สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนานแบบหลายจุดประสงค์

ทวีพร ขำดี

31 ส.ค. 2559
365486 TH 002451

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ตุลาคม 2554
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

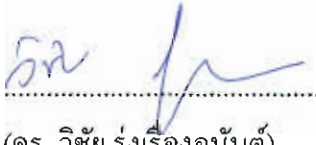
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ ทวีพร ขำดี ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

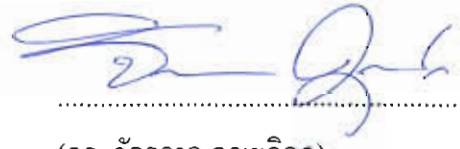
(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์



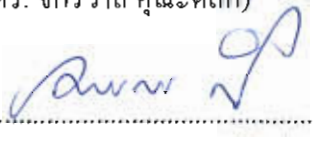
..... ประธาน

(ดร. วิชัย รุ่งเรืองอนันต์)



..... กรรมการ

(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ลิลา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย ศรีวิริยรัตน์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 15 เดือน มิถุนายน พ.ศ 2555

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.จักรวาล คุณะดิลก อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ทวีพร ขำดี

51926354: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)
คำสำคัญ: การจัดตารางการผลิตแบบหลายจุดประสงค์, การค้นหาวิธีทาบู

ทวีพร ขำดี: การจัดตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรขนานแบบหลายจุดประสงค์ (MULTIOBJECTIVES PARALLEL MACHINES SCHEDULING) อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์: ดร. จักรวาล คุณะดิลก, Ph.D., 97 หน้า. ปี พ.ศ. 2554.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานให้กับเครื่องจักรแบบขนานที่มีประสิทธิภาพของเครื่องจักรแตกต่างกัน รวมถึงเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรขึ้นอยู่กับลำดับงานก่อนหน้าโดยมีเป้าหมายให้เวลาปิดงานต่ำที่สุด และจำนวนงานสายน้อยที่สุด แนวทางในการจัดตารางการผลิตใช้การค้นหาซ้ำด้วยวิธีทาบูโดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดรวมทั้ง ออกแบบรายการข้อห้ามหลายรูปแบบที่สอดคล้องกับเป้าหมายของการจัดตารางการผลิต ผลการวิจัยพบว่าตารางการผลิตที่จัดด้วยวิธีที่เสนอมีเวลาปิดงานและจำนวนงานสายลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตโดยอาศัยหลักการที่ใช้จัดลำดับงานเวลาการผลิตน้อยที่สุด (SPT) และกำหนดส่งมอบหลังสุด (EDD) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตจากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าเฉลี่ยของเวลาปิดงานลดลง 17.5 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนงานสายโดยเฉลี่ยลดลง 1.8 งาน

51926354: MAJOR: INDUSTRIAL ENGINEERING; M.ENG.
(INDUSTRIAL ENGINEERING)
KEYWORDS: MULTI-OBJECTIVES SCHEDULING, PARALLE MACHINES,
TABU SEARCH

THAWEEPORN KHAMDEE: MULTIOBJECTIVES PARALLEL MACHINES SCHEDULING ADVISOR: JAKRAWARN KUNADILOK, Ph.D., 97 P. 2011.

This research was to study and develop a method for production scheduling of jobs to parallel machines with different performances. Each job required setup activities before production where the setup time depended on the precedence job scheduled on its assigned machine. The scheduling goals were to minimize makespan and number of tardy jobs. Tabu search approach was used for scheduling this problem. Several models of neighborhood structures and tabu lists were designed corresponding to the scheduling goals. The results revealed that the production schedule created by using the proposed tabu search can reduce makespan and the number of tardy jobs compared to scheduling with Shortest Processing Time and Earliest Due Date methods. It was found that the proposed tabu search outperformed the scheduling methods from previous research when using real production data sets in comparison. The average makespan and the average number of tardy jobs were decreased 17.5 % and 1.8 jobs, respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
แผนการดำเนินงาน	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	2
วิธีการวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ความหมายของการจัดตารางการผลิต	4
คำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย	4
การจัดเรียงเครื่องจักรแบบขนาน	5
ลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของกระบวนการ	5
วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับงาน	6
ประเภทของปัญหาการจัดลำดับและตารางเวลา	7
การจัดลำดับงานและกำหนดการผลิตงาน	9
ปัญหาเอ็นพีแบบในการศึกษาการจัดตารางการผลิต	10
ทฤษฎีฮิวริสติก	12
วิธีฮิวริสติกมาตรฐาน	14
วิธีการจัดตารางการผลิตแบบทาบู	15
หน่วยความจำระยะสั้นวิธีทาบู	17
กฎการจ่ายงาน	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	โปรแกรมไมโครซอฟต์วิชวล C ++	18
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
	วิธีการจัดตารางการผลิต	25
	การเปรียบเทียบผลลัพธ์วิธีการ ทางฮิวริสติกที่ทำการออกแบบ	43
4	ผลการทดลอง	44
	ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่ใช้ในการทดลอง	44
	วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์	50
	ผลการทดลองสำหรับปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์	54
	อธิปรายผลจากการทดลองด้วยปัญหาจากคอมพิวเตอร์	61
	ผลการทดลองสำหรับปัญหาขนาดเล็กที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	61
	อธิปรายผลจากปัญหาขนาดเล็กที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	64
	ผลการทดลองสำหรับปัญหาภาคอุตสาหกรรม	64
	อธิปรายผลจากปัญหาภาคอุตสาหกรรม	66
5	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	68
	สรุปผลการวิจัย	68
	ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม		71
ภาคผนวก		73
ประวัติย่อของผู้วิจัย		89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	ตัวอย่างข้อมูลด้านการผลิต	29
3-2	สรุปผลเวลาของงานที่ผลิตไม่ทันกำหนดส่ง	30
3-3	แสดงผลลัพธ์ข้างเคียงของการแทรกดำแหน่งงานที่ 5	31
3-4	ข้อมูลด้านการผลิตของตัวอย่างวิธีสลับงาน	32
3-5	สรุปผลเวลารวมของการปิดงานของลำดับงาน 3-1-2-5-4	33
3-6	แสดงผลลัพธ์ข้างเคียงจากการสลับงานที่ผลลัพธ์ตั้งต้น 3-1-2-5-4	34
3-7	การวิเคราะห์วิธีการสร้างผลลัพธ์ด้วยการแทรกงานและการสลับงาน	35
4-1	วัตถุประสงค์ของการแบ่งปัญหาในงานวิจัย	44
4-2	ตารางการผลิตสำหรับการจัดลำดับงานลงบนเครื่องจักรขนาน 2 เครื่อง	46
4-3	กลุ่มเครื่องจักรของงานอุตสาหกรรม	47
4-4	เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักร	48
4-5	ผลการทดสอบของโปรแกรมการจัดตารางการผลิตของกรณีศึกษา	49
4-6	ค่าเวลาของกรณีศึกษา	50
4-7	ปัญหาขนาดเล็ก 5 งาน 2 เครื่องจักร	51
4-8	การจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD บนเครื่องจักรขนาน	51
4-9	วิเคราะห์หาลำดับงาน SPT	53
4-10	ผลลัพธ์การทดลองของรูปแบบ 3(100)	55
4-11	สรุปผลลัพธ์การทดลองการปรับตั้งจำนวนความยาวทาบู	56
4-12	ผลลัพธ์ค่าเวลาปิดงานของรอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย	59
4-13	ผลลัพธ์จำนวนงานสายของรอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย	60
4-14	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	62
4-15	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาปิดงานเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์จากผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	63
4-16	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนงานสายเป็นผลต่างจากผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	63
4-17	ผลการทดลองจัดตารางการผลิตจากกรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรม	65
4-18	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ของปัญหากรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรม	65
4-19	เปรียบเทียบรูปแบบทาบูที่ออกแบบกับ SPT1	66
4-20	ลำดับงานในเครื่องจักรของปัญหาอุตสาหกรรม	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย	12
2-2	การค้นหาทาบู	16
3-1	แสดงโครงสร้างของวิธีทาบู	26
3-2	ตารางการผลิตของวิธีการจัดด้วย EDD	29
3-3	ตารางการผลิตวิธีการแทรกงาน	31
3-4	ตารางการผลิตการจัดด้วยวิธี SPT	33
3-5	ตารางการผลิตวิธีการสลับในรูปแบบที่ 1	36
3-6	ตารางการผลิตวิธีการแทรกในรูปแบบที่ 1	37
3-7	โครงสร้างเนเบอร์ฮูดรูปแบบที่ 1	37
3-8	ตารางการผลิตวิธีการแทรกในรูปแบบที่ 2	38
3-9	โครงสร้างเนเบอร์ฮูดรูปแบบที่ 2	39
3-10	แผนผังแสดงรูปแบบที่ 3	41
3-11	เส้นทางของผลลัพธ์ในรูปแบบ 1 และ 2	42
3-12	เส้นทางของผลลัพธ์ในรูปแบบ 3	43
4-1	รูปแบบการแสดงผลของการสร้างกลุ่มปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์	45
4-2	ตารางการผลิตด้วยวิธี EDD	52
4-3	ตารางการผลิตด้วยวิธี SPT	54
4-4	ช่วงยาวที่สุดของจำนวนรอบการค้นหาที่ลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลง	57
4-5	กราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างความยาวจำนวนรอบการค้นหากับจำนวนงาน	58
4-6	ผลลัพธ์การจัดตารางการผลิตจากปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์	61

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจัดตารางการผลิตเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เนื่องจากการจัดตารางการผลิต นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพขององค์กร โดยต้องพยายามจัดตารางการผลิตให้มีความเหมาะสม มิฉะนั้นจะทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมาเช่น การส่งงานสาย ผลิตสินค้าไม่ทันความต้องการ ของลูกค้า ส่งผลทำให้เสียชื่อเสียงขององค์กรเป็นต้น นอกจากนี้ยังส่งผลถึงกำลังการผลิตของเครื่องจักรได้ การจัดสายการผลิตที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นผลอย่างมากในการส่งงานช้า กว่ากำหนด ฉะนั้นการจัดตารางการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพทำให้ลดปัญหาการส่งงานได้

ขั้นตอนการผลิตของสายการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งประกอบด้วยเครื่องจักรแบบขนานเพื่อให้สามารถทำงานให้เสร็จตามเป้าหมายได้โดยการผ่านเครื่องจักรใดเครื่องจักรหนึ่ง ซึ่งเครื่องจักรแต่ละเครื่องนั้นอาจจะเป็นเครื่องจักรที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ มีอัตราการผลิตงานที่เหมือนกันไม่เท่ากัน แต่ทุกเครื่องสามารถทำงานชนิดเดียวกันได้ โดยมีเงื่อนไขทางด้านเวลาในการทำงานที่ต่างกันเข้ามา จึงเกิดความยุ่งยากในการตัดสินใจที่จะเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานในแต่ละงาน การเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมนั้นจึงเป็นหนทางหนึ่งที่จะจัดการทำงานได้อย่างเหมาะสมและ ลดเวลาของงานที่ส่งล่าช้าได้

ในการผลิตงานหนึ่งบนเครื่องจักรที่กำหนด ต้องทำการเตรียมความพร้อมของเครื่องจักรนี้ก่อนทำการผลิตจริง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของงานอาจมีการทำความสะอาดเครื่องจักรและทำการติดตั้งเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตงานที่กำลังจะผลิต ดังนั้นลำดับงานที่เข้าเครื่องจักรแต่ละเครื่องก่อนและหลัง จะมีผลที่ทำให้เวลาในการติดตั้งแตกต่างกันออกไป ถ้าไม่มีการจัดลำดับงานในการเข้าทำงานให้ดีก็จะส่งผลทำให้เสียเวลาในการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์และ ทำความสะอาดก่อนเปลี่ยนงานมากขึ้นก็จะส่งผลให้การผลิตอาจเกิดการส่งงานที่ล่าช้าได้

ดังนั้นการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนานสามารถช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ได้หลากหลายรูปแบบตัวอย่างเช่น นัฐพงศ์ สุดพุ่ม และ สรรพสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์ (2550) ได้ใช้วิธีการฮิวริสติกเพื่อค้นหาผลลัพธ์ในการจัดตารางการผลิตที่ให้เวลาปิดงานที่ดีได้ ณัชชา คารอน (2551) ได้ใช้วิธีฮิวริสติกซึ่งประยุกต์จากกฎพื้นฐานของการจัดตารางการผลิตเพื่อพัฒนาผลลัพธ์จากงานอุดสาหกรรมในด้านลดจำนวนงานสายและ ลดเวลาการปฏิบัติงาน ณัฐวร ยมพูล และ เตือนใจ

สมบรูณ์วิวัฒน์ (2550) ได้ใช้วิธีฮิวริสติกที่เป็นการค้นหาแบบทาบูเพื่อพัฒนาผลลัพธ์เวลาล่าช้ารวม และงานวิจัยอื่น ๆ อีกมากมายที่ทำการแก้ไขปัญหาการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนาน จนประสบความสำเร็จในทุก ๆ จุดประสงค์ งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจที่จะพัฒนาการจัดตาราง การผลิตของเครื่องจักรขนานเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีแบบผสมผสานกับกับเวลาปิดงานกับจำนวน งานสาย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานให้กับเครื่องจักรแบบขนานที่ มีประสิทธิภาพของเครื่องจักรแตกต่างกัน มีเป้าหมายให้เวลาปิดงานต่ำ (Minimum makespan) มี จำนวนงานสายน้อยที่สุด (Minimum number of tardy jobs)

ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้แนวทางการแก้ไขปัญหาโดยอาศัยเทคนิคของการค้นหาซ้ำ (Iterative search)
2. การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดคารางการผลิตการผลิตที่ออกแบบทำโดย
   2.1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาวิธีการจัดตารางการผลิต
   2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้ปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนาน
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม C++
3. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัย
4. เขียนโปรแกรมเพื่อทำการทดลองแก้ปัญหา
5. ออกแบบวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีฮิวริสติกแบบต่าง ๆ
6. ทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดตารางการผลิตตามที่เสนอ
7. สรุปผลงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนาน
2. ลดจำนวนงานสายที่เกิดขึ้น
3. เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการจัดตารางการผลิตในรูปแบบอื่น ๆต่อไป

วิธีการวิจัย

1. กำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย
2. สำรวจและศึกษางานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต
3. ศึกษาข้อมูลและวิธีการทดสอบของงานวิจัย
4. เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
5. วิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบการจัดตารางการผลิต
6. ออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาการจัดลำดับงานที่เป็นไปได้ในการวางแผนการจัดตารางการผลิต
7. สรุปผลการทำงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต รูปแบบการจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักร วิธีในการจัดตารางการผลิตแบบต่าง ๆ ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการทำโครงงานนี้ต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ความหมายของการจัดตารางการผลิต

สุปัญญาไชยชาญ (2540) การจัดตารางการผลิต (Production scheduling) หมายถึง การจัดสรรทรัพยากรการผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เหมาะสมกับงานจำนวนหนึ่งภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้ว ซึ่งเป็นการจัดลำดับความสำคัญก่อนหลังของขั้นตอนการผลิต เพื่อให้การใช้ทรัพยากรเกิดประสิทธิภาพสูงสุดตามเป้าหมายของบริษัทที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งทรัพยากรที่มีอยู่ในที่นี้คือเครื่องจักร โดยบ่งบอกว่าจะผลิตอะไร เมื่อไหร่ โดยใคร ใช้ทรัพยากรอะไรบ้าง และใช้ระยะเวลายาวนานแค่ไหน

2. คำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 เวลาในการดำเนินการ (Processing time: t_i) คือเวลาที่คาดว่าจะใช้ในการดำเนินการของงาน i ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสำเร็จ เวลาที่คาดการณ์นี้ควรรวมเวลาในการเตรียมเครื่องจักรก่อนการดำเนินการด้วย

2.2 กำหนดส่ง (Due date: d_i) คือกำหนดที่งาน i ต้องส่งให้กับลูกค้าถ้าไม่สามารถส่งได้ตามกำหนดจะนับเป็นการส่งงานไม่ทันและอาจต้องจ่ายค่าปรับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างองค์กรและลูกค้า

2.3 จำนวนหน่วยเวลาที่เบี่ยงเบนไปจากกำหนดส่ง (Lateness: L_i) คือความเบี่ยงเบนระหว่างกำหนดส่งงาน กับเวลาที่งานเสร็จสมบูรณ์ ดังนั้น $L_i = C_i - d_i$ และมีค่าเป็นบวกถ้างานเสร็จไม่ทันกำหนด ในทางตรงกันข้าม ค่านี้จะเป็นลบถ้าเสร็จก่อนกำหนดส่งงาน

2.4 จำนวนงานส่งไม่ทัน (Tardiness: T_i) คือ การวัดจำนวนหน่วยเวลาที่เบี่ยงเบนไปจากกำหนดส่ง L_i เป็นบวก

2.5 เวลาเหลือ (Slack: SL_i) เป็นการวัดเวลาที่เหลือก่อนกำหนดส่งงาน เพื่อตรวจสอบว่าเพียงพอต่อการดำเนินการให้ทันเวลาหรือไม่ โดย $SL_i = d_i - t_i$ ถ้าเป็นบวก แสดงว่ายังมีเวลา

เพียงพอที่จะดำเนินการผลิตให้ทันตามกำหนดส่ง ถ้าเป็นลบแสดงว่างาน i จะไม่สามารถเสร็จตามกำหนดได้

2.6 เวลางานเสร็จ (Completion time: C_i) คือ เวลาที่งาน i เสร็จสมบูรณ์

2.7 เวลางานในกระบวนการ (Flow time: F_i) คือ ช่วงเวลาตั้งแต่งานเข้าสู่ระบบการผลิตจนกระทั่งเสร็จและส่งให้กับลูกค้าต่อไป ดังนั้น F_i จึงเท่ากับผลรวมของ t_i และเวลาที่งานต้องรอที่แต่ละสถานีงาน

2.8 เวลาปิดงานของระบบ (Makespan: C_{max}) หมายถึงเวลาที่ระบบทำงานชิ้นสุดท้ายสิ้นสุดซึ่งการจัดตารางการผลิตที่มีเวลาปิดน้อยที่สุดจะส่งผลให้เกิดการผลิตที่มีปริมาณมากที่สุด

3. การจัดเรียงเครื่องจักรแบบขนาน

ปารเมศ ชุติมา (2551) การเรียงเครื่องจักรมีอยู่หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับระบบการทำงานขององค์กร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับเครื่องจักรขนาน (Parallel machines) สามารถอธิบายได้ดังนี้ งานสามารถเลือกทำบนเครื่องจักรใดก็ได้จากจำนวนของเครื่องจักรขนานที่มีอยู่ การนำเครื่องจักรขนานมาใช้งานในระบบผลิตจะทำให้ระบบผลิตมีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น ถ้ามีการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักรขนานทั้งแบบที่เหมือนกันทุกประการ (Identical) หรือแบบที่ไม่เหมือนกัน (Non-identical) อย่างมีประสิทธิภาพ และจะทำให้เวลาปิดงานของระบบ (Makespan) ลดลงอย่างมาก เครื่องจักรขนานในที่นี้หมายถึงเครื่องจักรประเภทเดียวกันที่สามารถทำงานทดแทนกันได้ การมีเครื่องจักรประเภทนี้อยู่ในระบบผลิตจะทำให้แนวทางในการจัดตารางเปลี่ยนไปจากการพิจารณาในเรื่องของการจัดลำดับงานเพียงอย่างเดียวดังเช่นในกรณีเครื่องจักรเดี่ยวส่งผลให้ต้องพิจารณาในเรื่องการจัดสรรงานลงบนเครื่องจักรที่เหมาะสมร่วมอีกด้วย

4. ลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของกระบวนการ

ปารเมศ ชุติมา (2546) ระบบผลิตอาจมีลักษณะสมบัติเฉพาะตัว ไม่เหมือนกับระบบอื่นบางประการ เราสามารถนำเอาลักษณะสมบัติและข้อจำกัดที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของระบบเหล่านี้มาพิจารณา เพื่อใช้เป็นสมมติฐานในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจัดตารางต่อไปได้ ซึ่งมีต่อไปนี้

4.1 เวลาตั้งเครื่องจักรขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้า (Sequence dependent setup time)

4.2 ข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence constraint)

4.3 ข้อจำกัดด้านเส้นทางงาน (Routing constraint)

4.4 ข้อจำกัดด้านเครื่องจักรที่เลือกได้ (Machine-eligibility constraint)

4.5 ข้อจำกัดด้านเครื่องมือและทรัพยากร (Tooling and resource constraint)

4.6 ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ (Material-handing constraint)

4.7 ข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บและเวลาคอย (Storage space and waiting time constraint)

4.8 ข้อจำกัดด้านการจัดตารางกำลังพล (Personnal scheduling constraint)

4.9 การแทรกงาน (Preemption)

4.10 การแยกงาน (Job splitting)

4.11 การผลิตซ้อนขั้นตอน (Lap phasing)

4.12 การเสีย (Breakdown)

4.13 การสลับตำแหน่ง (Permutation)

4.14 การบล็อก (Blocking)

4.15 การไม่คอย (No wait)

4.16 การเวียนซ้ำ (Recirculation)

5. วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับงาน

บรรหาญ ลิลา (2553) การจัดลำดับงานเป็นการวางแผนว่า แรงงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ จะต้องใช้ในงานใด เพื่อให้เกิดผลดีต่อองค์กรมากที่สุด คำว่าผลดีต่อองค์กรนั้นอาจมีความหมายที่แตกต่างกันไปสำหรับองค์กรที่แตกต่างกัน เพราะธรรมชาติการดำเนินการที่แตกต่างกัน นโยบายที่แตกต่างกัน ตลอดจนกลุ่มเป้าหมายที่แตกต่างกัน เป็นต้น อย่างไรก็ตามเป้าหมายของการจัดลำดับงานขององค์กรต่าง ๆ มักจะมีเป้าหมายที่คล้ายกันซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลิตให้สามารถส่งได้ทันตามกำหนด

5.2 ทำให้งานที่ส่งไม่ทันหรือ เวลาที่ส่งไม่ทันน้อยที่สุด

5.3 ทำให้เวลาในการตอบสนองต่อลูกค้าสั้นที่สุด

5.4 ทำให้เวลาในการดำเนินการเสร็จสั้นที่สุด

5.5 ทำให้เวลาของงานในระบบสั้นที่สุด

5.6 ลดการทำงานล่วงเวลา

5.7 ทำให้อัตราการใช้ประโยชน์ของแรงงาน เครื่องจักร อุปกรณ์สูง

5.8 ลดเวลาว่างงานของแรงงาน เครื่องจักร อุปกรณ์

5.9 ลดงานที่อยู่ระหว่างการผลิต

ปารเมศ ชุติมา (2546) ได้แบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็น 3 ด้านคือ วัตถุประสงค์ด้านปริมาณผลผลิต วัตถุประสงค์ด้านการส่งมอบ และวัตถุประสงค์ด้านค่าใช้จ่าย ในวัตถุประสงค์ก็จะแยกย่อยอีกได้ดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์ด้านปริมาณผลผลิต

- เวลาไหลของงาน (Flow time)
- เวลาปิดงานของระบบ (Makespan)

2. วัตถุประสงค์ด้านกำหนดส่งมอบ
- เวลาสาย (Lateness)
- เวลาล่าช้า (Tardiness)
- จำนวนงานสาย (Number of tardy jobs)

3. วัตถุประสงค์ด้านค่าใช้จ่าย
- เวลาเสร็จงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (Total weighted completion time)
- เวลาเสร็จงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนักและหักลด (Discounted total weighted completion time)
- ค่าใช้จ่ายด้านปรับตั้งเครื่อง (Setup cost)
- ค่าใช้จ่ายด้านพัสดุคงคลังของงานระหว่างกระบวนการ (Work in process inventory cost)
- ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร (Parsonnel cost)

6. ประเภทของปัญหาการจัดลำดับและตารางเวลา

Sule (1997) กล่าวว่า รูปแบบของตารางเวลาในการวางแผนการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 10 กลุ่มดังนี้

6.1 เครื่องจักรเดียว (Single machine) มีเพียงเครื่องจักรเดียวที่ใช้ในการผลิต และทุกงานต้องถูกผลิตโดยเครื่องจักรนี้ งานถูกผลิตเพียงครั้งเดียว แต่ละงานมีเวลาในการผลิต และกำหนดเวลาส่งมอบที่แตกต่างกันไป เราอาจกำหนดฟังก์ชั่นของความสูญเสียของงานที่เกิดจากการเบี่ยงเบนกำหนดเวลาส่งมอบ วัตถุประสงค์โดยทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการทำให้เวลาการส่งมอบช้ากว่ากำหนดให้น้อยที่สุด เรียกว่า Tardiness penalty ส่วนวัตถุประสงค์อื่น ๆ นั้นขึ้นอยู่กับเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ต้องการพัฒนาตารางเวลานั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น

6.1.1 งานที่เป็นอิสระต่อกัน (Independent jobs) เป็นงานที่ไม่มีข้อจำกัดด้านลำดับการทำงาน

1) รูปแบบของเวลาเสร็จสิ้น (Completion time models)
2) รูปแบบของเวลาล่าช้าโดยรวม (Lateness models)
3) รูปแบบของเวลาที่ล่าช้า (Tardiness models)

6.1.2 งานที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน (Dependent jobs) เป็นงานที่มีข้อจำกัดด้านลำดับการทำงาน ที่มีโครงสร้างเฉพาะของลำดับงาน (Special precedence structures) ที่แตกต่างกัน

1) รูปแบบของเวลาเสร็จสิ้นโดยรวม (Total completion time models)

2) รูปแบบปัญหากำหนดเวลาการส่งมอบ (Due-date problems)

3) รูปแบบปัญหาเวลาการเตรียมงาน (Sequence-dependent setup problems)

6.2 การผลิตแบบสายงาน (Flow shop) งานจะถูกผลิตด้วยเครื่องจักรหลายตัวที่มีลำดับการผลิตเดียวกัน อย่างไรก็ตามเวลาในการผลิตของแต่ละงาน ด้วยเครื่องจักรเดียวกันอาจจะแตกต่างกันได้ วัตถุประสงค์โดยทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการทำให้เวลาการผลิตโดยรวมน้อยที่สุด

6.3 เครื่องจักรแบบขนาน (Parallel machines) มีเครื่องจักรที่เป็นอิสระต่อกันหลายตัว และแต่ละงานมีความต้องการการผลิตจากเครื่องจักรเพียงเครื่องเดียว งานถัดไปไม่สามารถผลิตได้ถ้างานก่อนหน้ายังผลิตไม่เสร็จ วัตถุประสงค์โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นการทำให้เวลาการผลิตโดยรวมน้อยที่สุด

6.4 การผลิตแบบตามงาน (Job shop) เป็นระบบการผลิตที่ใช้กันอย่างกว้างขวางระบบหนึ่งซึ่งมีเครื่องจักรที่ทำงานแตกต่างกัน และแต่ละงานต้องการการผลิตจากเครื่องจักรบางเครื่องตามลำดับความต้องการของงานนั้น ๆ แบบจำลองที่ง่ายที่สุดของระบบการผลิตแบบตามงานคือ การที่งานแต่ละงานสามารถที่จะทำการดำเนินงานบนเครื่องจักรใด ๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นทางงานได้เพียงแค่หนึ่งครั้งเท่านั้น สำหรับแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นอาจเป็นไปได้ว่า งานอาจจะกลับมาทำซ้ำที่เครื่องจักรเดิมได้หลายครั้งบนเส้นทางที่กำหนดให้และเรียกการทำงานแบบนี้ว่า " การเวียนซ้ำ (Recirculation) " วัตถุประสงค์โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นการทำให้เวลาการผลิตโดยรวมน้อยที่สุด หรือ การทำให้เวลาการส่งมอบช้ากว่ากำหนดให้น้อยที่สุด

6.5 การผลิตแบบเปิด (Open shop) มีความคล้ายคลึงกันกับการผลิตแบบแยกงานเพียงแต่งานนั้นสามารถผลิตได้ในหลากหลายลำดับการผลิต หรือมีความอิสระด้านลำดับการผลิตนั่นเอง วัตถุประสงค์โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นการทำให้เวลาการผลิตโดยรวมน้อยที่สุด

6.6 การผลิตแบบไม่อิสระต่อกัน (Dependent shop) เป็นการผลิตที่มีสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการผลิตแบบแยกงาน (Job shop) เพียงแต่ลำดับของงานนั้นอาจขึ้นอยู่กับการผลิตของงานอื่น ๆ ได้ หรือไม่มีความอิสระด้านลำดับการผลิต วัตถุประสงค์โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นการทำให้เวลาการผลิตโดยรวมน้อยที่สุด

6.7 การผลิตแบบกลุ่มงาน (Batch processing) งานจะถูกผลิตเป็นกลุ่มก้อนที่มีเวลาการผลิตที่แน่นอน และมีกำลังการผลิตที่จำกัดในแต่ละครั้งของการผลิต เช่น เตาอบขนม

