



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน

Algorithm Development for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem

นามผู้วิจัย นายคณศ พลอยคนัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มทวียาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแก้ปัญหการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน

Algorithm Development for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem

โดย

นายคณิศ พลอยคนัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณะ พลอยคนัย 2554: การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแก้ปัญหการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D. 76 หน้า

ปัญหการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงานเป็นปัญหาที่ซับซ้อนที่สุดปัญหาหนึ่งในบรรดาปัญหการจัดตารางการผลิต เริ่มต้นงานต้องถูกระบุลงบนเครื่องจักรและงานในแต่ละเครื่องจักรต้องถูกเรียงลำดับ คำตอบที่คุณภาพสูงต้องอาศัยเวลาในการแก้ปัญหาที่ยาวนาน สำหรับปัญหขนาดใหญ่มากแล้ว คำตอบที่เหมาะสมไม่สามารถหาได้ภายในช่วงเวลาการหาคำตอบที่จำกัด ในงานวิจัยฉบับนี้พัฒนาวิธีวิทยาการศึกษาสมรรถนะที่เรียกว่าเมคสแปนทรีเพื่อจัดลำดับงานบนเครื่องจักร ต่อจากนั้นเมคสแปนทรีทั้งสองวิธีคือวิธีเจเนติกอัลกอริทึมและพาดิเคิลสวอมถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งทั้งสองวิธีใช้เมคสแปนทรีเป็นส่วนหนึ่งของการแก้ปัญหการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน โดยมีสมการเป้าหมายเพื่อหาเมคสแปนที่มีค่าน้อยที่สุด

ผลลัพธ์จากการหาคำตอบสำหรับปัญหการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน พบว่าวิธีเมคสแปนทรีให้คำตอบดีกว่าอนติเลย์ 11.80% ดีกว่าวิธีเลือกงานที่เสร็จเร็วที่สุด 13.60% และดีกว่าวิธีเลือกงานที่ใช้เวลาน้อยที่สุด 17.41% การเปรียบเทียบพาดิเคิลสวอมให้ผลลัพธ์ดีกว่าเจเนติกอัลกอริทึม 0.97%

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kanate Ploydanai 2011: Algorithm Development for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem. Doctor of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Anan Mungwattana, Ph.D. 76 pages.

Flexible job shop scheduling problem is the most complicated problem among scheduling problems. First, jobs must be assigned to machines, and then jobs in each machine must be sequenced. High quality solutions require a large amount of time to solve. For large problems, optimal solutions are unable to be found due to the computational time required. In this research, a heuristic, called Makespan Tree, is developed to sequence jobs on machines. Next, a genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) are developed. Both meta heuristic approaches use the Makespan Tree heuristic as a part of their processes in solving the flexible job shop problems with the objective of minimizing makespans.

The computational results for job scheduling problems show that the Makespan Tree outperforms the nondelay by 11.80%, the earliest finish time by 13.60%, and the shortest processing time by 57.41%. The comparisons show that results of PSO has the average makespan 0.97% lower than those of GA.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ มุ่งวัฒนา และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ มาตลอดด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง นอกจากนั้น ท่านยังให้ความช่วยเหลือทางด้านเงินทุนในการวิจัย จึงทำให้ผลการวิจัยสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณหลวงพ่อดำราญ ชัมมธโร ที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าทั้งทางโลกและทางธรรม เป็นเหตุให้ข้าพเจ้าสามารถเรียนในระดับปริญญาเอกได้อย่างมีความสุข สามารถควบคุมอารมณ์ และควบคุมจิตใจทำให้สามารถผ่านการเรียนได้โดยไม่ทุกข์ไม่กังวล และมีสติมีสมาธิในการเรียน เป็นอย่างดี จนทำให้ได้มาซึ่งคะแนนที่ดีในทุก ๆ วิชา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร.ณรงค์ พลอยคนัย และ ผศ. ดร.ดวงใจ พลอยคนัย บิดามารดาของข้าพเจ้าที่ได้วางรากฐานทั้งทางด้านการศึกษา อบรมสั่งสอนปูพื้นฐานที่ดีทั้งในเชิงศีลธรรม ให้แก่ข้าพเจ้า จนถึงวันนี้ข้าพเจ้าได้สำเร็จการศึกษาสมดังความปรารถนาของท่านทั้งสอง นอกจากนี้ที่ขาดเสียมิได้คือ อาจารย์ ดร.สุมิตรา นวลมีศรี แฟนของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจและเป็นกำลังใจที่สำคัญ จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

กณศ พลอยคนัย
สิงหาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	6
การตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลำดับการทำงานในแต่ละขั้นตอนของงานแต่ละงาน	4
2	ตัวอย่างปัญหา JSP	23
3	วิธีการประเมินเมคสแปนของกึ่งที่ 1	25
4	วิธีการประเมินเมคสแปนของกึ่งที่ 2	26
5	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีเดิมและวิธีใหม่	58
6	เปอร์เซ็นต์ของเมคสแปนที่ดีขึ้นเนื่องจากนำวิธี MT มาใช้	61
7	รายละเอียดการเปรียบเทียบผลของวิธีนอนดีเลย์ วิธี MT และวิธี LP	62
8	การเปรียบเทียบผลเฉลยของ 2 วิธีการ แบบทดลองซ้ำโจทย์เดิม	64
9	การเปรียบเทียบผลเฉลยของ 2 วิธีการ แบบทดลองกับปัญหาต่าง ๆ	65
10	เปรียบเทียบเมคสแปนจากวิธี GA และ PSO	66
11	เมคสแปนที่เปลี่ยนไปจากการหยุดทำงาน	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องจักรในสถานีนงาน	3
2	ตารางการผลิต	4
3	ข้อจำกัดก่อนหน้า	9
4	คอนจังก์ทีฟ – ดิสจังก์ทีฟ อาร์ค	9
5	ขั้นตอนการแตกกิ่งหาคำตอบ	20
6	การประเมินเมคสแปน ครั้งที่ 1	21
7	การประเมินเมคสแปน ครั้งที่ 2	22
8	ผังงานของวิธีเมคสแปนตรี	27
9	pseudo code ของวิธีเทคสแปนตรี	29
10	การส่งข้อมูลระหว่าง 2 ขั้นตอนการจัดลำดับงาน	30
11	รูปแบบในการจัดเก็บข้อมูลของตัวแปรแถวลำดับสำหรับกำหนดเครื่องจักรให้กับงาน	31
12	สตริงของการระบุงานลงบนเครื่องจักร	32
13	แสดงตัวอย่างการผสมพันธุ์	32
14	ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 1	34
15	ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 2	35
16	ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 3	36
17	ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 4	37
18	ภาษาเทียมสำหรับวิธี GA ที่ใช้ร่วมกับวิธี MT ในการแก้ปัญหา	40
19	ตัวอย่างการสร้างคำตอบใหม่สำหรับวิธี PSO ที่ใช้ร่วมกับ MT	42
20	ผังงานขั้นตอนวิธี PSO ส่วนที่ 1	43
21	ขั้นตอนวิธี PSO ส่วนที่ 2	44
22	ภาษาเทียมสำหรับวิธี PSO ที่ใช้ร่วมกับวิธี MT ในการแก้ปัญหา	46
23	ผลกระทบจากการไม่คำนึงถึงเวลาหยุดเครื่องจักร	48
24	การชดเชยเวลาหยุดงาน 1 ช่วง	50
25	การชดเชยเวลาหยุดงาน 2 ช่วง	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ผลกระทบจากการชดเชยเวลาหยุดงานที่กระทบกับวันถัด ๆ ไป	51
27	ผังงานการคำนวณเวลาเสร็จงานแบบมีช่วงเวลาหยุดพัก	52
28	ขั้นตอนวิธีการคำนวณเวลาเสร็จงานแบบมีช่วงเวลาหยุดพัก	53
29	ช่วงเวลาหยุดงานที่เป็นไปได้ในระหว่างทำงาน	55
30	การเปรียบเทียบเมคสเปนสำหรับ 3 วิธี 40 กรณีศึกษา	69

การพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน

Algorithm Development for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem

คำนำ

ในสภาวะที่โลกขาดแคลนพลังงานมีหน้าจั่วราคาวัตถุดิบก็เพิ่มมากขึ้น ในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการลดต้นทุน และใช้ทรัพยากรต่างๆ ให้คุ้มค่าที่สุด การคงแรงงานและเครื่องจักรไว้เท่าเดิม แต่พัฒนาวิธีการให้สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณมากขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้ภาคอุตสาหกรรมอยู่รอดและพร้อมที่จะแข่งขันในตลาดให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีจัดตารางการผลิตเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เพราะตารางการผลิตที่ดี ทำให้ได้มาซึ่งเวลานำ (Lead Time) ที่สั้น การใช้เครื่องจักรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ทันเวลา ทำให้เพิ่มโอกาสในการอยู่รอดและเพิ่มโอกาสในการแข่งขันให้สูงขึ้น

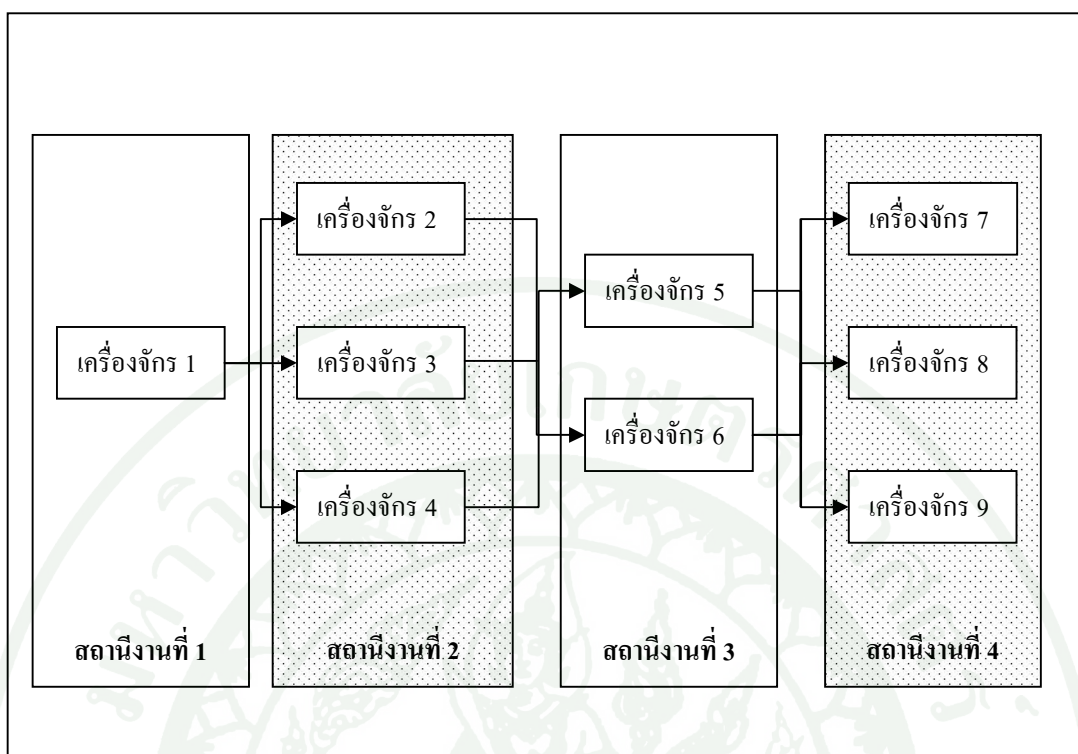
สำหรับปัญหาการวางแผนการผลิต แบ่งออกได้เป็นหลาย ๆ ประเภท แต่ละประเภทมีความซับซ้อนและข้อจำกัดต่าง ๆ ทั้งที่คล้ายคลึงกันและแตกต่างกัน ปัญหาที่นักวิจัยสนใจในการค้นคว้าและพัฒนาขั้นตอนวิธี (Algorithm) ต่าง ๆ ในการแก้ปัญหา เช่น ปัญหาการผลิตแบบไหลสั้น (Flow Shop Scheduling Problem, FSP) ปัญหาการผลิตแบบตามงาน (Job Shop Scheduling Problem, JSP) ปัญหาการผลิตแบบวางแผนโครงการ (Project Scheduling Problem, PSP) ปัญหาการผลิตแบบวางแผนโครงการภายใต้เงื่อนไขทรัพยากรมีจำนวนจำกัด (Resource Constraint Project Scheduling Problem, SCPSP) ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ (Assembly Line Balancing Problem, ALB) ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นไหลสั้น (Flexible Flow Shop Scheduling Problem, FFSP) และปัญหาการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน (Flexible Job Shop Scheduling Problem, FJSP)

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งประเด็นไปที่ปัญหา การจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความซับซ้อนสูง การหาคำตอบที่ดีใช้เวลา นานมาก โดยปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงานดังกล่าวถือเป็นปัญหาที่ยากที่สุด ปัญหาหนึ่งในกลุ่มการจัดตารางการผลิต ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปัญหาดังกล่าวประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน และส่วนที่เป็นปัญหาการจัดสรร เครื่องจักรสำหรับแต่ละขั้นตอนการผลิต

ในภาคอุตสาหกรรมมีโรงงานหลายๆโรงงานที่มีลักษณะของการผลิตจัดอยู่ในกลุ่ม FJSP สำหรับลักษณะของปัญหา FJSP งาน (Job) จะต้องผ่านกรรมวิธีการผลิตต่าง ๆ โดยที่งานต่างชนิดกัน จะมีลำดับขั้นตอนการผลิตในการเข้าสู่เครื่องจักรที่แตกต่างกัน และใช้เวลาในการผลิตในแต่ละเครื่องจักรที่แตกต่างกัน ในแต่ละขั้นตอนสามารถเลือกใช้เครื่องจักรเพื่อผลิตได้มากกว่า 1 ทางเลือก เช่น จะใช้เครื่องที่ 1 หรือเครื่องที่ 2 ก็ได้ เป็นต้น โดยแต่ละขั้นตอนจะเลือกเครื่องจักร เครื่องใดเครื่องหนึ่งเท่านั้น โดยจะเลือกเครื่องจักรจากสถานีนั้นๆมาใช้ในการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 1 เมื่อจัดงานลงในเครื่องจักรแต่ละเครื่องแล้ว จะพบว่า เครื่องจักรหนึ่งเครื่องต้องผลิตงานมากกว่า 1 งาน ขึ้นไป ดังนั้น จึงจำเป็นต้องจัดลำดับงานเครื่องจักรแต่ละเครื่องอีกด้วย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2 โดยที่แกนอนแสดงถึงเวลาการผลิต และแกนตั้งแสดงถึงชื่อเครื่องจักร กราฟแท่งแต่ละแท่ง แสดงถึงเวลาในการผลิตบนเครื่องจักรแต่ละเครื่อง

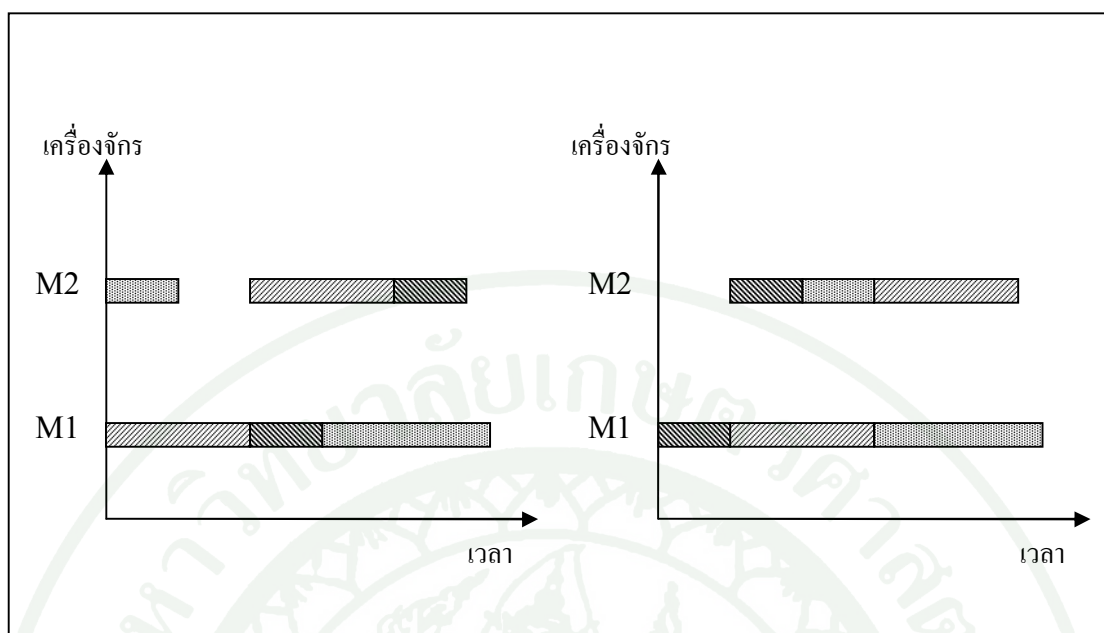
การระบุเครื่องจักรให้แต่ละงาน และการจัดลำดับการผลิตของงานในแต่ละเครื่องจักรมีผลต่อเวลาเสร็จงานและมีผลต่อเมคสแปนของระบบอีกด้วย การมอบหมายงานให้แต่ละเครื่องจักรและจากการจัดลำดับงานในเครื่องจักรที่สอดคล้องกันจะทำให้ เวลาเสร็จงานแต่ละงานและเมคสแปนของระบบมีค่าน้อย และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน อาจกล่าวได้ว่าปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงานเป็นลักษณะการผสมผสานระหว่างปัญหาเลือกเครื่องจักรให้กับงานและปัญหาการจัดลำดับของงานให้แต่ละเครื่องจักร เพื่ออธิบายปัญหาดังกล่าวให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ตัวอย่างต่อไปนี้จึงถูกหยิบยกขึ้นมาเพื่อใช้อธิบาย ซึ่งรายละเอียดของตัวอย่างมีดังต่อไปนี้

ตัวอย่างปัญหาเช่นในการจัดตารางการผลิตครั้งหนึ่งมีสินค้า 4 ชนิด โดยแต่ละสินค้ามีขั้นตอนการผลิต 4 ขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการผลิตใช้ 1 สถานีงาน (Work Station) โดยแต่ละงานมีลำดับการทำงานในแต่ละสถานีที่แตกต่างกัน เช่น งานที่ 1 เข้าสถานีที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ส่วนงานที่ 2 เข้าสถานี 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องจักรในสถานีงาน

จากตัวอย่างที่สมมุติขึ้นพอสรุปได้ว่า ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ต้องแก้ปัญห 2 ปัญหาในเวลาเดียวกัน ประกอบด้วย การเลือกเครื่องจักรให้กับงานและการเรียงงานในแต่ละเครื่องจักร ซึ่งทั้ง 2 ปัญหาดังกล่าวต้องการคำตอบที่สอดคล้องกันจึงจะได้มาซึ่งคำตอบที่เหมาะสม (Optimal Solution) ซึ่งจะทำให้เมคสแปนหรือเวลาเสร็จงานสุดท้ายที่สั้นที่สุด สำหรับปัญหาจริงในการผลิตนั้นจำนวนงานในการวางแผนการผลิตมีจำนวนมากและถ้าแต่ละงานมีขั้นตอนมากกว่า 4 ขั้นตอนและถ้าแต่ละสถานีมีเครื่องจักรจำนวนมาก เมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของปัญหามีปริมาณมาก ปัญหาจะยิ่งทวีความซับซ้อนและยากในการหาคำตอบ



ภาพที่ 2 ตารางการผลิต

ตารางที่ 1 ลำดับการทำงานในแต่ละขั้นตอนของงานแต่ละงาน

	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4
งานชนิดที่ 1	สถานีที่ 1	สถานีที่ 2	สถานีที่ 3	สถานีที่ 4
งานชนิดที่ 2	สถานีที่ 4	สถานีที่ 3	สถานีที่ 2	สถานีที่ 1
งานชนิดที่ 3	สถานีที่ 4	สถานีที่ 1	สถานีที่ 3	สถานีที่ 2
งานชนิดที่ 4	สถานีที่ 1	สถานีที่ 4	สถานีที่ 3	สถานีที่ 2

ปัญหา FJSP เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงมาก และใช้เวลานานมากในการหาคำตอบที่เหมาะสม นานจนบางครั้งไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาวิธีการสำหรับค้นหาคำตอบที่เหมาะสม หรือคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสม เพื่อตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรม งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งประเด็นไปที่การพัฒนาขั้นตอนวิธีเพื่อตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

งานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอวิธีการเพื่อให้ได้คำตอบใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสม วิธีการจากงานวิจัยดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีการอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้กับวิธีการอื่น ๆ ได้อีกด้วย



วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการที่จะนำไปใช้ในการวางแผนการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน



การทรวเอกสาร

ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบย่นตามงาน เป็นปัญหาการจัดตารางการผลิตที่ซับซ้อน การหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimal Solution) ภายในระยะเวลาอันจำกัดทำได้ยาก งานวิจัยต่าง ๆ จึงมุ่งประเด็นไปที่การใช้วิธี วิทยาการศึกษาสำนึก และวิธีเมตาฮิวริสติกในการหาคำตอบ จากการ ศึกษา ค้นคว้าบทความต่าง ๆ พบว่า การจะแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยแก้ปัญหาย่อยในครั้งเดียว หรือ การแบ่งการแก้ปัญหาย่อยเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการกำหนดงานให้กับเครื่องจักร เมื่อกำหนดงาน เสร็จแล้ว ปัญหา FJSP จะถูกลดรูปเป็นปัญหา JSP ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่า ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ จึงมีการศึกษาค้นคว้าขั้นตอนวิธีการในการแก้ปัญหาย่อยสำหรับแก้ปัญหาย่อย JSP และแก้ปัญหาย่อย FJSP โดยจะนำเสนอวิธีการในการแก้ปัญหาย่อย JSP ก่อน หลังจากนั้นจะนำเสนอวิธีการในการแก้ปัญหาย่อย FJSP ต่อไปโดยลำดับ

1. ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน (Job Shop Scheduling Problem, JSP)

ปัญหา JSP เป็นปัญหาการจัดลำดับงาน N งาน เพื่อผลิตบนเครื่องจักร M เครื่อง โดยงาน แต่ละงานจะมีลำดับการเข้าสู่เครื่องจักรที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ผลิตงานบนเครื่องจักร แต่ละเครื่องจะแตกต่างกัน มีวิธีการจัดลำดับงานทั้งหมด $N!$ วิธีสำหรับเครื่องจักร 1 เครื่อง แต่เนื่องจาก มีเครื่องจักรทั้งหมด M เครื่อง ดังนั้นในปัญหา JSP จะมีวิธีการจัดลำดับงานทั้งหมด $(N!)^M$ วิธี เพื่อใช้ ค้นหาคำตอบที่เหมาะสม สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา JSP มีตัวแปรตัดสินใจและ ค่าคงที่ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ต่อไปนี้

พารามิเตอร์

p_{ij}	เวลาที่ใช้ผลิตงาน j บนเครื่องจักร i
A	เซตของข้อจำกัดก่อนหน้า (Precedence Constraint)
N	เซตของงานที่จะนำมาจัดตารางการผลิต
$x_{i,j,k}$	ตัวแปรไบนารี มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องานที่ j ผลิตบนเครื่องจักร i ก่อนงานที่ k
i, h	ดัชนีใช้ระบุเครื่องจักร
j, k	ดัชนีใช้ระบุงาน

ตัวแปรตัดสินใจ

C_{max}	เมคสแปนหรือเวลาเสร็จงานลำดับสุดท้ายในตารางการผลิต
$t_{i,j}$	เวลาเริ่มต้นของงานที่ j ที่ผลิตบนเครื่องจักร i
$x_{i,j,k}$	ตัวแปรไบนารี มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องานที่ j ผลิตบนเครื่องจักร i ก่อนงานที่ k

$$\text{Minimize } C_{max} \quad (1)$$

ST.

$$C_{max} - t_{i,j} \geq p_{i,j}; \quad \forall (i,j) \in N \quad (2)$$

$$t_{h,j} - t_{i,j} \geq p_{i,j} \quad \text{for } (i,j) \rightarrow (h,j) \in A \quad (3)$$

$$t_{i,j} - t_{i,k} \geq p_{i,k} \quad \text{OR} \quad t_{i,k} - t_{i,j} \geq p_{i,j}; \quad \forall (i,j) \text{ and } (i,k) \quad (4)$$

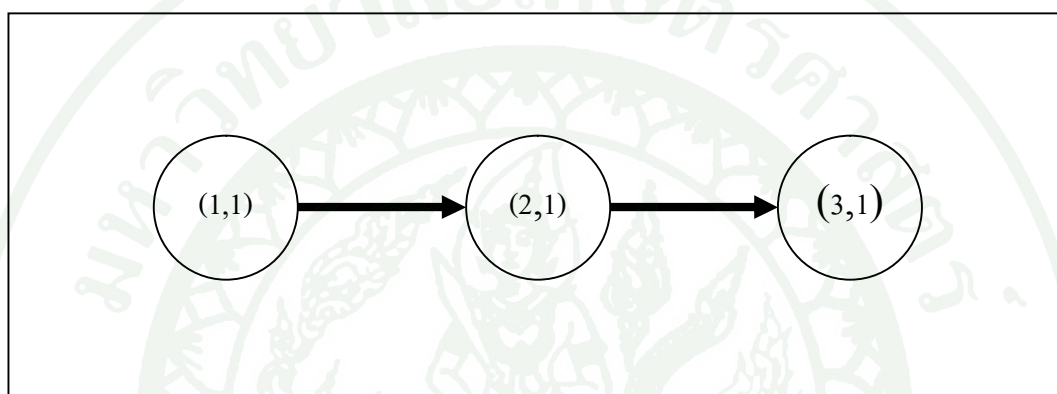
$$t_{i,j} \geq 0; \quad \forall (i,j) \in N \quad (5)$$

ในการแก้ปัญหา JSP นั้น มีการเป้าหมายหลากหลาย เป้าหมายโดยทั่วไปคือ หามาเมคสแปนที่มีค่าน้อยที่สุด โดยสมการที่ 1 และสมการที่ 2 แสดงเป้าหมายเพื่อหาค่าเมคสแปนที่น้อยที่สุด ซึ่งข้อจำกัดของเมคสแปน ก็จะต้องเป็นเวลาเสร็จของงานที่ช้าที่สุด สมการที่ 3 เป็นข้อจำกัดเรียงงานลำดับก่อนหลัง (Precedence Constraint) สมการที่ 4 ใช้ในการเรียงลำดับงานบนเครื่องจักร สมการที่ 5 กำหนดให้เวลาเริ่มต้นต้องไม่เป็นจำนวนเต็มลบ สำหรับสมการที่ 4 ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการหาคำตอบได้โดยตรง ด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) ดังนั้น จึงต้องนำสมการที่ 4 มาแปลง เป็นข้อจำกัด 2 ข้อดังแสดงในสมการที่ 6 และ 7

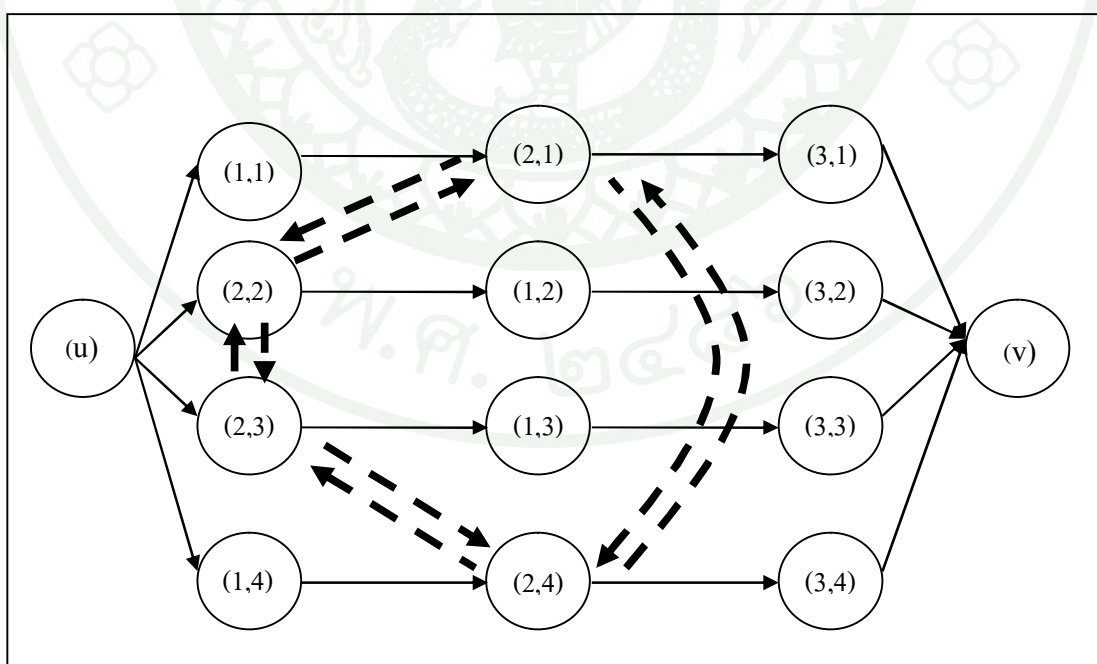
$$t_{i,k} - t_{i,j} + (1 - x_{i,j,k})M \geq p_{i,j} \quad (6)$$

$$t_{i,j} - t_{i,k} + (x_{i,j,k})M \geq p_{i,k} \quad (7)$$

นอกจากปัญหา JSP จะสามารถอธิบายได้ด้วย สมการทางคณิตศาสตร์แล้ว ปัญหาดังกล่าว ยังสามารถอธิบายได้ด้วยข่ายงาน (Network) ซึ่งประกอบด้วย ปม (Node) และ กิ่ง (Arc) สำหรับ ปัญหา JSP นั้น ปมหมายถึงงานที่ j ซึ่งผลิตบนเครื่องจักร i เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ (i,j) กราฟที่ใช้ อธิบายปัญหา JSP นี้ มีเส้นกิ่งอยู่ 2 ลักษณะซึ่งทั้ง 2 ลักษณะใช้อธิบายข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เส้นกิ่ง แบบแรกอยู่ในแนวเส้นนอนเรียกว่า คอนจังก์ทีฟอาร์ค (Conjunctive Arc) หัวลูกศรของกิ่งอธิบายถึง ทิศทางการทำงานตามลำดับดังแสดงไว้ในภาพที่ 3 เพื่อใช้อธิบายข้อจำกัดก่อนหน้าในการทำงาน เปรียบได้กับสมการที่ 3 ดังที่เคยกล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 3 คอนจังก์ทีฟอาร์ค



