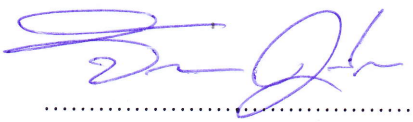
ฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบตามงาน

พัชรินทร์ ศรีสองสกุล

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณางานนิพนธ์ของ พัชรินทร์ ศรีสองสกุล ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

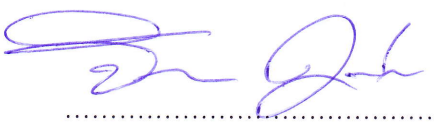
คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

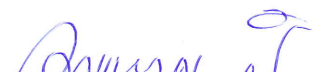
(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)

คณะกรรมการสอบงานนิพนธ์



..... ประธาน

(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ลิลา)

..... กรรมการ

(ดร. บัญชา อริยะจรรยา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 4 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

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

คุณค่าและประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

พัชรินทร์ ศรีสองสกุล

58920782: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)
คำสำคัญ: กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม/ ฮิวริสติก/ ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน

พัชรินทร์ ศรีสองสกุล: ฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบตามงาน (MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING BASED HEURISTIC FOR JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM). คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: จักรวาล คุณะดิลก, Ph.D., 109 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบตามงานที่มีสองจุดประสงค์ คือ การทำให้เวลาปิดงานของระบบและเวลาสายสูงสุดของทุกงานต่ำที่สุด การจัดตารางการผลิตเดิมของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งที่มีลักษณะการผลิตเป็นระบบการผลิตแบบตามงานใช้วิธีการกำหนดลำดับความสำคัญของงานจากกำหนดส่งมอบเร็วกว่าให้ทำการผลิตก่อน (Earliest due date, EDD) ซึ่งให้ผลเวลาปิดงานของระบบสูงและไม่สามารถส่งมอบงานได้ทันตามกำหนด งานวิจัยนี้ออกแบบฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming based heuristic, MILP_H) โดยมีการแบ่งงานที่ต้องการจัดตารางการผลิตที่มีจำนวนมากออกเป็นกลุ่มย่อยตามกฎลำดับความสำคัญแบบ EDD ตารางการผลิตของกลุ่มย่อยหนึ่ง ๆ ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming, MILP) หากไม่มีงานสายเกิดขึ้นจะใช้ MILP ที่มีจุดประสงค์ที่ทำให้เวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุด แต่หากมีงานสายเกิดขึ้นจะใช้ MILP ที่มีจุดประสงค์ที่ทำให้ผลรวมแบบถ่วงน้ำหนักของเวลาปิดงานของระบบและเวลาสายสูงสุดของทุกงานต่ำที่สุด โดยให้น้ำหนักเวลาสายสูงสุดมากกว่าเวลาปิดงานเพื่อลดเวลาการทำงานล่วงเวลาในการผลิตงานที่เสร็จไม่ทันตามกำหนดส่งมอบตารางการผลิตของกลุ่มย่อยแต่ละกลุ่มย่อยจะถูกนำมารวมกันตามลำดับกลุ่ม EDD ให้เป็นตารางการผลิตสำหรับใช้งาน ซอฟต์แวร์ OpenSolver ด้วยโปรแกรมประมวลผล Gurobi 7.5.2 ถูกนำมาใช้ในการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง MILP โดยกำหนดเวลาประมวลผลสูงสุดเท่ากับ 600 วินาที การทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับวิธีการเดิมด้วยปัญหาการจัดตารางการผลิตจริงและปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์รวม 15 ปัญหา จำนวนงานเฉลี่ย 47 งาน และแต่ละงานมีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน 4 เครื่องจักรจากทั้งหมด 9 เครื่องจักร ผลการวิจัยพบว่าตารางการผลิตที่สร้างด้วยวิธี MILP_H สามารถลดเวลาปิดงานลงได้เฉลี่ย 220 นาที และลดเวลาสายสูงสุดลงได้เฉลี่ย 74 นาที หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 4.22 และ 22.62 ตามลำดับ

57921135: MAJOR: INDUSTIAL ENGINEERING; M.Eng. (INDUSTRIAL ENGINEERING)
KEYWORDS: MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING/ HEURISTIC/ JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM
PATCHARIN SRISONGSAKUN: MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING BASED HEURISTIC FOR JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM. ADVISORY COMMITTEE: JAKRAWARN KUNADILOK, Ph.D., 109 P. 2017.

This research proposed a job shop scheduling method with two objectives which are minimizing the makespan and the maximum tardiness. The earliest due date rule was used for solving this problem which is the job shop scheduling problem in an automotive part manufacturing process. Production schedules generated by using the EDD method were not effective when consider theirs makespan and the number of tardy jobs. This research developed a mixed integer linear programming based heuristic (MILP_H) to build the production schedules. The MILP_H is the heuristic for dividing the jobs to be scheduled to several subgroups with the EDD rule. Then one of the proposed mixed integer linear programming (MILP) models is used for generating a schedule for each subgroup. If all jobs in the subgroup have completed before their due date the MILP with minimizing the makespan will be chosen for scheduling. Otherwise, the MILP with minimizing the total weighted makespan and the maximum tardiness will be used. The subgroup schedules then are combined in the EDD group order to a production schedule for practice. This research assigned the weight of the maximum tardiness more than the makespan in the purpose of reduction the extra time for producing the tardy jobs to be finished within their due date. The OpenSolver software with Gurobi 7.5.2 optimizer was used to find the solution from the proposed MILP models. The maximum computation time was set at 600 seconds. The performance of the MILP_H was evaluated by comparing with the EDD method. The 15-problem set consists of real scheduling problems and simulation problems with the average number of jobs equal to 47 jobs and each job has different process steps produced by 4 machines form 9 possible machines. The results revealed that the MILP_H can create production schedules that the average makespan was reduced 200 minutes or 4.22% and the average of the maximum tardiness was reduced 74 minutes or 22.62%.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

