

การประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการค้นหาแบบตาบู่ในการจัดตารางการผลิต เครื่องจักรแบบขนาน กรณีศึกษาโรงงานทอयाง

ณัฐพล พุทธิพงษ์¹ และ ธัญญา วสุศรี²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2548 ตอรับเมื่อ 25 พฤษภาคม 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงกิจกรรมวางแผนการผลิตของโรงงานผลิตแถบยาง ที่มีการดำเนินการแบบผลิตตามสั่ง และผลิตภัณฑ์ของทางโรงงานมีความหลากหลายในด้านลวดลาย ชนิดของวัตถุดิบ ส่วนผสม โดยมีจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมากถึง 180 รายการ โดยจะทำการปรับปรุงในส่วนของการจัดตารางการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากทางโรงงานประสบปัญหาการส่งมอบสินค้าล่าช้าอยู่ในช่วงร้อยละ 16.78 ถึงร้อยละ 32 มีสาเหตุหลักจากขั้นตอนการจัดลำดับงาน ไม่มีการจัดลำดับก่อนหลังของงานที่เหมาะสม นอกจากนี้การจัดตารางการผลิตให้กับจำนวนงานโดยเฉลี่ยมากถึง 70 รายการ/สัปดาห์มีความยุ่งยากและซับซ้อน ผู้จัดตารางการผลิตจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถพิจารณาข้อจำกัดทุกตัวไปพร้อมๆ กันได้อย่างละเอียด อีกทั้งยังต้องใช้เวลาในการจัดมากอีกด้วย ดังนั้นเพื่อขยายขีดความสามารถในการจัดตารางการผลิต โดยอาศัยจุดเด่นของการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์และวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ในการทำวิจัยจะมีการพัฒนาโปรแกรมการจัดตารางการผลิตเพื่อช่วยในการจัดตารางการผลิต โดยนำวิธีการค้นหาแบบตาบู่มาเป็นกลไกในการจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักรในส่วนทอ ที่มีลักษณะเป็นแบบจำลองเครื่องจักรขนาน เพื่อให้การจัดตารางการผลิตสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเวลาที่ใช้ในการผลิตไม่ผันแปรมากนัก และในช่วงการวางแผนการผลิตหนึ่งๆ มีเวลาที่เป็นภาระเครื่องจักรไม่มากกว่าเวลาของเครื่องจักรที่มีอยู่ จากการทดลองจัดตารางการผลิต พบว่าการจัดตารางการผลิตด้วยโปรแกรมสามารถลดจำนวนงานล่าช้าได้ร้อยละ 76.49 ลดเวลาล่าช้ารวมได้ร้อยละ 97.67 และลดเวลาที่ใช้ในการจัดได้ร้อยละ 94.04 เมื่อเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตแบบเดิม

คำสำคัญ : การจัดตารางการผลิต / วิธีการค้นหาแบบตาบู่ / เครื่องจักรแบบขนาน

¹ นักวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านโลจิสติกส์

² อาจารย์ บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม

An Application of Tabu Search Technique in Parallel Machine Production Scheduling A Case Study of an Elastic Knitting Factory

Nuttapol Puttipong¹ and Thananya Wasusri²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 28 February 2005 ; accepted 25 May 2005

Abstract

The purpose of this study is to improve the performance of production scheduling at an elastic knitting factory, in which Make To Order strategy (MTO) is being applied. There are 180 different product types being served to customers. The factory faced with late delivery high from 16.78 % to 32 % and the main reason was from ineffective of production scheduling. Moreover, the average number of task per week is 70 tasks. The production scheduling is difficult as there are many factors that a scheduler can not take them all into account. In order to improve the performance of production scheduling at the factory, the Tabu Search technique was then applied. A computer programming was developed with using the Tabu Search technique to establish production scheduling on the parallel machine environment with concerning of setup time. In addition to these, production time is almost stable and machine available time is more than machine loading time. It was found that the program developed could reduce the tardy job number up to 76.49 %. Tardiness could be decreased by 97.67 % and the time for establishing the production schedule could be reduced to 94.04 % comparing the factory's typical production scheduling records.

Keywords : Scheduling / Tabu Search / Parallel Machine

¹ Researcher, Center for Logistics Excellence.

² Lecturer, Graduate School of Management and Innovation.

1. บทนำ

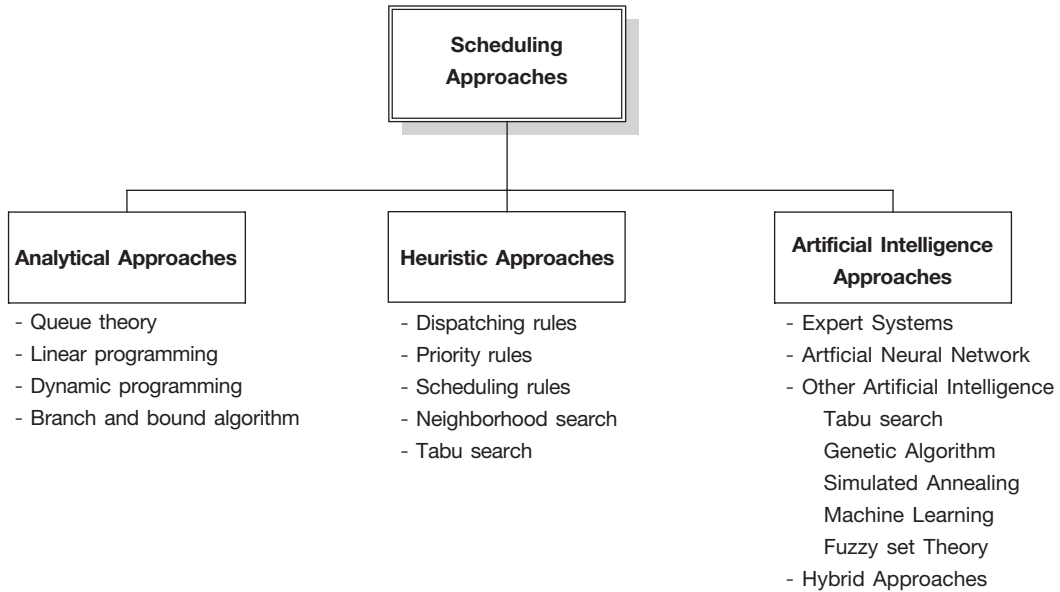
กิจกรรมทางด้านวางแผนการผลิตนั้นถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญอย่างมาก เพราะการวางแผนการผลิตที่ดีและมีประสิทธิภาพนั้น ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมขององค์กร นอกจากนี้ยังช่วยให้ต้นทุนในการดำเนินการลดลง และสามารถตอบสนองลูกค้าได้ทันตามเวลาที่ลูกค้าต้องการอีกด้วย