ภาพที่ 4 คอนจังก์ทีฟ- ดิสจังก์ทีฟ อาร์ค

ภาพที่ 4 แสดงกิ่งที่เรียกว่าดิสจังก์ทีฟอาร์คและคอนจังก์ทีฟอาร์ค โดยเส้นเต็มคือคอนจังก์ทีฟอาร์ค และเส้นประคือดิสจังก์ทีฟอาร์ค (Disjunctive Arc) สำหรับดิสจังก์ทีฟอาร์คใช้อธิบายการจัดลำดับงานบนเครื่องจักรแต่ละเครื่อง โดยเส้นกิ่งของดิสจังก์ทีฟอาร์คคือตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหานั้นเอง หากจะเปรียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วก็เปรียบได้กับสมการที่ 4 สำหรับเครื่องจักรเครื่องหนึ่งจะมีดิสจังก์ทีฟอาร์คต่อกันคล้ายๆลักษณะของวงกลมซึ่งมีชื่อเรียกว่าคลิก (Clique) ซึ่งใช้สำหรับตัดสินใจในการเรียงลำดับงานในแต่ละเครื่องจักร ตัวอย่างเช่น ถ้าหัวลูกศรในคลิกแสดงทิศทางการเคลื่อนที่จากปม (1, 1) ไปยังปม (1, 2) ไปยังปม (1, 3) ไปยังปม (1, 4) แสดงว่าบนเครื่องจักรที่ 1 จะผลิตงานที่ 1, 2, 3 และ 4 เรียงตามลำดับ ส่วนปม u และปม v เรียกว่า ปมคัมมี (Dummy Node) โดยที่ปม u แสดงถึงเวลาเริ่มต้นของงาน และปม v แสดงถึงเวลาสิ้นสุดของงาน หรือ ค่าเมคสแปนของระบบ ซึ่งเวลาสิ้นสุดของงานจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับเส้นทางวิกฤต (Critical Path) ดังนั้นเป้าหมายหลักคือทำอย่างไรให้เส้นทางวิกฤตมีค่าน้อยที่สุด

ภาพที่ 4 ใช้อธิบายปัญหา JSP รูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้กัน จึงได้นำมาแสดงไว้สำหรับนักวิจัยที่ต้องการศึกษาปัญหาดังกล่าวจะได้เห็นภาพรวมแบบกว้าง ๆ ของงานวิจัยในปัญหา JSP แต่การอธิบายลักษณะของปัญหาอาจใช้ปัญหาข้างงานรูปแบบอื่นมาอธิบายก็ได้ เช่น ในงานวิจัยฉบับนี้จะอธิบายปัญหาดังกล่าวในลักษณะของข่ายงานที่เรียกว่ารูปต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree) ซึ่งแผนภูมิดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งแผนภูมิ (หรือแบบจำลอง) ที่มีลักษณะคล้ายกับต้นไม้มาช่วยในการตัดสินใจ โดยกิ่งต่าง ๆ มักจะเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ แผนภูมิด้านไม้จะนำเสนอต่อไปในส่วนของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตัดสินใจ

สำหรับปัญหา JSP มีงานวิจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ Choi (2002) ทำการวิจัยโดยพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบโลคอล (Local Search Algorithm) เพื่อแก้ปัญห JSP สมการเป้าหมายคือการหาค่า เมคสแปนที่น้อยที่สุด ซึ่งการเรียงลำดับของงานมีผลต่อเวลาดังเครื่อง (Setup Time) งานวิจัยนี้สรุปว่า ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบโลคอลช่วยลดเวลาในการค้นหาคำตอบลงได้มาก Koonce (2000) ใช้การทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) เพื่อค้นหารูปแบบในการจัดลำดับงานสำหรับปัญหา JSP ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ใช้การทำเหมืองข้อมูลเพื่อค้นหารูปแบบ (Pattern) ในการเรียงงานเพื่อให้ได้มาซึ่งเมคสแปนที่น้อยที่สุด ในงานวิจัยจะใช้ วิธี GA เพื่อสร้างชุดคำตอบที่ให้เมคสแปนน้อย หลังจากนั้นจะใช้ การทำเหมืองข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ และใช้ในการพยากรณ์ว่าถ้างานในลำดับก่อนหน้าคืองานใดแล้วงานถัดไปควรเป็นงานใด ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเป็นดิสแพชชิงรูใหม่ ๆ ที่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับวิธี GA

งานวิจัยถัดมา Huang (2004) ใช้วิธีชิพบอททอลเนค (Shift Bottleneck Procedure) เพื่อแก้ปัญหา JSP โดยสมการเป้าหมายคือการลดค่าใช้จ่ายในการถือครองที่ต่ำที่สุด (Minimize Holding Cost) ในปัญหาดังกล่าวมีการเพิ่มเติมข้อจำกัดโดยบังคับให้ จำนวนงานส่งล่าช้าต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ จากงานวิจัยพบว่า วิธีชิพบอททอลเนค ช่วยลดเวลาในการหาคำตอบได้ดี Caumond (2008) ใช้วิธีเมมเมติก (Mimetic Algorithm) เพื่อแก้ปัญหา JSP ที่คำนึงถึงทามแลก (Time Lag) โดยทามแลก หมายถึงผลต่างของค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของเวลาเริ่มต้นการทำงานในแต่ละทุกกิจกรรม ในบทความเสนอแนวทางในการแปลงปัญหา JSP เป็นดิสจังก์ทีฟกราฟ (Disjunctive Graph) แล้วแก้ปัญหาด้วยวิธีเมมเมติก

Jansen (2005) แก้ปัญหา JSP โดยสนใจในกรณีที่ JSP สามารถควบคุมเวลาในการผลิตได้ เขาสนใจศึกษาปัญหาที่สามารถลดเวลาในการผลิตของแต่ละขั้นตอนลงได้ โดยยอมเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยฉบับนี้เสนอแนวทาง 2 แบบจำลอง (Model) ประกอบด้วยแบบจำลองชนิดต่อเนื่อง (Continuous Model) และแบบที่สองเป็นแบบจำลองชนิดไม่ต่อเนื่อง (Decrease Model) จากการทดลองพบว่าทั้ง 2 แบบจำลอง สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่เป็นพหุนาม (Polynomial Time) เมื่อจำนวนของเครื่องจักรและจำนวนของขั้นตอนเป็นค่าคงที่

Guinet (2000) ลดความซับซ้อนของปัญหาจากปัญหา JSP เป็นปัญหา FSP โดยการเพิ่มข้อจำกัดเรื่องงานก่อนหน้า (Precedence Constraint) หลังจากนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยวิธีของจอห์นสัน (Johnson's Rule) ซึ่งวิธีดังกล่าวของจอห์นสันสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักร 2 เครื่อง และมีประสิทธิภาพสำหรับ 3 และ 4 เครื่องจักรอีกด้วย Rajendran (1990) เสนอกฎดิสแพชชิง 3 วิธีเพื่อใช้ในการวางแผนการผลิตทั้งในปัญหา JSP และ FSP ประสิทธิภาพของวิธีใหม่ถูกนำเสนอโดยเปรียบเทียบกับ 13 ดิสแพชชิงรูล โดยการจำลองสถานการณ์ (Simulation Study) การทดลองเริ่มต้นจากปัญหา FSP หลังจากนั้นจะสุ่มเส้นทางของงาน (Job Routing) เพื่อให้เส้นทางที่แตกต่างกัน ปัญหาจะเปลี่ยนจาก FSP เป็น JSP งานวิจัยกล่าวสรุปว่า วิธีการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานในงานจริงได้

Drobouchevitch (2000) เสนอวิธีวิทยาการศึกษาสำนัก 2 วิธี เพื่อใช้แก้ปัญหา JSP แบบพิเศษ โดยปัญหาดังกล่าวอยู่บนสมมุติฐานว่า แต่ละงานต้องผ่านการผลิตอย่างน้อย 2 ขั้นตอนบน 2 เครื่องจักร และ 2 ขั้นตอนดังกล่าว ต้องมี 1 ขั้นตอนที่ผลิตบนเครื่องจักรที่เป็นคอขวดของระบบ ในปัญหาดังกล่าวจะสามารถแก้ปัญหาได้ด้วย 2 วิธีข้างต้น โดยกรณีที่แย่ที่สุด (Worst Case) จะแก้ปัญหาก็โดยมีอัตราส่วนของประสิทธิภาพ (Performance Ratio) เท่ากับ $3/2$ นอกจากนี้งานวิจัยเสนอว่า วิธีการ

ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีความคล้ายคลึงกันได้ เช่นในปัญหา การผลิตแบบไหลต่อเนื่องที่มีเครื่องจักรที่เหมือนกันในแต่ละขั้นตอนมากกว่า 1 เครื่อง (Flow Shop Scheduling Problem with Parallel Machines)

Ganesen (2006) เพิ่มความแปรปรวนเข้าไปในปัญหา JSP เพื่อสร้างปัญหาใหม่ แล้วจึงแก้ปัญหาดังกล่าวโดยมีสมการเป้าหมายเพื่อลดความแปรปรวนของเมคสแปน วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาคือ เทคนิคการจัดตารางจากหลังไปหน้า (Backward Scheduling Approach) ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับการจัดตารางจากหน้าไปหลัง (Forward Scheduling Approach) ผลการทดลองสรุปว่า การจัดตารางจากหลังไปหน้าสามารถแก้ปัญหาลักษณะที่สร้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าการจัดตารางจากหน้าไปหลัง

Pham (2008) ศึกษาปัญหา JSP ที่เรียกว่า มัลติโหมดบล็อกกิ้ง (Multi Mode Blocking Job Shop Scheduling Problem) ปัญหาดังกล่าวมาจากการศึกษาในโรงพยาบาล เป็นการ จัดทรัพยากร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ทางด้านการแพทย์ในการผ่าตัด โดยโปรแกรมซีเพล็กซ์ (CPLEX) ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญห จากการศึกษาพบว่ายังมีข้อจำกัดในด้านเวลาการหาคำตอบ ซึ่งสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้เฉพาะในปัญหขนาดกลางและขนาดเล็กเท่านั้น

งานวิจัยอื่นๆ ศึกษาการแก้ปัญห โดยใช้วิธีเมตาฮิวริสติก เช่น Watanabe (2005) และ Koonce (2000) แก้ปัญหา JPS โดยใช้วิธี GA นอกจากนี้งานวิจัยบางฉบับใช้ วิธี ANN (El-Bouri, 2006) เพื่อเลือกคัสแพชซึ่งนำมาใช้จัดตารางการผลิต ส่วนงานวิจัยอื่น ๆ ใช้ขั้นตอนวิธีแบบผสมผสานระหว่าง 2 วิธีทางเมตาฮิวริสติก (Dominic, 2004; Ohta, 2006; Xia, 2006)

2. ปัญหา การจัดตารางการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน (Flexible Job Shop Scheduling Problem)

ในส่วนต่อจากนี้จะอธิบายถึงลักษณะของปัญหา FJSP ซึ่งงานวิจัยโดยทั่วไปมักกล่าวถึงในลักษณะของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าปัญหา JSP เนื่องจากเพิ่มตัวแปรตัดสินใจลงไปว่าขั้นตอนการผลิตที่ h ของงานที่ j ควรผ่านกระบวนการผลิตบนเครื่องจักรใด สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาดังกล่าวจะมีส่วนตัวแปรไบนารีเข้ามาเกี่ยวข้องจำนวนมาก โดยที่ตัวแปรต่างๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์

M	คือตัวเลขบิกเอ็มหรือเลขจำนวนมากในเชิงคณิตศาสตร์
i	ดัชนีระบุเครื่องจักร
j, k	ดัชนีระบุงาน
h, k	ดัชนีระบุขั้นตอนของงาน
$p_{i,j,h}$	เวลาที่ใช้ในการผลิตขั้นตอนที่ h ของงานที่ j บนเครื่องจักร i
$O_{i,j,h}$	สัญลักษณ์แทนขั้นตอนการผลิตที่ h ของงานที่ j ผลิตด้วยเครื่องจักร i
$a_{i,j,h}$	ค่าคงที่เพื่อระบุว่างานที่ j ในขั้นตอนที่ h สามารถผลิตได้บนเครื่องจักร i หรือไม่ จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อสามารถผลิตได้ แต่จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อผลิตไม่ได้

ตัวแปรตัดสินใจ

C_{max}	เมคสเปน (Makespan)
$t_{j,h}$	เวลาเริ่มผลิตขั้นตอนที่ h ของงานที่ j บนเครื่องจักรใดๆ
$f_{j,h}$	เวลาที่ผลิตเสร็จของขั้นตอนที่ h ของงานที่ j บนเครื่องจักรใดๆ
$y_{i,j,h}$	ตัวแปรไบนารีมีค่าเป็น 1 เมื่อขั้นตอนการผลิตที่ h ของงานที่ j สามารถผลิตได้ด้วย เครื่องจักร i
$x_{i,j,h,k,l}$	ตัวแปรตัดสินใจชนิดไบนารี มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $O_{i,j,h}$ ผลิตก่อน $O_{i,k,l}$

แบบจำลองของการจัดการการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน เขียนแทนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } C_{max} \quad (8)$$

st.

$$t_{j,h} + y_{i,j,h} \times p_{i,j,h} \leq f_{j,h}; \quad \forall (i, j, h) \quad (9)$$

$$f_{j,h} \leq t_{j,h+1}; \quad \forall (j, h) \quad (10)$$

$$f_{j,h} \leq C_{max}; \quad \forall (j) \quad (11)$$

$$y_{i,j,h} \leq a_{i,j,h}; \quad \forall(i,j,h) \quad (12)$$

$$t_{j,h} + p_{i,j,h} \leq t_{k,l} + (1 - x_{i,j,h,k,l})M; \quad \forall(i,j,h,k,l) \quad (13)$$

$$\sum_i y_{i,j,h} = 1; \quad \forall(h,j) \quad (14)$$

$$\sum_j \sum_h x_{i,j,h,k,l} = y_{i,k,l}; \quad \forall(i,k,l) \quad (15)$$

$$\sum_k \sum_j x_{i,j,h,k,l} = y_{i,j,h}; \quad \forall(i,j,h) \quad (16)$$

$$x_{i,j,h,j,h} = 0; \quad \forall(i,j,h) \quad (17)$$

$$t_{j,h} \geq 0; \quad \forall(j,h) \quad (18)$$

$$f_{j,h} \geq 0; \quad \forall(j,h) \quad (19)$$

$$y_{i,j,h} \in \{0,1\} \quad (20)$$

$$x_{i,j,h,k,l} \in \{0,1\} \quad (21)$$

สมการที่ 9 และ 10 ใช้กำหนดเงื่อนไขในงานเดียวกันต้องผลิตแต่ละขั้นตอนเรียงตามลำดับ (Precedence Constraint) สมการที่ 11 เป็นเงื่อนไขของเมคสแปน ในขณะที่ สมการที่ 12 บังคับให้เลือกเครื่องจักรเฉพาะที่สามารถทำการผลิตได้เท่านั้น สมการที่ 13 ใช้ในการกำหนดว่าเครื่องจักรสามารถผลิตงานได้ครั้งละ 1 งานเท่านั้น สมการที่ 14 กำหนดให้เลือกเครื่องจักรได้เพียง 1 เครื่องต่อหนึ่งงานเท่านั้น สมการที่ 15 และ 16 ใช้เพื่อเรียงลำดับงานก่อนหลังบนเครื่องจักร i โดยที่สมการที่ 15 เป็นการเลือกงานก่อนหน้า และสมการที่ 16 เป็นการเลือกงานตามหลัง สมการที่ 17 กำหนดให้ตรงความเป็นจริงที่ว่า งานแต่ละงานจะเป็นงานก่อนหน้าของงานตัวเองไม่ได้ ส่วนสมการที่ 18 และ 19 เป็นการกำหนดว่าเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของทุกงานต้องเป็นจำนวนจริงบวก ส่วนสมการที่ 21 และ 22 เป็นการกำหนดให้ตัวแปร $y_{i,j,h}$ และ $x_{i,j,h,k,l}$ เป็นตัวแปรไบนารี

ส่วนต่อมาจะกล่าวถึงการตรวจเอกสารของปัญหา FJSP ซึ่งจากการตรวจเอกสารพบว่า งานวิจัยโดยมากมุ่งเน้นที่จะใช้ GA โดยปรับปรุง GA ให้มีคุณภาพสูงยิ่งขึ้นดังเช่น Jansen (2003) สร้างสมการเป้าหมายขึ้นใหม่ โดยกำหนดเวลาเสร็จงานสุดท้ายผสมอยู่ในฟังก์ชันเป้าหมายด้วย แล้วใช้วิธี GA ในการแก้ปัญหา เขาเสนอว่าไม่จำเป็นที่จะต้องได้คำตอบที่เหมาะสมซึ่งหาได้ยาก (Optimal Solution) เพราะในภาคอุตสาหกรรมจริง ๆ นั้น การเปลี่ยนแผนการผลิตเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากเครื่องจักรเสียหรือการขนส่งวัตถุดิบล่าช้า ดังนั้นวิธีการวางแผนที่ดีควรจะ สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีเหตุการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้น

Zribi (2004) แก้ปัญหา FJSP โดยแบ่งขั้นตอนทั้งหมด เป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการจัดงานเข้าเครื่องจักรใช้วิธีวิทยาการศึกษาสำนัก และขั้นตอนหลังใช้ GA จัดลำดับงาน ซึ่งการแบ่งการค้นหาเป็น 2 ขั้นตอนจะช่วยลดความซับซ้อนของปัญหา ทำให้หาคำตอบได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการตั้งขอบเขตล่าง (Lower Bound) ที่น่าสนใจอีกด้วย

ในปีเดียวกันนั้น Tanev (2004) ใช้ GA ร่วมกับกฎคีสแพชซึ่งต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหา โดยนำไปใช้งานในโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่ง ซึ่งงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีจุดประสงค์ต้องการให้วิธีการที่ใช้สามารถตอบสนองต่อการใช้งานจริงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการผสมผสานระหว่างวิธี GA และระบบฐานข้อมูล ซึ่งในภาคธุรกิจต้องการทั้งการตอบสนองที่รวดเร็วและคำตอบที่ดี ผลการทดลองพบว่าสามารถใช้งานได้ดีกับโรงงานซึ่งมีลูกค้าถึง 400 รายนอกจากนี้ Tay (2004) โดยงานวิจัยดังกล่าวได้นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า ขั้นตอนวิธีไฮบริด อีโวลูชันนารี (Hybrid Evolutionary Algorithm) ซึ่งผสมผสานระหว่าง GA และ คีสแพชซึ่งรูล การใช้งานจะสามารถควบคุมได้จากกระยะไกลคือทางอินเทอร์เน็ตเว็บไซต์

หลังจากนั้นในปี 2006 Zribi แก้ปัญหาที่มีสมการเป้าหมายคือ ลดเวลางานที่เสร็จล่าช้าให้น้อยที่สุด (Tardiness) โดยให้ความสำคัญกับเวลาจัดส่ง ซึ่งเวลาจัดส่งมีส่วนสำคัญมากในระบบห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) วิธีการหาคำตอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนในการมอบหมายงานใช้ วิทยาการศึกษาสำนัก และส่วนการจัดลำดับงานจะใช้ GA ในการแก้ปัญหา

Gao *et al.* (2007) ใช้วิธีผสมผสานระหว่าง GA และวิธีการย้ายคอขวด (Bottleneck Shifting) มาแก้ปัญหา FJSP โดยแก้ปัญหาที่มีสมการเป้าหมาย 3 ชนิด คือ หามคอขวดต่ำสุด ลดจำนวนภาระงานบนเครื่องจักรที่มีภาระมากที่สุดให้มีค่าน้อยที่สุด และสมการเป้าหมายสุดท้ายคือการลดผลรวมของภาระงานของทั้งระบบ โดยในงานวิจัยพยายามปรับสมดุลในเทคนิคการค้นหาคำตอบทั้งในเชิงลึกและเชิงกว้าง ซึ่งเชิงลึกคือการใช่วิธีย้ายคอขวดและเชิงกว้างคือการใช้วิธี GA

และในปี 2008 Gao ได้ใช้ GA ในการแก้ปัญหาอีกครั้งโดยพัฒนาวิธีการสลับคู่พันธุกรรม อีก 2 วิธีมาผสมกับสมการเป้าหมาย 3 เป้าหมายเดิม (เมคสแปนต่ำสุด ลดภาระของเครื่องจักรที่รับภาระสูงสุด และลดผลรวมของภาระโดยรวมของเครื่องจักร) โดยในการวิจัยครั้งนี้จะให้ความสำคัญกับการจัดโครโมโซม โดยมี 2 ขั้นตอนวิธีการ วิธีการแรกเป็นการค้นหาแบบ โลคอล (Local Search) โดยจะปรับปรุงคำตอบครั้งละ 1 ขั้นตอนการผลิต และอีกวิธีการหนึ่ง คือ การค้นหาแบบโลคอลเช่นเดียวกัน แต่การปรับปรุงคำตอบจะปรับโครโมโซมโดยปรับครั้งละ 2 ขั้นตอนการผลิต

งานวิจัยอื่นที่น่าสนใจเช่น Ho and Tay (2010) แก้ปัญหา FJSP ที่มีสมการเป้าหมายหลายชนิด โดยใช้ GA และวิธีที่เรียกว่ากฎวิวัฒนาการ (Evolving Dispatching Rule) โดยทำการทดลองนำหลายๆวิธีมาใช้ร่วมกับ GA จากผลการทดลองสรุปว่าวิธีจัดลำดับจากงานตามกำหนดส่ง (Earliest Start Time, EDD) มีประสิทธิภาพดีกับสมการเป้าหมายในการลดเวลางานช้าโดยเฉลี่ย (Mean Tardiness) และ เวลาเฉลี่ยของงานในสายการผลิต (Mean Flow Time) แต่ไม่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้กับเป้าหมายเมคสแปนต่ำสุด

Guohui (2009) ใช้วิธี PSO แก้ปัญหา FJSP โดยมีสมการเป้าหมายหลายสมการ (Multi Objective) ซึ่งเมื่อใช้ GA ร่วมกับวิธีตาม (Tabu Search) งานวิจัยฉบับดังกล่าวขยายผลมาจากงานวิจัยลำดับก่อนหน้าซึ่งเป็นการแก้ปัญหา JSP โดยใช้ PSO เขา กล่าวว่าเทคนิคการหาคำตอบที่นิยมใช้กันโดยส่วนใหญ่แก้ปัญหา FJSP ที่มีสมการเป้าหมายเดียวได้ดี แต่ใช้ไม่ได้ผลสำหรับสมการเป้าหมายแบบหลายเป้าหมาย (Multi Objective) ผลการทดลองสรุปว่า วิธีการที่พัฒนาขึ้นมามีประสิทธิภาพดีเมื่อนำมาใช้กับปัญหามหาศาล

Rossi and Boschi (2008) ใช้วิธี GA และ ACO ในการแก้ปัญหา โดยทั้ง 2 วิธีจะใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน และใช้โครงสร้างของชุดคำตอบที่เหมือนกัน เพื่อที่จะจัดตารางงานและนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งเมื่อนำมาทดลองกับปัญหาพบว่า PSO ดีกว่า GA ด้วยระดับความเชื่อมั่น 0.05 เปอร์เซนต์ งานวิจัยอื่น ๆ Tay (2007) ปรับปรุงวิธี GA ให้ดีขึ้นแล้วนำมาใช้แก้ปัญหาโดยเปรียบเทียบกับวิธี GA ปกติ โดยวิธีการที่พัฒนาขึ้นเรียกว่า เลิร์นเนเบิลเจเนติกอาร์คิเทคเจอร์ (Learnable Genetic Architecture) ถัดมา Pezzella (2008) ใช้ GA โดยปรับปรุงวิธีการกลายพันธุ์ของคำตอบ (Mutation) โดยจะเลือกกลายพันธุ์ (หรือปรับปรุงคำตอบ) เฉพาะบริเวณที่เป็นเส้นทางวิกฤต Najib (2002) แก้ปัญหา FJSP โดยใช้วิธีหาคำตอบโดยวิธี SA และใช้ ตารางตามาป้องกันกับดักคำตอบที่เป็นโลคอล (Local Trap) หลังจากนั้นอีก 3 ปี Xia and Wu (2005) ใช้วิธีผสมผสานระหว่าง PSO และ SA เพื่อแก้ปัญหา M-FJSP ถัดมา Xing and Wu (2008) ได้ตีพิมพ์งานวิจัยอีก 1 ฉบับสนับสนุนงานวิจัยดังกล่าว

สำหรับงานวิจัยต่าง ๆ มีจุดเด่นที่นำเสนอแตกต่างกันไป โดยสรุปแล้วเทคนิคในการหาคำตอบที่ดีที่เหมาะสมมีอยู่หลายวิธี แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้เวลานานมาก อาจเกินกว่าที่จะสามารถนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ วิธีเมตาดิวริสติกสามารถหาคำตอบได้ดีใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสม หรืออาจจะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้ในบางครั้ง แต่ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าคำตอบที่พบเป็นคำตอบที่เหมาะสม และโดยส่วนมากวิธีดังกล่าวใช้กลุ่มคำตอบ (Candidate Solution) ในการค้นหาจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีวิทยาการศึกษาสำนึก โดยส่วนใหญ่วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกใช้จำนวนคำตอบในการค้นหาน้อยกว่า แต่คำตอบที่ได้มักจะอยู่ในเกณฑ์พอใช้ได้เท่านั้น เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับปัญหาFJSP เป็นปัญหาที่มีตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) จำนวนมาก พื้นที่ในการหาคำตอบ (Search Space) จะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นงานวิจัยในปัญหาดังกล่าว จึงมักจะแบ่งการค้นหาคำตอบเป็น 2 ขั้นตอนคือขั้นตอนในการระบุเครื่องจักรให้กับงาน และขั้นตอนสำหรับการจัดเรียงงานในแต่ละเครื่องจักร งานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหา โดยแบ่งการหาคำตอบเป็น 2 ขั้นตอนเช่นกัน โดยขั้นตอนแรกเป็นการจัดงานเข้าสู่เครื่องจักรซึ่งนำเสนอวิธี GA และ PSO ส่วนการจัดเรียงงานจะใช้วิธีที่เรียกว่าวิธีเมตสเปนทรีซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทางวิทยาการศึกษาสำนึกอื่นๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีการเดิมที่มีอยู่แล้วให้ได้คำตอบที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้นได้ ข้อดีของการแบ่งเป็นสองขั้นตอนในการหาคำตอบอีกอย่างหนึ่งนอกเหนือจากการลดความซับซ้อนของปัญหาและลดเวลาในการหาคำตอบแล้วคือวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้กับปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบ JSP ได้ทันทีทำให้การพัฒนาวิธีการดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับ 2 ปัญหาคือ FJSP และ JSP ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกำหนดงานให้กับเครื่องจักรแล้ว จะทำให้ปัญหา FJSP ลดรูปกลายเป็นปัญหา JSP ดังที่เคยกล่าวไว้แล้วในตอนต้น

นอกจากนี้จากการเข้าไปศึกษาข้อมูลจริงในโรงงานทำให้ทราบว่าทุกๆ ที่ขั้นตอนวิธีการจัดตารางการผลิตอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่า เครื่องจักรไม่มีการหยุดตลอดช่วงเวลาการทำงานแต่ เครื่องจักรทุกเครื่องในโรงงานไม่ได้ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง มีการหยุดเช่น เพื่อบำรุงรักษา หยุดพักระหว่างวัน เป็นต้น (Lee *et al.*, 1997; Sanlaville and Schmidt, 1998; Schmidt, 2000; Ma, 2010) ดังนั้นในตอนท้ายของงานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณในส่วนของการทำงานของเครื่องจักรที่ทำงานแบบมีช่วงเวลาการหยุดอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม Visual Basic
3. โปรแกรม Microsoft Excel

วิธีการ

ในการแก้ปัญหา FJSP เทคนิคการแก้ปัญหาที่น่าสนใจเทคนิคหนึ่งคือ การแบ่งขั้นตอนการหาคำตอบเป็น 2 ขั้นตอน (Zribi, 2004) และ (Nozha, 2006) เนื่องจากปัญหา FJSP เป็นปัญหาที่ซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมาก จึงยากที่จะหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาอันสั้น ในทำนองเดียวกันงานวิจัยฉบับนี้ใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนการระบุงานให้แก่เครื่องจักรและขั้นตอนการเรียงลำดับงาน

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา JSP ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ที่เรียกว่าวิธีเมคสแปนทรี และนำเสนอวิธีเมคสแปนทรี โดยนำไปใช้ร่วมกับวิธี GA และ PSO เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา FJSP โดย GA และ PSO ถูกนำมาใช้โดยปรับปรุงให้เหมาะสมกับ วิธีเมคสแปนทรี ซึ่งวิธี GA และ PSO ถูกใช้ในการระบุเครื่องจักรให้กับงาน สำหรับรายละเอียดของการแก้ปัญหาจะเริ่มต้นอธิบายหลักการทำงานของวิธีเมคสแปนทรีในการแก้ปัญหา JSP เสียก่อนจากนั้นจึงขยายรูปแบบของปัญหาเป็น FJSP และนำเสนอวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหา FJSP ซึ่งจะนำเอาวิธีเมคสแปนทรีมาใช้ร่วมกับวิธี GA และ PSO ต่อไป และสุดท้ายจะนำเสนอวิธีการคำนวณเวลาทำงานของเครื่องจักรที่มีการหยุดเครื่องระหว่างทำงาน

1. ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหา การวางแผนการผลิตแบบตามงาน

