

วิธีการจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรมเพื่อ ลดปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด*

มานพ ดอนหมื่น¹⁾ ดนัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์²⁾ และศุภชัย ปทุมนากุล³⁾

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

²⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

³⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

Email: d_manop@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรม รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอได้พัฒนาต่อยอดจากวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการผลิตและค่าไฟฟ้ารวมของระบบ ในที่นี้สมการเป้าหมายอยู่ในรูปของ Value Function ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถตัดสินใจเลือกน้ำหนักความสำคัญระหว่างเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบและค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ประเภทของปัญหาที่พิจารณาเป็นงานการผลิตแบบสั่งทำ ซึ่งในระบบการผลิตมี 4 งานและ 4 เครื่องจักร ผลจากการทดลองจากการจำลองสถานการณ์ชี้ให้เห็นว่า รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอให้ผลคำตอบที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต ในการลดเวลาการผลิตและค่าไฟฟ้ารวมของงานในระบบ

คำสำคัญ : การจัดตารางการผลิต, วิธีแตกกิ่งและจำกัดเขต, แนวทางลดค่าไฟฟ้า

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2550 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน 2550

Production Scheduling Methods for Minimizing Electrical Peak Demand Charge*

Manop Dunmuan¹⁾ Danaipong Chetchotsak²⁾ and Supachai Pathumnakul³⁾

¹⁾ Master Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

²⁾ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

³⁾ Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

Email: d_manop@hotmail.com

ABSTRACT

This paper proposes mathematical models for production scheduling which are modified from the branch and bound method. The objective function is to reduce completion time and the electricity cost of the jobs in a production system. Such function is in the form of a value function which we can determine the weights of importance between the completion time and electricity cost. Here, the problem type considered is a job shop scheduling that has four jobs and four machines. The experiment conducted based on a discrete simulation reveals that the proposed models provide solution at least as well as that of the branch and bound method in reducing the production time and electricity cost.

Keywords : Job Shop Scheduling, Branch and Bound Method, and Reducing Electricity Cost

* Original manuscript submitted: February 20, 2007 and Final manuscript received: June 11, 2007

บทนำ

ในปัจจุบันการแข่งขันทางอุตสาหกรรมที่ความรุนแรงมากขึ้น อีกทั้งความก้าวหน้าทางด้านวิทยาการต่างๆ ล้วนแล้วแต่เอื้ออำนวยต่อการแข่งขันทางธุรกิจและอุตสาหกรรม การเพิ่มศักยภาพทางการแข่งขันจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมในประเทศ การมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงในขณะที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในสภาวะการแข่งขันในปัจจุบัน และในขณะที่สถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศอยู่ในขั้นวิกฤติ การลดต้นทุนการผลิตในส่วนของค่าไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นและควรได้รับการเอาใจใส่อย่างยิ่ง สำหรับแนวทางการลดต้นทุนค่าไฟฟ้าประกอบด้วยสองแนวทางหลัก (ไชยะ, 2544) คือ 1) การเพิ่มสมรรถนะของระบบไฟฟ้าด้วยการเพิ่มค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ โดยจะมุ่งเน้นถึงการเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนอุปกรณ์เครื่องมือทางไฟฟ้าเพื่อเพิ่มค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ และ 2) การควบคุมความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ซึ่งจะเน้นถึงการบริหารจัดการกระบวนการผลิตเพื่อลดหรือหลีกเลี่ยงความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในบางช่วงเวลาที่มีราคาไฟฟ้าที่มีอัตราที่สูง การลดการเกิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถทำได้โดยการหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องจักร อุปกรณ์พร้อมๆ กันหลายๆ เครื่องในเวลาเดียวกัน

ในการจัดตารางการผลิตเพื่อให้ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงนั้น หากให้ความสำคัญกับส่วนนี้เพียงส่วนเดียวอาจจะส่งผลให้เกิดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบ (Makespan) ล่าช้าออกไปมาก ในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตเพื่อลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงและในขณะเดียวกันเพื่อลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบให้น้อยที่สุดด้วย โดยจะพิจารณาที่ระบบการคิดค่าไฟฟ้าแบบปกติ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ 1) เพื่อหารูปแบบวิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสม สำหรับการคิดค่าไฟฟ้าแบบปกติ ให้มีค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต่ำลง และ 2) เพื่อเป็นแนวทางในการช่วยให้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ใช้ระบบการคิดค่าไฟฟ้าแบบปกติมีต้นทุนทางไฟฟ้าลดลงในขณะที่มีเวลาแล้วเสร็จรวมของงานที่เหมาะสม

รูปแบบของปัญหาที่พิจารณาคือ การจัดตารางการผลิตแบบสั่งทำ (Job Shop Scheduling) โดยกำหนดให้ระบบการผลิตมีงานอยู่ 4 งาน ที่ต้องผลิตบนเครื่องจักร 4 เครื่อง งานแต่ละงานนั้นใช้เวลาในการผลิตแตกต่างกัน ซึ่งงานทุกงานจะต้องผลิตให้เสร็จภายใน 1 วัน (24 ชั่วโมง) และมีกำหนดส่งงานในวันถัดไป โดยในระบบการผลิตนั้นจะไม่พิจารณาเวลาในการเตรียมงานและไม่ได้พิจารณาถึงค่าแรงงาน

คาดว่าวิธีการจัดตารางการผลิตที่นำเสนอจะเป็นตัวแบบที่สามารถใช้ในการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดซึ่งจะช่วยในการลดต้นทุนค่าไฟฟ้าโดยมีเวลาแล้วเสร็จรวมของงานที่เหมาะสม โดยเหมาะกับธุรกิจขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น งานกลึง งานเจาะ และงานเชื่อมโลหะ เป็นต้น

มีงานวิจัยและบทความจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะสมการเป้าหมาย (Objective Function) ของรูปแบบทางคณิตศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับการลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบหรือการลดต้นทุน เช่น งานวิจัยของ Palmer (1965), Gupta (1972) และ Campbell et al. (1970) ซึ่งงานวิจัยทั้งสามนี้ได้กำหนดการจัดตารางการผลิตแบบ Flow Shop ให้มีเวลา

แล้วเสร็จรวมของงานในระบบต่ำที่สุด นอกจากนั้นยังมีบทความอื่นๆ ที่นำเสนอรูปแบบการจัดตารางการผลิตในลักษณะเดียวกันซึ่งได้แก่ Satake et al. (1999), Sabuncuoglu และ Bayiz (1998), Morikawa และ Satake (2003), Sule และ Vijayasundaram (1998) และ Ohta และ Nakatani (2006) ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการประหยัดพลังงาน และการลดค่าไฟฟ้านั้น พิพรรช (2539) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการออกแบบระบบเก็บความเย็นในรูปน้ำแข็งสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแช่แข็งซึ่งมีการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOD เพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด สุตสาคร (2538) นำเสนอแนวทางเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน โดยการลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด และการปรับตัวประกอบพลังไฟฟ้า โดยคำนึงถึงมาตรการต่างๆ ได้แก่ การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนการย้ายเวลาการทำงานของห้องแช่แข็ง Litt et al. (1988) ได้นำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตและการวางแผนใช้โดยระบบผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมเตาเผาหลายๆ เตา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงาน ในขณะที่ยังใช้เตาให้เกิดประโยชน์สูงสุด งานวิจัยของ Ashok (2005) ได้สร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าไฟฟ้าซึ่งเป็นอัตราการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านผลิตภัณฑ์ การไหลของงาน และการเก็บรักษา

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่ายังไม่มีความใดที่นำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตซึ่งเป็นระบบการผลิตแบบสั่งทำเพื่อลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอรูปแบบวิธีการจัดตารางการผลิตที่สามารถใช้ในการลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งจะช่วยให้การลดต้นทุนค่าไฟฟ้าโดยมีเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบที่เหมาะสม

วิธีการที่นำเสนอ

วิธีจัดตารางการผลิตที่นำเสนอได้นั้นได้พัฒนาขึ้นโดยการปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณต่อจากวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and Bound)¹ โดยมีสมการเป้าหมาย คือค่าเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบต่ำที่สุด หลังจากได้คำตอบเริ่มต้นจากวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต ขั้นตอนต่อไปจะใช้คำตอบเริ่มต้นมาคำนวณหาค่าไฟฟ้าในระบบการคิดค่าไฟฟ้าแบบปกติ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า Value Function (vf) ซึ่งมีรูปแบบดังสมการต่อไปนี้

$$vf = \alpha \cdot t_c + \beta \cdot c \quad (1)$$

โดยที่ α = น้ำหนักคะแนนความสำคัญของค่าเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบ

β = น้ำหนักคะแนนความสำคัญของค่าไฟฟ้า

t_c = เวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบ (โดยปรับฐานให้มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1)

c = ค่าไฟฟ้าเนื่องจากกระบวนการผลิตของงานในระบบ (โดยปรับฐานให้มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1)

¹ เนื่องจากเนื้อที่จำกัด วิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตจะไม่อธิบายในบทความนี้แต่ผู้อ่านสามารถดูได้จาก Lomnicki (1965) และ ปารเมศ (2546)

ในที่นี้ $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$ และ $\alpha + \beta = 1$ ต่อจากนั้น νf จะนำไปใช้ในการคำนวณในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่น่าเสนอ ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

Algorithm 1: Maximum Power (MP) Algorithm

แนวคิดของวิธีนี้จะหาตำแหน่งที่เกิดช่วงโหลดสูงสุดในช่วงที่มีการคิดค่าใช้จ่ายของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าปกติ แล้วทำการย้ายเวลาเริ่มต้นการทำงานของงานที่มีค่าโหลดมากที่สุดออกไปเป็นระยะทางเท่ากับระยะเวลาที่เกิดโหลดสูงสุด วัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมนี้เพื่อต้องการให้ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นลดลงอย่างรวดเร็วแต่อาจจะส่งผลให้เวลาแล้วเสร็จรวมของงานมีค่าสูงขึ้นมาก (ดูที่ตารางภาคผนวก 1)

Algorithm 2: Minimum Processing Time (MPT) Algorithm

แนวคิดของวิธีนี้จะหาตำแหน่งที่เกิดช่วงโหลดสูงสุดซึ่งเป็นช่วงที่มีการคิดค่าใช้จ่ายของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าปกติ แล้วทำการย้ายเวลาเริ่มต้นการทำงานของงานที่มีเวลางานน้อยที่สุดออกไปเป็นระยะทางเท่ากับระยะเวลาที่เกิดโหลดสูงสุด วัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมที่ 2 ก็เพื่อให้ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นลดลงและอาจจะส่งผลให้เวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบมีค่าไม่สูงขึ้นไม่มากนัก (ดูที่ตารางภาคผนวกที่ 2)