สารบัญ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ซ

สารบัญภาพ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ..... 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

สมมติฐานการวิจัย..... 4

กรอบแนวคิดในการวิจัย..... 4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 5

ขอบเขตการวิจัย..... 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

การจัดตารางการผลิต..... 6

คำศัพท์ที่ใช้ในการจัดตารางการผลิต..... 8

รูปแบบการผลิต..... 9

ลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของกระบวนการ..... 10

ตัววัดสมรรถนะและวัตถุประสงค์ของตารางการผลิต..... 11

วิธีการจัดตารางการผลิต..... 12

วิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบตามงาน..... 12

แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์..... 13

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มและกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม..... 16

การหาผลลัพทธที่เหมาะสมที่สุดด้วยซอฟต์แวร์ OpenSolver..... 17

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 19

3 วิธีการดำเนินงาน..... 23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	ศึกษากระบวนการผลิตและวิธีการจัดตารางการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา.....	24
	วิธีการจัดตารางการผลิต และประสิทธิภาพของตารางการผลิตในปัจจุบัน.....	30
	วิเคราะห์ปัญหาการจัดตารางการผลิตหากมีงานสายเกิดขึ้น.....	31
4	ผลการศึกษาวิจัย.....	35
	วิธีการในการจัดตารางการผลิตแบบตามงานด้วยฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม.....	35
	แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม.....	38
	การใช้ซอฟต์แวร์ OpenSolver สำหรับหาผลลัพท์ของ MILP.....	52
	การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการตารางการผลิต.....	54
5	สรุปและอภิปรายผล.....	61
	สรุปผลการวิจัย.....	61
	อภิปรายผลการวิจัย.....	62
	ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....		64
ภาคผนวก.....		65
ภาคผนวก ก.....		66
ภาคผนวก ข.....		69
ภาคผนวก ค.....		74
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....		109

สารบัญตาราง

ภาพที่		หน้า
1-1	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการ EDD และวิธี SPT.....	2
4-1	เวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักรก่อนการจัดตารางการผลิตงานในกลุ่มย่อยถัดไป.....	46
4-2	เวลาผลิตเสร็จเทียบกับกำหนดส่งมอบหลังการทำงานล่วงเวลา.....	51
4-3	เวลาปิดงานเมื่อจัดตารางการผลิตด้วย MILP ของปัญหากรณีศึกษา 41 งาน.....	55
4-4	ปัญหาสำหรับทดสอบ.....	58
4-5	ผลการทดสอบ.....	59

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	ระบบการผลิตแบบตามงานของโรงงานกรณีศึกษา	2
2-1	ระบบการผลิต	6
2-2	แผนภูมิแกนต์	8
2-3	ระบบการผลิตแบบตามงาน	10
2-4	การเรียกใช้งาน OpenSolver	18
2-5	หน้าต่าง OpenSolver-Model และตัวอย่างการบันทึกตัวแบบ	19
2-6	ผลอันดับคะแนนการจัดลำดับงานด้วยกฎต่าง ๆ	20
3-1	กระบวนการหลักที่โรงงานใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	26
3-2	รายละเอียดการผลิตในแต่ละกระบวนการ	27
3-3	ลำดับการผลิตของกลุ่มงานและเครื่องจักรที่ใช้	27
3-4	ตัวอย่างงานในรอบการจัดตารางการผลิต	28
3-5	เวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตของแต่ละงาน	29
3-6	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD และวิธี SPT	30
3-7	ตัวอย่างข้อมูลการผลิต	31
3-8	ตัวอย่างตารางการผลิตก่อนพิจารณาการทำงานล่วงเวลา	32
3-9	ตัวอย่างตารางการผลิตหลังพิจารณาการทำงานล่วงเวลาแบบเพิ่มกำหนดส่งมอบ	32
3-10	ตัวอย่างตารางการผลิตหลังพิจารณาการทำงานล่วงเวลาแบบลดเวลาการผลิต	33
4-1	วิธีการจัดตารางการผลิตด้วยฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม	37
4-2	ผลการแบ่งกลุ่มงานด้วยวิธี EDD จากปัญหาตัวอย่าง	42
4-3	ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP I กลุ่มงานที่ 1	43
4-4	ตารางการผลิตที่สร้างจากวิธี EDD กลุ่มงานที่ 1	44
4-5	ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP II (W = 0.01) กลุ่มงานที่ 1	45
4-6	ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP I กลุ่มงานที่ 2	47
4-7	ตารางการผลิตที่สร้างจากวิธี EDD กลุ่มงานที่ 2	48
4-8	ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP II (W = 1, l_{max} = 0) กลุ่มงานที่ 2	49
4-9	ตารางการทำงานของเครื่องจักรก่อนและหลังการทำงานล่วงเวลา	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4-10 ตัวอย่างแผนงาน MILP 1 ของไฟล์เอ็กเซลสำหรับจัดตารางการผลิต..... 53