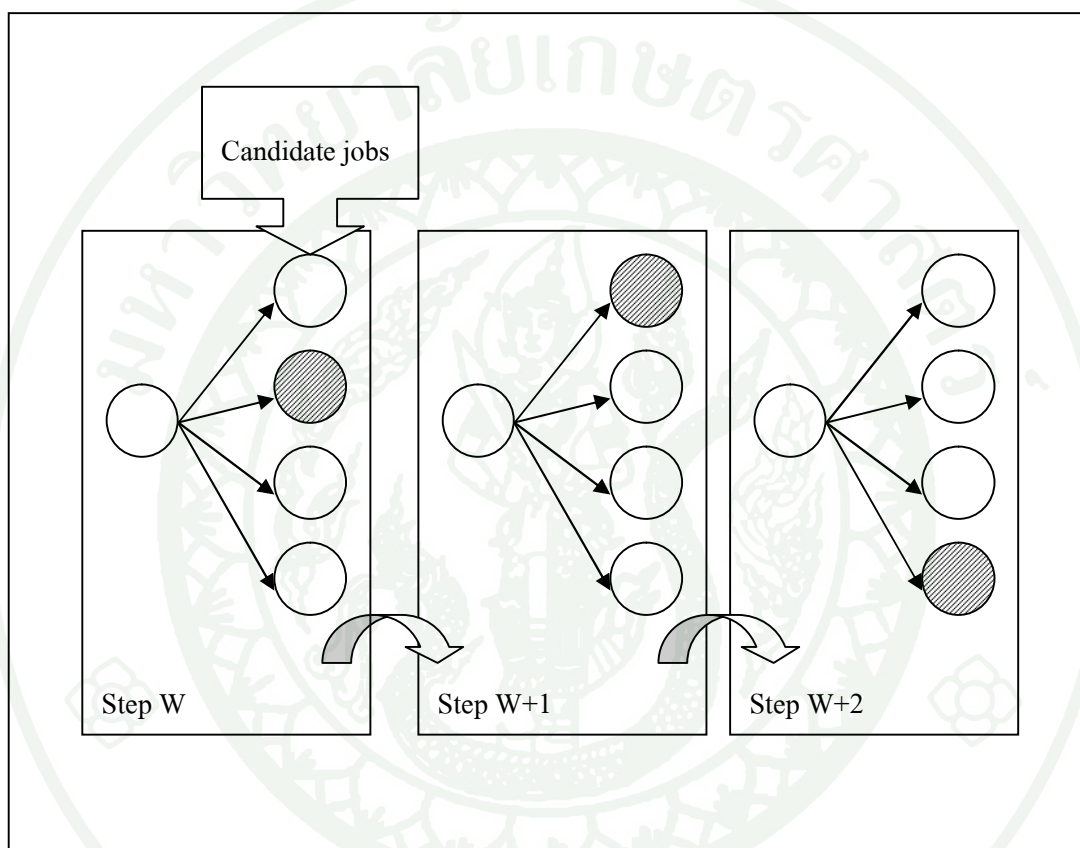
วิธีเมคสเปนทรี (Makespan Tree, MT)

รายละเอียดของวิธีเมคสเปนทรีถูกนำเสนอเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนของการประเมินทางเลือกเพื่อจัดลำดับลงในตารางการผลิต และขั้นตอนของการเลือกงานลงในตารางการผลิต สำหรับขั้นตอนของการประเมินทางเลือกในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ฟังก์ชันประเมิน (Evaluation Function) เพื่อเลือกงานในแต่ละขั้นตอน ถ้าฟังก์ชันที่ใช้ประเมินมีประสิทธิภาพ คำตอบที่ได้ก็จะได้ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมมากขึ้น ฟังก์ชันประเมินเป็นฟังก์ชันที่มักใช้กันในโปรแกรมการเล่นเกมต่าง ๆ เช่น หมากรุก (Chess) หรือเกมส้อมากลิ้ม (Go) เพื่อประเมินตำแหน่งการเดินของแต่ละทางเลือกของเกม ฟังก์ชันประเมินถูกออกแบบมาเพื่อเน้นความรวดเร็วในการตัดสินใจมากกว่าความถูกต้องแม่นยำ ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้หลักการดังกล่าวมาประเมินเพื่อช่วยในการจัดตารางการผลิต โดยใช้วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกที่ไม่ซับซ้อนสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันในการประเมิน

สำหรับการตัดสินใจในแต่ละรอบของการวนซ้ำ (Iteration) เพื่อจัดตารางงานทุกงานจะถูกแตกกิ่งเพื่อทำการตัดสินใจ (Decision Tree) และประเมินเมคสเปน เมื่องานใดถูกเลือก ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนสุดท้ายจะถูกจัดลงในตาราง โดยการเลือกหนึ่งครั้ง งานจะถูกจัดลงในตารางการผลิตเพียงหนึ่งขั้นตอนเท่านั้น เมื่องานใดถูกเลือกจนกระทั่งทำครบทุกขั้นตอนแล้ว งานดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาแตกกิ่งอีกต่อไป

สำหรับการประเมินในแต่ละกิ่งจะประเมินโดยสมมุติว่า ถ้างานประจำกิ่งนั้นถูกจัดเข้าสู่ตารางการผลิต แล้วเมคสเปนของระบบจะมีค่าเท่าไร แต่เมคสเปนยังไม่สามารถคำนวณได้จนกว่าทุกงานจะถูกจัดลงในตารางการผลิตเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นจึงต้องจัดลำดับงานที่เหลือนี้อย่างก่อน งานที่เหลือจะถูกจัดลงในตารางการผลิตโดยอาศัยกฎการจัดตารางที่ไม่ซับซ้อน หลังจากนั้นจึงจะคำนวณเมคสเปน ทำวิธีเดียวกันนี้กับทุกๆ กิ่งและเลือกกิ่งที่มีค่าเมคสเปนน้อยที่สุดลงในตารางการผลิตเพียง 1 กิ่งเท่านั้น หลังจากนั้นจะทำการวนซ้ำจนกว่าทุกๆ งานของทุกๆ ขั้นตอนจะถูกจัดลงในตารางการผลิต

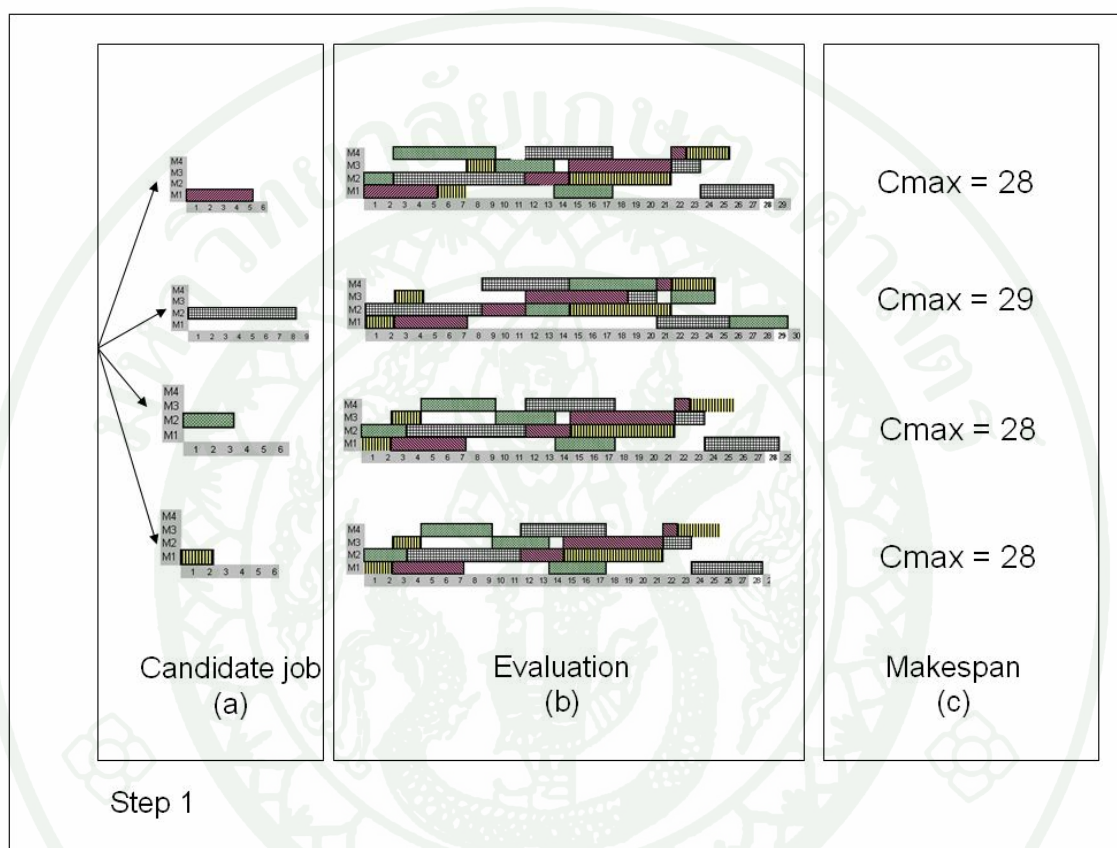
เริ่มแรกขั้นตอนการเลือกงานจะถูกอธิบายด้วยภาพที่ 5 สำหรับขั้นตอนในการเลือกนั้น ในแต่ละรอบสมมุติให้มี 4 งานที่พร้อมจะจัดลงในตารางการผลิต ถ้างานใดถูกเลือกเป็นครั้งแรก ขั้นตอนแรกของงานนั้นจะถูกจัดเข้าตารางการผลิต ถ้างานใดถูกเลือกเป็นครั้งที่ 2 แสดงว่าขั้นตอนที่สองของงานนั้นถูกจัดเข้าในตารางการผลิต ถ้างานถูกผลิตครบทุกขั้นตอนแล้ว งานดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาแตกกิ่งเพื่อค้นหาในครั้งต่อไป



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการแตกกิ่งหาคำตอบ

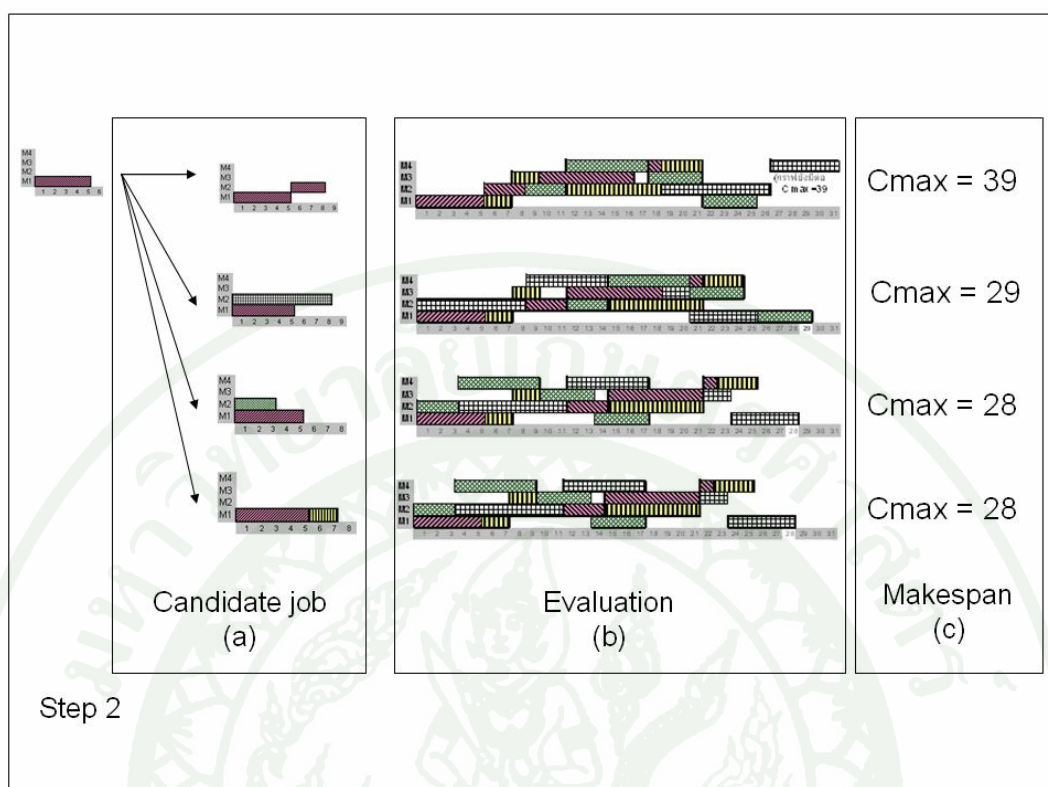
สำหรับขั้นตอนการประเมิน งานจะถูกเลือกโดยใช้กฎในการเลือกที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ทำการทดลองด้วยกฎ 3 ข้อคือวิธีจัดแบบนอนดีเลย์ (Non Delay Scheduling Algorithm) หรือเลือกงานที่พร้อมจะผลิตเข้าสู่ตารางการผลิตก่อน วิธีที่สองคือการเลือกงานที่เสร็จเร็วที่สุดก่อน (Earliest Finish Time, EFT) และวิธีสุดท้ายคือเลือกงานที่ใช้เวลาผลิตสั้นที่สุดก่อน (Shortest Processing Time, SPT) สามวิธีดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่าง สำหรับการใช้งานจริงสามารถนำวิธีการอื่นมาใช้แทนได้

เมื่อจัดงานเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการคำนวณเมคสเปน โดยค่าเมคสเปนจะถูกนำไปใช้เป็นค่าประจำกิ่งของทางเลือก หลังจากนั้นจะเลือกงานที่ให้เมคสเปนน้อยที่สุด โดยขั้นตอนการเลือกจะถูกริยาบดียังภาพที่ 6 และภาพที่ 7 ซึ่งภาพที่ 6 คือขั้นตอนการเลือกในการแตกกิ่งครั้งที่ 1 และภาพที่ 7 เป็นขั้นตอนการเลือกในการแตกกิ่งครั้งที่ 2



ภาพที่ 6 การประเมิน เมคสเปนครั้งที่ 1

ในการเลือกครั้งที่ 1 แต่ละทางเลือกจะถูกแตกกิ่งเพื่อตัดสินใจ ทางเลือกประกอบด้วยงานที่ 1, 2, 3 และ 4 จากภาพที่ 6 ในแต่ละกิ่งแสดงถึงแต่ละทางเลือกในการประเมิน งานประจำกิ่งจะถูกจัดลงในตารางการผลิตทันที ดังภาพที่ 6 (a) หลังจากนั้นขั้นตอนอื่นๆ (ทั้งหมดของงานที่เหลืออยู่) จะถูกจัดลงในตารางผลิตอย่างรวดเร็วด้วยกฎการจัดตารางอย่างง่ายดังแสดงไว้ใน ภาพที่ 6 (b) หลังจากนั้นจะคำนวณค่าเมคสเปนเป็นค่าประจำกิ่ง และเลือกเมคสเปนที่มีค่าต่ำที่สุด จากภาพที่ 6 (c) เมคสเปนที่น้อยที่สุดมีค่า 28 ดังนั้นจะเลือก งานที่ 1 เข้าสู่ตารางการผลิตจริง เพราะงานที่ 1 ให้เมคสเปนเท่ากับ 28 เป็นงานแรก เมื่อเลือกงานที่ 1 เข้าสู่ตารางการผลิตแล้ว งานที่ 1 ในขั้นตอนที่ 1 จะถูกจัดลงในตารางการผลิตทันที



ภาพที่ 7 การประเมิน เมคสเปนครั้งที่ 2

หลังจากนั้น จะเข้าสู่ขั้นตอนการเลือกในรอบถัดไป โดยการเลือกจะทำการแตกกิ่งอีกครั้ง เพื่อจัดตารางการผลิตดังภาพที่ 7 ซึ่งทางเลือกมีอยู่ 4 ทางเลือก คือ งานที่ 1 (ในขั้นตอนที่ 2) งานที่ 2, 3 และ 4 (ในขั้นตอนที่ 1) จากนั้นทั้ง 4 ทางเลือกจะถูกคำนวณค่าเมคสเปน และจะเลือกทางเลือกที่ให้เมคสเปนน้อยที่สุด ซึ่งในครั้งที่ 2 นี้ งานที่ 3 ให้ค่าเมคสเปนน้อยที่สุดเป็นงานแรก ดังนั้นงานที่ 3 จึงถูกเลือกเข้าสู่ตารางการผลิต จุดเด่นอย่างหนึ่งของวิธีการนี้คือ ค่าเมคสเปนในการเลือกแต่ละครั้งจะมีค่าเท่าเดิมหรือน้อยกว่าเดิมเสมอ เช่นถ้าครั้งที่ 1 มีค่าเมคสเปนต่ำสุดเท่ากับ 28 ในครั้งหลังจากนี้ อาจจะได้ค่าเมคสเปนเท่าเดิม หรือน้อยกว่านั้น เช่น 26 เป็นต้น

ส่วนต่อจากนี้จะเป็นการลงรายละเอียดในการประเมินค่าเมคสเปนของแต่ละกิ่ง โดยตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างโจทย์การคำนวณ (Askin, 1993) มีงาน 4 งาน ที่ต้องทำการจัดตารางเวลางานแต่ละงาน ต้องผลิตเรียงตามขั้นตอนโดยแต่ละขั้นตอนใช้เครื่องจักรแตกต่างกัน จากข้อมูลในตารางลำดับหลักแรกแสดงถึงชื่อเครื่องจักร และลำดับหลักที่ 2 แสดงถึงเวลาที่ใช้ในการผลิตบนเครื่องจักร เช่น ในงานที่ 1 ขั้นตอนที่ 1 ต้องผลิตบนเครื่องจักร M1 และใช้เวลาผลิต 5 นาที เริ่มต้นการตัดสินใจ

มี 4 ทางเลือก คือ งานที่ 1 งานที่ 2 งานที่ 3 และงานที่ 4 ดังนั้นสามารถแตกกิ่งได้ทั้งหมด 4 กิ่ง ซึ่งได้แสดงไว้แล้วในภาพที่ 6 (a) หลังจากนั้นจะเริ่มประเมินค่าเมคสแปนกิ่งที่ 1 (กิ่งบนสุด) โดยใช้วิธีนอนติเคย์ ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณไว้ในตารางที่ 3 สำหรับสดมภ์แรกคือลำดับการคำนวณสดมภ์ที่ 2 และ 3 คือเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของงานที่ 1 สดมภ์ที่ 4 ถึง 9 คือเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของงานที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สดมภ์สุดท้ายคือสดมภ์การตัดสินใจเลือก

ตารางที่ 2 ตัวอย่างปัญหา JSP

	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4
งานที่ 1	(M1, 5)	(M2, 3)	(M3, 7)	(M4, 1)
งานที่ 2	(M2, 8)	(M4, 6)	(M3, 2)	(M1, 5)
งานที่ 3	(M2, 3)	(M4, 6)	(M3, 4)	(M1, 4)
งานที่ 4	(M1, 2)	(M3, 2)	(M2, 7)	(M4, 3)

เริ่มต้นในลำดับที่ 1 (ของการประเมิน) จะนำงานประจำกิ่งลงสู่ตารางก่อน ในที่นี้งานที่ 1 คืองานประจำกิ่ง ดังนั้นขั้นตอนที่ 1 ของงานที่ 1 ถูกจัดลงในตารางการผลิตก่อน เมื่อถึงขั้นตอนนี้อธิบายได้ดังภาพที่ 6 (a) ในกิ่งบนสุดและอธิบายด้วย ตารางที่ 3 แถวที่ 1 หลังจากนั้น งานที่เหลือทั้งหมดจะถูกจัดลงในตารางอย่างรวดเร็วด้วยกฎนอนติเคย์ ซึ่งอธิบายด้วยข้อมูลตัวเลขในตารางที่ 3 ตั้งแต่แถวที่ 2 ถึงแถวที่ 16 โดยวิธีการเลือกคือจะเลือกเวลาเริ่มต้นผลิตที่น้อยที่สุดเข้าตารางการผลิตก่อน แต่ถ้าเวลาเริ่มต้นเท่ากันจะเลือกงานที่ผลิตเสร็จเร็วที่สุดก่อน

สำหรับข้อมูลตัวเลขที่เน้นเป็นตัวหนาหมายถึงข้อมูลที่ถูกเลือก และสำหรับสดมภ์สุดท้ายของตารางที่ 2 นี้ แสดงถึงงานที่ถูกเลือกและหมายเลขขั้นตอนการผลิตที่จัดลงในตารางการผลิต ตัวอย่างเช่น ในแถวที่ 1 ตัวเลข 1/1 หมายถึงว่า งานที่ 1 ถูกเลือก และขั้นตอนที่ 1 ของงานดังกล่าวถูกจัดลงในตารางการผลิต สำหรับตัวอย่างการคำนวณค่าต่าง ๆ งานที่ 1 ถูกจัดลงในตารางก่อนจากรายละเอียดข้อมูลการผลิต (ตารางที่ 3) งานที่ 1 ขั้นตอนที่ 1 ผลิตบนเครื่องจักร M1 ใช้เวลาผลิต 5 นาที ดังนั้นจึงใช้เวลาตั้งแต่ 0 ถึง 5 นาที บนเครื่องจักร M1 แล้วจึงทำการบันทึกข้อมูลดังกล่าวไว้ในตารางที่ 3 แถวที่ 1

หลังจากที่งานประจำถูกจัดลงไปแล้ว ขั้นตอนต่อมา จะเป็นการประเมินแต่ละทางเลือก (โดยใช้วิธีนอนติลย์) โดยทางเลือกที่ 1 คืองานที่ 1 ในขั้นตอนที่ 2 ผลิตบนเครื่องจักร M2 และใช้เวลาผลิต 3 นาที แต่ว่า งานที่ 1 ในขั้นตอนที่ 2 จะเริ่มได้หลังจากขั้นตอนที่ 1 ของงานดังกล่าวเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นจึงเริ่มผลิตได้ที่เวลา 5 นาที และเสร็จที่เวลา 8 นาที ดังแสดงในตารางที่ 3 แถวที่ 2 สดมภ์ที่ 2 และ 3 ทางเลือกถัดมาในสดมภ์ที่ 4 และ 5 แสดงรายละเอียดของงานที่ 2 ขั้นตอนที่ 1 ซึ่งต้องผลิตบนเครื่องจักร M2 และใช้เวลา 8 นาที เนื่องจากเครื่องจักร M2 สามารถเริ่มต้นได้ทันที ดังนั้นงานที่ 2 ขั้นตอนที่ 1 จึงผลิตที่เวลา 0 ถึง 8 นาที

ทางเลือกที่ 3 ในสดมภ์ที่ 6 และ 7 คืองานที่ 3 ในขั้นตอนที่ 1 ผลิตบนเครื่องจักร M2 ใช้เวลา 3 นาที ซึ่งเครื่องจักร M2 สามารถผลิตได้ทันที ดังนั้นจึงเริ่มผลิตที่เวลา 0 และเสร็จที่เวลา 3 นาที ส่วนทางเลือกสุดท้าย ในสดมภ์ที่ 8 และ 9 คืองานที่ 4 ในขั้นตอนที่ 1 ต้องผลิตบนเครื่องจักร M1 ซึ่งใช้เวลาในการผลิต เพียง 2 นาที แต่เนื่องจาก เครื่องจักร M1 พร้อมทั้งจะเริ่มงานที่เวลา 5 นาที (เพราะเวลา 0 ถึง 5 ถูกใช้ในการผลิต งานที่ 1 ไปแล้ว) ดังนั้น งานที่ 4 ในขั้นตอนที่ 1 จึงเริ่มผลิตที่เวลา 5 และเสร็จที่เวลา 7 นาที เมื่อดูจากทั้ง 4 ทางเลือกพบว่า ทางเลือกที่ 3 เริ่มต้นได้เร็วที่สุดคือเวลา 0 และเสร็จเร็วที่สุดที่เวลา 3 นาที ดังนั้น (ในแถวที่ 2 ตารางที่ 3) งานที่ 3 ขั้นตอนที่ 1 ถูกจัดลงในตารางผลิต ทำวิธีดังกล่าวซ้ำจนกระทั่งงานทุกงานถูกจัดลงในตารางการผลิตจนครบถ้วน เมื่องานทั้งหมดถูกจัดลงในตารางผลิตแล้วเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการประเมิน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในภาพที่ 6 (b) ส่วนค่าเมคสแปนแสดงไว้ดังภาพที่ 6 (c)

ตารางที่ 3 วิธีการประเมินเมคสแปนของกึ่งที่ 1

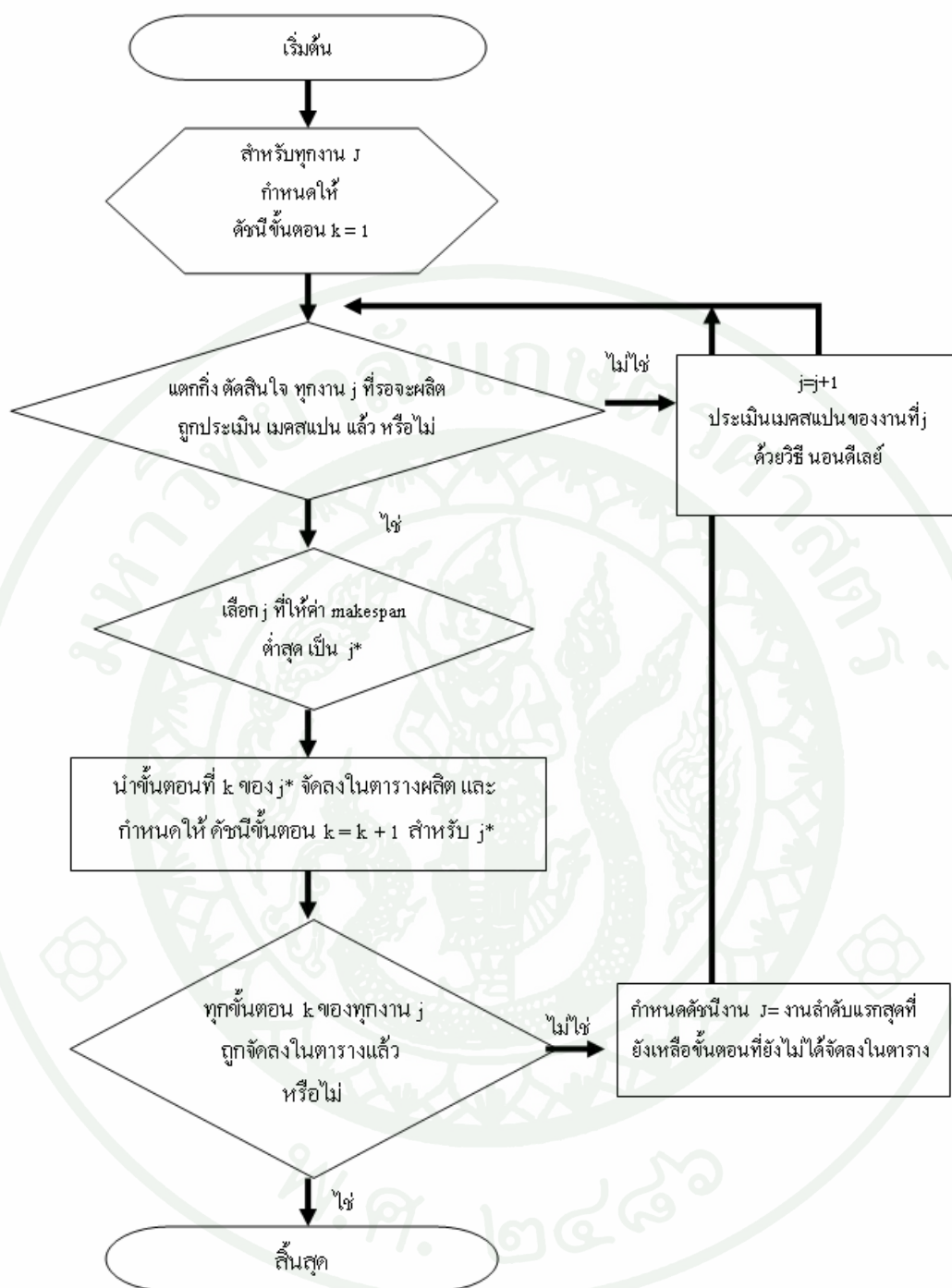
ลำดับ	งาน 1		งาน 2		งาน 3		งาน 4		ลำดับ
	เริ่ม	สิ้นสุด	เริ่ม	สิ้นสุด	เริ่ม	สิ้นสุด	เริ่ม		
1	0	5							1/1
2	5	8	0	8	0	3	5	7	3/1
3	5	8	3	11	3	9	5	7	3/2
4	5	8	3	11	9	13	5	7	2/1
5	11	14	11	19	9	13	5	7	4/1
6	11	14	11	17	9	13	7	9	4/2
7	11	14	11	17	9	13	11	18	3/3
8	11	14	11	17	13	17	11	18	1/2
9	14	21	11	17	13	17	14	21	2/2
10	14	21	17	19	13	17	14	21	3/4
11	14	21	17	19			14	21	1/3
12	21	22	21	23			14	21	4/3
13	21	22	21	23			21	24	1/4
14			21	23			22	25	2/3
15			23	28			22	25	4/4
16			23	28					

เมื่อประเมินค่าเมคสแปนของกึ่งที่ 1 เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการประเมินเมคสแปนของกึ่งที่ 2 ซึ่งกึ่งที่ 2 งานประจำกึ่งคือ งานที่ 2 ดังนั้นจึงนำงานที่ 2 ในขั้นตอนการผลิตที่ 1 จัดลงในตารางก่อน จากนั้นก็ใช้วิธีอันดับเดียวประเมินค่าเมคสแปน โดยรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 4 และภาพของการแต่งกึ่ง แสดงไว้ในภาพที่ 6 (a) ในกึ่งที่ 2 ซึ่งวิธีการจัดงานประจำกึ่งลงในตาราง และวิธีการประเมินเมคสแปน ใช้หลักการเดียวกับตารางที่ 3 แต่ผลลัพธ์ที่ได้คือในกึ่งที่สอง (ตารางที่ 4) เมคสแปนมีค่าเท่ากับ 29 นาที เป็นค่าประจำกึ่ง

ตารางที่ 4 วิธีการประเมินเมคสแปนของกึ่งที่ 2

ลำดับ	งาน1		งาน2		งาน3		งาน4		เลือกงาน
	เริ่ม	สิ้นสุด	เริ่ม	สิ้นสุด	เริ่ม	สิ้นสุด	เริ่ม	สิ้นสุด	
1			0	8					2/1
2	0	5	8	14	8	11	0	2	4/1
3	2	7	8	14	8	11	2	4	4/2
4	2	7	8	14	8	11	8	15	1/1
5	8	11	8	14	8	11	8	15	1/2
6	11	18	8	14	11	14	11	18	2/2
7	11	18	14	16	11	14	11	18	3/1
8	11	18	14	16	14	20	14	21	1/3
9	18	19	18	20	14	20	14	21	3/2
10	20	21	18	20	20	24	14	21	4/3
11	20	21	18	20	20	24	21	24	2/3
12	20	21	20	25	20	24	21	24	1/4
13			20	25	20	24	21	24	3/3
14			20	25	24	28	21	24	2/4
15					25	29	21	24	4/4
16					25	29			3/4