Algorithm 3: Mix (MIX) Algorithm

แนวคิดของวิธีนี้จะเป็นการรวม MP และ MPT Algorithms โดยมีหลักการอยู่ว่าในช่วงแรกจะใช้วิธี MP Algorithm ช่วยในการลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลง และเมื่อการคำนวณผ่านไป n รอบการคำนวณแล้ว จะใช้วิธี MPT Algorithm ในการลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลงในช่วงหลังเป็นจำนวน n' รอบการคำนวณ ซึ่งแนวคิดนี้จะมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นเราจะพยายามลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดลงโดยพยายามให้ความสำคัญของเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบให้มากที่สุด (ดูที่ตารางภาคผนวกที่ 3)

ในที่นี้จำนวนรอบการคำนวณ n ใน MP และ MPT Algorithms ได้กำหนดไว้ที่ 50 รอบ ส่วน MIX Algorithm จำนวนรอบการคำนวณ (n และ n') ได้กำหนดไว้ที่ 10 และ 40 รอบตามลำดับ² ซึ่งการกำหนดเช่นนั้น เนื่องจากขณะที่แต่ละอัลกอริทึมทำการคำนวณจะมีการเลื่อนงานออกไปเป็นเวลาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 82.5 นาที (5.5x15 นาที) และรอบในการคำนวณที่ได้ตั้งไว้ที่ 50 รอบ ก็จะใช้เวลาเลื่อนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 82.5x50=4125 นาที (68.75 ชม.) และจากการทดลองได้ตั้งข้อกำหนดไว้ว่า งานทุกงานต้องผลิตให้เสร็จภายใน 1 วัน (24ชม.) จึงพบว่าการกำหนดรอบการคำนวณเท่ากับ 50 รอบนั้นเพียงพอสำหรับแต่ละอัลกอริทึมที่จะใช้ในการค้นหาคำตอบ

² ยังไม่ได้มีการศึกษาว่าค่า $n = 10$ และ $n' = 40$ นั้นมีความเหมาะสมเพียงใด

วิธีการศึกษา

ตารางที่ 1 ได้กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอ จากตารางที่ 1 ปัจจัยที่ 1) และ 2) กำหนดให้ ที่ระดับสูงมีความแปรปรวนของตัวแปรสูง และที่ระดับต่ำ มีความแปรปรวนที่ต่ำกว่า ซึ่งปัจจัยทั้งสองจะทดสอบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ นั้นให้คำตอบเป็นอย่างไรในระดับความแปรปรวนที่แตกต่างกัน

ในที่นี้เพื่อสะดวกแก่การวิเคราะห์ผลจึงได้จำแนกการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองย่อยโดยแบ่งตามระดับของอัตราส่วน α และ β ในแต่ละชุดการทดลองจะทดสอบอัลกอริทึมภายใต้ปัจจัยที่ 1) และ 2) โดยกำหนดให้อัตราส่วน α และ β คงที่ในแต่ละชุดการทดลองย่อย ดังนั้นในแต่ละชุดการทดลองย่อยจึงมี $2 \times 2 \times 4 = 16$ หน่วยการทดลอง

ในการทดลองนี้ค่า Value Function จะใช้เป็นตัววัดความสามารถในการให้คำตอบของแต่ละอัลกอริทึม และ วิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตจะเป็นอัลกอริทึมพื้นฐาน (Baseline Algorithm) ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม และเพื่อลดความโน้มเอียงเนื่องจากการสุ่มตัวอย่าง (Dependency on Sampling) แต่ละหน่วยการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 100 ครั้ง ซึ่งในแต่ละครั้ง การสุ่มตัวอย่างของตัวแปรการทดลองจะเกิดขึ้นใหม่ทุกครั้ง

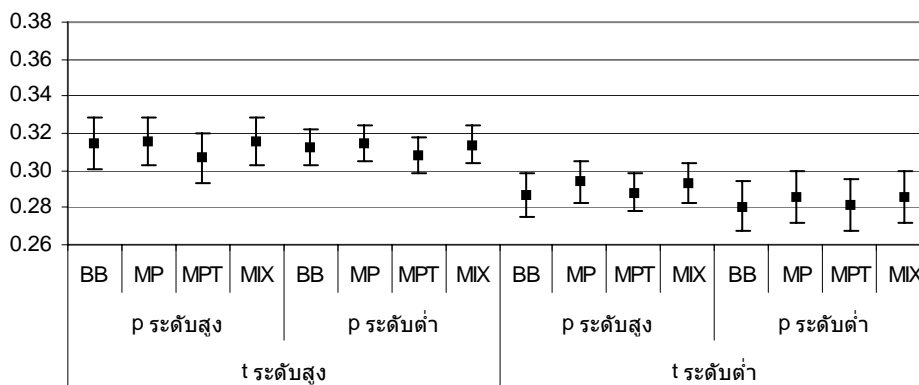
ปัจจัยการทดลอง	ระดับ
1) เวลาที่แต่ละเครื่องจักรใช้ในการผลิตในแต่ละงาน (t) ใน 1 หน่วยเวลา (x15 นาที)	1) สูง: $t \sim \text{uniform}[1,10]$ 2) ต่ำ: $t \sim \text{uniform}[4,7]$
2) กำลังไฟฟ้าของแต่ละเครื่องจักร (p) ในหน่วยของ kW	1) สูง: $p \sim \text{uniform}[1,10]$ 2) ต่ำ: $p \sim \text{uniform}[4,7]$
3) อัตราส่วนของ α และ β	1) สูง: $\alpha : \beta = 0.7:0.3$ 2) ปานกลาง: $\alpha : \beta = 0.5:0.5$ 3) ต่ำ: $\alpha : \beta = 0.3:0.7$
4) วิธีการจัดตารางการผลิตที่นำเสนอ	1) MP Algorithm 2) MPT Algorithm 3) MIX Algorithm 4) Branch and Bound Algorithm