จากการศึกษาข้อมูลของโรงงานตัวอย่างที่เป็นโรงงานผลิตแบบยาง ที่มีการดำเนินการแบบผลิตตามสั่ง และมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์มากถึง 180 ชนิด พบว่าทางโรงงานประสบปัญหาในส่วนการส่งมอบสินค้าล่าช้า อยู่ในช่วงร้อยละ 16.78 ถึงร้อยละ 32 มีสาเหตุหลักจากขั้นตอนการจัดลำดับงาน ไม่มีการจัดลำดับก่อนหลังของงานที่เหมาะสม เนื่องจากผู้จัดตารางการผลิตจัดตารางโดยมุ่งเน้นไปที่กลุ่มรายการสินค้าที่เหมือนกัน ถึงแม้จะช่วยลดเวลาในการตั้งเครื่องลงได้ แต่จะก่อให้เกิดความล่าช้าเกิดขึ้น และในการจัดตารางการผลิตยังต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ อีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัจจัยที่จะต้องนำมาพิจารณาได้แก่ ความสามารถในการผลิตของแต่ละรายการ จำนวนงานที่จะต้องทำการจัดตารางการผลิต และรายละเอียดของแต่ละงานที่จะต้องนำมาพิจารณา ซึ่งประกอบไปด้วย เวลาที่งานเข้ามา (release date) เวลาที่ใช้ในการผลิต (processing time) เวลาที่กำหนดส่ง (due date) เวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่อง (setup time) ในกรณีที่มิได้สั่งซื้อเข้ามาจำนวนมาก ปัจจัยที่จะต้องนำมาพิจารณาจะแปรผันตามจำนวนใบสั่งซื้อ ทำให้ผู้จัดตารางการผลิตไม่สามารถพิจารณาข้อจำกัดทุกตัวไปพร้อมๆ กันได้อย่างละเอียด จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ตารางการผลิตที่ได้อาจจะเป็นตารางการผลิตที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ค่อยน่าพอใจ ซึ่งก่อให้เกิดความล่าช้าขึ้น นอกจากนี้การจัดตารางการผลิตให้กับงานจำนวนมากมีความยุ่งยากและซับซ้อน และผู้จัดตารางการผลิตยังต้องใช้เวลาในการจัดมากอีกด้วย เพื่อให้ตารางการผลิตที่จัดทำขึ้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาโปรแกรมขึ้นมา เพื่อช่วยลดเวลาในการจัดตารางการผลิต ช่วยในการจัดลำดับงานอย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อแก้ปัญหาทางด้านขีดจำกัดความสามารถของผู้จัดตารางการผลิต ซึ่งจะช่วยให้ผู้จัดตารางการผลิตสามารถจัดตารางการผลิตได้อย่างรวดเร็ว และได้ตารางการผลิตที่ให้ผลลัพธ์ที่ดี

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการจัดตารางการผลิต

ปัญหาทางด้านการจัดตารางการผลิตนั้นสามารถแก้ได้หลายวิธีการด้วยกัน วิธีการที่นำมาใช้นั้นจะมีความเหมาะสมกับลักษณะปัญหาที่ต่างกัน วิธีการหนึ่งอาจจะมีเหมาะสมกับลักษณะปัญหาหนึ่ง แต่นำมาใช้กับอีกลักษณะปัญหาหนึ่งไม่ได้ Geyik และ Cedimoglu [1] ได้แบ่งวิธีการที่ใช้ในการจัดตารางการผลิตออกเป็น 3 วิธีการใหญ่ๆ ได้แก่ วิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical Approaches) วิธีการเชิงฮิวริสติก (Heuristic Approaches) และวิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Approaches) รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการจัดตารางการผลิต [1]

2.2 วิธีการจัดตารางการผลิตแบบตาม

การค้นหาแบบตามเป็นฮิวริสติกวิธีหนึ่ง โดย Fred Glover เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบตามในปี 1977 ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยได้นำวิธีการค้นหาแบบตาม ซึ่งเป็นเทคนิคในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดขั้นสูง (advanced optimization technique) มาใช้ในส่วนของการจัดตารางการผลิต เพื่อให้ได้ตารางการผลิตที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ส่วนที่สำคัญของวิธีการค้นหาแบบตามได้แก่ รายการตาม ซึ่งเป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานั้นๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบไม่ให้เกิดกลับไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ซึ่งเคยผ่านมาก่อนหน้านี้แล้ว วิธีการค้นหาแบบตาม เป็นวิธีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาทางด้านการจัดเรียงที่ต้องการคำตอบที่ดีที่สุด (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของวิธีการค้นหาแบบตามคือ มีการปรับปรุงคำตอบที่ได้ในแต่ละรอบการค้นหา โดยสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด [2-4]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบการผลิตของกรณีศึกษานี้เป็นระบบการผลิตแบบเครื่องจักรขนาน (identical parallel machine) ที่มีการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่อง (setup time) จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตสำหรับหน่วยผลิตแบบขนานนั้นมีจำนวนมาก แต่งานวิจัยที่มีการพิจารณาเวลาในการตั้งเครื่องนั้นยังมีจำนวนจำกัด จากการสำรวจสามารถแยกตามวิธีการจัดตารางการผลิตได้ดังนี้ งานวิจัยที่ใช้วิธีการเชิงวิเคราะห์มีเพียงงานเดียวเท่านั้นที่พิจารณาเวลาในการตั้งเครื่อง Schutten และ Leussink [5] ได้ใช้วิธีการ branch and bound โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ความเบี่ยงเบนสูงสุด (maximum lateness) ของงานใดๆ มีค่าต่ำที่สุด งานวิจัยที่ใช้วิธีการเชิงฮิวริสติกประกอบไปด้วย Centeno และ Armacost [6] ใช้กฎการจัดลำดับแบบ LFJ (least flexible job first) และ LFM (least flexible machine first) ร่วมกัน เพื่อทำให้ความเบี่ยงเบนสูงสุดมีค่าต่ำที่สุด Weng et. al. [7] ใช้

วิธีการฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้น 7 วิธี เพื่อให้เวลาเสร็จสิ้นเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของงานมีค่าต่ำที่สุด Franca et. al. [2] และ Bilge et. al. [8] ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอด (Tabu search) โดยงานวิจัยของ Franca et. al. [2] มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ makespan มีค่าต่ำที่สุด ส่วนงานวิจัยของ Bilge et. al. [8] มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความล่าช้ารวมมีค่าต่ำที่สุด งานวิจัยที่ใช้วิธีการเชิงปัญญาระดับสูงประกอบไปด้วย Serifoglu [9] ใช้วิธี genetic algorithm วัตถุประสงค์ของงานวิจัยก็เพื่อ ทำให้ผลรวมค่าน้ำหนักการส่งงานก่อนกำหนดและการส่งงานไม่ทันกำหนดมีค่าต่ำที่สุด Kim et. al. [10] ใช้วิธี simulated annealing โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ความล่าช้ารวมมีค่าต่ำที่สุด Park et. al. [11] ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (neural network) ร่วมกับกฎฮิวริสติก เพื่อให้ผลรวมของความล่าช้าแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเอาเทคนิคการค้นหาแบบตาบอดเข้าประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบเครื่องจักรขนาน โดยนำเอาเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่องเข้าเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาด้วย

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของทางโรงงาน

โรงงานมีการดำเนินการแบบผลิตตามสั่ง (make to order) สามารถทำการผลิตแยกโดยแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้เป็น 4 ชนิดคือ สายแขน กำมะหยี่ ริปบิ้น และ โคเชอร์ ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปทั้ง 4 ชนิดนี้สามารถแยกย่อยตามชนิดของยาง ขนาด และลวดลายออกเป็นรายการสินค้าได้ถึง 180 รายการ โรงงานมีเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด 28 เครื่อง แบ่งเป็นเครื่องจักรที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทสายแขน กำมะหยี่ ริปบิ้นจำนวน 20 เครื่อง เครื่องจักรที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทโคเชอร์จำนวน 8 เครื่อง เวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่องขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ประเภทสายแขนใช้เวลา 12 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ประเภทริปบิ้นและโคเชอร์ใช้เวลา 8 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ประเภทกำมะหยี่ใช้เวลา 4 ชั่วโมง

เนื่องจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์มีมาก ผู้วิจัยได้ทำการจำกัดขอบเขตของการศึกษา โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์ด้วย Volume-Variety Chart และเปอร์เซ็นต์การใช้งานเครื่องจักร พบว่าเปอร์เซ็นต์การใช้งานเครื่องจักรที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทสายแขน กำมะหยี่ ริปบิ้นอยู่ในสัดส่วนที่สูง ส่วนเปอร์เซ็นต์การใช้งานเครื่องจักรที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทโคเชอร์อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ และจากการวิเคราะห์ Volume-Variety พบว่าผลิตภัณฑ์ประเภทสายแขน กำมะหยี่ ริปบิ้น จำนวน 34 รายการมีสัดส่วนความต้องการเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความต้องการทั้งหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะจำกัดขอบเขตการศึกษา โดยทำการศึกษาเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทสายแขน กำมะหยี่ ริปบิ้น จำนวน 34 รายการ

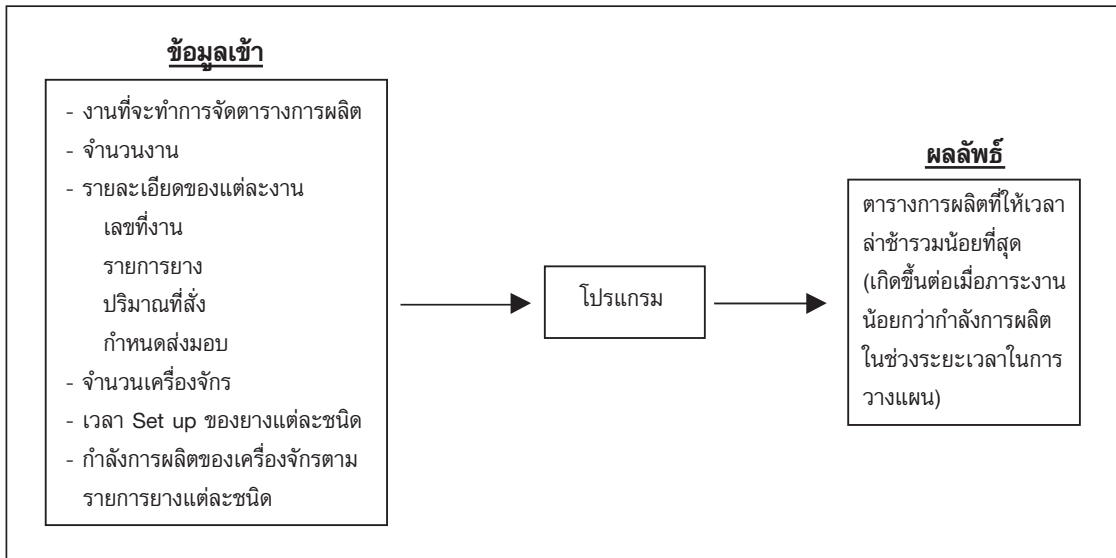
3.2 ระบบการจัดตารางการผลิตในปัจจุบัน

ระบบการผลิตของกรณีศึกษาเป็นระบบการผลิตแบบเครื่องจักรขนาน ระบบนี้ประกอบไปด้วยเครื่องจักร 20 เครื่อง แต่ละเครื่องมีความสามารถในการทำงานที่เหมือนกันและมีความเร็วในการทำงานเท่ากัน งานที่เข้ามาในระบบสามารถที่จะเลือกทำได้ที่เครื่องจักรเครื่องใดก็ได้ใน 20 เครื่องนี้ ระบบการจัดตารางการผลิตของโรงงานตัวอย่างเริ่มจากผู้จัดตารางการผลิตทำการรวบรวมปริมาณความต้องการของยางรายการที่เหมือนกันจากใบสั่งซื้อต่างๆ เข้า

ด้วยกัน หลังจากนั้นจึงคำนวณเวลาที่ใช้ในการผลิตของยางแต่ละรายการ โดยคำนวณจากปริมาณที่จะต้องทำการผลิตหารด้วยกำลังการผลิตที่สามารถผลิตได้ต่อวันของยางรายการนั้นๆ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักร โดยผู้จัดตารางการผลิตจะให้ความสำคัญกับงานที่ทำอยู่ก่อนเป็นอันดับแรก เนื่องจากถ้าเป็นรายการเดียวกันมาทำต่อจากกันก็就不用ทำการตั้งเครื่องใหม่ในทางตรงกันข้ามถ้ารายการที่จะนำมาทำต่อเป็นคนละรายการก็จะต้องมีการตั้งเครื่องใหม่ ส่วนปัจจัยที่นำมาพิจารณาเป็นลำดับถัดไปก็คือวันกำหนดส่ง โดยจะพิจารณาว่างานที่จัดไปเลยกำหนดส่งหรือไม่ ซึ่งเมื่อจัดลำดับงานเสร็จ ก็จะได้ตารางการผลิตรายสัปดาห์ออกมา