6.8 การผลิตแบบมีเวลาเตรียมการ (Sequence-dependent setup times) มีความคล้ายคลึงกันกับการผลิตแบบกลุ่มงาน เพียงแต่จะมีเวลาเตรียมการผลิตในกรณีที่กลุ่มงานที่ผลิตต่อกันเป็นงานที่แตกต่างกัน จึงเกิดต้นทุนจากการเตรียมการผลิตขึ้น แต่ละงานมีกำหนดเวลาส่งมอบ และวัตถุประสงค์โดยทั่วไปจะเป็นการทำให้เวลาโดยรวมของการส่งมอบช้ากว่ากำหนดให้น้อยที่สุด เรียกว่า Total tardiness penalty

6.9 การผลิตแบบสายงานการประกอบ (Assembly line) ทุกงานจะผ่านลำดับการผลิตที่แน่นอน มีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปในการกำหนดงานให้แต่ละสถานีงานเพื่อให้ได้ระดับการผลิตและประสิทธิภาพตามที่ต้องการ เช่น การสมดุลสายงาน (Line balancing)

6.10 การผลิดแบบผสมในสายงานการประกอบ (Mixed-mode assembly line) งานผลิตบนการผลิตแบบสายงานการประกอบ แต่สามารถผลิดงานที่คล้ายกันที่มีลักษณะการทำงานและเวลาแตกต่างกันได้

7. การจัดลำดับงานและกำหนดการผลิตงาน (Job sequencing and scheduling)

บรรหาญ ลิลา (2553) การจัดลำดับงานเบื้องต้น จะกล่าวถึง 2 กรณี คือ การจัดลำดับงานจำนวน n งานบนเครื่องจักร 1 เครื่อง และการจัดลำดับงานจำนวน n งานบนเครื่องจักร m เครื่อง รายละเอียดมีดังที่อธิบายดังนี้

การจัดลำดับงานจำนวน n งานบนเครื่องจักร 1 เครื่อง วิธีนี้เป็นวิธีพื้นฐานที่สุด โดยงานจำนวน n งานต้องผ่านเครื่องจักรเครื่องเดียวกัน เวลาในการผลิต และกำหนดส่งงานของแต่ละงานเป็นอิสระต่อลำดับของงานที่จัด การจัดลำดับงานเป็นการวางแผนว่าควรทำงานใดก่อนหลังเพื่อให้เกิดผลดีที่สุดต่อเป้าหมายขององค์กร ไม่ว่าจะจัดลำดับงานอย่างไรก็ตาม เวลาในการทำงานรวม (Total completion time : Ms) จะมีค่าเท่าเดิม แต่กำหนดการเสร็จของแต่ละงานขึ้นอยู่กับลำดับที่ถูกจัดไว้โดยเวลาในการทำงานรวมคำนวณได้จากสมการ (2-1)

$$Ms = \sum_{i=1}^{n} t_i \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อกำหนดให้ Ms = เวลาในการทำงานรวม

t_i = เวลาในการผลิตของงาน i

เวลาในการผลิตจะรวมถึงเวลาในการผลิตและการเตรียมของแต่ละงานด้วย ซึ่งถ้างานทุกงานพร้อมที่จะนำเข้าทำงานได้ ณ เวลาเริ่มต้นที่จัดลำดับการทำงาน เวลาของงานแต่ละงานในกระบวนการผลิดจะเท่ากับเวลาที่งานนั้น ๆ เสร็จ ค่าเฉลี่ยของเวลาของงานในระบบ (Mean flow time) คำนวณได้จากสมการ (2-2)

$$F = (1/n) \sum_{i=1}^{n} F_i \qquad (2\text{-}2)$$

ถ้ากำหนดงานทุกงานเริ่มนับจากเวลา $T = 0$ จะประเมินเวลาคาดเคลื่อนของงานเสร็จจากกำหนดส่งงานได้จากสมการ (2-3)

$$L_i = C_i - d_i \quad (2\text{-}3)$$

และหน่วยเวลาที่งานแต่ละงานจะส่งไม่ทันกำหนด เกิดขึ้นจากเมื่อเวลาคลาดเคลื่อนของงานเสร็จมากกว่าศูนย์ หรืองานเสร็จหลังกำหนดส่งได้ผ่านไปแล้ว แสดงได้ดังสมการ (2-4)

$$T_i = \max(0, C_i - d_i) \quad (2\text{-}4)$$

หลักการในการจัดของจำนวน n งานบนเครื่องจักร 1 เครื่อง จะมีวิธี SPT, WSPT, Slack time, Hodgson's algorithm การจัดลำดับงานจำนวน n งานบนเครื่องจักร m เครื่อง การจัดลำดับงานจะมีความซับซ้อนมากเมื่อจำนวนเครื่องจักรและจำนวนงานเพิ่มขึ้น และไม่มีหลักการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่สามารถรับรองค่าที่ดีที่สุดได้ มีเพียงการประยุกต์ใช้ของกฎต่าง ๆ ที่ทำให้ได้คำตอบที่ดีเท่านั้น

8. ปัญหาเอ็นพีแบบในการศึกษาการจัดตารางการผลิต

ปารเมศ ชุติมา (2546) เราสามารถแบ่งเทคนิคที่สามารถนำมาใช้ในการจัดตารางเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดนั้นออกเป็น 3 ประเภท คือ

8.1 การแจงนับบริบูรณ์ (Complete enumeration) เป็นแนวทางในการหาคำตอบโดยการค้นหาจากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ไม่ได้รับความนิยมและควรหลีกเลี่ยง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ทรัพยากร หรืองานที่กำลังพิจารณามีเป็นจำนวนมาก เช่น ในระบบที่ซับซ้อน หรือระบบขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากว่าจะต้องเสียเวลาในการค้นหาคำตอบนานมาก และควรจะนำเอาแนวทางนี้มาใช้ก็ต่อเมื่อไม่มีวิธีการอื่นที่เหมาะสมกว่าเท่านั้น

8.2 ขั้นตอนวิธีสร้างเสริม (Constructive algorithm) เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจากข้อมูลที่ให้มาพร้อมกับปัญหา แนวทางนี้จะใช้กฎหรือกลุ่มของกฎพื้นฐานที่ง่ายในการแก้ปัญหาซึ่งผลลัพธ์ก็ คือ ลำดับงานที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดให้มีค่าดีที่สุด เช่น ในแบบจำลองเครื่องจักรเดี่ยว กฎ SPT จะทำให้เวลาไหลเฉลี่ยของงานมีค่าต่ำที่สุด เป็นต้น แต่ทว่ามีปัญหาการจัดตารางจำนวนน้อยมากที่สามารถแก้ไขได้โดยใช้แนวคิดนี้

8.3 การแจงนับโดยนัย (Implicit enumeration) เป็นแนวทางในการหาคำตอบที่ใช้ขั้นตอนวิธีที่ชาญฉลาดในการตัดทอนคำตอบ หรือคำตอบแบบบางส่วน (Partial solution) ออกจากการพิจารณาเนื่องจากว่า คำตอบดังกล่าวนี้ไม่มีโอกาสที่จะนำไปสู่คำตอบสุดท้ายที่ดีที่สุดได้ โดยมากแล้วแนวทางนี้จะช่วยลดจำนวนของการค้นหาคำตอบลง จากจำนวนของคำตอบที่ เป็นไปได้ทั้งหมดอย่างมาก ตัวอย่างของวิธีการแจงนับโดยนัย คือ ไดนามิกโปรแกรม (Dynamic programming) หรือการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and bound) เป็นต้น

แน่นอนว่าขั้นตอนวิธีสร้างเสริมเป็นแนวทางที่สมควรนำมาใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดมากที่สุด (ถ้ามี) เมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางอื่นที่กล่าวมาเนื่องจากมีการคำนวณไม่ยุ่งยากนักและใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการอื่นมาก แต่ในทางตรงกันข้ามวิธีการแจงนับบริบูรณ์เป็นวิธีการที่ควรนำมาใช้ ก็ต่อเมื่อไม่สามารถหาคำตอบได้จากวิธีการชนิดอื่น ๆ ทั้งหมด

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงการคำนวณสัมพัทธ์ระหว่างขั้นตอนวิธีที่แตกต่างกัน เราจะใช้ฟังก์ชันที่แสดงถึงความซับซ้อนด้านเวลาในการแก้ปัญหา ซึ่งเขียนแทนด้วย f(v) ฟังก์ชันนี้จะแสดงให้เห็นถึงจำนวนของการดำเนินงานที่มากที่สุดที่ต้องใช้ในการแก้ปัญหาขนาด v ที่กำหนดให้ ในทางปฏิบัติแทนที่จะหาฟังก์ชันนี้ออกมาอย่างสมบูรณ์ เราจะใช้ O(*) แสดงพฤติกรรมของฟังก์ชันนี้เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เรากล่าวว่า f(v) = O(g(v)) อ่านว่า "f(v) มีระดับเดียวกันกับ g(v)" ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่ออัตราส่วนของ f(v) /g(v) มีแนวโน้มเป็นค่าคงที่เมื่อ v เพิ่มขึ้น จะมีระดับ $O(v^n)$ ถ้าฟังก์ชันความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนาม แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นขั้นตอนวิธีนี้ก็จะมีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงเลขยกกำลัง ตัวอย่างขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนของเวลาเชิงเลขยกกำลังคือ ระดับ $O(2^v)$, $O(3^v)$ และยังรวมถึงขั้นตอนวิธีประเภทที่อยู่ในกรณีพิเศษด้วย เช่น O(v!) เป็นต้น

เราพบว่า เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนาม จะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าประเภทที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงเลขยกกำลังอย่างมาก และถ้าความเร็วของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงเลขยกกำลังจะได้รับผลดีในเชิงบวกเมื่อปัญหาใหญ่ขึ้น ในขณะที่ขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนามจะได้รับผลดีในลักษณะทวีคูณ ดังนั้นความก้าวหน้าในด้านเทคโนโลยีเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ จะมีประโยชน์ต่อกระบวนการหาคำตอบที่ใช้ขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนามมากกว่าเชิงเลขยกกำลัง เราพบว่าขั้นตอนวิธีสร้างเสริมเป็นขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนาม ในขณะที่การแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and bound) และได้นามิกโปรแกรมมิง (Dynamic programming) เป็นขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงเลขชี้กำลัง

เราสามารถแบ่งขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนาม และประเภทที่ไม่มีลักษณะเช่นนั้น เราเรียกปัญหาทั้งหมดที่มีความซับซ้อนด้านเวลาเชิงพหุนานว่า ปัญหาประเภทพี (P-Class) โดยที่ "P" ย่อมาจาก Polynomial (พหุนาม) นั่นเอง และเรียกปัญหาอีกประเภทที่เหลือว่า ปัญหาประเภทเอ็นพี (NP-Class) โดยที่ "เอ็นพี (NP) " ย่อมาจาก Non determinstic polynomial ซึ่งปัญหาประเภทนี้จะมีความซับซ้อน

ด้านเวลาเชิงเลขยกกำลัง การแยกปัญหาออกเป็น 2 ประเภทนี้ ก็เพื่อให้เกิดความชัดเจนในแนวทางเกี่ยวกับการหาคำตอบที่ดีที่สุด ปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial optimization) ส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มของปัญหาประเภทเอ็นพีเช่นกัน โดยมีกรณียกเว้นอยู่เป็นจำนวนน้อยมาก ความสำคัญของการระบุว่าปัญหาอยู่ในประเภทเอ็นพีก็คือ เป็นการยอมรับอย่างเป็นทางการว่าการแก้ปัญหาเหล่านี้ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดนั้น จะต้องอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพหุนามที่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพเท่านั้น

การที่เราสามารถลดรูปปัญหาตั้งต้น $\pi 1$ ไปสู่รูปแบบของปัญหาใหม่ $\pi 2$ ภายใต้เวลาเชิงพหุนาม มีความหมายว่ากำหนด $\pi 1$ ที่มีขนาด v ให้เราสามารถสร้าง $\pi 2$ ภายใต้จำนวนของการดำเนินงานเท่ากับ p(v) บางตัว และถ้าหาก $\pi 1$ สามารถถูกลดรูปเชิงพหุนามไปสู่ $\pi 2$ ได้ และถ้า $\pi 2$ อยู่ในประเภทพี (เอ็นพี) แล้วดังนั้น $\pi 1$ จะอยู่ในประเภทพี (เอ็นพี) ด้วยเช่นกัน ความสัมพันธ์ของการลดรูปเชิงพหุนามระหว่างปัญหาเช่นนี้อาจจะแปรความหมายถึงระดับความยากของปัญหา ซึ่งหมายความว่าปัญหา $\pi 2$ จะต้องมีความยากในการหาคำตอบอย่างน้อยเท่ากับปัญหา $\pi 1$ เราเรียกปัญหา $\pi 2$ ที่อยู่ในประเภทเอ็นพี ว่า เอ็นพีบริบูรณ์ (NP-Hard) สรุปก็คือ เราเรียกปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดว่าปัญหาเอ็นพียาก ก็ต่อเมื่อเราทราบว่าปัญหานั้นเป็นปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์นั่นเอง

9. ทฤษฎีฮิวริสติก

F. and M. Laguna, (1997) การค้นหาประเภทฮิวริสติกนี้จะใช้ความรู้แบบหนึ่งที่เรียกว่าฮิวริสติก มาช่วยในการค้นหาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยฮิวริสติกตัวนี้จะช่วยชี้แนะว่ากระบวนการค้นหาควรจะเลือกเส้นทางใด หรือ สถานะใดเพื่อทำการค้นหาต่อไปให้ได้คำตอบอย่างมีประสิทธิภาพ พิจารณาปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem) ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-1

ภาพที่ 2-1 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย

ในตัวอย่างปัญหานี้ มีเมือง 7 เมือง พนักงานขายต้องการเดินทางไปให้ครบทั้ง 7 เมือง และกลับมายังจุดเริ่มต้นให้ได้ระยะทางโดยรวมทั้งสิ้นสั้นที่สุด วิธีหนึ่งที่ทำได้คือ หาเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ซึ่งมีด้วยกันทั้งสิ้น (7-1)!/2 = 360 แบบ จากนั้นวัดแต่ละเส้นทางว่าใช้ระยะทางเท่าใดแล้วก็เลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด วิธีการนี้ไม่สามารถคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางปฏิบัติ เมื่อจำนวนเมืองมีมากขึ้น เช่น ถ้ามีเมือง 100 เมือง จะมีเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 4.67×10^{155} แบบ ถ้าเราใช้สามัญสำนึกโดยคาดเดาอย่างมีเหตุผลว่า เมื่อเราต้องการระยะทางโดยรวมสั้นที่สุด เราก็น่าจะเลือกเมืองที่อยู่ใกล้มากที่สุดที่เราอยู่ปัจจุบัน แล้วเดินทางไปยังเมืองนั้นก่อน เมื่อไปถึงเมืองนั้นแล้วก็ทำในทำนองเดียวกันอีกว่า จะเดินไปยังเมืองที่ใกล้ที่สุดเมืองถัดไป ทำเช่นนี้จนกระทั่งครบทุกเมือง ก็น่าจะได้ระยะทางที่สั้นรวมที่สุด แม้ว่าวิธีการเช่นนี้จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคำตอบก็มีแนวโน้มว่าจะดี แต่อย่างไรก็ดี คำตอบที่ได้โดยวิธีนี้อาจจะไม่เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดก็ได้ วิธีการเช่นนี้ก็คือการนำเอาความรู้แบบหนึ่งมาแก้ไขปัญหา ความรู้นี้อาจไม่ใช่ความรู้ที่สมบูรณ์ แต่ก็พอที่จะนำมาแก้ปัญหาเราได้ และช่วยให้แนะให้เรารู้ว่าเราควรจะค้นหาเส้นทางอย่างไร เราเรียกความรู้ที่ไม่สมบูรณ์หรือการคาดเดาอย่างมีเหตุผลแบบนี้ว่า ฮิวริสติก

การค้นหาฮิวริสติกคือ การค้นหาที่นำความรู้ประเภทนี้มาใช้ช่วยชี้แนะเส้นทางในการค้นหาคำตอบ โดยมีลักษณะเด่นดังนี้

1. เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการค้นหา โดยอาจจะต้องยอมให้ขาดความสมบูรณ์ไปบ้าง คืออาจจะไม่พบคำตอบที่ถูกต้อง แม้ว่าในปริภูมิสถานะจะมีคำตอบนี้อยู่

2. การนำฮิวริสติกมาใช้จะต้องนำมาใช้ในรูปแบบที่วัดค่าได้อย่างง่าย ซึ่งมักจะทำโดยนิยามฮิวริสติกให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชัน เราเรียกว่า ฟังก์ชันฮิวริสติก (heuristic function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่คำนวณค่าสถานะไปยังตัวเลขชี้ว่าสถานะนั้นเข้าใกล้สถานะเป้าหมายเท่าไร (ยิ่งมากเท่าไหร่ ยิ่งมีโอกาสที่จะเปลี่ยนสถานะเป้าหมายมากเท่านั้น) การค้นหาก็จะมุ่งเน้นไปเส้นทางที่มีค่าฮิวริสติกที่ดีกว่า

3. ฟังก์ชันฮิวริสติกนี้เป็นสิ่งที่ใช้ชี้แนะกระบวนการค้นหาว่าจะค้นหาไปในทิศทางใด ซึ่งกระบวนการค้นหาฟังก์ชันฮิวริสติกสามารถออกแบบได้หลายชนิด

4. ในบางกรณีเราสามารถนิยามฟังก์ชันฮิวริสติกได้อย่างสมบูรณ์แบบ การค้นหาก็จะสามารถมุ่งไปยังเป้าหมายโดยไม่ผิดเส้นทางเลย แต่ถ้าฟังก์ชันฮิวริสติกไม่ดีก็อาจทำให้กระบวนการค้นหาหลงไปในทางที่ผิดได้ ทำให้คำตอบที่ได้ เมื่อใช้ฮิวริสติกไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด

10. วิธีฮิวริสติกมาตรฐาน

อรอนงค์ ดอกจันรี (2551) ได้กล่าวว่า ปัญหาการจัดตารางเวลาเป็นหนึ่งในปัญหาเอ็นพีฮาร์ด (NP-hard problem) กล่าวคือ เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาในการคำนวณหาคำตอบโดยใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์จะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย และไม่สามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการสร้างอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมาใช้หาคำตอบของปัญหา

มีการนำวิธีฮิวริสติกมาตรฐานที่เรียกว่า เมต้าฮิวริสติก (Meta-heuristic) ต่าง ๆ ได้แก่ วิธี ซิมูเล็ทเต็ดแอนนิลลิง (Simulated annealing: SA) วิธีการหาคำตอบที่ป้องกันการเข้าสู่ค่าเดิม หรือวิธี ทาบู (Tabu search: TS) รวมทั้งวิธีการหาคำตอบเชิงพันธุกรรมหรือวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm: GA) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมาใช้ในการหาคำตอบของตารางเวลาที่เป็นไปได้ และมีผู้วิจัยจำนวนมากเลือกวิธีดังกล่าวเพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบโดย (Bullnheimer, 1998) ได้ใช้วิธีการหาคำตอบซิมูเล็ทเต็ดแอนนิลลิงในการค้นหาคำตอบ (Gaspero and Schaerf, 2001) ใช้วิธีทาบู ขณะที่ (Chu and Fang, 1999) ใช้วิธีการหาคำตอบเชิงพันธุกรรมหรือวิธีเจเนติกอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาและได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจัดตารางเวลาด้วยวิธีดังกล่าวกับวิธีทาบู

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาอัลกอริทึมต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคำตอบของตารางเวลาที่เป็นไปได้ให้ดียิ่งขึ้น (Zhaohui and Lim, 2000) ได้ใช้ Iterative-greedy heuristic เพื่อหาคำตอบที่เป็นไปได้ (Good coloring solution) ในการพัฒนาการจัดตารางเวลาสอบ และใช้วิธีทาบูในการหารูปแบบตารางที่เป็นไปได้ที่เหมาะสม (Cheng, Klienberg, Kruk, Lindsey and Steffy, 2006) ผสมผสานวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมหลายวิธีเข้าด้วยกัน คือ Hypergraph และ Greedy approach ที่เรียกว่า วิธีการกำหนดกลุ่ม (Cluster method) และวัดประสิทธิภาพของรูปแบบการจัดตารางเวลาสอบ โดยใช้ค่า Cost function ที่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของค่าปรับที่มีกรณีของเงื่อนไขรองเกิดขึ้นในตารางเวลาที่เป็นไปได้ (Boizumault, Delon and Peridy, 1996) ใช้การโปรแกรมเชิงตรรกศาสตร์ (Logic programming) ในการค้นหาคำตอบ ส่วน (Thomson and Dowsland, 1998) ใช้วิธีการหาคำตอบซิมูเล็ทเต็ดแอนนิลลิงในส่วนที่ 1 คือ ลดจำนวนที่งานที่มีเวลาซ้ำซ้อนกันให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด และ Kempe chain neighborhood ในส่วนที่ 2 เพื่อขยายเวลางานแต่ละงานให้มีเวลามากพอที่จะกำหนดได้ (Azimi, 2005) ได้พิจารณาฮิวริสติกพื้นฐาน 3 วิธี คือ วิธีการหาคำตอบซิมูเล็ทเต็ดแอนนิลลิง (Simulated annealing) วิธีทาบู (Tabu search) วิธีการหาคำตอบเชิงพันธุกรรมหรือวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) และระบบการเลือกเส้นทางหาอาหารของมด (Ant colony system) จากนั้นเปรียบเทียบ 3 ฮิวริสติกรูปแบบผสม

ในการแก้ปัญหา ได้แก่ ฮิวริสติกแบบลำดับโดยวิธีทาบูและระบบการเลือกเส้นทางหาอาหารของมด (A Sequential TS–ACS) ฮิวริสติกแบบผสมระหว่างวิธีทาบูและระบบการเลือกเส้นทางหาอาหารของมด (A Hybrid ACS/TS) และวิธีฮิวริสติกแบบลำดับโดยระบบการเลือกเส้นทางหาอาหารของมดและวิธีทาบู (A Sequential ACS–TS algorithms) อย่างไรก็ตาม ยังมีนักวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาวิธีฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางเวลาเพื่อให้ได้ตารางเวลาที่เป็นไปได้ตรงตามวัตถุประสงค์

11. วิธีการจัดตารางการผลิตแบบทาบู

การค้นหาแบบทาบูเป็นฮิวริสติกวิธีหนึ่ง โดย (Fred Glover, 1977) เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบทาบู ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยได้นำวิธีการค้นหาแบบทาบู ซึ่งเป็นเทคนิคในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดชั้นสูง (Advanced optimization technique) มาใช้ในส่วนของการจัดตารางการผลิต เพื่อให้ได้ตารางการผลิตที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ส่วนที่สำคัญของวิธีการค้นหาแบบทาบูได้แก่ รายการทาบู ซึ่งเป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานั้น ๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบไม่ให้กลับไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ซึ่งเคยผ่านมาก่อนหน้านี้แล้ว วิธีการค้นหาแบบทาบู เป็นวิธีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาทางด้านการจัดเรียงที่ต้องการคำตอบที่ดีที่สุด (Combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของวิธีการค้นหาแบบทาบูคือ มีการปรับปรุงคำตอบที่ได้ในแต่ละรอบการค้นหา โดยสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด

F. and M. Laguna, (1997) ทาบู (Tabu, Taboo) แปลว่าต้องห้าม การค้นหาทาบูเป็นเทคนิคการค้นหาที่ค่อนข้างใหม่ ในกระบวนการค้นหาแบบทาบูนั้น ทำเครื่องหมายบนเส้นทางที่ไม่สนใจค้นหา การทำเครื่องหมายนี้อาจจะทำในระดับของตัวกระทำการ หรือหน่วยย่อยของหน่วยกระทำการก็ได้ หน่วยย่อยใดที่ถูกทำเครื่องหมายไว้จะเปลี่ยนสถานภาพต้องห้าม (Tabu status) ให้อยู่ในภาวะต้องห้าม (Tabu active) กล่าวคือ หน่วยย่อยนี้จะไม่ถูกนำมาใช้สร้างเส้นทางในการค้นหา อาจเป็นเพราะเส้นทางนี้คงไม่นำไปสู่คำตอบ หรืออาจเป็นเส้นทางที่เคยค้นหามาแล้ว เป็นต้น

การค้นหาทาบูจะกำหนดสถานภาพของหน่วยย่อยโดยขึ้นกับหน่วยความจำ ซึ่งหน่วยความจำนี้จะเปลี่ยนแปลงตามสภาพเวลา และสภาพแวดล้อมในระหว่างกระบวนการค้นหา การค้นหาทาบูมีแนวคิดที่ว่า การค้นหาที่ฉลาดจะต้องพิจารณาสิ่งเหล่านี้คือ

1. หน่วยความจำปรับตัว (Adaptive memory) กล่าวคือหน่วยความจำต้องมีการปรับตัวเพื่อให้การค้นหาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพตามสภาพการค้นหา ณ ตำแหน่งนั้น ๆ

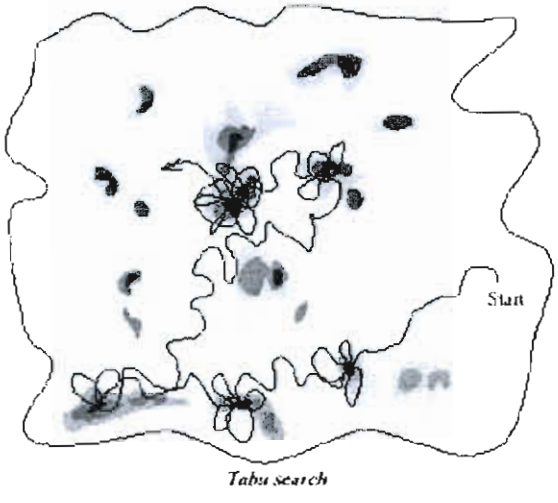
2. การสำรวจแบบตอบสนอง (Responsive exploration) ซึ่งการค้นหานั้น เราจะต้องทำการสำรวจอย่างถี่ถ้วนในเส้นทางที่ดี เพื่อหวังว่าอาจจะได้เส้นทางที่ดีกว่าเดิม นอกจากนั้นแล้วเรายังต้องค้นหาเส้นทางที่ไม่ดีด้วย เพราะบางครั้งเส้นทางที่ไม่ดีอาจจะให้ข้อมูลมากกว่าเส้นทางที่ดีเพื่อหาเส้นทางที่ดีใหม่ขึ้น

หน่วยความจำในการค้นหานี้มี 2 ชนิดคือ

1. หน่วยความจำตามเวลา (Recency-base memory) เป็นหน่วยความจำที่ปรับเปลี่ยนไปตามขั้นตอนการค้นหา

2 หน่วยความจำตามความถี่ (Frequency-base memory) เป็นหน่วยความจำที่ใช้สำหรับจำว่าตัวกระทำตัวไหนใช้งานบ่อย ๆ

หน่วยความจำทั้งสองนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อปรับสภาพสถานะของตัวกระทำการ หน่วยความจำทั้งสองนี้ใช้สำหรับการค้นหาในสองลักษณะคือ 1 ความละเอียด (Intensification) และ 2 ความหลากหลาย (Diversification) ความละเอียดหมายถึงว่า เมื่อเราพบผลเฉลย (Solution) อยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง เราจะพยายามค้นหาบริเวณใกล้เคียงให้มากขึ้นเพื่อหาผลเฉลยที่ดีกว่า ส่วนความหลากหลายหมายถึง เมื่อเราค้นผลเฉลยพบแล้วว่าอยู่ในบริเวณใด บริเวณหนึ่ง ให้เลือกเส้นทางที่ต่างจากเดิมบ้าง เพื่อที่เราอาจจะได้ผลเฉลยที่ดีขึ้น แม้ว่าเส้นที่นั้นจะเป็นเส้นทางที่ไม่ดี (เมื่อประเมินจากค่าฮิวริสติก)



ภาพที่ 2-2 การค้นหาทาบู

ภาพที่ 2-2 แสดงแนวคิดการค้นหาทาบู ในรูปบริเวณที่มีสีเข้มแสดงถึงบริเวณที่มีค่าฮิวริสติกที่ดี จากรูปจะเห็นว่าจุดเริ่มต้นการค้นหาจะพยายามไปสู่บริเวณที่มีค่าฮิวริสติกสูง (สีเข้ม) ซึ่งก็พบจุดสูงสุดเฉพาะที่ จากนั้นก็สำรวจบริเวณรอบ ๆ และค่อย ๆ เปลี่ยนไปยังเส้นทางใหม่ต่างไปจากเดิม ซึ่งอาจจะต้องไปในเส้นทางใหม่ที่มีค่าฮิวริสติกไม่ดีด้วย ในที่สุดก็คาดหวังว่าการค้นหาจะสามารถนำไปสู่จุดสูงสุดวงกว้างได้

13. หน่วยความจำระยะสั้นวิธีทาบู

ปัญหาที่เราสนใจ คือ หาค่า x ที่ทำให้ฟังก์ชัน f(x) มีค่าต่ำสุด โดยกำหนดให้ N(x) เป็นสถานะข้างเคียง (Neighborhood) ของ x ในปริภูมิสถานะ X กล่าวคือ N(x) คือสถานะลูกที่สามารถสร้างได้จากตัวกระทำการ

