมง
เครื่องจักร	500 ชั่วโมง
วัสดุ	600 หน่วย

โปรเจค	กำไร	แรงที่ใช้	เครื่องจักรที่ใช้	วัสดุที่ใช้
1	500	4	2	5
2	400	6	1	4
3	600	5	3	6

โดยจะเขียนออกมาได้เป็นสมการดังนี้

$$\text{maximize } 500x_1 + 400x_2 + 600x_3$$

subject to :

$$4x_1 + 6x_2 + 5x_3 \leq 500$$

$$2x_1 + x_2 + 3x_3 \leq 400$$

$$5x_1 + 4x_2 + 6x_3 \leq 600$$

$$x_i \geq 0 \text{ โดยที่ } i = 1, 2, 3$$

$$x_i \in I$$

2.4 วิธีการแก้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเมต้าฮิวริสติก (Metaheuristic optimization)

ในการหาค่าที่ดีที่สุดโดยเมต้าฮิวริสติกเป็นการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดโดยสามารถใช้ได้ในงานออกแบบทางวิศวกรรมศาสตร์ไปจนถึงเศรษฐศาสตร์ ในความเป็นจริงปัญหาส่วนใหญ่มักจะเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นและมีหลายจุดสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดที่ซับซ้อนหลายประการ อีกทั้งการแก้ปัญหาแบบแน่นอน (Deterministic Approach) ใช้ระยะเวลาในการคำนวณค่อนข้างสูงและใช้ทรัพยากรมาก ดังนั้นวิธีเมต้าฮิวริสติกเป็นวิธีการหรือกลไกการค้นหาคำตอบของปัญหาแบบประมาณที่ดีเพียงพอภายในเวลาอันสั้นโดยไม่ต้องคำนึงถึงการทำให้ได้คำตอบที่ต่อเนื่องอีกทั้งยังสามารถแก้ไขปัญหามีความซับซ้อนสูงได้

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยเมต้าฮิวริสติกจะถือได้ว่าเป็นกลยุทธ์หรือกรอบการทำงานในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละโจทย์ปัญหา ตัวอย่างเมต้าฮิวริสติก เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด

2.4.1 การจำแนกประเภทของขั้นตอนวิธีเมต้าฮิวริสติก

2.4.1.1 การจำแนกประเภทของเมต้าฮิวริสติกตามประเภทของการค้นหาคำตอบ

ในการจำแนกประเภทของเมต้าฮิวริสติกตามประเภทจะแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ดังที่แสดงในรูปที่ 4

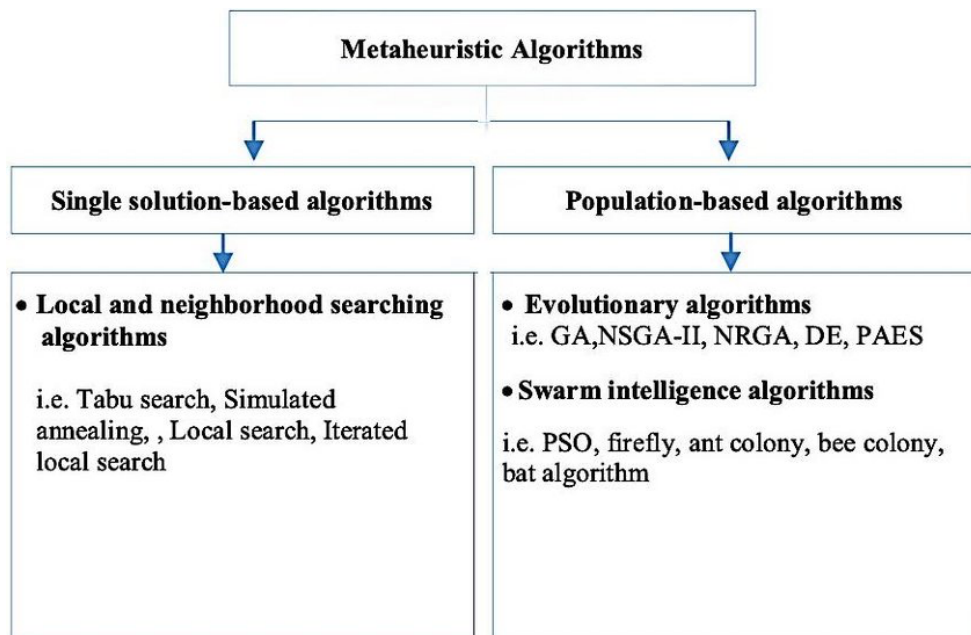
1. การค้นหาคำตอบแบบเดี่ยว

ในการค้นหาคำตอบแบบเดี่ยวมักจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณและทรัพยากรน้อยกว่าการค้นหาคำตอบแบบกลุ่ม แต่เนื่องจากการค้นหาคำตอบจะค้นหาเฉพาะพื้นที่เล็กๆ ของชุดคำตอบ ทำให้มีโอกาสติดอยู่กับคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะพื้นที่นั้นได้ง่ายกว่าตัวอย่างขั้นตอนวิธีแบบเมต้าฮิวริสติกที่ใช้การค้นหาคำตอบแบบเดี่ยว เช่น ขั้นตอนวิธีการค้นหาคำตอบแบบทาบู (Tabu search) และ ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated annealing) โดยจะมีขั้นตอนดังนี้ สุ่มเลือกคำตอบมา 1 คำตอบจากนั้นจะนำคำตอบมาปรับปรุงแก้ไขให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นภายในจำนวนรอบที่กำหนดหรือเมื่อเจอคำตอบที่พึงพอใจ

2. การค้นหาคำตอบแบบกลุ่ม

ในการค้นหาคำตอบแบบกลุ่มโดยขั้นตอนวิธีการค้นหาคำตอบแบบกลุ่มมักจะเริ่มต้นด้วยการสร้างคำตอบแบบสุ่มหลายคำตอบและนำมาปรับปรุงคำตอบเหล่านั้น ยกตัวอย่างเช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะมีการเลือกสรร (selection) การผสมข้าม (cross over) และการกลายพันธุ์ (mutation) โดยที่ข้อดีของการค้นหาคำตอบแบบกลุ่มจะหลีกเลี่ยงติดคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ได้ดีกว่า เนื่องจากรักษาความหลากหลายของคำตอบไว้ ทำให้สามารถสำรวจบริเวณต่างๆ ของพื้นที่คำตอบได้หลากหลาย ลดโอกาสติดอยู่กับคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะพื้นที่นั้น แต่ใช้ทรัพยากรในการคำนวณมากกว่าการค้นหาแบบเดี่ยวโดยที่การค้นหาคำตอบแบบกลุ่มจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีเป็นหลักๆ ได้แก่

- ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm) ซึ่งจะจำลองหลักการคัดเลือกตามธรรมชาติและการดำเนินการทางพันธุกรรมเพื่อพัฒนาประชากรของคำตอบโดยใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรมต่างๆ
- ขั้นตอนวิธีความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm intelligence) ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมร่วมกันของสัตว์เช่น มด หรือ นกโดยใช้แนวคิดต่างๆ เช่น การเรียนรู้ทางสังคมเพื่อค้นหาคำตอบ

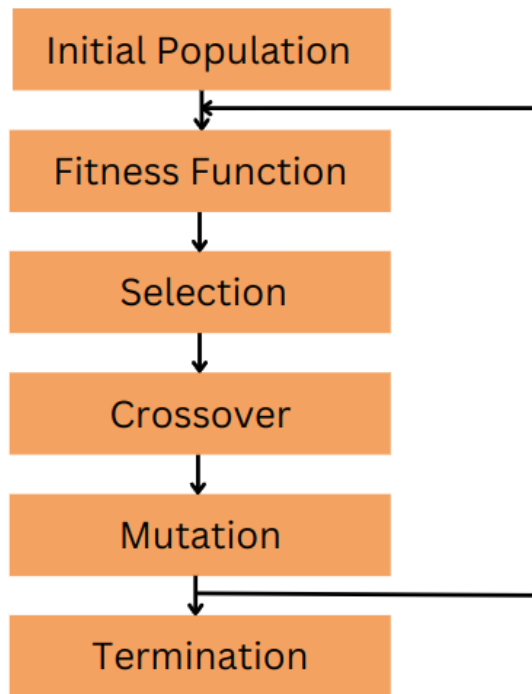


รูปที่ 4 การจำแนกประเภทของเมต้าฮิวริสติกตามประเภทของคำตอบ [6]

2.5 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากแนวคิดเรื่องการวิวัฒนาการของโครโมโซมดังแสดงในรูปที่ 5 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 คือการสุ่มเลือกสร้างโครโมโซมรุ่นแรก คือ การสุ่มเลือกคำตอบที่เป็นไปได้ขึ้นมา โดยโครโมโซมจะมีลักษณะเป็นเวกเตอร์, เมทริกซ์ เป็นต้น
- ขั้นตอนที่ 2 คือการเลือกโครโมโซมที่แข็งแรงให้อยู่ต่อในรุ่นถัดไปซึ่งก็นำโครโมโซมไปแทนในฟังก์ชันจุดประสงค์ตัดสินใจว่าคำตอบใดใกล้เคียงกับเป้าหมายจะตัดสินใจว่าโครโมโซมนั้นแข็งแรง จากนั้นจึงคัดสรรโครโมโซมที่แข็งแรงให้อยู่ต่อและกำจัดโครโมโซมที่แข็งแรงน้อยออกไป
- ขั้นตอนที่ 3 คือการแลกเปลี่ยนรหัสพันธุกรรม โดยหยิบโครโมโซมอย่างสุ่มมา 1 คู่ สลับยีนกันในบางส่วน ได้โครโมโซมลูกใหม่ 1 โครโมโซม ทำแบบนี้จนได้จำนวนโครโมโซมเท่ากับขั้นตอนการสร้างโครโมโซมรุ่นแรก
- ขั้นตอนที่ 4 คือการกลายพันธุ์ โดยบางตำแหน่งของโครโมโซมจะถูกเปลี่ยน
- ขั้นตอนที่ 5 คือ การทำซ้ำขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 จนครบจำนวนรอบที่กำหนดหรือได้คำตอบที่พึงพอใจแล้ว



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (ที่มา: medium.com)

2.6 วิธีการแก้ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฮิวริสติก

เป็นวิธีการหรือกลไกการค้นหาคำตอบของปัญหาแบบประมาณที่ดีเพียงพอภายในเวลาอันสั้นโดยไม่ต้องคำนึงถึงการทำให้ได้คำตอบที่ต่อเนื่อง หรือได้รับคำตอบอย่างละเอียด

ซึ่งวิธีการฮิวริสติกมักถูกใช้ในสถานการณ์ที่คำนึงถึงประสิทธิภาพและความเร็วในการหาคำตอบที่เหมาะสม อีกทั้งวิธีการฮิวริสติกนิยมใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนและยากต่อการคำนวณ

- 1) ฮิวริสติกแบบสร้าง (Construction heuristic) เป็นวิธีการโดยเน้นการสร้างคำตอบทีละส่วนจนกว่าจะได้คำตอบทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้น วิธีการนี้มีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง
- 2) ฮิวริสติกแบบพัฒนา (Improvement heuristic) เป็นวิธีการในการปรับปรุงคำตอบที่มีอยู่แล้วเพื่อให้คำตอบมีผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องสร้างคำตอบใหม่ทั้งหมด โดยวิธีนี้มักจะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคำตอบที่ได้จากวิธีการอื่นๆ ทำให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 3) ฮิวริสติกแบบผสม (Hybrid heuristic) เป็นวิธีการฮิวริสติกที่นำเอาวิธีการฮิวริสติกแบบสร้างและวิธีการฮิวริสติกแบบพัฒนามาผสมกันเพื่อให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยวิธีการฮิวริสติกแบบผสมนี้จะใช้วิธีการสร้างคำตอบทีละส่วนจนได้คำตอบทั้งหมด และนำเอาคำตอบที่ได้มาปรับปรุงเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.7 วิธีฮังกาเรียน

2.7.1 นิยาม

วิธีการฮังกาเรียนจะใช้กับปัญหาการมอบหมายงานให้แต่ละคนที่จะทำได้ต้นทุนที่ใช้น้อยที่สุด ปัญหาการมอบหมายงานมีลักษณะดังนี้ มีงานจำนวน n งานซึ่งจะจัดให้คน n คน งานหนึ่งชิ้นจะมอบหมายให้คนทำเพียงหนึ่งคนเท่านั้น ไม่มีการมอบหมายงานซ้ำ ถ้ากำหนดให้ x_{ij} คืองานที่ i มอบหมายให้คนที่ j ทำ โดยที่ $x_{ij} = \{0,1\}$ และมีค่าใช้จ่ายเป็น C_{ij} เป้าหมายของการมอบหมายงานคือ ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดและเขียนสมการออกมาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{minimization } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \\ & \text{subject to } \sum_{i=1}^n x_i = 1 \text{ โดยที่ } i = 1, 2, 3, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n x_j = 1 \text{ โดยที่ } j = 1, 2, 3, \dots, n \\ & x_{ij} = \{0,1\} \end{aligned}$$

2.7.2 อธิบายขั้นตอนการใช้วิธีฮังกาเรียนในการแก้ปัญหา

การแก้ปัญหาด้วยวิธีฮังกาเรียนจะต้องมีเมทริกซ์จัตุรัสขนาด n เป็นอันดับแรก โดยมีขั้นตอนดังนี้ [4]

ขั้นตอนที่ 1 นำค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละแถวมาลบกับทุกสมาชิกที่อยู่ในแถว ดังนั้นผลลัพธ์ตารางใหม่ที่ได้จะมี 0 อยู่ในทุกแถว

ขั้นตอนที่ 2 นำค่าที่น้อยที่สุดในของแต่ละหลักมาลบกับ ทุกสมาชิกที่อยู่ในหลักนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 3 ลากเส้นที่น้อยที่สุดเพื่อปิดทับศูนย์ทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 3.1 หากได้จำนวนเส้น n เส้นที่สามารถปิดทับศูนย์ทั้งหมด ซึ่งหมายถึงการเลือกค่า 0 ในแต่ละแถว หลังจากนั้นขั้นตอนวิธีฮังกาเรียนจะสิ้นสุดลง

ขั้นตอนที่ 3.2 หากได้จำนวนเส้นน้อยกว่า n เส้นให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าที่น้อยที่สุดที่ยังไม่ได้ถูกปิดทับด้วยเส้นในขั้นตอนที่ 3 หลังจากนั้นให้ลบค่านั้นออกจากทุกตัวที่ยังไม่ได้ถูกปิดทับและบวกเพิ่มให้กับทุกตัวที่เป็นจุดตัดของแต่ละเส้น แล้วจึงวนกลับไปหาขั้นตอนที่ 3

2.7.3 ตัวอย่างขั้นตอนวิธีการใช้วิธีฮังกาเรียน

พิจารณาตัวอย่างงานสี่งาน (J1,J2,J3,J4) ที่ต้องทำโดยพนักงานสี่คน (W1,W2,W3,W4) คนละหนึ่งงานต่อคนวัตถุประสงค์คือการมอบหมายงานที่เหมาะสมให้แก่พนักงานแต่ละคน เพื่อที่จะได้ระยะเวลาในการทำงานทั้งหมดน้อยที่สุด

	J1	J2	J3	J4
W1	82	83	69	92
W2	77	37	49	92
W3	11	69	5	86
W4	8	9	98	23

ในแต่ละแถวจะมีค่าที่น้อยที่น้อยที่สุด คือ 69, 37, 5 และ 8 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 1 : นำค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละแถวมาลบกับทุกๆสมาชิกที่อยู่ในแถวนั้นๆซึ่งในแต่ละแถวจะมีค่าที่น้อยที่น้อยที่สุด คือ 69, 37, 5 และ 8 ตามลำดับ ดังนั้นผลลัพธ์ตารางใหม่ที่ได้จะมี 0 อยู่ในทุกๆแถวอย่างน้อย 1 ตัว

	J1	J2	J3	J4	
W1	13	14	0	23	-69
W2	40	0	12	55	-37
W3	6	64	0	81	-5
W4	0	1	90	15	-8

ขั้นตอนที่ 2 : นำค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละคอลัมน์มาลบ โดยที่จะมีค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละคอลัมน์ คือ 0, 0, 0 และ 15 ตามลำดับ

	J1	J2	J3	J4
W1	13	14	0	23
W2	40	0	12	55
W3	6	64	0	81
W4	0	1	90	15
	0	0	0	-15

ขั้นตอนที่ 3 : ลากจำนวนเส้นที่น้อยที่สุดในการทับศูนย์ทุกตัว จะสังเกตได้ว่าใช้จำนวนเส้นทั้งหมดในเพื่อที่จะลากทับ 0 ทุกตัว ใช้ทั้งหมด 3 เส้นซึ่งน้อยกว่าขนาดของเมทริกซ์จึงต้องทำขั้นตอนที่ 4

	J1	J2	J3	J4
W1	13	14	0	8
W2	40	0	12	40
W3	6	64	0	66
W4	0	1	90	0

ขั้นตอนที่ 4: หาค่าที่น้อยที่สุดที่ยังไม่ได้ถูกปิดทับด้วยเส้นในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งมีค่าเป็น 6 หลังจากนั้นให้ลบค่านั้นออกจากทุกตัวที่ยังไม่ได้ถูกปิดทับและบวกเพิ่มให้กับจุดตัดของแต่ละเส้น แล้วจึงวนกลับไปขั้นตอนที่ 3