4-11 ผลลัพทธ์ระหว่างการรันโปรแกรมที่ช่วงเวลาการประมวลผลต่าง ๆ..... 56

บทที่ 1
บทนำ

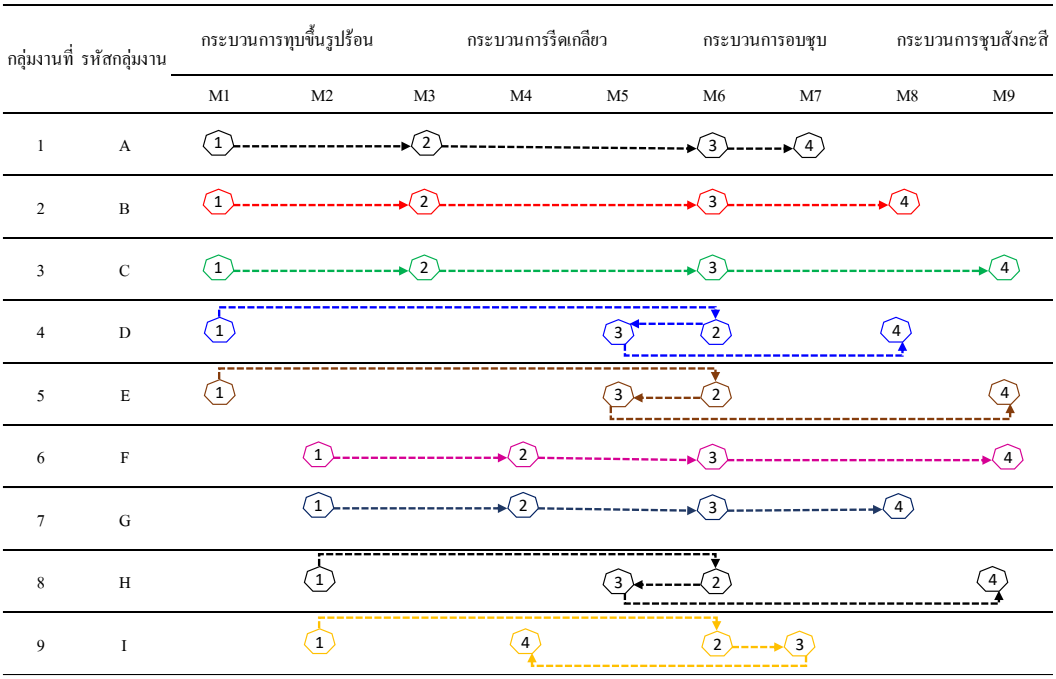
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจัดตารางการผลิตเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพขององค์กรเป็นอย่างมาก เนื่องจากการผลิตที่ดี คือ การมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรการผลิตที่มีอยู่ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด อาทิเช่น วัตถุดิบ แรงงาน เครื่องจักร หรือสิ่งอำนวยความสะดวกที่มีอยู่อย่างจำกัด และเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า รวมถึงเพื่อให้กระบวนการผลิตสามารถดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากแต่ละบริษัทมีกระบวนการและปัญหาที่แตกต่างกัน การจัดตารางการผลิตที่ดีที่สุดนั้นจึงเป็นเรื่องยาก ดังนั้นการจัดตารางการผลิตที่ใช้เวลาในการจัดไม่มากนัก และผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นที่ยอมรับได้ จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด (บรรหาญ ลิลา, 2553)

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับกรณีศึกษาของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง กระบวนการผลิตทั้งหมด 4 ขั้นตอน คือ การทุบขึ้นรูป การรีดเกลียว การอบชุบ และการชุบสังกะสี จำนวนเครื่องจักรรวมทุกขั้นตอนการผลิตเท่ากับ 9 เครื่อง กลุ่มชิ้นส่วนที่ผลิตมีทั้งหมด 9 กลุ่ม แต่ละกลุ่มถูกจำแนกออกเป็นรุ่นต่าง ๆ มากกว่า 40 รุ่น งานแต่ละกลุ่มมีขั้นตอนการผลิตที่กำหนดไว้แตกต่างกัน โดยที่แต่ละกลุ่มงานอาจต้องผ่านขั้นตอนการผลิตทุกขั้นตอนหรือไม่ก็ได้ แต่จะถูกกำหนดเครื่องจักรสำหรับการผลิตของแต่ละกลุ่มงานไว้ ขั้นตอนการผลิตบนเครื่องจักรต่าง ๆ ของกลุ่มงานทั้ง 9 กลุ่ม ดังภาพที่ 1-1

ระบบการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาตามภาพที่ 1-1 เป็นระบบการผลิตแบบตามงาน (Job shop) ที่งานแต่ละงานมีลำดับการผลิตเป็นของตัวเอง ระบบการผลิตแบบนี้เป็นระบบที่จัดตารางการผลิตให้มีเวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุดได้ยาก (Pinedo, 2002) กิจกรรมการจัดตารางการผลิตของโรงงานตัวอย่างเริ่มจากการรวบรวมคำสั่งซื้อของลูกค้าที่ประกอบด้วยข้อมูลสำคัญ คือ รุ่นของงาน ปริมาณที่ต้องการ และกำหนดส่งมอบ เมื่อถึงรอบเวลาการจัดตารางการผลิต (พิจารณาจากจำนวนงานที่สั่ง หรือช่วงเวลา) ผู้วางแผนการผลิตจะทำการจัดตารางการผลิตโดยมีตัวชี้วัดประสิทธิภาพของตารางการผลิตที่สำคัญสองดัชนี คือ เวลาปิดงานของระบบ (Makespan) และจำนวนงานสาย (Number of tardy jobs) ในอดีตโรงงานได้ออกแบบวิธีการจัดตารางการผลิตโดยการประยุกต์กฎการจัดลำดับการผลิตที่งานที่มีกำหนดส่งมอบก่อนให้ทำการผลิตก่อน (Earliest due date, EDD) และหากมีกำหนดส่งมอบเท่ากันให้งานที่รับคำสั่งซื้อก่อนผลิตก่อน (First come

first serve, FCFS) หลังจากใช้งานได้มาระยะเวลาหนึ่งโรงงานได้ใช้วิธีการจัดตารางการผลิตโดยกำหนดให้งานที่พร้อมผลิตและใช้เวลาในการผลิตน้อยที่สุดให้ทำการผลิตก่อน (Shortest processing time, SPT) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาปิดงานของระบบ พบว่า วิธีการ EDD มีเวลาปิดงานของระบบต่ำกว่า SPT แต่มีจำนวนงานสายมากกว่า (Kowmanee, 2014) ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสองวิธีนี้แสดงในตารางที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 ระบบการผลิตแบบตามงานของโรงงานกรณีศึกษา

ตารางที่ 1-1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการ EDD และวิธี SPT