การค้าหาทาบูใช้หน่วยความจำสองชนิดเพื่อเปลี่ยนค่า N(x) คือหน่วยความจำระยะสั้น (Short term memory) เพื่อใช้เป็นหน่วยความจำตามเวลา และหน่วยความจำระยะยาว (Long term memory) ใช้เป็นหน่วยความจำตามความถี่ โดยให้ N*(x) แทนจุดข้างเคียงของ x ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้หน่วยความจำเหล่านี้มาช่วยสร้างสถานะข้างเคียง

ในกรณีของหน่วยความจำระยะสั้น หน่วยความจำนี้เป็นหน่วยความจำตามเวลาเพื่อเก็บผลเฉลยหรือคุณสมบัติของผลเฉลย (Solution attribute) ในการค้นหาที่จะผ่านมาและคุณสมบัติที่ปรากฏในผลเฉลยที่เพิ่งจะค้นหาไปจะถูกกำหนดให้มีสถานภาพเป็น "ภาวะต้องห้าม" ซึ่งภาวะต้องห้ามคือการทำเครื่องหมายไว้ว่าเราไม่ต้องการค้นหาเส้นทางหรือผลเฉลยอื่น ๆ ถ้าเส้นทางหรือผลเฉลยนั้น ๆ มีคุณสมบัติเหมือนกับผลเฉลยที่เพิ่งค้นหาไปเมื่อเร็ว ๆ นี้ เพราะจะได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงนั่นเอง และผลเฉยอื่น ๆ ที่จะพบในอนาคตที่มีคุณสมบัติเป็นภาวะต้องห้ามก็มีสถานะเป็นภาวะต้องห้ามด้วย (ก็เพราะว่ามันมีคุณสมบัติเหมือนกันจึงไม่จำเป็นต้องเสียเวลาค้นหามันอีก) ดังนั้นหน้าที่ของหน่วยความจำระยะสั้นก็คือ การป้องกันการสร้างผลเฉลยบางตัวที่ไม่อยู่ใน N*(x) กล่าวคือ N*(x) จะเป็นเซตย่อยของ N(x) โดยมีสถานะบางตัวเป็นภาวะต้องห้ามถูกตัดออกไป (ในกรณีของหน่วยความจำระยะยาว N*(x) อาจเป็น Super set ของ N(x)) N*(x) นี้จะถูกกำหนดโดยหน่วยความจำระยะสั้น ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงในแต่ละครั้งของการค้นหา

14. กฎการจ่ายงาน

ปารเมศ ชุติมา, (2546) กฎการจ่ายงาน (Dispatching rule) เพื่อนำมาใช้แก้การขัดแย้งที่เกิดขึ้น เมื่อใดก็ตามที่มีเซตของงานตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป คอยรับบริการจากเครื่องจักรเครื่องเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการตัดสินใจว่าจะทำงานใดก่อน โดยธรรมชาติของกฎการจ่ายงานการตัดสินใจจะเป็นแบบทันทีเมื่อมีความจำเป็นเท่านั้น และไม่พยายามที่จะไปสร้างหรือกำหนด

ตารางในอนาคตสำหรับงานและเครื่องจักร การพัฒนากฎการจ่ายงานขึ้นมาสักกฎหนึ่งไม่ได้เป็นเรื่องยากแต่ประการใด แต่เราอาจพบว่าในบางสถานการณ์การใช้กฎการจ่ายงานที่เหมาะสมอาจจะทำให้ความแออัดภายในระบบลดลง หรือสามารถทำให้ส่งสินค้าทันตามกำหนดเวลาที่สัญญาไว้กับลูกค้าก็ได้ กฎต่าง ๆ ที่สามารถเลือกใช้มีดังนี้

14.1 EDD (Earliest due date) ลำดับความสำคัญสูงสุดจะให้กับงานที่มีเวลาส่งมอบกระชั้นที่สุด

14.2 FCFS (First come first served) ลำดับความสำคัญสูงสุดจะให้กับงานที่มาถึงแถวคอยที่กำลังพิจารณาเป็นงานแรก

14.3 SPT (Shortest processing time) ลำดับความสำคัญสูงสุดจะให้กับงานที่มีเวลาทำบนเครื่องจักรที่กำลังพิจารณาอยู่มีค่าน้อยสุด

14.4 SLACK (Different between due date, Arrival time, Remaining processing time)

15. โปรแกรมไมโครซอฟต์วิชวล C ++

ยุทธนา ลีลาศวัฒนกุล, (2547) ภาษาซีพลัสพลัส เป็นภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์อเนกประสงค์ มีโครงสร้างภาษาที่มีการจัดชนิดข้อมูลแบบสแตติก (Statically typed) และสนับสนุนรูปแบบการเขียนโปรแกรมที่หลากหลาย (Multi-paradigm language) ได้แก่ การโปรแกรมเชิงกระบวนคำสั่ง, การนิยามข้อมูล, การโปรแกรมเชิงวัตถุ, และการโปรแกรมแบบเจเนริก (Generic programming)

15.1 รูปแบบของการออกแบบภาษาซีพลัสพลัส

15.1.1 ภาษาซีพลัสพลัสได้ถูกออกแบบมาเพื่อเป็นภาษาสำหรับการเขียนโปรแกรมทั่วไป สามารถรองรับการเขียนโปรแกรมในระดับภาษาเครื่องได้ เช่นเดียวกับภาษาซี

15.1.2 ในทางทฤษฎี ภาษาซีพลัสพลัสควรจะมีความเร็วเทียบเท่าภาษาซี แต่ในการเขียนโปรแกรมจริงนั้น ภาษาซีพลัสพลัสเป็นภาษาที่มีการเปิดกว้างให้โปรแกรมเมอร์เลือกรูปแบบการเขียนโปรแกรม ซึ่งทำให้มีแนวโน้มที่โปรแกรมเมอร์อาจใช้รูปแบบที่ไม่เหมาะสมทำให้โปรแกรมที่เขียนมีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็น และภาษาซีพลัสพลัสนั้นเป็นภาษาที่มีความซับซ้อนมากกว่าภาษาซี จึงทำให้มีโอกาสเกิดบั๊กขณะคอมไพล์มากกว่า

15.1.3 ภาษาซีพลัสพลัสได้รับการออกแบบเพื่อเข้ากันได้กับภาษาซีในทุกกรณี (ดูเพิ่มเติมที่ Compatibility of C and C++)

15.1.4 มาตรฐานของภาษาซีพลัสพลัส ถูกออกแบบมาเพื่อไม่ให้มีการเจาะจงแพลตฟอร์มคอมพิวเตอร์

15.1.5 ภาษาซีพลัสพลัสถูกออกแบบมาให้รองรับรูปแบบการเขียนโปรแกรมที่หลากหลาย (Multi-paradigm)

15.2 Function เป็นหนึ่งในหน่วยการสร้างขั้นหลัก (Fundamental building block) ของ C++ โปรแกรมแรก ประกอบไปด้วย Function เดี่ยว ๆ ที่เรียกว่า main() ส่วนของโปรแกรมนี้ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของ Function มีเพียงส่วนเดียว คือ #include <iostream.h> เครื่องหมาย () ที่ตามหลังคำว่า main เป็นคุณลักษณะที่แบ่งแยก Function ออกจากส่วนประกอบอื่น ๆ ถ้าไม่มีเครื่องหมาย () Compiler จะคิดว่า main หมายถึงตัวแปร หรือส่วนประกอบอื่น ๆ ของโปรแกรม เมื่อกล่าวถึง Function เราจะดำเนินการตามข้อตกลงเดียวกันกับที่ C++ ใช้นั่นคือ เราจะจัดวางเครื่องหมาย () ไว้หลังชื่อของ Function ในภายหลัง เราจะเห็นว่า ภายใน () ไม่ได้ว่างเสมอไป คือมีการใช้ เครื่องหมาย () ในการส่ง อาร์กิวเมนต์ ของ Function (Function arguments) ซึ่งอาร์กิวเมนต์เป็นค่าที่ผ่านจากโปรแกรม ที่เรียกใช้ Function

15.3 เครื่องหมาย {} และตัวของ Function หรือ Body ของ Function ถูกโอบล้อมไว้ด้วยเครื่องหมาย {} เครื่องหมายเหล่านี้จะแสดงบทบาทในทำนองเดียวกันกับคำหลัก BEGIN และ END ทีพบอยู่ในภาษา Basic pascal delphi เป็นต้น โดยจะโอบล้อมหรือกำหนดขอบเขต Block หนึ่ง ๆ ของข้อความคำสั่งในโปรแกรมเอาไว้ ทุก ๆ Function จะต้องใช้เครื่องหมาย {} คู่นี้ ดังตัวอย่างข้างต้น มีข้อความเพียง 2 บรรทัดคำสั่ง อยู่ภายในเครื่องหมาย {} ก็คือคำสั่ง cout อย่างไรก็ตามตัวของ Function อาจประกอบไปด้วยข้อความหลาย ๆ คำสั่ง

15.4 เริ่มต้นด้วย main() เสมอเมื่อคุณเขียนโปรแกรมด้วย C++ ข้อความคำสั่งแรกที่กระทำการ จะเป็นข้อความคำสั่งซึ่งอยู่ตรงจุดเริ่มต้นของ Function ที่เรียกว่า main() โปรแกรมหนึ่ง ๆ อาจประกอบไปด้วย Class และส่วนประกอบอื่น ๆ ของโปรแกรมอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ตัวควบคุมการเริ่มต้นจะอยู่ที่ main() เสมอถ้าในโปรแกรมนั้นไม่มี Function นี้ปรากฏอยู่เลย ตัว Complier ก็จะแสดงข้อผิดพลาดออกมา

15.5 ข้อความคำสั่งของโปรแกรมข้อความคำสั่งของโปรแกรมเป็นหลักของการเขียนโปรแกรม เครื่องหมาย ; จะเป็นตัวบงบอกให้ Compiler รู้ว่าสิ้นสุดข้อความคำสั่ง 1 คำสั่ง เครื่องหมายนี้เป็นส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่ง หากไม่มีข้อความนี้ตัว Compiler เองจะไม่ทราบว่าข้อความคำสั่งสิ้นสุดที่ไหน ดังนั้นหากมีข้อความคำสั่งมากกว่า 1 คำสั่งแต่ใส่เครื่องหมาย ; ที่ท้ายของข้อความคำสั่งสุดท้ายตัว Compiler เองจะมองเป็น 1 คำสั่งดังนั้นจะเกิดข้อผิดพลาดทันที หรือหากไม่ใส่เลยตัว Compiler ก็จะไม่ทราบที่สิ้นสุดของคำสั่ง ก็จะเกิดข้อผิดพลาดเช่นกัน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิเรขา มีแหยม (2549) เป็นการศึกษาเรื่อง การจัดตารางผลิตของกลุ่มงานให้กับเครื่องจักรแบบขนานที่อิสระต่อกันและมีประสิทธิภาพต่างกันโดยเวลาเสร็จสิ้นรวมต่ำสุด ซึ่งได้ทำการวิจัยโดยการจัดตารางผลิตสำหรับกลุ่มงานที่ต้องเข้าผลิตเครื่องจักรแบบขนานต้องการผลิตเพียงครั้งเดียว ทำการหาคำตอบด้วยการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้นำเสนอฮิวริสติก 4 วิธี คือ LBLP(Lower bound linear programming relaxation), PRLP(Packing and remaining linear programming relaxation), ELPT (Efficiency parallel machines with longest processing time), EBFD (Efficiency parallel machines with best fit decreasing) จากการทดสอบปัญหาที่มีขนาดแตกต่างกัน ถ้าต้องการผลลัพธ์ที่ดีที่สุดควรเลือกใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ แต่ถ้าต้องการผลลัพธ์ที่ดีภายในระยะเวลาอันสั้นแล้ว ควรเลือกใช้วิธีการทางฮิวริสติกให้เหมาะสมกับขนาดของปัญหา ซึ่งพบว่าวิธีการที่เหมาะสมในการทดสอบปัญหาขนาดเล็ก คือ วิธี LBLP ส่วนวิธีการที่เหมาะสมในการทดสอบปัญหาขนาดกลางนั้นคือ PRLP, ELPT และ EBFD ซึ่งควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับปัญหา และพลว่ามีเพียงวิธี LBLP ที่ไม่เหมาะสำหรับแก้ปัญหาขนาดกลางเท่านั้น ในส่วนของวิธีการที่เหมาะสมในการทดสอบปัญหาขนาดใหญ่นั้น วิธี ELPT

ปิยะ ชัชชวลิตสกุล (2547) เป็นการศึกษาเรื่อง การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรที่มีลักษณะเหมือนกัน และมีการจัดเรียงกันแบบขนาน โดยงานมีการเข้ามาเป็นแบบพลวัตร โดยเครื่องจักรสามารถดำเนินการได้หลายงานพร้อมกันในรูปกลุ่ม (Batch) เรียกว่าปัญหานี้ว่าปัญหาการจัดการแบบกลุ่มตัวอย่างของเครื่องจักรที่มีการทำงานลักษณะนี้ได้แก่ เตาอบ วัตถุประสงค์คือเพื่อลดเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการผลิตจนเสร็จสิ้นที่มากที่สุด โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและทำการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม LINGO ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่การแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้จะทำได้ยาก ดังนั้นวิธีการฮิวริสติกจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ ERT และ New heuristic

จากการเปรียบเทียบวิธีการที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกับวิธีการฮิวริสติก พบว่าสำหรับปัญหามีขนาดเล็ก วิธีการที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดมีความเหมาะสมเพราะใช้เวลาในการแก้ปัญหาน้อยและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่วิธีการ New heuristic มีความเหมาะสมมากกว่าเพราะใช้เวลาในการแก้ปัญหาน้อยและให้ค่าผลลัพธ์ที่ดีโดยเปอร์เซ็นต์ผลต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด

นัฐพงค์ สุดพุ่ม และ สรรพสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์ (2550) การจัดตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรแบบขนานโดยมีเวลาเตรียมการผลิตเป็นแบบไม่อิสระ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นการพัฒนาวิธีการฮิวริสติกอัลกอริทึม ในการจัดตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรแบบขนานโดยมีเวลาเตรียมการผลิตเป็นแบบไม่อิสระ โดยการจัดตารางการผลิตมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาการผลิตของเครื่องจักร โดยมีเวลาเตรียมการผลิตเป็นแบบไม่อิสระและเครื่องจักรแบบขนาน งานวิจัยนี้เสนอวิธีการจัดตารางการผลิต วิธีฮิวริสติก 4 วิธี ได้แก่ วิธี SPAST, วิธี SPACT, วิธี SPASCR และ วิธี SPASPR โดยมีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่ให้ค่า makespan ต่ำที่สุด ซึ่งผลของการศึกษาจะทำให้สามารถเลือกวิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสม ผลจากการศึกษานี้ได้พบว่า วิธีการฮิวริสติก SPACT เป็นวิธีที่ให้ค่า makespan ต่ำที่สุด

ณัฐวร ยมพูล และ เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ (2550) เป็นการศึกษาเรื่องการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กันในการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการจัดตารางการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผนผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน หรือมีความสามารถด้านการผลิตแตกต่างกัน โดยได้พัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตเพื่อให้เวลาล่าช้ารวมต่ำที่สุด ด้วยวิธีการแก้ปัญหาแบบหลายขั้นตอน (Multi-phase methodology) ในขั้นตอนแรกเป็นการแบ่งกลุ่มงาน (Allocation) มอบหมายงานให้เครื่องจักรโดยการใช้กฎการจ่ายงาน (Dispatching rules) ด้วยการใช้เกณฑ์วันกำหนดส่ง (EDD : Early due date) ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ และความสำคัญของลูกค้าเป็นเกณฑ์ในการจัดมอบงาน ขั้นที่สองเป็นการจัดลำดับงาน (Assigning) โดยวิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu search) ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของการจัดตารางการผลิต ซึ่งในการสร้างคำตอบตั้งต้นหรือคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดนั้นได้ใช้การหาคำตอบข้างเคียง (Neighborhood search) โดยใช้การสลับงาน (Swap pairwise interchange) และได้ประยุกต์วิธีการในการทดลองข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบปกติซึ่งอยู่ในช่วงงานที่ 70-90 งาน ช่วง 91-110 งาน ช่วง 111-130 งาน และช่วง 131-150 งาน จากผลการทดลองพบว่าวิธีการจัดตารางที่ใช้การค้นหาแบบทาบูให้ค่าเวลาล่าช้ารวมที่น้อยกว่าการจัดตารางแบบเดิมประมาณ 90% ส่วนเวลาที่ใช้ในการจัดตารางการผลิตพบว่าวิธีการจัดตารางการผลิตแบบใหม่ใช้เวลาที่น้อยกว่าวิธีการจัดตารางการผลิตแบบเดิมประมาณ 75% ในทุก ๆ ช่วงงาน ในการหารอบการค้นหาที่ให้ค่าเวลาล่าช้ารวมน้อยที่สุดมีลักษณะแบบสุ่มและการวิเคราะห์เวลาในการรันโปรแกรมพบว่ามีความสัมพันธ์กับจำนวนรอบการค้นหาและจำนวนงานที่ทำการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

ณัชชา คารอน (2551) การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานเมื่อเวลาปรับตั้งเครื่องจักรไม่เป็นอิสระกับลำดับงาน และมีความสามารถจำกัด ในการทำกระบวนการตัดสายไฟสำหรับรถยนต์ โดยเสนอกฎฮิวริสติกซึ่งประยุกต์จากกฎพื้นฐาน 10 กฎ การประเมินผลแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกทำการเปรียบเทียบกฎฮิวริสติกทั้งหมดที่นำเสนอกับปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ และขั้นตอนที่ 2 นำกฎฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพดีจากขั้นที่ 1 มาทำการทดสอบกับการจัดตารางการผลิตแบบเดิมของบริษัท ซึ่งได้ผลคือ SPT1 ทำให้เกณฑ์การประเมินดีกว่าแบบอื่น และผลจากกรณีศึกษางานสามารถลดงานสาย และเวลาการปฏิบัติงานเท่ากับ 20 % และ 62.43 % ของการจัดตารางการผลิตแบบเดิม และยังพบว่า SPT1 มีงานรอหลังกระบวนการตัดจำนวนมาก ในขณะที่ SPT2 ส่งผลตรงข้าม สามารถสรุปได้ว่ากฎฮิวริสติก SPT1 และ SPT2 มีความเหมาะสมกว่ากฎฮิวริสติกที่ทำการทดลองอีก 8 วิธี ภายใต้สถานการณ์ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้

Dong Cao, Mingyuan Chen and Guohua Wan (2005) กล่าวถึงปัญหาการเลือกงานที่เกิดขึ้นพร้อมกัน และการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานเพื่อให้ผลรวมค่าใช้จ่ายด้านเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายจำนวนงานสายมีค่าน้อยที่สุด การที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายต้องมีการพัฒนารูปแบบของปัญหา NP-hard ซึ่งกระบวนการทางฮิวริสติกนี้จะนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด หรือ ใกล้เคียงที่ดีที่สุด โดยใช้วิธี Tabu sarch ในการแก้ปัญหา ซึ่งได้ออกแบบ neighborhood ให้ค้นหาเฉพาะรอบบริเวณคำตอบที่ดีอยู่แล้วเท่านั้น

B.M.T. Lin (2003) ทำการแก้ไขปัญหาตารางการผลิตที่ปัญหาเป็น เครื่องจักรขนานที่เป็นอิสระต่อกันและการปรับตั้งเครื่องจักรมีผลกับงานก่อนหน้า โดยมีเป้าหมายแรกคือ ลดเวลางานสายให้ได้มากที่สุด เป้าหมายที่สองลดจำนวนงานสายให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งใช้วิธีไดนามิกส์โปรแกรมในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

Alex, Francisco and Johnny (2007) ทำงานวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการจัดตารางการผลิตที่เครื่องจักรเป็นแบบขนานที่ความเร็วของเครื่องจักรขึ้นอยู่กับการจัดสรรทรัพยากร เพื่อแก้ไขปริมาณ และการจัดสรรงานให้เครื่องจักรอันดับแรก วัตถุประสงค์ คือ ลดจำนวนงานสาย มีวิธีการ 2 แบบในการนำเสนอ คือ เสนอสูตร Integer programming และใช้กระบวนการทางฮิวริสติก ในการแก้ปัญหาดังกล่าว

Vinicius and Moacir (2007) ทำงานวิจัยเรื่องของการจัดตารางการผลิตในรูปแบบของเครื่องจักรแบบขนาน โดยเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรมีผลกับเวลาการผลิต เพื่อให้จำนวนงานสายซึ่งสัมพันธ์กับเวลาสายของงาน มีค่าน้อยที่สุด การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการ GRASP จะออกแบบรวมระบบความจำสำหรับปัญหานี้ โดยสร้างระบบความจำระยะยาวในการทำระยะเริ่มต้น หลังจาก

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

ได้ค่าที่เหมาะสมของกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสูงขึ้นจะทำการหา Local optima รอบ ๆ บริเวณคำตอบนั้น การดำเนิน GRASP จะนำไปเทียบกับวิธีทางฮิวริสติกต่อไป

Giuseppe (2000) ทำการแก้ปัญหาการกำหนดชุดงาน n กับเวลาที่เริ่มงานและเวลาจบงาน ปัญหานี้วิเคราะห์ที่เครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน เพื่อให้ค่าเวลาจบแต่ละเครื่องลดลงซึ่งใช้วิธี Branch and bound ในการแก้ปัญหา และนำมาเทียบกับวิธีฮิวริสติก

Tamer (2009) กล่าวว่าในการศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตทั่วไป การศึกษาเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร และการย้ายเวลางาน จะไม่สนใจเวลาของกระบวนการ อย่างไรก็ตามระบบการผลิตที่มีเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรและการย้ายเวลางาน ควรจะให้ความสำคัญกับเวลาของกระบวนการเป็นสิ่งสำคัญ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อลดผลรวมเวลาของกระบวนการที่มีการปรับตั้งเครื่องจักรและการย้ายเวลางาน และจำนวนงานสาย โดยพัฒนารูปแบบคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหา NP-Hard โดยทดลองการแก้ปัญหา 15 งานเครื่องจักร 5 ตัว ใช้วิธีทางฮิวริสติก 3 วิธี ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่เพื่อเป็นความรู้แต่มิได้ทำกับงานจริง

365486

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับงานที่เป็นการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่แตกต่างกัน (Non identical machines in parallel) ซึ่งรูปแบบของปัญหาคือ มีเครื่องจักร m เครื่อง ($m > 1$) ที่ทำงานเหมือนกัน เครื่องจักรแต่ละเครื่องนั้นมีประสิทธิภาพแตกต่างกันเช่น เครื่องจักร 1 ทำงานได้เร็วกว่าเครื่องจักร 2 ที่งานเป็นประเภทเดียวกัน อีกทั้งงานมีลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของเวลาตั้งเครื่องจักรขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้า (Sequence dependent setup time) การจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักรมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งความน่าพึงพอใจนั้นอาจจะวัดจากหลายอย่าง เช่น เวลาปิดงานต่ำสุด (Minimum makespan) จำนวนงานสายน้อยที่สุด (Minimum number of tardy job) เวลารวมของงานสายน้อยที่สุด (Minimum total tardiness) เวลาการไหลโดยเฉลี่ยของงานต่ำ (Minimum flow time) หรือจะเป็นวัตถุประสงค์ด้านค่าใช้จ่าย เป็นต้น การศึกษาเกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตที่น่าสนใจ คือ การส่งมอบตรงตามกำหนด อาจถือได้ว่าเป็นตัววัดสมรรถนะที่สำคัญอย่างหนึ่งในการจัดตาราง และได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติ การส่งมอบตรงตามกำหนดนี้เป็นตัววัดเชิงปริมาณ ซึ่งมีความหมายเป็นนัยว่าจะไม่มีผลประโยชน์ใด ๆ เกิดขึ้นเมื่อทำงานเสร็จก่อนกำหนด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำงานเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดจะต้องเสียค่าปรับ การส่งมอบตรงตามกำหนดจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับตัววัดที่เกี่ยวกับจำนวนงานสาย (Number of tardy job)

สำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต ในงานวิจัยนี้จึงพยายามทำให้จำนวนงานสายเกิดขึ้นจำนวนน้อย หรือไม่มีเลย และอีกหนึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือ เวลาปิดงานต่ำสุด เพื่อให้เกิดความรวดเร็วของการผลิตงานด้วย ความยากในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับจำนวนงานที่ล่าช้าและเวลาปิดงานต่ำ สำหรับการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานจัดเป็นปัญหาที่ซับซ้อน เมื่อพิจารณาปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบเครื่องจักรเดียวที่ลำดับงานมีผลต่อเวลาในการตั้งเครื่องจักร โดยมีเป้าหมายที่เวลาปิดงานมีค่าต่ำสุดมีลักษณะความซับซ้อนของปัญหาเป็นแบบ NP-Hard (M.Pinedo, 2002) ดังนั้นปัญหาการจัดตารางการผลิตในงานวิจัยนี้จึงมีสภาพความซับซ้อนของปัญหาเป็นแบบ NP-Hard ด้วยจะต้องอาศัยแนวทางฮิวริสติก (Heuristic approach) ในการหาคำตอบเข้ามาประยุกต์ งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีทาบู (Tabu search) ซึ่งออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูด (Neighborhood structure) แบบใหม่ วิธีนี้จัดอยู่ในวิธีฮิวริสติกและงานวิจัยนี้ได้

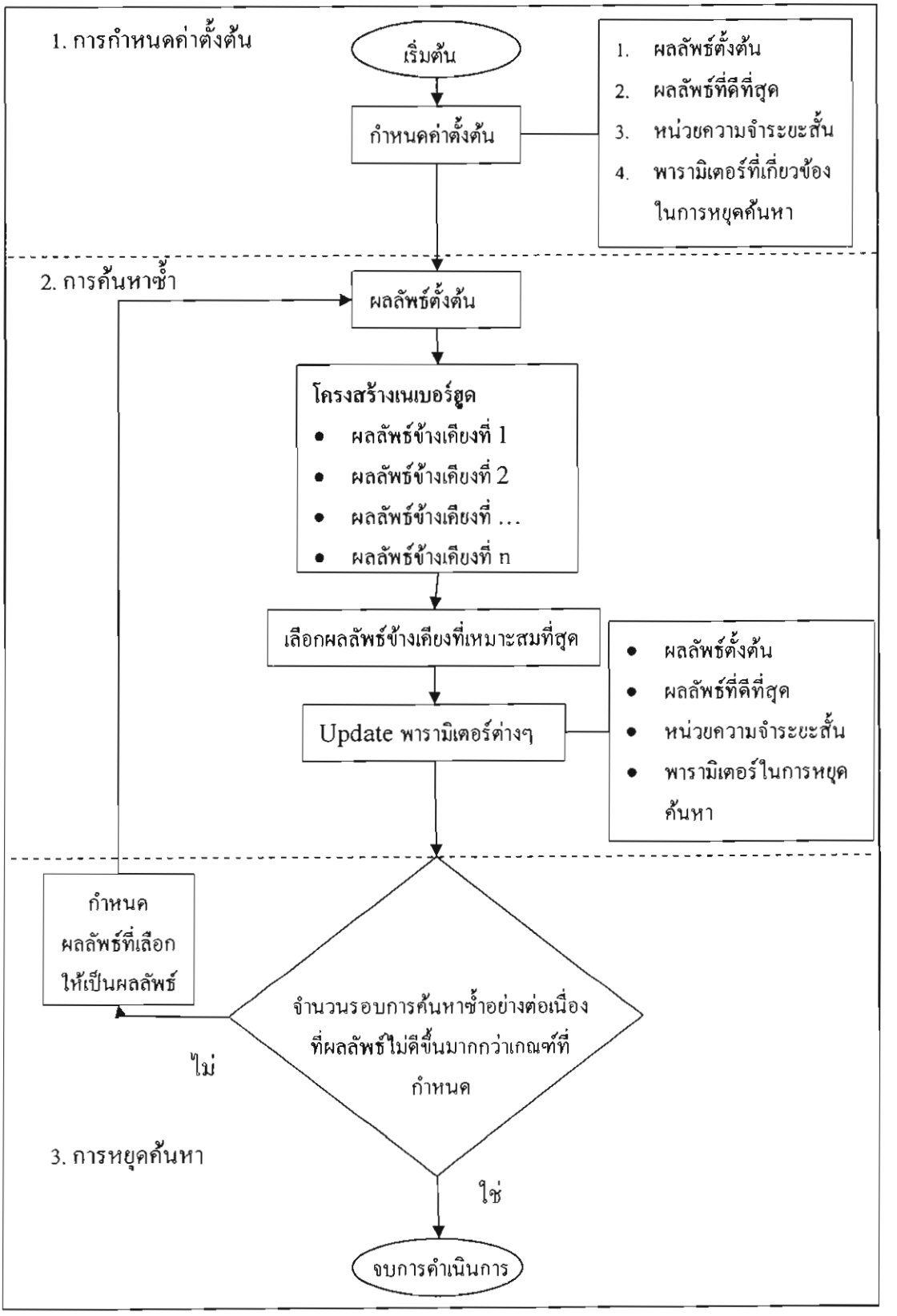
ทำการศึกษางานวิจัยที่ทำเกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรที่มีอยู่เดิม จากนั้นนำตัวอย่างในงานวิจัยมาทดลองในวิธีทาบูที่ออกแบบใหม่ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่สนใจ ว่าดีกว่าหรือไม่