	J1	J2	J3	J4
W1	7	8	0	2
W2	40	0	18	40
W3	0	58	0	60
W4	0	1	96	0

ขั้นตอนที่ 3 ลากจำนวนเส้นที่น้อยที่สุดในการทับศูนย์ทุกตัว

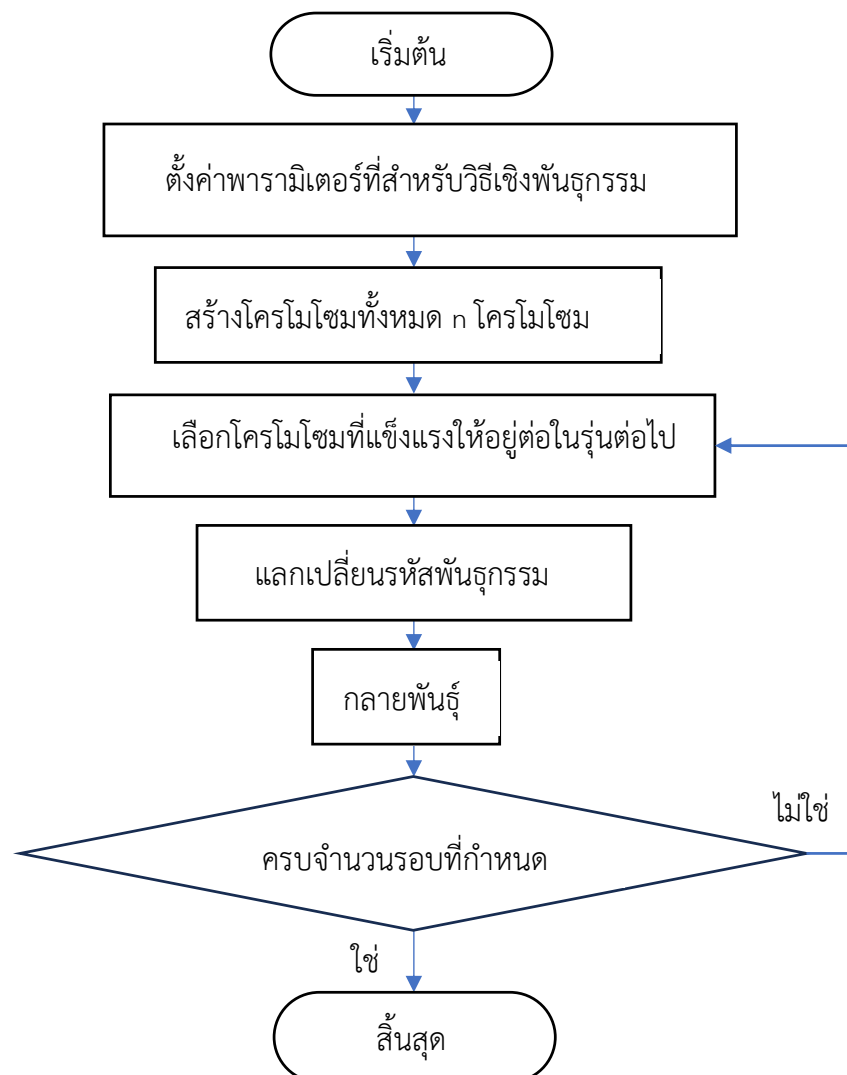
	J1	J2	J3	J4
W1	7	8	0	2
W2	40	0	13	40
W3	0	58	0	60
W4	0	1	95	0

จะเห็นว่าใช้จำนวนเส้นทั้งหมด 4 เส้น ซึ่งมีขนาดเท่ากับเมทริกซ์ โดยคำตอบจากค่าศูนย์ที่อยู่ในตารางโดยตำแหน่งศูนย์ในตารางจะมีดังนี้ W1 คอลัมน์ J3, W2 คอลัมน์ J2, W3 คอลัมน์ J1, W3 คอลัมน์ J3, W4 คอลัมน์ J1 และ W4 คอลัมน์ J4 จะสังเกตได้ว่าในแถว W1 และ แถว W2 จะมีค่าศูนย์เพียงค่าเดียว ดังนั้นเราจะมอบหมายงาน J3 ให้แก่ W1 และ มอบหมายงาน J2 ให้แก่ W2 และจะมีแถว W3 และ แถว W4 ที่จะมีค่าศูนย์อยู่ 2 ตำแหน่งแต่ว่างงาน J4 จะสามารถมอบหมายได้แค่ W4 จึงจำเป็นต้องมอบหมายงาน J1 ให้แก่ W3 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ W1 ควรทำงาน J3, W2 ทำงาน J2, W3 ควรทำงาน J1 และ W4 ควรทำงาน J4

3. ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

โครงการนี้จะออกแบบและพัฒนาขั้นตอนวิธีฮิวริสติกที่ใช้แก้ปัญหาการจัดตารางงานแบบยัดเยียดให้รวดเร็วขึ้น โดยใช้ขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับขั้นตอนวิธีฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นมาโดยใช้ภาษาไพธอน โดยขั้นตอนวิธีฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้น คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม, ขั้นตอนวิธีการห่อหุ้มข้อมูลด้วยวิธีฮังกาเรียนและขั้นตอนวิธีการห่อหุ้มด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม สำหรับการแก้ไขปัญหาการจัดตารางงานแบบยัดเยียด และในการแก้ปัญหานี้เกณฑ์ของปัญหาที่นำมาทดสอบได้แก่ปัญหา la01 ถึง la15 [7] และ ft06, ft10 [8] ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทดสอบทั้งหมด 50 รอบ, ขั้นตอนวิธีการห่อหุ้มข้อมูลด้วยวิธีฮังกาเรียนและขั้นตอนวิธีการห่อหุ้มด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มโดยจะทำการทดสอบทั้งหมด 100 รอบโดยที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ CPU Ryzen7 5500 Ram 8 GB ในการทดสอบ

3.1 ขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)



รูปที่ 6 แผนผังของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาการจัดการตารางงานแบบยืดหยุ่นด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมจะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิธีเชิงพันธุกรรมจะตั้งค่าพารามิเตอร์ดังนี้
จำนวนรอบ 1000 รอบและจำนวนโครโมโซม 1000 โครโมโซม

1	2	1	3	2	1	3	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---

รูปที่ 7 ตัวอย่างโครโมโซม

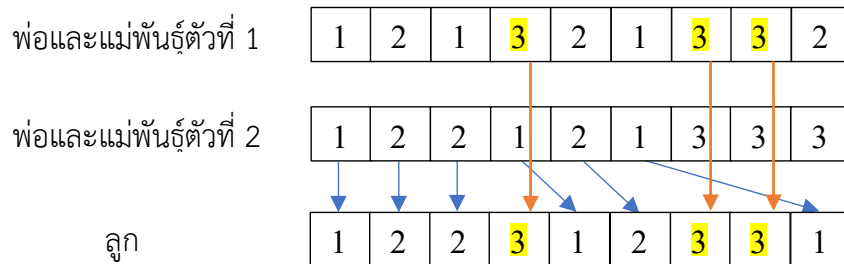
ตารางที่ 2 ตารางตัวอย่างลำดับของเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละงาน

	ลำดับที่ 1	ลำดับที่ 2	ลำดับที่ 3
Job1	M2	M3	M1
Job2	M1	M3	M2
Job3	M3	M2	M1

โครโมโซมเป็นเวกเตอร์ขนาด จำนวนงาน \times จำนวนเครื่องจักร โดยโครโมโซมจะบ่งบอกถึงลำดับของงานที่มอบหมายแก่ระบบและในหนึ่งโครโมโซมจะประกอบไปด้วยยีนซึ่ง ยีนตำแหน่งที่ i แสดงการมอบหมายงาน a_i ลำดับที่ j ให้กับระบบ โดย j คือ จำนวนครั้งที่ a_i ปรากฏในยีนที่ 1 ถึง i หรือลำดับของเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละงาน ยกตัวอย่างเช่น ยีนตำแหน่งที่ 7 ในรูปที่ 7 แสดงการมอบหมายงานที่ 3 ลำดับที่ 2 โดยยีนตำแหน่งที่ 7 คือการมอบหมายงานที่ 3 เครื่องจักรที่ 2 ซึ่งลำดับของเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละงานสามารถดูได้จากตารางที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 คือการเลือกโครโมโซมจะเลือกโครโมโซมที่ให้ค่าตอบที่ดีที่สุด 10 เปอร์เซ็นต์ให้อยู่รอดในรุ่นถัดไปจากนั้นอีก 90 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะนำมาแลกเปลี่ยนพันธุกรรมกัน

ขั้นตอนที่ 3 คือการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมโดยที่จะสุ่มเลือกพ่อและแม่พันธุ์โดยตอนแรกสุ่มเลขงาน จากนั้นจะนำเอาตำแหน่งงานที่สุ่มมาได้จากพ่อและแม่พันธุ์ตัวที่ 1 มาใส่ที่ตำแหน่งของลูก จากนั้นจะมีตำแหน่งที่ว่างอยู่ให้พนักงานที่เหลือจากพ่อและแม่พันธุ์ตัวที่ 2 ที่ไม่ใช่ตัวเลขที่ของงานที่สุ่มมาได้จากพ่อและแม่พันธุ์ตัวที่ 1 มาแทนที่ตำแหน่งที่ว่างอยู่ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 8 โดยสมมติว่าเลขที่สุ่มได้เท่ากับ 3



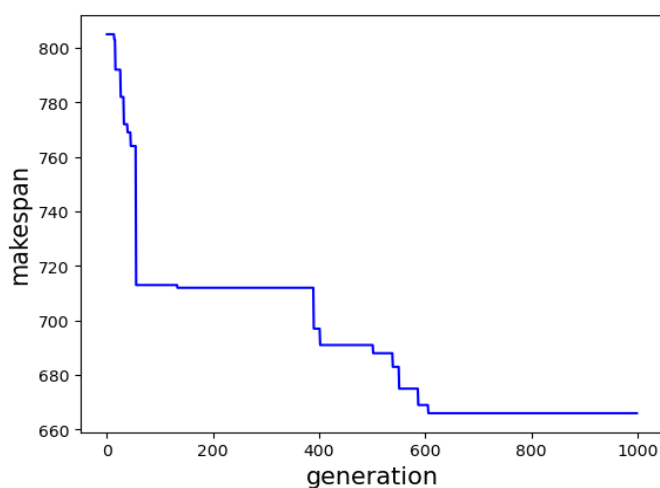
รูปที่ 8 ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม

ขั้นตอนที่ 4 คือการกลายพันธุ์โดยจะสุ่มเลือกตำแหน่งออกมา 2 ตำแหน่งของงานที่ต่างกกันและสลับตำแหน่งนั้นดังรูปที่ 9



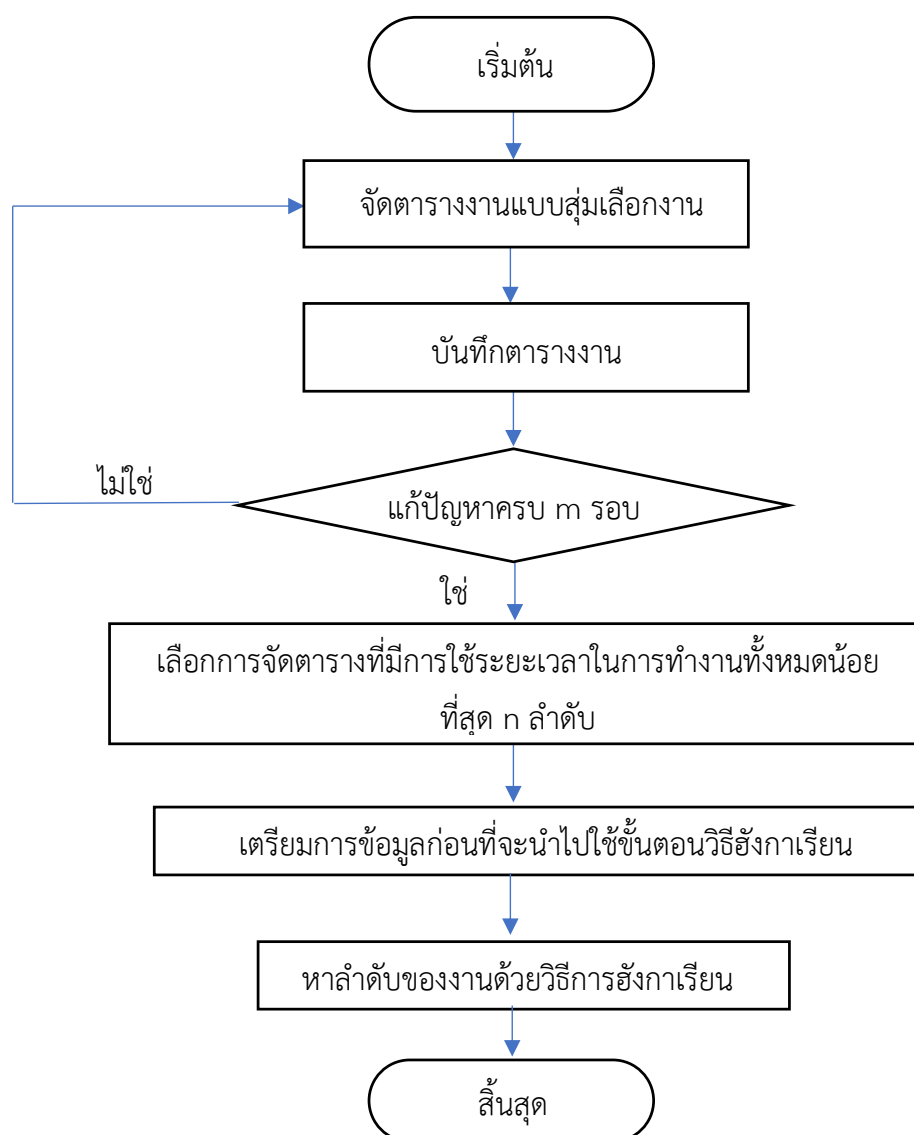
รูปที่ 9 ขั้นตอนการกลายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 5 คือทำซ้ำขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 จนครบจำนวนรอบที่กำหนด



รูปที่ 10 ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3.2 ขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดการตารางงานที่ยืดหยุ่นด้วยการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี (Data fusion with Hungarian method)

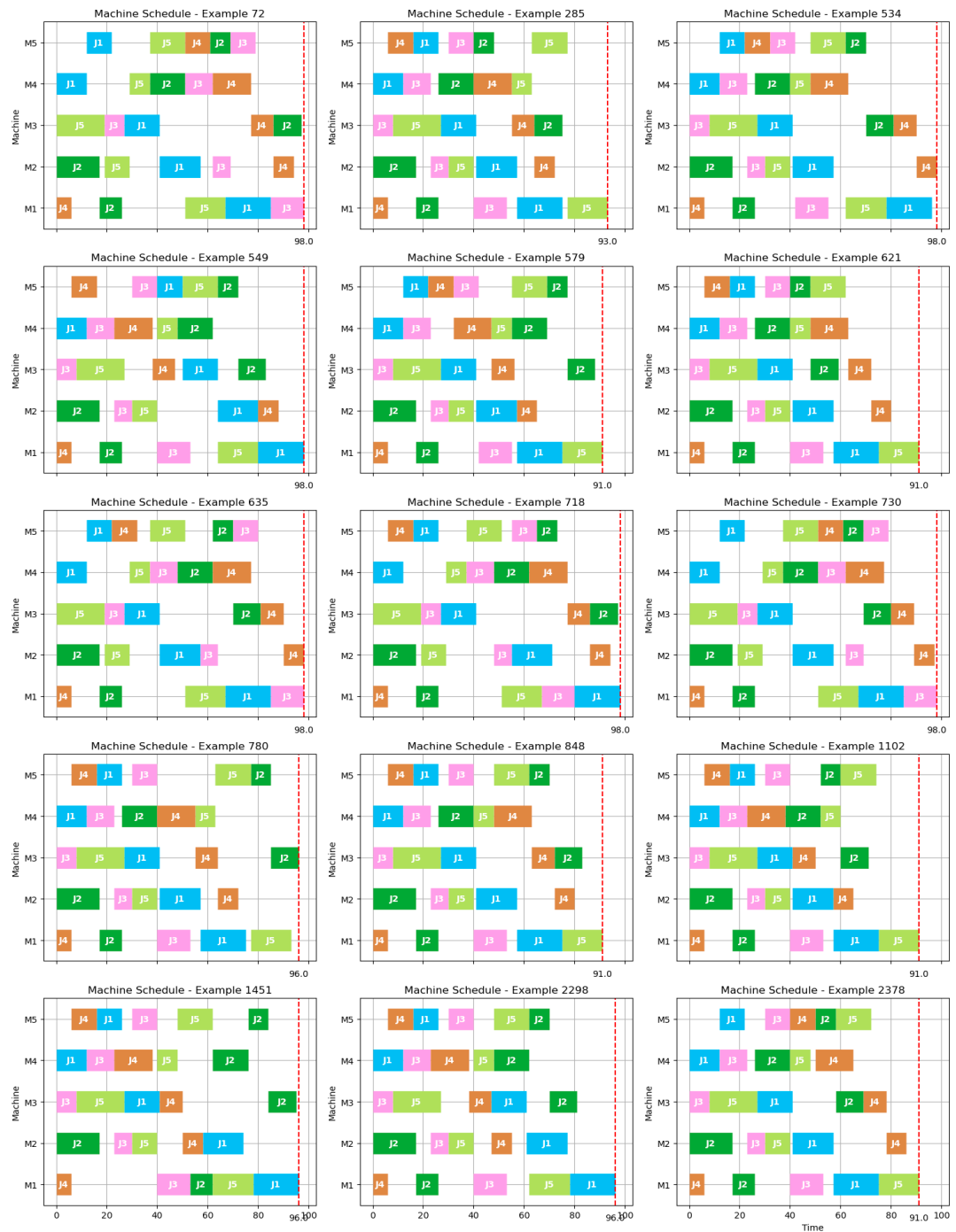


รูปที่ 11 แผนผังของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี

ขั้นตอนวิธีของการแก้ปัญหาการจัดการตารางงานแบบยืดหยุ่นด้วยการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีจะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ จัดตารางงานแบบสุ่มทั้งหมด m ตารางงาน