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลอง

ผลการศึกษา

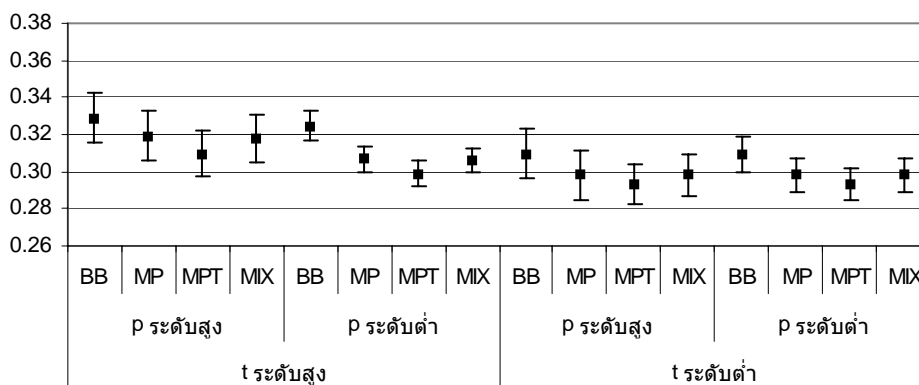
ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าแต่ละอัลกอริทึมให้ผลคำตอบอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมพื้นฐานในแต่ละปัจจัยการทดลอง ในที่นี้ผลการทดลองนำเสนอในรูปแบบของช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่า Value Function (ผลรวมปรับค่านำหน้าระหว่างเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบและค่า

ไฟฟ้า) ของแต่ละอัลกอริทึมซึ่งรูปแบบดังกล่าวจะช่วยให้เข้าใจถึงค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของ Value Function ของแต่ละอัลกอริทึม การเปรียบเทียบค่า Value Function นั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)³ และการเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละอัลกอริทึมในการให้คำตอบโดยวิธี Duncan (Montgomery, 1997)



รูปที่ 1 ผลการทดลองในกรณี $\alpha:\beta = 0.7:0.3$

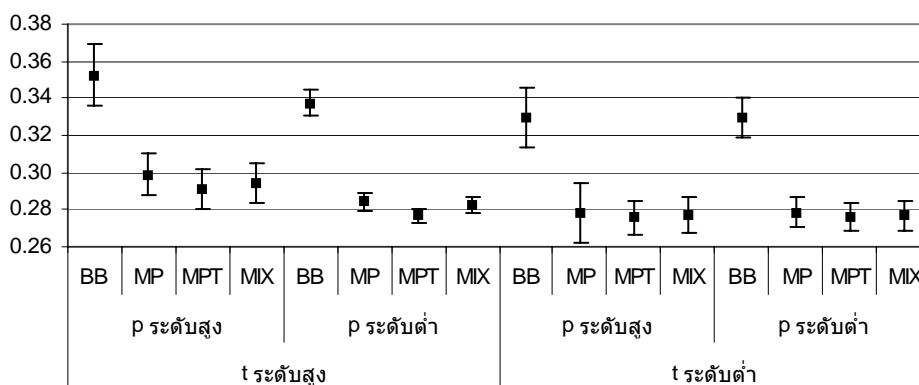
จากรูปที่ 1 ซึ่งแสดงผลการทดลองในกรณีที่ให้ความสำคัญของเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบมากกว่าค่าไฟฟ้าพบว่า ทุกอัลกอริทึมให้ผลคำตอบที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบที่ปัจจัยการทดลองเดียวกัน ส่วนผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึมโดยวิธี Duncan (ตารางภาคผนวกที่ 4) พบว่าแต่ละอัลกอริทึมให้ผลคำตอบที่ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 2 ผลการทดลองในกรณี $\alpha:\beta = 0.5:0.5$

³ ในที่นี้การทดสอบว่าปัจจัยใดมีผลกระทบต่อค่า Value Function จะไม่นำเสนอ เนื่องจากไม่ใช่จุดมุ่งหมายหลักของการทดลอง แต่จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบความแตกต่างแต่ละอัลกอริทึมในการให้ผลคำตอบ

รูปที่ 2 แสดงผลการทดลองในกรณีที่ทำให้ความสำคัญของเวลาแล้วเสร็จของงานในระบบเท่ากับค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 2 MPT Algorithm ให้ค่า Value Function ที่ต่ำกว่าวิธีอื่นซึ่งหมายความว่าวิธี MPT มีแนวโน้มลดทั้งเวลาแล้วเสร็จรวมของงานและค่าไฟฟ้าได้ดีกว่าวิธีอื่น อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบ อัลกอริธึมโดยวิธี Duncan (ตารางภาคผนวกที่ 5) พบว่า MPT, MIX และ MP Algorithm ให้คำตอบที่ดีกว่า วิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบอัลกอริธึมที่นำเสนอด้วยกันเองพบว่าแต่ละอัลกอริธึมที่นำเสนอั้นไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 3 ผลการทดลองในกรณี $\alpha:\beta = 0.3:0.7$