วิธีการจัดตารางการผลิต

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการจัดตารางการผลิต และให้ความสนใจในวิธีการเมตาฮิวริสติก (Meta – heuristics) ซึ่งจะอยู่ในเทคนิคในการจัดตารางการผลิตประเภท การแจงนับโดยนัย (Implicit enumeration) เทคนิคการจัดตารางการผลิตประเภทนี้ส่วนมากที่นิยมนำมาวิเคราะห์ปัญหากันมีอยู่ 3 วิธีคือ วิธีการค้นหาแบบจำลองการอ่อนตัว (Simulated annealing) วิธีทาบู (Tabu search) วิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) ซึ่งทั้ง 3 วิธีนี้ก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีทาบูมาใช้ในงานวิจัยนี้ (ปารเมศ ชุติมา, 2546) ซึ่งวิธีเชิงพันธุกรรม จะไม่สนใจในโครงสร้างของผลลัพธ์เดิมที่มีอยู่ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่องานวิจัยนี้ที่ต้องการจะปรับปรุงโครงสร้างของผลลัพธ์เดิมให้ดีขึ้น ส่วนวิธีการค้นหาแบบจำลองการอ่อนตัวเมื่อเทียบกันกับวิธีทาบูจะมีลักษณะของวิธีการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมือนกันแตกต่างกันที่วิธีการเลือกผลลัพธ์นั้นๆ และวิธีการค้นหาแบบจำลองการอ่อนตัวต้องการเวลาในการค้นหาที่นานกว่า และมีวิธีการในการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมตลอดช่วงการค้นหาผลลัพธ์ยุ่งยากมากกว่าวิธีทาบู

1. การวางแผนการทำวิธีทาบู (Tabu search)

จะแบ่งการค้นหาแบบข้อห้าม (Tabu search) หรือ TS เป็น 3 โครงสร้างคือ การกำหนดค่าตั้งต้น (Initialization) การค้นหาซ้ำ (Iterative search) การหยุดค้นหา (Search stopping) ซึ่งทั้ง 3 โครงสร้างแสดงในภาพที่ 3-1 จะมีวิธีการทำ ดังนี้



ภาพที่ 3-1 แสดงโครงสร้างของวิธีทาบู

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะขออธิบายคำศัพท์ที่ใช้ในวิธีทาบูดังนี้

1. Iteration คือ การทำการค้นหาผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดตามโครงสร้างของทาบูที่ได้ออกแบบเอาไว้

2. Neighborhood structure คือ รูปแบบหรือวิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ใน Iteration

3. Move คือ การเปลี่ยนค่าตัวแปรเพื่อให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด

4. Neighbor คือ ผลลัพธ์จากการ Move

5. Incumbent คือ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของทุกรอบการค้นหาที่ผ่านมา

6. Tabu list คือ หน่วยความจำระยะสั้นที่จะทำหน้าที่ไม่ให้การหาผลลัพธ์ย้อนกลับที่เดิม

7. Nontabu move คือ Neighbor ที่ไม่อยู่ใน Tabu list

8. Tabu move คือ Neighbor ที่อยู่ใน Tabu list

2. อธิบายโครงสร้างทาบู

2.I การกำหนดค่าตั้งต้น: เริ่มทำการค้นหาจากตารางการผลิตตั้งต้นหนึ่ง ๆโดยการนำผลลัพธ์ตั้งต้นจากตารางการผลิตเดิม

2.2 การค้นหาซ้ำ:

2.2.1 ทำการค้นหาผลลัพธ์ข้างเคียง (Neighbor solution) ทั้งหมด โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรหรือรูปแบบ จากผลลัพธ์เริ่มต้น (Current solution) ของแต่ละ Iteration

1) การเปลี่ยนค่าตัวแปร (ทำการ Move)

2) หาการ Move ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการเปลี่ยนค่าตัวแปร

2.2.2 ทำการเลือกการ Move ตามลำดับที่เป็นไปได้ดังนี้

1) เลือกการ Move ที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นผลลัพธ์ที่ดีกว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Incumbent) ที่พบจากการ Search ทั้งหมดที่ผ่านมา (ถ้ามี)

2) เลือก Nontabu move ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (ถ้ามี)

3) เลือก Tabu move ตัวใดตัวหนึ่ง

2.2.3 การหยุดค้นหา งานวิจัยนี้จะกำหนดให้ การหยุดค้นหาจากจำนวนรอบการค้นหา ที่ไม่มีการปรับปรุงผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เท่ากับจำนวนที่มากที่สุดซึ่งสามารถกำหนดได้จากการทดลอง

ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีทาบูนั้น จำเป็นต้องมีการออกแบบ Neighborhood structure เพื่อที่จะทำการค้นหาผลลัพธ์ข้างเคียงซึ่งในการออกแบบนี้ต้องคำนึงถึงผลลัพธ์ที่ตั้งวัตถุประสงค์ในการค้นหาเพื่ออะไร จากการสำรวจงานวิจัยในอดีตพบว่า ถ้าต้องการออกแบบ Neighborhood structure ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้เวลาเสร็จสิ้นรวมต่ำสุด (Minimum makespan)

จะออกแบบด้วยวิธีการสลับงาน โดยวิธีการสลับงานที่ส่งผลด้านเวลาปิดงานของตารางการผลิตที่ต้องการปรับปรุง ส่วนงานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เกี่ยวกับเวลาส่งมอบงานเช่น ต้องการเวลารวมของงานสายน้อยที่สุด (Minimum total tardiness) จะออกแบบด้วยวิธีการแทรกงาน โดยเลือกงานที่เสร็จช้ากว่ากำหนดมอบไปแทรกงานที่ทำการผลิตก่อนในตารางการผลิตที่ต้องการปรับปรุง

3. ตัวอย่าง Neighborhood structure ด้วยวิธีทาบูซึ่งออกแบบด้วยวิธีการแทรกงาน

มีงานวิจัยที่ทำการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีทาบูซึ่งออกแบบ Neighborhood structure ด้วยการแทรกงานดังนี้ (ณัฐพล พุทธิพงษ์ และ ธนัญญา วสุศรี, 2548) การประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการค้นหาแบบทาบูในการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนาน (กนกวรรณ จงสดกมล และคณะ, 2551) การจัดตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรแบบขนานที่ลำดับของงานก่อนหน้ามีผลต่อเวลาในการเตรียมการผลิต (ศิริลักษณ์ เด็มภักดี และ คณะ, 2551) การพัฒนารูปแบบการจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบการไหลของสายงาน โดยจุดมุ่งหมายส่วนใหญ่เพื่อทำการลดจำนวนงานสาย

การจัดตารางการผลิตด้วยวิธีทาบูเป็นวิธีค่อนข้างยุ่งยาก และเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีนี้มากยิ่งขึ้น จึงใช้ตัวอย่างซึ่งอยู่ในรูปแบบเดียวกันซึ่งจำลองมาเป็นปัญหาขนาดเล็กเพื่อช่วยในการอธิบายรูปแบบของการจัดตารางการผลิตให้กับเครื่องจักรเป็นดังนี้

กำหนดให้มีงานจำนวน 10 งานซึ่งทำการผลิตบนเครื่องจักรแบบขนานจำนวน 3 เครื่อง ตามข้อมูลตารางที่ 3-1 โดยใช้วิธีการค้นหาแบบทาบู

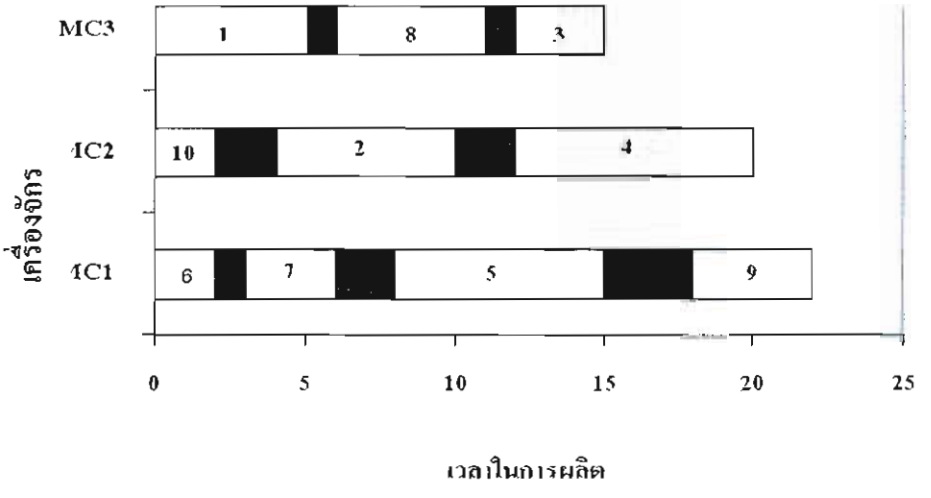
วิธีการค้นหาแบบทาบูเป็นวิธีที่นำเอาผลลัพธ์ของการจัดตารางการผลิตแบบง่ายมาปรับปรุง โดยตัวอย่างในงานวิจัยที่ทำการศึกษาจะนำเอาผลลัพธ์ของวิธี EDD มาเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นดังนั้นจัดลำดับของงานทั้งหมดโดยใช้กฎ EDD ได้งานตามลำดับ 6-10-1-7-2-8-5-4-3-9 มอบหมายงานให้เครื่องจักรที่มีงานอยู่น้อยที่สุดพร้อมกับรวมเวลาตั้งเครื่องจักรได้ผลลัพธ์ดังแสดงในแผนภูมิแกนต์ในภาพที่ 3-2

ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างข้อมูลด้านการผลิต

งาน	เวลาในการผลิต	กำหนดส่ง	เวลาตั้งเครื่องจักรหลังงานที่									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	8	0	3	1	1	2	1	1	2	1	2
2	6	11	2	0	3	2	1	2	3	1	3	2
3	3	16	1	1	0	1	1	1	1	1	2	(1)
4	8	15	1	2	1	0	2	4	2	2	1	2
5	7	12	2	3	1	2	0	2	2	3	2	2
6	2	5	3	1	2	1	1	0	3	1	2	3
7	3	8	2	2	3	2	2	1	0	2	3	1
8	5	11	1	1	2	3	3	3	2	0	2	1
9	4	17	2	3	1	2	2	1	1	1	0	(2)
10	2	7	1	1	1	1	3	2	7	7	3	0

เวลาตั้งเครื่องจักรของงาน 3 ที่ผลิตต่อจากงาน 10

เวลาตั้งเครื่องจักรของงาน 9 ที่ผลิตต่อจากงาน 10



ภาพที่ 3-2 ตารางการผลิตของวิธีการจัดด้วย EDD

ตารางการผลิตสามารถวิเคราะห์และสรุปผลเวลาได้ดังตารางที่ 3-2

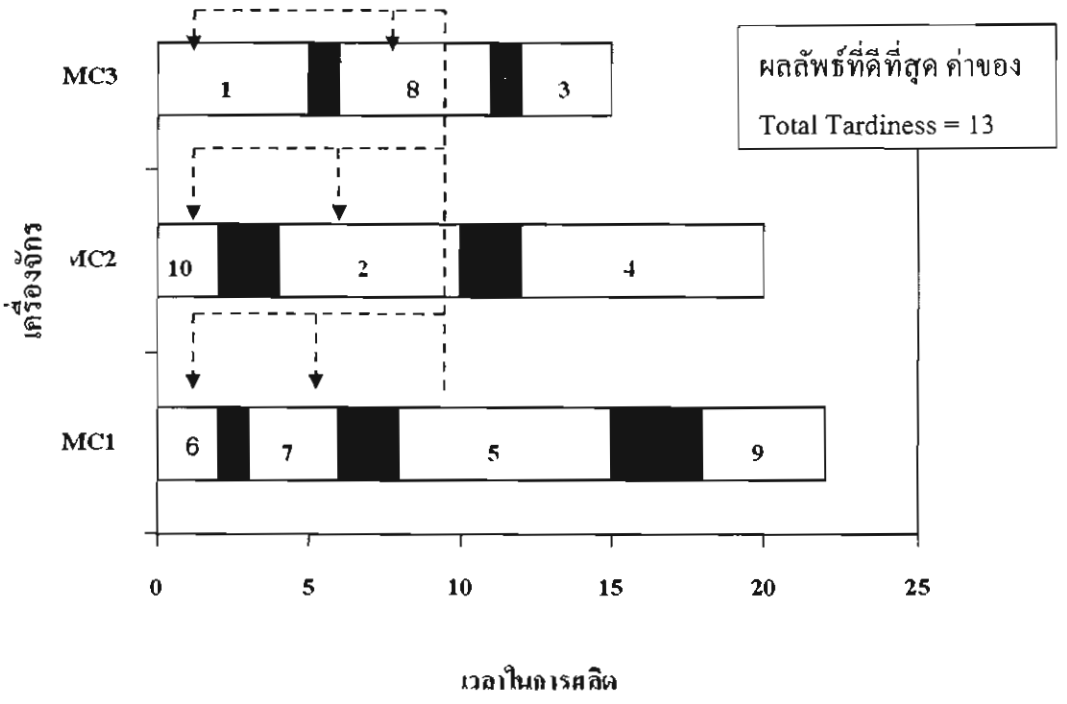
ตารางที่ 3-2 สรุปผลเวลาของงานที่ผลิตไม่ทันกำหนดส่ง

งาน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
เครื่องจักรที่	3	2	3	2	1	1	1	3	1	2	
เวลาการผลิต	5	6	3	8	7	2	3	5	4	2	
เวลาปรับตั้งเครื่องจักร	0	2	1	2	2	0	1	1	3	0	รวม
เวลางานเสร็จ	5	10	15	20	15	2	6	11	22	2	
กำหนดส่ง	8	11	16	15	12	5	8	11	17	7	
จำนวนงานส่งไม่ทัน	0	0	0	5	3	0	0	0	5	0	13

จากตารางที่ 3-2 สามารถบอกได้ว่ามีจำนวนงานสาย 3 งานคืองานที่ 4 5 9 Total Tardiness คือ 13 หน่วย

ผลลัพธ์ตั้งต้นจะใช้ผลลัพธ์ของวิธี EDD จากนั้นนำงานสายครั้งละ 1 งานทำการแทรกงานและหาผลลัพธ์จำนวนงานสายที่น้อยที่สุด เลือกทุกงานสายไปทำการแทรกจนครบวัตถุประสงค์ของการแทรกเพื่อลดจำนวนงานสาย ซึ่งการแทรกงานจะสามารถทำได้ทั้งบนเครื่องจักรเดียวกัน และต่างเครื่องจักร เพื่อให้เข้าใจในลักษณะของการแทรกงานแสดงไว้ตามภาพที่ 3-3 การแทรกงานที่ 5 โดยสมมติว่าให้งานที่ 5 เป็นงานสายจากนั้นให้นำงานที่ 5 ไปแทรกก่อนหน้างานที่มีเวลาเริ่มงานน้อยกว่าเวลาเริ่มงานของงานที่ 5 เช่นงาน 2 มีเวลาเริ่มเท่ากับ 4 หน่วย งาน 5 มีเวลาเริ่มเท่ากับ 8 หน่วย ดังนั้น 4 หน่วยน้อยกว่า 8 หน่วย งาน 5 จึงสามารถแทรกก่อนหน้างาน 2 ได้

จากตัวอย่างจำนวนงาน 10 งานบนเครื่องจักร 3 เครื่อง เมื่อทำการแทรกงานที่ 5 ได้ผลลัพธ์ข้างเคียงดังตารางที่ 3-3 อธิบายผลลัพธ์เมื่อนำงาน 5 ซึ่งอยู่บนเครื่องจักรเดิมคือ MC1 ไปแทรกก่อนหน้างาน 6 บนเครื่องจักรใหม่ในผลลัพธ์นี้เครื่องจักรใหม่ คือ MC1 เหมือนเดิม ได้ลำดับงานใหม่หลังการแทรกงานคือ 5-6-7-9 ส่วนลำดับงานหลังการแทรกงานบนเครื่องจักรเดิมจะเหมือนกับงานใหม่ เพราะเป็นการแทรกซึ่งอยู่บนเครื่องจักรตัวเดียวกัน เมื่อได้ลำดับงานจากนั้นทำการคำนวณเวลาล่าช้าได้ผลลัพธ์เท่ากับ 18 แสดงผลลัพธ์ของการแทรกงานดังตารางที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ตารางการผลิตวิธีการแทรกงาน

ตารางที่ 3-3 แสดงผลลัพธ์ข้างเคียงของการแทรกตำแหน่งงานที่ 5

งานสายที่เลือก	ผลลัพธ์ที่	ลำดับงานหลังการแทรกงาน		เครื่องจักรเดิม	เครื่องจักรใหม่	เวลาล่าช้า
		งานบนเครื่องจักรเดิม	งานใหม่			
5	1	5-6-7-9	5-6-7-9	1	1	18
	2	6-5-7-9	6-5-7-9			17
	3	6-7-9	5-10-2-4		2	29
	4	6-7-9	10-5-2-4			20
	5	6-7-9	5-1-8-3		3	28
	6	6-7-9	1-5-8-3			28

การเลือกผลลัพธ์ข้างเคียงที่ดีที่สุดมีวิธีดังนี้

1. เลือกผลลัพธ์ที่มีค่าเวลาล่าช้าน้อยที่สุดที่มีค่าน้อยกว่า Incumbent แต่ถ้าไม่มีผลลัพธ์ที่น้อยกว่าให้ทำตามข้อ 2

2. เลือกผลลัพธ์ที่ให้ค่าเวลาล่าช้าน้อยที่สุดใน รอบการค้นหา ปัจจุบันที่เป็น non tabu move (ถ้ามี) ในกรณีไม่มี non tabu move ให้ทำตามข้อ 3

3. เลือกที่ tabu move ที่เวลาล่าช้าดีที่สุด

4. ผลลัพธ์ที่ถูกเลือกจะนำไปเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นต่อไป

Tabu list: เป็นการบันทึกงานที่เคยถูกเปลี่ยนตำแหน่งในการค้นหาค่าก่อนหน้านี้ โดยงานที่ถูกบันทึกในรายการข้อห้าม (tabu list) ถูกบันทึกไว้ตามจำนวนครั้งที่เรากำหนด ในตัวอย่างนี้งานที่ถูกบันทึกคือ 5 ซึ่งตำแหน่งงานนี้เป็นตำแหน่งงานที่ถูกเปลี่ยน

จากตัวอย่างผลลัพธ์ข้างเคียงในตารางการผลิตที่ทำการเลือกค่าเวลาล่าช้าที่ดีที่สุดมา 1 ค่า ได้แก่ 17 ที่ลำดับงาน 6-5-7-9 ลำดับงานที่ถูกเลือกนี้ใช้เป็นผลลัพธ์ตั้งต้นต่อไป

4. ตัวอย่าง Neighborhood structure ด้วยวิธีทาบูซึ่งออกแบบด้วยวิธีการสลับงาน

การออกแบบด้วยวิธีการสลับงานนี้มีจุดมุ่งหมายโดยส่วนใหญ่อยู่ที่ลดเวลาการปิดงานให้น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีการจะใช้ปัญหาขนาดเล็กเพื่อช่วยในการอธิบาย การออกแบบ Neighborhood structure ของการจัดตารางการผลิตให้กับเครื่องจักร ตัวอย่างปัญหามีดังนี้

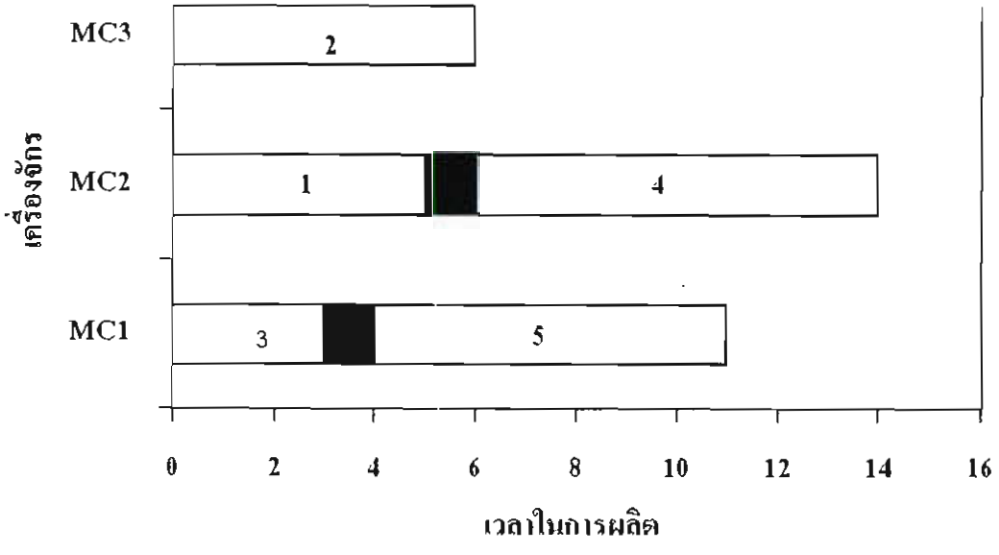
กำหนดให้มีงานจำนวน 5 งานซึ่งทำการผลิตบนเครื่องจักรแบบขนานจำนวน 3 เครื่อง ตามตารางที่ 3-4 โดยใช้วิธีการค้นหาแบบทาบู

ตารางที่ 3-4 ข้อมูลด้านการผลิตของตัวอย่างวิธีสลับงาน

งาน	เวลาในการผลิต	เวลาตั้งเครื่องจักร				
		1	2	3	4	5
1	5	0	3	1	1	2
2	6	2	0	3	2	1
3	3	1	1	0	1	1
4	8	1	2	1	0	2
5	7	1	3	1	2	0

วิธีการค้นหาแบบทาบูเป็นวิธีที่นำเอาผลลัพธ์ของการจัดตารางการผลิตแบบง่าย มาปรับปรุง โดยตัวอย่างนี้ใช้วิธี SPT มาเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นดังนั้นจัดลำดับของงานทั้งหมดโดยใช้กฎ SPT ได้งานตามลำดับ 3-1-2-5-4

มอบหมายงานให้เครื่องจักรที่มีงานอยู่น้อยที่สุดพร้อมกับรวมเวลาตั้งเครื่องจักร ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางการผลิตในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ตารางการผลิตการจัดด้วยวิธี SPT

จากตารางการผลิตสามารถวิเคราะห์และสรุปผลเวลาได้ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 สรุปผลเวลารวมของการปิดงานของลำดับงาน 3-1-2-5-4

งาน	1	2	3	4	5
เครื่องจักรที่	2	3	1	2	1
เวลาการผลิต	5	6	3	8	7
เวลาปรับตั้งเครื่องจักร	0	0	0	1	1
เวลางานเสร็จ	5	6	3	14	11
เวลาปิดงาน	14				

จากตารางที่ 3-5 มีค่าเวลาปิดงานของการจัดลำดับงาน 3-1-2-5-4 เท่ากับ 14 หน่วย ผลลัพธ์ตั้งต้นให้นำผลลัพธ์ของวิธี SPT เป็นผลลัพธ์ตั้งต้น และทำการสลับงานที่อยู่ใกล้เคียงกันจนครบทุกงาน วิธีการมอบหมายงานให้กับเครื่องจักรที่มีค่าน้อยสุดผลิตก่อน ผลลัพธ์ข้างเคียงที่ทำการสลับงานแสดงดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 แสดงผลลัพธ์ข้างเคียงจากการสลับงานที่ผลลัพธ์ตั้งต้น 3-1-2-5-4

ลำดับงานเดิม	ลำดับงานใหม่ที่ทำการสลับ	เวลาปิดงาน
3-1-2-5-4	1-3-2-5-4	14
	3-2-1-5-4	14
	3-1-5-2-4	14
	3-1-2-4-5	13

การเลือกผลลัพธ์ข้างเคียงที่ดีที่สุดมีวิธีดังนี้

1. เลือกผลลัพธ์ที่มีค่าเวลาปิดงานน้อยที่สุดถ้ามี แต่ถ้าไม่มีผลลัพธ์ที่น้อยกว่าให้ทำตามข้อ 2

2. ถ้าผลลัพธ์ไม่มีผลลัพธ์ที่ให้ค่าเวลาปิดงานน้อยกว่าผลตั้งต้นให้เลือกผลลัพธ์น้อยที่สุดในรอบการค้นหา นั้นที่เป็น Non tabu move ถ้ามี ในกรณีไม่มี Non tabu move ให้ทำตามข้อ 3

3. ถ้าไม่มี Non tabu move ให้เลือกที่ Tabu move ที่ เวลาปิดงาน ดีที่สุด

4. ผลลัพธ์ที่ถูกเลือกจะนำไปเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นต่อไป

Tabu list: เป็นการบันทึกงานที่เคยถูกเปลี่ยนตำแหน่งในการค้นหาค่าก่อนหน้านี้ โดยงานที่ถูกบันทึกในรายการข้อห้าม (Tabu list) จะถูกบันทึกไว้ตามจำนวนครั้งที่เรากำหนด ในตัวอย่างนี้งานที่ถูกบันทึก คือ 3-1-2-5-4 ซึ่งตำแหน่งงานนี้เป็นตำแหน่งงานที่ถูกเปลี่ยน

จากตัวอย่างผลลัพธ์ข้างเคียงในตารางการผลิตที่ทำการเลือกค่าเวลาปิดงานที่ดีที่สุดมา 1 ค่า ได้แก่ 13 ที่ลำดับงาน 3-1-2-4-5 และคู่งาน 4 สลับ 5 ถูกบันทึกอยู่ในรายการข้อห้ามและลำดับงานที่ถูกเลือกนี้ใช้เป็นผลลัพธ์ตั้งต้นต่อไป

จากตัวอย่างทั้ง 2 แสดงให้เห็นถึงการหาเป้าหมายที่ต่างกันจึงทำให้การออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดแตกต่างกันแต่ในงานวิจัยที่ทำการศึกษานี้ได้ให้ความสนใจกับเป้าหมายทั้ง 2

พร้อมกันดังนั้นการออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดจึงต้องแตกต่างกันออกไป ทางผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงการแทรกงานและการสลับเพื่อนำมาออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดต่อไป

5. การออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูด

วิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดของการแทรกงานและการสลับงานตามตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 3-7

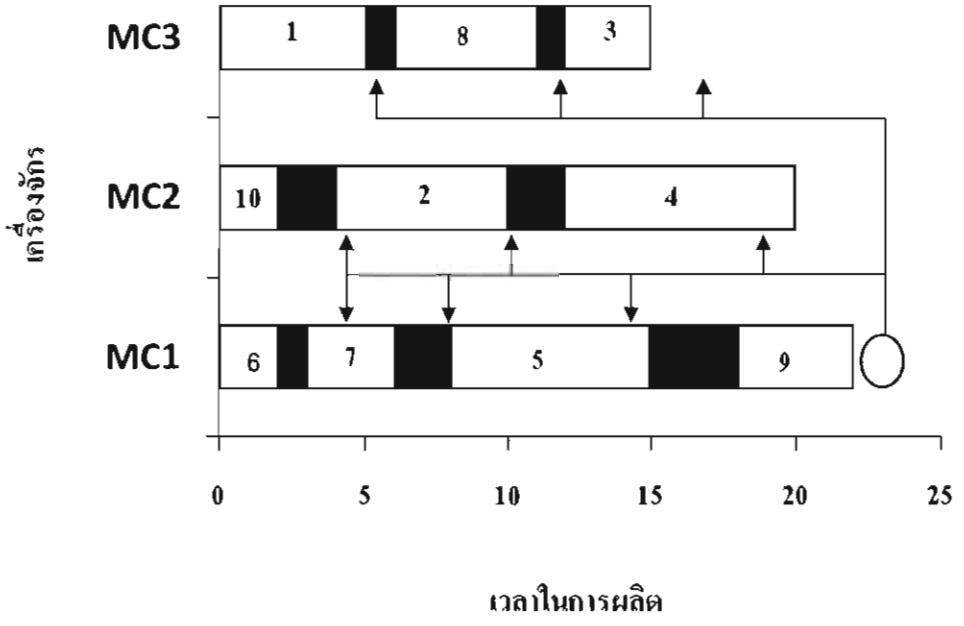
ตารางที่ 3-7 การวิเคราะห์วิธีการสร้างผลลัพธ์ด้วยการแทรกงานและการสลับงาน

การแทรกงาน	การสลับงาน
สามารถเจาะจงงานที่ต้องการเปลี่ยนตำแหน่งได้ ซึ่งงานนั้นก็เป็นปัญหาอย่างชัดเจนที่ต้องการจะแก้ไขเพื่อให้งานนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดของงาน จำนวนผลลัพธ์ในการทำแต่ละรอบการค้นหาไม่เท่ากันจึงทำให้เวลาในการค้นหาไม่แน่นอนอาจมากหรือน้อยแล้วแต่จำนวนที่ทำการค้นหาผลลัพธ์	งานสามารถสลับเปลี่ยนเครื่องจักรอื่นได้โดยง่าย งานที่ถูกเลือกไปสลับนั้นอาจไม่ใช่งานที่เป็นปัญหาตามที่กำหนด เพียงแต่เมื่อทำการสลับแล้วอาจทำให้ผลลัพธ์ดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้