หลังจากนั้น จึงคำนวณ กิ่งถัดไป คืองานที่ 3 และงานที่ 4 ซึ่งงานที่ 3 และงานที่ 4 จะได้เมคสแปนเท่ากับ 28 เช่นเดียวกับงานที่ 1 เป็นอันเสร็จสิ้นการประเมิน และจะเข้าสู่ขั้นตอนการเลือก และจะเลือกกิ่งที่มีค่าเมคสแปนประจำกิ่งน้อยที่สุด เพียงกิ่งเดียว หลังจากนั้นจะเริ่มทำการแตกกิ่ง เพื่อทำการค้นหาในรอบถัดไป โดยในรอบที่ 2 มีรายละเอียดดังภาพที่ 7



ภาพที่ 8 ฟังงานของวิธีเมคสแปนทรี

ภาพที่ 8 แสดงฟังงานของวิธีเมคสแปนทรีซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มต้นจากการกำหนดดัชนีของขั้นตอนของงานทุกงานให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง ($k = 1$) ขั้นตอนถัดมางานทุกงานจะถูกแตกกิ่งเพื่อเป็นทางเลือกในการตัดสินใจ โดยแต่ละกิ่งจะมีขั้นตอนที่ k คือขั้นตอนของงานประจำกิ่ง หลังจาก

นั้นจะคำนวณค่าเมคสเปนด้วยวิธีนอนดิเลย์ (หรือใช้ วิธีวิทยาการศึกษาสำนักอื่นก็ได้) ขั้นตอนต่อมาตรวจสอบว่า งาน j ถูกประเมินค่าเมคสเปนครบทุกงานแล้วหรือไม่ ถ้าไม่จะนำงานถัดไปที่ยังไม่ประเมินค่าเมคสเปนไปประเมินค่า แต่ถ้ากรณีที่ทุกงานงาน j ถูกประเมินเมคสเปนแล้ว ให้เข้าสู่ขั้นตอนถัดไป โดยขั้นตอนถัดไป เป็นการเลือกงาน j ที่ให้ค่าเมคสเปนต่ำที่สุด (ดีที่สุด) จากนั้นขั้นตอนที่ k (ขั้นตอนที่พร้อมจะผลิต) ของงาน j ที่ถูกเลือกจัดลงในตารางการผลิต (ในที่นี้เรียกว่า j^*) หลังจากนั้นบวกเพิ่มขั้นตอนที่ k ของงาน j^* ไปอีก 1 ค่า หรือเลื่อนลำดับขั้นตอนของงาน j^* ไปสู่ขั้นตอนถัดไป หลังจากนั้นตรวจสอบว่า ทุกขั้นตอนของงานทุกงานถูกจัดลงในตารางการผลิตแล้วหรือไม่ ถ้าไม่จะกลับเข้าสู่ขั้นตอนการแตกกิ่งเพื่อตัดสินใจเลือกงานในรอบถัดไป แต่ถ้าขั้นตอนทั้งหมดของทุกงานจัดลงในตารางการผลิตเรียบร้อยแล้ว แสดงว่าเสร็จสิ้นการคำนวณงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีโดยสรุปไว้ในรูปแบบของ ภาษาเทียม (Pseudo Code) ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 9 โดยรายละเอียดของขั้นตอนวิธี MT ในภาษาเทียมมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงไว้ดังต่อไปนี้

บรรทัดที่ 1	ตรวจสอบว่าจัดลำดับงานครบทุกกิจกรรมหรือไม่
บรรทัดที่ 2	แตกกิ่งของทุกงาน j เพื่อเตรียมประเมินเมคสเปน
บรรทัดที่ 3 และ 10	ใช้ตรวจสอบว่า งานทุกงานถูกประเมินค่าเมคสเปนครบทุกงานแล้วหรือไม่
บรรทัดที่ 4	เป็นการใช้วิธีนอนดิเลย์ หรือวิธีการอื่นๆ ในการเรียงลำดับงาน
บรรทัดที่ 5	เป็นการคำนวณเวลาเสร็จงานของแต่ละขั้นตอน
บรรทัดที่ 6	เลือกงาน
บรรทัดที่ 7	ขยับดัชนีขั้นตอนของงาน j ไปยังขั้นตอนถัดไป (โดย o_j คือ ดัชนีระบบขั้นตอนของงาน j)
บรรทัดที่ 8	ปรับปรุงเวลาบนเครื่องจักรให้สอดคล้องกับงานที่เพิ่งจัดลงในตาราง
บรรทัดที่ 9	สิ้นสุดการวนลูปเพื่อเลือกงานในแต่ละรอบการจัดตาราง
บรรทัดที่ 11	คำนวณค่าเมคสเปน
บรรทัดที่ 14	เลือกงานประจำกิ่งที่ให้ค่าเมคสเปนต่ำสุด
บรรทัดที่ 15	จองเวลาและลำดับในตารางสำหรับงานที่ถูกเลือก

```

(1)    Do while complete all operation of choosing operation

(2)          For job  $\hat{j} = 1$  to J

                *//Evaluating each job  // *

(3)          Do while complete all operation of evaluating operation

(4)          For j=1 to J

(5)          Calculating  $t_{i,j}$  and  $f_{i,j}$  of operation  $o_j$ 

(6)          Choose one operation of job  $j^*$  depended on criteria

(7)          If  $o_j < O_j$  then  $o_{j^*} = o_j + 1$ ,

(8)           $t_m = f_{i,j^*}$ 

(9)          Next j

(10)         Loop

(11)         Fine Makespan  $C_j$ 

(12)     Next  $\hat{j}$ 

(13)     Choose one operation by minimum  $C_j$ 

(14)     Update sequence and machine time

(15) Loop

```

ภาพที่ 9 pseudo code ของวิธีเมคสเปนทรี

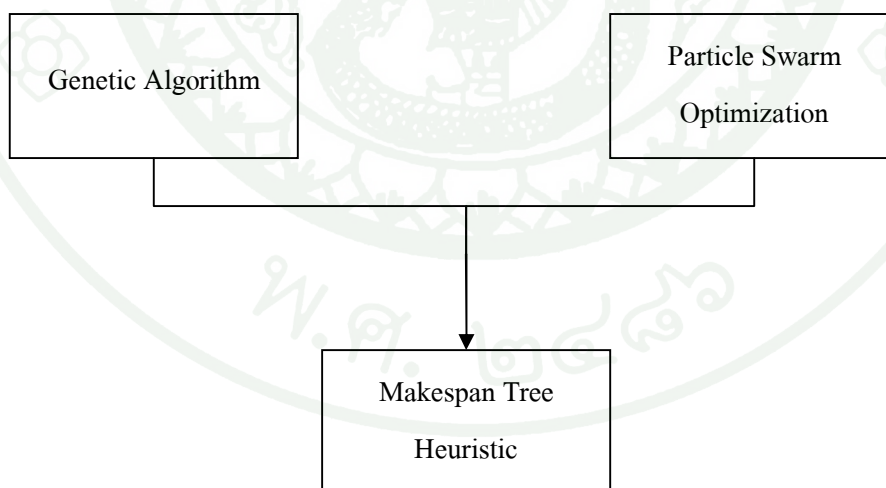
วิธีการดังกล่าวแตกต่างจาก วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกโดยทั่วไป เนื่องจาก วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกโดยทั่วไป เช่น กฎดิสแพชชิง จะยึดหลักการใดหลักการหนึ่งในการจัด โดยจะเลือกหลักการที่น่าจะส่งผลต่อสมการเป้าหมาย แต่วิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้จะวัดค่าผลลัพธ์กับสมการเป้าหมายโดยตรง และทำให้การเลือกแต่ละครั้งมีผลต่อสมการเป้าหมาย ส่งผลให้ในแต่ละครั้งของการจัดลำดับงานเกิดค่าสมการเป้าหมายหรือค่าเมคสเปนที่มีค่าเท่าเดิมหรือถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่าเดิมเสมอ

หลังจากนำเสนอ วิธีการในการจัดลำดับงานในแต่ละเครื่องจักรแล้ว ในส่วนถัดไปจะนำเสนอ วิธีการในการเลือกเครื่องจักร ซึ่งจะถูกนำมาใช้ร่วมกับวิธีการจัดเรียงลำดับที่ได้นำเสนอไว้แล้ว โดย ในส่วนของวิธีการเลือกเครื่องจักร จะนำเสนอ 2 วิธีเปรียบเทียบกันเพื่อดูว่าวิธีการใดได้คำตอบ ที่ดีกว่ากันเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวิธี MT

2. ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตแบบยืดหยุ่นตามงาน

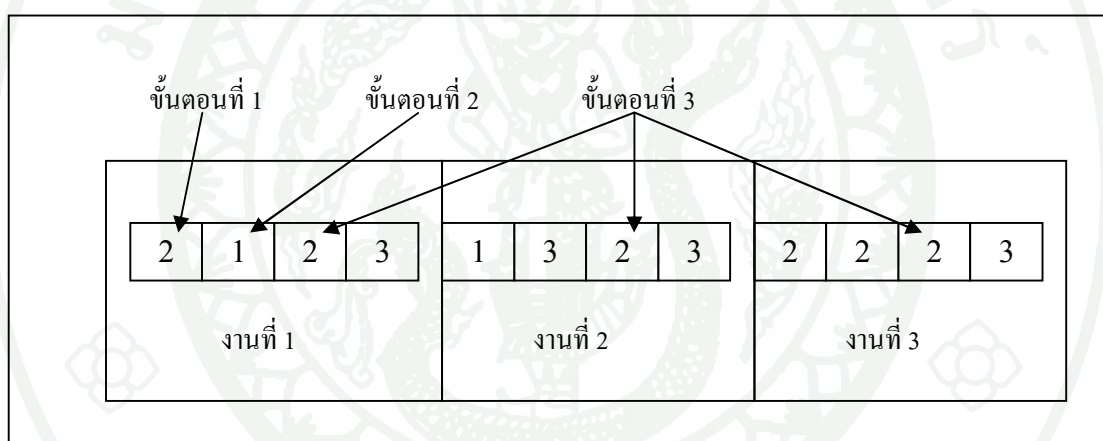
2.1 โครงสร้างของคำตอบที่ใช้ร่วมกัน

สำหรับขั้นตอนวิธีการถัดมาเป็นการกำหนดเครื่องจักรให้กับงานที่ต้องผลิตซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้ 2 ขั้นตอนวิธี คือ วิธี GA และ วิธี PSO แต่ก่อนนำเสนอ วิธี GA และ PSO งานวิจัยฉบับนี้ จะนำเสนอ ลักษณะของชุดคำตอบที่ใช้สำหรับการหาคำตอบซึ่งชุดคำตอบดังกล่าวเป็นจุดเชื่อมต่อ ระหว่าง 2 ขั้นตอนในการหาคำตอบ คือส่งผ่านข้อมูลการผลิตจาก GA และ PSO ไปยัง MT ซึ่งทั้ง วิธี GA และ PSO จะใช้รูปแบบของคำตอบในลักษณะเดียวกัน เพื่อง่ายต่อการส่งข้อมูลไปสู่วิธี MT ต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งมีรายละเอียดว่า เริ่มต้นจะเลือกวิธีใดวิธีหนึ่ง ระหว่าง GA และ PSO หลังจากนั้นข้อมูลจากการคำนวณจะถูกส่งไปยังวิธี MT เพื่อใช้ในการประมวลผลต่อไป



ภาพที่ 10 การส่งข้อมูลระหว่าง 2 ขั้นตอนการจัดลำดับงาน

ชุดคำตอบจะเป็นลักษณะของ ตัวแปรแถวลำดับ (Array) โดยการเรียงตำแหน่งของตัวแปรลำดับจะเรียงจาก งานหมายเลข 1 ในขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนสุดท้าย (ดูจากตำแหน่งการเรียงลำดับ โดยไม่เกี่ยวข้องกับตัวเลขที่บรรจุอยู่ภายใน) จากนั้นจะต่อด้วยงานหมายเลข 2 ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนสุดท้าย และจะเรียงลำดับงานไปเรื่อยๆ จนถึงงานสุดท้ายขั้นตอนสุดท้าย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 11 ส่วนข้อมูลตัวเลขที่บรรจุภายในแสดงถึงหมายเลขประจำเครื่องจักร เพื่อใช้ในการระบุเครื่องจักรให้แต่ละขั้นตอนของงาน เช่น จากภาพที่ 11 งานที่ 1 ในขั้นตอนที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2 หมายความว่า ขั้นตอนที่ 1 ของงานที่ 1 จะผลิตด้วยเครื่องจักรหมายเลข 2 แต่จะเป็นเครื่องหมายเลข 2 ของสถานีนงานใดนั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการผลิต เช่นถ้าขั้นตอนที่ 1 ของงานที่ 1 ต้องผลิตบนสถานีนงานกลึง นั่นหมายความว่า เลข 2 ในตัวแปรแถวลำดับหมายถึงเครื่องจักรหมายเลข 2 ของสถานีนงานกลึงนั่นเอง หลังจากกำหนดรูปแบบของชุดคำตอบแล้วขั้นตอนต่อมาจะกล่าวถึง วิธีการที่ใช้ในการหาคำตอบ โดยจะเริ่มกล่าวถึงวิธี GA และ PSO ตามลำดับ

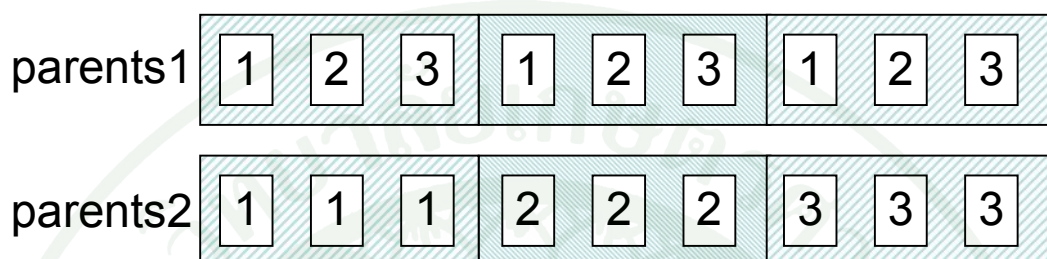


ภาพที่ 11 รูปแบบในการจัดเก็บข้อมูลของตัวแปรแถวลำดับสำหรับกำหนดเครื่องจักรให้กับงาน

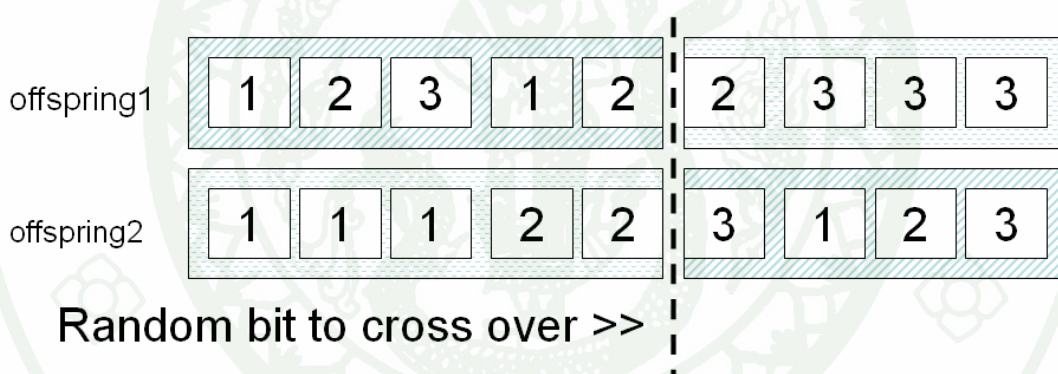
2.2 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมคอมพิวเตอร์ (Genetic Algorithm, GA)

วิธี GA เป็นวิธีในการค้นหาที่เลียนแบบพฤติกรรมทางธรรมชาติเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการดังกล่าวประกอบไปด้วย การรับทอด (Inheritance) การกลายพันธุ์ (Mutation) และการคัดเลือก (Selection) โดยการรับทอด คือการส่งผ่านจากรุ่นบรรพบุรุษไปยังรุ่นถัดไป การรับทอดเป็นการส่งผ่านข้อมูลจากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่ง ซึ่งจะใช้วิธีครอสโอเวอร์หรือการผสมพันธุ์ (Cross Over) การครอสโอเวอร์เป็นการนำคำตอบบางส่วนของพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์มาผสมกันเพื่อให้เกิดคำตอบใหม่ดังแสดงในภาพที่ 12 และ 13 โดยภาพที่ 12 เป็นตัวอย่างพ่อแม่พันธุ์ที่เลือกขึ้นมา

และ ภาพที่ 13 เป็นการตัดบางส่วนของพ่อพันธุ์มาผสมกับบางส่วนของแม่พันธุ์เพื่อสร้างทายาท ส่วนการกลายพันธุ์ เป็นการคงคำตอบเดิมไว้ แต่จะสลับบิตบางบิตในคำตอบเพื่อเปลี่ยนสถานะ การครอสโอเวอร์และการกลายพันธุ์จำเป็นต้องอาศัยการคัดเลือกพ่อพันธุ์แม่พันธุ์เสียก่อนจึงจะ นำมาผ่านกระบวนการทั้งสอง



ภาพที่ 12 สตริงของการระบุงานลงบนเครื่องจักร



ภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างการผสมพันธุ์

สำหรับการมิวเทต (Mutation) งานวิจัยฉบับนี้จะไม่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของ คำตอบ เนื่องจากต้องการให้คำตอบที่ปรับปรุงในแต่ละครั้งมีความแตกต่างจากคำตอบชุดเดิมให้มาก ซึ่งถ้าใช้การมิวเทตคำตอบจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับจุดจุดเดิมที่หาคำตอบ เนื่องจากการมิวเทตมี การสลับคำตอบให้ต่างจากเดิมเพียงเล็กน้อย ไม่ปฏิเสธว่าการมิวเทตจะมีความสำคัญในการปรับปรุง คำตอบแต่เนื่องจาก ในขั้นตอนการประเมินผลค่าฟิตเนสแต่ละครั้งต้องอาศัยเวลา ต้องมีการจัดลำดับ งานก่อน ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวคิดว่า คำตอบในการค้นหาแต่ละครั้ง ควรจะเปลี่ยนแปลงครั้งละ หลายๆ ส่วน เพื่อความคุ้มค่าในการประเมินค่าฟิตเนส ดังกล่าว

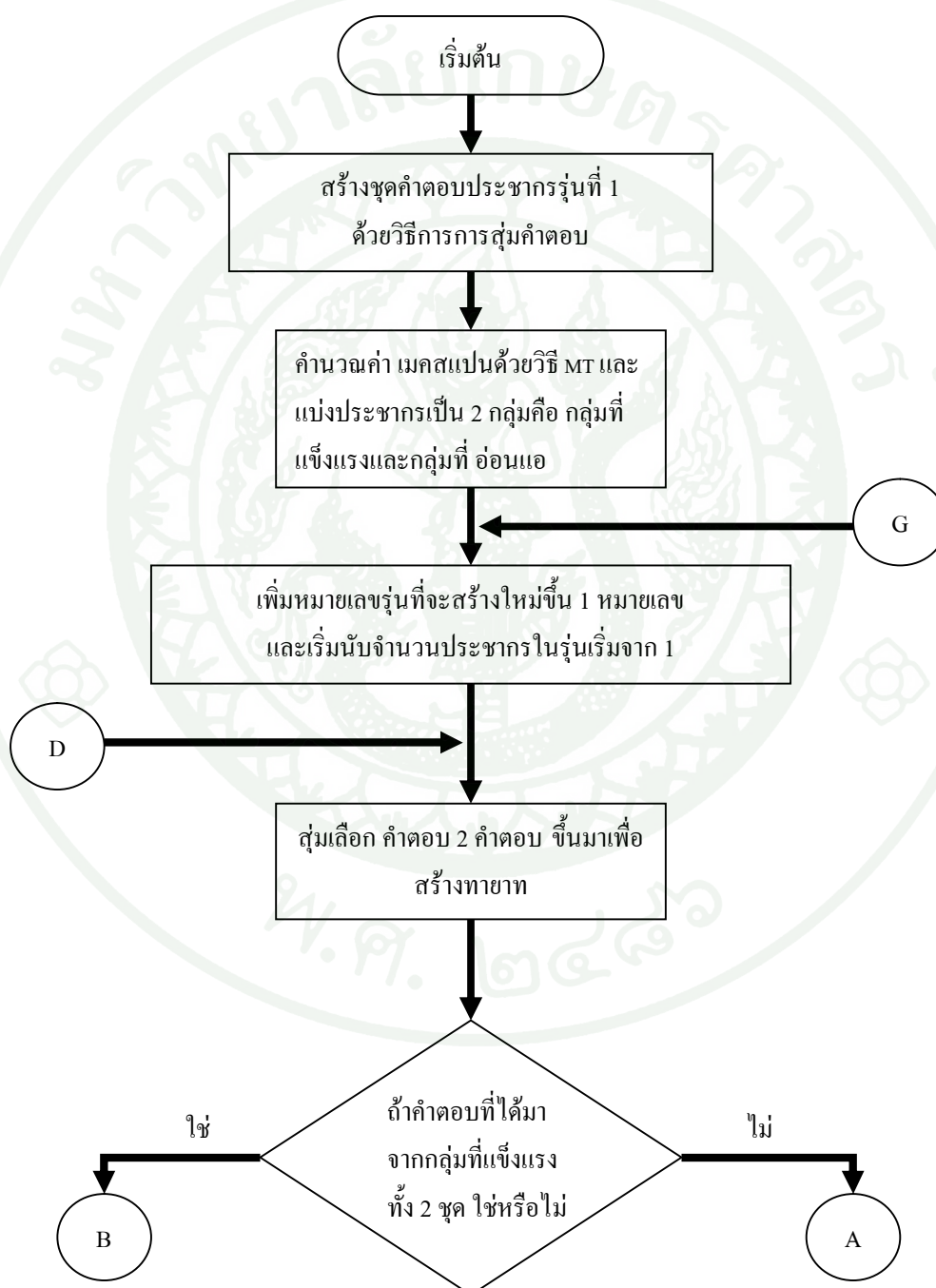
การคัดเลือก คือการเลือก จีโนม (Genomes) จากประชากรทั้งหมดเพื่อการสืบพันธุ์ ด้วย GA ประชากรของสตริง (String) ซึ่งเรียกว่า โครโมโซม (Chromosomes) หรือ จีโนไทป์ของจีโนม (Genotype of Genomes) จะถูกแปลงไปเป็น คำตอบที่นำมาพิจารณา (Candidate Solution) มักจะอธิบายในรูปไบนารี (Binary) หรืออาจจะเป็นตัวอักษรอื่นๆ ขึ้นอยู่กับการถอดรหัส เริ่มต้นประชากรจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีสุ่ม ในแต่ละรอบการวนซ้ำ (Iteration) ขั้นตอนวิธีจะทำการเลือกพ่อแม่พันธุ์ และแม่พันธุ์ด้วยวิธีการสุ่มแบบถ่วงน้ำหนัก โดยอาศัยค่าความแข็งแรง (Fitness) พ่อพันธุ์แม่พันธุ์ที่มีความแข็งแรง จะมีโอกาสถูกเลือกมากกว่าพ่อแม่พันธุ์ที่อ่อนแอ

ความแข็งแรงจะถูกประเมินจากคุณภาพของคำตอบ (Fitness) ซึ่ง ค่าความแข็งแรงอาจคำนวณจากสมการเป้าหมายหรือฟังก์ชันการประมาณ (Evaluation Function) เช่นในการจัดตารางการผลิตที่ต้องการค่าเมคสเปนต่ำสุด จะใช้ค่าเมคสเปนเป็นค่าความแข็งแรงเป็นต้น ทายาทรุ่นถัดไปจะเกิดขึ้นจากการครอสโอเวอร์และการกลายพันธุ์ในการวนซ้ำเพื่อสร้างชุดคำตอบในรอบถัดไป (Next Iteration) ของวิธีการทาง GA โดยทั่วไปขั้นตอนวิธีจะจบการทำงานเมื่อครบตามจำนวนรอบที่ระบุไว้ หรือได้ค่าฟิตเนสตามที่ต้องการแล้ว

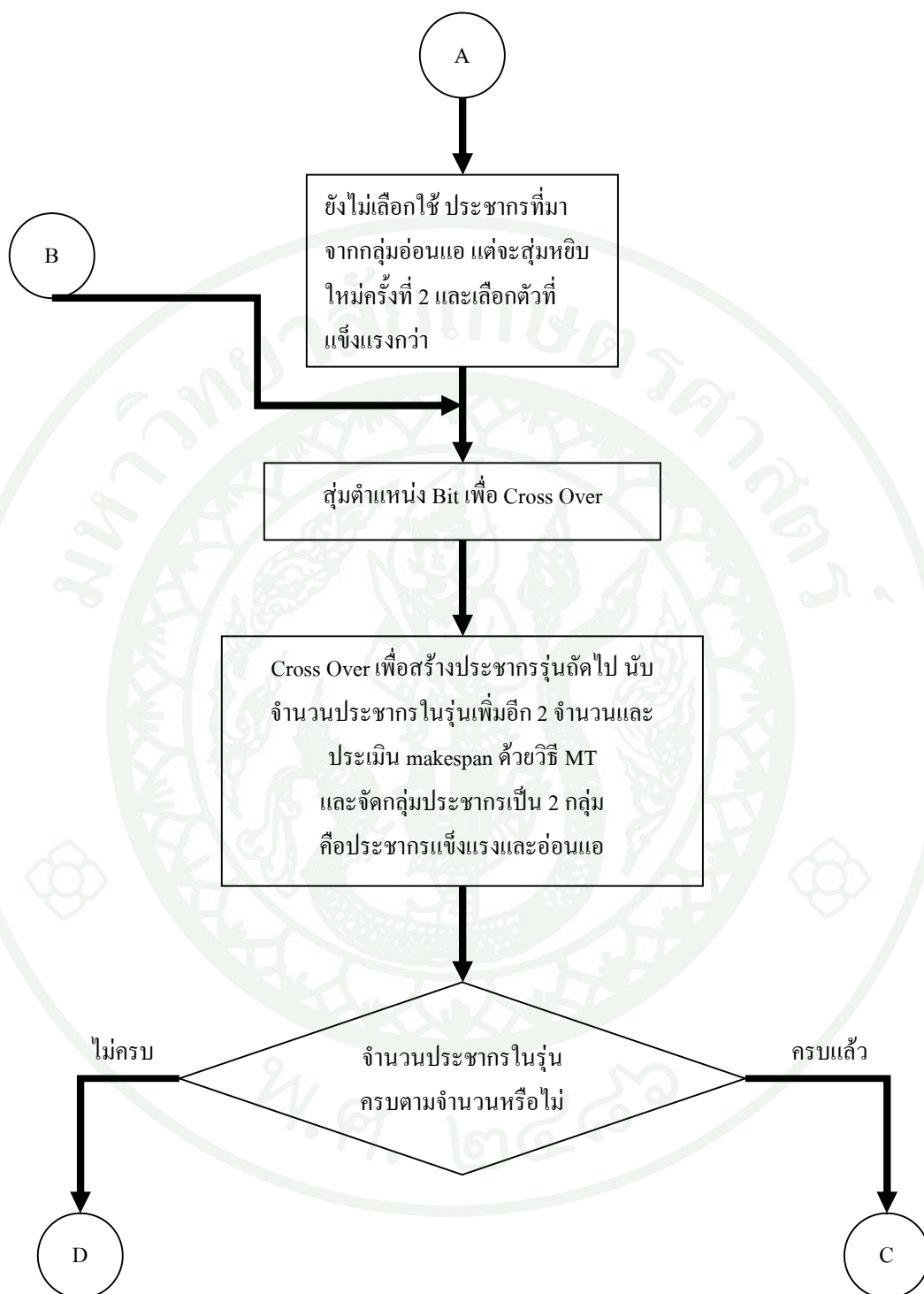
ในงานวิจัยฉบับนี้ จะปรับปรุงวิธี GA เพื่อให้เหมาะสมกับการนำมาใช้ร่วมกับ วิธี MT โดยเริ่มจากสุ่มสร้างชุดคำตอบในกลุ่มแรกมาเป็นพ่อแม่พันธุ์ จากนั้นจะสุ่มเลือกพ่อแม่พันธุ์แม่พันธุ์ขึ้นมาเพื่อสร้างทายาทรุ่นถัดไป โดยพ่อแม่พันธุ์แม่พันธุ์ที่มีความแข็งแรงสูงจะมีโอกาสถูกเลือกมากกว่า สำหรับ GA ในงานวิจัยฉบับนี้จะให้โอกาสกับพ่อแม่พันธุ์ที่แข็งแรงมีโอกาสสร้างทายาทมากกว่า โดยในขั้นตอนการเลือกคำตอบเพื่อสร้างทายาทรุ่นถัดไป ถ้าคำตอบที่ถูกเลือกมีความแข็งแรงสูง (ให้คำตอบที่ดี) คำตอบนั้นจะถูกเลือกเพื่อใช้งานทันที แต่ในทางกลับกันถ้าคำตอบที่ถูกเลือก (พ่อแม่พันธุ์) มาจากกลุ่มที่อ่อนแอ ขั้นตอนวิธี GA จะทำการสุ่มซ้ำอีกรอบหนึ่งเพื่อทำการเลือกใหม่ ถ้าคำตอบใหม่ที่สุ่มขึ้นมาเกิดจากกลุ่มที่อ่อนแอเป็นครั้งที่ 2 ขั้นตอนวิธีการนี้จึงจะยอมให้พ่อแม่พันธุ์ที่อ่อนแอถูกนำไปสร้างทายาท ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กลุ่มที่อ่อนแอมีโอกาสสืบทอดไปยังรุ่นต่อไปน้อยกว่ากลุ่มที่แข็งแรง

การทำลายพ่อแม่พันธุ์แม่พันธุ์มีประโยชน์ในการลดหน่วยความจำที่นำมาใช้งาน ซึ่งวิธี GA มักจะใช้หน่วยความจำเยอะกว่าวิธีอื่นๆ และจะเยอะขึ้นเรื่อยๆ ในงานวิจัยฉบับนี้ทำลายพ่อแม่พันธุ์แม่พันธุ์โดยใช้หลักการเดียวกันกับการผสมพันธุ์ แต่ตรงกันข้ามตรงที่วิธีการเลือก ถ้าคำตอบที่สุ่มขึ้นมาทำลายมาจากกลุ่มที่อ่อนแอ คำตอบก็就会被ทำลายทันที แต่ถ้าคำตอบมาจากกลุ่มที่แข็งแรง ตัวต่อมาจะสุ่มอีกครั้งเพื่อเลือกขึ้นมาใหม่ ถ้ายังคงอยู่ในกลุ่มที่แข็งแรง ประชากรตัวที่อ่อนแอจะถูกทำลาย