ขั้นตอนที่ 2 คือ เลือกตารางงานที่ดีที่สุดทั้งหมด 15 จากขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 12 กราฟแผนภูมิแกนต์การจัดตารางงานที่ได้ใช้ระยะเวลาในการทำงานทั้งหมดน้อยที่สุด
15 ตารางงานในปัญหาการจัดตารางงาน 5 งาน 5 เครื่องจักร

ขั้นตอนที่ 3 คือ การเตรียมข้อมูลก่อนที่จะนำไปหาลอรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังกาเรียน

ขั้นตอนที่ 3.1 คือ ใส่ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตารางงาน โดยจะใส่ค่าถ่วงน้ำหนักมากให้กับ
ตารางงานที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานทั้งหมดน้อย

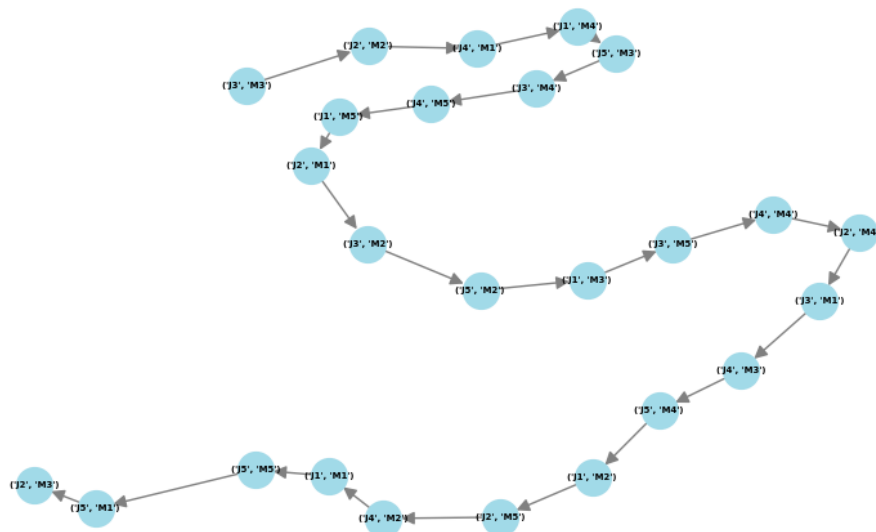
สูตรค่าถ่วงน้ำหนัก คือ $\frac{\max \{x_1, x_2, \dots, x_i\}}{x_i}$ โดยที่ x_i คือระยะเวลาในการทำงานทั้งหมด
ของแต่ละตาราง

ขั้นตอนที่ 3.2 คือ สร้างตารางความถี่ทุกงานและเครื่องจักรที่ทำงานก่อนและหลังของทุกตารางงานโดยค่าความถี่ของแต่ละตารางเท่ากับค่าถ่วงน้ำหนักของตารางนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 3.3 คือ แทนค่าความถี่ที่มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนของค่าความถี่ที่สูงสุดในตารางด้วยค่าที่มากกว่าความถี่สูงสุดมากๆและตัดแถวที่มีค่านั้นทั้งแถวทิ้ง

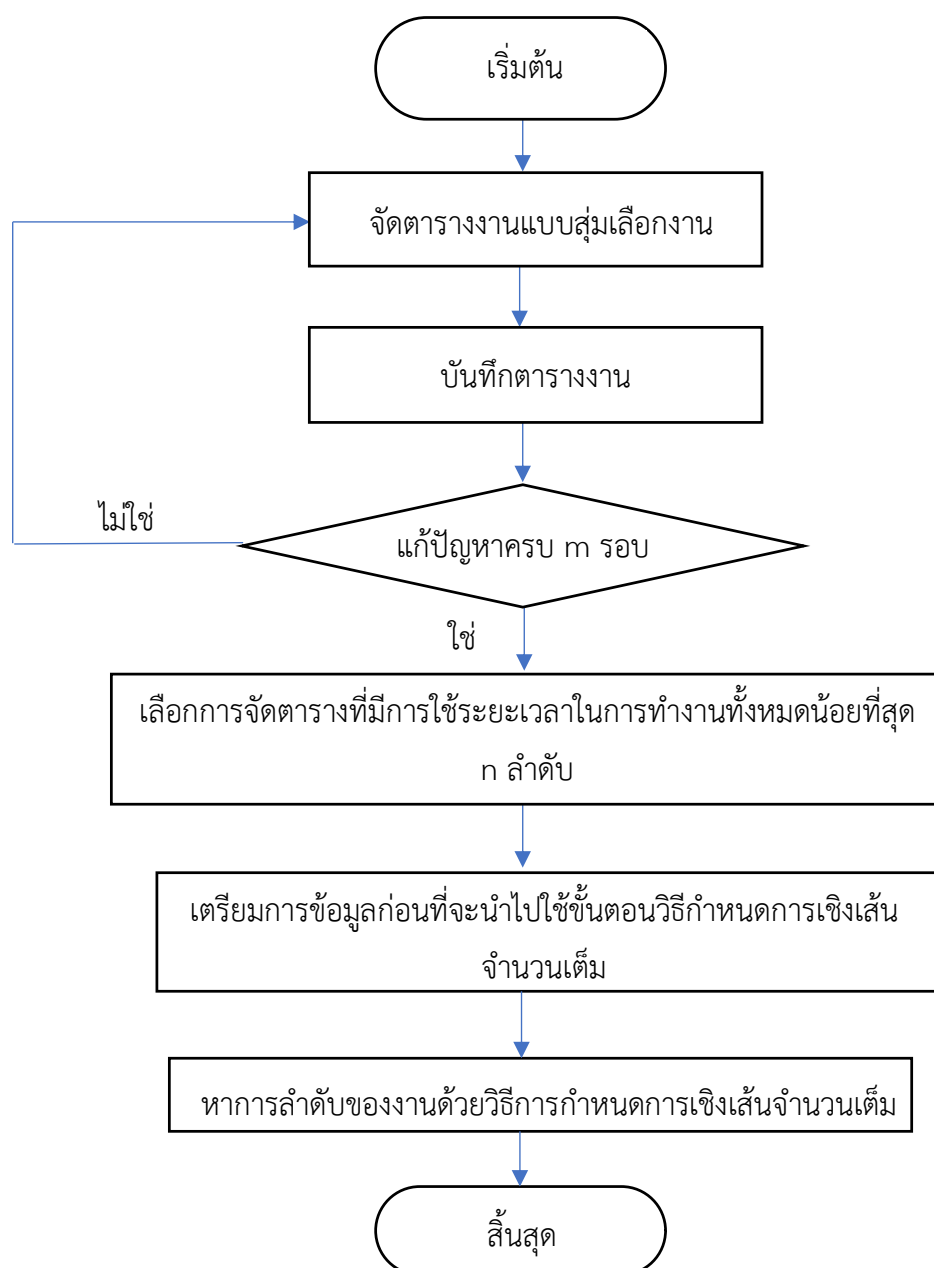
ขั้นตอนที่ 3.4 คือ นำค่าที่มากที่สุดที่ไม่ใช่ค่าที่ถูกแทนที่ในตารางมาลบกับค่าที่อยู่ในตารางทุกค่า

ขั้นตอนที่ 4 คือ การหาลำดับของงานด้วยวิธีฮังกาเรียน



รูปที่ 13 ลำดับของตารางงานโดยวิธีฮังกาเรียน

3.3 ขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดการตารางงานที่ยืดหยุ่นด้วยวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Data fusion with Integer programming)



รูปที่ 14 แผนผังของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ขั้นตอนวิธีของการแก้ปัญหาการจัดการตารางงานแบบยืดหยุ่นด้วยการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มจะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ สุ่มจัดการตารางงานแบบสุ่มทั้งหมด m ตารางงาน

ขั้นตอนที่ 2 คือ เลือกเอาตารางที่ดีที่สุดทั้งหมด n ตารางงานทั้งหมด m ตาราง

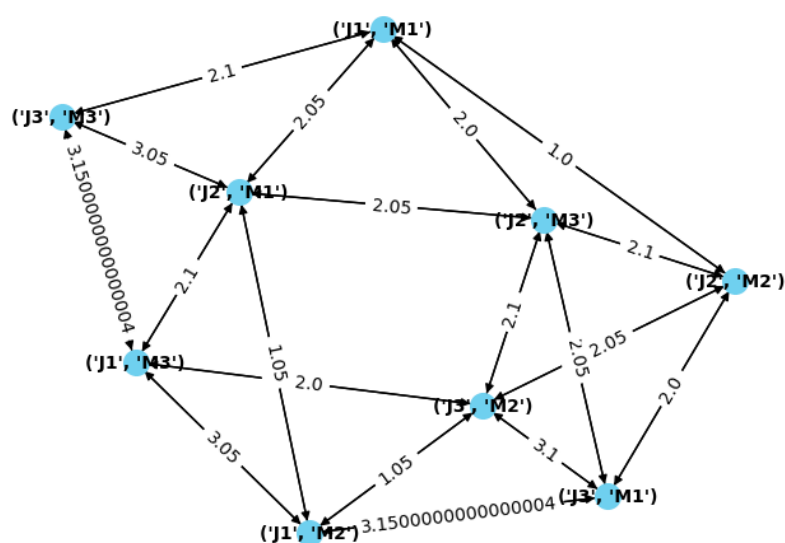
ขั้นตอนที่ 3 คือ การเตรียมข้อมูลก่อนที่จะนำไปหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มจะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 3.1 คือ ใส่ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตารางงาน โดยจะใส่ค่าถ่วงน้ำหนักมากๆให้กับตารางงานที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานทั้งหมดน้อย

สูตรค่าถ่วงน้ำหนัก คือ $\frac{\max \{x_1, x_2, \dots, x_i\}}{x_i}$ โดยที่ x_i คือระยะเวลาในการทำงานทั้งหมดของแต่ละตาราง

ขั้นตอนที่ 3.2 คือ ลำดับตารางงานเราจะมองเป็นจุดกับเส้นโดยที่จุดจะแทนคู่อันดับของงานและเครื่องจักรส่วนเส้นทางของแต่ละจะมีค่าเท่ากับค่าถ่วงน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 3.3 คือ นำแต่ละลำดับของตารางงานมารวมกัน



รูปที่ 15 รูปการสร้างเส้นทางของอันดับของงานและเครื่องจักร

ตารางที่ 3 ตัวอย่างตารางที่การรวมกันของแต่ละตารางงาน

	J2, M2	J3, M3	J3, M1	J1, M3	J1, M1	J3, M2	J2, M3	J1, M2	J2, M1
J2, M2	0.00	0.00	2.00	0.00	1.00	2.05	2.10	0.00	0.00
J3, M3	0.00	0.00	0.00	3.15	2.10	0.00	0.00	0.00	3.05
J3, M1	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	2.05	3.15	0.00
J1, M3	0.00	3.15	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	3.05	2.10
J1, M1	1.00	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	2.05
J3, M2	2.05	0.00	3.10	2.00	0.00	0.00	2.10	1.05	0.00
J2, M3	2.10	0.00	2.05	0.00	2.00	2.10	0.00	0.00	2.05
J1, M2	0.00	0.00	3.15	3.05	0.00	1.05	0.00	0.00	1.05
J2, M1	0.00	3.05	0.00	2.10	2.05	0.00	2.05	1.05	0.00

ขั้นตอนที่ 4 คือ การหาลำดับของงานด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยจะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \\
 & \text{subject to} \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1 \text{ โดยที่ } i = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & \quad \quad \quad \sum_{i=1}^n x_j = 1 \text{ โดยที่ } j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & \quad \quad \quad x_{ij} = \{0, 1\}
 \end{aligned}$$

โดยที่ x_{ij} คือตัวแปรตัดสินใจว่าแถวที่ i ไปยังหลักที่ j

C_{ij} คือ ค่าในแถวที่ i หลักที่ j ของตารางการรวมกันของแต่ละตารางงาน

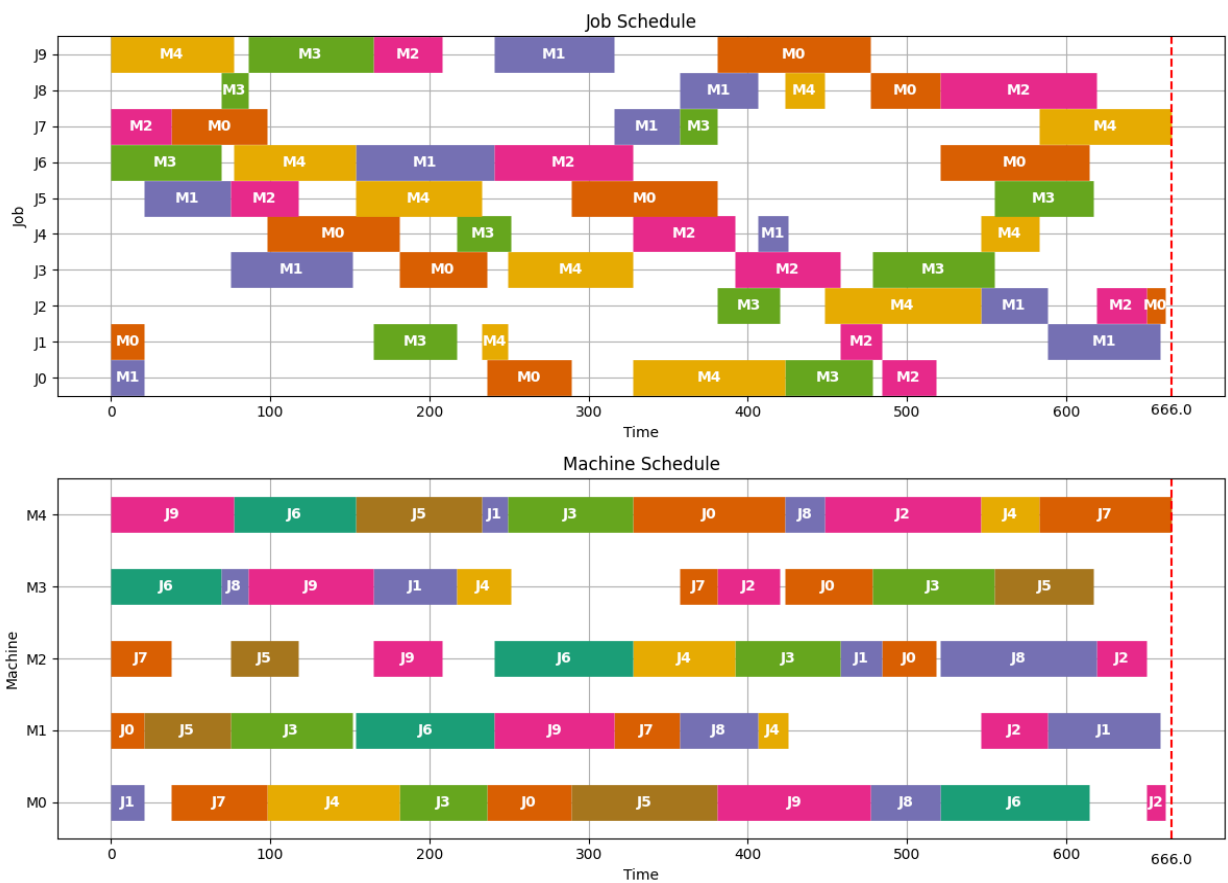
3.4 ขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง (Brute Force)

ในขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้จากการหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด และนำเอาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งปัญหาหลักที่เกิดจากขั้นตอนวิธีนี้ระยะเวลาในการหาคำตอบสูงมากและใช้ทรัพยากรในการคำนวณสูงมากดังที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลคำตอบที่ได้จากวิธีการแตกกิ่งสาขา

ปัญหา	คำตอบ	ระยะเวลาในการหาคำตอบ
la01	666	7735.84
la02	655	7845.98
la03	597	7698.98
la04	590	7765.46
la05	593	7748.56
la06	926	15441.68
la07	890	15510.67
la08	863	15567.65
la09	951	15401.32
la10	958	15050.18
la11	1222	28120.56

la12	1039	28034.71
la13	1150	28345.78
la14	1292	28020.68
la15	1207	28206.45
ft06	55	2580.34
ft10	930	19168.44