ทางผู้วิจัยต้องการข้อดีของทั้งสองแบบมาผสมผสานกันจึงออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดออกมา 3 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 สลับงานจากนั้นแทรกงาน (ไม่ข้ามเครื่องจักร)

1. ทำการสลับงาน โดยงานที่ต้องนำไปสลับตำแหน่งต้องเลือกจากงานสุดท้ายที่ให้ค่า เวลาปิดงาน มากที่สุดสลับกับทุกงาน เพื่อให้ง่ายต้องการทำความเข้าใจจะแสดงการอธิบายดังภาพที่ 3-5 อธิบายว่างานที่ 9 เป็นลำดับงานสุดท้ายที่ให้ค่า เวลาปิดงาน มากที่สุดดังนั้นงานที่ 9 จึงเป็นงานที่ต้องถูกเลือกไปสลับกับงานอื่น ๆ ทุกงานเพื่อหาลำดับงานใหม่ที่อาจให้ค่าเวลาปิดงานลำดับอื่นที่ดีกว่า

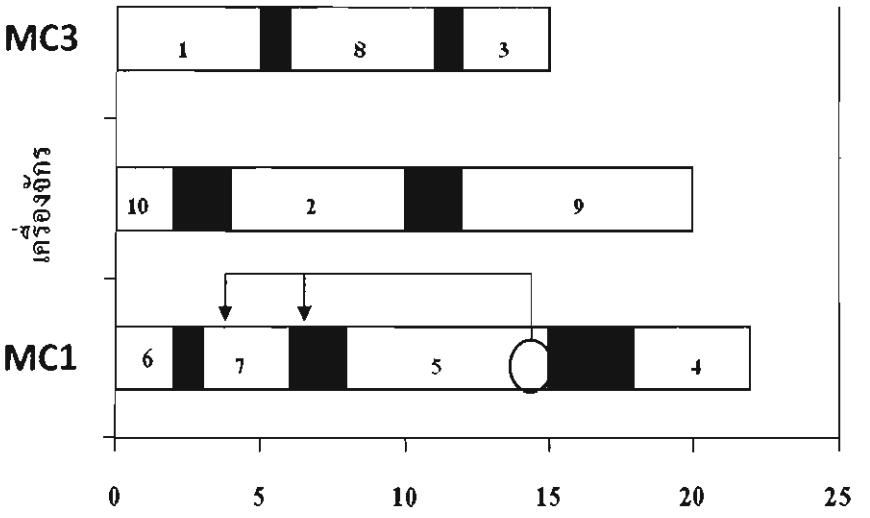


ภาพที่ 3-5 ตารางการผลิตวิธีการสลับในรูปแบบที่ 1

2. เลือกงานลำดับงานที่ให้ผลลัพธ์เวลาปิดงานน้อยที่สุดจากการสลับ

3. ตรวจสอบดูว่าลำดับงานนั้นมีงานสายหรือไม่ ถ้าไม่มีจบรอบการค้นหานั้น ๆ ถ้ามีทำตามข้อ 4

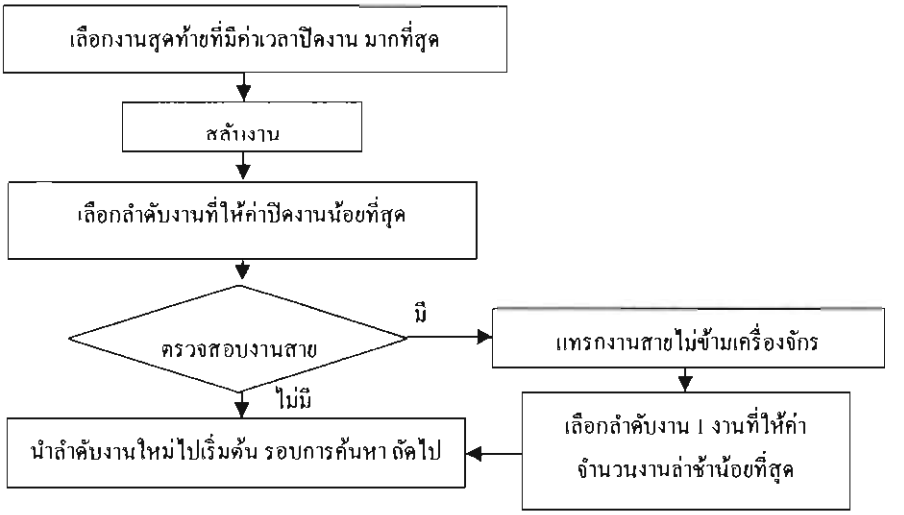
4. เลือกงานที่สายทำการแทรกงานเฉพาะภายในเครื่องจักรเดียวกันไม่กระโดดข้ามไปที่เครื่องจักรอื่น เพื่อเป็นการรักษาลำดับงานให้ค่าเวลาปิดงานเปลี่ยนไปน้อยที่สุด การแทรกงานก็จะได้ข้อดีคือ เจาะจงที่เปลี่ยนตำแหน่งงานที่ล่าช้าให้ไม่ล่าช้าได้ เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจจะแสดงเป็นภาพที่ 3-6 อธิบายได้ว่าสมมติว่างาน 5 เป็นงานสายดังนั้นจึงนำงาน 5 ไปแทรกก่อนงานที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ทำการพิจารณาเช่นนี้กับงานสายทุกงาน



ภาพที่ 3-6 ตารางการผลิตวิธีการแทรกในรูปแบบที่ 1

5. เมื่อแทรกงานตามลำดับจนจำนวนงานที่ทำการแทรกไม่ล่าช้าหรือจนครบแล้วเลือก 1 ลำดับที่ให้ค่าผลลัพธ์จำนวนงานสายดีที่สุดไปเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นต่อไป ในรูปแบบที่ 1 สามารถอธิบายขั้นตอนใน 1 รอบการค้นได้ดังภาพที่ 3-7

หมายเหตุ : งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับจำนวนงานสายมากกว่า เวลาล่าช้า

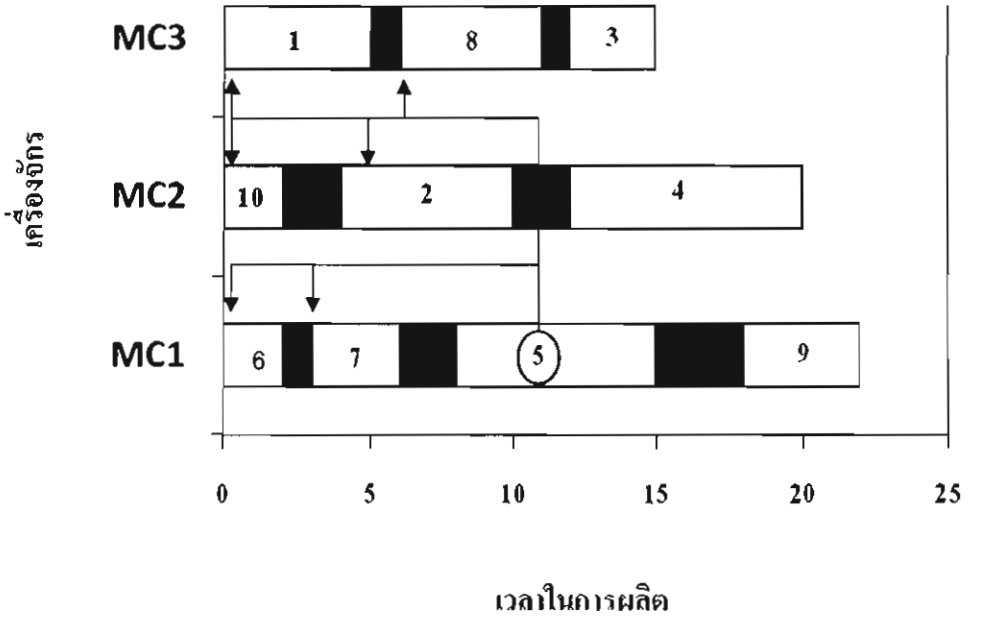


ภาพที่ 3-7 โครงสร้างเนเบอร์ฮูดรูปแบบที่ 1

รูปแบบที่ 2 แทรกงาน (ข้ามเครื่องจักร) จากนั้นสลับงาน

1. ตรวจสอบดูว่าลำดับงานนั้นมีงานสายหรือไม่ ถ้ามีทำตามข้อ 2 ถ้าไม่มีทำตามข้อ 4

2. เลือกงานที่สาย นำงานที่สายไปแทรกในลำดับงานต่าง ๆ ที่มีค่าเวลาที่เริ่มต้นงานน้อยกว่าค่าเวลาเริ่มต้นงานของตัวงานสายสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 ตารางการผลิตวิธีการแทรกในรูปแบบที่ 2

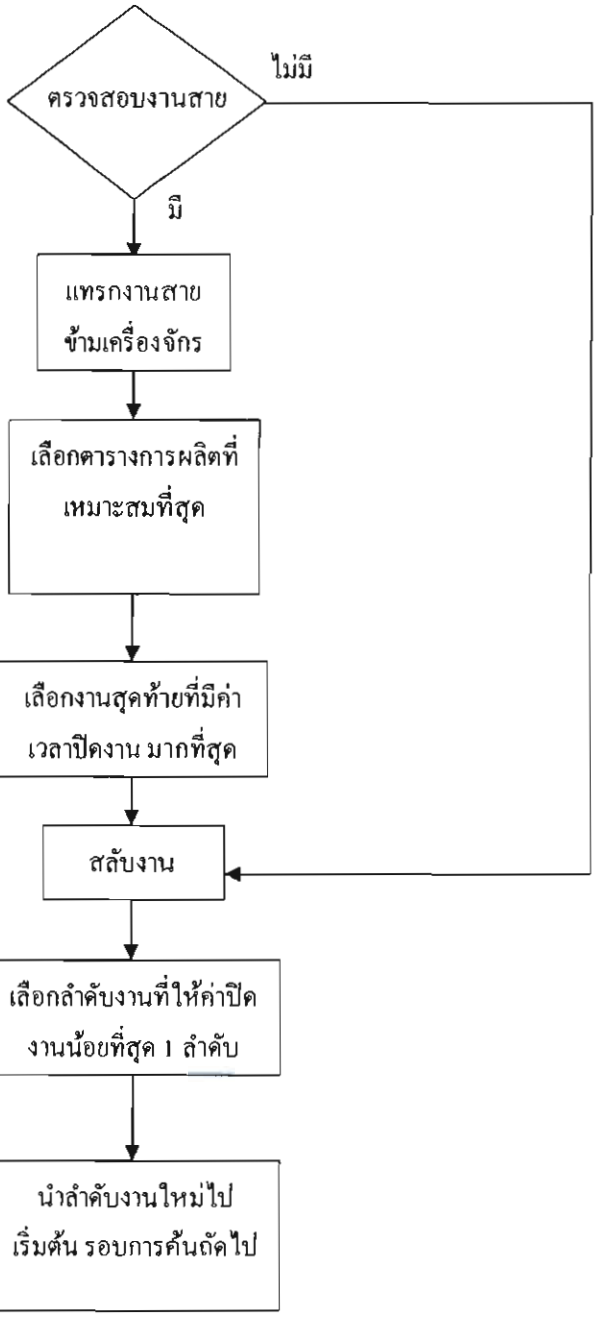
จากภาพที่ 3-8 อธิบายได้ว่าสมมติว่างาน 5 เป็นงานสาย ดังนั้นจึงนำงาน 5 ไปแทรกงานที่ค่าเวลาเริ่มต้นของงานน้อยกว่าของงานที่ 5 ซึ่งในที่นี้คืองาน 6,7,10,2,1 และ 8 ทำการพิจารณาเช่นนี้กับงานสายทุกงาน

3. เลือกงานลำดับงานที่ให้จำนวนงานสายน้อยที่สุดจากการแทรกมา 1 ลำดับงาน

4. ทำการสลับงาน โดยงานที่ต้องนำไปสลับตำแหน่งต้องเลือกจากงานสุดท้ายที่ให้ค่า เวลาปิดงาน มากที่สุดสลับกับทุกงาน (เหมือนกับข้อ 1 ในรูปแบบที่ 1)

5. เมื่อทำการสลับงานจนครบทุกงานแล้วเลือกลำดับงานที่ให้ผลลัพธ์เวลาปิดงาน ดีที่สุดเพื่อนำไปตั้งต้นเป็นรอบการค้นหาต่อไป

ในรูปแบบที่ 2 สามารถอธิบายขั้นตอนใน 1 รอบการค้นหาได้ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 โครงสร้างเนเบอร์ฮูดรูปแบบที่ 2

รูปแบบที่ 3 สลับงาน (หลายรอบการค้นหาติดต่อกัน) จากนั้นแทรกงาน (หลายรอบการค้นหาติดต่อกัน)

1. ทำการสลับงาน เลือกงานสุดท้ายที่ให้ค่าเวลาปิดงานสลับกับทุกงาน (เหมือนกับข้อ 1 ในรูปแบบที่ 1)

2. เมื่อทำการสลับงานจนครบทุกงานแล้วเลือกลำดับงานที่ให้ผลลัพธ์เวลาปิดงานดีที่สุดเพื่อนำไปตั้งต้นเป็น รอบการค้นหา ต่อไป

3. ทำซ้ำข้อ 1 และ 2 ไปถึงจำนวนครั้งที่เหมาะสมซึ่งจำนวนครั้งสามารถกำหนดได้จากการทดลองต่อไป

4. นำผลลัพธ์เวลาปิดงานที่สุดจากทุกรอบจำนวนครั้งที่เหมาะสมไปเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นของการแทรกงานต่อไป

5. ตรวจสอบดูว่ามีงานสายหรือไม่ ถ้าไม่มีทำตามข้อ 1 ใหม่ ถ้ามีทำข้อ 5

6. ทำการแทรกงานเหมือนกับรูปแบบที่ 2 แล้วเลือกผลลัพธ์จำนวนงานสายน้อยที่สุดนำไปตั้งต้นเป็น รอบการค้นหา ต่อไป

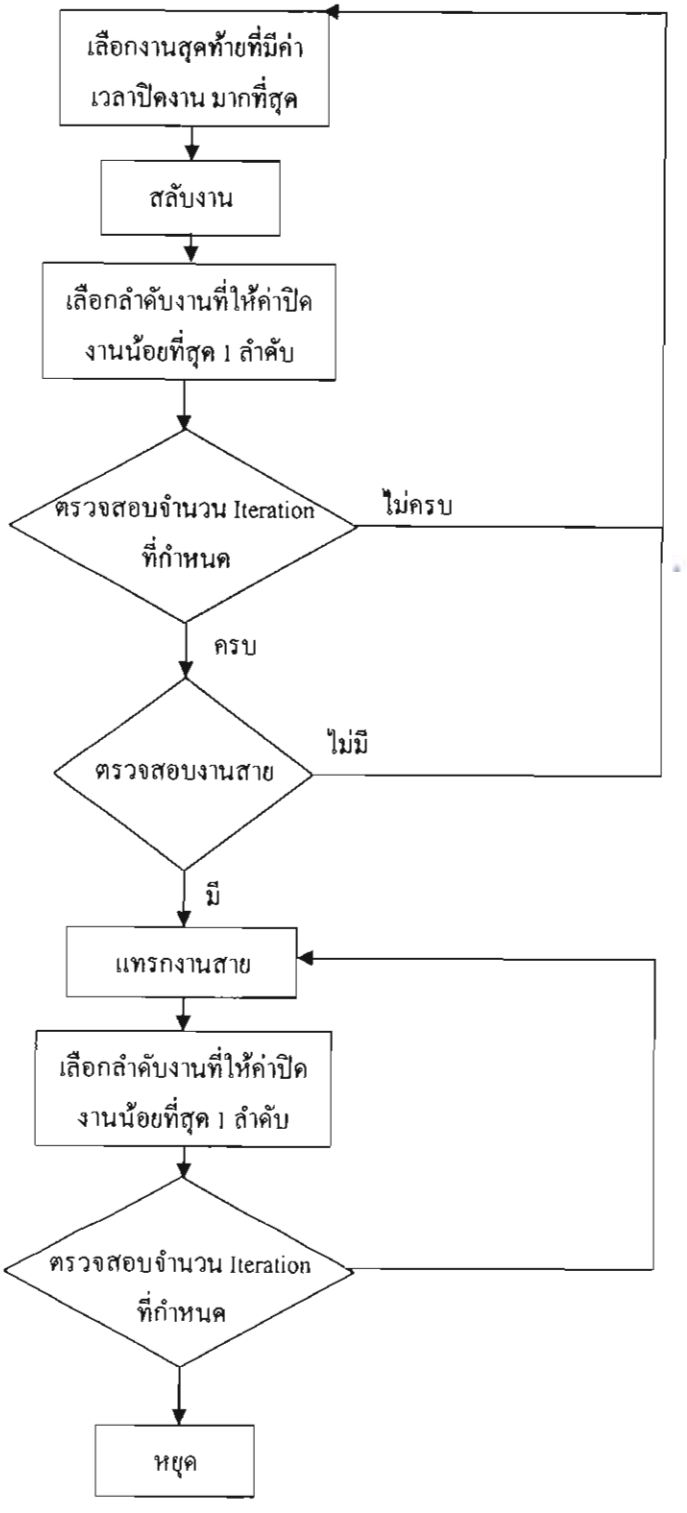
7. ทำซ้ำข้อ 4 และ 5 ไปจนจำนวนครั้งที่เหมาะสมซึ่งจำนวนครั้งสามารถกำหนดได้จากการทดลอง ในกรณีที่งานไม่มีงานสายแล้วแต่ยังทำซ้ำไม่ถึงตามจำนวนครั้งให้หยุดการค้นหาในรอบนั้น ๆ

8. นำผลลัพธ์จำนวนงานสายน้อยที่สุดจากทุกรอบจำนวนครั้งที่เหมาะสมไปเป็นผลลัพธ์ตั้งต้นของการสลับงานในรอบต่อไป

ในรูปแบบที่ 3 สามารถอธิบาย ได้ดังภาพที่ 3-10

6. การออกแบบรายการข้อห้าม

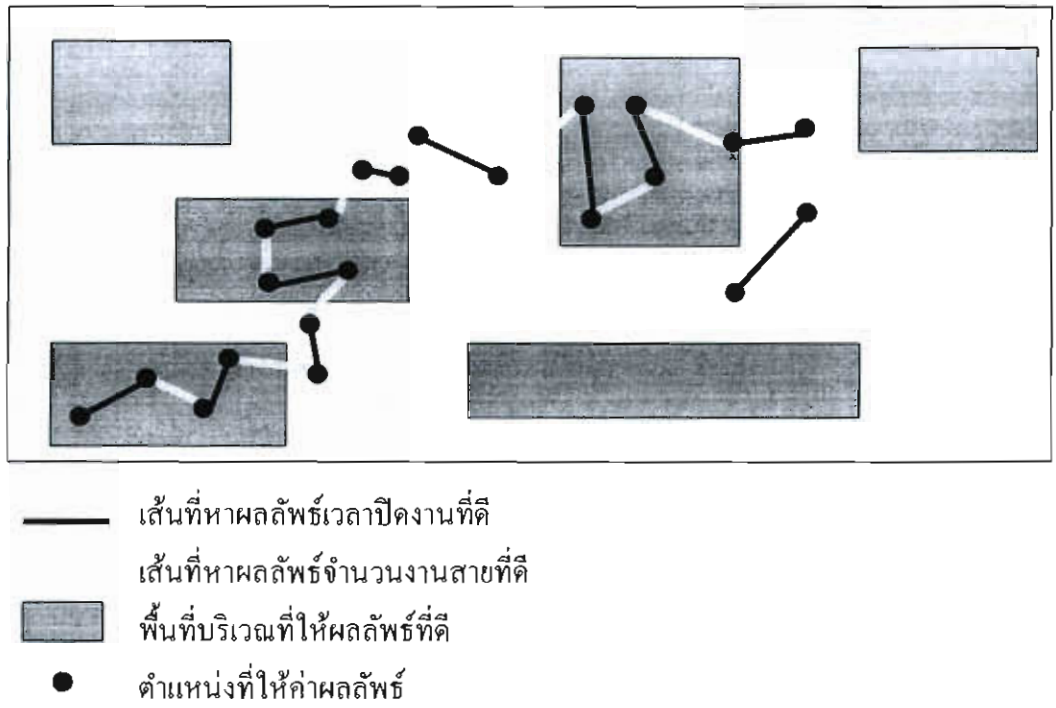
จากตัวอย่างแทรกงานและสลับงาน เมื่อวิเคราะห์การออกแบบรายการข้อห้าม(Tabu list) ทั้งสองตัวอย่างนั้นจะเห็นได้ว่ารูปแบบทั้งสองไม่สามารถออกแบบให้เหมือนกัน เพราะการออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดไม่เหมือนกันซึ่งการแทรกงานไปเป็นการบันทึกในรายการข้อห้ามจึงใช้ 1 งานเท่านั้น ซึ่งต่างจากการสลับงานต้องยึดหลักเป็นคู่เพราะฉะนั้นการบันทึกในรายการข้อห้ามจึงบันทึกเป็นคู่การสลับ ดังนั้นการออกแบบ รายการข้อห้าม ในรูปแบบที่กำหนดไว้ข้างต้นทั้ง 3 รูปแบบนั้น จึงต้องปรับตามแบบของโครงสร้างเนเบอร์ฮูดที่สามารถทำได้ในที่นี้ใช้แบบวิธีบันทึก 1 งานในรูปแบบที่ 1 และใช้วิธีบันทึกคู่ลำดับผสมกับบันทึก 1 งานในรูปแบบที่ 2 กับรูปแบบที่ 3



ภาพที่ 3-10 แผนผังแสดงรูปแบบที่ 3

7. กลยุทธ์ที่ใช้ในการออกแบบการค้นหา

รูปแบบที่ 1 และ 2 ใช้กลยุทธ์การค้นหาแบบทาบูตามโครงสร้างทาบูภาพที่ 3-1 เขียนเป็นเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ได้ดังภาพที่ 3-11

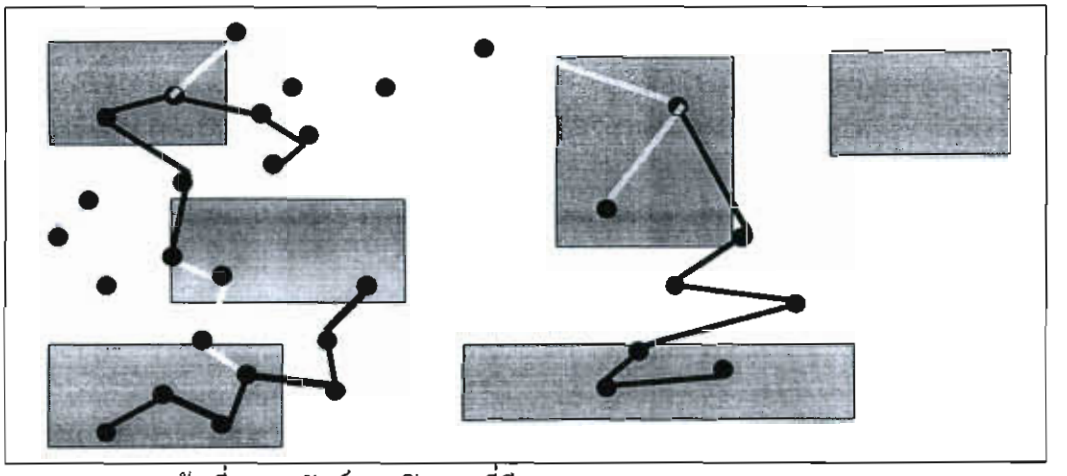


ภาพที่ 3-11 เส้นทางของผลลัพธ์ในรูปแบบ 1 และ 2

จากภาพที่ 3-11 เห็นได้ว่าผลลัพธ์เส้นทางของผลลัพธ์จะเป็นเส้นเดียวไม่มีการแยกไปในพื้นที่ต่าง ๆ โดยผลลัพธ์นั้นมุ่งในเป้าหมายที่ดีที่สุดของเวลาปิดงานสลับกับจำนวนงานสายในทุกรอบการค้นหา

รูปแบบ 3 ใช้กลยุทธ์การค้นหาแบบ การเริ่มต้นการค้นหาใหม่แบบหลายครั้ง (Multi restart strategy) กล่าวคือ เมื่อทำการค้นหาตามโครงสร้างทาบูดังภาพที่ 3-1 จนถึงจำนวนรอบที่เหมาะสมจากนั้นทำการเริ่มการค้นหาใหม่โดยใช้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาที่ผ่านมาเป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหาต่อไปโดยลบข้อมูลทั้งหมดที่บันทึกไว้เกี่ยวกับรายการห้าม ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เพื่อทำการเริ่มต้นค้นหาใหม่ เส้นทางของผลลัพธ์แสดงดังภาพที่ 3-12

การเริ่มต้นการค้นหาใหม่แบบหลายครั้ง (Multi restart strategy) มีรูปแบบการทำหลากหลายวิธี จุดประสงค์ของการเริ่มค้นหาใหม่แบบหลายครั้งก็เพื่อให้การค้นหาผลลัพธ์ได้กระจายได้ทั่วพื้นที่ของผลลัพธ์ที่เป็นได้ทั้งหมดมากกว่า



เส้นที่หาผลลัพธ์เวลาปิดงานที่ดี

เส้นที่หาผลลัพธ์จำนวนงานสายที่ดี

พื้นที่บริเวณที่ให้ผลลัพธ์ที่ดี

ตำแหน่งที่ให้ค่าผลลัพธ์

ตำแหน่งที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดก่อนเริ่มต้นการค้นหาใหม่

ภาพที่ 3-12 เส้นทางของผลลัพธ์ในรูปแบบ 3

จากภาพที่ 3-12 เห็นได้ว่าเส้นทางของผลลัพธ์จะแตกเป็นกิ่ง ไม่เป็นไปในเส้นทางเดียว จะทำให้ค้นหาผลลัพธ์เป็นบริเวณกว้าง โดยผลลัพธ์มุ่งเน้นเพียงหนึ่งเป้าหมายในระยะเวลาหนึ่ง ๆ (ระยะเวลาคือช่วงรอบการค้นหาที่ปรับตั้งนานเท่าใดก่อนทำการเปลี่ยนเป้าหมายในการค้นหา) จากนั้นจะทำการเริ่มต้นใหม่โดยจะมุ้งเน้นในเป้าหมายถัดไปจนครบตามจำนวนรอบการค้นหา

การเปรียบเทียบผลลัพธ์วิธีการทางฮิวริสติกที่ทำการออกแบบ

เมื่อทำการออกแบบวิธีการจากนั้น จำเป็นต้องบอกถึงวิธีการวัดผลของกระบวนการว่าจะต้องทำอย่างไร ทางผู้วิจัยได้วางแผนที่จะเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ไว้ดังนี้

1. เปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรม (ณัชชา ดารอน, 2551)
2. เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
3. เปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตพื้นฐานอย่างง่าย

ปัญหาที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

1. ปัญหาการจัดตารางการผลิตโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสายไฟรถยนต์
2. ปัญหาที่จำลองขึ้นมาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้จำแนกปัญหาที่ทำการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

2. ปัญหาขนาดเล็กที่สามารถหาตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานต่ำที่สุด และตารางการผลิตที่มีจำนวนงานสายต่ำที่สุด

3. ปัญหาจากกรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรม

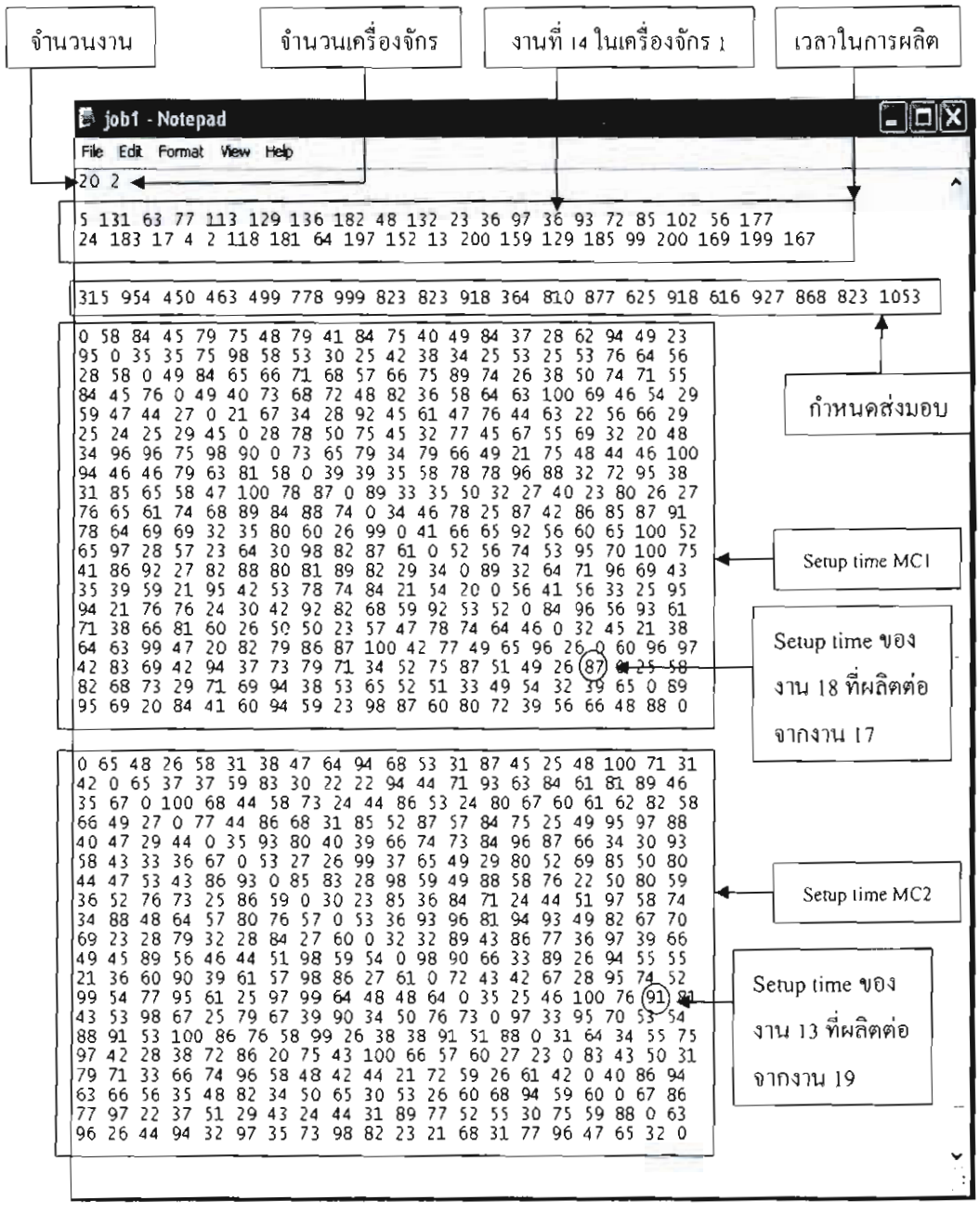
ปัญหาทั้งสามส่วนมีวัตถุประสงค์ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 วัตถุประสงค์ของการแบ่งปัญหาในงานวิจัย