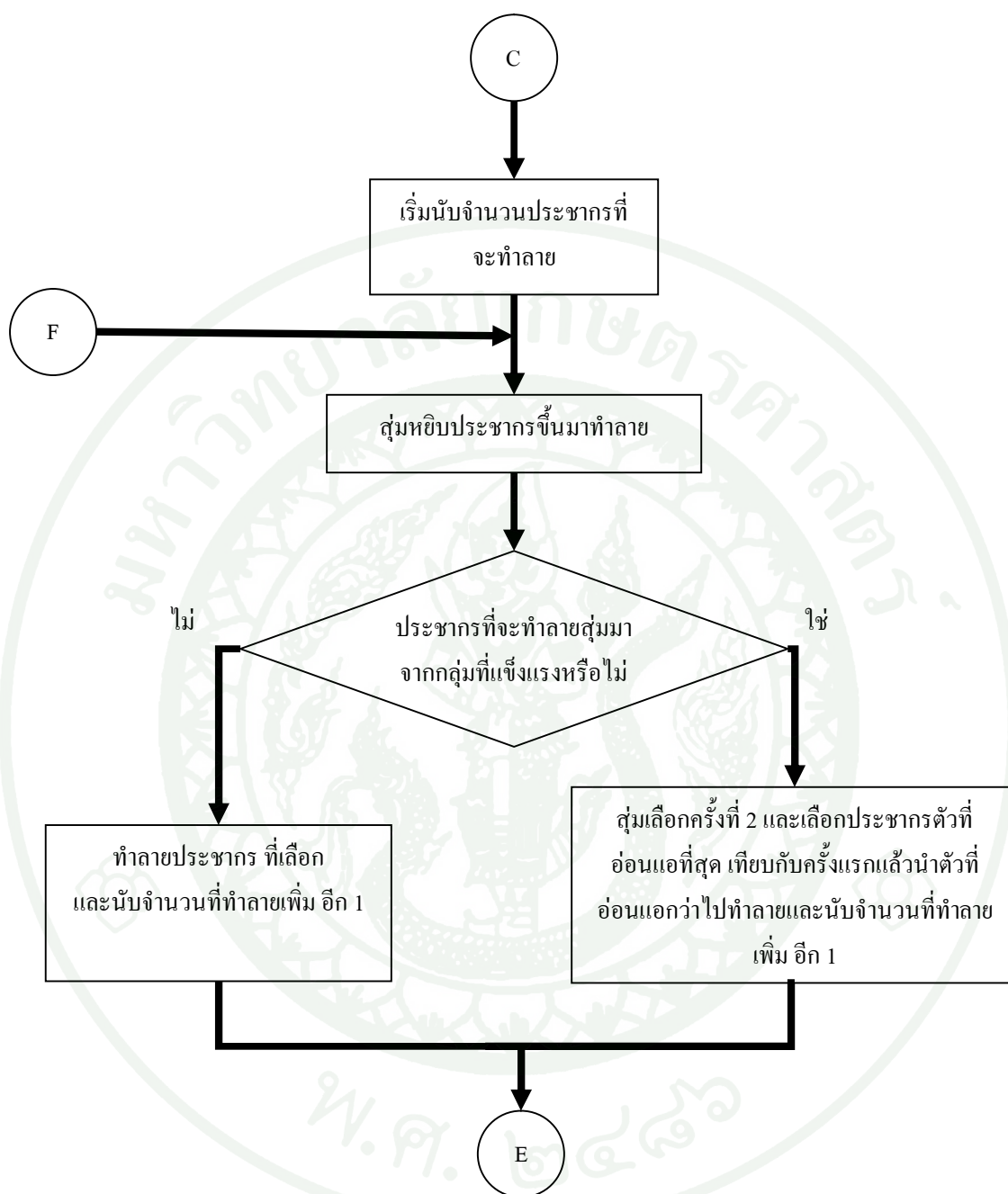
ในงานวิจัยฉบับนี้การครอสโอเวอร์จะทำการสุ่มบิตที่ต้องการจะตัดเพื่อสลับขึ้นมาหนึ่งค่า แล้วทำการสลับ ในการครอสโอเวอร์แต่ละครั้ง บิตจะถูกสุ่มแล้วสลับใหม่ทุกครั้ง ดังนั้นในแต่ละคู่ที่นำมาครอสโอเวอร์ในทุกๆ ครั้ง บิตที่สลับจะแทบไม่ซ้ำกันเลยเพราะใช้วิธีการสุ่มเพื่อสลับการครอสโอเวอร์ จะทำการสลับเพื่อผสมโครโมโซมเพื่อให้เกิดรุ่นถัดไป (Offspring) การสลับโครโมโซมในตำแหน่งใดนั้นจะเลือกโดยวิธีการสุ่ม เมื่อสุ่มเลือกบิตที่ต้องการจะสลับคู่ระหว่างพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการสลับ เพื่อให้เกิดทายาทรุ่นถัดมา



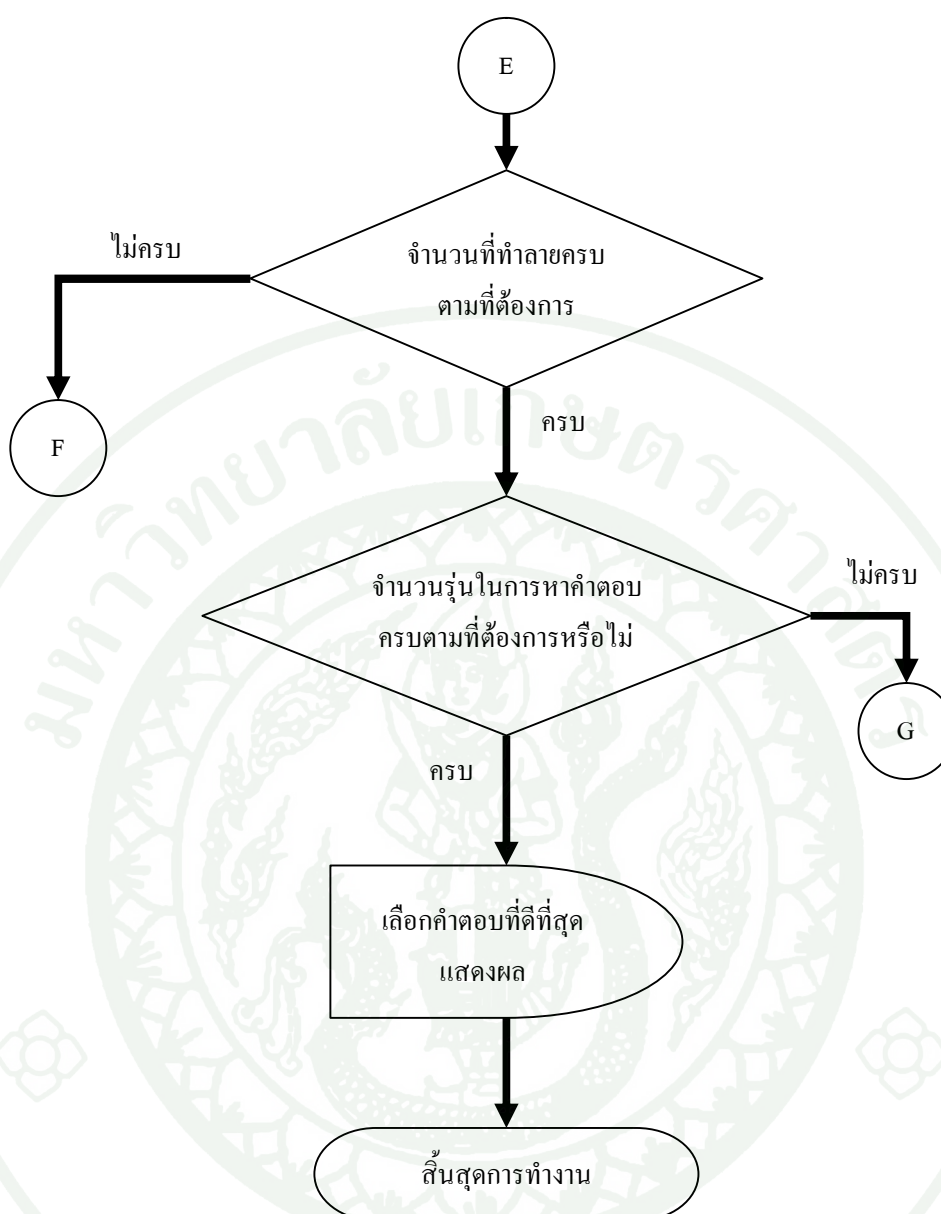
ภาพที่ 14 ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 1



ภาพที่ 15 ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 2



ภาพที่ 16 ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 3



ภาพที่ 17 ผังงานขั้นตอนวิธี GA ส่วนที่ 4

ภาพที่ 14 แสดงผังงานของวิธี GA เริ่มแรกจะสร้างชุดข้อมูลของคำตอบเริ่มต้นขึ้นมาเสียก่อน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ชุดคำตอบเริ่มต้นทั้งหมด 50 ชุดข้อมูล ขั้นตอนต่อมาข้อมูลทั้ง 50 จะถูกคำนวณค่าเมคสแปนโดยอาศัยวิธีเมคสแปนทรี หลังจากนั้น จะแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ แข็งแรงและกลุ่มที่อ่อนแอ โดยมีเกณฑ์การแบ่งคือ นำค่าเมคสแปนที่ดีที่สุด บวกค่าเมคสแปนที่น้อยที่สุด แล้วหารด้วย 2 หลังจากนั้นจะจัดกลุ่มโดยดูจากค่าเฉลี่ยดังกล่าว ถ้าค่าเมคสแปนน้อยกว่าค่ากึ่งกลาง ข้อมูลดังกล่าวจะถูกจัดเข้าไว้ในกลุ่มที่แข็งแรง แต่ถ้าค่าเมคสแปนที่ได้มากกว่าค่ากึ่งกลาง ข้อมูลดังกล่าวจะถูกจัดเข้าไว้ในกลุ่มที่อ่อนแอ หลังจากนั้นจะเริ่มสร้างทายาทรุ่นถัดมา โดยจะเริ่มนับ

ประชากรของทายาทรุ่นถัดมาตั้งแต่ 1 เป็นต้นไป หลังจากนั้นจะสุ่มเลือก ประชากรที่มีอยู่ขึ้นมาเป็น พ่อพันธุ์แม่พันธุ์ที่ใช้ในการสร้างรุ่นถัดไป โดยจะสุ่มเลือกทั้งหมด 2 จำนวน หลังจากนั้นจะตรวจสอบ พ่อพันธุ์แม่พันธุ์ทั้ง 2 ข้อมูล ถ้าพ่อพันธุ์แม่พันธุ์มาจากข้อมูลชุดที่แข็งแรง ทั้งพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ จะถูกนำมาใช้ในการสร้างทายาทได้ทันที ในทางกลับกันถ้าพ่อแม่พันธุ์มาจากชุดข้อมูลที่อ่อนแอ เช่นถ้าพ่อพันธุ์มาจากข้อมูลชุดที่อ่อนแอ ในกรณีนี้จะสุ่มเลือกข้อมูลขึ้นมาใหม่เพื่อใช้แทนพ่อพันธุ์ ที่อ่อนแอ โดยถ้าข้อมูลใหม่มีความแข็งแรงมากกว่าจะใช้ข้อมูลใหม่แทน แต่ถ้าข้อมูลเดิมแข็งแรงกว่า จะใช้ข้อมูลของพ่อพันธุ์เดิม ในทำนองเดียวกันจะใช้เกณฑ์นี้ในการเลือกแม่พันธุ์ด้วย

ภาพที่ 15 แสดงรายละเอียดในส่วนที่ 2 ของวิธี GA โดยหลังจากได้พ่อพันธุ์แม่พันธุ์แล้ว ขั้นตอนต่อมาจะสุ่มเลือกตำแหน่งที่ทำการ คrossover โดยในการ crossover แต่ละครั้ง จะมีการ สุ่มเลือกตำแหน่งใหม่เสมอ หลังจากนั้นจะทำการ crossover เพื่อสร้างทายาทใหม่ ซึ่งจะได้ทายาท รุ่นถัดไปของชุดคำตอบ ครั้งละ 2 ข้อมูล และทั้ง 2 ข้อมูลดังกล่าว จะถูกนำไปคำนวณ fitness ด้วย วิธี MT และถูกจัดกลุ่มเข้าสู่กลุ่มที่อ่อนแอ และกลุ่มที่แข็งแรงต่อไป หลังจากนั้นจะตรวจสอบว่า จำนวนทายาทที่สร้างขึ้นใหม่ครบตามจำนวนที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้กำหนดทายาท แต่ละรุ่นไว้ที่ 50 ข้อมูล ในกรณีที่ยังไม่ครบ 50 ข้อมูล ขั้นตอนต่อไปก็จะดำเนินการเลือกพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์เพื่อสร้างทายาทต่อไป เมื่อได้ทายาทครบแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการทำลาย ประชากรเพื่อลด จำนวนข้อมูลคำตอบที่ด้อยคุณภาพต่อไป ซึ่งรายละเอียดการทำลายแสดงไว้ในภาพที่ 16 เริ่มต้นจากการเริ่มนับจำนวนประชากรที่จะทำลายทิ้ง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ จะทำลายรอบละ 15 ข้อมูลต่อ 1 รอบ โดยจะสุ่มหยิบข้อมูลขึ้นมาทำลาย ข้อมูลที่สุ่มขึ้นมา ถ้ามาจากกลุ่มที่อ่อนแอ จะถูกทำลายทันที แต่ถ้ามาจากกลุ่มที่แข็งแรง จะสุ่มหยิบขึ้นมาอีก 1 รอบ และเลือกทำลายข้อมูลที่อ่อนแอกว่า โดย เทียบจากค่า fitness ของข้อมูลแต่ละชุด เมื่อทำลายแล้วจะนับจำนวนข้อมูลที่ทำลาย ดังภาพที่ 17 หลังจากนั้นจะตรวจนับข้อมูลที่ทำลาย ถ้าครบตามจำนวนก็จะออกจากขั้นตอนการทำลายทันที และ เข้าสู่การตรวจนับจำนวนรุ่นในการหาคำตอบต่อไป โดยถ้าจำนวนรุ่นยังสร้างไม่ครบตามที่กำหนดไว้ ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างทายาทรุ่นถัดไป แต่ถ้ากรณีที่สร้างครบตามจำนวนที่กำหนดแล้ว ก็จะนำ คำตอบที่ดีที่สุดมาแสดงผล และออกจากขั้นตอนวิธีการหาคำตอบ ภาพที่แสดง 19 แสดงรายละเอียด ของ pseudo code ของวิธี GA ที่ใช้งานร่วมกับ วิธี MT ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- | | |
|-------------|--|
| บรรทัดที่ 1 | เริ่มต้นการทำงานด้วยการสุ่มสร้างชุดคำตอบชุดแรกขึ้นมาเป็นพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ จำนวนหนึ่งกลุ่ม และคำนวณค่า fitness โดยใช้ MT |
| บรรทัดที่ 2 | กำหนดจำนวนรุ่น (Generation) เริ่มต้น เพื่อจะทำการนับจำนวนรุ่น |
| บรรทัดที่ 3 | ตรวจสอบจำนวนครั้งของการวนซ้ำในการหาคำตอบ |

บรรทัดที่ 4	นับจำนวนการวนซ้ำเพิ่ม 1 ครั้ง
บรรทัดที่ 5	กำหนดให้จำนวนทายาทที่จะสร้างใหม่ในแต่ละรุ่น เริ่มนับจากเลข 0
บรรทัดที่ 6	นับจำนวนทายาทที่สร้างขึ้นว่าครบตามจำนวนที่ต้องสร้างแล้วหรือไม่ ถ้าครบตามจำนวนก็จะออกจาก วงรอบการวนซ้ำเพื่อสร้างทายาท
บรรทัดที่ 7	นับทายาท เพิ่มขึ้น ครั้งละ 2 จำนวน ในทุกๆรอบ
บรรทัดที่ 8	สุ่มเลือก 2 คำตอบเพื่อใช้เป็น พ่อพันธุ์แม่พันธุ์
บรรทัดที่ 9	ตรวจสอบว่าพ่อพันธุ์แม่พันธุ์มาจากสายพันธุ์ที่แข็งแรงหรือไม่ ในกรณีที่แข็งแรงจะเข้าสู่บรรทัดที่ 10 ถ้าไม่แข็งแรง จะเข้าสู่บรรทัดที่ 12 โดยระบบจะบริหารจัดการ กับพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ทั้ง 2 ตัวโดยจะนำมาบริหารจัดการครั้งละ 1 ตัว
บรรทัดที่ 10	เป็นการตัดสินใจเลือกพ่อพันธุ์แม่พันธุ์เพื่อสร้างทายาทรุ่นถัดไป
บรรทัดที่ 12	เป็นการสุ่มเลือกพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ขึ้นมาใหม่ และจะเลือกพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ที่แข็งแรงที่สุดระหว่าง พ่อพันธุ์แม่พันธุ์ตัวเก่าและตัวใหม่ที่เพิ่งเลือกขึ้นมาเพื่อใช้ สร้างทายาท
บรรทัดที่ 14	สุ่มเลือกตำแหน่งสำหรับการทำการ Crossover
บรรทัดที่ 15	ทำการ คrossover
บรรทัดที่ 16	คำนวณค่า ความแข็งแรงของทายาท โดยใช้ MT
บรรทัดที่ 18	กำหนดจำนวนประชากรที่จะทำลายในแต่ละรอบ เริ่มจาก 0
บรรทัดที่ 19 และ 20	ตรวจนับ จำนวนประชากรที่ถูกทำลาย ว่าครบแล้วหรือไม่
บรรทัดที่ 21	สุ่มประชากรขึ้นมาเพื่อทำลาย ครั้งละ 1 คำตอบ
บรรทัดที่ 22	ตรวจสอบว่าตัวที่จะทำลายทั้งมีความแข็งแรงหรือไม่ ถ้าไม่แข็งแรงจะไปยังบรรทัดที่ 25 แต่ถ้าแข็งแรง จะไปยังบรรทัดถัดไป
บรรทัดที่ 23	กรณีที่ประชากรแข็งแรงจะสุ่ม หยิบขึ้นมาอีกครั้ง และเลือกตัวที่อ่อนแอกว่านำไปทำลาย
บรรทัดที่ 25	ทำลายประชากรที่เลือก
บรรทัดที่ 27	เครื่องหมายสิ้นสุด รูปการทำลายข้อมูล
บรรทัดที่ 28	เครื่องหมายสิ้นสุด รูปของการวนซ้ำเพื่อพัฒนาคำตอบ

Genetic algorithm with Makespan heuristic

- (1) Create initial solutions and use MT to calculate fitness value
- (2) $b_t = 0$
- (3) Do while $b_t < \text{limited of iteration}$
- (4) $b_t = b_t + 1$
- (5) $b_n = 0$
- (6) Do while $b_n < \text{limited number of new solution}$
- (7) $b_n = b_n + 2$
- (8) Randomly choosing two parents from population
- (9) If parents are high fitness value then
- (10) Choosing them to create 2 offspring solution
- (11) Else
- (12) Randomly again and choose the strong solution to parent
- (13) End if
- (14) Random bit of solution to crossover procedure
- (15) Crossover to create new solution
- (16) Calculate fitness value by makespan tree heuristic
- (17) Loop
- (18) $b_d = 0$
- (19) Do while $b_d < \text{number to destroy}$
- (20) $b_d = b_{d+1}$
- (21) Random solution from population to destroy
- (22) If solution is strong then
- (23) Random solution again and select weak solution to destroy
- (24) Else
- (25) Destroy solution
- (26) End if
- (27) Loop
- (28) Loop

ภาพที่ 18 ภาษาเทียมสำหรับวิธี GA ที่ใช้ร่วมกับ วิธี MT ในการแก้ปัญหา

2.3 ขั้นตอนวิธีพาดิเคิลสวอม

PSO เป็นเทคนิคการหาคำตอบที่สร้างขึ้นโดย Kenedy ในปี 1995 หลักการพัฒนามาจากธรรมชาติในการหาอาหารของ สวอม (Swarm) ที่อาศัยกันอยู่เป็นฝูง โดยแต่ละตัวมีความเร็วและมีประสิทธิภาพของตนเอง และมีการสื่อสารกันระหว่างสมาชิกในฝูง แต่ละตัวเรียกว่า พาดิเคิล (Particle) ซึ่งแต่ละพาดิเคิลจะบินอยู่ในปริภูมิคำตอบ (Solution Space) เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimal Solution) วิธี PSO เป็นการจำลองพฤติกรรมของสวอมเพื่อใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยอาศัยพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารของพาดิเคิล

ขั้นตอนวิธี PSO เริ่มจากการสุ่มตำแหน่งของพาดิเคิลแต่ละตัวซึ่งก็คือ คำตอบของปัญหา (Candidate Solution) พาดิเคิลแต่ละตัวจะบินค้นหาคำตอบในอาณาบริเวณของการค้นหา โดยมีการปรับเปลี่ยนทิศทางและความเร็ว แต่ละตัวให้สอดคล้องกับประสิทธิภาพของมัน แต่ละตัวจะบินอยู่ตามจุดต่างๆซึ่งอธิบายโดย $X_b = (x_{b,1}, x_{b,2}, \dots, x_{b,d})$ โดยที่อัตราการบินเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของพาดิเคิลอธิบายโดย $V_b = (v_{b,1}, v_{b,2}, \dots, v_{b,d})$ แต่ละรอบในการค้นหาคำตอบ พาดิเคิลจะเคลื่อนที่โดยได้รับอิทธิพลจาก 2 ค่า คือ ค่าที่เหมาะสมที่พาดิเคิลแต่ละตัวที่ค้นพบเอง (P best, P_i) และค่าที่เหมาะสมที่ทั้งกลุ่มค้นพบ (G best, P_g) ในแต่ละรอบที่ทำการค้นหาพาดิเคิลแต่ละตัวจะบินด้วยสมการดังต่อไปนี้

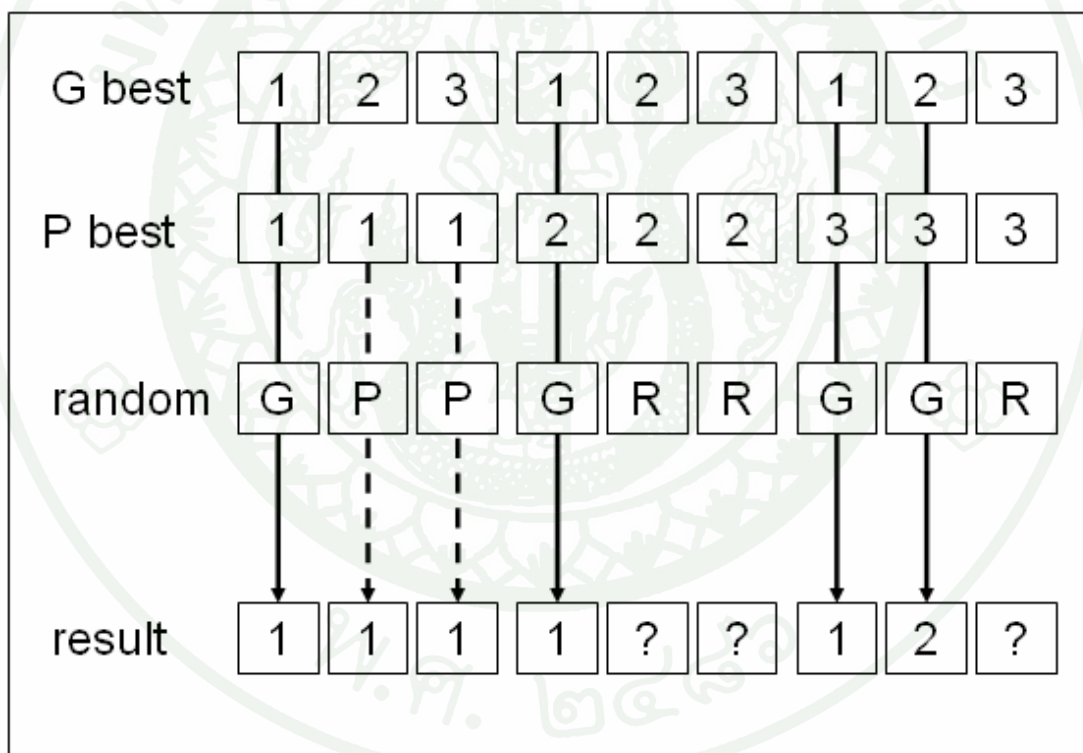
$$V_{bd} = w \times v_{bd} + c_1 \times \text{rand}() \times (p_{id} - x_{bd}) + c_2 \times \text{rand}() \times (p_{gd} - x_{bd}) \quad (22)$$

$$X_{bd} = x_{bd} + v_{bd} \quad (23)$$

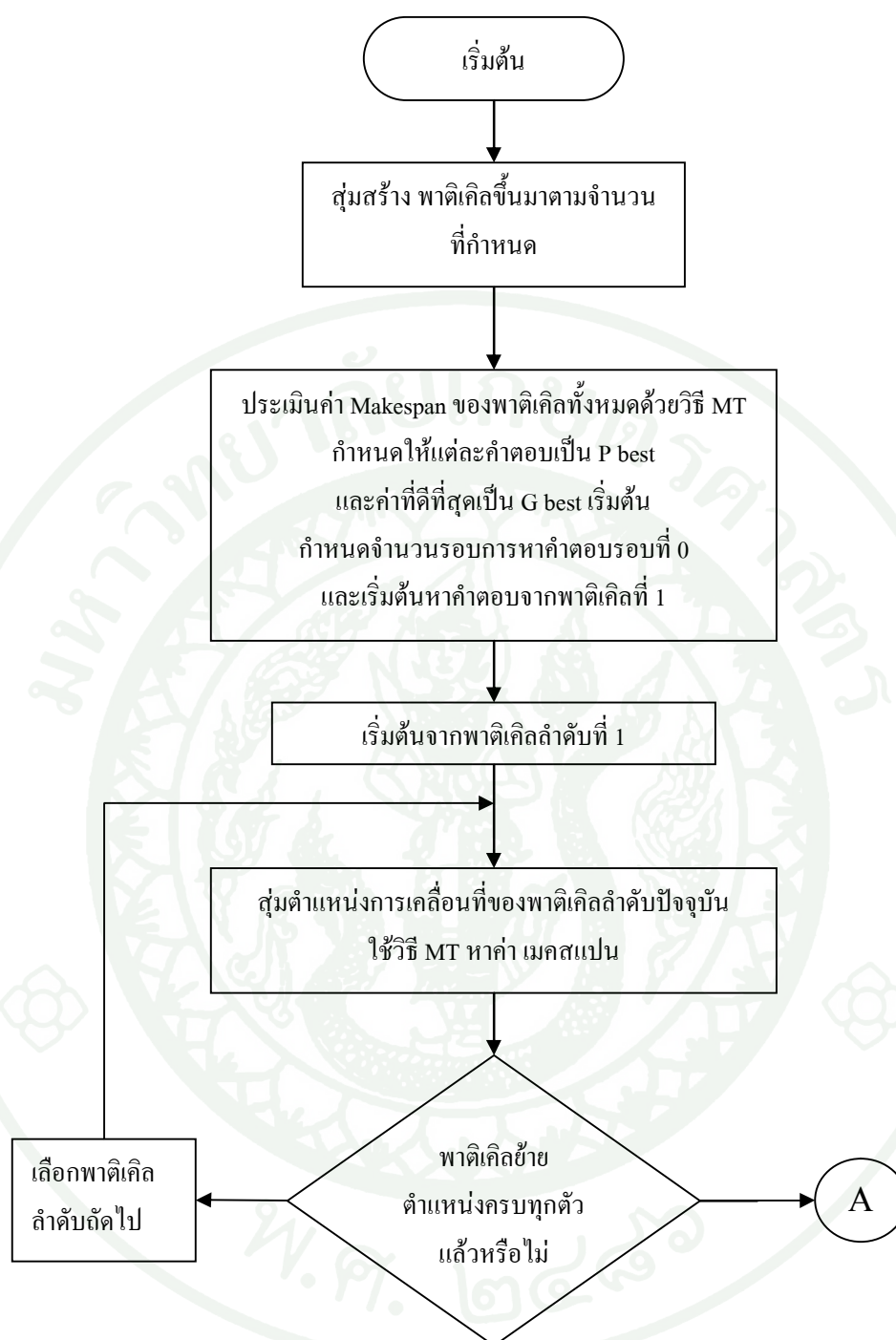
โดยที่ w คือน้ำหนักที่ใช้ควบคุมความเร็วของพาดิเคิล เพื่อใช้ควบคุมไม่ให้พาดิเคิลเคลื่อนที่เร็วหรือช้าเกินไป โดยการเคลื่อนที่จะได้รับอิทธิพลจาก P best และ G best นอกจากนี้ c_1 และ c_2 คือค่าคงที่เพื่อใช้ถ่วงน้ำหนักในการควบคุมค่าทางสถิติ (Rand) ที่ใช้ควบคุมระยะห่างระหว่างตำแหน่งของพาดิเคิลจากค่า P best และ G best สำหรับสมการที่ 15 ใช้เพื่อปรับปรุงคำตอบหรือตำแหน่งของพาดิเคิล

งานวิจัยฉบับนี้ปรับปรุง PSO ให้เหมาะกับ MT โดยหลักการที่ใช้คือใช้ชุดโครงสร้างของคำตอบในลักษณะเดียวกับชุดคำตอบของวิธี GA มีสตริงของ G best และ สตริงของ P best ในปัญหาดังกล่าว G best แทนการมอบหมาย ซึ่งประกอบไปด้วย งานให้เครื่องจักรที่ให้ค่าเมคสแปน