รูปที่ 16 คำตอบของปัญหา la01 ด้วยวิธีการเอาแต่แรง

3.5 การเปรียบเทียบคำตอบในแต่ละขั้นตอนวิธี

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la01

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la01	Brute Force	666	7735.48
	Genetic algorithm	684.22	1016.89
	Data fusion with Hungarian method	801.82	1.31
	Data fusion with Integer programming	776.9	1.59

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la02

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la02	Brute Force	655	7845.98
	Genetic algorithm	691.64	1015.24
	Data fusion with Hungarian method	816.95	1.32
	Data fusion with Integer programming	790.04	1.63

ตารางที่ 7 ตารางเปรียบเทียบแต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la03

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la03	Brute Force	597	7698.97
	Genetic algorithm	648.88	1014.19
	Data fusion with Hungarian method	738.77	1.32
	Data fusion with Integer programming	718.69	1.66

ตารางที่ 8 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la04

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la04	Brute Force	590	7765.46
	Genetic algorithm	621.84	1055.44
	Data fusion with Hungarian method	743.14	1.32
	Data fusion with Integer programming	720.92	1.63

ตารางที่ 9 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la05

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la05	Brute Force	593	7748.56
	Genetic algorithm	595.66	946.98
	Data fusion with Hungarian method	639.86	1.34
	Data fusion with Integer programming	619.61	1.66

ตารางที่ 10 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la06

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la06	Brute Force	926	15441.68
	Genetic algorithm	933.34	1100.76
	Data fusion with Hungarian method	1079.37	3.29
	Data fusion with Integer programming	1063.72	3.53

ตารางที่ 11 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la07

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la07	Brute Force	890	15510.67
	Genetic algorithm	948.62	1128.44
	Data fusion with Hungarian method	1078.66	3.31
	Data fusion with Integer programming	1052.37	3.5

ตารางที่ 12 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la08

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la08	Brute Force	863	15567.65
	Genetic algorithm	916.88	1153.97
	Data fusion with Hungarian method	1072.33	3.31
	Data fusion with Integer programming	1046.95	3.52

ตารางที่ 13 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la09

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la09	Brute Force	951	15401.32
	Genetic algorithm	961.86	1151.52
	Data fusion with Hungarian method	1139.37	3.3
	Data fusion with Integer programming	1117.25	3.54

ตารางที่ 14 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la10

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la10	Brute Force	958	15050.18
	Genetic algorithm	963.24	1153.77
	Data fusion with Hungarian method	1081.95	3.31
	Data fusion with Integer programming	1055.32	3.54

ตารางที่ 15 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la11

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la11	Brute Force	1222	28120.56
	Genetic algorithm	1261.26	1366.45
	Data fusion with Hungarian method	1437.39	6.12
	Data fusion with Integer programming	1423	7.05

ตารางที่ 16 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la12

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la12	Brute Force	1039	28034.71
	Genetic algorithm	1065.28	1262.18
	Data fusion with Hungarian method	1256.15	6.12
	Data fusion with Integer programming	1232.2	7.08

ตารางที่ 17 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la13

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la13	Brute Force	1150	28345.78
	Genetic algorithm	1186.62	1268.79
	Data fusion with Hungarian method	1382.92	6.11
	Data fusion with Integer programming	1355.97	6.97

ตารางที่ 18 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la14

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la14	Brute Force	1292	28020.68
	Genetic algorithm	1292	1373.87
	Data fusion with Hungarian method	1418.19	6.12
	Data fusion with Integer programming	1395.91	7.02

ตารางที่ 19 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา la15

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
la15	Brute Force	1207	28206.45
	Genetic algorithm	1369.29	1373.3
	Data fusion with Hungarian method	1542.88	6.12
	Data fusion with Integer programming	1504.92	7.03

ตารางที่ 20 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา ft06

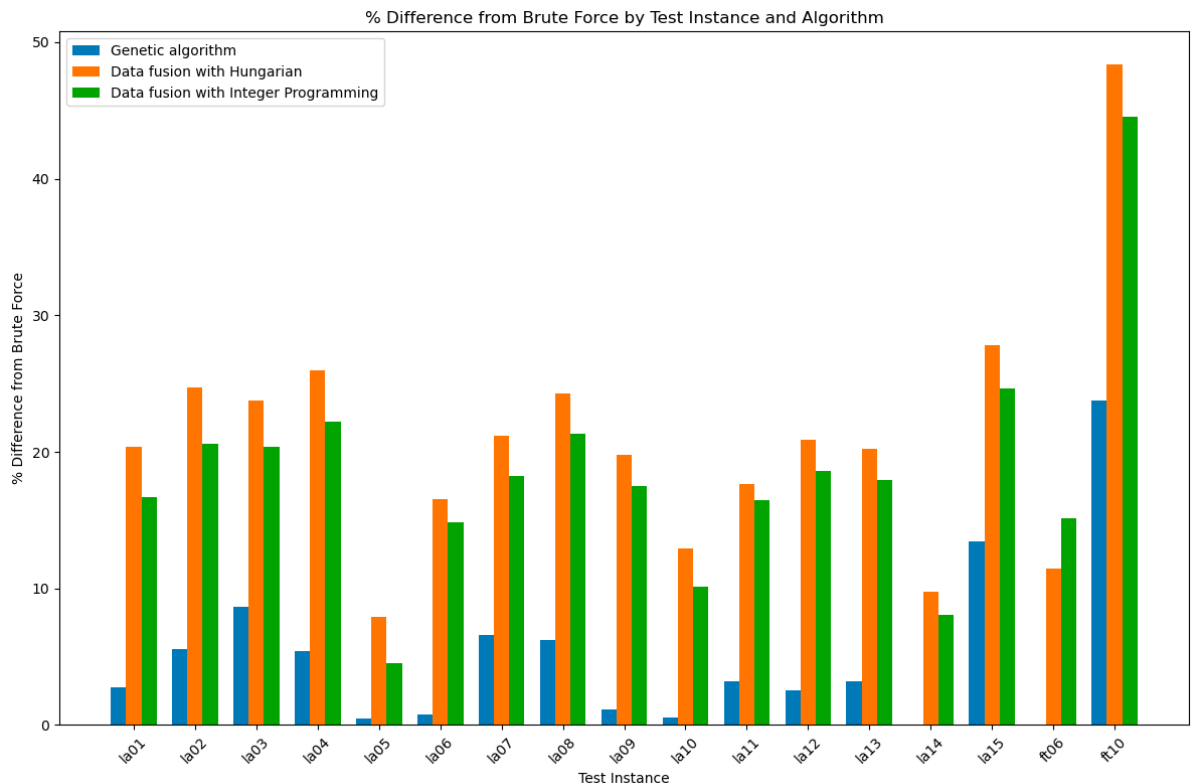
โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
ft06	Brute Force	55	2580.34
	Genetic algorithm	55	494.08
	Data fusion with Hungarian method	61.28	0.56
	Data fusion with Integer programming	63.33	0.99

ตารางที่ 21 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหา ft10

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ
ft10	Brute Force	930	19168.44
	Genetic algorithm	1151.18	1368.25
	Data fusion with Hungarian method	1379.71	6.61
	Data fusion with Integer programming	1343.99	7.61

3.5.1 ผลลัพธ์ที่ได้การเปรียบเทียบในแต่ละขั้นตอนวิธี

3.5.1.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ของขั้นตอนวิธีสถิติที่พัฒนากับขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง



รูปที่ 17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้ของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลกับขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง

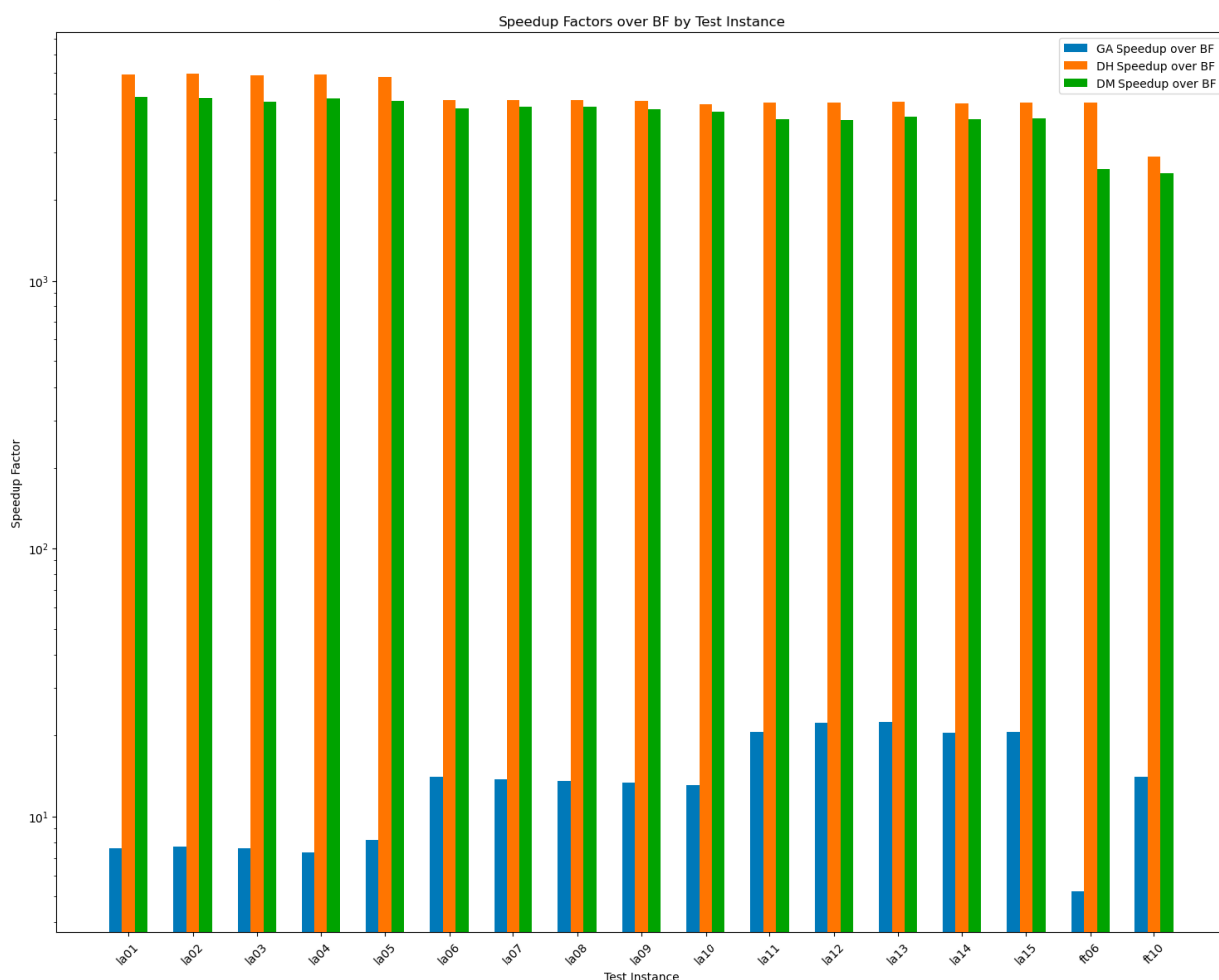
จากรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะคำตอบที่ได้จะมีมากกว่าขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มโดยใช้ขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงเป็นตัวเปรียบเทียบ

ผลลัพธ์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีเทียบกับขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงจะอยู่ที่ประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ยกเว้นปัญหา ft10 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะสูงถึงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

ผลลัพธ์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มกับขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงจะอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ยกเว้นปัญหา ft10 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะสูงถึงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

ผลลัพธ์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอยู่ที่ประมาณ 1 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ยกเว้นปัญหา ft10 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจะสูงถึงประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์

3.5.1.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระยะเวลาในการหาคำตอบของขั้นตอนวิธีของขั้นตอนวิธีวิสติก ที่พัฒนาข้อมูลกับขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง



รูปที่ 18 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาในการหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลกับ
ขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง

หมายเหตุ GA คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

DH คือ ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี

DM คือ ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม

BF คือ ขั้นตอนวิธีเอาแต่แรง

ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบเร็วกว่าขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงประมาณ 4500 ถึง 6000 เท่า

ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบเร็วกว่าขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงประมาณ 4000 ถึง 5000 เท่า

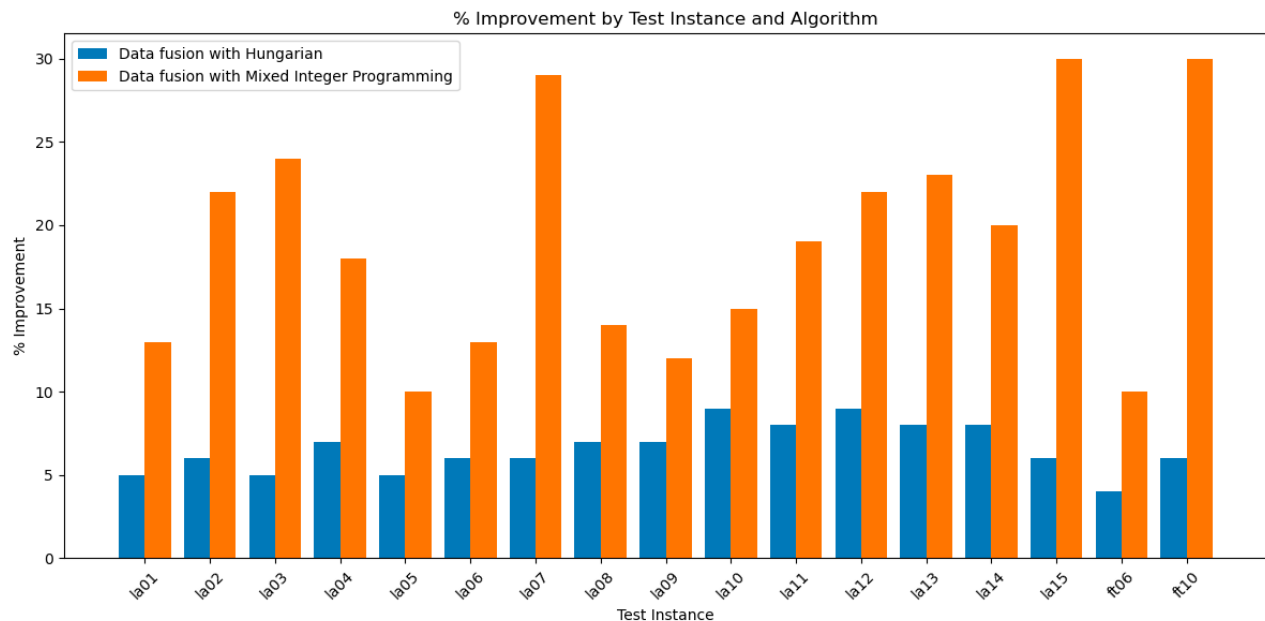
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบเร็วกว่าขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรงประมาณ 5 ถึง 20 เท่า

3.5.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบของวิธีการหลอมรวมข้อมูล

ตารางที่ 22 ตารางการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบของวิธีการหลอมรวมข้อมูล

โจทย์	ขั้นตอนวิธี	คำตอบ	ระยะเวลาในการ หาคำตอบ	เปอร์เซ็นต์การ ปรับปรุงคำตอบ
la01	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	801.82	1.31	5
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	776.9	1.6	13
la02	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	816.95	1.32	6
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	790.04	1.63	22
la03	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	738.77	1.32	5
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	718.69	1.66	24
la04	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	743.14	1.32	7
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	720.92	1.63	18
la05	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	639.86	1.34	5
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	619.61	1.66	10
la06	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	1079.37	3.29	6
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	1063.72	3.52	13
la07	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	1078.66	3.31	6
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	1052.37	3.5	29
la08	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	1072.33	3.31	7
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	1046.95	3.53	14
la09	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	1139.37	3.3	7
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวน เต็ม	1117.25	3.54	12
la10	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี	1081.95	3.31	9

	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1055.32	3.54	15
la11	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	1437.39	6.12	8
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1423	7.05	19
la12	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	1256.15	6.12	9
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1232.2	7.08	22
la13	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	1382.92	6.11	8
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1355.97	6.98	23
la14	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	1418.19	6.12	8
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1395.91	7.03	20
la15	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	1542.88	6.12	6
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1504.92	7.03	30
ft06	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	63.33	0.56	4
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	61.28	0.99	10
ft10	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีอิงกาเรียน	1343.99	6.61	6
	การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม	1379.71	7.61	30



รูปที่ 19 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาในเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบของแต่ละขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูล

เปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบ คือการที่หลังจากผ่านการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีต่างๆแล้วได้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบของเดิมที่มีอยู่ จากรูปที่ 20 จะเห็นว่าขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีนั้นมีเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบที่ต่ำกว่าขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มอยู่อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงส่งผลทำให้คำตอบที่ได้ของขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีมีค่าที่ต่ำกว่าขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มดังที่แสดงในตารางที่ 21