3.3 การออกแบบการทำงานของวิธีการจัดตารางการผลิต

ในตอนต้นของการออกแบบโปรแกรมการจัดตารางการผลิต ผู้วิจัยได้กำหนดข้อมูลนำเข้า และผลลัพธ์ของโปรแกรมการจัดตารางการผลิต ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2 และลำดับขั้นตอนในการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่สุรูปไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แสดงข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ของโปรแกรมการจัดตารางการผลิต

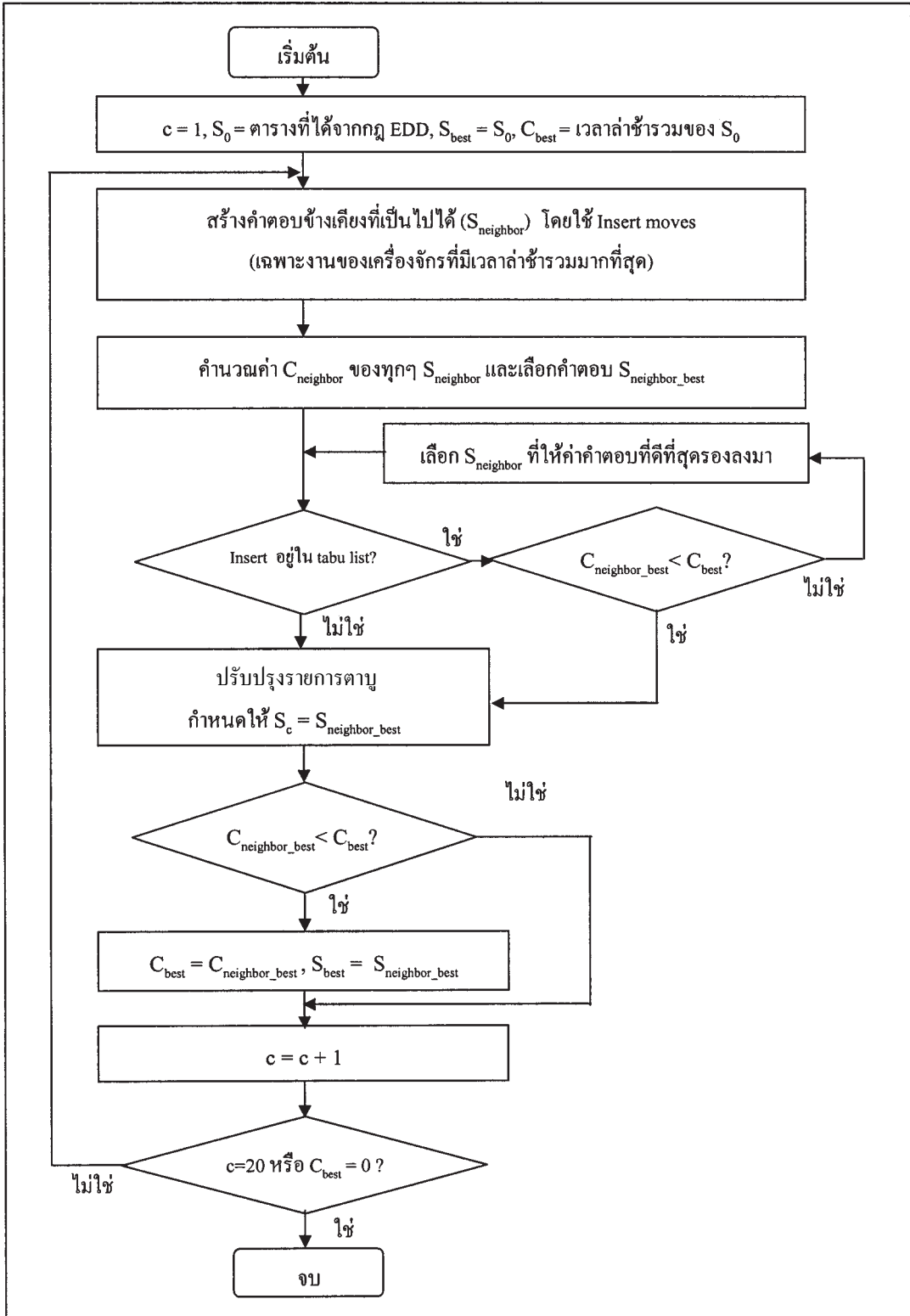
การทำงานของวิธีการจัดตารางการผลิตสามารถอธิบายได้ด้วย flowchart ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนตัวแปรที่กำหนดขึ้นใน flowchart ประกอบไปด้วย c คือตัวนับจำนวนรอบในการค้นหา, S_0 คือตารางตั้งต้นที่ใช้สำหรับค้นหาคำตอบ, S_c คือคำตอบของรอบการค้นหาที่ c , S_{best} คือคำตอบที่ดีที่สุด, C_{best} คือค่าเวลาล่าช้ารวมที่ดีที่สุด, $S_{neighbor}$ คือคำตอบข้างเคียงที่เป็นไปได้, $S_{neighbor_best}$ คือคำตอบข้างเคียงที่ให้ค่าเวลาล่าช้ารวมที่ดีที่สุด, $C_{neighbor}$ คือค่าเวลาล่าช้ารวมของคำตอบข้างเคียง, $C_{neighbor_best}$ คือค่าเวลาล่าช้ารวมของคำตอบข้างเคียงที่ดีที่สุด, insert คือรูปแบบการเคลื่อนที่แบบแทรก เริ่มจากกำหนดค่ารอบการค้นหาให้เท่ากับ 1 กำหนดให้ S_0 คือตารางที่ได้จากกฎ EDD, S_{best} คือ S_0 , และ C_{best} คือค่าเวลาล่าช้ารวมของ S_0 หลังจากนั้นจะทำการสร้างคำตอบข้างเคียงที่เป็นไปได้ ($S_{neighbor}$) โดยใช้การเคลื่อนที่แบบแทรก (insert moves) โดยจะนำเฉพาะงานของเครื่องจักรที่มีเวลา