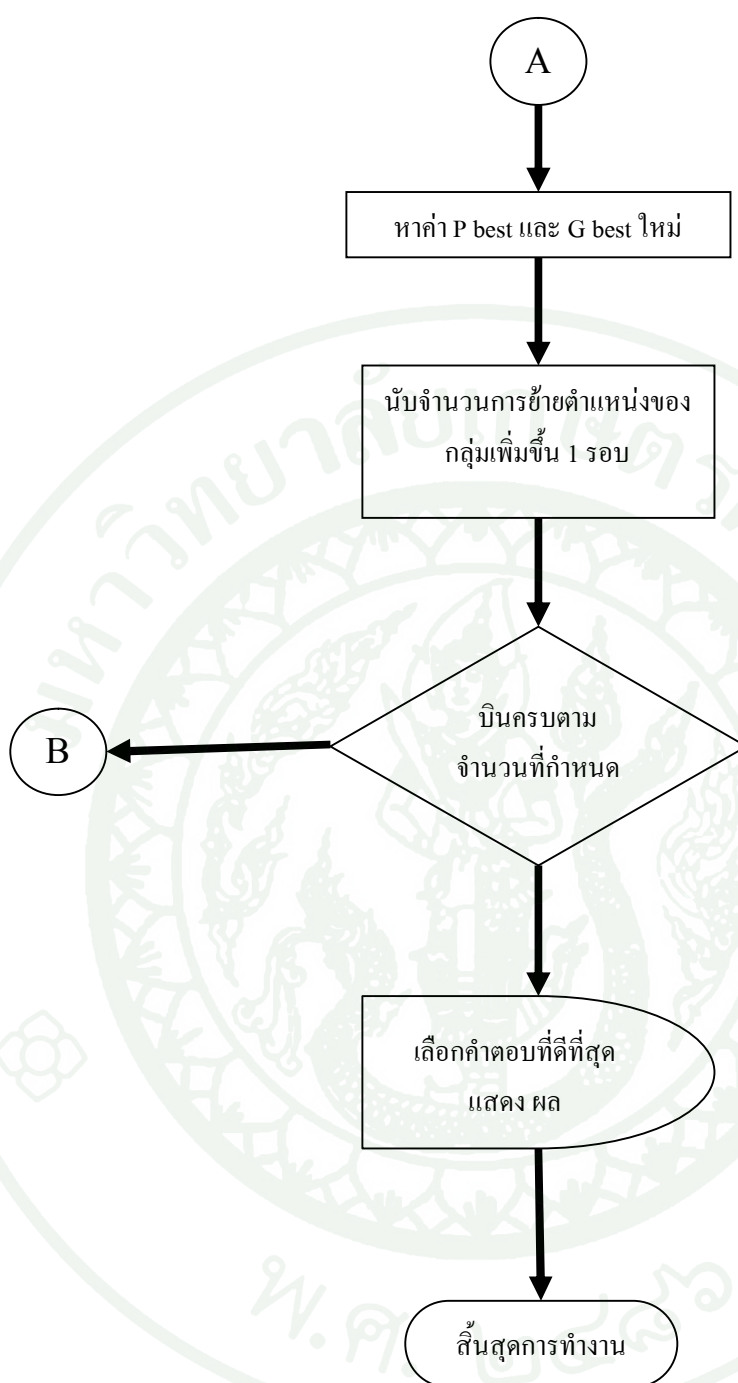
ค่าที่ดีที่สุดพบโดยกลุ่ม และ P best แทนการมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรที่ค่าที่สุดของพาดิเคิล การเคลื่อนที่ของพาดิเคิลแต่ละตัว ได้รับอิทธิพลจาก G best และ P best และ ค่าจากการสุ่มของพาดิเคิลแต่ละตัว ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ จึงมีการปรับเปลี่ยนคำตอบแต่ละครั้ง ขึ้นอยู่กับ 3 ค่าดังกล่าว โดยตัวดำเนินการจะทำการสุ่ม อักษร 3 ตัวอักษรคือ G, P และ R เพื่อเลือกวิธีการในแต่ละบิตของคำตอบ โดยมีโอกาสเท่าๆกันดังแสดงในภาพที่ 19 ถ้าบิตที่ 1 ของคำตอบ สุ่มได้อักษร G จะนำค่า ในบิตที่ 1 ของ G best มาเป็นค่าในบิตที่ 1 ของคำตอบใหม่ (ตำแหน่งการบินของพาดิเคิล) หลังจากนั้นในบิตที่ 2 เมื่อสุ่มได้เลข P จะเลือกค่าในบิตที่ 2 ของ P best ในบิตที่ 3 สุ่มได้อักษร P ดังนั้นในบิตที่ 3 ของคำตอบใหม่จะใช้ค่าจากบิตที่ 3 ของ P best บิตสุดท้ายสุ่มได้อักษร R ตัวดำเนินการจะสุ่มตัวเลขขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในบิตนั้น เช่นสุ่มได้เลข 3 ก็หมายความว่า บิตสุดท้ายจะใช้เครื่องจักรหมายเลข 3 ของสถานี



ภาพที่ 19 ตัวอย่างการสร้างคำตอบใหม่สำหรับวิธี PSO ที่ใช้ร่วมกับ MT



ภาพที่ 20 ฟังงานขั้นตอนวิธี PSO ส่วนที่ 1



ภาพที่ 21 ขั้นตอนวิธี PSO ส่วนที่ 2

ภาพที่ 20 อธิบายขั้นตอนวิธีพาทิเคิลสวอม เริ่มต้นจากการสุ่มชุดคำตอบขึ้นมาก่อน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะสุ่มพาทิเคิลทั้งหมด 8 ข้อมูล หลังจากนั้น ทั้ง 8 ข้อมูลจะถูกนำไปหาค่าเมคสแปนด้วยวิธี MT ข้อมูลแต่ละพาทิเคิลจะทำหน้าที่เป็น P best ของแต่ละพาทิเคิล และข้อมูลที่ดีที่สุดจะเป็นค่า G best หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการค้นหาคำตอบในรอบถัดไป โดยจะสุ่มตำแหน่ง

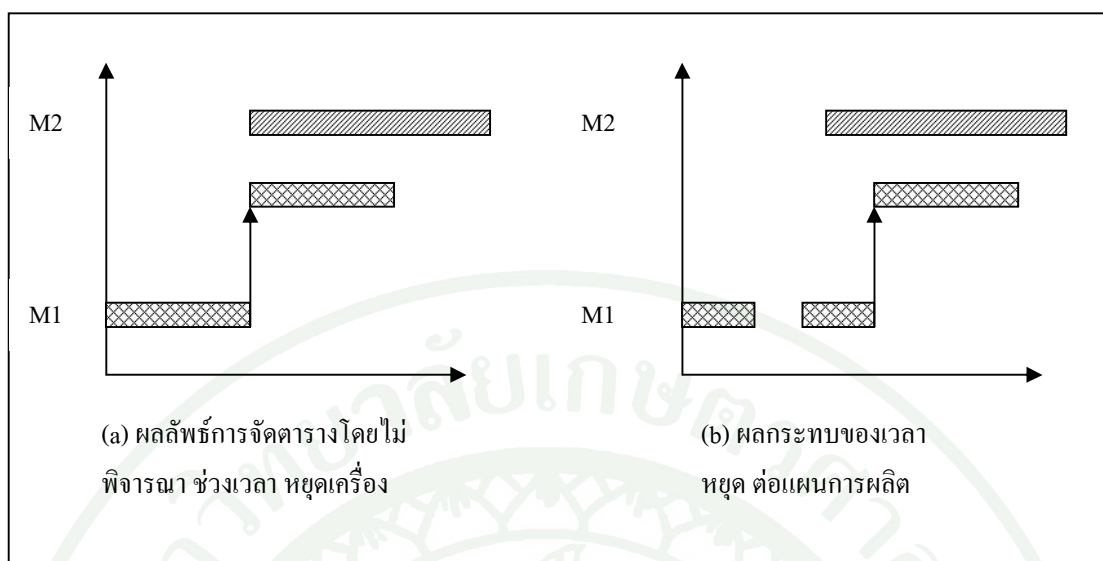
การเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่จะได้รับอิทธิพลจาก G best และ P best สำหรับการหาคำตอบในรอบถัดไป แต่ละบิตจะถูกสุ่มขึ้นมาด้วยค่า 3 ค่าคือ 1, 2 , และ 3 ถ้าสุ่มได้ 1 จะนำค่าในบิตนั้นจาก G best มาใช้ ถ้าสุ่มแล้วได้ 2 จะนำค่าจาก P best มาใช้ และกรณีสุดท้ายถ้าสุ่มได้ 3 บิตดังกล่าวจะเป็นอิสระจาก G best และ P best คือ จะสุ่มตัวเลขขึ้นมาใหม่เพื่อใช้เป็นค่าในบิตดังกล่าวเลย การหาตัวเลขมาเติมในแต่ละบิต จะดำเนินการครั้งละ 1 บิต จนกระทั่งทุกๆบิตของคำตอบหรือของพาดิเคิลได้ถูกดำเนินการเรียบร้อยแล้ว เมื่อเสร็จพาดิเคิลแรก แล้วจะทำการปรับปรุงค่าพาดิเคิลถัดไป จนครบทั้ง 8 พาดิเคิล เมื่อทั้ง 8 พาดิเคิลปรับปรุงค่าเรียบร้อยแล้ว ก็จะถือว่าเป็นการค้นหาคำตอบครบ 1 รอบ เมื่อครบ 1 รอบ จะทำการกำหนดค่า G best และ P best ใหม่ และเริ่มปรับปรุง การบินของพาดิเคิลเพื่อค้นหาคำตอบในรอบถัดไป ในกรณีที่บินค้นหาคำตอบครบทั้ง 50 รอบแล้ว ก็จะนำคำตอบที่ดีที่สุด มาเป็นผลเฉลย และออกจากขั้นตอนวิธีการหาคำตอบรายละเอียดของขั้นตอนวิธี PSO ที่ใช้งานร่วมกับ MT ที่แสดงไว้ในภาพที่ 22 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- | | |
|--------------|---|
| บรรทัดที่ 1 | สุ่มตำแหน่งของพาดิเคิล เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบ เพื่อเก็บเป็นค่า P best โดยประเมินคำตอบด้วย MT |
| บรรทัดที่ 2 | หาคำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นค่าเริ่มต้นของ G best |
| บรรทัดที่ 3 | การวนรอบตามจำนวนครั้งการบินทั้งหมดของ พาดิเคิล เพื่อหาคำตอบ |
| บรรทัดที่ 4 | การวนรอบการทำงานของละพาดิเคิลตั้งแต่ ตัวแรก ถึงตัวสุดท้าย |
| บรรทัดที่ 5 | คำอธิบายซึ่งไม่มีผลต่อคำสั่งการประมวลผล แต่เพื่อระบุว่า บรรทัดต่อไปนี้ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ ของ พาดิเคิล |
| บรรทัดที่ 6 | การวนรอบเพื่อ ปรับปรุงข้อมูลการเคลื่อนที่ของ พาดิเคิล โดยจะเริ่มวนรอบตั้งแต่ บิตแรก ($b = 1$) จนถึงบิตสุดท้าย ($b = MN$) ซึ่งแต่ละบิต แสดงถึงหมายเลขเครื่องจักรที่ใช้ ในแต่ละขั้นตอนของงาน j แต่ละงาน |
| บรรทัดที่ 7 | กำหนดให้ w คือค่าการสุ่ม เพื่อใช้ในการสร้างคำตอบใหม่ โดยจะสุ่มค่า w จากตัวเลข 1, 2 และ 3 |
| บรรทัดที่ 8 | ตรวจสอบ ค่า w ที่สุ่มขึ้นมา |
| บรรทัดที่ 9 | ในกรณีที่สุ่มได้ 1 บิตดังกล่าวจะใช้ค่าเดียวกับ บิตที่ b ของ G best |
| บรรทัดที่ 10 | ในกรณีที่สุ่มได้ 2 บิตดังกล่าวจะใช้ค่าเดียวกับ บิตที่ b ของ P best |
| บรรทัดที่ 11 | ในกรณีที่สุ่มได้ 3 บิตดังกล่าวจะเป็นอิสระจาก G best และ P best โดยจะสุ่มตัวเลขขึ้นมาใหม่เพื่อใช้เป็นค่าประจำบิต |
| บรรทัดที่ 12 | จบการเลือก w |
| บรรทัดที่ 13 | จบการวนเพื่อปรับปรุงตำแหน่งของพาดิเคิลในแต่ละบิต |

3. การแก้ปัญหาการวางแผนการผลิตที่มีกะการทำงาน

จากการเข้าไปเก็บข้อมูลจริงในโรงงานทำให้ทราบว่า เครื่องจักรต่างๆในโรงงานไม่ได้ทำงานตลอด 24 ชั่วโมงเสมอไป อาจกล่าวได้ว่า เวลาทำงานของเครื่องจักรไม่ต่อเนื่องตามสมมุติฐานของวิธีการในการจัดการการผลิตโดยทั่วไป ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรบางเครื่องหยุดพักในช่วงเที่ยงเนื่องจากพนักงานไปรับประทานอาหาร และพักในช่วง 16.00 ถึง 20.00 เนื่องจาก ค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวสูงกว่าปกติ หรือในบางโรงงาน เครื่องจักรบางเครื่องทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ในขณะที่ เครื่องจักรอื่น ๆ ในแผนกเดียวกันหยุดพักตามระยะเวลาซึ่งเป็นไปตามนโยบายของฝ่ายบริหาร

จากกรณีดังกล่าวทำให้แผนการผลิตคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง และงานที่ถูกเลือกในลำดับต่าง ๆ ตามกฎที่ใช้ในการเลือกเกิดความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากเวลาหยุดพัก เช่น จากแผนการผลิตเดิมถ้าเลือกงานโดยยึดหลักเลือกงานที่พร้อมจะผลิตเข้าสู่ตารางผลิตก่อน ตัวอย่างในการจัดการโดยไม่สนใจเวลาหยุดเครื่องจักร ตัวอย่างเช่นการจัดการตารางการผลิตพบว่างานชนิดที่ 1 และ 2 เริ่มงานได้พร้อมกันบนเครื่องจักร M2 จึงมีโอกาสดูถูกเลือกเพื่อผลิตบนเครื่องจักร M2 ทั้ง 2 งาน และตัดสินใจเลือกชนิดที่ 1 เข้าผลิตก่อนเนื่องจากเสร็จเร็วกว่าทั้งเริ่มได้พร้อมกัน แต่เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงปรากฏว่า งานที่ 1 ออกจากเครื่องจักร M1 ช้ากว่าที่กำหนด 1 ชั่วโมง เนื่องจากเวลาพักกลางวัน ซึ่งไม่ได้นำมาคิดคำนวณ ทำให้งานที่ 1 มาถึงเครื่องจักร M2 ช้าไป 1 ชั่วโมง ในขณะที่งานที่ 2 มาถึงตรงตามเวลาที่กำหนดและไม่ได้ผลิตเพราะแผนบอกให้ผลิตงานที่ 1 ก่อน ความผิดพลาดดังกล่าวทำให้ เครื่องจักรเสียเวลารอ 1 ชั่วโมง เพื่อขึ้นงานที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 23 ซึ่งภาพที่ 23 (a) คือการวางแผนผลิตโดยไม่คำนวณเวลาหยุดงาน และภาพ 24(b) แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการจัดการดังกล่าว จากความผิดพลาดดังกล่าวทำให้เวลารวมของทั้งระบบสูงขึ้น ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ ถ้าการจัดการตารางผลิตตัดสินใจภายใต้เงื่อนไขของ ช่วงเวลาการทำงานและช่วงเวลากการหยุดพัก ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอแนวทางการคำนวณเพื่อช่วยในการจัดการตารางการผลิต ให้มีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 23 ผลกระทบจากการไม่คำนึงถึงเวลาหยุดเครื่องจักร

จากการเก็บข้อมูลเพื่อการศึกษาวิจัยทางด้านวางแผนการผลิตพบว่า โรงงานย่อมมีเครื่องจักรบางเครื่องทำงานตลอดเวลา แต่บางเครื่องทำงานเป็นช่วงเวลา หรือ โรงซบอุมิเนียมเครื่องจะหยุดงานในบางช่วงเวลาที่ค่าไฟฟ้าสูงตามนโยบายของผู้บริหาร นอกจากนี้ (โรงงานในประเทศไทย) ยังมีช่วงเวลาหยุดตามเทศกาล และหยุดตามแผนเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักร ดังนั้นการออกแบบขั้นตอนวิธีการในการจัดลำดับงานโดยคำนึงถึงช่วงเวลาหยุดพักเครื่องจักรและคน จึงมีความสำคัญในการตัดสินใจวางแผนการผลิตเพื่อความแม่นยำและได้เป้าหมายที่ดีขึ้น สำหรับปัญหาการจัดการการผลิตโดยคำนึงถึงช่วงเวลาหยุดพักงาน มีตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ในการตัดสินใจดังนี้

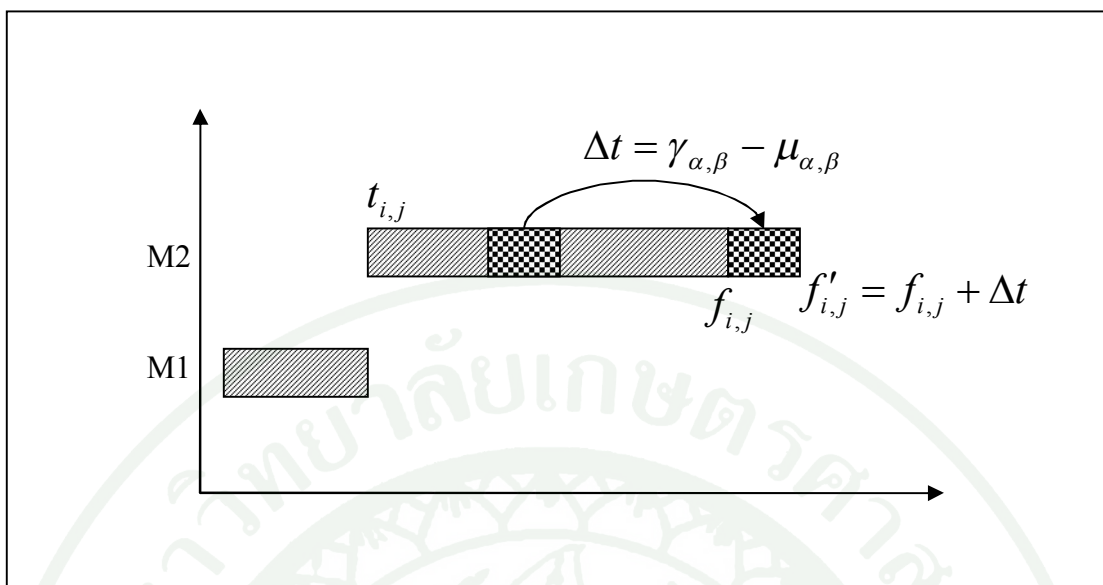
กำหนดให้

α	ดัชนีระบุชนิดของวันทำงาน.
β	ดัชนีของช่วงเวลาหยุดพักในแต่ละชนิดของวันทำงาน
$\mu_{\alpha,\beta}$	เวลาหยุดพักของวัน α ในช่วงเวลา β .
$\gamma_{\alpha,\beta}$	เวลากลับมาเริ่มทำงานหลังหยุดพักของวัน α ในช่วงเวลา β .
t_{ij}^C	เวลาเริ่มต้นใช้ในกรณีการตรวจสอบเพื่อหาเวลาหยุดพักในกะต่างๆของงานที่ j บนเครื่องจักร i
t_{ij}	เวลาเริ่มงานที่ j บนเครื่องจักร i
f_{ij}	เวลาสิ้นสุดงานที่ j บนเครื่องจักร i
f'_{ij}	เวลาเสร็จงานครั้งใหม่ที่ชดเชยเวลาหยุดงานแล้ว 1 ช่วงเวลา
f''_{ij}	เวลาเสร็จงานครั้งใหม่ที่ชดเชยเวลาหยุดงานแล้ว 2 ช่วงเวลา

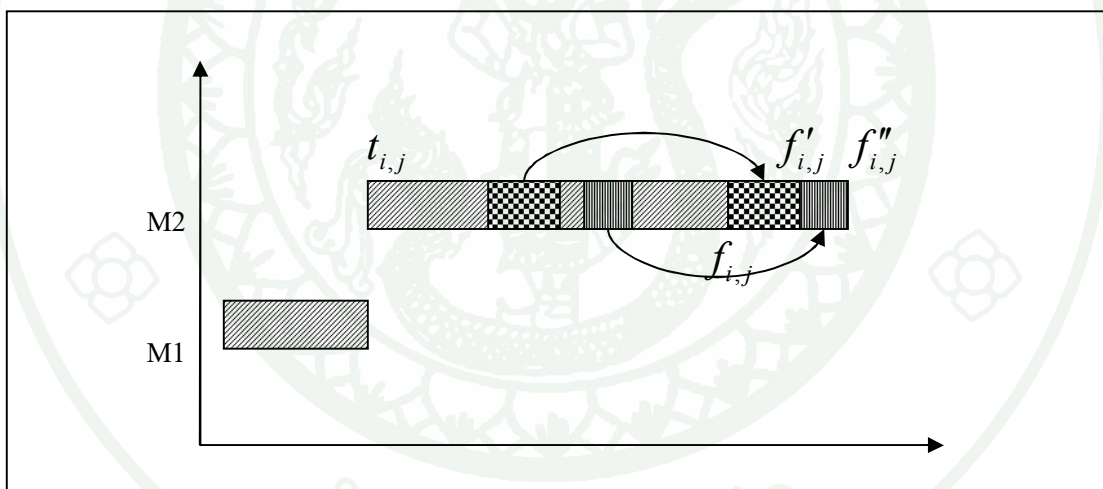
การอธิบายตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตัวอย่างต่อไปนี้ สมมติให้ เครื่องจักร M1 ทำงานวันจันทร์ด้วย รูปแบบเวลาหยุดงานชนิดที่ 1 มีเวลาหยุดพัก 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงเที่ยง 12.00 ถึง 13.00 และช่วงเย็นคือ 16.00 ถึง 18.00 จากข้อมูลดังกล่าว แสดงว่า รูปแบบการหยุดพักงานของเครื่องจักรแบบที่ 1 ($\alpha=1$) ประกอบด้วยช่วงเวลาหยุดงาน 2 ช่วง (คือ $\beta=1$ และ $\beta=2$) โดยสำหรับช่วงแรก $\alpha=1$ และ $\beta=1$ จะเริ่มหยุดงานที่เวลา $\mu_{\alpha,\beta}=12.00$ และกลับมาเริ่มงานอีกครั้งที่เวลา $\gamma_{\alpha,\beta}=13.00$ และช่วงที่ 2 $\alpha=1$ และ $\beta=2$ จะได้ว่า $\mu_{\alpha,\beta}=16.00$ และ $\gamma_{\alpha,\beta}=18.00$ ในการประกาศตัวแปรลักษณะนี้ทำให้เครื่องจักรแต่ละเครื่องสามารถทำงานได้หลากหลายวิธี ซึ่งจะยืดหยุ่นสามารถตอบสนองต่อการหยุดตามช่วงเวลาต่าง ๆ ของโรงงานได้มาก

หลักการคิดคำนวณช่วงเวลาทำงานแบบมีการหยุดจะแตกต่างจากการคิดคำนวณโดยทั่วไปเนื่องจากโดยปกติ เวลาสิ้นสุดงานจะคิดคำนวณจากเวลาเริ่มงานบวกกับเวลาในการผลิตโดยตรง เช่น งานที่ (j) ที่ผลิต บนเครื่องจักร (i) โดยใช้เวลาผลิต ($p_{i,j}$) จะเริ่มต้นผลิตที่เวลา $t_{i,j}$ และผลิตเสร็จสิ้นที่เวลา $f_{i,j}$ ซึ่งคำนวณได้โดยตรงจาก $f_{i,j} = t_{i,j} + p_{i,j}$ แต่เมื่อนำช่วงเวลางานมาคิดแล้ว ถ้ามีช่วงเวลาที่หยุดงาน อยู่ระหว่างเวลาผลิต เวลาเสร็จงานจะเลื่อนไป โดยจะต้องชดเชยด้วยช่วงเวลาที่ไม่ได้ผลิต ดังภาพที่ 24 โดย กราฟแท่งรูปตารางหมากรุกแสดงถึงเวลาหยุดพักงาน (ช่วงเวลาที่ไม่ได้ผลิต) ที่เกิดขึ้นในระหว่างเวลาทำงาน ทำให้ เวลาเสร็จงานจริงต้องถูกเลื่อนออกไปเท่ากับช่วงเวลาที่หยุดพัก

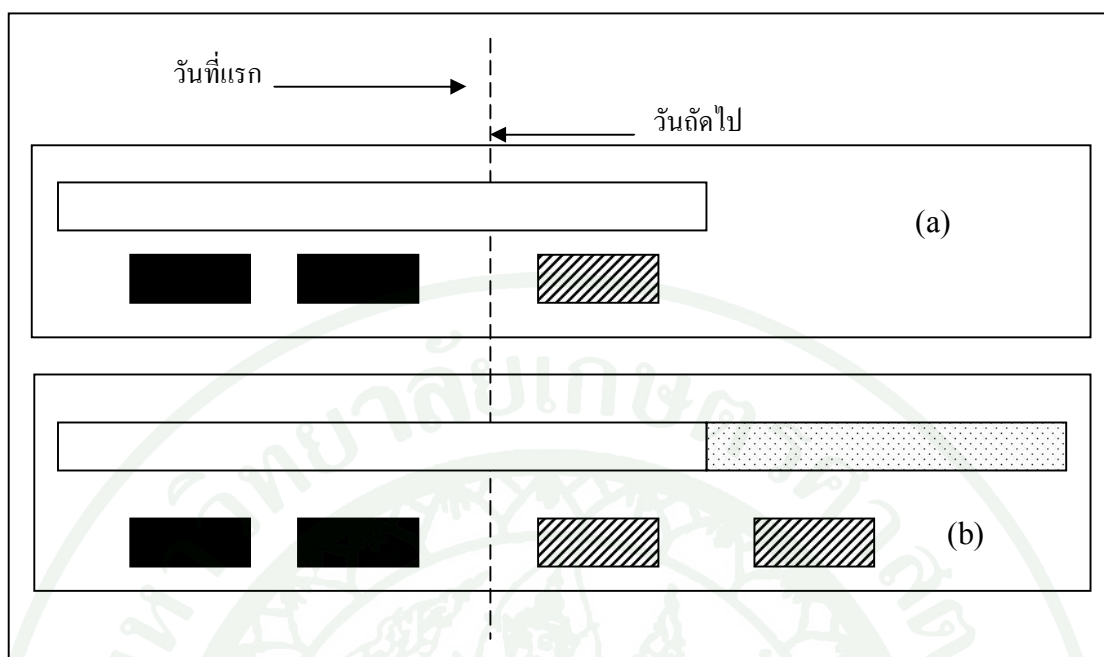
หลายครั้งที่อาจเกิดการหยุดทำงานมากกว่า 1 ช่วงเวลา ดังนั้นการชดเชยจะต้องชดเชยจนครบทุกช่วงเวลาดังแสดงในภาพที่ 25 และในบางครั้งการชดเชยเวลางานอาจทำให้งานเสร็จในวันถัดไปซึ่งในวันถัดไป อาจเป็นวันหยุดหรือ วันถัดไปอาจมีช่วงเวลาหยุดพักงานแตกต่างจากวันปัจจุบันก็มีความเป็นไปได้ ซึ่งการวางแผนการผลิตที่ด้วยก็ควรจะตอบสนองลักษณะของปัญหาดังกล่าวได้เช่นกันจากภาพที่ 26 (a) กราฟแท่งสีขาวแสดงถึงเวลาเริ่มงานและเวลาเสร็จงาน กราฟแท่งเล็กสีดำ (สองแท่ง) แสดงถึงช่วงเวลาหยุดพักของเครื่องจักรในวันแรก และกราฟแท่งเล็กลายตัดเฉียงแสดงถึงเวลาหยุดพักในวันถัดไป



ภาพที่ 24 การชดเชยเวลาหยุดงาน 1 ช่วง

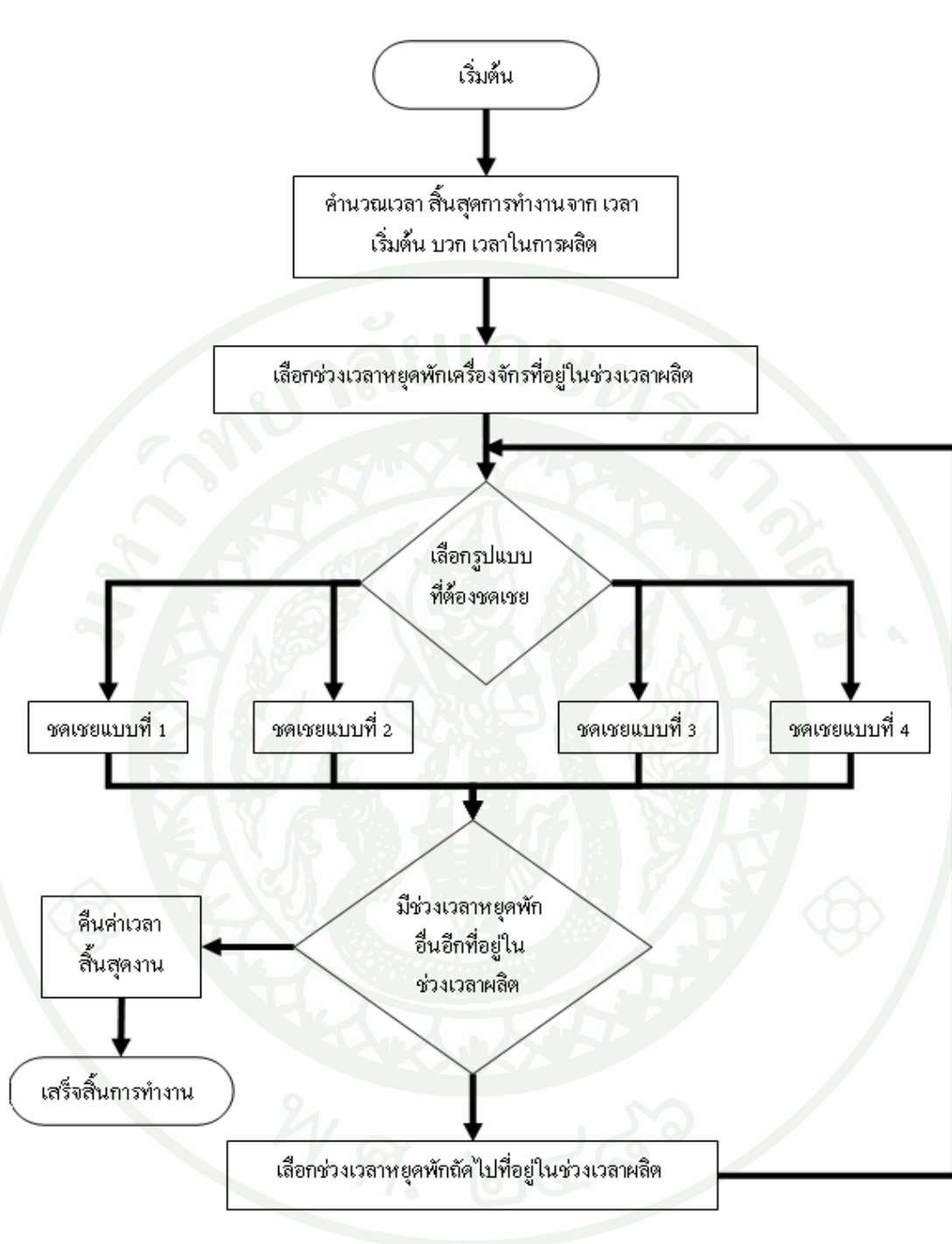


ภาพที่ 25 การชดเชยเวลาหยุดงาน 2 ช่วง



ภาพที่ 26 ผลกระทบจากการลดระยะเวลาหยุดงานที่กระทบกับวันถัด ๆ ไป

ภาพ 27(b) แสดงถึงการลดระยะเวลาเนื่องจาก ระยะเวลาหยุดงานของภาพ 27(a) โดย กราฟแท่งยาวลายจุดแสดงถึงช่วงเวลาชดเชย เมื่อดูจากภาพจะพบว่า เวลาที่ชดเชยทำให้เวลาสิ้นสุดของงานเลื่อนออกไป และบางครั้งก็เลื่อนไปทับกับเวลาหยุดพักงานของเครื่องจักรในช่วงต่อไปอีกด้วย และเมื่อมีการซ้อนทับกับช่วงเวลาหยุดพักเกิดขึ้นซ้ำ การคำนวณจะต้องดำเนินการเพิ่มเติมอีกรอบ และไม่สามารถคาดเดาได้ว่า เมื่อชดเชยเวลาในครั้งถัดไปแล้ว จะเกิดการซ้อนทับกับช่วงหยุดงานอีกหรือไม่ ดังนั้นในการคำนวณจะใช้ ฟังก์ชันเรียกตัวเอง (Recursive Function) ในการประมวลผล โดยการคิดเวลาหยุดงานจะกระทำครั้งละ 1 ช่วงเวลาหยุดงาน และตรวจสอบว่ามีการซ้อนทับกับช่วงเวลาหยุดงานหรือไม่ ถ้าการซ้อนทับเกิดขึ้น ฟังก์ชันจะเรียกตัวเองซ้ำอีกรอบ จนกว่าจะไม่มี การซ้อนทับ