4. บทสรุป

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

จากสร้างขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหาการจัดตารางงานที่ยืดหยุ่นด้วยวิธีการเอาแต่แรง, วิธีเชิงพันธุกรรม, วิธีเชิงพันธุกรรม, วิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีและวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มพบว่าการใช้วิธีการฮิวริสติกที่พัฒนาสามารถช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาคำตอบได้เป็นอย่างมากในขณะที่ผลลัพธ์ของคำตอบที่แย่งเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง แต่ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการีเพอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบมีน้อยมากดังนั้นจึงได้พัฒนาขั้นตอนวิธีการหลอมรวมข้อมูลด้วยกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มและเพิ่มประสิทธิภาพของเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบแต่แลกมากับระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ประเด็นที่สามารถต่อยอดโครงการในอนาคต คือ การพัฒนาขั้นตอนวิธีในการหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีใหม่ที่สามารถทำให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าเดิมทั้งคำตอบและระยะเวลาในการค้นหาคำตอบ และการวิเคราะห์ว่าข้อมูลของตารางงานที่จัดมานั้นควรจะนำมาหลอมรวมกับข้อมูลอื่นแล้วสามารถหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบที่เคยมีอยู่

4.2 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 23 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการต่างๆที่ใช้ใน การแก้ไขปัญหาการจัดตารางงาน									
2. ออกแบบวิธีการจัดตารางงานด้วยวิธีฮิวริสติก									
3. พัฒนาขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาการจัดตารางงานจากการใช้การหลอมรวมข้อมูลด้วยวิธีฮังการี									
4. พัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม									
5. พัฒนาขั้นตอนวิธีแก้ปัญหาการจัดตารางงานจากใช้การหลอมรวมข้อมูลด้วย									
6. พัฒนาขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง									
7. บันทึกผลลัพธ์ของแต่ละขั้นตอนวิธี									
8. ทำสรุปผลรายงาน									

หมายเหตุ สีเทา คือ ความก้าวหน้าที่ยังวางแผนไว้
 สีดำ คือ ความก้าวหน้าปัจจุบัน

4.3 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข

เนื่องจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่นด้วยการหลอมรวมข้อมูลในขั้นตอนการเลือกตารางที่ดีที่สุด n ตารางไม่สามารถใช้ได้กับทุกโจทย์ปัญหา จึงต้องใช้ระยะเวลาในการลองผิดลองถูกเพื่อดูแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงคำตอบที่ดีที่สุดมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ธีรพล ศิลาวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่พิจารณารับนิสิตเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า ตลอดจนการแนะแนวทางที่นิสิตได้พบเจอตลอดการทำโครงงาน อาจารย์คอยช่วยตอบคำถาม คำติชมรวมถึงการแสดงความคิดเห็นในแง่มุมต่างๆ และตรวจสอบความถูกต้องของรายงานโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้าฉบับนี้ โครงงานวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้านี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้หากปราศจากคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษารวมถึงกำลังจากครอบครัวและเพื่อนในการฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นและผลักดันให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdolrazzagh-Nezhad, M., & Abdullah, S. (2014). A Robust Intelligent Construction Procedure for Job-Shop Scheduling. *Information Technology And Control*, 43(3), 217-229.
- [2] Joaquim A.S. Gromicho, Jelke J. van Hoorn, Francisco Saldanha-da-Gama, Gerrit T. Timmer, Solving the job-shop scheduling problem optimally by dynamic programming, *Computers & Operations Research*, Volume 39, Issue 12, 2012, Pages 2968-2977, ISSN 0305-0548,
- [3] Nordin, Nurul Nadia and Lai Soon Lee. “Heuristics and Metaheuristics Approaches for Facility Layout Problems: A Survey.” (2016).
- [4] Shah, P. N. (n.d.). Assignment problem using method Algorithm & Example-1. Atozmath. Retrieved from <https://cbom.atozmath.com/example/CBOM/Assignment.aspx?q=hm&q1=E1> (เข้าถึง วันที่ 22 พฤศจิกายน 2566)
- [5] NOHAIR, L., ADRAOUI, A.E. and NAMIR, A. (2022) ‘Solving non-delay job-shop scheduling problems by a new matrix heuristic’, *Procedia Computer Science*, 198, pp. 410–416.
- [6] M. Almufti, S. (2019). Historical survey on metaheuristics algorithms. *International Journal of Scientific World*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.14419/ijsw.v7i1.29497>
- [7] S. Lawrence. Resource Constrained Project Scheduling. An Experimental Investigation of Heuristic Scheduling Techniques (Supplement).Carnegie-Mellon University, 1984.
- [8] H. Fisher and G. L. Thompson. Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules. In: *Industrial Scheduling*: 225-251. ed. by J.F. Muth and G.L. Thompson. Prentice Hall, 1963.
- [9] Bynum, Michael L., Gabriel A. Hackebeil, William E. Hart, Carl D. Laird, Bethany L. Nicholson, John D. Siirola, Jean-Paul Watson, and David L. Woodruff. *Pyomo - Optimization Modeling in Python*, 3rd Edition. Springer, 2021.

7. ภาคผนวก

7.1 ภาคผนวก ก.

โจทย์ปัญหาการจัดตารางงานจะมีลักษณะเป็นตารางโดยที่แถวจะบอกถึงงาน เช่น แถวที่ 1 คือ งานที่ 1 และหลักจะบอกถึงเครื่องจักรที่ใช้แต่ว่าหลักเครื่องจักรที่ใช้จะเป็นกอบไปด้วย 2 ส่วนซึ่งก็คือลำดับและระยะเวลาที่ใช้ของเครื่องจักร (หลักเลขคือลำดับของเครื่องจักรและหลักเลขคู่คือระยะเวลาที่เครื่องจักรทำงาน)

ตารางที่ 24 ปัญหา la01 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (10 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
1	21	0	53	4	95	3	55	2	34
0	21	3	52	4	16	2	26	1	71
3	39	4	98	1	42	2	31	0	12
1	77	0	55	4	79	2	66	3	77
0	83	3	34	2	64	1	19	4	37
1	54	2	43	4	79	0	92	3	62
3	69	4	77	1	87	2	87	0	93
2	38	0	60	1	41	3	24	4	83
3	17	1	49	4	25	0	44	2	98
4	77	3	79	2	43	1	75	0	96

ตารางที่ 25 ปัญหา la02 ของการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น (10 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
0	20	3	87	1	31	4	76	2	17
4	25	2	32	0	24	1	18	3	81
1	72	2	23	4	28	0	58	3	99
2	86	1	76	4	97	0	45	3	90
4	27	0	42	3	48	2	17	1	46
1	67	0	98	4	48	3	27	2	62
4	28	1	12	3	19	0	80	2	50
1	63	0	94	2	98	3	50	4	80
4	14	0	75	2	50	1	41	3	55
4	72	2	18	1	37	3	79	0	61

ตารางที่ 26 ปัญหา la03 ของการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น (10 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
1	23	2	45	0	82	4	84	3	38
2	21	1	29	0	18	4	41	3	50
2	38	3	54	4	16	0	52	1	52
4	37	0	54	2	74	1	62	3	57
4	57	0	81	1	61	3	68	2	30
4	81	0	79	1	89	2	89	3	11
3	33	2	20	0	91	4	20	1	66
4	24	1	84	0	32	2	55	3	8
4	56	0	7	3	54	2	64	1	39
4	40	1	83	0	19	2	8	3	7

ตารางที่ 27 ปัญหา la04 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (10 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
0	12	2	94	3	92	4	91	1	7
1	19	3	11	4	66	2	21	0	87
1	14	0	75	3	13	4	16	2	20
2	95	4	66	0	7	3	7	1	77
1	45	3	6	4	89	0	15	2	34
3	77	2	20	0	76	4	88	1	53
2	74	1	88	0	52	3	27	4	9
1	88	3	69	0	62	4	98	2	52
2	61	4	9	0	62	1	52	3	90
2	54	4	5	3	59	1	15	0	88

ตารางที่ 28 ปัญหา la05 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (10 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
1	72	0	87	4	95	2	66	3	60
4	5	3	35	0	48	2	39	1	54
1	46	3	20	2	21	0	97	4	55
0	59	3	19	4	46	1	34	2	37
4	23	2	73	3	25	1	24	0	28
3	28	0	45	4	5	1	78	2	83
0	53	3	71	1	37	4	29	2	12
4	12	2	87	3	33	1	55	0	38
2	49	3	83	1	40	0	48	4	7
2	65	3	17	0	90	4	27	1	23

ตารางที่ 29 ปัญหา la06 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (15 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
1	21	2	34	4	95	0	53	3	55
3	52	4	16	1	71	2	26	0	21
2	31	0	12	1	42	3	39	4	98
3	77	1	77	4	79	0	55	2	66
4	37	3	34	2	64	1	19	0	83
2	43	1	54	0	92	3	62	4	79
0	93	3	69	1	87	4	77	2	87
0	60	1	41	2	38	4	83	3	24
2	98	3	17	4	25	0	44	1	49
0	96	4	77	3	79	1	75	2	43
4	28	2	35	0	95	3	76	1	7
0	61	4	10	2	95	1	9	3	35
4	59	3	16	1	91	2	59	0	46
4	43	1	52	0	28	2	27	3	50
0	87	1	45	2	39	4	9	3	41

ตารางที่ 30 ปัญหา la07 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (15 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
0	47	4	57	1	71	3	96	2	14
0	75	1	60	4	22	3	79	2	65
3	32	0	33	2	69	1	31	4	58
0	44	1	34	4	51	3	58	2	47
3	29	1	44	0	62	2	17	4	8
1	15	2	40	0	97	4	38	3	66
2	58	1	39	0	57	4	20	3	50
2	57	3	32	4	87	0	63	1	21
4	56	0	84	2	90	1	85	3	61
4	15	0	20	1	67	3	30	2	70
4	84	0	82	1	23	2	45	3	38
3	50	2	21	0	18	4	41	1	29
4	16	1	52	0	52	2	38	3	54
4	37	0	54	3	57	2	74	1	62
4	57	1	61	0	81	2	30	3	68

ตารางที่ 31 ปัญหา la08 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (15 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
3	92	2	94	0	12	4	91	1	7
2	21	1	19	0	87	3	11	4	66
1	14	3	13	0	75	4	16	2	20
2	95	4	66	0	7	1	77	3	7
2	34	4	89	3	6	1	45	0	15
4	88	3	77	2	20	1	53	0	76
4	9	3	27	0	52	1	88	2	74
3	69	2	52	0	62	1	88	4	98
3	90	0	62	4	9	2	61	1	52
4	5	2	54	3	59	0	88	1	15
0	41	1	50	4	78	3	53	2	23
0	38	4	72	2	91	3	68	1	71
0	45	3	95	4	52	2	25	1	6
3	30	1	66	0	23	4	36	2	17
2	95	0	71	3	76	1	8	4	88

ตารางที่ 32 ปัญหา la09 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (15 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
1	66	3	85	2	84	0	62	4	19
3	59	1	64	2	46	4	13	0	25
4	88	3	80	1	73	2	53	0	41
0	14	1	67	2	57	3	74	4	47
0	84	4	64	2	41	3	84	1	78
0	63	3	28	1	46	2	26	4	52
3	10	2	17	4	73	1	11	0	64
2	67	1	97	3	95	4	38	0	85
2	95	4	46	0	59	1	65	3	93
2	43	4	85	3	32	1	85	0	60
4	49	3	41	2	61	0	66	1	90
1	17	0	23	3	70	4	99	2	49
4	40	3	73	0	73	1	98	2	68
3	57	1	9	2	7	0	13	4	98
0	37	1	85	2	17	4	79	3	41

ตารางที่ 33 ปัญหา la10 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (15 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
1	58	2	44	3	5	0	9	4	58
1	89	0	97	4	96	3	77	2	84
0	77	1	87	2	81	4	39	3	85
3	57	1	21	2	31	0	15	4	73
2	48	0	40	1	49	3	70	4	71
3	34	4	82	2	80	0	10	1	22
1	91	4	75	0	55	2	17	3	7
2	62	3	47	1	72	4	35	0	11
0	64	3	75	4	50	1	90	2	94
2	67	4	20	3	15	0	12	1	71
0	52	4	93	3	68	2	29	1	57
2	70	0	58	1	93	4	7	3	77
3	27	2	82	1	63	4	6	0	95
1	87	2	56	4	36	0	26	3	48
3	76	2	36	0	36	4	15	1	8

ตารางที่ 34 ปัญหา la11 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น (20 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
2	34	1	21	0	53	3	55	4	95
0	21	3	52	1	71	4	16	2	26
0	12	1	42	2	31	4	98	3	39
2	66	3	77	4	79	0	55	1	77
0	83	4	37	3	34	1	19	2	64
4	79	2	43	0	92	3	62	1	54
0	93	4	77	2	87	1	87	3	69
4	83	3	24	1	41	2	38	0	60
4	25	1	49	0	44	2	98	3	17
0	96	1	75	2	43	4	77	3	79
0	95	3	76	1	7	4	28	2	35
4	10	2	95	0	61	1	9	3	35
1	91	2	59	4	59	0	46	3	16
2	27	1	52	4	43	0	28	3	50
4	9	0	87	3	41	2	39	1	45
1	54	0	20	4	43	3	14	2	71
4	33	1	28	3	26	0	78	2	37
1	89	0	33	2	8	3	66	4	42
4	84	0	69	2	94	1	74	3	27
4	81	2	45	1	78	3	69	0	96

ตารางที่ 35 ปัญหา la12 ของการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น (20 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
1	23	0	82	4	84	2	45	3	38
3	50	4	41	1	29	0	18	2	21
4	16	3	54	1	52	2	38	0	52
1	62	3	57	4	37	2	74	0	54
3	68	1	61	2	30	0	81	4	57
1	89	2	89	3	11	0	79	4	81
1	66	0	91	3	33	4	20	2	20
3	8	4	24	2	55	0	32	1	84
0	7	2	64	1	39	4	56	3	54
0	19	4	40	3	7	2	8	1	83
0	63	2	64	3	91	4	40	1	6
1	42	3	61	4	15	2	98	0	74
1	80	0	26	3	75	4	6	2	87
2	39	4	22	0	75	3	24	1	44
1	15	3	79	4	8	0	12	2	20
3	26	2	43	0	80	4	22	1	61
2	62	1	36	0	63	3	96	4	40
1	33	3	18	0	22	4	5	2	10
2	64	4	64	0	89	1	96	3	95
2	18	4	23	3	15	1	38	0	8

ตารางที่ 36 ปัญหา la13 ของการจัดตารางงานแบบยี่ดหุ่่น (20 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
3	60	0	87	1	72	4	95	2	66
1	54	0	48	2	39	3	35	4	5
3	20	1	46	0	97	2	21	4	55
2	37	0	59	3	19	1	34	4	46
2	73	3	25	1	24	0	28	4	23
1	78	3	28	2	83	0	45	4	5
3	71	1	37	2	12	4	29	0	53
4	12	3	33	1	55	2	87	0	38
0	48	1	40	2	49	3	83	4	7
0	90	4	27	2	65	3	17	1	23
0	62	3	85	1	66	2	84	4	19
3	59	2	46	4	13	1	64	0	25
2	53	1	73	3	80	4	88	0	41
2	57	4	47	0	14	1	67	3	74
2	41	4	64	3	84	1	78	0	84
4	52	3	28	2	26	0	63	1	46
1	11	0	64	3	10	4	73	2	17
4	38	3	95	0	85	1	97	2	67
3	93	1	65	2	95	0	59	4	46
0	60	1	85	2	43	4	85	3	32

ตารางที่ 37 ปัญหา la14 ของการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น (20 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
3	5	4	58	2	44	0	9	1	58
1	89	4	96	0	97	2	84	3	77
2	81	3	85	1	87	4	39	0	77
0	15	3	57	4	73	1	21	2	31
2	48	4	71	3	70	0	40	1	49
0	10	4	82	3	34	2	80	1	22
2	17	0	55	1	91	4	75	3	7
3	47	2	62	1	72	4	35	0	11
1	90	2	94	4	50	0	64	3	75
3	15	2	67	0	12	4	20	1	71
4	93	2	29	0	52	1	57	3	68
3	77	1	93	0	58	2	70	4	7
1	63	3	27	0	95	4	6	2	82
4	36	0	26	3	48	2	56	1	87
2	36	1	8	4	15	3	76	0	36
4	78	1	84	3	41	0	30	2	76
1	78	0	75	4	88	3	13	2	81
0	54	4	40	2	13	1	82	3	29
1	26	4	82	0	52	3	6	2	6
3	54	1	64	0	54	2	32	4	88

ตารางที่ 38 ปัญหา la15 ของการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่น (20 งาน 5 เครื่องจักร)

M1		M2		M3		M4		M5	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
0	6	2	40	1	81	3	37	4	19
2	40	3	32	0	55	4	81	1	9
1	46	4	65	2	70	3	55	0	77
2	21	4	65	0	64	3	25	1	15
2	85	0	40	1	44	3	24	4	37
0	89	4	29	1	83	3	31	2	84
4	59	3	38	1	80	2	30	0	8
0	80	2	56	1	77	4	41	3	97
4	56	0	91	3	50	2	71	1	17
1	40	0	88	4	59	2	7	3	80
0	45	1	29	2	8	4	77	3	58
2	36	0	54	3	96	1	9	4	10
0	28	2	73	1	98	3	92	4	87
0	70	3	86	2	27	1	99	4	96
1	95	0	59	4	56	3	85	2	41
1	81	2	92	4	32	0	52	3	39
1	7	4	22	2	12	0	88	3	60
3	45	0	93	2	69	4	49	1	27
0	21	1	84	2	61	3	68	4	26
1	82	2	33	4	71	0	99	3	44