รูปที่ 3 แสดงผลการทดลองในกรณีที่ทำให้ความสำคัญของเวลาแล้วเสร็จของงานในระบบน้อยกว่าค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกอัลกอริธึมที่นำเสนอให้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตอย่างชัดเจนไม่ว่าจะอยู่ภายใต้ปัจจัยการทดลองแบบใด ในกรณีนี้ผลการทดลองเป็นไปตามที่คาดหมายไว้ กล่าวคือเมื่อให้ความสำคัญของค่าไฟฟ้ามากกว่าเวลาแล้วเสร็จรวมของงาน ทุกอัลกอริธึมน่าจะให้คำตอบได้ดีกว่าวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตเนื่องจากวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตไม่ได้พิจารณาค่าไฟฟ้าในการหาคำตอบ และการเปรียบเทียบอัลกอริธึมโดยวิธี Duncan (ตารางภาคผนวกที่ 6) ยืนยันว่าทุกอัลกอริธึมให้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 1-3 เมื่อมีการเปรียบเทียบผลคำตอบของแต่ละอัลกอริธึมที่นำเสนอพบว่า MPT มีแนวโน้มที่จะให้ผลคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริธึมอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบปัจจัยการทดลองเดียวกัน กล่าวคือ MPT ให้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของ Value Function ที่ต่ำกว่าอัลกอริธึมอื่นๆ

ตารางที่ 2-4 แสดงการวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงลึก โดยที่ค่า Dt_c ของแต่ละอัลกอริธึมในตารางดังกล่าวแสดงค่าร้อยละของความแตกต่างระหว่างค่า t_c โดยเฉลี่ยของอัลกอริธึมนั้นๆ⁴ เมื่อเทียบ

⁴ ค่า t_c โดยเฉลี่ยของแต่ละอัลกอริธึมคำนวณโดยการเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 100 ครั้ง

กับค่า t_c โดยเฉลี่ยของอัลกอริทึมพื้นฐาน ในขณะที่ค่า D_c แสดงค่าความแตกต่างเป็นร้อยละของค่า c โดยเฉลี่ยของแต่ละอัลกอริทึมเทียบกับอัลกอริทึมพื้นฐาน ค่าดังกล่าวอาจแปลความหมายโดยใช้ตัวอย่างดังต่อไปนี้เช่น จากตารางที่ 2 ที่ t ระดับสูงและ p ระดับสูง ค่า Dt_c ของ MP Algorithm มีค่าเท่ากับ 5.18% ซึ่งหมายความว่าโดยเฉลี่ยแล้ว MP Algorithm มีค่าเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบที่สูงกว่าอัลกอริทึมพื้นฐาน 5.18% และเช่นเดียวกัน ค่า c ของ MP Algorithm มีค่าเท่ากับ -14.45% ซึ่งหมายความว่าโดยเฉลี่ยแล้ว MP Algorithm สามารถลดค่าไฟฟ้าต่ำกว่าอัลกอริทึมพื้นฐาน 14.45%

	t ระดับสูง				t ระดับต่ำ			
	p ระดับสูง		p ระดับต่ำ		p ระดับสูง		p ระดับต่ำ	
	t_c	c	t_c	c	t_c	c	t_c	c
MP	5.18%	-14.45%	4.55%	-12.92%	5.88%	-10.10%	5.56%	-12.04%
MPT	2.42%	-13.39%	2.98%	-13.56%	4.81%	-11.61%	4.49%	-11.94%
MIX	5.20%	-14.58%	4.55%	-13.27%	5.91%	-10.56%	5.56%	-12.04%

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง t_c และ c ของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึมพื้นฐาน:

$$\alpha:\beta = 0.7:0.3$$

	t ระดับสูง				t ระดับต่ำ			
	p ระดับสูง		p ระดับต่ำ		p ระดับสูง		p ระดับต่ำ	
	t_c	c	t_c	c	t_c	c	t_c	c
MP	9.18%	-16.87%	8.26%	-20.05%	11.23%	-18.30%	9.14%	-16.62%
MPT	6.15%	-17.40%	6.53%	-21.26%	10.48%	-20.29%	9.32%	-19.77%
MIX	9.35%	-17.34%	8.62%	-20.62%	11.28%	-19.46%	9.24%	-17.04%

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง t_c และ c ของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึมพื้นฐาน:

$$\alpha:\beta = 0.5:0.5$$

	t ระดับสูง				t ระดับต่ำ			
	p ระดับสูง		p ระดับต่ำ		p ระดับสูง		p ระดับต่ำ	
	t_c	c	t_c	c	t_c	c	t_c	c
MP	29.37%	-33.72%	24.29%	-33.82%	34.41%	-36.31%	34.69%	-36.34%
MPT	25.40%	-34.49%	18.76%	-33.32%	31.65%	-35.99%	32.45%	-36.15%
MIX	32.41%	-36.23%	25.45%	-35.04%	36.71%	-35.70%	36.69%	-37.99%

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง t_c และ c ของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึมพื้นฐาน:

$$\alpha:\beta = 0.3:0.7$$

ตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบในกรณีที่ให้ความสำคัญกับเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบมากกว่าค่าไฟฟ้า ($\alpha:\beta = 0.7:0.3$) แสดงให้เห็นว่า โดยรวมแล้ว MP MPT และ MIX อัลกอริธึมมีค่าเวลาแล้วเสร็จรวมมากกว่าอัลกอริธึมมาตรฐานอยู่ประมาณ 5 % ในขณะที่สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ดีกว่าอัลกอริธึมมาตรฐานประมาณ 15% ส่วนตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบอัลกอริธึมในกรณีที่ให้ความสำคัญกับเวลาแล้วเสร็จของงานและค่าไฟฟ้าเท่ากัน ซึ่งตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโดยรวมแล้วอัลกอริธึมที่นำเสนอทั้งหมดให้ค่าเวลาแล้วเสร็จรวมของงานสูงกว่าอัลกอริธึมมาตรฐานประมาณ 9 % ในขณะที่สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ดีกว่าประมาณ 19% ในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีที่ให้ความสำคัญของเวลาแล้วเสร็จรวมของงานน้อยกว่าค่าไฟฟ้า ($\alpha:\beta = 0.3:0.7$) แสดงให้เห็นว่าโดยรวมแล้ว อัลกอริธึมที่นำเสนอให้ค่าเฉลี่ยเวลาแล้วเสร็จรวมของงานสูงกว่าอัลกอริธึมพื้นฐาน 30%แต่สามารถลดค่าไฟฟ้าได้มากกว่า ประมาณ 35%