ล่ำซ้ารวมมากที่สุดไปมอบให้กับเครื่องจักรเครื่องอื่นๆ โดยแทรกลงในตำแหน่งต่างๆ ของตารางตั้งต้นที่สามารถแทรกได้ [8] ในการแทรก 1 ครั้งก็จะได้ตารางข้างเคียง 1 ตาราง หลังจากนั้นทำการคำนวณค่า $C_{neighbor}$ ของทุกๆ $S_{neighbor}$ และเลือกคำตอบข้างเคียงที่ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด ($S_{neighbor_best}$) ขั้นตอนต่อไปเป็นการตรวจสอบว่ารูปแบบการเคลื่อนที่แบบแทรก (insert) อยู่ในรายการตามหรือไม่ ในที่นี้รูปแบบการเคลื่อนที่แบบแทรกจะอยู่ในลักษณะที่นำงานใดไปแทรกที่ตำแหน่งใด เช่นงานที่ 23 ไปแทรกงานที่ 12 เป็นต้น ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่า Insert ไม่อยู่ในรายการตามก็ให้ปรับปรุงรายการตามโดยนำ insert ไปใส่ไว้ในรายการตามและกำหนดให้ $S_c = S_{neighbor_best}$ ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่า insert อยู่ในรายการตาม ก็ทำการเช็คค่า $C_{neighbor_best} < C_{best}$ หรือไม่ ถ้าน้อยกว่าก็ให้นำ insert เขียนทับลงในรายการตามเลย แต่ถ้า $C_{neighbor_best} > C_{best}$ ก็ให้เลือกค่า $S_{neighbor_best}$ ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดรองลงมา และนำ insert มาตรวจสอบว่าอยู่ในรายการตามหรือไม่ ทำจนกว่าจะได้ตาราง S_c เมื่อได้ค่า $S_c = S_{neighbor_best}$ แล้ว ก็ทำการตรวจสอบว่า $C_{neighbor_best} < C_{best}$ หรือไม่ ถ้าน้อยกว่าก็ให้ปรับปรุงค่า $C_{best} = C_{neighbor_best}$, $S_{best} = S_{neighbor_best}$ หลังจากนั้นให้นับจำนวนรอบในการค้นหาเพิ่มขึ้นอีก 1 รอบ และทำการตรวจสอบว่าการค้นหาคำตอบเป็นไปตามเกณฑ์การหยุดค้นหาคำตอบ (stopping condition) ซึ่งได้แก่เวลาล่ำซ้ารวมเท่ากับศูนย์หรือจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้แล้วหรือยัง ถ้ายังก็ให้ทำการค้นหาคำตอบในรอบต่อไป แต่ถ้าครบแล้วก็ให้แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุด

3.4 การทดลองหาจำนวนรอบในการรันโปรแกรมที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การหยุดค้นหาคำตอบไว้ 2 รูปแบบคือ เวลาล่ำซ้ารวมเท่ากับศูนย์หรือจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ การค้นหาคำตอบจะหยุด เมื่อพบเกณฑ์การหยุดเกณฑ์ใดเกณฑ์หนึ่งสาเหตุที่ต้องใช้เกณฑ์การหยุดเกณฑ์ที่สองเนื่องจากไม่สามารถค้นหาเวลาล่ำซ้ารวมที่เท่ากับศูนย์ได้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกำหนดรอบการค้นหาสูงสุดไว้ที่ 20, 30, 50, และ 100 รอบ โดยได้นำข้อมูลจำนวน 10 ชุดมาทำการทดลอง เพื่อที่จะทำการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดที่เหมาะสม

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 จากการทดลองพบว่าร้อยละ 70 ของข้อมูลพบค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างรอบที่ร้อยละ 1-20, 10 ของข้อมูลพบค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างรอบที่ร้อยละ 21-30, 10 ของข้อมูลพบค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างรอบที่ 31-50, และอีกร้อยละ 10 พบค่าคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างรอบที่ 51-100 จากการทดลองพบว่าควรกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหาไว้ที่ 20 รอบก็เพียงพอแล้ว เนื่องจากคำตอบที่ได้มีค่าไม่แตกต่างจากค่าที่ดีที่สุดเท่าไรนัก โดยความแตกต่างอยู่ในช่วง 2.171 - 6.774 ซม. ดังนั้นในงานวิจัยนี้กำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 20 รอบ



รูปที่ 3 วิธีการจัดตารางการผลิตแบบตาม

ตารางที่ 1 ผลการทดลองรันโปรแกรมเมื่อกำหนดเกณฑ์การหยุดที่จำนวนรอบการค้นหาต่างๆ

ชุดข้อมูล	20		30		50		100	
	เวลาล่าช้ารวม (ข.ม.)	เวลาที่ใช้ในการจัด (นาที)	เวลาล่าช้ารวม (ข.ม.)	เวลาที่ใช้ในการจัด (นาที)	เวลาล่าช้ารวม (ข.ม.)	เวลาที่ใช้ในการจัด (นาที)	เวลาล่าช้ารวม (ข.ม.)	เวลาที่ใช้ในการจัด (นาที)
1	3.563	01:49	3.563	02:20	3.563	03:25	3.563	06:38
2	0	00:51	0	00:51	0	00:51	0	00:51
3	0	01:20	0	01:20	0	01:20	0	01:20
4	3.908	01:04	1.656	01:28	1.656	02:27	0	02:32
5	0	00:20	0	00:20	0	00:20	0	00:20
6	0	00:36	0	00:36	0	00:36	0	00:36
7	0	00:21	0	00:21	0	00:21	0	00:21
8	20.133	01:16	20.133	01:36	13.359	02:35	13.359	05:11
9	0	00:41	0	00:41	0	00:41	0	00:41
10	10.901	01:12	8.730	01:41	8.730	02:49	8.730	05:47

3.5 การทดสอบหาขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

การทดสอบหาขนาดของตัวอย่างที่ทำให้เชื่อมั่นได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 100 (1- α) เปอร์เซนต์ ว่าความคลาดเคลื่อนจะไม่เกินช่วงที่กำหนด สูตรที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้ [12]

$$n = \frac{t_{\alpha/2}^s}{E}$$

ตัวแปรในสมการมีความหมายดังนี้ n คือ ขนาดตัวอย่าง, t คือ ค่าที่เปิดจากตารางการแจกแจงปกติ, s คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, E คือ ความคลาดเคลื่อน ในการทดสอบหาขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ผู้วิจัยได้นำข้อมูลเวลาล่าช้ารวมของการรันโปรแกรมจำนวน 10 ชุด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2 มาใช้ในการคำนวณ โดยข้อมูลที่น่ามานี้เป็นผลการรันเมื่อใช้จำนวนรอบในการค้นหาเท่ากับ 20 รอบ

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบหาขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ชุดข้อมูลที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เวลาล่าช้ารวม (ชั่วโมง)	3.563	0	0	3.908	0	0	0	20.133	0	10.901