ปัญหาการทดลอง	วัตถุประสงค์ของการทดลอง
1	- กำหนดค่าพารามิเตอร์ รอบการหยุดและความยาวทาบู - เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการจัดตารางการผลิตอย่างง่าย
2	- เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลลัพธ์ขอบเขตล่าง (Lower bound)
3	- เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการจัดตารางการผลิตในอุตสาหกรรม

1. ปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ มีการทดลองสำหรับการจำลองปัญหาด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งหมด 17 ปัญหา ผลลัพธ์จากการทดลองนำไปใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ในการค้นหาแบบทาบูได้แก่ ความยาวของทาบู (Tabu length) และพารามิเตอร์ในการหยุดการค้นหา การออกแบบปัญหาให้มีจำนวนงานอยู่ในช่วง 20-80 งาน จำนวนเครื่องจักร 2 หรือ 3 เครื่องจักร เวลาการผลิตของแต่ละงานบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องถูกกำหนดโดยใช้ตัวแปรสุ่มแบบยูนิฟอร์มที่มีค่าตั้งแต่ 1-200 หน่วยเวลา เวลาปรับตั้งเครื่องจักรของงานแต่ละงานขึ้นอยู่กับงานก่อนหน้าถูกกำหนดโดยใช้ตัวแปรสุ่มแบบยูนิฟอร์มที่มีค่าตั้งแต่ 20-100 หน่วยเวลา ส่วนเวลากำหนดส่งมอบถูกกำหนดจากจำนวน F เท่าของผลรวมของเวลาผลิตโดยเฉลี่ยและเวลาปรับ

ตั้งเครื่องจักรโดยเฉลี่ยของงานนั้น การกำหนดค่า F ทำโดยทดลองจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD เพื่อให้มีงานสาย 30% ของจำนวนงานทั้งหมด ตัวอย่างของผลลัพธ์จากการจำลองปัญหาแสดงได้ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 รูปแบบการแสดงผลของการสร้างกลุ่มปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

3. ปัญหาจากกรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรม การจัดตารางการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสายไฟรถยนต์ สำหรับการทดลองกับกรณีศึกษามีทั้งหมด 5 ปัญหา โดยปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตส่วนหนึ่งมาจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เหมือนกัน มีความต้องการแตกต่างกัน ทำให้เกิดปัญหางานคั่งค้างอยู่ในกระบวนการเป็นจำนวนมาก และสาเหตุอีกส่วนหนึ่งมาจากการจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักรไม่มีประสิทธิภาพจึงพยายามแก้ปัญหานี้โดยการจัดตารางการผลิตให้กับเครื่องจักร การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนาน ภายใต้เงื่อนไขของทรัพยากรการผลิตสามารถสรุปงานทั้งหมดได้ดังนี้

3.1 งานวิจัยได้ทำการศึกษาถึงปัญหาการผลิตของชุดสายไฟสำหรับรถยนต์เท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 9 ชุด

3.2 งานเป็นลักษณะการจัดเรียงสายไฟให้เข้าชุดตามใบสั่ง

3.3 งานวิจัยที่อ้างถึงนี้เป็นการศึกษาการทำงานเครื่องตัดสายไฟแบบอัตโนมัติ 18 เครื่อง

3.4 การจัดเรียงเครื่องจักรแบบขนาน

3.5 แบ่งกลุ่มเครื่องจักรดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 กลุ่มเครื่องจักรของงานอุตสาหกรรม

กลุ่มเครื่องจักร	จำนวนเครื่องจักร
KM	1
TR	3
TRD และ WPBS	11 และ 3

3.6 กำหนดให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรเหมือนกัน

3.7 คุณสมบัติของเครื่องจักรเป็นได้ทั้งเครื่องจักรขนานสัมพันธ์กัน (Identical) ใช้กับกรณีไม่ย้ำหัวสายไฟ และเป็นเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated) ใช้กับกรณีย้ำหัวสายไฟ

3.8 ในงานวิจัยที่อ้างถึงได้ใช้วิธีการสุ่มอย่างมีเหตุผล (Heuristic Approach) โดยใช้กฎการจ่ายงาน (Dispatching rule) 10 กฎได้แก่ SPT1, EDD-SPT1, EDD-LPT1, MOPNR1, LOPNP1, SPT2, , EDD-SPT2, EDD-LPT2, MOPNR2, LOPNP2

3.9 งานวิจัยที่อ้างถึงได้แบ่งขนาดของงานออกเป็นขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่เพื่อนำไปทดสอบโปรแกรมการจัดตารางการผลิต

3.10 จากผลการทดสอบโปรแกรมการจัดตารางการผลิตทั้ง 3 ประเภททำให้ทราบกฎแบบ SPT1 ที่ให้ความสำคัญกับเวลาปรับตั้งเครื่องจักร ที่นำงานทั้งหมดที่ทำการผลิตในวันนั้นมาทำการจัดกลุ่มเพื่อลดการปรับตั้งเครื่อง ทำให้เกิดประสิทธิภาพการจัดตารางการผลิตดีที่สุดและสม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าของเวลาเสร็จงานมีน้อยที่สุดกว่าวิธีอื่น SPT1 จะนำเวลาปฏิบัติงานที่สั้นที่สุดมาทำการผลิตก่อน

ลักษณะการจัดเรียงเครื่องจักร

จากการศึกษางานวิจัยตัวอย่างจะพบว่าระบบการผลิตประกอบด้วยเครื่องจักรมากกว่า 1 เครื่องที่มีการทำงานแบบขนานกัน ทำงานได้ประสิทธิภาพด้านความเร็วในการผลิตไม่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การจัดเรียงเครื่องจักรเป็นแบบเครื่องจักรขนานที่เหมือนกันส่วนบางงานในงานวิจัยตัวอย่างต้องทำการผลิตเฉพาะเครื่องจักรบางเครื่องทำได้เท่านั้นซึ่งเป็นข้อยกเว้นของงานวิจัยนี้

ลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของการผลิต

ระบบผลิตมีลักษณะสมบัติเฉพาะตัวและ ข้อจำกัดที่ไม่เหมือนกับระบบอื่นบางประการ เราสามารถนำเอาลักษณะสมบัติและ ข้อจำกัดที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของระบบเหล่านี้มาพิจารณาเพื่อใช้เป็นสมมติฐานในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจัดตารางการผลิตต่อไป ในงานวิจัยที่อ้างถึงได้มีลักษณะสมบัติและ ข้อจำกัดของกระบวนการคือ

1. เวลาตั้งเครื่องขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้า (Sequence dependent setup time) จากการวิเคราะห์งานวิจัยตัวอย่างพบว่า เวลาในการตั้งเครื่องนั้นจะเปลี่ยนไปเสมอถ้าลำดับงานก่อนหน้านั้นมีลักษณะของงานเปลี่ยนไป ซึ่งเวลาการตั้งเครื่องเป็นไปดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักร

ลักษณะของงานที่เปลี่ยนไป	เวลา(วินาที)
เปลี่ยนสายไฟ	130.8
เปลี่ยนหัวเทอร์มินอลข้างเดียว	308.4
เปลี่ยนหัวเทอร์มินอลสองข้าง	616.8

2. ข้อจำกัดด้านเครื่องจักรที่เลือกได้ (Machine eligibility constraint) ในงานวิจัยตัวอย่างบอกเกี่ยวกับการย้ำหัวสายไฟ (เฉพาะบางรุ่นที่ต้องทำ) ว่าสามารถทำได้ที่เครื่องฉะเพาะรุ่นเท่านั้น

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่ามีข้อจำกัดด้านเครื่องจักรที่เลือกใช้ได้ซึ่งงานวิจัยมิได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับเรื่องนี้เพียงบอกเป็นแนวทางในการพัฒนาในขั้นตอนอื่นต่อไป

วัตถุประสงค์และตัววัดสมรรถนะ

จากการวิเคราะห์งานวิจัยตัวอย่างสามารถบอกเป็นวัตถุประสงค์แยกเป็นหัวข้อได้ว่างานวิจัยนั้นใช้อะไรบ้างเป็นตัววัดสมรรถนะของระบบดังนี้

1. วัตถุประสงค์ด้านปริมาณผลผลิต (Throughput related objective) จากผลลัพธ์งานวิจัยตัวอย่างนำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ เวลาไหลของงานและ เวลาปิดงาน

2. วัตถุประสงค์ด้านกำหนดส่งมอบ (Due-Date related objectives) จากผลลัพธ์งานวิจัยตัวอย่างนำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ จำนวนงานสาย, เวลาล่าช้า

ผลการวิจัยของงานวิจัยตัวอย่าง

ผลการทดสอบของโปรแกรมการจัดตารางการผลิตกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบของโปรแกรมการจัดตารางการผลิตของกรณีศึกษา

ดัชนี	กฎฮิวริสติกที่ดีในสามอันดับแรก
เวลาการไหลของงานโดยเฉลี่ย	1. SPT1 2. MOPNR1 3. EDD-LPT1
เวลาปิดงานของระบบ	1. SPT1 2. MOPNR1 3. EDD-LPT1
จำนวนงานสาย	1. SPT1 2. MOPNR1 3. EDD-LPT1
ผลรวมเวลาล่าช้าทั้งหมด	1. SPT1 2. MOPNR1 3. LOPNR1
เวลาคอยเฉลี่ย	1. SPT1 2. LOPNR1 3. MOPNR1

สังเกตได้ว่าดัชนีที่ให้ความสนใจอันดับ 1 และ 2 ที่ให้ค่าดีที่สุดคือ SPT1 และ MOPNR1 ตามลำดับซึ่งจะแสดงค่าเวลาของปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ค่าเวลาของกรณีศึกษา

ค่าดัชนี	อิวริสติก					
	SPT1			MOPNR1		
	เล็ก	กลาง	ใหญ่	เล็ก	กลาง	ใหญ่
เวลาปิดงาน	14516.36	24519.88	42853.2	14694.4	25131.32	45481.2
จำนวนงานสาย	6	5	0	7	6	4
เวลาล่าช้า	3614.4	3135.24	0	4126.72	4023.6	2281.2

สรุปปัญหาจากกรณีศึกษาได้ว่าทุกปัญหามีความใกล้เคียงกันเช่น จำนวนเครื่องจักรที่ใช้เท่ากัน จำนวนงานทั้งหมดใกล้เคียงกัน ค่าเวลาตั้งเครื่องจักรอยู่ในช่วงเวลาไม่แตกต่างกัน เป็นต้น ผู้จัดทำงานวิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลการผลิตของกรณีศึกษาทั้ง 5 ปัญหาแล้วนำไปจัดเรียงในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการจัดตารางการผลิตตามวิธีที่เสนอได้ผลการจัดเรียงดัง ภาคผนวก จ

วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์

การเปรียบเทียบผลลัพธ์การทดลองของงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

1. ปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ใช้การประยุกต์กฎพื้นฐาน EED และ SPT สำหรับเครื่องจักรขนานมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD บนเครื่องจักรขนาน

1.1.1 เรียงลำดับงานจากกำหนดส่งมอบตามวิธี EDD

1.1.2 เลือกงานตามลำดับ EDD ที่ยังไม่ได้จัดลงในตารางการผลิต

1.1.3 คำนวณเวลาผลิตเสร็จของงานที่เลือกบนทุกเครื่องจักร

1.1.4 เลือกเครื่องจักรที่ให้เวลาผลิตเสร็จน้อยที่สุด

1.1.5 พิจารณาจัดงานทุกงานจนครบหรือไม่

- ยังไม่ครบให้ย้อนกลับไปทำข้อ 1.1.2
- ครบแล้วเสร็จสิ้นการจัดตารางแบบ EDD บนเครื่องจักรขนาน

การจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD จากปัญหาตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 4-7 เริ่มจาก

การจัดเรียงลำดับงานจากกำหนดส่งมอบจากค่าน้อยไปมากได้ดังนี้ 696, 702, 840, 1014, 1032 ดังนั้นลำดับของงานคือ 4, 1, 2, 5, 3 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เวลาในการผลิตของงานตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-8

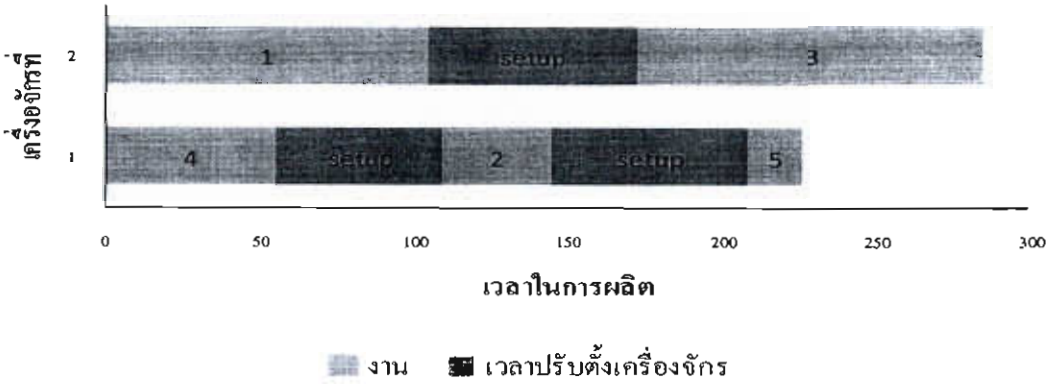
ตารางที่ 4-7 ปัญหาขนาดเล็ก 5 งาน 2 เครื่องจักร

เครื่องจักรที่	งาน	เวลาในการผลิต	กำหนดส่ง	setup time หลังงานที่				
				1	2	3	4	5
1	1	8	702	0	21	53	46	46
	2	36	840	55	0	60	54	78
	3	127	1032	40	20	0	77	42
	4	55	696	57	85	100	0	22
	5	18	1014	72	63	72	45	0
2	1	104	702	0	100	98	57	71
	2	131	840	28	0	58	64	62
	3	112	1032	69	98	0	52	26
	4	64	696	89	29	28	0	49
	5	184	1014	72	84	62	74	0

ตารางที่ 4-8 การจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD บนเครื่องจักรขนาน

ลำดับวิเคราะห์ที่	งานที่เลือก	เวลาพร้อมผลิต		เวลาผลิตเสร็จ = เวลาพร้อมผลิต+เวลาตั้งเครื่องจักร+เวลาผลิต		เครื่องจักรที่เลือก
		เครื่องจักร 1	เครื่องจักร 2	เครื่องจักร 1	เครื่องจักร 2	
1	4	0	0	0+0+55	0+0+64	1
2	1	55	0	55+46+8=109	0+0+104	2
3	2	55	104	55+54+36=145	104+64+131=299	1
4	5	145	104	145+63+18=226	104+72+184=360	1
5	3	226	104	226+42+127=395	104+69+112=285	2

จากตารางที่ 4-8 สามารถอธิบายดังนี้ ในขั้นตอนที่ 1 ลำดับงานแรกที่ถูกเลือกไว้จากกฎ EDD คืองาน 4 นำมาวิเคราะห์เวลาผลิตเสร็จบนเครื่องจักรทั้งสองและเลือกงานที่ให้เวลาผลิตเสร็จน้อยที่สุดจากนั้นพิจารณาลำดับงานถัดไปคืองาน 1 นำมาวิเคราะห์เวลาผลิตเสร็จบนเครื่องจักรทั้งสองเลือกค่าน้อยสุด การคิดค่าเวลาผลิตเสร็จของเครื่องจักรแต่ละเครื่องต้องบวกเวลาที่มีก่อนหน้าของเครื่องจักรนั้นรวมด้วย ทำการเลือกจนครบทุกงานเสร็จสิ้นวิธี EDD ภาพที่ 4-2 แสดงตารางการผลิตด้วยวิธี EDD



ภาพที่ 4-2 ตารางการผลิตด้วยวิธี EDD

1.2 การจัดตารางการผลิตด้วยวิธี SPT บนเครื่องจักรขนาน

1.2.1 เริ่มต้นเลือกงานที่ให้เวลาผลิตที่ดีที่สุดในทุกเครื่องจักร

1.2.2 คำนวณเวลาผลิตเสร็จที่ดีที่สุดในทุกเครื่องจักรจากงานที่ยังไม่ถูกเลือก

1.2.3 เลือกงานที่ให้เวลาผลิตเสร็จน้อยที่สุด

1.2.4 พิจารณาจัดงานครบหรือไม่

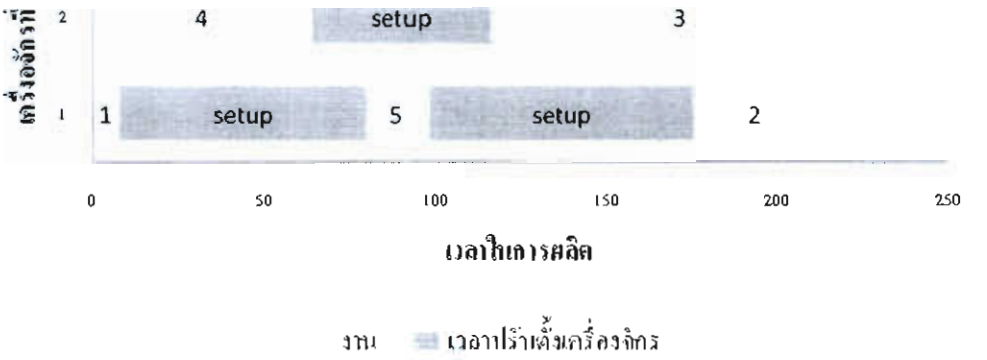
- ไม่ครบกลับไปทำข้อ 1.2.2
- ครบแล้วเสร็จสิ้นการจัดตารางแบบ SPT บนเครื่องจักรขนาน

ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี SPT บนเครื่องจักรขนาน ซึ่งแสดงด้วยปัญหาขนาดเล็กเช่นเดียวกันกับปัญหา EDD สามารถแสดงการจัดตารางการผลิตได้ดังตารางที่ 4-9

จากตารางที่ 4-9 สามารถอธิบายได้ ในขั้นตอนที่ 1 เลือกเวลาผลิตเสร็จน้อยที่สุดคืองาน 1 ที่เครื่องจักร 1 ถูกเลือก จากนั้นขั้นตอนที่สองตัดงานที่ถูกเลือกออกไปและพิจารณาเลือกงานที่ให้เวลาผลิตเสร็จน้อยสุดคืองาน 4 ที่เครื่องจักร 2 ถูกเลือก จากนั้นทำเช่นเดียวกันจนครบทุกงานเสร็จขั้นตอน SPT ของเครื่องจักรขนานสามารถแสดงตารางการผลิตด้วยวิธี SPTได้ดังภาพที่ 4-3

ตารางที่ 4-9 วิเคราะห์หาลำดับงาน SPT

ขั้นตอนที่	เครื่องจักรที่	งานที่	เวลาก่อนหน้า	เวลาตั้งเครื่องจักร	เวลาผลิต	เวลาผลิตเสร็จ
1	1	1	0	0	8	8
		2	0	0	36	36
		3	0	0	127	127
		4	0	0	55	55
		5	0	0	18	18
	2	1	0	0	104	104
		2	0	0	131	131
		3	0	0	112	112
		4	0	0	64	64
		5	0	0	184	184
2	1	2	8	55	36	99
		3	8	40	127	175
		4	8	57	55	120
		5	8	72	18	98
	2	2	0	0	131	131
		3	0	0	112	112
		4	0	0	64	64
		5	0	0	184	184
3	1	2	8	55	36	99
		3	8	40	127	175
		5	8	72	18	98
	2	2	64	64	131	259
		3	64	52	112	228
		5	64	74	184	322
4	1	2	98	78	36	212
		3	98	42	127	267
	2	2	64	64	131	259
		3	64	52	112	228
5	1	3	212	20	127	359
	2	3	64	52	112	228



ภาพที่ 4-3 ตารางการผลิตด้วยวิธี SPT

2. ปัญหาขนาดเล็ก ใช้วิธีการเลือกตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานต่ำที่สุด และตารางการผลิตที่มีจำนวนงานสายน้อยที่สุดจากตารางการผลิดที่เป็นไปได้ทั้งหมด

3. กรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรมใช้ผลลัพธ์จากวิธี SPT1 ของกรณีศึกษานำมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่ออกแบบในงานวิจัยนี้

ผลการทดลองสำหรับปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

ปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประมาณค่าพารามิเตอร์จำนวนความยาวทาบูและจำนวนรอบการหยุดการค้นหา ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายวิธี งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และปัญหาจากกรณีศึกษา 5 ปัญหาผลลัพธ์การตั้งพารามิเตอร์นี้ยังสามารถนำไปใช้กับปัญหาอื่นที่มีปัจจัยด้านเวลาและจำนวนงานต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงกันได้

วิธีการกำหนดจำนวนความยาวทาบูทำได้โดยแบ่งการทดลองแต่ละปัญหาออกเป็น 6 ครั้งการทดลอง ในทุกครั้งการทดลองกำหนดพารามิเตอร์จำนวนความยาวทาบูเป็นจำนวน 10, 20, 30, 40, 50, 60 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนงานในปัญหานั้นเช่น job1 มีจำนวนงานเท่ากับ 20 งาน กำหนดความยาวทาบูที่ 20 เปอร์เซ็นต์จำนวนความยาวทาบูเท่ากับ 4 งานเป็นต้น

จำนวนที่ทำการทดลองทั้งหมด 17 ปัญหาได้จำนวนครั้งในการทดลองเท่ากับ 102 ครั้ง ผลลัพธ์จากทดลองที่ ภาคผนวก ก จากนั้นแยกผลลัพธ์ที่ได้ตามกลุ่มที่ได้มาจากจำนวน 10-60 เปอร์เซ็นต์ได้ 6 กลุ่มของผลลัพธ์ทั้งหมดนำมาหาค่าเฉลี่ยยกตัวอย่าง 1 รูปแบบการทดลองของรูปแบบ 3 (100) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ผลลัพธ์การทดลองของรูปแบบ 3 (100)

ชื่อ	จำนวน	จำนวน	% ของจำนวนงานสำหรับกำหนดความยาวทาบู											
			10%		20%		30%		40%		50%		60%	
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL
job1	20	2	1020	1	1019	1	1015	1	1010	1	1016	1	1010	1
job2	20	2	1002	1	992	1	997	1	996	0	984	1	989	1
job3	20	3	590	0	565	0	565	0	565	0	574	0	586	0
job4	20	3	611	0	575	0	566	0	566	0	576	0	587	0
job5	40	2	1795	0	1791	0	1796	0	1793	1	1786	0	1796	0
job6	40	2	1554	0	1570	0	1543	0	1562	0	1561	0	1549	0
job7	40	3	1306	1	1320	2	1328	2	1325	2	1301	2	1320	2
job8	40	3	1044	0	1063	0	1055	0	1056	0	1058	0	1052	0
job9	80	2	3696	1	3734	1	3703	2	3706	2	3706	1	3708	2
job10	80	2	4127	7	4122	9	4134	8	4115	8	4117	10	4131	10
job13	60	2	2952	2	2958	2	2950	2	2949	2	2923	3	2943	2
job14	60	2	2953	0	2979	0	2973	0	2968	0	2962	0	2978	0
job21	30	2	1472	0	1448	0	1445	0	1454	0	1467	0	1456	0
job24	50	2	2170	1	2166	0	2168	1	2181	1	2172	1	2171	1
job25	50	2	2594	4	2601	5	2586	4	2605	5	2597	4	2578	5
job28	70	2	3540	1	3569	0	3565	1	3570	0	3565	1	3533	1
job29	70	2	2916	0	2941	0	2918	0	2920	0	2938	0	2920	0
ค่าเฉลี่ย			2079	1.1	2083	1.2	2077	1.3	2079	1.3	2077	1.4	2077	1.5

C_{max} = เวลาปิดงาน, NL = จำนวนงานสาย

จากตารางที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยของรูปแบบที่ 3(100) ที่กลุ่ม 30 % มีค่าเท่ากับ 2077 นำค่าเฉลี่ยนี้ไปเปรียบเทียบกับกลุ่มที่เหลือคือกลุ่ม 10 % ,20 % , 40 % , 50 % , 60 % ในรูปแบบเดียวกัน เพื่อจะเลือกว่ารูปแบบที่ทำการทดลองควรใช้จำนวนความยาวทาบูเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของจำนวนงาน ซึ่งสามารถสรุปผลลัพธ์การทดลองการปรับตั้งจำนวนความยาวทาบูทั้ง 3 รูปแบบได้ดังตาราง ที่ 4-11

ภาพที่ 4-1 แสดงตัวอย่างของผลลัพธ์จากการจำลองปัญหาด้วยคอมพิวเตอร์ 1 ปัญหา ปัญหานี้มีขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 20 งานแต่ละงานสามารถเลือกผลิตบนเครื่องจักรเครื่องใดเครื่องหนึ่งจาก 2 เครื่อง โดยเวลาในการผลิตของทั้ง 2 เครื่องจักรแตกต่างกันเช่น งานที่ 14 ในเครื่องจักร 1 ใช้เวลา 36 หน่วยเวลาในขณะที่งานที่ 14 ในเครื่อง 2 ใช้เวลา 129 หน่วยเวลา กำหนดส่งมอบถูกกำหนดจากจำนวน F เท่าของผลรวมเวลาการผลิตและเวลาส่งมอบโดยเฉลี่ย ค่า F สำหรับตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากับ 4.5 ข้อมูลเกี่ยวกับเวลาเตรียมเครื่องจักรมีสองกลุ่มแยกตามจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ผลลัพธ์การจำลองปัญหาด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหาได้แสดงที่ภาคผนวก จ

2. ปัญหาขนาดเล็กที่สามารถหาตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานต่ำที่สุด และตารางการผลิตที่มีจำนวนงานสายต่ำที่สุด ทำการทดลองหาผลลัพธ์เวลาปิดงานและจำนวนงานสายจากจำนวนตารางการผลิตที่เป็นไปได้ ซึ่งจำนวนตารางการผลิตนั้นมากเพิ่มขึ้นตามจำนวนงานที่มากขึ้นแสดงดังตารางที่ 4-2 การออกแบบปัญหาขนาดเล็กนี้ทำทั้งสิ้น 21 ปัญหา กำหนดขอบเขตของปัญหาให้ทุกปัญหามีเครื่องจักรเท่ากับ 2 เครื่องจักร จำนวนงานที่มีเริ่มจาก 4 งานจนถึง 10 งาน เวลาในการผลิต กำหนดส่งมอบได้ปรับดั้งเช่นเดียวกับ 17 ปัญหาข้างต้น ผลลัพธ์การจำลองปัญหา 21 ปัญหาแสดงที่ ภาคผนวก จ

ตารางที่ 4-2 ตารางการผลิตสำหรับการจัดลำดับงานลงบนเครื่องจักรขนาน 2 เครื่อง

จำนวนงาน (n)	**จำนวนตารางการผลิตที่เป็นไปได้**	
	สำหรับการจัดงานอย่างน้อย 1 งานบนทุกเครื่องจักร ($n!/(n-1)$)	**สำหรับการจัดงานลงบนเครื่องจักรแบบไม่มีเงื่อนไข ($n!/(n+1)$)**
4	72	120
5	480	720
6	3600	5040
7	30240	40320
8	282240	362880
9	2903040	3628800
10	32659200	39916800