ประสิทธิภาพ	วิธี EDD	วิธี SPT	หน่วย
เวลาปิดงานของระบบ (Makespan)	4,490	5,130	นาที
จำนวนงานที่ส่งล่าช้า	17	3	งาน
ผลรวมเวลารอคอยงาน (Total idle time of job)	36,157	670	นาที
ผลรวมเวลารอคอยของเครื่องจักร (Total idle time of machine)	22,419	16,153	นาที
ประสิทธิภาพการทำงาน (% Utilization)	29.32	36.53	เปอร์เซ็นต์
ผลรวมเวลาสิ้นสุดการทำงานของเครื่องจักร	31,717	25,451	นาที

การจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่างเดิมที่ใช้วิธีการจัดตารางผลิตแบบ EDD และ SPT นั้นพิจารณาเป้าหมายของการผลิตที่สำคัญ 2 เป้าหมาย คือ เวลาปิดงานต่ำที่สุด และจำนวนงานสายต่ำที่สุด จากตารางที่ 1-1 พบว่า เวลาปิดงานต่ำที่สุดที่ได้จากวิธี EDD เท่ากับ 4,490 นาที ขณะที่จำนวนงานสายต่ำที่สุดที่ได้วิธีการ SPT คือ 3 งาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งยังไม่ทำให้ตารางการผลิตมีความเหมาะสมตามที่โรงงานต้องการ นอกจากนี้แล้วการจัดตารางการผลิตยังอยู่ภายใต้เงื่อนไขเวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักรเริ่มต้นที่เวลาอ้างอิงศูนย์ เท่ากันทุกเครื่องจักร ซึ่งในทางปฏิบัติเครื่องจักรอาจไม่ได้พร้อมผลิตที่เวลาเดียวกัน และการจัดตารางการผลิตเดิมกำหนดเวลาในการผลิตที่เป็นไปได้ในแต่ละวันเท่ากับ 8 ชั่วโมงทำงานต่อวัน ซึ่งในทางปฏิบัติหากมีงานที่ผลิตไม่เสร็จก่อนกำหนดส่งมอบ จะต้องมีการวางแผนการทำงานล่วงเวลาเพื่อทำให้งานส่งทันตามกำหนดหรือส่งช้ากว่ากำหนดน้อยที่สุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการเชิงประมาณ (Approximation method) สำหรับจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่างด้วยวิธีฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming based heuristic) ที่มีจุดประสงค์ด้านประสิทธิภาพการผลิต คือ ทำให้เวลาปิดงานในระบบต่ำที่สุด และด้านการส่งมอบงาน คือ ทำให้เวลาสายสูงที่สุดของทุกงานมีค่าต่ำที่สุดเพื่อเป็นตัวกำหนดเวลาในการทำงานล่วงเวลาที่ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายส่วนเพิ่มนี้ต่ำที่สุด โดยการจัดตารางการผลิตในงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขการผลิตของโรงงานตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลการผลิตได้แก่เวลาการผลิต และเวลาส่งมอบงาน เป็นค่าคงที่
2. งานที่กำลังผลิตอยู่บนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ จะต้องถูกทำจนเสร็จ ไม่สามารถนำงานนั้นออกมารอเพื่อให้เครื่องจักรเครื่องนั้นผลิตงานอื่นก่อนได้
3. เครื่องจักรทำงานได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่เสีย หรือต้องทำการซ่อมบำรุงหลังจากที่วางแผนการผลิตแล้ว
4. เวลาการตั้งเครื่องจักรถูกคิดรวมกับเวลาการผลิตแล้ว
5. เครื่องจักรแต่ละเครื่องมีเวลาพร้อมผลิตแตกต่างกันได้
6. สามารถทำงานล่วงเวลาได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบวิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบตามงาน โดยมีเป้าหมายให้เวลาปิดงานต่ำที่สุด (Minimizing makespan) และเวลาสายสูงที่สุดของทุกงานมีค่าต่ำที่สุด (Minimizing maximum tardiness)

สมมติฐานการวิจัย

ระบบการผลิตแบบตามงานเป็นระบบที่จัดตารางการผลิตให้มีเวลาปิดงานที่ต่ำที่สุดได้ยาก เนื่องจากเป็นปัญหาประเภท NP-hard (Garey & Johnson, 1979) การใช้วิธีการแบบแน่นอน (Exact method) หรือวิธีการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) อาจช่วยจัดตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานที่ต่ำที่สุดหรือมีจำนวนงานสายน้อยที่สุดได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้สามารถจัดตารางการผลิตได้ภายใต้เงื่อนไขที่จำนวนงานและจำนวนขั้นตอนการผลิตต้องไม่มากเกินไป รอบเวลาของการจัดตารางการผลิตในทางปฏิบัติของโรงงานตัวอย่างมีจำนวนงานประมาณ 40 งาน ซึ่งเป็นจำนวนงานที่มากสำหรับการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบตามงานนี้ ดังนั้น การออกแบบวิธีการเชิงประมาณที่เหมาะสมจะช่วยทำให้สร้างตารางการผลิตที่ประสิทธิภาพในด้านเวลาปิดงาน และเวลาสายสูงสุดได้

กรอบแนวคิดในการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการเชิงประมาณ (Approximation method) สำหรับจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่างด้วยวิธีฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming based heuristic) ที่มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เวลาปิดงานในระบบต่ำที่สุดและเวลาสายสูงสุดมีค่าต่ำที่สุด การออกแบบวิธีการนี้อยู่ภายใต้แนวคิด 3 ส่วน คือ 1) แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบตามงานจากงานวิจัยในอดีตสามารถจัดตารางการผลิตที่มีประสิทธิภาพที่สุดได้ เมื่อจำนวนงานที่จัดมีไม่มากเกินไป 2) การจัดตารางการผลิตของโรงงานตัวอย่างมีรอบเวลาการจัดตารางการผลิตที่จำนวนงานประมาณ 40 งาน ดังนั้นจึงออกแบบวิธีการฮิวริสติกส์โดยใช้แนวคิดการแบ่งกลุ่มย่อยของงาน (Decomposition) เพื่อทำให้ขนาดจำนวนงานในกลุ่มย่อยไม่มากเกินไป แล้วใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมในการจัดตารางการผลิตในกลุ่มต่าง ๆ เหล่านั้น แล้วมาสร้างเป็นตารางการผลิตของปัญหาจริง 3) การจัดตารางการผลิตที่มีตัวชี้วัดประสิทธิภาพ 2 ตัว คือ เวลาปิดงานของระบบกับเวลาสายสูงสุด เป็นลักษณะการจัดตารางการผลิตแบบสองวัตถุประสงค์ ที่เพิ่มความซับซ้อนของปัญหาขึ้นอีก ดังนั้นจึงต้องออกแบบฮิวริสติกที่เหมาะสม เพื่อให้ตารางการผลิตที่จัดมามีค่าเวลาปิดงานของระบบต่ำ และเวลาสายสูงสุดที่ต่ำซึ่งทำให้เกิดต้นทุนด้านการทำงานล่วงเวลาเพื่อให้ส่งมอบงานได้ทันเวลาที่ไม่สูงเกินไป หลังจากที่ออกแบบฮิวริสติกและทดสอบประสิทธิภาพแล้ว งานวิจัยนี้จะออกแบบโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซลที่ใช้สำหรับสร้างตารางการผลิตตามวิธีการที่เสนอ เพื่อช่วยสร้างแผนการผลิตได้อย่างรวดเร็ว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถจัดลำดับงานในระบบการผลิตแบบงาน ที่ทำให้เวลาปิดงานของระบบต่ำและใช้เวลาการทำงานล่วงเวลาน้อยที่สุดสำหรับผลิตงานให้ทันตามกำหนดส่งมอบ
2. สามารถรับงานจากลูกค้าได้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสามารถผลิตงานได้เร็วขึ้น
3. จัดตารางการผลิตได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ
4. เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการจัดตารางการผลิตในรูปแบบอื่น ๆ

ขอบเขตการวิจัย

1. การออกแบบวิธีการแบ่งกลุ่มย่อยของงาน เป็นการประยุกต์กฎการจัดลำดับงานแบบ EDD เนื่องจากเป็นวิธีการที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ด้านการทำให้เวลาสายสูงสุดมีค่าต่ำที่สุด

2. แบบจำลองกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับจัดตารางการผลิตมี 2 รูปแบบ คือ แบบจำลองที่ใช้สำหรับหาเวลาปิดงานในระบบที่ต่ำที่สุด และแบบจำลองที่ใช้สำหรับผลรวมเวลาสายสูงสุดกับเวลาปิดงานแบบปรับขนาดหน่วยเวลา (Time scale) ที่มีค่าน้อยที่สุด ลักษณะของแบบจำลองเป็นแบบกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed integer linear programming: MILP)

3. การหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมใช้โปรแกรม OpenSolver เวอร์ชั่น 2.8.6 (เริ่มให้ดาวน์โหลดวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2560) โดยใช้ Gurobi 7.0.2 เป็นตัวประมวลผลลัพธ์ (Solver engine)

4. ใช้ตัวอย่างกลุ่มงานจากคำสั่งซื้อจริงของลูกค้าของโรงงานตัวอย่าง 1 กลุ่มงาน เป็นข้อมูลสำหรับออกแบบ และทดสอบวิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอ

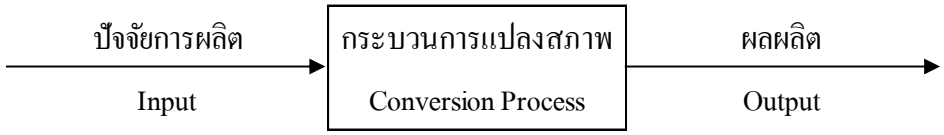
5. การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดตารางการผลิตทำโดยการเปรียบเทียบเวลาปิดงาน และเวลาสายสูงที่สุด ที่ได้จากวิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้ในอดีตของโรงงานตัวอย่าง โดยแยกกลุ่มปัญหาสำหรับทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัญหาที่จำลองจากคอมพิวเตอร์กับปัญหาการจัดตารางการผลิตจริงของโรงงานตัวอย่าง

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต (Scheduling) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม (Mathematical Model and Optimization) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดตารางการผลิต

ชุมพล ศฤงคารศิริ (2536) กล่าวว่า ระบบการผลิต (Production system) การผลิตเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการสร้างสิ่งหนึ่งสิ่งใดขึ้นมา จากการใช้ทรัพยากรหรือปัจจัยการผลิตที่มีอยู่ การดำเนินการผลิตจะเป็นไปตามลำดับขั้นตอนของการกระทำก่อนหลัง กล่าวคือ จากวัตถุดิบที่มีอยู่จะถูกแปลงสภาพให้เป็นผลผลิตที่อยู่ในรูปตามต้องการ เพื่อให้การผลิตบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวนั้น จึงจำเป็นต้องมีการจัดการให้อยู่ในรูปของระบบการผลิต ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ปัจจัยการผลิต (Input) กระบวนการแปลงสภาพ (Conversion process) และผลผลิต (Output) ที่อาจเป็นสินค้าและบริการ ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ระบบการผลิต

การผลิตที่มีประสิทธิภาพนั้น จะต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านปริมาณ คุณภาพ เวลาและราคา ซึ่งทั้งหมดนี้จะต้องนำมารวมไว้ในระบบการผลิต โดยมีการวางแผนและควบคุมการผลิตเป็นแกนกลาง กิจกรรมต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบการผลิตนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การวางแผน (Planning) หมายถึง การวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ และวางแผนการใช้ทรัพยากรให้ตรงกับเป้าหมายที่ต้องการ และเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2. การดำเนินงาน (Operation) หมายถึง ขั้นตอนการดำเนินงานหลังจากกำหนดแผนการผลิต