นำข้อมูลเวลาล่าช้ามาคำนวณได้ค่าเฉลี่ย = 3.85, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 6.7 กำหนดระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, $\alpha = 0.05$, $Z = 1.96$ ค่าจำนวนตัวอย่างเมื่อกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ มีดังนี้

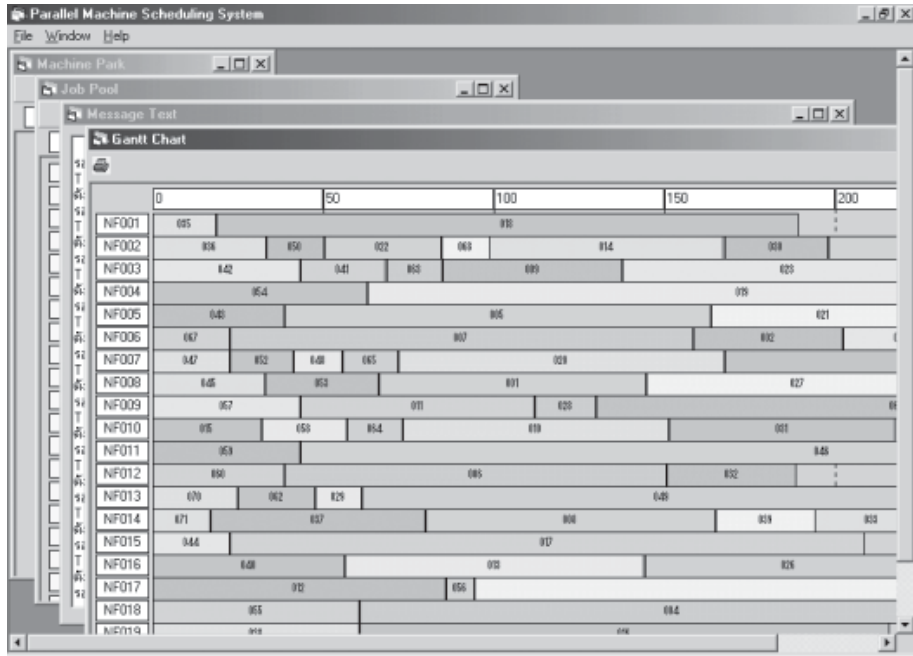
ตารางที่ 3 ขนาดตัวอย่างเมื่อกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ

	ค่าความคลาดเคลื่อน (E)		
	8 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
ขนาดตัวอย่าง (n)	2.69	1.20	0.30

จากการคำนวณพบว่าใช้จำนวนตัวอย่างเพียง 3 ชุดก็เพียงพอแล้ว ในการทดลองนี้ทำการทดลองที่ 10 ชุด ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 8 ชั่วโมง

4. ผลการวิจัย

เพื่อที่จะอธิบายการจัดตารางการผลิตด้วยโปรแกรม ผู้วิจัยได้นำข้อมูลชุดที่ 1 มาใช้ประกอบการอธิบายผลการจัดตารางการผลิตด้วยโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการรันโปรแกรม (output) ประกอบไปด้วยผลลัพธ์ในรูปแบบคุณสมบัติของงานแต่ละงาน (job pool) ผลลัพธ์ในรูปแบบผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบ และผลลัพธ์ในรูปแบบแผนภูมิแกนต์ ผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการค้นหาแสดงดังตารางที่ 4 ผลลัพธ์ในรูปแบบคุณสมบัติของงานแต่ละงานแสดงดังรูปที่ 5 ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการสั่งซื้อของลูกค้าในแต่ละสัปดาห์จำนวน 10 สัปดาห์มาทำการทดลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการจัดตารางแบบเดิม และวิธีการที่นำเสนอ ปัจจัยที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่ เวลาล่าช้ารวม จำนวนงานล่าช้า และเวลาที่ใช้ในการจัด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5 จากการทดลองสรุปได้ว่าวิธีการจัดตารางแบบตามสามารถลดเวลาล่าช้ารวม จำนวนงานล่าช้า และเวลาที่ใช้ในการจัดได้มากกว่าวิธีการจัดตารางการผลิตแบบเดิมร้อยละ 97.67 76.49 และร้อยละ 94.04 ตามลำดับ



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงผลการรันโปรแกรม

ตารางที่ 4 ผลการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการค้นหา

รอบการค้นหาที่	จำนวนตารางข้างเคียง	ค่าเวลาลำช้ารวมที่ดีที่สุด	ตารางที่ดีที่สุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่
1	267	263.288	แทรก J013 หน้า J002
2	534	229.048	แทรก J022 หน้า J068
3	267	185.563	แทรก J042 หน้า J041
4	356	150.924	แทรก J021 หน้า J034
5	356	118.758	แทรก J002 หน้า J051
6	267	88.435	แทรก J045 หน้า J053
7	445	59.303	แทรก J015 หน้า J058
8	267	38.207	แทรก J047 หน้า J052
9	178	63.018	แทรก J012 หน้า J044
10	534	37.127	แทรก J008 หน้า J019
11	178	63.018	แทรก J008 หน้า J039
12	532	38.207	แทรก J012 หน้า J019
13	173	75.286	แทรก J012 หน้า J056
14	349	20.127	แทรก J054 หน้า J019
15	178	30.841	แทรก J037 หน้า J044
16	532	11.094	แทรก J044 หน้า J017
17	445	3.563	แทรก J050 หน้า J022
18	178	29.460	แทรก J055 หน้า J044
19	267	3.563	แทรก J055 หน้า J004
20	175	32.384	แทรก J055 หน้า J038

Parallel Machine Scheduling System - [Job Pool]