ภาพที่ 27 ฟังก์ชันการคำนวณเวลาเสร็จงานแบบมีช่วงเวลาหยุดพัก

ภาพที่ 27 แสดงขั้นตอนวิธีการคำนวณเวลาเสร็จงาน เริ่มต้นจะคำนวณเวลาเสร็จงานจากการนำเวลาเริ่มต้นผลิตบวกเวลาที่ใช้ในการผลิต ซึ่งจะได้เวลาสิ้นสุดงานโดยไม่ได้ตรวจสอบช่วงเวลาหยุดงานของเครื่องจักร หลังจากนั้นในบล็อกถัดมา เลือกช่วงเวลาหยุดงานที่เป็นช่วงเวลาแรกสุดที่

มีการหยุดงานมาคำนวณก่อน เลือกรูปแบบการหยุดงานที่ต้องชดเชยจากทั้งหมด 4 แบบ โดยแต่ละแบบจะต้องมีการชดเชยด้วยช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และต้องปรับปรุงช่วงเวลาหยุดงาน ตามเวลาที่ชดเชย และขยับจุดเวลาที่ใช้ในการค้นหาช่วงเวลาหยุดพักในรอบถัดไป ในที่นี้คือค่า $t_{i,j}^C$ ซึ่งจะกล่าวต่อไป ใน ภาพของภาษาเทียม (Pseudo Code) หลังจากนั้น จะเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบว่ามีช่วงเวลาหยุดพักที่ยังไม่ได้ชดเชยอีกหรือไม่ ถ้ามีช่วงเวลาหยุดพักที่ต้องชดเชยจะวนลูปเข้าสู่การชดเชยเวลาในรอบถัดไป แต่ถ้าชดเชยจนครบหมดทุกช่วงเวลาแล้วถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการชดเชยเวลา เนื่องจากการหยุดงาน

Algorithm1: working time window algorithm ($t_{i,j}^C, f_{i,j}, p_{i,j}$)

- (1) $f_{i,j} = t_{i,j}^C + p_{i,j}$
- (2) SET
- (3) $b_1 = \begin{cases} true & ; t_{i,j}^C \leq \mu_{\alpha,\beta} \leq f_{i,j} \\ false & ; otherwise \end{cases}$
- (4) $b_2 = \begin{cases} true & ; t_{i,j}^C \leq \gamma_{\alpha,\beta} \leq f_{i,j} \\ false & ; otherwise \end{cases}$
- (5) $b_3 = \begin{cases} 1 & ; \mu_{\alpha,\beta} \leq t_{i,j}^C \leq \gamma_{\alpha,\beta} \\ 0 & otherwise \end{cases}$
- (6) $b_4 = \begin{cases} 1 & ; \mu_{\alpha,\beta} \leq f_{i,j} \leq \gamma_{\alpha,\beta} \\ 0 & otherwise \end{cases}$
- (7) /*to calculate new finish time by rules followed that:*/
- (8) If $\sim b_1 \wedge b_2 \wedge b_3 \wedge \sim b_4$ then
- (9) $f_{i,j} = f_{i,j} + (\gamma_{\alpha,\beta} - t_{i,j}^C)$ and $t_{i,j}^C = \gamma_{\alpha,\beta}$
- (10) Else If $b_1 \wedge b_2 \wedge b_3 \wedge \sim b_4$ then
- (11) $f_{i,j} = f_{i,j} + (\gamma_{\alpha,\beta} - \mu_{\alpha,\beta})$ and $t_{i,j}^C = \gamma_{\alpha,\beta}$
- (12) Else If $b_1 \wedge b_2 \wedge \sim b_3 \wedge \sim b_4$ then
- (13) $f_{i,j} = f_{i,j} + (\gamma_{\alpha,\beta} - \mu_{\alpha,\beta})$ and $t_{i,j}^C = \gamma_{\alpha,\beta}$
- (14) Else If $b_1 \wedge \sim b_2 \wedge \sim b_3 \wedge b_4$ then
- (15) $f_{i,j} = \gamma_{\alpha,\beta} + (f_{i,j} - \mu_{\alpha,\beta})$ and $t_{i,j}^C = \gamma_{\alpha,\beta}$

ภาพที่ 28 ขั้นตอนวิธีการคำนวณเวลาเสร็จงานแบบมีช่วงเวลาหยุดพัก

- (16) End if
- (16) If $f_{i,j} < \text{start time of the next breaking period}$ then
- (17) Finish time = $f_{i,j}$
- (18) Else
- (19) Call working time window procedure ($t_{i,j}^C, f_{i,j}, 0$) again
- (20) End if
- (21) END.

ภาพที่ 28 (ต่อ)

จากขั้นตอนวิธีกำหนดให้ b_1, b_2, b_3 และ b_4 เป็นตัวแปรตัดสินใจในการตรวจสอบว่า ช่วงเวลาหยุดงานมีความเกี่ยวข้องกับเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของงานแต่ละชิ้นอย่างไรโดย

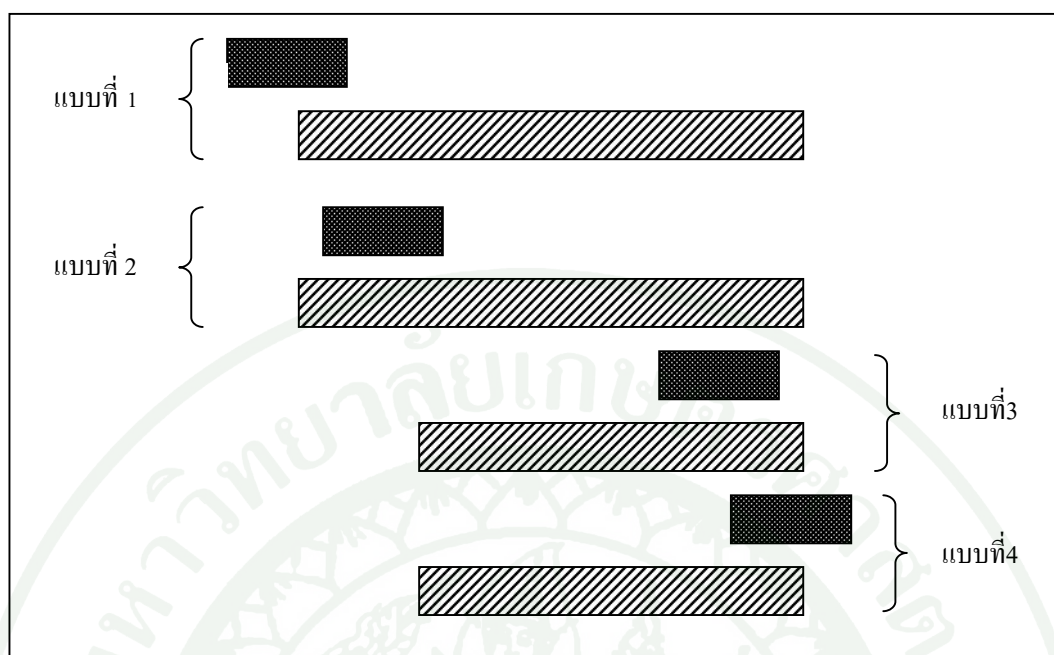
b_1 ตรวจสอบว่า เวลาเริ่มต้นของช่วงเวลาหยุดงานอยู่ระหว่างการผลิตหรือไม่

b_2 ตรวจสอบว่า เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลาหยุดงานอยู่ระหว่างการผลิตหรือไม่

b_3 ตรวจสอบว่า เวลาเริ่มต้นทำงานอยู่ในช่วงเวลาเบรก(หยุดพัก) หรือไม่

b_4 ตรวจสอบว่า เวลาเสร็จการทำงานอยู่ในช่วงเวลาเบรกหรือไม่

หลังจากนั้นจะทำการประมวลผลจาก ตัวแปรทั้ง 4 เพื่อตัดสินใจว่า เวลาทำงานและเวลาหยุดงานมีความเกี่ยวข้องกันอย่างไร โดยแบ่งได้ 4 กรณีดังภาพที่ 29 ซึ่งกราฟแท่งลายแสดงช่วงเวลาทำงานและ กราฟแท่งทึบแสดงช่วงหยุดงาน แต่ละภาพแสดงถึงผลจากค่าตัวแปรตัดสินใจทั้ง 4 ตัวแปรเพื่อนำมาวิเคราะห์ 4 กรณี การหยุดที่แตกต่างกันส่งผลให้การชดเชยเวลาแตกต่างกันด้วย ช่วงเวลาที่ต้องชดเชยคือช่วงเวลาทำงานที่ไปซ้อนทับอยู่ในช่วงหยุดพัก ซึ่งหลักการชดเชยดังที่แสดงไว้ในขั้นตอนวิธีการคำนวณดังกล่าวถึงในภาพที่ 28 บรรทัดที่ 8 ถึง 16



ภาพที่ 29 ช่วงเวลาหยุดงานที่เป็นไปได้ในระหว่างทำงาน

สำหรับตัวอย่างการตัดสินใจและการชดเชยเวลาหยุดพักแสดงไว้ดังนี้ กรณีที่ 1 เริ่มทำงานตอน 12.30 และเสร็จในเวลา 15.00 แต่ช่วงเวลา 12.00 ถึง 13.00 เป็นช่วงเวลาหยุดงานดังนั้นต้องชดเชยเวลาไป 30 นาที เวลาชดเชยต้องบวกเพิ่มไป 30 นาที จาก $f_{i,j} = 15:00 + 0:30 = 15:30$ และเวลาเริ่มต้น จาก $t_{ij}^C = 12:30$ เลื่อนเป็น $t_{ij}^C = 13:00$

สาเหตุที่ต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้น ($t_{i,j}^C$) เนื่องจาก ต้องใช้เวลาเริ่มต้น และเวลาสิ้นสุดในการตรวจสอบว่าเวลาดังกล่าวทำงานครบวันหยุดพักหรือไม่ โดยเวลาที่เลื่อนใช้เพื่อตรวจสอบทางตรรกะ เท่านั้น ส่วนเวลาเริ่มงานจริงยังคงเป็นเวลาเดิม ($t_{i,j}$) กรณีที่ 2 ตามตารางการผลิตต้องเริ่มงาน 11.00 แต่ช่วงเวลา 12.00 ถึง 13.00 เป็นช่วงเวลาหยุดพักงาน จึงต้องชดเชยเวลา 1 ชั่วโมง $f_{i,j} = 15:00 + 1:00 = 16:00$ และเวลาเริ่มต้น จาก $t_{ij}^C = 12:00$ เลื่อนเป็น $t_{ij}^C = 13:00$

กรณีที่ 3 ตามตารางการผลิต เริ่มงาน 13.00 และเสร็จในเวลา 18.00 แต่เนื่องจาก ช่วงเวลา 17.00 ถึง 18.00 เป็นช่วงเวลาหยุดงาน ดังนั้นงานจะต้องเสร็จช้าลงอีก 1 ชั่วโมง $f_{i,j} = 18:00 + 1:00 = 19:00$ และเวลาเริ่มต้น จาก $t_{ij}^C = 13:00$ เลื่อนเป็น $t_{ij}^C = 19:00$ กรณีที่ 4 ตามตารางการผลิต เริ่มงาน 13.00 และเสร็จในเวลา 18.00 แต่เนื่องจาก ช่วงเวลา 17.00 ถึง 19.00 เป็นช่วงเวลาหยุดงาน งานจะต้องเสร็จช้าลง 1 ชั่วโมงของช่วงเวลาซ้อนทับและสามารถเริ่มผลิตได้

อีกครั้งในเวลา 19.00 ดังนั้นงานจะเสร็จช้าลงไป 2 ชั่วโมง $f_{i,j} = 18:00 + 2:00 = 20:00$ และเวลาเริ่มต้น จาก $t_{ij}^C = 18:00$ เลื่อนเป็น $t_{ij}^C = 19:00$ รายละเอียดของขั้นตอนวิธีการ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

บรรทัดที่ 1	คำนวณเวลาสิ้นสุดขั้นตอนจาก เวลาเริ่มต้น บอกด้วยเวลาผลิต
บรรทัดที่ 2	คำอธิบายว่าส่วนถัดมาจะเป็นส่วนการกำหนดค่า b_1 ถึง b_4
บรรทัดที่ 3 ถึง 6	การกำหนดค่า b_1 ถึง b_4 ซึ่งอธิบายรายละเอียดไปแล้วตอนต้น
บรรทัดที่ 7	คำบรรยาย ระบุส่วนของการตรวจสอบและชดเชยเวลา เนื่องจากการหยุดทำงานของเครื่อง
บรรทัดที่ 8	ตรวจสอบกรณีที่ 1
บรรทัดที่ 9	ชดเชย เวลาเสร็จงานจากกรณีที่ 1
บรรทัดที่ 10	ตรวจสอบ กรณีที่ 2
บรรทัดที่ 11	ชดเชย เวลาเสร็จงานจากกรณีที่ 2
บรรทัดที่ 12	ตรวจสอบ กรณีที่ 3
บรรทัดที่ 13	ชดเชย เวลาเสร็จงานจากกรณีที่ 3
บรรทัดที่ 14	ตรวจสอบ กรณีที่ 4
บรรทัดที่ 15	ชดเชย เวลาเสร็จงานจากกรณีที่ 4
บรรทัดที่ 16	สิ้นสุดการตรวจสอบ
บรรทัดที่ 17	ตรวจสอบเวลาเสร็จงานที่ชดเชยแล้ว ว่าเข้าไปซ้อนทับกับช่วงเวลาหยุดพักเครื่องจักรช่วงถัดไปอีกหรือไม่ โดยตรวจสอบว่า ถ้าช่วงเวลาสิ้นสุดงาน น้อยกว่าเวลาหยุดงานในรอบถัดไป แสดงว่า ไม่ต้องคำนวณเพิ่มเติมแล้ว ไปยังบรรทัดที่ 18 แต่ถ้าต้องคำนวณเพิ่มเติมจะข้ามไปบรรทัดที่ 20
บรรทัดที่ 18	คืนค่า เวลาสิ้นสุด
บรรทัดที่ 19 และ 20	สำหรับกรณีที่ เวลาสิ้นสุด เลย์ข้ามไปสู่ช่วงเวลาหยุดของ กะถัดไป ฟังก์ชันจะเรียกตัวเองซ้ำเพื่อชดเชยเวลาในกะถัดไป
บรรทัดที่ 21	สิ้นสุดการตรวจสอบ
บรรทัดที่ 22	สิ้นสุดฟังก์ชันเรียกตัวเอง

อาจกล่าวได้ว่าความแตกต่างของผลลัพธ์จากการคิดแบบไม่คำนึงถึงกะการทำงานและการคำนึงถึงกะการทำงานมีผลต่อการตัดสินใจของขั้นตอนวิธี และให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันในด้านของลำดับงานเข้าและเวลาที่เสร็จถูกนำเสนอไว้ในบทถัดไปในส่วนของการทดลอง

ผลและวิจารณ์

ภาพรวมแผนการทดลองทั้งหมด

เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอผลการทดลองโดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งกล่าวถึง ประสิทธิภาพของวิธี เมคสเปนทรี (MT) ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยจะเปรียบเทียบกับวิธีการจัดการวางแผนพื้นฐานที่รู้จักโดยทั่วไป เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ได้คำตอบที่ดีกว่าและสามารถนำไปประยุกต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการวางแผนการผลิตแบบเดิมให้สามารถหาคำตอบได้ดียิ่งขึ้นในเวลาที่ไม่มาก หลังจากนั้นจะขยายผลจากปัญหา JSP ไปประยุกต์ใช้กับปัญหา FJSP โดยจะนำวิธี MT ไปใช้ร่วมกับวิธีเมต้าฮิวริสติก ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีเมต้าฮิวริสติกได้ โดยจะนำวิธี MT ไปประยุกต์ใช้ ร่วมกับ GA และ PSO และสุดท้ายงานวิจัยฉบับนี้จะแสดงถึงการศึกษาผลกระทบของช่วงเวลาการหยุดพักระหว่างการทำงานซึ่งมีผลต่อการจัดการวางแผนการผลิต โดยจะแสดงให้เห็นว่าถ้าโรงงานมีการทำงานเป็นกะหรือมีช่วงเวลาหยุดเครื่อง แต่การจัดการวางแผนการผลิตไม่คำนวณช่วงเวลาหยุดงาน จะส่งผลให้คำตอบที่ได้คลาดเคลื่อนเนื่องจากเวลาที่หยุดไป และทำให้การเลือกจัดลำดับงานไม่เหมาะสมต่อสมการเป้าหมาย ซึ่งจะนำเสนอต่อไปตามลำดับ

การใช้วิธี MT แก่ปัญหา JSP

เริ่มแรกเพื่อแสดงประสิทธิภาพของวิธีเมคสเปนทรี งานวิจัยฉบับนี้นำตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในหลายงานวิจัยมาทำการทดลองโดยนำมาจาก OR -LIB ซึ่งเป็นฐานข้อมูลหนึ่งสำหรับปัญหาทางด้านการวิจัยและดำเนินการ (Operation Research) กรณีศึกษาประกอบด้วยปัญหาการจัดงานตั้งแต่ 15 ถึง 50 งาน แต่ละงานต้องผลิตบนเครื่องจักร 15 ถึง 20 เครื่อง มีการทดลองทั้งหมด 240 ครั้ง โดยแบ่งเป็นปัญหา 40 กรณีศึกษา และทุกปัญหาลดลงด้วย 6 ขั้นตอนวิธี โดยแบ่งออกเป็นวิธีดั้งเดิม 3 วิธี และวิธีที่ปรับปรุงใหม่โดยใช้ MT อีก 3 วิธี

เริ่มต้นการทดลอง โดยใช้ 3 ขั้นตอนวิธีการที่รู้จักกันโดยแพร่หลาย จะถูกนำมาใช้เพื่อจัดลำดับงานกับ 40 ปัญหาดังกล่าว ซึ่ง 3 วิธีดังกล่าวประกอบด้วย วิธีนอนดีเลย์ (Non Delay Scheduling Algorithm, NSA) วิธีเลือกงานที่เสร็จไวที่สุดผลิตก่อน (Earliest Finish Time, EFT) และวิธีเลือกงานที่ใช้เวลาผลิตสั้นสุดผลิตก่อน (Shortest Processing Time, SPT) หลังจากนั้นจะนำ 3 วิธีดังกล่าวมาใช้ร่วมกับวิธี MT เพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า คำตอบที่ได้ถูกปรับปรุงขึ้นมาก โดยตารางที่ 5

แสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีเมคสแปนที่เทียบกับวิธีเดิมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนจากผลการทดลองว่า คำตอบปรับปรุงขึ้นจากวิธีเดิม

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของการทดลอง โดยศดมภ์แรกแสดงหมายเลขลำดับของปัญหา ศดมภ์ที่ 2 และ 3 คือรายละเอียดของปัญหา ซึ่งประกอบด้วยจำนวนงานและจำนวนเครื่องจักรในการจัดตาราง ศดมภ์ที่ 4 คือคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบจาก OR-LIB ศดมภ์ที่ 5 และ 6 เป็นค่าเมคสแปนที่เกิดจากวิธีนอนดิเลย์และวิธีเมคสแปนที่ประยุกต์ใช้กับนอนดิเลย์ ตามลำดับ ศดมภ์ที่ 7 และ 8 เป็นผลจากวิธี EFT โดย ศดมภ์ที่ 7 เป็นค่าเมคสแปนที่ได้จาก EFT และศดมภ์ที่ 8 ได้จาก EFT ที่ปรับปรุงด้วย MT ศดมภ์ที่ 9 เป็นผลลัพธ์จากวิธี SPT และศดมภ์ที่ 10 เป็น SPT ที่ปรับปรุงด้วย MT

จากการทดลองพบว่า วิธี MT สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้วิธีดั้งเดิมทั้ง 3 ทำให้คุณภาพของวิธีการค้นหามีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเมื่อปรับปรุงแล้วยังพบว่า วิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือวิธีนอนดิเลย์ ส่วนวิธี EFT และ SPT ให้ผลลัพธ์ลดลงตามลำดับ และทั้ง 3 วิธี เมื่อถูกปรับปรุงด้วย MT แล้ว ล้วนให้ผลลัพธ์ดีขึ้น

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบเมคสแปนของวิธีเดิมและวิธีใหม่

case	job	Machine	best known solution	NSA		EFT		SPT	
				original	new	original	new	original	new
1	15	15	1231	1462	1389	1662	1415	5784	2701
2	15	15	1244	1446	1335	1616	1478	5653	2675
3	15	15	1218	1495	1359	1825	1455	6182	2766
4	15	15	1175	1708	1324	1705	1459	5909	2703
5	15	15	1224	1618	1387	1872	1525	6700	3244
6	15	15	1238	1522	1342	1524	1400	6270	2859
7	15	15	1227	1434	1407	1506	1446	6228	2936
8	15	15	1217	1457	1356	1602	1392	4806	2765

ตารางที่ 5 (ต่อ)

case	job	Machine	best	NSA		EFT		SPT	
			known	original	new	original	new	original	new
9	15	15	1274	1622	1416	1936	1546	6767	3232
10	15	15	1241	1697	1453	1617	1512	5663	2875
11	20	15	1359	1865	1522	2120	1690	8326	3346
12	20	15	1367	1667	1518	2067	1681	7581	4140
13	20	15	1342	1802	1553	2133	1707	7670	3200
14	20	15	1345	1635	1463	1877	1636	8625	3784
15	20	15	1339	1835	1580	1865	1680	9065	3487
16	20	15	1360	1965	1587	1917	1663	8735	3879
17	20	15	1462	2059	1663	1983	1735	9090	3303
18	20	15	1396	1808	1592	1900	1713	7610	3120
19	20	15	1335	1789	1556	1941	1612	9263	2955
20	20	15	1348	1710	1619	1972	1675	11000	4830
21	30	15	1764	2335	2007	2389	2161	10292	4020
22	30	15	1795	2432	2221	2542	2288	12478	4850
23	30	15	1791	2453	2115	2724	2334	12363	5472
24	30	15	1829	2434	2135	2582	2298	12654	5224
25	30	15	2007	2497	2193	2447	2332	11390	4573
26	30	15	1819	2445	2135	2683	2276	12682	4735
27	30	15	1771	2664	2160	2771	2374	12463	5036
28	30	15	1673	2155	2038	2399	2068	10520	4316
29	30	15	1795	2477	2070	2529	2228	9648	4656
30	30	15	1674	2301	1941	2540	2198	10053	4807
31	50	20	2868	3606	3191	4080	3575	24672	9904

ตารางที่ 5 (ต่อ)

case	job	Machine	best known solution	NSA		EFT		SPT	
				original	new	original	new	original	new
32	50	20	2869	3639	3265	4230	3650	27184	10095
33	50	20	2755	3521	3049	4143	3427	26751	8885
34	50	20	2702	3447	3162	3998	3368	25221	8644
35	50	20	2725	3332	3044	4017	3537	22729	8887
36	50	20	2845	3677	3166	4112	3532	23353	8853
37	50	20	2725	3487	3146	4272	3353	24197	10199
38	50	20	2784	3336	3167	3877	3355	26183	10909
39	50	20	3071	3862	3410	4208	3591	24427	10489
40	50	20	2995	3801	3463	4168	3612	24318	9351

ตารางที่ 6 เป็นการนำข้อมูลผลลัพธ์จากตารางที่ 5 มาวิเคราะห์เพื่อแสดงประสิทธิภาพของวิธี MT ที่ถูกนำมาใช้กับขั้นตอนวิธีทั้ง 3 วิธีดังที่กล่าวมาแล้ว โดยรายละเอียดของตารางมีดังนี้

สดมภ์ที่ 1 แสดงถึงกลุ่มของปัญหา โดยแต่ละกลุ่มปัญหาประกอบด้วย 10 ปัญหา สดมภ์ที่ 2 และ 3 แสดงจำนวนงานและเครื่องจักรที่ใช้ สดมภ์ที่ 4 คือ เปอร์เซนต์การปรับปรุงโดยเฉลี่ย (จาก 10 ปัญหา) เมื่อนำวิธี MT มาใช้ร่วมกับวิธีนอนติเลย์ โดยคำนวณจาก เมคสแปนจากวิธีนอนติเลย์ ลบด้วย เมคสแปนของวิธี MT หลังจากนั้นจึงนำมารหารด้วยเมคสแปนของวิธีนอนติเลย์ แล้วคูณด้วย 100 สำหรับสดมภ์ที่ 5 แสดงเปอร์เซนต์การปรับปรุงโดยเฉลี่ยเมื่อนำ วิธี MT มาใช้ร่วมกับวิธี EST โดยคำนวณจากการนำเมคสแปนที่ได้จากวิธี EST ลบ เมคสแปนจากวิธีนอนติเลย์ แล้วจึงนำไปหารด้วย เมคสแปนของวิธี EST แล้วจึงทำเป็นเปอร์เซนต์โดยคูณด้วย 100 และ สดมภ์สุดท้ายแสดงเปอร์เซนต์การปรับปรุงโดยเฉลี่ยเมื่อนำวิธี MT มาใช้ร่วมกับวิธี SPT โดยจะนำเมคสแปนจากวิธี SPT ลบด้วย เมคสแปนจากวิธีนอนติเลย์แล้วหารด้วยเมคสแปนจากวิธี SPT และคูณด้วย 100 ซึ่งจากผลการทดลองทำให้พอจะคาดการณ์ได้ว่าวิธี MT สามารถนำไปพัฒนาขั้นตอนวิธีการต่างๆ ทำให้สามารถค้นพบคำตอบที่ดีขึ้น โดยเมื่อนำมาใช้กับขั้นตอนวิธีที่มีประสิทธิภาพ คำตอบก็จะปรับปรุงขึ้น และเมื่อนำไปใช้ร่วมกับวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อย (ต่อสมการเป้าหมายที่เลือก) เช่น SPT ยิ่งทำให้คำตอบที่

ได้ปรับปรุงได้ดีขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัดเจน จึงอาจกล่าวได้ว่า วิธีการ MT น่าจะถูกนำไปทดลองเพิ่มเติมในครั้งต่อไปกับขั้นตอนวิธีการอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 6 เปอร์เซนต์ของเมคสเปนที่ดีขึ้นเนื่องจากนำวิธี MT มาใช้

กลุ่มปัญหา	งาน	เครื่องจักร	NSA	EST	SPT
1	15	15	10.62	12.85	51.83
2	20	15	13.43	14.92	58.36
3	30	15	13.00	11.82	58.15
3	50	20	10.14	14.82	61.30

ส่วนต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในแง่ของเวลาการหาคำตอบของวิธี MT เทียบกับวิธีนอนติเลย์และคิซเพชชิงรูทั่วไป ในการจัดตารางของปัญหา JSP เริ่มต้นจะแสดงถึงเวลาการหาคำตอบของวิธีนอนติเลย์หรือคิซเพชชิงรูทั่วไปเสียก่อน กำหนดให้มีความทั้งหมด N งานที่ผลิตบนเครื่องจักร M เครื่อง ดังนั้นมีงานที่ต้องจัดลำดับทั้งหมดของวิธีนอนติเลย์คือ $T_{NSA} = N \times M$ ลำดับ (Askin, 1993) โดยกำหนดให้ T_{NSA} คือเวลาที่ใช้ของวิธีนอนติเลย์ ถ้าแต่ละขั้นตอนใช้เวลาในการหาคำตอบ 1 หน่วยเวลา ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบคือ $T_{NSA} = N \times M$

สำหรับวิธี เมคสเปนทรีมีจำนวนลำดับที่ต้องจัดทั้งหมด $N \times M$ เช่นเดียวกัน และแต่ละครั้งที่เลือกมีงานที่สามารถจัดได้ไม่เกินครั้งละ N งาน ดังนั้นวิธี MT ใช้เวลาทั้งหมด $T_{MT} = N^2 \times M \times T_E$ โดยที่ T_E คือเวลาที่ใช้ในการประเมิน และ T_{MT} ซึ่งในการประเมินจะใช้วิธีสติกพื้นฐาน ง่ายๆ เช่น วิธีนอนติเลย์ ดังนั้น T_E จึงใช้เวลาเท่ากับเวลาที่ใช้ในการค้นหาของวิธีนอนติเลย์ ดังนั้นเวลาทั้งหมดที่ใช้คือ $T_{MT} = N^3 \times M^2$ ซึ่งยังคงเป็นเวลาที่เป้นพหุนาม ทั้งนี้กล่าวได้ว่า การหาคำตอบด้วยวิธี เมคสเปนทรีสามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่เป้นพหุนามในกรณีที่วิธีการประเมินมีคุณสมบัติสามารถหาคำตอบได้ในเวลาที่เป้นพหุนาม