ตารางที่ 39 ปัญหา ft06 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น

M1		M2		M3		M4		M5		M6	
ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา	ลำดับ	เวลา
2	1	0	3	1	6	3	7	5	3	4	6
1	8	2	5	4	10	5	10	0	10	3	4
2	5	3	4	5	8	0	9	1	1	4	7
1	5	0	5	2	5	3	3	4	8	5	9
2	9	1	3	4	5	5	4	0	3	3	1
1	3	3	3	5	9	0	10	4	4	2	1

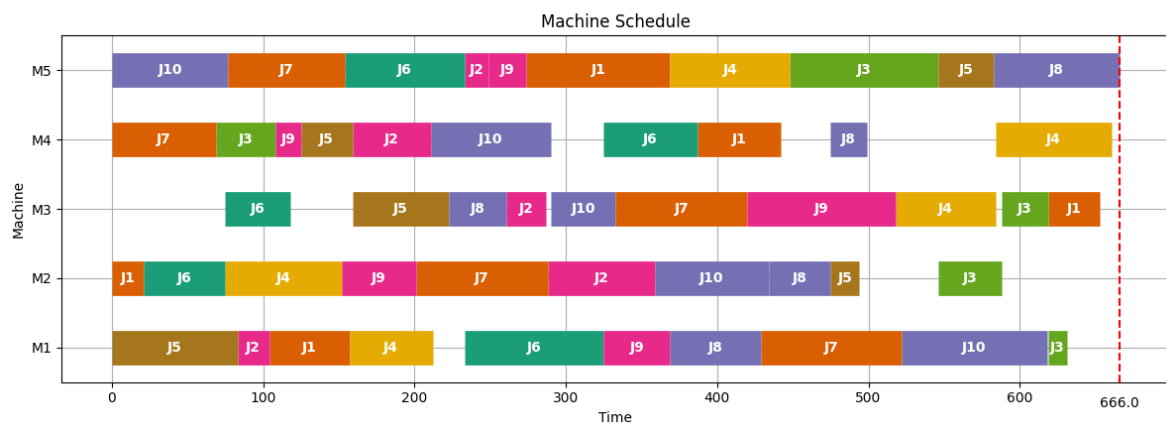
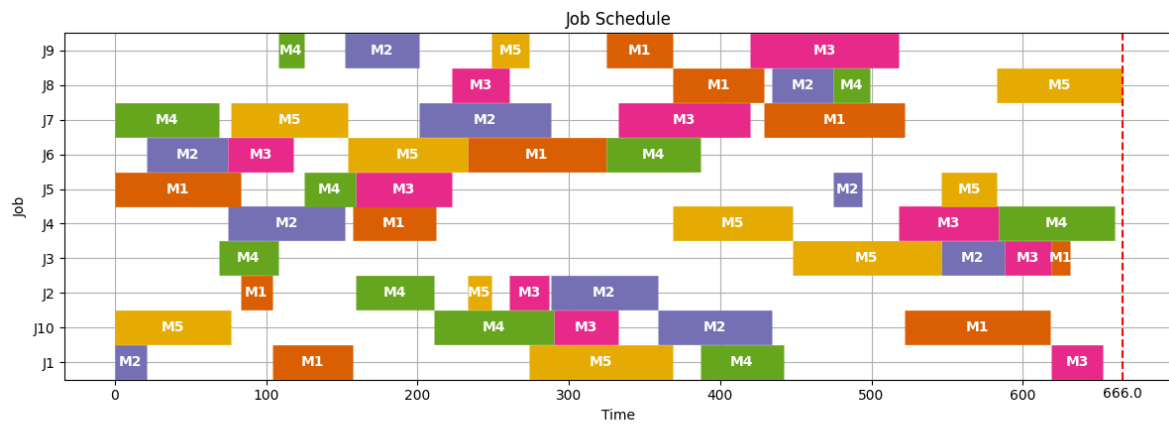
ตารางที่ 40 ปัญหา ft10 ของการจัดตารางงานแบบยัดหย่น

0	29	1	78	2	9	3	36	4	49	5	11	6	62	7	56	8	44	9	21
0	43	2	90	4	75	9	11	3	69	1	28	6	46	5	46	7	72	8	30
1	91	0	85	3	39	2	74	8	90	5	10	7	12	6	89	9	45	4	33
1	81	2	95	0	71	4	99	6	9	8	52	7	85	3	98	9	22	5	43
2	14	0	6	1	22	5	61	3	26	4	69	8	21	7	49	9	72	6	53
2	84	1	2	5	52	3	95	8	48	9	72	0	47	6	65	4	6	7	25
1	46	0	37	3	61	2	13	6	32	5	21	9	32	8	89	7	30	4	55
2	31	0	86	1	46	5	74	4	32	6	88	8	19	9	48	7	36	3	79
0	76	1	69	3	76	5	51	2	85	9	11	6	40	7	89	4	26	8	74
1	85	0	13	2	61	6	7	8	64	9	76	5	47	3	52	4	90	7	45

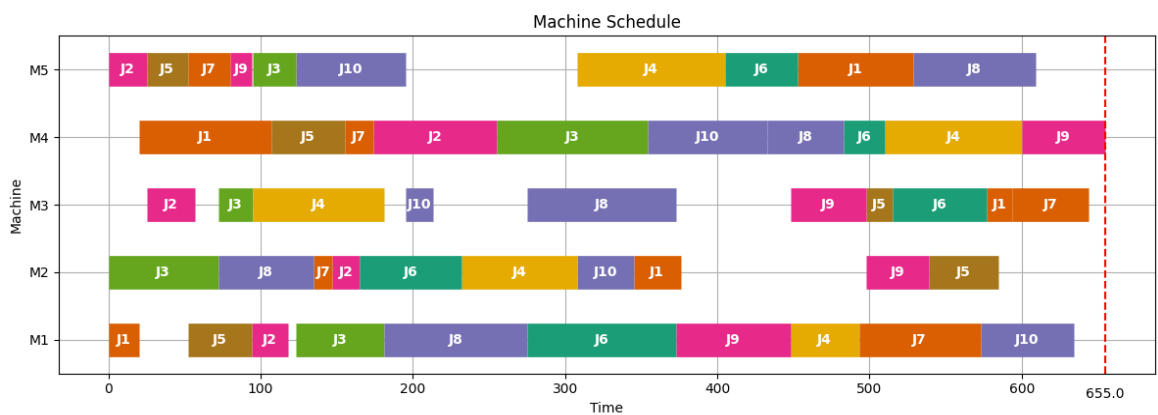
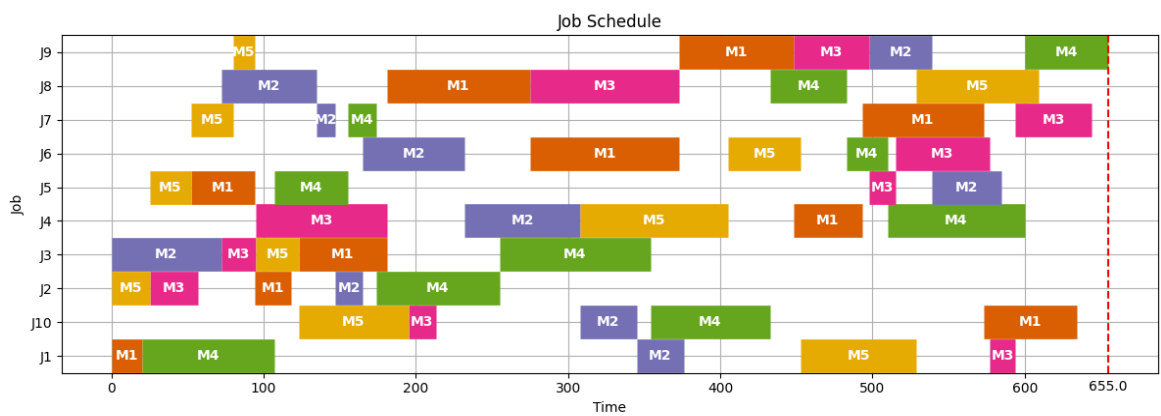
7.2 ภาคผนวก ข.

ตารางที่ 41 คำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีการเอาแต่แรง

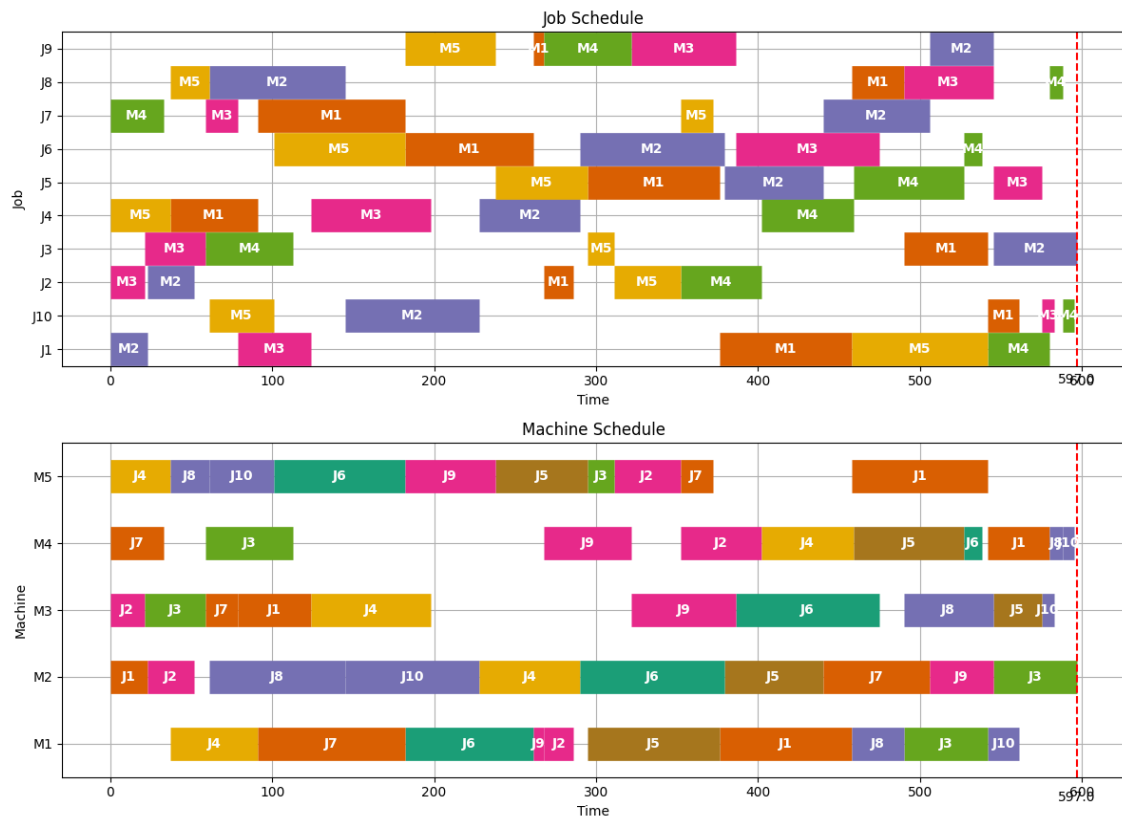
ปัญหา	คำตอบ	ระยะเวลาในการหาคำตอบ
la01	666	7735.84
la02	655	7845.98
la03	597	7698.98
la04	590	7765.46
la05	593	7748.56
la06	926	15441.68
la07	890	15510.67
la08	863	15567.65
la09	951	15401.32
la10	958	15050.18
la11	1222	28120.56
la12	1039	28034.71
la13	1150	28345.78
la14	1292	28020.68
la15	1207	28206.45
ft06	55	2580.34
ft10	930	19168.44



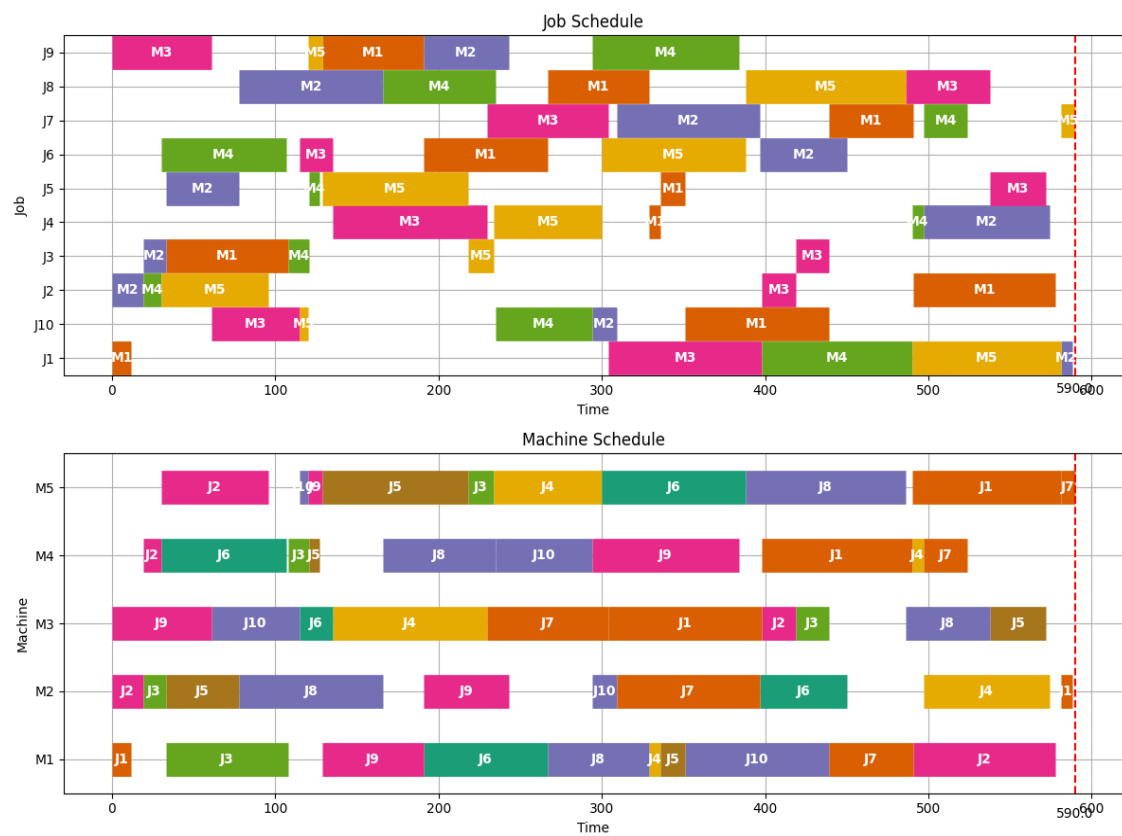
รูปที่ 21 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la01



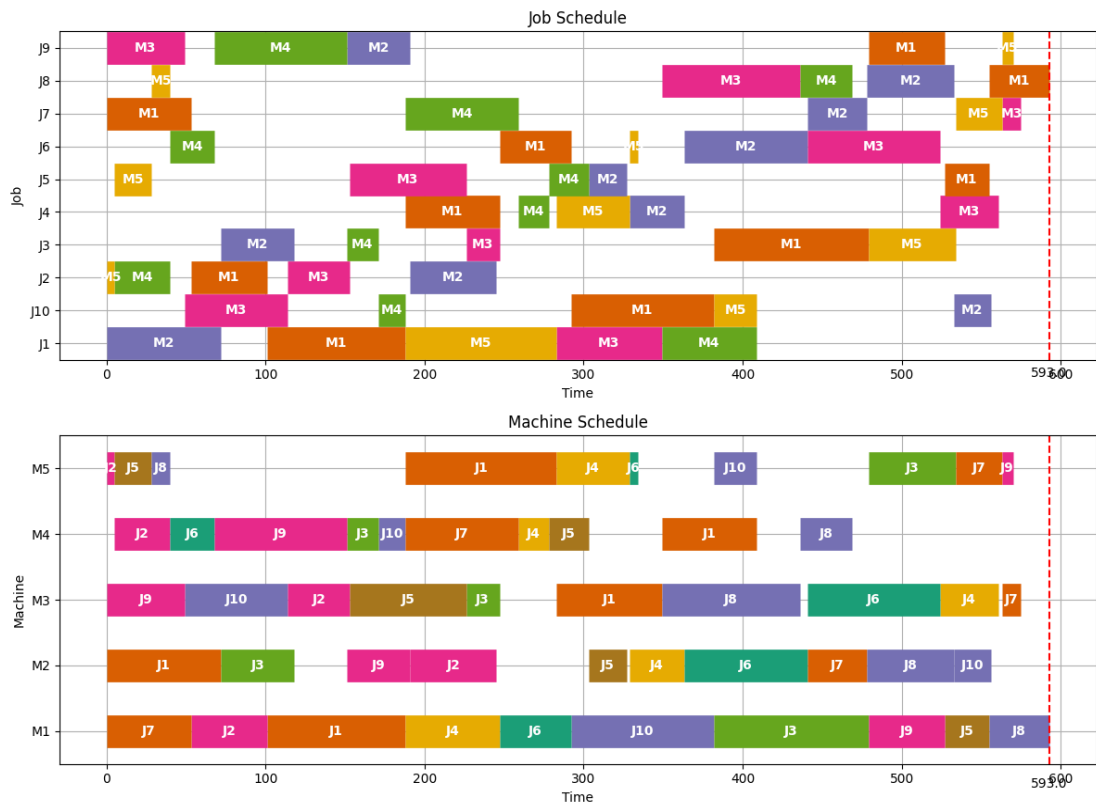
รูปที่ 22 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la02