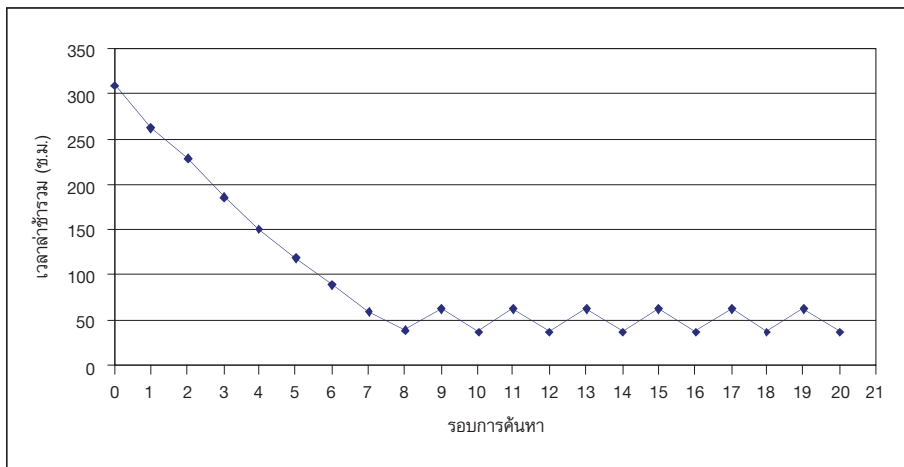
Job	File	Due	Pr.tn	Bgn.	End	T
J001	0	168	74.437	66.259	144.696	0
J002	0	240	31.68	158.571	202.251	0
J003	0	168	149.114	14.171	166.295	0
J004	0	240	178.971	60.592	243.563	3.563
J005	0	168	120.96	38.96	163.92	0
J006	0	168	108	38.96	150.96	0
J007	0	168	131.76	22.811	158.571	0
J008	0	168	81	79.936	164.936	0
J009	0	168	48.816	84.885	137.701	0
J010	0	168	74.057	73.314	151.371	0
J011	0	168	64.8	43.168	111.968	0
J012	0	168	82.08	0	86.08	0
J013	0	168	83.808	56.416	144.224	0
J014	0	168	64.8	98.797	167.597	0
J015	0	168	27.914	0	31.914	0
J016	0	240	151.2	60.592	215.792	0
J017	0	240	182.057	22.811	208.868	0
J018	0	192	166.752	18.688	189.44	0
J019	0	288	216	62.976	282.976	0
J020	0	168	91.8	72.014	167.814	0
J021	0	240	61.56	163.52	229.08	0
J022	0	240	30.24	50.336	84.576	0
J023	0	240	93.046	137.701	234.747	0
J024	0	600	128.37	197.888	338.258	0

รูปที่ 5 ผลลัพธ์ในรูปแบบคุณสมบัติของแต่ละงาน

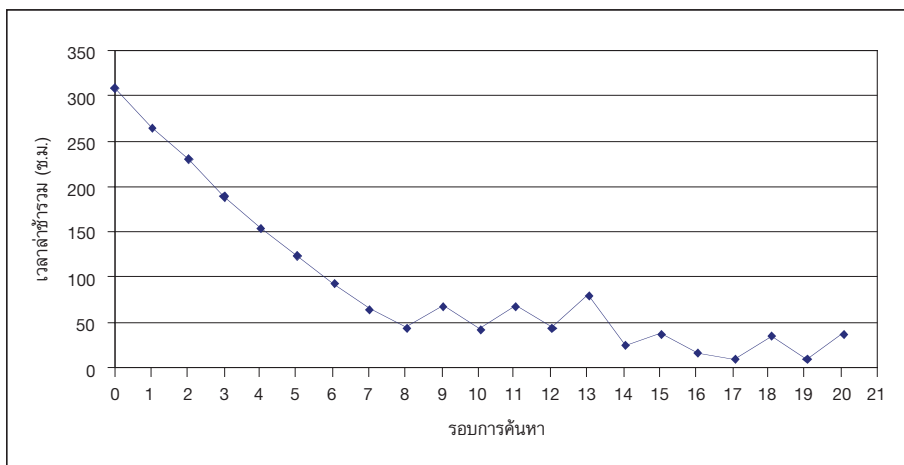
ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการเดิมและวิธีการที่นำเสนอ

ชุดข้อมูล	วิธีการเดิม			Tabu Search			ผลต่าง		
	เวลา ล่าช้า รวม (ข.ม.)	จำนวน งาน ล่าช้า (งาน)	เวลาที่ ใช้ใน การจัด (นาที)	เวลา ล่าช้า รวม (ข.ม.)	จำนวน งาน ล่าช้า (งาน)	เวลาที่ ใช้ใน การจัด (นาที)	ร้อยละ เวลา ล่าช้า รวม	ร้อยละ จำนวน งาน ล่าช้า	ร้อยละ เวลาที่ ใช้ใน การจัด
1	234.737	7	241	3.563	1	14.67	98.48	85.71	93.91
2	140.607	6	219	0	0	13.02	100.00	100.00	94.05
3	251.449	8	220	0	0	13.47	100.00	100.00	93.88
4	117.029	6	207	3.908	5	13.20	96.66	16.67	93.62
5	149.131	7	217	0	0	12.42	100.00	100.00	94.28
6	144.948	7	231	0	0	13.15	100.00	100.00	94.31
7	160.623	9	225	0	0	12.53	100.00	100.00	94.43
8	167.027	8	210	20.133	7	13.28	87.95	12.50	93.68
9	188.588	5	215	0	0	12.28	100.00	100.00	94.29
10	169.970	6	222	10.901	3	13.33	93.59	50.00	94.00
							97.67	76.49	94.04

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของวิธีการค้นหาแบบตามู ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจัดตารางระหว่างวิธีการค้นหาทางข้างเคียง (neighborhood search) และวิธีการค้นหาแบบตามู ทั้ง 2 วิธีการมีขั้นตอนการคำนวณตามรูปที่ 3 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ไม่มีและมียารายการตามูเท่านั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการสั่งซื้อสินค้าของลูกค้าในสัปดาห์หนึ่งมาใช้ในการอธิบายผลการจัดตาราง ผลการค้นหาคำตอบแสดงดังรูปที่ 6 การค้นหาคำตอบของวิธีการค้นหาทางข้างเคียงได้คำตอบแสดงในรูปที่ 6 (ก) จากภาพจะเห็นได้ว่าการค้นหาคำตอบเกิดการวนลูปตั้งแต่รอบที่ 12 เป็นต้นไป และคำตอบที่ได้คือเวลาล่าช้ารวมเท่ากับ 37.127 ชั่วโมง เมื่อนำการค้นหาแบบตามูมาใช้จะได้อันดับคำตอบแสดงดังรูปที่ 6 (ข) การนำรายการตามูมาใช้ทำให้การค้นหาคำตอบไม่เกิดการวนลูป และสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไป ปรากฏว่าได้เวลาล่าช้ารวมที่ดีที่สุดเท่ากับ 3.563 ชั่วโมง