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับงานแบบสั่งทำโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดค่าไฟฟ้าโดยลดที่ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดและในขณะเดียวกันยังลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบลง วิธีการจัดตารางการผลิตที่นำเสนอได้นั้นได้พัฒนาต่อยอดมาจากวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตและได้ทำการทดสอบผลการให้คำตอบภายใต้ปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการผลิตในแต่ละงานของแต่ละเครื่องจักรกำลังไฟฟ้าของแต่ละเครื่องจักร และอัตราส่วนน้ำหนักความสำคัญของเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบและค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้น วิธีที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีโดยเหมาะกับธุรกิจขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นงานผลิตแบบสั่งทำเช่น งานผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ที่มีจำนวนของเครื่องจักรและงานไม่มากนัก จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปและให้ข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้ ในกรณีที่ให้ความสำคัญกับเวลาแล้วเสร็จรวมของระบบมากกว่าค่าไฟฟ้า วิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสมที่สุดคือ การจัดตารางการผลิตโดยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขตเนื่องจากให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับวิธีอื่นและยังใช้เวลาในการหาคำตอบได้เร็วที่สุดและสะดวกที่สุด ส่วนในกรณีที่ให้ความสำคัญกับเวลาแล้วเสร็จรวมของงานในระบบและค่าไฟฟ้าเท่ากัน หรือให้ความสำคัญกับเวลาแล้วเสร็จรวมของงานน้อยกว่า วิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสมที่สุดคือ MPT Algorithm เนื่องจากให้คำตอบที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งบทความคนที่ 2 ขอขอบคุณพระเจ้าผู้ประทานพรและสติปัญญาในการดำเนินงานวิจัยนี้ และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ทุนอุดหนุนทั่วไปประจำปีงบประมาณ 2548)

เอกสารอ้างอิง

- ไชยะ แซ่มซ้อย. 2544. **คู่มือการลดค่าไฟฟ้า**. เอ็มแอนดอี: กรุงเทพฯ.
- ปารเมศ ชูติมา. 2546. **เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- พิพรรธ ทวีวัฒน์กิจ. 2539. “การลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ระบบเก็บน้ำแข็งในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง.” **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.
- สุดสาคร น้อยดี. 2539. “การศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานและลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในโรงงานปลาทูน่ากระป๋อง.” **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.
- Ashok, S. 2005. “Peak-load management in steel plants.” **National Institute of Technology**. Calicut, Calicut. India. 83, 5:413-424.
- Cambell, H.G., Dudek, R.A. and Smith, M.L. 1970. “A heuristic algorithm for the n-job m-machine sequencing problem.” **Management Science**. 16: 630-637.
- Gupta, J.N.D. 1972. “Heuristic algorithm for multistage flow shop problem.” **AIIIE Transactions**. 4:11-18.
- Litt et al, 1988. “A scheduling and planning expert system for multiple furnaces.” **Engineering Application for Artificial Intelligence**. 1, 1: 16-21
- Lomnicki, Z.A. 1965. “A branch and bound algorithm for the exact solution of the three-machine scheduling problem.” **Operation Research Quarterly**. 16:89-100.
- Morikawa, K. and Satake, T. 2003. “Branch and bound based makespan minimization using the rescheduling procedure of a human scheduler.” **Industrial Engineering & Management Systems, An International Journal**, 2, 145-150.
- Ohta, H. and Nakatani, T. 2006. “A heuristic job-shop scheduling algorithm to minimize the total holding cost of completed and in-process products.” **International Journal of Economics**, 101, 19–29.
- Plamer, D.S. 1965. “Sequence jobs through a multi-stage process in the minimum total time – A quick method of obtaining a near optimum.” **Operation Research Quarterly**. 16:101-107.
- Sabuncuoglu, I. , and Bayiz, M. 1999. “Job shop scheduling with beam search.” **European Journal of Operational Research**, 118, 2:390-412.
- Satake, T., Morikawa, K., Takahashi, K., and Nakamura, N. 1999. “Simulated annealing approach for minimizing the makespan of the general job-shop.” **International Journal of Production Economics**, 60-61, 515-522.
- Sule, D.R., and Vijayasundaram, K. 1998. “A heuristic procedure for makspan minimization in job shop with multiple identical processors.” **Computers Ind. Eng**, 3-4, 35: 399-402.