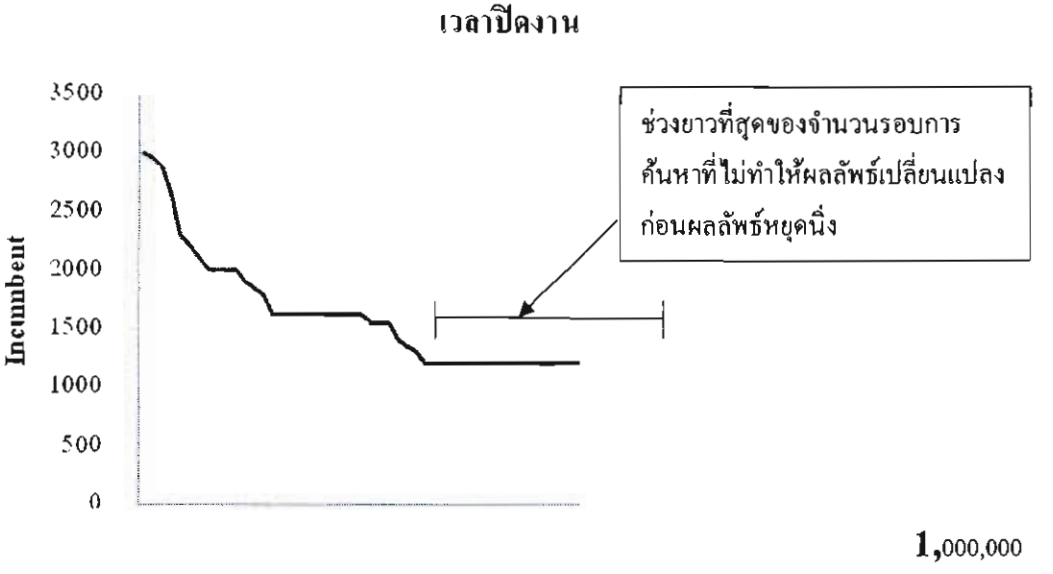
ตารางที่ 4-11 สรุปผลลัพธ์การทดลองการปรับตั้งจำนวนความยาวทาบู

รูปแบบที่	ค่าเฉลี่ยของเวลาปิดงานที่ 10 – 60 เปอร์เซ็นต์					
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
1	2171	2170	2166	2168	2169	2168
2	2198	2195	2202	2217	2210	2239
3(50)	2094	2090	2094	2092	2089	2087
3(100)	2078	2083	2076	2078	2076	2076

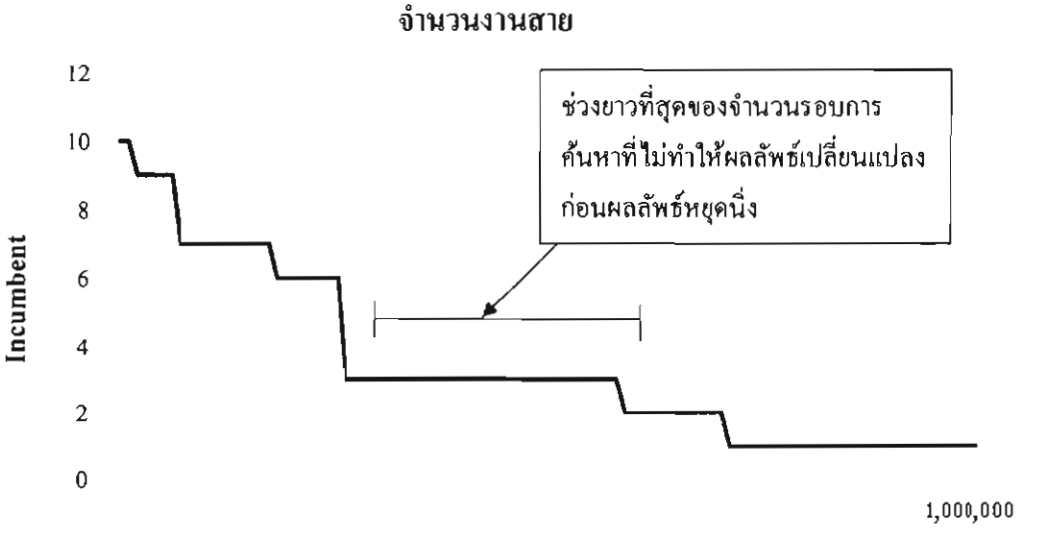
หมายเหตุ: ผลลัพธ์ในการปรับตั้งค่าถูกกำหนดจากการใช้เวลาปิดงานในการเปรียบเทียบเนื่องจากเวลาปิดงานมีความแตกต่างกันของผลลัพธ์มากกว่าจำนวนงานสาย

จากตารางที่ 4-11 รูปแบบที่ 1, 2, 3 (50) และ 3 (100) ถูกกำหนดให้ใช้ความยาวทาบูเท่ากับ 30%, 20%, 60% และ 30% ของจำนวนงานตามลำดับ เนื่องจากให้ตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด

วิธีการกำหนดพารามิเตอร์จำนวนรอบการหยุดการค้นหาในแต่ละรูปแบบใช้วิธีการหาสมการเส้นตรงอย่างง่าย วิธีการคือหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของเวลาปิดงานและจำนวนงานสายจากค้นหา 1,000,000 รอบ แล้วหาช่วงที่ไม่ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงจำนวนมากที่สุด แสดงดังภาพที่ 4-4



(ก)



(ข)

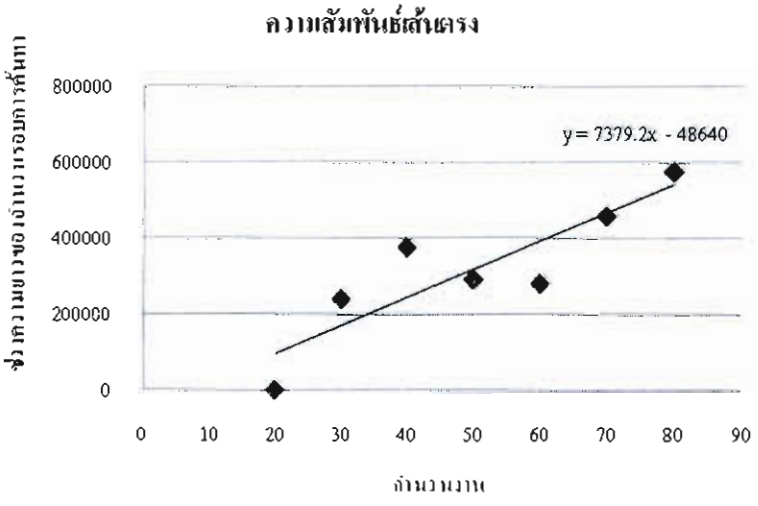
ภาพที่ 4-4 ช่วงยาวที่สุดของจำนวนรอบการค้นหาที่ผลลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลง

ทำการทดลองหาช่วงยาวที่สุดจำนวนรอบการค้นหาที่ลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลงกับ 17 ปัญหาในรูปแบบที่ออกแบบได้ผลลัพธ์ดัง ภาคผนวก ข จากนั้นนำค่าที่ได้ในแต่ละรูปแบบทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงได้สองวิธีดังนี้

วิธีที่ 1 จำนวนงานเป็นตัวแปรต้นช่วงความยาวเป็นตัวแปรตาม

วิธีที่ 2 จำนวนงานยกกำลังสองเป็นตัวแปรต้นช่วงความยาวเป็นตัวแปรตาม

ได้ผลลัพธ์ค่า R Square ทั้งสองวิธีแสดงผลลัพธ์ดัง ภาคผนวก ค เลือกใช้ค่า R Square ที่ให้ค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด (ตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์มากเมื่อค่า R Square เข้าใกล้ 1) เท่ากับ 0.767 และแสดงสมการเส้นครงดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างช่วงความยาวจำนวนรอบการค้นหากับจำนวนงาน

จากภาพที่ 4-5 มีสมการความสัมพันธ์ดังเส้นตรงนี้

เมื่อ y คือ ช่วงความยาวของจำนวนรอบการค้นหาที่ผลลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลง

x คือ จำนวนงาน

$$y = 7379.x - 48640 \qquad (4\text{-}1)$$

จากสมการ (4-1) ที่เกิดขึ้นจากช่วงความยาวที่มากที่สุดจะสังเกตได้ว่าที่ช่วงความยาวนั้นยังไม่สามารถให้ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Incumbent) ของในแต่ละรูปแบบดังนั้นสมการนี้จึงต้องคูณค่า

F เพื่อช่วงความยาวของรอบการค้นหามากขึ้นเพื่อที่จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของทุกรูปแบบ กำหนดค่า $F = 1.5$ ดังนั้นสมการความสัมพันธ์เส้นตรงที่จะนำไปใช้คือ (4-3)

$$y = 1.5(7379.x - 48640) \quad (4\text{-}2)$$

$$y = 11068.x - 72960 \quad (4\text{-}3)$$

หมายเหตุ: สมการนี้ใช้ได้ต่อเมื่อจำนวนงานมากกว่าเท่ากับ 7

สำหรับรูปแบบที่ 3 ซึ่งมีโครงสร้างเนเบอร์ฮูดเหมือนกันการกำหนดค่ารอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย จึงจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อหารอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมายที่เหมาะสม โดยแบ่งรอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมายออกเป็น 50, 100, 1000, 10000, 100000 และ 500000 ผลลัพธ์เวลาปิดงานแสดงดังตารางที่ 4-12 และผลลัพธ์จำนวนงานสายแสดงดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-12 ผลลัพธ์ค่าเวลาปิดงานของรอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย

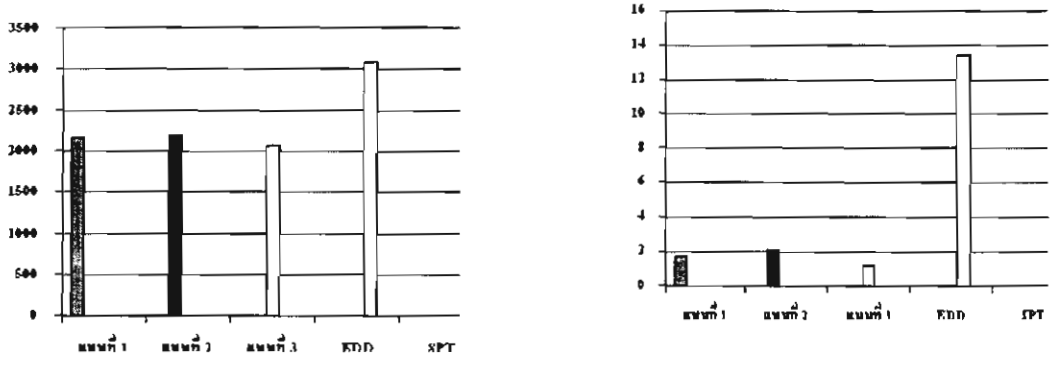
ชื่อปัญหา	จำนวน		รอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย					
	งาน	เครื่องจักร	50	100	1000	10000	100000	500000
job1	20	2	1010	1010	1014	1014	1019	1049
job2	20	2	990	981	984	990	1002	1002
job3	20	3	565	578	565	565	565	592
job4	20	3	593	585	575	552	561	582
job5	40	2	1796	1793	1773	1773	1787	1787
job6	40	2	1560	1552	1528	1530	1547	1599
job7	40	3	1321	1312	1321	1313	1323	1343
job8	40	3	1066	1067	1051	1052	1062	1062
job9	80	2	3686	3711	3655	3668	3695	3707
job10	80	2	4105	4116	4074	4079	4111	4111
job13	60	2	2919	2935	2922	2933	2960	2961
job14	60	2	2970	2964	2937	2947	2957	3006
job21	30	2	1450	1456	1447	1452	1458	1458
job24	50	2	2178	2167	2153	2163	2171	2199
job25	50	2	2560	2583	2577	2578	2590	2600
job28	70	2	3562	3547	3539	3542	3563	3563
job29	70	2	3470	3457	3452	3458	3456	3468
ค่าเฉลี่ย			2106	2107	2092	2095	2107	2123

ตารางที่ 4-13 ผลลัพธ์จำนวนงานสายของรอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย

ชื่อปัญหา	จำนวน		รอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมาย					
	งาน	เครื่องจักร	50	100	1000	10000	100000	500000
job1	20	2	1	1	1	1	2	4
job2	20	2	1	0	0	1	1	1
job3	20	3	0	0	0	0	0	0
job4	20	3	0	0	0	0	0	0
job5	40	2	0	0	2	2	3	3
job6	40	2	0	0	0	0	0	1
job7	40	3	1	1	2	3	4	4
job8	40	3	0	0	0	0	0	0
job9	80	2	2	2	3	3	4	4
job10	80	2	10	9	11	13	14	14
job13	60	2	2	2	3	5	5	9
job14	60	2	0	0	0	0	1	1
job21	30	2	1	1	1	2	3	3
job24	50	2	1	1	1	2	3	4
job25	50	2	4	5	6	6	8	11
job28	70	2	1	1	3	2	3	5
job29	70	2	2	1	1	4	6	6
ค่าเฉลี่ย			1.53	1.41	2.00	2.59	3.35	4.12

จากตารางที่ 4-12 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยที่ให้เวลาปิดงานน้อยที่สุดอยู่ที่รอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมายที่ 1000 ซึ่งต่างจากตารางที่ 4-13 ให้ค่าเฉลี่ยผลลัพธ์จำนวนงานสายอยู่ที่รอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมายที่ 100 แต่ความแตกต่างของจำนวนงานสายนั้นน้อยมาก ดังนั้นควรใช้รอบการค้นหาก่อนเปลี่ยนเป้าหมายที่ 1000 ในการทดลองเพื่อหาผลลัพธ์ในรูปแบบ 3

ผลการทดลองสำหรับปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งหมด 17 ปัญหา สามารถบอกจำนวนรายการข้อห้ามที่เหมาะสมรวมทั้งรอบการค้นหาที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างเนเบอร์ฮูดทั้งสามรูปแบบ ส่วนการเปรียบเทียบวิธีการจัดตารางการผลิตแบบต่าง ๆ จากภาพที่ 4-6 พบว่าวิธีการจัดตารางการผลิตด้วยการค้นหาแบบทาบูทำให้เวลาปิดงานโดยเฉลี่ย และจำนวนงานสายโดยเฉลี่ยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตด้วยกฎพื้นฐานของการจัดตารางการผลิต EDD และ SPT



(ก) เวลาปิดงานเฉลี่ย (ข) จำนวนงานสายเฉลี่ย

ภาพที่ 4-6 ผลลัพธ์การจัดตารางการผลิตจากปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์

อธิปรายผลจากการทดลองด้วยปัญหาจากคอมพิวเตอร์

ผลลัพธ์การทดลองปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์ถึงรูปแบบทาบูเปรียบเทียบกับกฎการจัดตารางการผลิต SPT และ EDD ได้ว่า รูปแบบทาบูนั้นสามารถหาผลลัพธ์ที่ดีมากกว่า เนื่องจากโครงสร้างการค้นหาผลลัพธ์สามารถค้นหาซ้ำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์หลายผลลัพธ์ที่กระจายตัวออกไป ซึ่งต่างจากกฎการจัดตารางการผลิต SPT และ EDD ที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่ดีเพียง 1 ผลลัพธ์เท่านั้น รูปแบบทาบูที่ดีกว่านั้นเนื่องจากมีโครงสร้างเนเบอร์ฮูดที่ออกแบบเพื่อให้ผลลัพธ์มีค่าเวลาปิดงานน้อยลงและจำนวนงานสายลดลงระหว่างการค้นหาซ้ำในบริเวณพื้นที่หนึ่ง ๆ และมีการออกแบบหน่วยความจำระยะสั้น (Short term memory) คือ รายการต้องห้ามกับวิธีการเลือกผลลัพธ์ในแต่ละรอบการค้นหาที่ทำให้สามารถค้นหาผลลัพธ์ครอบคลุมพื้นที่ค้นหาในบริเวณกว้างและป้องกันการค้นหาผลลัพธ์ในบริเวณที่ได้ค้นหาแล้ว

ผลการทดลองสำหรับปัญหาขนาดเล็กที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

จากปัญหาขนาดเล็ก 21 ปัญหาได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกับวิธี SPT, EDD,รูปแบบทาบูออกแบบ ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ชื่อปัญหา	ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด		SPT		EDD		รูปแบบ 1		รูปแบบ 2		รูปแบบ 3	
	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL
4Job1	241	2	307	1	334	3	241	2	291	2	241	2
	292	1					292	1	292	1	292	1
4Job2	200	2	271	1	271	1	200	2	200	2	200	2
	271	1					271	1	271	1	271	1
4Job3	204	3	250	2	250	2	243	2	204	3	204	3
	243	2					243	2	243	2	243	2
*5Job1	177	2	248	2	248	2	177	2	177	2	177	2
	177	2					177	2	177	2	177	2
5Job2	274	3	307	2	361	3	274	3	274	3	274	3
	307	2					307	2	307	2	307	2
*5Job3	242	4	383	4	330	4	242	4	245	4	242	4
	242	4					242	4	245	4	242	4
6Job1	166	3	184	3	203	3	166	3	166	3	166	3
	166	3					166	3	166	3	166	3
*6Job2	262	4	324	4	468	5	262	4	262	4	262	4
	262	4					262	4	262	4	262	4
6Job3	267	4	358	2	358	2	267	4	267	4	267	4
	299	2					299	2	299	2	299	2
7Job1	381	4	540	3	501	3	409	4	381	4	381	4
	430	3					436	3	436	3	436	3
7Job2	349	6	425	5	513	6	349	6	349	6	349	6
	370	5					349	6	370	5	370	5
7Job3	345	2	437	2	441	2	376	3	345	2	345	3
	385	1					388	2	410	1	397	1
8Job1	279	2	361	4	496	5	306	3	279	2	279	2
	279	2					315	2	279	2	279	2
*8Job2	364	0	476	4	520	2	389	0	364	0	364	0
	364	0					389	0	364	0	364	0
*8Job3	312	3	577	7	605	6	330	4	312	3	330	4
	312	3					363	3	312	3	333	3
9Job1	429	5	476	4	533	4	453	6	429	5	429	5
	476	4					488	5	476	4	476	4
*9Job2	418	7	577	7	685	8	473	7	449	7	418	7
	418	7					473	7	449	7	418	7
9Job3	369	7	447	6	477	6	402	7	399	7	382	7
	422	5					422	5	422	5	422	5
10Job1	400	9	562	8	580	8	429	7	424	8	400	9
	429	7					429	7	429	7	429	7
10Job2	378	5	417	4	417	5	378	5	389	5	378	5
	407	4					417	4	417	4	417	4
10Job3	330	4	475	4	521	4	333	2	333	2	333	2
	397	1					333	2	333	2	333	2

C_{max}= เวลาปิดงาน, NL = จำนวนงานสาย

หมายเหตุ: * คือปัญหาที่สามารถหาผลลัพธ์เวลาปิดงานที่ดีที่สุด และจำนวนงานสายที่ดีที่สุด เป็นตารางการผลิตเดียวกัน

จากตารางที่ 4-14 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและเทียบเวลาปิดงานเป็นเปอร์เซ็นต์กับทุกรูปแบบแสดงตารางการเปรียบเทียบ ภาคผนวก ง ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาปิดงานเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์จากผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ชื่อปัญหา	ผลลัพธ์											
	ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด		SPT		EDD		รูปแบบ 1		รูปแบบ 2		รูปแบบ 3	
	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%
ค่าเฉลี่ย	304.1	100.0	400.1	68.4	433.9	57.6	319.0	95.5	311.4	97.7	305.8	99.5

จากตารางที่ 4-15 รูปแบบ 3 ให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 99.5 % ลองมาเป็น รูปแบบ 2, รูปแบบ 1, SPT, EDD ตามลำดับ

จากนั้นทำการเปรียบเทียบจำนวนงานสายโดยการเปรียบเทียบจำนวนงานสายของผลลัพธ์ที่ดีที่กับทุกรูปแบบหาผลต่างในทุกรูปแบบโดยกำหนดให้ผลต่างของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับศูนย์นั้นคือผลต่างในทุกรูปแบบที่ดีจะเข้าใกล้ค่า 0 ซึ่งได้ผลลัพธ์ดัง ภาคผนวก จ สามารถสรุปผลเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างของจำนวนงานสายได้ดังตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจำนวนงานสายเป็นผลต่างจากผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ชื่อปัญหา	ผลลัพธ์											
	ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด		SPT		EDD		รูปแบบ 1		รูปแบบ 2		รูปแบบ 3	
	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง
ค่าเฉลี่ย	3	0	3.76	0.76	4.00	1	3.19	0.19	3.05	0.05	3.05	0.05

จากตารางที่ 4-16 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยทุกรูปแบบนั้นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดอยู่ที่รูปแบบ 3 และ 2ให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 นั้นคือในรูปแบบนี้สามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของจำนวนงานสายของปัญหาขนาดเล็กได้จำนวนมากจากนั้นเป็น รูปแบบ 1, SPT, EDD ตามลำดับ

อภิปรายผลจากปัญหาขนาดเล็กที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

จากผลลัพธ์ข้างต้นเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกับรูปแบบทาบูที่ออกแบบและการจัดตารางการผลิตพื้นฐานอย่างง่าย เห็นได้ว่ารูปแบบทาบูที่ออกแบบสามารถให้ค่าที่เข้าใกล้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของเวลาปิดงานและจำนวนงานสายได้มากกว่าการจัดตารางการผลิตพื้นฐานอย่างง่ายและรูปแบบทาบูที่ออกแบบสามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้เป็นจำนวนมาก

ถึงรูปแบบทาบูที่ออกแบบจะให้ผลลัพธ์ที่ดีแต่ก็ยังอยู่ในขอบเขตของปัญหาเพียง 10 งาน 2 เครื่องจักรเท่านั้นซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก การที่จะหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบของปัญหาที่มีจำนวนงานและเครื่องจักรมากกว่านี้ การค้นหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องใช้เวลานานหรืออาจไม่สามารถค้นหาได้

ผลการทดลองสำหรับปัญหาภาคอุตสาหกรรม

การทดลองปัญหาจากกรณีศึกษาใช้ค่าพารามิเตอร์ จำนวนรอบการค้นหาและจำนวนความยาวทาบู ที่ได้จากการทดลอง 17 ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์จากกรณีศึกษา 5 ปัญหา ผลลัพธ์สามรูปแบบที่ออกแบบนั้นได้เป็นสองตารางการผลิตคือ ตารางการผลิตที่ให้เวลาปิดงานที่ดีกับตารางการผลิตที่ให้จำนวนงานสายที่ดี ซึ่งผลลัพธ์ทั้งสองตารางการผลิตทำการปรับปรุงเวลาปิดงานและจำนวนงานสายให้ดีขึ้น เพียงแต่ทั้งสองตารางการผลิตให้ผลลัพธ์ที่ดีแตกต่างกัน รูปแบบทาบูที่ออกแบบนั้นจะทำการเปรียบกับผลลัพธ์ของกรณีศึกษา SPT1 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-17

วิธีการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีค้นหาแบบทาบูทำให้เวลาปิดงานโดยเฉลี่ย และจำนวนงานสายโดยเฉลี่ยดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิต SPT1 แสดงดังตารางที่ 4-18

จากตารางที่ 4-18 ค่าเฉลี่ยของเวลาปิดงานจากตารางการผลิตเวลาปิดงานที่ดีและ ค่าเฉลี่ยของจำนวนงานสายจากตารางการผลิตจำนวนงานสายที่ดี วิธีการรูปแบบ 3 ดีที่สุดเมื่อเทียบกับทุกวิธี สามารถแสดงการเปรียบเทียบเวลาปิดงานของรูปแบบทาบูที่ออกแบบกับ SPT1 ด้วยการเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ดีขึ้นได้ดังตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-17 ผลการทดลองจัดตารางการผลิตจากกรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรม

ชื่องาน	จำนวน		ผลการทดลองเวลาปิดงานที่ดี			ผลการทดลองจำนวนงานสายที่ดี		
	งาน	เครื่องจักร	วิธีการ	เวลาปิดงาน	จำนวนงานสาย	วิธีการ	เวลาปิดงาน	จำนวนงานสาย
1	80	5	รูปแบบ 1	12123	10	รูปแบบ 1	12309.6	9
			รูปแบบ 2	12213.6	11	รูปแบบ 2	13515	9
			รูปแบบ 3	11818.2	9	รูปแบบ 3	12241.2	8
			SPT1	16001.4	9	SPT1	16001.4	9
2	79	5	รูปแบบ 1	11212.2	6	รูปแบบ 1	11342.4	5
			รูปแบบ 2	11130.2	5	รูปแบบ 2	11594.4	3
			รูปแบบ 3	10628.2	0	รูปแบบ 3	10628.2	0
			SPT1	10857	1	SPT1	10857	1
3	87	5	รูปแบบ 1	12758.2	16	รูปแบบ 1	12865.6	15
			รูปแบบ 2	12827.4	16	รูปแบบ 2	12954.6	14
			รูปแบบ 3	12245.2	14	รูปแบบ 3	12312.6	11
			SPT1	16889.4	13	SPT1	16889.4	13
4	64	5	รูปแบบ 1	9942.6	0	รูปแบบ 1	9942.6	0
			รูปแบบ 2	9756.8	0	รูปแบบ 2	9756.8	0
			รูปแบบ 3	9942.6	0	รูปแบบ 3	9942.6	0
			SPT1	14636.41	7	SPT1	14636.41	7
5	94	5	รูปแบบ 1	13390	20	รูปแบบ 1	13461.8	18
			รูปแบบ 2	13346.4	20	รูปแบบ 2	13586.2	17
			รูปแบบ 3	12698.4	19	รูปแบบ 3	12790.8	14
			SPT1	15355.8	12	SPT1	15355.8	12

ตารางที่ 4-18 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ของปัญหากรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรม

วิธีการ	ค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด	
	เวลาปิดงาน	จำนวนงานสาย
รูปแบบ 1	11885.2	9.4
รูปแบบ 2	11854.88	8.6
รูปแบบ 3	11466.52	6.6
SPT1	14748.002	8.4

ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบรูปแบบทาบูที่ออกแบบกับ SPT1

วิธีการ	ค่าเฉลี่ย	
	เวลาปิดงานที่ดีขึ้น(เปอร์เซ็นต์)	จำนวนงานสายน้อยลงจากเดิม
รูปแบบ 1	15.04	0
รูปแบบ 2	15.27	0
รูปแบบ 3	17.52	1.8

ตารางที่ 4-19 วิธีการทาบูในทุกรูปแบบเมื่อเปรียบเทียบกับ SPT1 ตารางการผลิตเวลาปิดงานที่ดีสามารถทำให้เวลาปิดงานดีขึ้นมากสุดโดยเฉลี่ย 17.52 เปอร์เซ็นต์ในรูปแบบที่สาม ส่วนตารางการผลิดจำนวนงานสายที่ดีสามารถทำให้จำนวนงานสายลดลงได้โดยเฉลี่ย 1.8 งาน ในรูปแบบ 3 แต่ในรูปแบบอื่นไม่สามารถทำให้จำนวนงานสายลดลงได้จึงควรใช้รูปแบบ 3 ในการจัดตารางการผลิดจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

อภิปรายผลจากปัญหาจากภาคอุตสาหกรรม

ผลลัพธ์การเปรียบเทียบรูปแบบการจัดตารางการผลิดวิธีทาบูกับวิธี SPT1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าในรูปแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งหาผลลัพธ์เวลาปิดงานได้ดีกว่า SPT1 แต่ไม่สามารถหาผลลัพธ์จำนวนงานสายได้ดีกว่า SPT1 เนื่องจากโครงสร้างเนเบอร์ฮูดที่ออกแบบทำการวนรอบน้อยเกินไปสำหรับการค้นหาจำนวนงานสายกับเวลาปิดงานใน 1 รอบการค้นหา จึงทำให้ได้พื้นที่เวลาปิดงานที่ดีแล้วไม่สามารถกระโดดไปพื้นที่จำนวนงานสายที่ดีได้ ในส่วนของรูปแบบ 3 ซึ่งมีการวนรอบหลายครั้งของเวลาปิดงานและจำนวนงานสายใน 1 รอบการค้นหา จึงทำให้สามารถหาผลลัพธ์ในพื้นที่ที่แตกต่างออกไปได้มาก และการออกแบบการเริ่มต้นการค้นหาใหม่แบบหลายครั้งเพื่อให้การกระจายตัวของผลลัพธ์เป็นบริเวณกว้างจึงทำให้หาผลลัพธ์ได้ดีกว่ารูปแบบ 1, 2 และ SPT1 ทั้งตารางการผลิตที่ให้ผลลัพธ์เวลาปิดงานที่ดีและตารางที่ให้ผลลัพธ์จำนวนงานสายที่ดี

ผลลัพธ์ของจัดการตารางการผลิตลำดับงานใดควรทำการผลิตที่เครื่องจักรใดของรูปแบบ 3 ในปัญหาอุดสาหกรรมแสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ในปัญหาที่ 1 ดังตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4-20 ลำดับงานในเครื่องจักรของปัญหาอุตสาหกรรม

เครื่องจักรท	ลำดับงาน
1	60 10 3 13 11 12 73 59 7 6 9 8 4 5 2 1
2	78 71 72 40 52 50 49 48 15 62 23 24 27 22 25
3	31 30 32 55 63 53 54 61 58 57 37 38 64 33 36 34 35
4	20 19 21 74 70 69 75 76 67 16 77 46 47 44 43 45 42
5	79 65 66 80 51 41 39 18 17 29 28 26 68 56 14