(ก) วิธีการค้นหาทางข้างเคียง



(ข) วิธีการค้นหาแบบตามู

รูปที่ 6 ค่าคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการค้นหา

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงกิจกรรมการวางแผนการผลิตของโรงงานผลิตแถบยางยืด ที่มีการดำเนินการแบบผลิตตามสั่ง ซึ่งประสบปัญหาส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้ามีความล่าช้าอยู่ในช่วงร้อยละ 16.78–32 ต่อเดือน มีสาเหตุหลักจากขั้นตอนการจัดลำดับงาน ไม่มีการจัดลำดับก่อนหลังของงานที่เหมาะสม เนื่องจากผู้จัดตารางการผลิตจัดตารางโดยมุ่งเน้นไปที่กลุ่มรายการสินค้าที่เหมือนกัน ถึงแม้จะช่วยลดเวลาในการตั้งเครื่องลงได้ แต่จะก่อให้เกิดความล่าช้าเกิดขึ้น ในความเป็นจริงแล้วในการดำเนินการแบบผลิตตามสั่งควรจะมีการวางแผนโดยพิจารณาตามใบสั่งซื้อมากกว่า เวลาล่าช้ารวมจึงจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ในกรณีที่มีคำสั่งซื้อจำนวนมาก ผู้จัดตารางการผลิตจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ อีกเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถพิจารณาข้อจำกัดทุกตัวไปพร้อมๆ กันได้อย่างละเอียด ดังนั้นเพื่อให้การจัดตารางการผลิตสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ในการทำวิจัยจะมีการพัฒนาโปรแกรมที่เขียนด้วยโปรแกรมวิซวลเบสิก 6.0 ขึ้นมาเพื่อช่วยในการจัดตารางการผลิตให้กับเครื่องจักรในส่วนการทอ ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบจำลองเครื่องจักรขนาน ภายในโปรแกรมจะมีการนำวิธีการค้นหาแบบตามู มาเป็นกลไกในการจัดลำดับงาน เนื่องจากวิธีการค้นหาแบบตามูเป็นวิธีการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการจัดเรียงที่ต้องการคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวิธีการมีความเหมาะสมกับลักษณะปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งวิธีการทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาได้ นอกจากนี้วิธีการค้นหาแบบตามูยังสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดในช่วงกว้างได้ ในส่วนการวัดผล จะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตารางการผลิตที่จัดโดยวิธีการเดิม ซึ่งผู้จัดตารางการผลิตเป็นคนจัดลำดับงาน และวิธีการที่นำเสนอซึ่งจัดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยจะใช้เวลาล่าช้ารวม (total tardiness) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ จากการทดลองจัดตารางการผลิตพบว่าการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถลดเวลาล่าช้ารวม จำนวนงานล่าช้า และเวลาที่ใช้ในการจัดได้มากกว่าวิธีการจัดตารางการผลิตแบบเดิม

วิธีการที่นำมาใช้ในการจัดตารางการผลิตนั้น จะมีความเหมาะสมกับลักษณะปัญหาที่ต่างกัน วิธีการเชิงวิเคราะห์จะใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบ วิธีการจะให้คำตอบแบบ exact solution แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใช้แก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนได้ เนื่องจากวิธีการคำนวณจะเป็นแบบ non-polynomial ส่วนวิธีการเชิงฮิวริสติก และวิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์ใช้ได้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะซับซ้อน วิธีการเชิงฮิวริสติกสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและมีหลักการที่ค่อนข้างง่ายกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการเชิงปัญญาประดิษฐ์

6. ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรม ให้สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงมากยิ่งขึ้น โดยสามารถกำหนด release date ของแต่ละเครื่องจักรได้ เนื่องจากในสภาพการทำงานจริง release date จะไม่ได้เริ่มที่ศูนย์ เพราะจะมีงานตกค้างอยู่ที่เครื่องจักรต่างๆ

2. วิธีการค้นหาแบบตามู สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการจัดตารางการผลิตที่มีวัตถุประสงค์อื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีจุดเด่นคือสามารถค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงหรือเท่ากับคำตอบที่ดีที่สุด

3. แนวความคิดในส่วนขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีลักษณะเป็นแบบจำลองเครื่องจักรขนานได้

4. ในการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหาที่เหมาะสมนั้น ควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้รับและขีดความสามารถของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ด้วย กล่าวคือถ้ากำหนดจำนวนรอบน้อยเกินไป ก็มีความเป็นไปได้ว่าคำตอบที่ได้อาจจะยังไม่ใช่คำตอบที่ดีสักเท่าไร ถ้ากำหนดจำนวนรอบสูงเกินไป จะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้น นอกจากนี้ยังต้องใช้หน่วยความจำเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในการรันกับคอมพิวเตอร์ที่มีสเปกต่ำก็อาจจะทำให้มีปัญหาได้ ทั้งนี้ต้องขึ้นกับลักษณะของข้อมูลนำเข้าซึ่งได้แก่ จำนวนงาน ความแตกต่างระหว่างเวลาที่สามารถเริ่มต้นได้ และเวลากำหนดส่งของงานอีกด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

1. Geyik, F. and Cedimoglu, I. H., 1999, "A Review of the Production Scheduling Approaches Based-on Artificial Intelligence and the Integration of Process Planning and Scheduling," *Proceedings on Swiss Conference of CAD/CAM'99*, Neuchatel University, Switzerland, pp. 167-174.

2. Franca, P. M. et al., 1996, "A Tabu Search Heuristic for the Multiprocessor Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Times," *International Journal of Production Economics*, Vol. 43, pp. 79-89.

3. Glover, F., 1989, "Tabu Search - Part I," *ORSA Journal on Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 190-206.

4. Rardin, R. L., 1998, *Optimization in Operations Research*, Prentice Hall, New Jersey.

5. Schutten, J. M. J. and Leussink, R. A. M., 1996, "Parallel Machine Scheduling with Release Dates, Due Dates and Family Setup Times," *International Journal of Production Economics*, Vol. 46-47, pp. 119-125.

6. Centeno, G. and Armacost, R. L., 1997, "Parallel Machine Scheduling with Release Time and Machine Eligibility Restrictions," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 33, No. 1-2, pp. 273-276.

7. Michael X. Weng, 2001, "Unrelated Parallel Machine Scheduling with Setup Consideration and a Total Weighted Completion Time Objective," *International Journal of Production Economics*, Vol. 70, pp. 215-226.

8. Bilge, U. et al., 2004, "A Tabu Search Algorithm for Parallel Machine Total Tardiness Problem," *Computers & Operations Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 397-414.
9. Sivrikaya-Serifoglu F., 1999, "Parallel Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties," *Computers & Operations Research*, Vol. 26, pp. 773-787.
10. Dong-Won Kim. et al., 2002, "Unrelated Parallel Machine Scheduling with Setup Times using Simulated Annealing," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 223-231.
11. Youngshin Park et al., 2000, "Scheduling Jobs on Parallel Machines Applying Neural Network and Heuristic Rules," *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 38, pp. 189-202.
12. Montgomery D. C. and Runger G. C., 1994, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Wiley, New York.