ภาคผนวก

สัญลักษณ์

L_B	=	ขีดจำกัดล่างของปัญหา
P^*	=	Peak Load ที่เกิดขึ้น
T	=	ระยะเวลาที่เกิด P^*
p_{ij}	=	ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องจักร $j, j=1, \dots, 4$ ที่ผลิตงาน $i, i=1, \dots, 4$
$p^*(i, j)$	=	ค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องจักร $j, j=1, \dots, 4$ ที่มีค่าสูงสุดที่ผลิตงาน i และทำงานในช่วงเวลา T
ts_{ij}	=	เวลาเริ่มต้นการทำงานของงาน $i, i=1, \dots, 4$ ที่ผลิตบนเครื่องจักร $j, j=1, \dots, 4$
tf_{ij}	=	เวลาสิ้นสุดการทำงานของงาน $i, i=1, \dots, 4$ ที่ผลิตบนเครื่องจักร $j, j=1, \dots, 4$
vf	=	ค่า Value Function
$t_p^*(i, j)$	=	เวลาการผลิตของเครื่องจักร $j, j=1, \dots, 4$ ที่มีค่าต่ำสุดที่ผลิตงาน i และทำงานในช่วงเวลา T
t_{ij}	=	เวลาการผลิตของเครื่องจักร $j, j=1, \dots, 4$ ที่ผลิตงาน $i, i=1, \dots, 4$

ตารางภาคผนวกที่ 1 MP Algorithm

- หาค่าตอบเริ่มต้นโดยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต
- คำนวณค่า $L_B = \min\{p_j, j=1, \dots, 4\}$
- กำหนดค่า n (จำนวนรอบในการคำนวณ)
- สำหรับรอบการคำนวณที่ $l=1$ ถึง n
- คำนวณหา P^*
- คำนวณหา T
- คำนวณค่า $p^*(i, j)$ เมื่อ $p^*(i, j) = \max\{p_{ij}, j=1, \dots, 4, i=1, \dots, 4\}$ ที่ทำงาน ณ ช่วงเวลา T และส่งคืนค่ากลับ $j^* = j$ และ $i^* = i$
- เลื่อนเวลาเริ่มต้นของงานใดๆ ที่เกิดในช่วงเวลา T ซึ่งทำบนเครื่องจักร j^* ออกไปเป็นระยะเวลา T

$$ts_{ij^*}^{new} = ts_{ij^*}^{old} + T$$
- ตรวจเงื่อนไขการทำงานซ้อนกันของเครื่องจักร โดยที่เวลา ณ ขณะทำงาน i ผลิตบนเครื่องจักร j^* จะต้องไม่ตรงกับเวลา ณ ขณะเครื่องจักร i ผลิตบนเครื่องจักรที่อยู่ก่อนหน้า ($t_{ij^*} \neq t_{ik}$)
$$\begin{aligned} \text{if} \quad & t_{ij} = t_{ik} \\ \text{then} \quad & ts_{ij^*}^{new} = tf_{ik} \\ \text{else} \quad & ts_{ij^*}^{new} = ts_{ij^*}^{old} + T \end{aligned}$$
- หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้นใหม่
- คำนวณค่าไฟฟ้าของงานในระบบที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- คำนวณค่า vf
- ถ้า $P^* > L_B$ ทำขั้นตอนที่ 5 ถ้า $P^* = L_B$ แล้วทำขั้นตอนที่ 14
- ตรวจสอบรอบการคำนวณถ้า $l < n$ ทำขั้นตอนที่ 5 และถ้า $l = n$ ทำขั้นตอนที่ 15
- ทำการหยุดคำนวณแล้วเลือกค่าชุดคำตอบที่มีค่า vf น้อยที่สุดมาเป็นคำตอบ

ตารางภาคผนวกที่ 2 MPT Algorithm

1. หาค่าตอบเริ่มต้นโดยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต
2. คำนวณค่า $L_B = \min\{p_j, j = 1, \dots, 4\}$
3. กำหนดค่า n (จำนวนรอบในการคำนวณ)
4. สำหรับรอบการคำนวณที่ $l = 1$ ถึง n
5. หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้น
6. คำนวณหาระยะเวลาที่เกิด Peak Load (T)
7. คำนวณค่า $t_p^*(i, j)$ เมื่อ $t_p^*(i, j) = \min\{t_{p(i,j)}, j = 1, \dots, 4, i = 1, \dots, 4\}$ ที่ทำงาน ณ ช่วงเวลา T และส่งคืนกลับ $j^* = j$ และ $i^* = i$
8. เลื่อนเวลาเริ่มต้นของงานใดๆ ที่เกิดในช่วงเวลา T ซึ่งทำบนเครื่องจักร j^* ออกไปเป็นระยะเวลา T

$$t_{j^*}^{new} = t_{j^*}^{old} + T$$
9. ตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานซ้อนกันของเครื่องจักร โดยที่เวลา ณ ขณะทำงาน i ผลิตบนเครื่องจักร j^* จะต้องไม่ตรงกับเวลา ณ ขณะเครื่องจักร i ผลิตบนเครื่องจักรที่อยู่ก่อนหน้า ($t_{ij^*} \neq t_{ik}$)
$$\begin{aligned} \text{if} \quad & t_{ij} = t_{ik} \\ \text{then} \quad & t_{j^*}^{new} = t_{ik} \\ \text{else} \quad & t_{j^*}^{new} = t_{j^*}^{old} + T \end{aligned}$$
10. หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้นใหม่
11. คำนวณค่าไฟฟ้าของงานในระบบที่เกิดขึ้นทั้งหมด
12. คำนวณค่า v_f
13. ถ้า $P^* > L_B$ ทำขั้นตอนที่ 5 และถ้า $P^* = L_B$ ทำขั้นตอนที่ 14
14. ตรวจสอบรอบการคำนวณถ้า $l < n$ ทำขั้นตอนที่ 5 และถ้า $l = n$ ทำขั้นตอนที่ 15
15. ทำการหยุดคำนวณแล้วเลือกค่าชุดคำตอบที่มีค่า v_f น้อยที่สุดมาเป็นคำตอบ