ตัวอย่างถัดมาจะเป็นการนำคำตอบจากวิธี นอนติเลย์และวิธี MT ซึ่งสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วไปเปรียบเทียบกับ คำตอบที่เหมาะสมจากวิธีกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming, LP) โดยวิธีกำหนดการเชิงเส้นสามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาอันสั้นเมื่อปัญหามีขนาดเล็ก แต่ถึงอย่างไรก็ตามยังต้องอาศัยเวลาในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในเรื่องของ เส้นทางการผลิตของงานแต่ละงาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไปนี้เป็น การนำตัวอย่างจากตารางที่ 2 (จากบท

ของการตรวจสอบเอกสาร) มาทำการหาคำตอบโดยเทียบกับวิธีนอนดีเลย์ และวิธี MT ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าในบางครั้งสำหรับปัญหามิติเล็ก คำตอบที่ได้จากวิธี MT และนอนดีเลย์ได้ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมที่ได้จาก Solver แต่ในปัญหามิติใหญ่ คำตอบของวิธี MT จะดีกว่านอนดีเลย์มาก แต่ก็ยังห่างจากคำตอบที่เหมาะสม แต่วิธีการ MT มีจุดเด่นที่สามารถหาคำตอบที่ดีได้ภายในระยะเวลาอันสั้น การทดลองถัดมาเริ่มจากขยายปัญหา JSP เป็น FJSP และนำวิธีการ MT ประยุกต์ใช้กับวิธีการทางเมตาดาวิริสติกซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในส่วนต่อไป

ตารางที่ 7 รายละเอียดการเปรียบเทียบเมคสแปนของ วิธีนอนดีเลย์ วิธี MT และ วิธี LP

	NSA	MT	LP (Solver)
กรณีที่ 1	28	27	27
กรณีที่ 2	28	28	27
กรณีที่ 3	28	28	27
กรณีที่ 4	28	28	25

การเปรียบเทียบผลระหว่างวิธี GA และ PSO

ส่วนต่อมานำเอาปัญหา JSP เดิมที่หลายงานวิจัยอ้างอิงถึง มานำเสนอโดยจะขยายจำนวนเครื่องจักรขึ้น เพื่อเพิ่มทางเลือกในการผลิต โดยแต่ละขั้นตอนจะสามารถเลือกเครื่องจักรที่สามารถทำการผลิตได้ 3 เครื่อง จากนั้นจะนำวิธี MT มาใช้ในการแก้ปัญหา โดยจะใช้งานร่วมกับวิธี GA และ PSO โดยวิธี ทั้ง 2 วิธีจะทำหน้าที่จัดเครื่องจักรให้เหมาะสมกับงานในแต่ละขั้นตอน และใช้วิธี MT เรียงลำดับงานในแต่ละเครื่องจักร

การทดลองแสดงถึงประสิทธิภาพของการแก้ปัญหา FJSP ด้วยการประยุกต์ใช้ วิธี GA และ PSO ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับ MT เพื่อทดสอบว่ามีความเหมาะสมกับปัญหา FJSP มากน้อยเพียงไร ซึ่งจุดเด่นของ วิธี MT คือความรวดเร็วที่ใช้ในการหาคำตอบซึ่งมีคุณภาพดีพอสมควร และจุดเด่นของ GA และ PSO ซึ่งเป็นวิธีการในการค้นหาและปรับปรุงคุณภาพของคำตอบ ที่รู้จักกันแพร่หลายว่ามีประสิทธิภาพสูง

เนื่องจากการหาคำตอบของวิธี GA และ PSO เกิดจากค่าการสุ่มและความน่าจะเป็นทางสถิติ การรันโปรแกรมเพื่อหาคำตอบแต่ละครั้งได้คำตอบไม่เหมือนกันทุกครั้ง ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ จึงแบ่งผลการเปรียบเทียบเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการ ทดสอบการหาคำตอบซ้ำๆ กับกรณีศึกษา เดิม ซึ่งคาดเดาได้ว่าทั้ง PSO และ GA น่าจะสลับกันให้คำตอบที่ดีกว่า ในครั้งนี้จะทำการทดลองว่า วิธีใด (ในสองวิธีดังกล่าว) ให้คำตอบที่ดีกว่าบ่อยครั้งกว่า หลังจากนั้นทดลองโดยการเปลี่ยนโจทย์ และเปลี่ยนแปลงจำนวนเครื่องจักร และเพิ่มจำนวนงานเข้าไปในระบบ เพื่อสังเกตว่า ในกรณีที่ เปลี่ยน โจทย์ไปเรื่อยๆผลลัพธ์ที่ได้จะมีความเหมือนหรือแตกต่างจากเดิม มากน้อยเพียงใด และความแปรปรวนของทั้ง 2 วิธีมีค่าต่างกันอย่างไร

ผลที่ได้ดังตารางต่อไปนี้ ตารางที่ 8 เป็นการทดลองโดยใช้โจทย์คงที่แต่ให้หาคำตอบซ้ำๆ การทดลองครั้งนี้ โดยมีงาน 15 ชิ้น มีสถานีผลิต 15 สถานี และแต่ละสถานีมีเครื่องจักรที่เหมือนกัน ทั้งหมดสถานีละ 3 เครื่อง ผลการทดลองสรุปว่า ในการทำซ้ำทั้งหมด 20 ครั้ง มี 15 ครั้งที่ PSO ให้ คำตอบที่ดีกว่า และมี 5 ครั้งที่ GA ให้คำตอบที่ดีกว่า ค่าที่น้อยที่สุดมาจาก PSO ซึ่งได้ค่า 936 และ ค่าที่มากที่สุดมาจาก GA ได้ค่า 986 เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยพบว่า PSO ให้ค่าเฉลี่ยที่ดีกว่าคือ 960.7 ในขณะที่ GA ให้ค่า 970.85 แต่พบว่า ค่าความแปรปรวนของคำตอบที่ได้มาจาก PSO มีความแปรปรวน สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ GA คือ PSO ให้ค่าความแปรปรวน 119.17 ในขณะที่ GA ให้ค่าความ แปรปรวน 112.56

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบเมคสแปนของ 2 วิธีการ แบบทดลองซ้ำโจทยเดิม

ซ้ำครั้งที่	PSO	GA	ซ้ำครั้งที่	PSO	GA
1	953	979	11	936	951
2	972	961	12	963	965
3	940	978	13	975	971
4	960	975	14	949	984
5	954	957	15	958	954
6	965	956	16	954	986
7	958	985	17	965	975
8	978	975	18	973	979
9	962	975	19	967	965
10	965	970	20	967	976

สำหรับตารางที่ 9 เป็นการทดลองโดยปรับเปลี่ยนโจทย ซึ่งรายละเอียดดังนี้คือ 15 งาน 15 สถานีผลิต จำนวน 10 กรณีศึกษา 20 งาน 15 สถานีผลิต จำนวน 10 กรณีศึกษา และ 20 งาน 20 สถานีผลิต จำนวน 10 กรณีศึกษา ผลการทดลองพบว่า PSO ให้คำตอบที่ดีกว่า 22 ครั้ง ในขณะที่ GA ให้คำตอบที่ดีกว่า 7 ครั้ง และมี 1 ครั้งที่ให้คำตอบเท่ากัน

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบเมคสแปนของ 2 วิธีการ แบบทดลองกับปัญหาต่างๆ

ปัญหาที่	งาน	สถานี	PSO	GA
1	15	15	978	982
2	15	15	962	964
3	15	15	949	958
4	15	15	918	943
5	15	15	953	948
6	15	15	941	951
7	15	15	945	962
8	15	15	978	979
9	15	15	982	1010
10	15	15	966	956
11	20	15	983	995
12	20	15	1048	1043
13	20	15	999	1001
14	20	15	990	990
15	20	15	989	1020
16	20	15	1045	1055
17	20	15	1057	1065
18	20	15	980	1028
19	20	15	996	986
20	20	15	1019	1018
21	20	20	1292	1316
22	20	20	1283	1282
23	20	20	1245	1258
24	20	20	1252	1289
25	20	20	1263	1288
26	20	20	1293	1309
27	20	20	1341	1359
28	20	20	1317	1306
29	20	20	1309	1333
30	20	20	1275	1280

ตารางที่ 10 แสดงผลโดยนำผลลัพธ์จากตารางที่ 9 มาวิเคราะห์ จากตารางที่ 10 สดมภ์ที่ 1 แสดงถึงวิธีการที่นำมาแก้ปัญหา สดมภ์ที่ 2 แสดงถึงจำนวนเครื่องจักร สดมภ์ที่ 3 แสดงถึงสถานงาน สดมภ์ที่ 4 คือคำตอบที่ได้โดยเฉลี่ย (จากทั้งหมด 10 ปัญหา) สดมภ์ที่ 5 คือคำตอบที่ดีที่สุด และสดมภ์ที่ 6 คือคำตอบที่แย่ที่สุด สดมภ์ที่ 7 คือจำนวนครั้งที่ได้คำตอบดีกว่า (จาก 10 ครั้ง) และสดมภ์ที่ 8 คือเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของแต่ละวิธี

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบเมคสแปนจากวิธี GA และ PSO

Algorithm	Job	Station	AVG	Min	Max	Var	Win	Time(hr)
PSO	15	15	957.2	918	982	401.5111	8	00:08:45
GA	15	15	965.3	943	1010	402.0111	2	00:13:06
PSO	20	15	1010.6	980	1057	860.2667	6	00:23:35
GA	20	15	1020.1	986	1065	765.4333	3	00:34:16
PSO	20	20	1287	1245	1341	898.4444	8	00:43:15
GA	20	20	1302	1258	1359	850.6667	2	1:03:47

จากผลการทดลองเนื่องจากจำนวนครั้งที่ PSO ให้ค่าต่ำกว่า และ ค่าน้อยที่สุดของการทดลอง มักได้มาจาก PSO อาจพอสรุปได้ว่า วิธี PSO ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับ วิธี MT น่าจะให้ผลเฉลี่ยที่คาดได้ว่าดีกว่าการประยุกต์ใช้วิธี GA กับวิธี MT

การเปรียบเทียบการทำงานแบบมีช่วงเวลาหยุดงาน

การทดลองเรื่องสุดท้ายคือการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่า การจัดตารางการผลิตโดยไม่คำนึงถึง ช่วงเวลาหยุดเครื่องจักรมีผลต่อตารางการผลิตอย่างเห็นได้ชัด โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 40 กรณีศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย กลุ่มที่ 1 มี 15 งาน 15 เครื่องจักร 10 กรณีศึกษา กลุ่มที่ 2 มี 20 งาน 15 เครื่องจักร 10 กรณีศึกษา กลุ่มที่ 3 มี 20 งาน 20 เครื่องจักร 10 กรณีศึกษา และกลุ่มที่ 4 มี 30 งาน 15 เครื่องจักร 10 กรณีศึกษา ซึ่งรายละเอียดของการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เมคสแปนที่เปลี่ยนไปจากการหยุดพักงาน

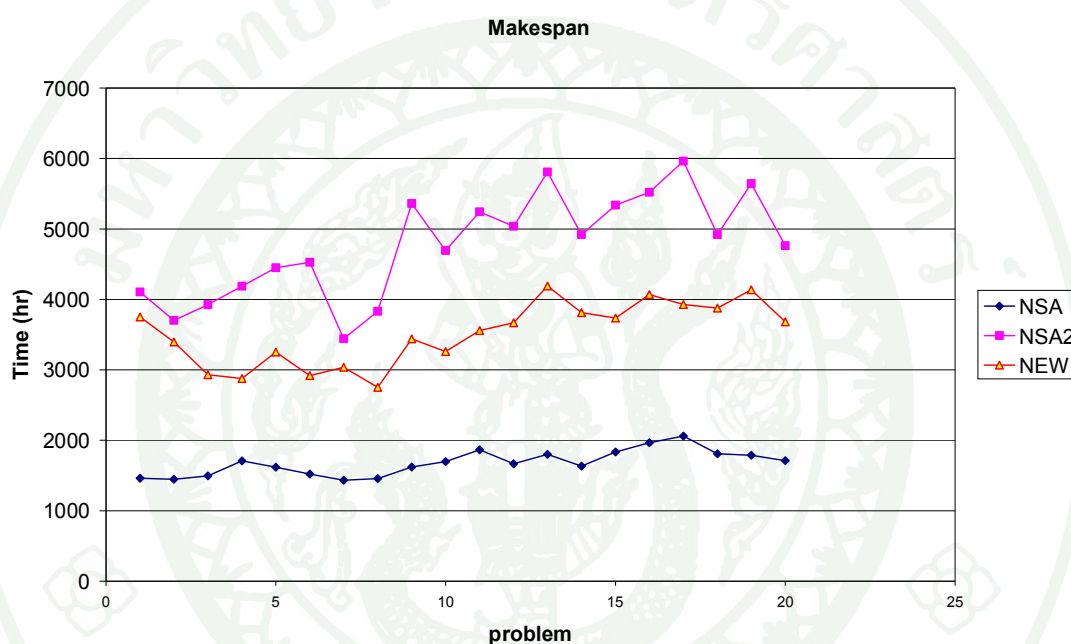
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	นอน ดีเลย์	เพิ่มเวลา หยุด	วิธีใหม่	คลาดเคลื่อน	ปรับปรุง	ปรับปรุง%
1	15	15	1462	4105	3751	2643	354	9.44
2	15	15	1446	3701	3395	2255	306	9.01
3	15	15	1495	3926	2930	2431	996	33.99
4	15	15	1708	4188	2877	2480	1311	45.57
5	15	15	1618	4449	3252	2831	1197	36.81
6	15	15	1522	4526	2917	3004	1609	55.16
7	15	15	1434	3442	3037	2008	405	13.34
8	15	15	1457	3831	2751	2374	1080	39.26
9	15	15	1622	5362	3440	3740	1922	55.87
10	15	15	1697	4693	3260	2996	1433	43.96
11	20	15	1865	5243	3558	3378	1685	47.36
12	20	15	1667	5037	3667	3370	1370	37.36
13	20	15	1802	5809	4189	4007	1620	38.67
14	20	15	1635	4918	3813	3283	1105	28.98
15	20	15	1835	5339	3735	3504	1604	42.95
16	20	15	1965	5520	4068	3555	1452	35.69
17	20	15	2059	5963	3927	3904	2036	51.85
18	20	15	1808	4919	3877	3111	1042	26.88
19	20	15	1789	5643	4137	3854	1506	36.40
20	20	15	1710	4762	3682	3052	1080	29.33
21	20	20	2175	6067	4656	3892	1411	30.30
22	20	20	1965	6118	4867	4153	1251	25.70
23	20	20	1933	5674	4091	3741	1583	38.69
24	20	20	2230	5719	4469	3489	1250	27.97
25	20	20	1950	5724	4431	3774	1293	29.18

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	นอน ดีเลย์	เพิ่มเวลา หยุด	วิธีใหม่	คลาดเคลื่อน	ปรับปรุง	ปรับปรุง%
26	20	20	2188	6003	4263	3815	1740	40.82
27	20	20	2096	5664	3907	3568	1757	44.97
28	20	20	1968	5344	4737	3376	607	12.81
29	20	20	2166	5396	4407	3230	989	22.44
30	20	20	1999	5589	4101	3590	1488	36.28
31	30	15	2335	7318	5909	4983	1409	23.84
32	30	15	2432	7595	4835	5163	2760	57.08
33	30	15	2453	7834	4915	5381	2919	59.39
34	30	15	2434	7884	5234	5450	2650	50.63
35	30	15	2497	8150	5385	5653	2765	51.35
36	30	15	2445	7934	5416	5489	2518	46.49
37	30	15	2664	8219	5482	5555	2737	49.93
38	30	15	2155	7100	4888	4945	2212	45.25
39	30	15	2477	7479	5349	5002	2130	39.82
40	30	15	2301	6375	5222	4074	1153	22.07

โดยสมรรถที่ 1 ถึง 3 คือรายละเอียดของปัญหา สมรรถที่ 4 คือการจัดตารางการผลิตใช้วิธีนอนดีเลย์ในการหาคำตอบ สมรรถที่ 5 เป็นการนำผลลัพธ์การเรียงลำดับด้วยวิธีนอนดีเลย์มาคิดเวลาเสร็จงานเสียใหม่ (Recalculation) โดยยึดลำดับเดิมไว้แต่บวกเพิ่มช่วงเวลาที่หยุดพัก สมรรถที่ 6 คือการจัดตารางการผลิตโดยใช้วิธีนอนดีเลย์แบบพิเศษที่นอนดีเลย์ที่คิดช่วงเวลาที่หยุดพักไปพร้อมๆ กับการจัดลำดับงาน ทำให้ลำดับที่จัดในตารางการผลิตไม่เหมือนนอนดีเลย์เดิม สมรรถที่ 7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนหรือผลต่าง ระหว่าง สมรรถที่ 4 และสมรรถที่ 5 ส่วนรายละเอียดของสมรรถที่ 8 คือความแตกต่างระหว่างสมรรถที่ 5 และ สมรรถที่ 6 (คิดเวลาหยุดไปพร้อมกับนอนดีเลย์) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้นอนดีเลย์ที่คิดช่วงเวลาที่หยุดงาน ให้คำตอบดีกว่าการคิดด้วยวิธีนอนดีเลย์ที่ไม่คิดช่วงหยุดงานทั้งๆที่โรงงานโดยส่วนใหญ่มีช่วงเวลาที่หยุดงาน

จากตารางที่ 11 นำข้อมูลมาสร้างเป็นกราฟเพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนของวิธีที่ปรับปรุง แกนตั้งแสดงเวลาในการผลิต และแกนนอน แสดงหมายเลขของปัญหาที่นำมาทดลองเรียงตามลำดับ ภาพที่ 31 แสดง 3 วิธีการเปรียบเทียบกัน กราฟเส้นที่อยู่ต่ำที่สุดคือกราฟที่ให้คำตอบดีกว่า ซึ่งกราฟ ที่อยู่ต่ำสุดคือข้อมูลจากสคมภ์ที่ 4 และกราฟที่สูงที่สุดมาจากสคมภ์ที่ 5 ส่วนกราฟเส้นกลางมาจาก ข้อมูลในสคมภ์ที่ 6 จากกราฟเป็นหลักฐานยืนยันว่าในการจัดตารางควรจะคำนึงถึงช่วงเวลาในการ หยุดพักเครื่องจักรเพราะจะทำให้ได้คำตอบที่ดีกว่า การจัดตารางโดยไม่คำนึงถึงการหยุดพักเพราะ เมื่อนำลำดับงานไปใช้จริงจะทำให้ได้เวลาเสร็จงานที่ล่าช้า



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบเมคสเปน สำหรับ 3 วิธี 40 กรณีศึกษา

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในส่วนสุดท้ายสรุปภาพรวมของงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำในขณะศึกษาระดับปริญญาเอก โดยเนื้อหาต่างๆที่จะนำเสนอประกอบด้วย ส่วนที่ 1 สรุปสาระสำคัญของวิธี MT ส่วนที่ 2 สาระสำคัญของวิธี GA และ PSO ที่ใช้ร่วมกับวิธี MT ส่วนที่ 3 สรุปสาระสำคัญการทำงานแบบมีช่วงเวลาหยุดพักเนื่องจาก เครื่องจักรหรือแรงงาน ส่วนที่ 4 สรุปประโยชน์จากงานวิจัย และ ส่วนสุดท้ายคืองานวิจัยที่น่าจะขยายผลต่อไปในอนาคตได้อย่างไร

สำหรับวิธี MT จุดเด่นของวิธีการอยู่ที่แต่ละรอบในการจัดลำดับงาน 1 งาน คำตอบที่ได้จะดีขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งแสดงไว้แล้วที่ผลการทดลองและจาก ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบ ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการหาคำตอบยังคงเป็นพหุนาม ในกรณีที่ เลือกใช้ฟังก์ชันการประเมินที่ใช้เวลาการหาคำตอบเป็นพหุนาม วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้แก้ปัญหา JSP ได้ดี และสามารถนำมาใช้ประเมินคำตอบร่วมกับ GA และ PSO ในการแก้ปัญหา FJSP ได้อีกด้วย

สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้แก้ปัญหา FJSP ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ 2 วิธี คือ GA และ PSO ซึ่ง GA มีจุดเด่นตรงที่การสร้างประชากรใหม่จากคำตอบเดิมที่หลากหลาย และวิธี PSO มีจุดเด่นที่ใช้จำนวนประชากรน้อยกว่าในการหาคำตอบ แต่ทั้ง 2 วิธีถูกนำมาเปรียบเทียบโดยพยายามปรับจำนวนคำตอบที่ใช้ประเมินให้ใกล้เคียงกัน เพื่อความเสมอภาคในการตรวจสอบประสิทธิภาพ จากผลการทดลองพอจะสรุปได้ว่า วิธี PSO ได้คำตอบที่ดีกว่าวิธี GA แต่การสรุปดังกล่าว สรุปได้เพียงในกรณีศึกษาของงานวิจัยฉบับนี้ที่นำ GA และ PSO มาใช้ร่วมกับ วิธี MT เท่านั้น แต่จะสรุปรวมในทุกๆกรณีไม่ได้ เพราะว่า การเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองก็ย่อมมีผลต่อคุณภาพของคำตอบ

ในระหว่างทำงานวิจัยเรื่อง FJSP ทำให้ทราบว่าเวลาการทำงานของเครื่องจักรในโรงงานเป็นการทำงานแบบมีช่วงเวลาหยุดพัก ดังนั้นจึงพัฒนาวิธีการคำนวณการจัดตารางการผลิตโดยคำนึงถึงช่วงเวลาหยุดพัก ซึ่งจากการทดลองพบว่า การจัดตารางแบบมีช่วงเวลาหยุดพักให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าการจัดตารางไม่คำนึงถึงช่วงเวลาหยุดพัก ถึงแม้ว่าวิธีการที่สร้างขึ้นจะถูกสร้างขึ้นเพื่อนำมาใช้กับปัญหา FJSP แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับการจัดตารางการผลิตแบบอื่นๆได้อีกด้วย แต่มีข้อจำกัดว่าเวลาในการหาคำตอบจะมากกว่าเดิมเพราะมีการเพิ่มขั้นตอนในระหว่างการจัดตาราง แต่ก็มีความสำคัญและน่าจะเป็นประโยชน์สำหรับโรงงานที่ทำงานเป็นช่วงเวลา

สำหรับประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้ ถ้าเป็นไปได้ผู้วิจัยก็ต้องการจะให้ งานวิจัยในระดับปริญญาเอก ฉบับนี้ มีประโยชน์ต่อสังคมให้มากที่สุดโดยคิดว่าเมื่อทำงานวิจัยจบ แล้ว จะพยายามนำขั้นตอนวิธีเพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์กับภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย และ คาดหวังว่าถ้ามีนักวิจัยรุ่นต่อไป จะนำงานวิจัยฉบับนี้มาอ่าน เป็นแนวทางให้เกิดแนวคิดเพื่อให้เกิด วิธีการใหม่ๆ ที่นำไปใช้กับภาคอุตสาหกรรม สำหรับประโยชน์ของขั้นตอนวิธีต่างๆ อาจพอสรุปได้ ว่า วิธี MT น่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหา JSP และปัญหาอื่นๆ ได้ ด้วยแนวคิดที่ว่า รู้ค่า เป้าหมายก่อนเลือกน่าจะดีกว่าการเลือกโดยใช้กฎที่คาดว่าจะดี สำหรับวิธี GA และ PSO ที่นำเสนอ นักวิจัยสามารถปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานใน โรงงานหรือปัญหาที่นำมาหาคำตอบ สำหรับวิธีการในการคำนวณ สำหรับการคำนวณแบบกะการทำงานสามารถใช้กับการจัดตารางการ ผลิตได้หลากหลายชนิด น่าจะใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง

สำหรับตัวผู้วิจัยเอง ได้วางแผนไว้ว่าจะนำความรู้ความสามารถที่ได้รับจากการทำวิจัยและ การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในแง่ของการถ่ายทอดให้กับนักศึกษาและ นักวิจัย รวมถึงนำความรู้ไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะของที่ปรึกษาโรงงาน และเขียนโปรแกรม คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรมในส่วนของการวางแผนการผลิต โดยคาดหวังว่าจะทำ ให้เต็มที่ให้สมกับที่ได้รับ โอกาสในการศึกษาและได้ทำวิจัยในมหาวิทยาลัยที่มีชื่อเสียงแห่งนี้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Askin, R.G. and C.R. Standridge. 1993. **Modeling and Analysis of Manufacturing Systems**. John Wiley and sons Inc, Florida.
- Bouri, A.E. and P. Shah. 2006. A neural network for dispatching rule selection in a job shop. **International Journal Advance Manufacturing Technology** 31: 342-349.
- Caumond, A., P. Lacomme and N. Tchernev. 2008. A memmatic algorithm for the job shop with time-lags. **Computers and Operations research** 35(7): 2331-2356.
- Choi, I. and D. Choi. 2002. A local search algorithm for job shop scheduling problems with alternative operations and sequence dependent setups. **Computer and Industrial Engineering** 42: 43-58.
- Dominic, P., D. Durai, S. Kaliyamoorthy and R. Murugan. 2004. A conflict-based priority dispatching rule and operation-based approaches to job shops. **International Journal Advance Manufacturing Technology** 24: 76-80.
- Drobouchevitch, I.G. and V. A. Strusevich. 2000. Heuristic for the two stage job shop scheduling problem with a bottleneck machine. **European Journal of Operational Research** 123: 229-240.
- Ganesen, V.K. and A. I. Sivakumar. 2006a. Hierarchical minimization of completion time variance and makespan in jobshops. **Computer and Operational research** 33: 1345-1367.
- _____. 2006b. Scheduling in static jobshops for minimizing mean flowtime subject to minimum total deviation of job completion time. **International Journal Production Economics** 103: 633-647.

- Gao, J., L. San. and M. Gen. 2008. A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. **Com. and Ope. Res.** 35: 2892-2907.
- _____, M. Gen, L. Sun and X. Shao. 2007. A hybrid of genetic algorithm and the bottle shifting for multi objective flexible job shop scheduling problem. **Computers and Industrial Engineering** 53: 149-162.
- Guinet, A. 2000. Efficiency of reduction of job shop to flow shop problems. **European Journal of Operational Research** 125: 469-485.
- Ho, N.B., J.C. Tay and E.M.K. Lai. 2007. An effective architecture for learning and evolving flexible job-shop schedules. **Eur. J. of Oper. Res.** 179: 316-333.
- Huang W.Q. and Z. Huang. 2004. Algorithm based on taboo search and shifting bottleneck for job shop scheduling. **Journal of Computer Science and Technology** 19(6): 776-781.
- Jansen, K., M. Mastrolilli and R. S. Oba. 2005. Approximation scheme for job shop scheduling problem with controllable processing time. **European Journal of Operational Research** 167: 297-319.
- Jensen. M.T. 2003. Generating robust and flexible job-shop schedules using genetic algorithms. **IEEE Transaction** 7(3): 275-288.
- Koonce, D.A. and S.C. Tsai. 2000. Using data mining to find patterns in genetic algorithm solutions to a job shop schedule. **Computer and Industrial Engineering** 38: 361-374.
- Lee, C., L. Lei and M. Pinedo. 1997. Current trends in deterministic scheduling. **Annals of Operations Research** 70: 1-40.

- Ma, Y., C. Chu and C. Zuo. 2010. A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints. **Computers and Industrial Engineering**. 58: 199-211.
- Najid, N.M. and staff. 2002. A modified simulated annealing method for flexible job shop scheduling problem. pp. 0-6. *In* **System, Man and Cybernet, 2002 IEEE International Conference**. 6-9 October 2002, Nantes, France.
- Ohta, H. and T. Nakatani. 2006. A heuristic job-shop scheduling algorithm to minimize the total holding cost of completed and in-process products subject to no tardy jobs. **International Journal Production Economics** 101: 19-29.
- Pezzella, F., G. Morganti. and G. Ciaschetti. 2008. A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. **Com. and Ope. Res.** 35: 3202-3212.
- Pham, D.N. and A. Klingert. 2008. Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research** 185: 1011-1025.
- Rajendran, C. and O. Holthaus. 1990. A comparative of study of dispatching rules in dynamic flow shops and job shops. **European Journal of Operational Research** 116: 156-170.
- Rossi, A. and E. Boschi. 2008. A hybrid heuristic to solve the parallel machines job-shop scheduling problem. **Adv. in Eng. Sof.** 40(2): 118-127.
- Sanlaville, E. and G. Schmidt 1998. Machine scheduling with available constraints. **Acta Informatica**. 35: 795-811.
- Schmidt, G. 2000. Scheduling with limited machine availability. **European Journal of Operational Research** 121: 1-15.

- Tanve, I., T.Uozumi. and Y. Morotome. 2004. Hybrid evolutionary algorithm-based real-world flexible job-shop scheduling: application service provider approach. **App. Soft Com.** 5: 87-100.
- Tay, J.C. and and D. Wibowo. 2004. An effective chromosome representation for Evolving flexible job shop schedules. **LNCS.** 3013: 210-221.
- _____ and, N.B. Ho 1010. Evolving dispatching rule for solving the flexible job-shop problem. **IEEE Explore at Kasetsart University, Bangkok.**
- Watanabe, M., K. Ida and M. Gen. 2005. A genetic algorithm with modified crossover operator and search area adaptation for the job-shop scheduling problem. **Computer and Industrial Engineering** 48: 743-752.
- Xia, W. and Z. Wu. 2005. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. **Comput. and Ind. Eng.** 48: 409-425.
- _____. 2006. A hybrid particle swarm optimization approach for the job-shop scheduling problem. **International journal advance manufacturing technology** 29: 360-366.
- Xing, L.N., Y.W. Chen. and K.W. Yang. 2008. Multi-objective flexible job-shop schedule: Design and evaluation by simulation modeling. **Applied Soft Computing.** 9(1): 362-376.
- Zribi, N. ,and staff. 2004. Optimization by phases for the flexible job-shop scheduling problem. In **Proceedings of the 5th Asian Control Conference.** 20 July 2004, The University of Melbourne, Australia.
- Zribi, N., A. El Kamel. and P. Borne. 2006. Total Tardiness in a flexible job-shop. **IMACS.Conf.** October 4-6,2006 Beijing China.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	คณะ พลอยคนัย
วัน เดือน ปีเกิด	5 มีนาคม 2519
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัด ภูเก็ต
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมการผลิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วศ.ม. (วิศวกรรมการผลิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
งานปัจจุบัน	อาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการลดต้นทุน (CORE-4 และ CORE-5)
ความถนัด	เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในงานด้านการวางแผนการผลิตการพัฒนา ขั้นตอนวิธีในงานวิจัยด้านการวิจัยดำเนินงาน (Operation research)