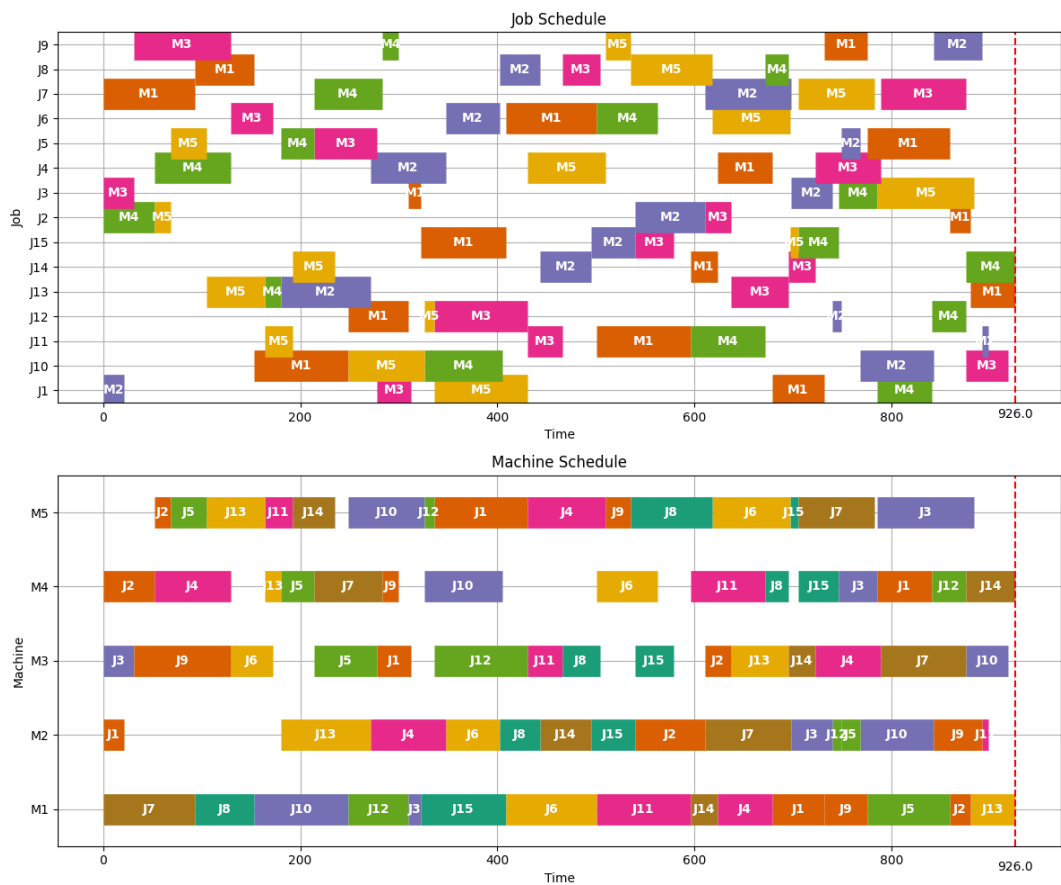
รูปที่ 23 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la03



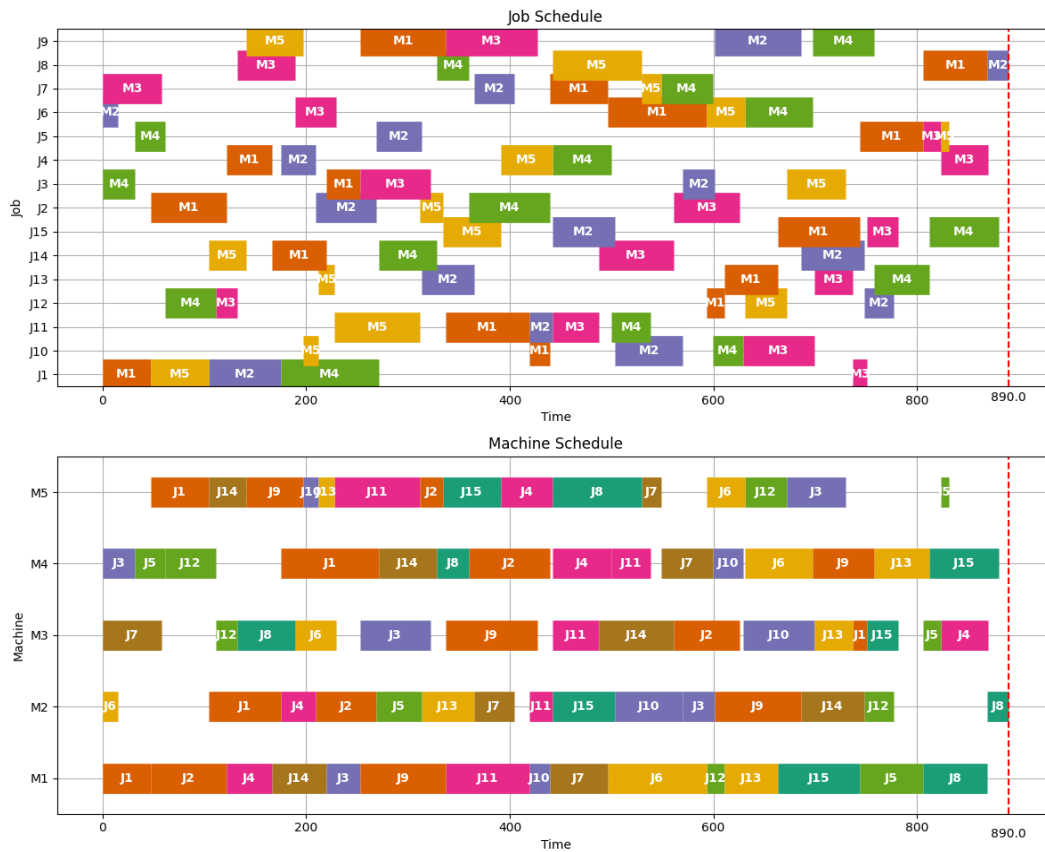
รูปที่ 24 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la04



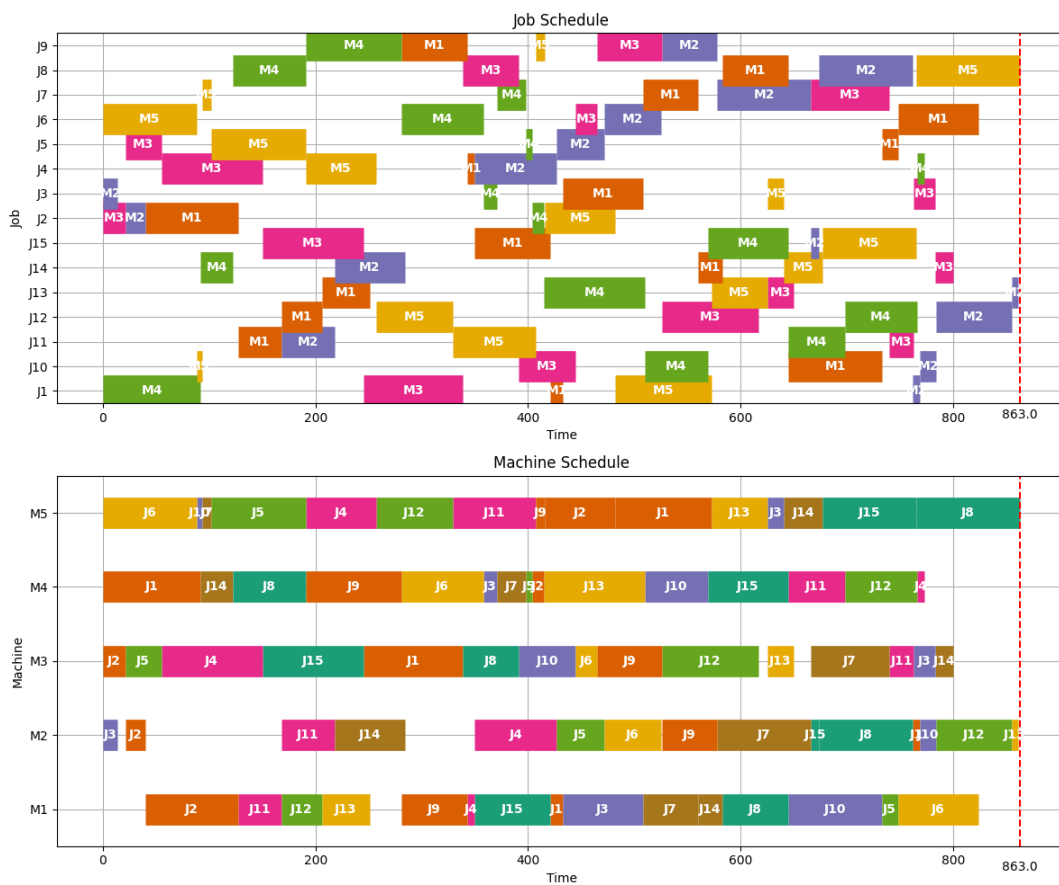
รูปที่ 25 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la05



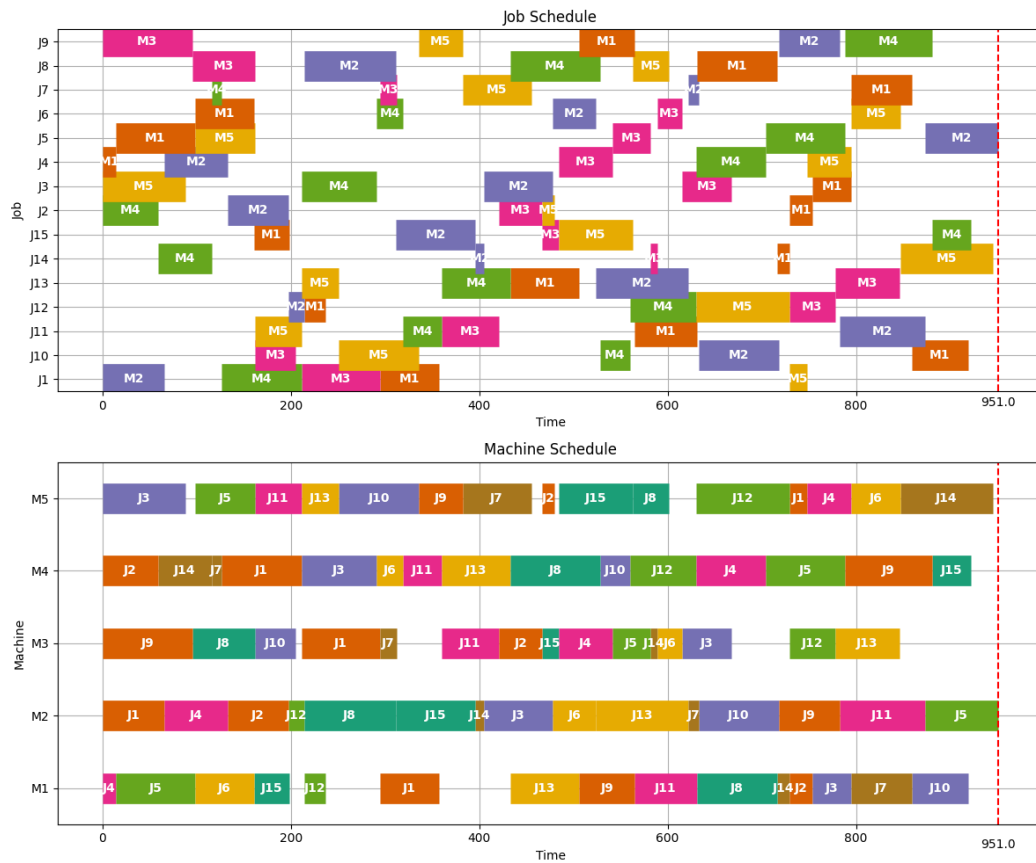
รูปที่ 26 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la06



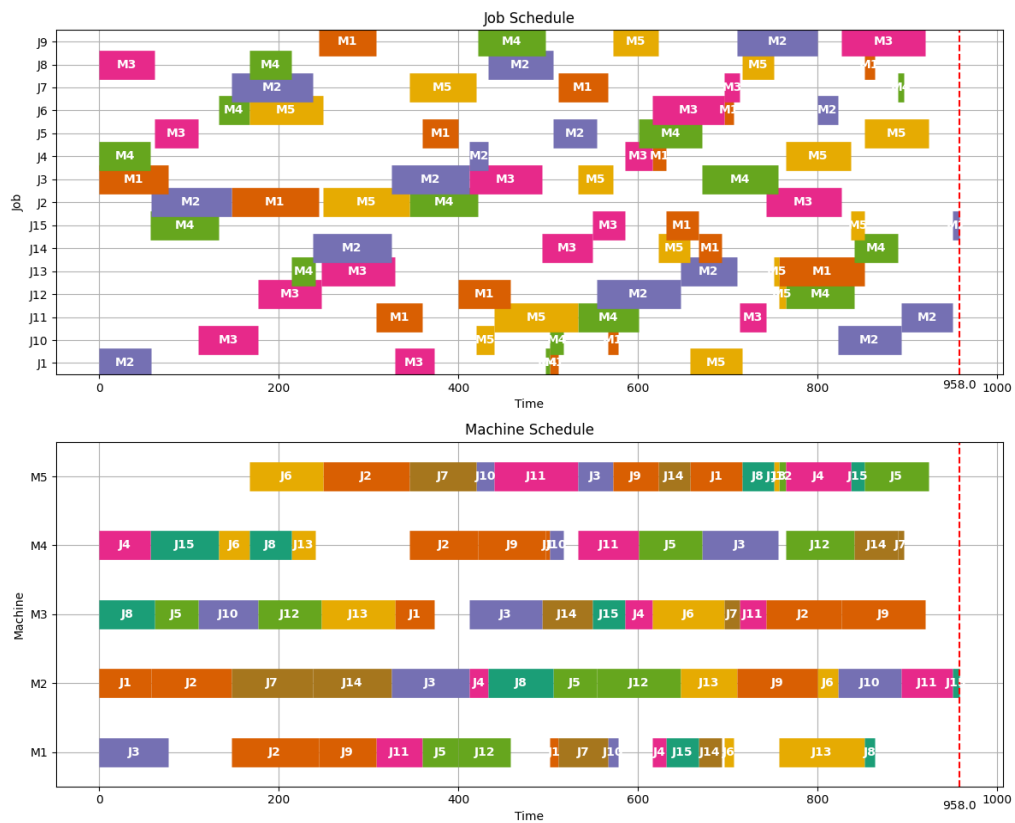
รูปที่ 27 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la07



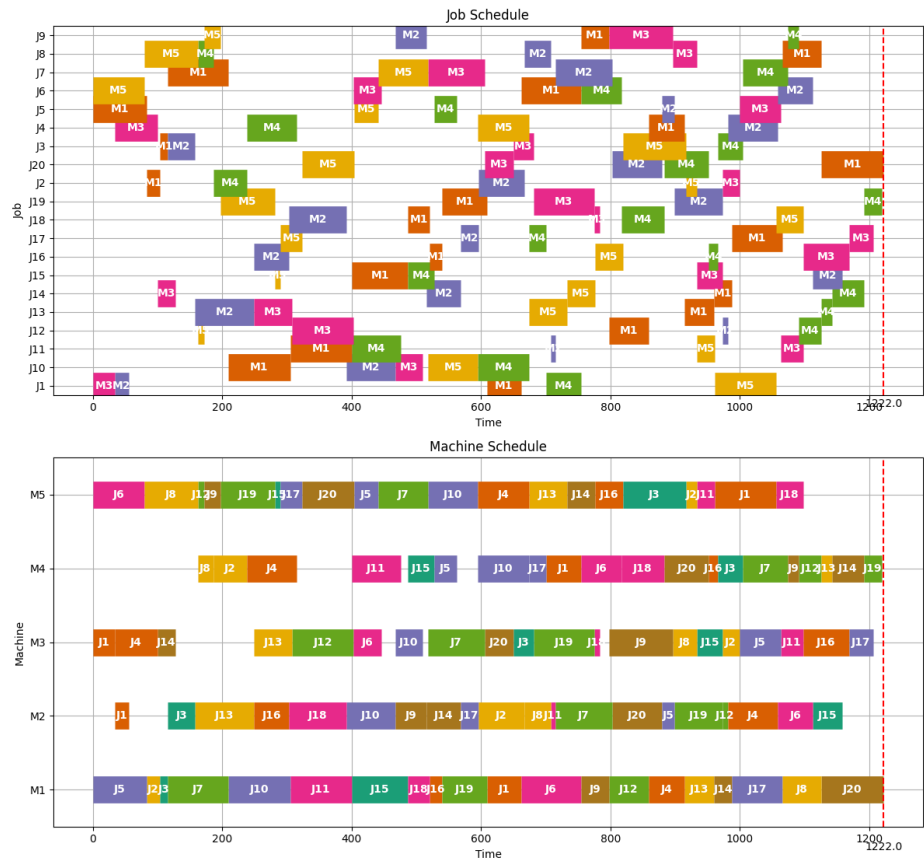
รูปที่ 28 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la08