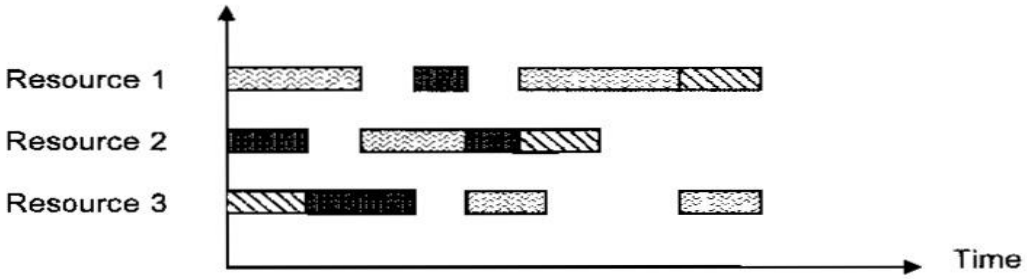
3. การควบคุม (Control) หมายถึง การตรวจตราให้คำแนะนำ และติดตามผลเกี่ยวกับการดำเนินงาน ขั้นตอนนี้ทำหน้าที่ปรับปรุงแผนงาน และเป้าหมายเพื่อให้เป็นที่น่าเชื่อในการบรรลุเป้าหมายหลัก

การวางแผนการผลิต และการควบคุมการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ต้องมีความพร้อมทั้งวัตถุดิบ กำลังคน และกำลังเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตด้วย (พิภพ ลลิตาภรณ์, 2553) การจัดตารางการผลิตเป็นกิจกรรมหนึ่งในการวางแผนการผลิต โดยการจัดตาราง (Scheduling) เป็นกระบวนการในการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับกิจกรรมหรือจัดเรียงกิจกรรม เพื่อทำให้กิจกรรมเหล่านั้นเป็นไปตามข้อกำหนด เงื่อนไขบังคับ หรือวัตถุประสงค์ที่กำหนดให้ (Penedo, 2002) การจัดตั้งวิธีการจัดลำดับงาน (Scheduling) เกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการที่จะจัดลำดับงานหนึ่งงานใดให้กับหน่วยงานต่าง ๆ ในระยะเวลาที่ต้องเริ่มต้นและสิ้นสุดตามที่กำหนดไว้

การจัดตารางการผลิตมีความหมายทั่วไป คือ การจัดเตรียมตารางเวลา (Time table) ของขั้นตอนของงาน (Activities) ที่เกี่ยวข้องในการทำงานอย่างหนึ่งอย่างใดให้สำเร็จลุล่วงไป งานที่กล่าวถึงในที่นี้มีความหมายรวมถึงงานทุกชนิดที่ต้องการวางแผนหรือกำหนดงานขั้นตอนในงานนั้น ๆ ให้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ (Penedo, 2002)

เฮนรี แกนท์ (Henry Gantt) เป็นผู้พัฒนาแผนภูมิแกนท์ขึ้นมา แผนภูมิแกนท์ดังแสดงในภาพที่ 2-2 แสดงถึงกิจกรรมที่เกิดขึ้นซึ่งอยู่ในรูปของเส้นแถบตามเวลาที่แน่นอน หลักการประยุกต์แผนภูมิแกนท์สำหรับแสดงแผนการผลิตนั้นจะเป็นแบบง่าย ๆ กล่าวคือ กิจกรรมต่าง ๆ จะถูกกำหนดให้มีการดำเนินการเป็นไปตามแผนการผลิตที่ต้องการ และถ้ามีความเบี่ยงเบนเกิดขึ้นในเวลาใด ๆ ก็จะมีการจดบันทึกและแสดงสภาพที่เกิดขึ้น เพื่อจะได้หาทางแก้ไข เช่น เรื่องการกำหนดงาน สาเหตุของการล่าช้า ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงและจัดแจกภาระงานในการผลิต การประยุกต์แผนภูมิแกนท์ให้อยู่ในรูปของตารางการผลิต (ชุมพล ศฤงคารศิริ, 2536) สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. โดยการรวมเวลาของงานต่าง ๆ ทั้งหมดเข้าด้วยกันไว้ในแต่ละแผนกหรือศูนย์งาน (Perpetual scheduling) หรือแม้กระทั่งเครื่องจักรหรือสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ หลังจากนั้นจึงทำการทบทวนสถานะของงานทุก ๆ งาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะทำการตรวจสอบดูทุก ๆ สัปดาห์ การสรุปผลในแต่ละสัปดาห์จะได้ข้อมูลในรูปของกราฟ (Graphic record) เมื่อนำภาระของกิจกรรมต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกันและถ้าแสดงให้เห็นถึงภาระงานที่แตกต่างกัน เราก็อาจจะนำทรัพยากรในแผนกที่มีภาระงานน้อยไปช่วยในแผนกที่มีภาระงานมากก็ได้



ภาพที่ 2-2 แผนภูมิแกนต์

1. โดยพิจารณาเฉพาะงานที่ต้องทำให้เสร็จในแต่ละศูนย์งาน ภายในแต่ละช่วงเวลา (Periodic scheduling)

2. โดยการจัดลำดับขั้นตอนการทำงาน (Order scheduling)

คำศัพท์ที่ใช้ในการจัดตารางการผลิต

คำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายข้อมูลเชิงปริมาณที่เกี่ยวข้องกับงาน ตามรายละเอียดต่อไปนี้

1. เวลาในการดำเนินการ (Processing time: P_i) คือ เวลาที่คาดว่าจะใช้ในการดำเนินการของงาน i ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสำเร็จ เวลาที่คาดการณ์นี้ควรรวมเวลาในการเตรียมก่อนการดำเนินการด้วย

2. กำหนดส่ง (Due date: D_i) คือ กำหนดที่งาน i ต้องส่งให้กับลูกค้าถ้าไม่สามารถส่งได้ตามกำหนดจะนับเป็นการส่งงานไม่ทัน และอาจต้องจ่ายค่าปรับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างองค์กรและลูกค้า