ปัญหาการจัดตารางการผลิตบางปัญหาสามารถตัดสินใจเลือกตารางการผลิตที่ดีได้เลย เช่น จากตารางที่ 4-17 ปัญหาที่ 2 กับ 4 จากผลลัพธ์ในรูปแบบที่ 3 งานสายทั้งสองตารางการผลิตเท่ากับ 0 จึงควรเลือกตารางที่ให้เวลาปิดงานที่ดีกว่า สำหรับการเลือกใช้ที่เหมาะสม ปัญหาที่ 1, 3 และ 5 รูปแบบที่ 3 ตารางการผลิตให้เวลาปิดงานที่ดีเท่ากับ 11818.2, 12245.2 และ12698.4 ตามลำดับแต่เมื่อทำการวิเคราะห์งานสายกับตารางที่ให้งานสายที่ดีแล้วงานสายของตารางที่ 2 ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเช่น ปัญหาที่ 1 รูปแบบที่ 3 สำหรับตารางการผลิตเวลาปิดงานที่ดี ซึ่งได้ผลลัพธ์งานสายเท่ากับ 9 มีเวลาปิดงานเท่ากับ 11818.2 เมื่อเทียบกับตารางาการผลิตจำนวนงานสายที่ดี ซึ่งได้ผลลัพธ์งานสายเท่ากับ 8 มีเวลาปิดงานเท่ากับ 12241.2 จากผลลัพธ์นี้ขึ้นอยู่กับผู้นำไปใช้ต้องการเลือกสิ่งใดที่เหมาะสมสำหรับงานในโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานให้กับเครื่องจักรแบบขนานโดยที่มีประสิทธิภาพของเครื่องจักรแตกต่างกัน โดยมีเป้าหมายให้เวลาปิดงานต่ำและมีจำนวนงานสายน้อยที่สุด

ลักษณะของงานที่ทำการทดลองให้ความสนใจเกี่ยวกับงานที่เป็นการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนานที่แตกต่างกันอีกทั้งงานมีลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของเวลาตั้งเครื่องจักรขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้า ดังนั้นปัญหาการจัดตารางการผลิตในงานวิจัยนี้จึงมีสภาพความซับซ้อนของปัญหาเป็นแบบ NP-Hard ด้วยดังนั้นต้องอาศัยแนวทางฮิวริสติกในการหาคำตอบเข้ามาประยุกต์ งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีทาบูซึ่งออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูด 3 วิธีดังนี้

1. รูปแบบที่ 1 สลับงานจากนั้นมาทำการแทรกงาน (แทรกไม่ข้ามเครื่องจักร)
2. รูปแบบที่ 2 แทรกงานจากนั้นทำการสลับงาน
3. รูปแบบที่ 3 สลับงาน N รอบจากนั้นแทรกงาน N รอบ

เมื่อออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดก็จำเป็นต้องออกแบบรายการข้อห้ามให้เหมาะสมด้วยซึ่งการออกแบบรายการข้อห้ามทำการแบ่งตามลักษณะความเหมาะสมของโครงสร้างได้ดังนี้ แบบที่ 1 การสลับงานได้ออกแบบให้รายการข้อห้ามบันทึกคู่ลำดับที่เหมาะสมจะได้ในขั้นตอนที่ทำการสลับงานเสร็จสิ้น การทำรายการข้อห้ามเพื่อเป็นการป้องกันการค้นหารอบถัดไปเกิดการวนซ้ำที่เดิม แบบที่ 2 และ 3 การแทรกงานได้ออกแบบให้รายการข้อห้ามบันทึกงานที่เลือกมาทำการแทรก ในส่วนของการสลับงานได้ออกแบบให้รายการข้อห้ามจำคู่ลำดับการสลับงาน

แนวคิดใหม่เกี่ยวกับกลยุทธ์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดได้ใช้วิธีการเริ่มต้นการค้นหาใหม่แบบหลายครั้ง (Multi restart strategy) ใช้ในรูปแบบ 3 โดยกลยุทธ์นี้จะทำการค้นหาผลลัพธ์ได้กระจายทั่วพื้นที่ของปัญหามากกว่าวิธีการทั่วไปของการค้นหาแบบทาบู

งานวิจัยนี้ได้จำแนกปัญหาที่ทำการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์, ปัญหาขนาดเล็กที่สามารถหาตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานต่ำที่สุดกับตารางการผลิตที่มีจำนวนงานสายต่ำที่สุด และปัญหาจากภาคอุตสาหกรรม

วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้กฎพื้นฐานสำหรับการจัดตารางการผลิต 2 อย่างคือ SPT และ EDD ผลการทดลองสำหรับปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถบอกถึงจำนวนรายการข้อห้ามที่เหมาะสมรวมทั้งรอบการค้นหาที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างเนเบอร์ฮูดทั้งสามรูปแบบ ส่วนการเปรียบเทียบวิธีการจัดตารางการผลิตแบบต่าง ๆ พบว่าวิธีการจัดตารางการผลิตด้วยการค้นหาแบบทาบูทำให้เวลาปิดงานโดยเฉลี่ย และจำนวนงานสายโดยเฉลี่ยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตด้วยกฎพื้นฐานของการจัดตารางการผลิต SPT และ EDD

การเปรียบเทียบวิธีทาบูกับปัญหาขนาดเล็กที่สามารถหาตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานที่ดีสุด และตารางการผลิตที่มีจำนวนงานสายที่ดีสุด เมื่อเทียบกับรูปแบบทาบูที่ออกแบบได้ผลลัพธ์ของการทดลองคือ รูปแบบทาบูที่ออกแบบให้ผลลัพธ์เฉลี่ยเข้าใกล้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดมากทั้งสามรูปแบบโดยรูปแบบ 3 นั้นได้ผลลัพธ์เข้าใกล้เวลาปิดงานที่ดีสุดและจำนวนงานสายที่ดีสุดสามารถให้ค่าเวลาปิดงานโดยเฉลี่ย 99.5 เปอร์เซ็นต์ที่ตารางการผลิตเวลาปิดงานที่ดี และผลต่างโดยเฉลี่ยของจำนวนงานสายน้อยถึง 0.05 หน่วยที่ตารางการผลิตจำนวนงานสายที่ดี

ปัญหาจากกรณีศึกษาพบว่าวิธีการจัดตารางการผลิตด้วยการค้นหาแบบทาบูทำให้เวลาปิดงานโดยเฉลี่ย และจำนวนงานสายโดยเฉลี่ยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตแบบ SPT1 โดยการค้นหาแบบทาบูในรูปแบบ 3 ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด ที่ตารางการผลิตที่ให้ค่าเวลาปิดงานที่ดีมีเวลาปิดงานโดยเฉลี่ยลดลง 17.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตารางการผลิตที่ทำให้จำนวนงานสายที่ดีมีเวลาปิดงานโดยเฉลี่ยลดลง 1.8 งาน โดยการค้นหาแบบวิธีทาบูสามารถค้นหาผลลัพธ์ได้กระจายตัวมากกว่าวิธีสร้างเสริม (วิธีสร้างเสริมในกรณีศึกษาคือ SPT1) จึงได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าโดยฉะเพราะวิธีทาบูในรูปแบบ 3 ซึ่งออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีเริ่มต้นการค้นหาใหม่แบบหลายครั้ง (Multi restart strategy) ทำให้การกระจายตัวของการหาผลลัพธ์ได้ทั่วพื้นที่ของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดเป็นบริเวณกว้าง

จากการทดลองสามารถบอกได้ว่าวิธีการที่ดีที่สุดในการงานวิจัยนี้คือ รูปแบบ 3 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ออกแบบกลยุทธ์วิธีการเริ่มต้นการค้นหาใหม่แบบหลายครั้ง ที่จะทำให้การค้นหานั้นกระจายได้ทั่วพื้นที่ของปัญหามากกว่าวิธีการอื่น ดังนั้นจึงควรเลือกวิธีการนี้ไปใช้และพัฒนาในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กันต่อไป

การใช้วิธีการค้นหาแบบทาบูในการจัดตารางการผลิตแบบหลายจุดประสงค์ สามารถทำได้โดยการออกแบบโครงสร้างเนเบอร์ฮูดและรายการข้อห้ามให้สอดคล้องกับเป้าหมายในการจัดตารางการผลิต เมื่อนำมาประยุกต์ในการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนาน

ที่มีประสิทธิภาพของเครื่องจักรแตกต่างกันและเวลาเตรียมเครื่องจักรขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้า สามารถลดเวลาปิดงานควบคู่กันกับลดจำนวนงานสายตามเป้าหมายของการจัดตารางผลิตได้ และยังให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีสร้างเสริมอีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. การตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้พยายามทำให้เหมาะสมกับรูปแบบของปัญหาที่จำลองขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการทดลองกับลักษณะปัญหาที่แตกต่างกันมากควรกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ใหม่ หรือทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปัญหาหลายรูปแบบและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดค่าตัวแปร

2. งานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์สำหรับการจัดตารางการผลิตที่ดี 2 ผลลัพธ์ ซึ่งไม่สามารถปรับเกณฑ์การเลือกที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีความต้องการที่แตกต่างกันของผู้จัดตารางการผลิต ดังนั้นจึงควรมีวิธีการเลือกที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เพียง 1 ตารางการผลิตเท่านั้น

3. ปัญหาที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้ออกแบบให้เวลาเตรียมเครื่องจักรเป็นช่วงกว้าง เพื่อให้ครอบคลุมกับปัญหาที่มีเวลาเตรียมเครื่องจักรน้อยจนถึงมาก ซึ่งในปัญหาจริงในอุตสาหกรรมนั้นส่วนมากจะมีเวลาเตรียมเครื่องจักรน้อย

4. ค่าตัวแปรที่ต้องตั้งค่านั้นคือ จำนวนรอบการค้นหาและจำนวนความยาวทาบู

บรรณานุกรม

ณัชชา คารอน และ บรรหาญ ลิลา. (2552). *การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรแบบขนาน ภายใต้เงื่อนไขของทรัพยากรการผลิต*. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, ขอนแก่น, ประเทศไทย, 21-22 ตุลาคม 2552: 52-74.

ณัฐวร ยมพูล และ เตือนใจ สมบรูณ์วิวัฒน์. (2550). *การจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กันในการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก*. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 15(2), วันที่ค้นข้อมูล 26 กุมภาพันธ์ 2552.

นัฐพงศ์ สุดพุ่ม และ สรรพสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์. (2550). *การจัดตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรแบบขนานโดยมีเวลาเตรียมการผลิตเป็นแบบไม่อิสระ*. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46 , 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551.

บรรหาญ ลิลา. (2553). *การวางแผนและควบคุมการผลิต* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ท๊อป.

ปิยะ ชัชชวลิตสกุล. (2547). *การจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรที่มีลักษณะเหมือนกันและมีการจัดเรียงกันแบบขนาน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปารเมศ ชุติมา. (2546). *เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: แอคทีฟ พริ้นท์.

ปารเมศ ชุติมา. (2551).*การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: แอคทีฟ พริ้นท์.

ยุทธนา ลีลาศวัฒนกุล. (2547). *เริ่มต้นการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ไทยเจริญการพิมพ์.

วิเรขา มีแหยม. (2549). *การจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานให้กับเครื่องจักรแบบขนานที่มีอิสระต่อกันและมีประสิทธิภาพต่างกันโดยเวลาเสร็จสิ้นรวมต่ำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุปัญญา ไชยชาญ. (2540). *การบริหารการผลิต* (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ : พี.เอ.ลีฟวิ่ง.

อรอนงค์ ดอกจันรี. (2551). *ฮิวริสติกต์สำหรับการจัดตารางเวลาสอบ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาสถิติ, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันบัณฑิตพัฒนาบริหารศาสตร์.

Alex J. Francisco J. and Johnny C. (2007). Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs. *Europen Journal of Operational Research, 179*, 302-315.

Cao, D., Chen, M. and Wan, G. (2005). Parallel machine selection and job scheduling to minimize machine cost and job tardiness. *Computers & Operations Research, 32,* 1995-2012.

F. Glover and M. Laguna, (1997). *Tabu search.* United States of America: Kluwer.

Giuseppe L. (2000). Scheduling jobs with release dates and tails on two unrelated parallel machines to minimize the makespan. *Europen Journal of Operational Research, 120,* 277-288.

Lin, B.M.T. and Jeng, A.A.K. (2004). Parallel-machine batch scheduling to minimize the maximum lateness and the number of tardy jobs. *International Journal of Production Economics*, *91*, 121-134.

Pinedo, M. (2002). *Scheduling theory, algorithms, and systems (2nd ed.).* United States of America: Prentice-Hall.

Sule. (1997*). Production scheduling.* United States of America: Boston.

Tamer Eren. (2009). A bicriteria parallel machine scheduling with a learning effect of setup and removal times, *Applied Mathematical Modelling, 33*, 1141-1150.

V. A. Armentano and M. F. Filho, (2007). Minimizing total tardiness in parallel machine scheduling with setup time: An andaptive memory-based GRASP approach, *Europen Journal of Operational Research, 183*, 100-114.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลลัพธ์การทดลองปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลลัพธ์การทดลองปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา (รูปแบบ 1)

ชื่อ	จำนวน	จำนวน	ความยาวทาบูที่ 10-60% ของจำนวนงาน											
			0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.6	
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL
job1	20	2	1073	2	1048	1	1058	2	1058	2	1048	1	1047	2
job2	20	2	1013	1	1009	1	1009	1	1003	0	1002	1	1009	1
job3	20	3	622	0	635	1	592	0	592	0	592	0	592	0
job4	20	3	580	0	597	0	575	0	576	0	591	0	517	0
job5	40	2	1836	1	1822	1	1824	1	1834	1	1827	0	1832	1
job6	40	2	1624	0	1604	0	1609	0	1611	0	1614	0	1620	0
job7	40	3	1350	2	1347	2	1335	1	1348	2	1344	2	1354	2
job8	40	3	1075	0	1093	0	1093	0	1096	0	1092	0	1104	0
job9	80	2	3826	3	3836	3	3816	3	3854	2	3824	1	3850	3
job10	80	2	4205	9	4248	9	4193	9	4228	8	4231	8	4215	8
job13	60	2	3035	2	3017	3	3031	4	3023	3	3029	3	3036	3
job14	60	2	3065	0	3066	0	3063	0	3058	0	3072	0	3060	0
job21	30	2	1483	1	1468	1	1473	1	1461	1	1478	2	1463	1
job24	50	2	2240	1	2213	1	2246	1	2240	0	2246	1	2247	1
job25	50	2	2653	4	2648	5	2650	5	2634	5	2646	4	2656	5
job28	70	2	3677	1	3678	2	3688	2	3665	2	3666	1	3666	1
job29	70	2	3548	2	3562	1	3566	2	3569	2	3572	2	3589	2
ค่าเฉลี่ย			2171	2	2170	2	2166	2	2168	2	2169	2	2168	2

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลลัพธ์การทดลองปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา (รูปแบบ 2)

ชื่อ	จำนวน	จำนวน	ความยาวทาบูที่ 10-60% ของจำนวนงาน											
			0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.6	
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL
job1	20	2	1035	1	1018	1	1011	1	1028	1	1025	1	1305	1
job2	20	2	1013	1	990	0	995	1	1013	1	1018	1	999	1
job3	20	3	619	0	589	0	574	0	574	0	570	0	565	0
job4	20	3	574	0	561	0	562	0	563	0	569	0	571	0
job5	40	2	1860	2	1860	1	1852	1	1861	1	1855	1	1851	2
job6	40	2	1612	0	1607	0	1636	0	1636	0	1642	0	1666	1
job7	40	3	1380	3	1359	3	1392	3	1382	2	1384	3	1402	4
job8	40	3	1111	0	1117	0	1108	0	1130	0	1122	0	1124	0
job9	80	2	3890	3	3921	3	3948	3	3950	4	3937	5	3954	5
job10	80	2	4276	9	4254	10	4302	9	4319	10	4323	11	4329	11
job13	60	2	3048	2	3066	4	3093	3	3101	4	3097	4	3131	4
job14	60	2	3118	0	3136	0	3107	0	3158	0	3133	0	3171	1
job21	30	2	1503	1	1503	2	1490	2	1499	2	1479	2	1513	2
job24	50	2	2265	1	2270	1	2269	1	2290	2	2297	1	2313	2
job25	50	2	2702	6	2689	5	2707	5	2734	5	2726	6	2738	6
job28	70	2	3744	2	3730	1	3760	2	3779	2	3766	2	3751	2
job29	70	2	3625	3	3657	3	3636	2	3672	3	3638	4	3680	5
ค่าเฉลี่ย			2199	2	2196	2	2202	2	2217	2	2211	2	2239	3

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลลัพธ์การทดลองปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา (รูปแบบ 3(50))

ชื่อ	จำนวน	จำนวน	ความยาวทาบูที่ 10-60% ของจำนวนงาน											
			0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.6	
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL
job1	20	2	1018	1	1018	1	1018	1	1011	1	1018	1	1018	1
job2	20	2	996	1	979	1	988	0	1000	1	993	1	994	0
job3	20	3	574	0	565	0	565	0	565	0	574	0	574	0
job4	20	3	596	0	623	0	598	0	575	0	576	0	593	0
job5	40	2	1797	0	1793	1	1807	1	1807	1	1804	1	1808	1
job6	40	2	1560	0	1554	0	1572	0	1568	0	1576	0	1560	0
job7	40	3	1329	2	1337	2	1336	2	1329	2	1329	2	1335	2
job8	40	3	1071	0	1092	0	1064	0	1103	0	1056	0	1073	0
job9	80	2	3757	2	3692	1	3745	1	3714	1	3729	2	3717	2
job10	80	2	4148	9	4177	9	4148	10	4165	10	4127	10	4127	11
job13	60	2	2979	3	2963	2	2975	2	2989	3	2970	2	2953	3
job14	60	2	2997	0	3000	0	2987	0	2983	0	2992	0	2978	0
job21	30	2	1475	0	1480	0	1487	0	1455	0	1472	0	1459	0
job24	50	2	2191	1	2192	1	2194	1	2176	0	2184	1	2186	2
job25	50	2	2619	4	2596	4	2626	5	2608	5	2617	5	2595	5
job28	70	2	3580	1	3535	1	3579	0	3595	1	3570	0	3575	2
job29	70	2	2921	0	2939	0	2921	0	2932	0	2934	0	2947	0
ค่าเฉลี่ย			2095	1	2090	1	2095	1	2093	1	2089	1	2088	2

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลลัพธ์การทดลองปัญหาการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา (รูปแบบ 3(100))

ชื่อ	จำนวน	จำนวน	ความยาวทาบูที่ 10-60% ของจำนวนงาน											
			0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.6	
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL	C_{max}	NL
job1	20	2	1020	1	1019	1	1015	1	1010	1	1016	1	1010	1
job2	20	2	1002	1	992	1	997	1	996	0	984	1	989	1
job3	20	3	590	0	565	0	565	0	565	0	574	0	586	0
job4	20	3	611	0	575	0	566	0	566	0	576	0	587	0
job5	40	2	1795	0	1791	0	1796	0	1793	1	1786	0	1796	0
job6	40	2	1554	0	1570	0	1543	0	1562	0	1561	0	1549	0
job7	40	3	1306	1	1320	2	1328	2	1325	2	1301	2	1320	2
job8	40	3	1044	0	1063	0	1055	0	1056	0	1058	0	1052	0
job9	80	2	3696	1	3734	1	3703	2	3706	2	3706	1	3708	2
job10	80	2	4127	7	4122	9	4134	8	4115	8	4117	10	4131	10
job13	60	2	2952	2	2958	2	2950	2	2949	2	2923	3	2943	2
job14	60	2	2953	0	2979	0	2973	0	2968	0	2962	0	2978	0
job21	30	2	1472	0	1448	0	1445	0	1454	0	1467	0	1456	0
job24	50	2	2170	1	2166	0	2168	1	2181	1	2172	1	2171	1
job25	50	2	2594	4	2601	5	2586	4	2605	5	2597	4	2578	5
job28	70	2	3540	1	3569	0	3565	1	3570	0	3565	1	3533	1
job29	70	2	2916	0	2941	0	2918	0	2920	0	2938	0	2920	0
ค่าเฉลี่ย			2079	1	2083	1	2077	1	2079	1	2077	1	2077	1

ภาคผนวก ข

ผลลัพธ์จำนวนรอบการค้นหาไม่เปลี่ยนแปลงของปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา

ช่วงความยาวมากที่สุดที่ผลลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลงทำการบันทึกเพื่อพารามิเตอร์ของการตั้งกฎการหยุดของรูปแบบทาบูที่ออกแบบ

ตารางภาคผนวก ข-1 ช่วงความยาวมากที่สุดที่ผลลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลง

ชื่อ	จำนวน	จำนวน	ช่วงความยาวมากที่สุดที่ผลลัพธ์ไม่เปลี่ยนแปลง							
			เวลาปิดงานในรูปแบบที่				จำนวนงานสายในรูปแบบที่			
ปัญหา	งาน	เครื่องจักร	1	2	3(50)	3(100)	1	2	3(50)	3(100)
job1	20	2	1059	3329	140701	140701	2502	13673	23951	23951
job2	20	2	3157	99784	5571	59947	1092	67517	151604	124701
job3	20	3	939	4245	61	179	1978	1062	0	1
job4	20	3	3582	32	285	536	857	1440	52	1
job5	40	2	162205	191654	82958	136553	251674	257903	13171	555402
job6	40	2	241170	457385	213861	271201	378769	29935	14665	5004
job7	40	3	260605	15421	254284	378880	4891	715358	83501	88402
job8	40	3	55206	71117	6854	111008	256982	325770	202	9802
job9	80	2	443138	107985	349570	481000	129537	700021	24654	12203
job10	80	2	43592	34291	118423	92917	578472	449621	25010	709392
job13	60	2	77503	23308	273878	116004	282907	57472	95465	36112
job14	60	2	200488	162464	200867	275779	1590	58848	71251	1104
job21	30	2	50013	116420	77687	884907	243972	362400	44655	1623
job24	50	2	75025	710164	437658	130958	190234	176858	56053	10101
job25	50	2	73960	8426	25897	256791	294577	509962	524752	26811
job28	70	2	52790	502415	225017	346958	165618	96449	95284	4910
job29	70	2	95191	274745	5473	160270	461031	103662	145607	226604

ภาคผนวก ค

ผลลัพธ์ R square ของปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ 17 ปัญหา

สรุปผลลัพธ์ค่า R square ของจำนวนงานเป็นตัวแปรต้นและ จำนวนงานกำสองเป็นตัวแปรต้น

ตารางภาคผนวก ค-1 ผลลัพธ์ค่า R squaer ทุกรูปแบบ

เป็นค่าของ	รูปแบบที่	ค่า r square		ค่า r square ของค่ามากสุดของจำนวนงาน	
		x	x^2	x	x^2
makespan	1	0.213607378	0.184984759	0.464492039	0.488503169
	2	0.071518441	0.039177601	0.02475509	0.001754277
	3(50)	0.203013095	0.16224278	0.359386249	0.286448455
	3(100)	0.028327	0.01862951	0.002565619	0.002134805
tardy job	1	0.328010702	0.28770424	0.767092335	0.726233561
	2	0.14375969	0.130976679	0.030837153	0.030837153
	3(50)	0.017755334	0.006049073	0.005633409	0.02313023
	3(100)	0.100694582	0.120394794	0.212460927	0.266122549

ภาคผนวก ง

ตารางเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ตารางภาคผนวก ง-1 เทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเวลาปิดงาน

ชื่อปัญหา	ผลลัพธ์													
	SPT		EDD		รูปแบบ 1		รูปแบบ 2		รูปแบบ 3		รูปแบบ 3 (100)		ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	
	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%	C_{max}	เทียบ%
4Job1	307.0	72.6	334.0	61.4	241.0	100.0	291.0	79.3	241.0	100.0	241.0	100.0	241.0	100.0
4Job2	271.0	64.5	271.0	64.5	200.0	100.0	200.0	100.0	200.0	100.0	200.0	100.0	200.0	100.0
4Job3	250.0	77.5	250.0	77.5	243.0	80.9	204.0	100.0	204.0	100.0	204.0	100.0	204.0	100.0
5Job1	248.0	59.9	248.0	59.9	177.0	100.0	177.0	100.0	177.0	100.0	177.0	100.0	177.0	100.0
5Job2	307.0	88.0	361.0	68.2	274.0	100.0	274.0	100.0	274.0	100.0	274.0	100.0	274.0	100.0
5Job3	383.0	41.7	330.0	63.6	242.0	100.0	245.0	98.8	242.0	100.0	242.0	100.0	242.0	100.0
6Job1	184.0	89.2	203.0	77.7	166.0	100.0	166.0	100.0	166.0	100.0	166.0	100.0	166.0	100.0
6Job2	324.0	76.3	468.0	21.4	262.0	100.0	262.0	100.0	262.0	100.0	262.0	100.0	262.0	100.0
6Job3	358.0	65.9	358.0	65.9	267.0	100.0	267.0	100.0	267.0	100.0	267.0	100.0	267.0	100.0
7Job1	540.0	58.3	501.0	68.5	409.0	92.7	381.0	100.0	381.0	100.0	381.0	100.0	381.0	100.0
7Job2	425.0	78.2	513.0	53.0	349.0	100.0	349.0	100.0	349.0	100.0	349.0	100.0	349.0	100.0
7Job3	437.0	73.3	441.0	72.2	376.0	91.0	345.0	100.0	345.0	100.0	345.0	100.0	345.0	100.0
8Job1	361.0	70.6	496.0	22.2	306.0	90.3	279.0	100.0	279.0	100.0	279.0	100.0	279.0	100.0
8Job2	476.0	69.2	520.0	57.1	389.0	93.1	364.0	100.0	364.0	100.0	364.0	100.0	364.0	100.0
8Job3	577.0	15.1	605.0	6.1	330.0	94.2	312.0	100.0	330.0	94.2	330.0	94.2	312.0	100.0
9Job1	476.0	89.0	533.0	75.8	453.0	94.4	429.0	100.0	429.0	100.0	429.0	100.0	429.0	100.0
9Job2	577.0	62.0	685.0	36.1	473.0	86.8	449.0	92.6	418.0	100.0	418.0	100.0	418.0	100.0
9Job3	447.0	78.9	477.0	70.7	402.0	91.1	399.0	91.9	382.0	96.5	382.0	96.5	369.0	100.0
10Job1	562.0	59.5	580.0	55.0	429.0	92.8	424.0	94.0	400.0	100.0	400.0	100.0	400.0	100.0
10Job2	417.0	89.7	417.0	89.7	378.0	100.0	389.0	97.1	378.0	100.0	378.0	100.0	378.0	100.0
10Job3	475.0	56.1	521.0	42.1	333.0	99.1	333.0	99.1	333.0	99.1	333.0	99.1	330.0	100.0
ค่าเฉลี่ย	400.1	68.4	433.9	57.6	319.0	95.5	311.4	97.7	305.8	99.5	305.8	99.5	304.1	100.0

ตารางภาคผนวก ง-2 เทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเป็นผลต่างของจำนวนงานสาย

ชื่อปัญหา	ผลลัพธ์													
	SPT		EDD		รูปแบบ 1		รูปแบบ 2		รูปแบบ 3		รูปแบบ 3 (100)		ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด	
	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง	NL	ผลต่าง
4Job1	1	0	3	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
4Job2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
4Job3	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
5Job1	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
5Job2	2	0	3	1	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
5Job3	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
6Job1	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
6Job2	4	0	5	1	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
6Job3	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
7Job1	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
7Job2	5	0	6	1	6	1	5	0	5	0	5	0	5	0
7Job3	2	1	2	1	2	1	1	0	1	0	1	0	1	0
8Job1	4	2	5	3	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0
8Job2	4	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8Job3	7	4	6	3	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
9Job1	4	0	4	0	5	1	4	0	4	0	4	0	4	0
9Job2	7	0	8	1	7	0	7	0	7	0	7	0	7	0
9Job3	6	1	6	1	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0
10Job1	8	1	8	1	7	0	7	0	7	0	7	0	7	0
10Job2	4	0	5	1	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
10Job3	4	3	4	3	2	1	2	1	2	1	1	0	1	0
ค่าเฉลี่ย	3.76	0.8	4	1	3.19	0.19	3.05	0.05	3.05	0.05	3	0	3	0

ภาคผนวก จ
คู่มือการใช้โปรแกรม C++ สำหรับค้นหาผลลัพธ์ในรูปแบบทาบู

ภาคผนวกนี้จะแสดงข้อมูลในรูปแบบ CD เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก ในแผ่น CD จะประกอบด้วย

1. ปัญหาที่ใช้ในการทดลองที่เป็นไฟล์ .txt ทั้งหมด

2. ไฟล์ตัวโปรแกรมที่สามารถใช้งานหาผลลัพธ์ได้

3. โครงสร้างเนเบอร์ฮูดรูปแบบทาบูที่ออกแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการเขียนโปรแกรมสำหรับโปรแกรมเมอร์ที่ต้องการจะเขียนตัวโปรแกรมด้วยตนเอง