ตารางภาคผนวกที่ 3 MIX Algorithm

1. หาค่าตอบเริ่มต้นโดยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต
2. คำนวณค่า $L_B = \min\{p_j, j = 1, \dots, 4\}$
3. กำหนดค่า n (จำนวนรอบในการคำนวณ)
4. สำหรับรอบการคำนวณที่ $l = 1$ ถึง n
5. หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้น
6. คำนวณหาระยะเวลาที่เกิด Peak Load (T)
7. คำนวณค่า $p^*(j)$ เมื่อ $p^*(j) = \max\{p_j, j = 1, \dots, 4\}$ ที่ทำงาน ณ ช่วงเวลา T และ $j = j^*$
8. เลื่อนเวลาเริ่มต้นของงานใดๆ ที่เกิดในช่วงเวลา T ซึ่งทำบนเครื่องจักร j^* ออกไปเป็นระยะเวลา T

$$t_{j^*}^{new} = t_{j^*}^{old} + T$$

9. ตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานซ้อนกันของเครื่องจักร โดยที่เวลา ณ ขณะทำงาน i ผลิตบนเครื่องจักร j^* จะต้องไม่ตรงกับเวลา ณ ขณะเครื่องจักร i ผลิตบนเครื่องจักรที่อยู่ก่อนหน้า ($t_{ij^*} \neq t_{ik}$)

$$\begin{aligned} \text{if} \quad & t_{ij} = t_{ik} \\ \text{then} \quad & ts_{ij^*}^{new} = tf_{ik} \\ \text{else} \quad & ts_{ij^*}^{new} = ts_{ij^*}^{old} + T \end{aligned}$$

10. หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้นใหม่
 11. คำนวณค่าไฟฟ้าของงานในระบบที่เกิดขึ้นทั้งหมด
 12. คำนวณค่า vf
 13. ถ้า $P^* > L_B$ ทำขั้นตอนที่ 5 และถ้า $P^* = L_B$ ทำขั้นตอนที่ 26
 14. ตรวจสอบรอบการคำนวณถ้า $l < n$ ทำขั้นตอนที่ 5 และถ้า $l = n$ ทำขั้นตอนที่ 15
 15. สำหรับรอบการคำนวณที่ $l = n+1$ ถึง $l = n'$
 16. หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้น
 17. คำนวณหาระยะเวลาที่เกิด Peak Load (T)
 18. คำนวณค่า $t_p^*(j)$ เมื่อ $t_p^*(j) = \min\{t_{p(j)}, j=1, \dots, 4\}$ ที่ทำงาน ณ ช่วงเวลา T และ $j = j^*$
 19. เลื่อนเวลาเริ่มต้นของงานใดๆ ที่เกิดในช่วงเวลา T ซึ่งทำบนเครื่องจักร j^* ออกไปเป็นระยะเวลา T

$$ts_{ij^*}^{new} = ts_{ij^*}^{old} + T$$

20. ตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานซ้อนกันของเครื่องจักร โดยที่เวลา ณ ขณะทำงาน i ผลิตบนเครื่องจักร j^* จะต้องไม่ตรงกับเวลา ณ ขณะเครื่องจักร i ผลิตบนเครื่องจักรที่อยู่ก่อนหน้า ($t_{ij^*} \neq t_{ik}$)

$$\begin{aligned} \text{if} \quad & t_{ij} = t_{ik} \\ \text{then} \quad & ts_{ij^*}^{new} = tf_{ik} \\ \text{else} \quad & ts_{ij^*}^{new} = ts_{ij^*}^{old} + T \end{aligned}$$

21. หาค่า Peak Load (P^*) ที่เกิดขึ้นใหม่
 22. คำนวณค่าไฟฟ้าของงานในระบบที่เกิดขึ้นทั้งหมด
 23. คำนวณค่า vf
 24. ถ้า $P^* > L_B$ ทำขั้นตอนที่ 16 และถ้า $P^* = L_B$ ทำขั้นตอนที่ 26
 25. ตรวจสอบรอบการคำนวณถ้า $l < n'$ ทำขั้นตอนที่ 16 และถ้า $l = n'$ ทำขั้นตอนที่ 26
 26. ทำการหยุดคำนวณแล้วเลือกค่าชุดคำตอบที่มีค่า vf น้อยที่สุดมาเป็นคำตอบ

ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลการเปรียบเทียบ Algorithms โดยวิธี Duncan, $\alpha:\beta = 0.7:0.3$

METHOD	N	Subset
MPT	400	.2960885
BB	400	.2985453
MIX	400	.3020293
MP	400	.3022763
Sig.		.193

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = .004.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 400.000.

b Alpha = .05.

ตารางภาคผนวกที่ 5 ผลการเปรียบเทียบ Algorithms โดยวิธี Duncan, $\alpha:\beta = 0.5:0.5$

METHOD	N	Subset	
		1	2
MPT	400	.2970172	
MIX	400	.3034150	
MP	400	.3040185	
BB	400		.3165348
Sig.		.083	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = .003.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 400.000.

b Alpha = .05.

ตารางภาคผนวกที่ 6 ผลการเปรียบเทียบ Algorithms โดยวิธี Duncan, $\alpha:\beta = 0.3:0.7$

METHOD	N	Subset	
		1	2
MPT	400	.2825837	
MIX	400	.2851972	
MP	400	.2879755	
BB	400		.3418758
Sig.		.154	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Based on Type III Sum of Squares The error term is Mean Square(Error) = .003.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 400.000.

b Alpha = .05.