3. เวลางานเสร็จ (Completion time: c_i) คือ เวลาที่งาน i เสร็จสมบรูณ์พร้อมส่งมอบ

4. จำนวนหน่วยเวลาที่เบี่ยงเบนไปจากกำหนดส่ง (Lateness: l_i) คือ ความเบี่ยงเบนระหว่างกำหนดส่งงาน กับเวลาที่งานเสร็จสมบรูณ์ ดังนั้น $l_i = c_i - D_i$ และมีค่าเป็นบวกถ้างานเสร็จไม่ทันกำหนด ในทางตรงกันข้าม ค่านี้จะเป็นลบถ้าเสร็จก่อนกำหนดส่งงาน

5. จำนวนหน่วยเวลาที่งานส่งไม่ทัน (Tardiness: t_i) คือ การวัดจำนวนหน่วยเวลาที่เวลาที่งานเสร็จสมบูรณ์ล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบ (l_i เป็นบวก)

6. เวลาเหลือ (Slack: SL_i) เป็นการวัดเวลาที่เหลือก่อนกำหนดส่งงาน เพื่อตรวจสอบว่าเพียงพอต่อการดำเนินการให้ทันเวลาหรือไม่ โดย $SL_i = D_i - P_i$ ถ้าเป็นบวก แสดงว่ายังมีเวลาเพียงพอที่จะดำเนินการผลิตให้ทันตามกำหนดส่ง ถ้าเป็นลบ แสงว่างาน i จะไม่สามารถเสร็จตามกำหนด

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

8. เวลาปิดงานของระบบ (Makespan: c_{max}) หมายถึง เวลาที่ระบบทำงานชิ้นสุดท้ายสิ้นสุด ซึ่งการจัดตารางการผลิตที่มีเวลาปิดน้อยที่สุดจะส่งผลให้เกิดการผลิตที่มีปริมาณมากที่สุด

รูปแบบการผลิต

รูปแบบการผลิตโดยทั่วไปตามทฤษฎีการจัดตารางการผลิตที่เป็นการจัดลำดับของงานในการใช้ทรัพยากรที่เป็นเครื่องจักรและเวลาที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับงาน เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพ และเกิดผลิตผลสูงสุด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

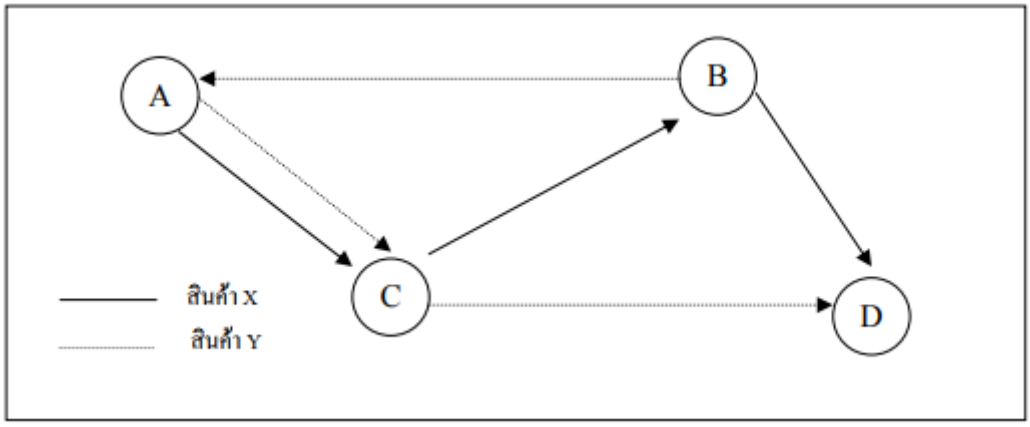
1. ระบบการผลิตแบบเครื่องจักรเดี่ยว (Single machine) เป็นระบบการผลิตที่กลุ่มงานที่จะทำการจัดตารางการผลิตใช้เครื่องจักรเครื่องเดียว งานแต่ละงานจะถูกผลิตเพียงครั้งเดียว แต่ละงานมีเวลาในการผลิต และกำหนดเวลาส่งมอบที่แตกต่างกันไป

2. ระบบการผลิตแบบเครื่องจักรขนาน (Parallel machine) ระบบนี้ประกอบด้วยเครื่องจักร m เครื่องที่ผลิตงานได้เหมือนกัน มีการทำงานแบบขนาน ระบบผลิตจำนวนมากมีการทำงานแบบนี้ เช่น ในโรงงานแห่งหนึ่งมีสายการผลิตที่ประกอบด้วยหลายสถานีงาน แต่ละสถานีงานประกอบด้วยเครื่องจักรที่ขนานกันอยู่หลายเครื่อง เมื่องาน j มาถึงยังแต่ละสถานีงานที่มีเครื่องจักรขนานกัน งาน j สามารถที่จะเลือกทำได้บนเครื่องจักรเครื่องใดก็ได้ใน m เครื่อง

3. ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow shop) ระบบผลิตแบบไหลเลื่อนจะประกอบด้วย m เครื่องจักรที่แตกต่างกัน แต่ละงานจะประกอบด้วย m การดำเนินงาน ซึ่งต้องทำบน m เครื่องจักรที่แตกต่างกัน การไหลของงานในระบบผลิตแบบไหลเลื่อนจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันเท่านั้น ซึ่งหมายความว่า เราสามารถกำหนดหมายเลขให้กับเครื่องจักรโดยที่ ถ้าการดำเนินที่ j อยู่ก่อนหน้าการดำเนินงานที่ k แล้ว หมายเลขของเครื่องจักรที่จะใช้ในการดำเนินงานที่ j จะต้องน้อยกว่าหมายเลขของเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการดำเนินงานที่ k การกำหนดให้เครื่องจักรในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน ถูกกำหนดหมายเลขเป็น 1, 2, ..., m และการดำเนินงานของงาน i จะถูกกำหนดหมายเลขเป็น (i, 1), (i, 2), ..., (i, m) ตามลำดับ ดังนั้นเราสามารถพิจารณาให้แต่ละงานเสมือนว่าประกอบด้วย m การดำเนินงาน