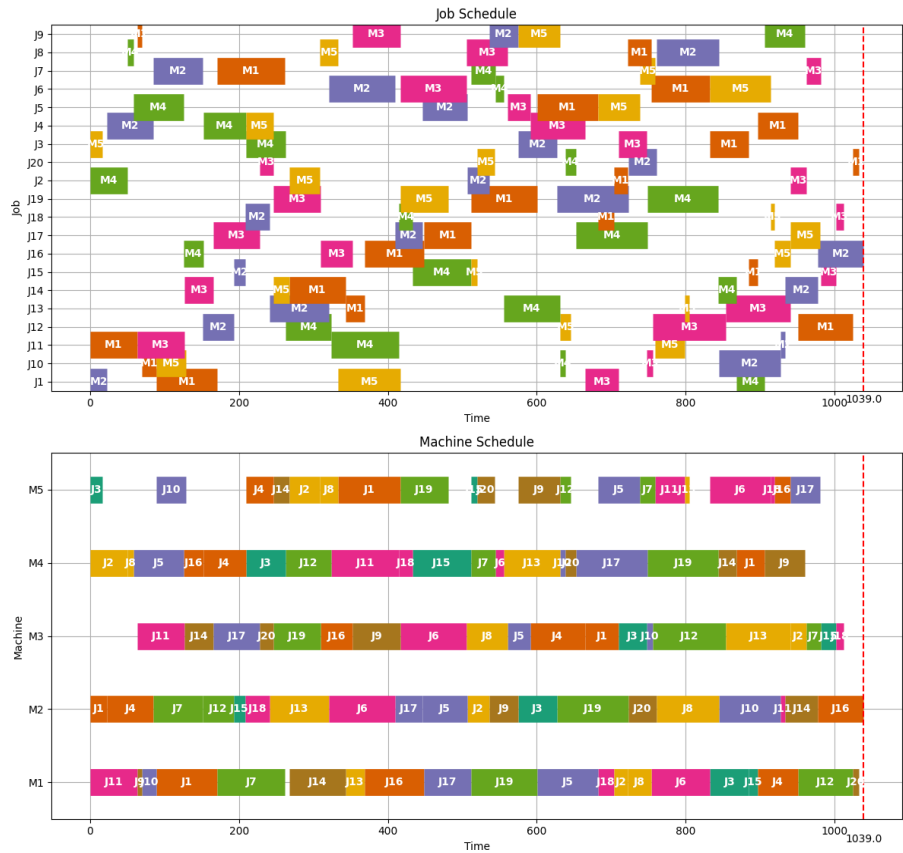
รูปที่ 29 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la09



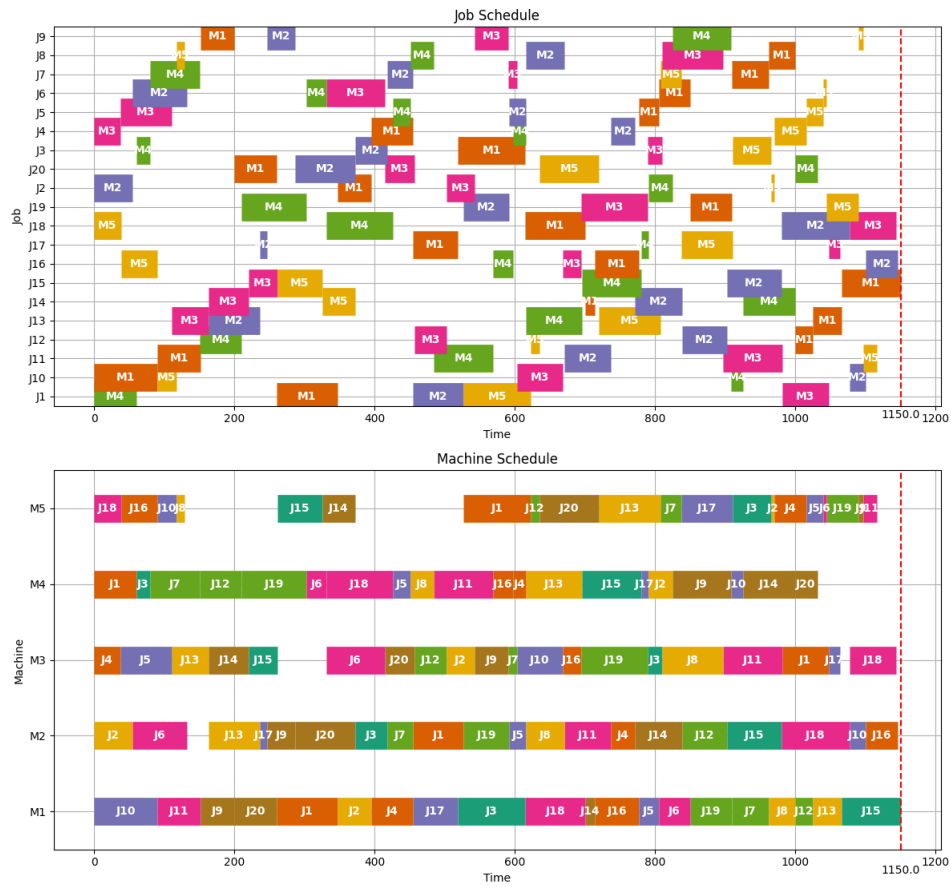
รูปที่ 30 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la10



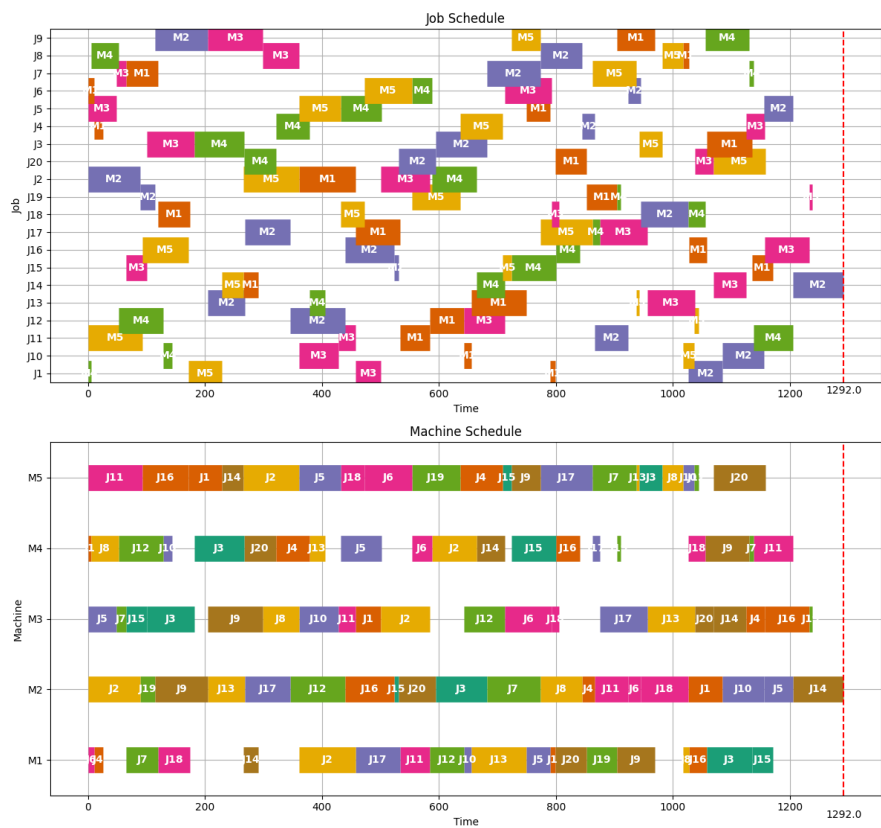
รูปที่ 31 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la11



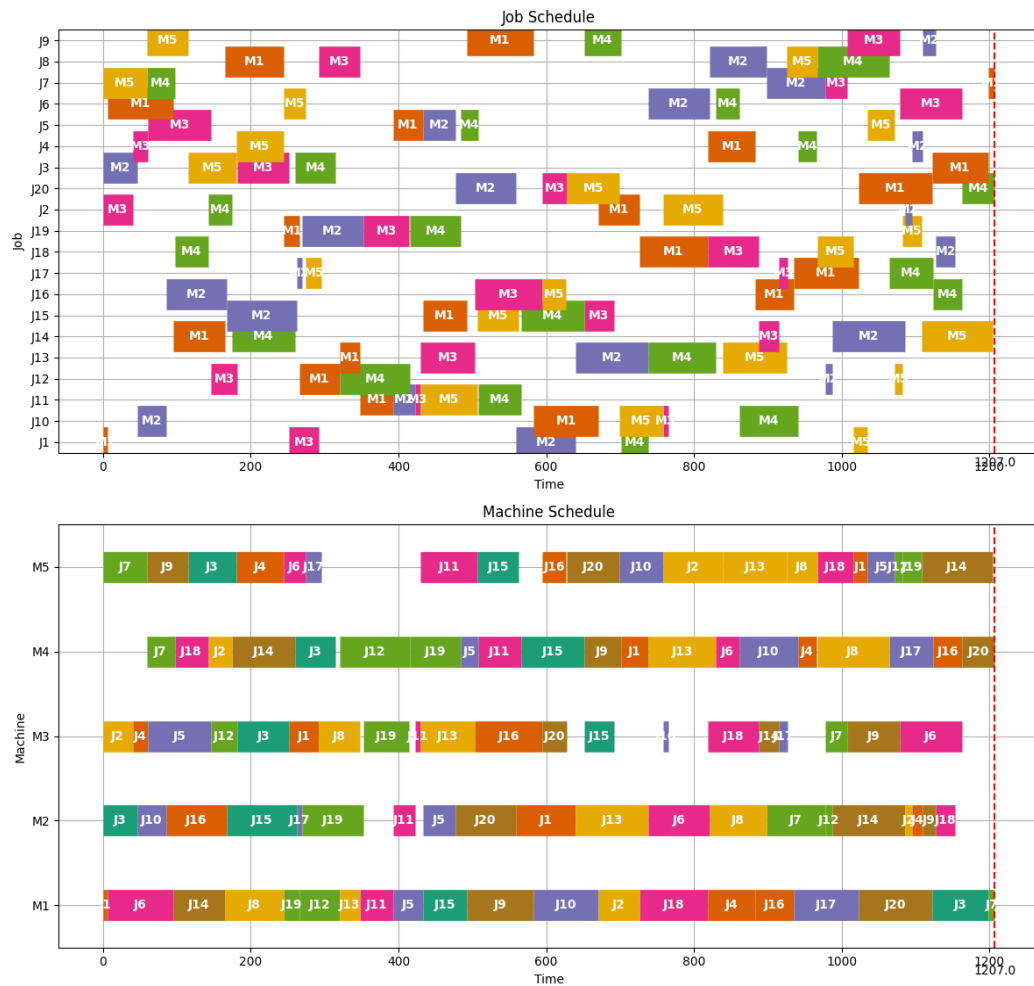
รูปที่ 32 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la12



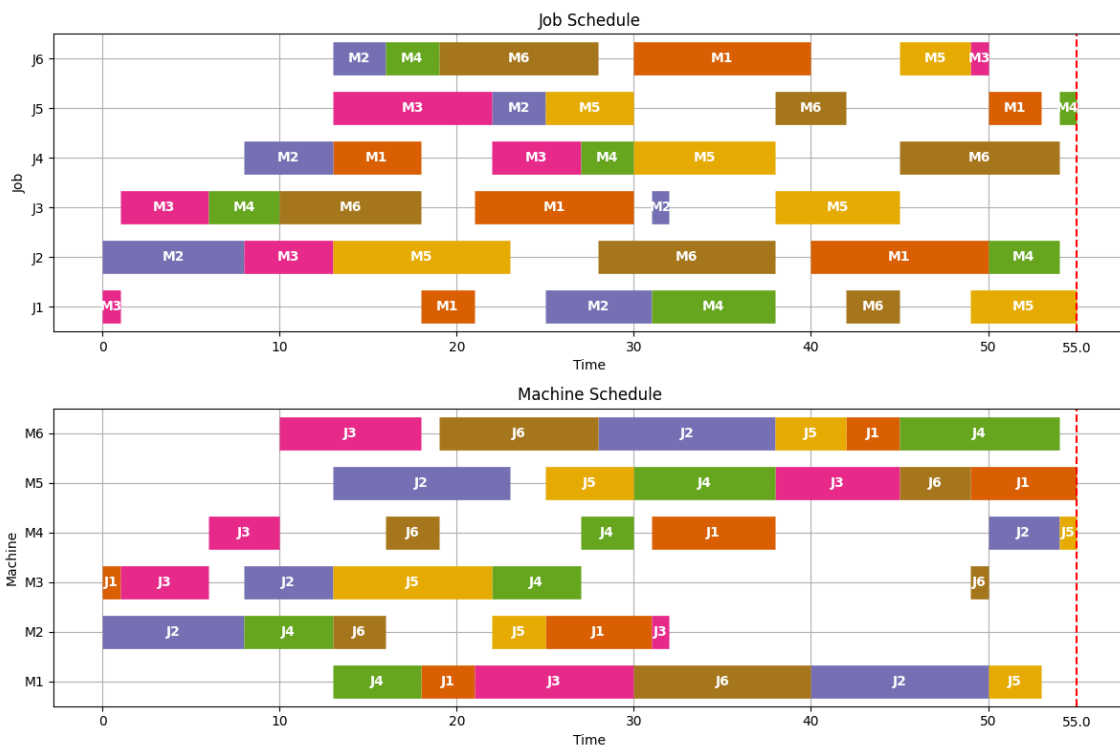
รูปที่ 33 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la13



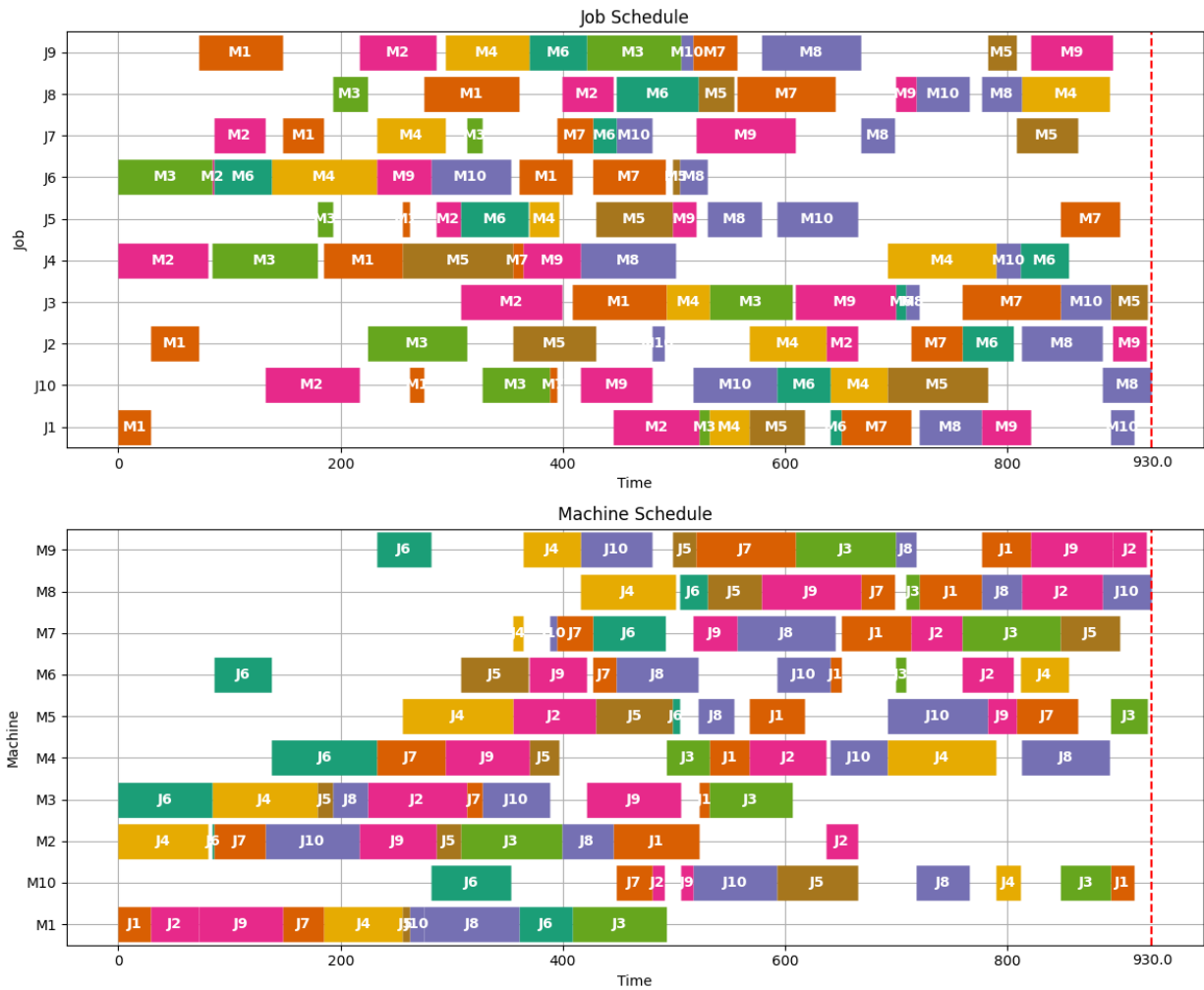
รูปที่ 34 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la14



รูปที่ 35 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา la15



รูปที่ 36 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา ft06



รูปที่ 37 แผนภูมิแกนต์คำตอบของโจทย์ปัญหา ft10