4. ระบบการผลิตแบบตามงาน (Job shop) เป็นระบบการผลิตที่ใช้กันอย่างกว้างขวางระบบหนึ่งซึ่งมีเครื่องจักรที่ทำงานแตกต่างกัน และแต่ละงานต้องการการผลิตจากเครื่องจักรบางเครื่องตามลำดับความต้องการของงานนั้น ๆ แบบจำลองที่ง่ายที่สุดของระบบการผลิตแบบ

ตามงาน คือ การที่งานแต่ละงานสามารถที่จะทำการดำเนินงานบนเครื่องจักรใด ๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นทางงานของตนได้เพียงแค่หนึ่งครั้งเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น สินค้า X และสินค้า Y มีขั้นตอนการผลิตจากเครื่องจักรทั้งหมด 4 เครื่อง เหมือนกัน แต่การผลิตสินค้า X ต้องเริ่มผลิตจากเครื่องจักร A, C, B และ D ตามลำดับ ซึ่งต่างจากสินค้า Y ที่ต้องเริ่มผลิตจากเครื่องจักร A, C, D และ B ตามลำดับ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ระบบการผลิตแบบตามงาน (Job shop)

ลักษณะสมบัติและข้อจำกัดของกระบวนการ

ปารเมศ ชุติมา (2546) อธิบายว่า ระบบผลิตอาจจะมีลักษณะสมบัติเฉพาะตัวไม่เหมือนกับระบบอื่นบางประการได้ เราสามารถนำเอาลักษณะสมบัติและข้อจำกัดที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของระบบเหล่านี้มาพิจารณา เพื่อใช้เป็นสมมติฐานในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจัดตารางต่อไปได้ ซึ่งมีต่อไปนี้

1. เวลาตั้งเครื่องจักรขึ้นกับลำดับงานก่อนหน้า (Sequence dependent setup time)
2. ข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลัง (Precedence constraint)
3. ข้อจำกัดด้านเส้นทางงาน (Routing constraint)
4. ข้อจำกัดด้านเครื่องจักรที่เลือกได้ (Machine-Eligibility constraint)
5. ข้อจำกัดด้านเครื่องมือและทรัพยากร (Tooling and Resource constraint)
6. ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ (Material handing constraint)
7. ข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บและเวลาคอย (Storage space and Waiting time constraint)
8. ข้อจำกัดด้านการจัดตารางกำลังพล (Personal scheduling constraint)

9. การแทรกงาน (Preemption)
10. การแยกงาน (Job splitting)
11. การผลิตซ้อนขั้นตอน (Lap Phasing)
12. การเสีย (Breakdown)
13. การสลับตำแหน่ง (Permutation)
14. การบล็อก (Blocking)
15. การไม่คอย (No wait)
16. การเวียนซ้ำ (Recirculation)

ตัววัดสมรรถนะและวัตถุประสงค์ของตารางการผลิต

ปารเมศ ชุติมา (2546) ได้แบ่งสมรรถนะของตารางการผลิตออกเป็น 3 ด้าน คือ ด้านปริมาณผลผลิต ด้านการส่งมอบ และด้านค่าใช้จ่าย ในแต่ละด้านจะแสดงวัตถุประสงค์ของการจัดตารางการผลิตแยกย่อยอีกได้ ดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์ด้านปริมาณผลผลิต
   1.1 เวลาไหลเฉลี่ยของงานต่ำที่สุด (Minimizing mean flow time)
   1.2 เวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุด (Minimizing makespan)
2. วัตถุประสงค์ด้านกำหนดส่งมอบ
   2.1 เวลาสายสูงสุดต่ำที่สุด (Minimizing maximum lateness)
   2.2 เวลาล่าช้าโดยรวมต่ำที่สุด (Minimizing total tardiness)
   2.3 จำนวนงานสายโดยรวมต่ำที่สุด (Minimizing total number of tardy jobs)
3. วัตถุประสงค์ด้านค่าใช้จ่าย
   3.1 เวลาเสร็จงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนักต่ำที่สุด (Minimizing total weighted completion time)
   3.2 เวลาเสร็จงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนักและหักลดต่ำที่สุด (Minimizing discounted total weighted completion time)
   3.3 ค่าใช้จ่ายด้านปรับตั้งเครื่องต่ำที่สุด (Minimizing setup cost)
   3.4 ค่าใช้จ่ายด้านพัสดุคงคลังของงานระหว่างกระบวนการต่ำที่สุด (Minimizing work in process inventory cost)
   3.5 ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากรต่ำที่สุด (Minimizing personnel cost)

วิธีการจัดตารางการผลิต

เทคนิคหรือวิธีการที่สามารถนำมาใช้ในการจัดตารางการผลิต เพื่อให้ได้ตารางการผลิตที่มีสมรรถนะตามที่ต้องการที่ดีที่สุดนั้นออกเป็น 3 ประเภท คือ

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

2. ขั้นตอนวิธีสร้างเสริม (Constructive algorithm) เป็นแนวทางในการสร้างตารางการผลิตจากการเพิ่มงานหรือการดำเนินงานในขั้นตอนการผลิตของงานนั้นครั้งละ 1 การดำเนินงานเข้าไปในตารางการผลิตบางส่วนที่ยังสร้างไม่เสร็จ จนกระทั่งเพิ่มการดำเนินงานครบทุกงานที่ต้องการจัดตารางการผลิต แนวทางการจัดตารางการผลิตวิธีนี้จัดเป็นวิธีการฮิวริสติกอย่างหนึ่ง เช่น การใช้กฎหรือกลุ่มของกฎพื้นฐานที่ง่ายในการสร้างตารางการผลิต เช่น รูปแบบการผลิตเครื่องจักรเดี่ยว กฎ SPT จะทำให้เวลาไหลเฉลี่ยของงานมีค่าต่ำที่สุด กฎ EDD จะทำให้เวลาสายสูงสุดของงานมีค่าต่ำที่สุด เป็นต้น แต่ทว่ามีปัญหาการจัดตารางจำนวนน้อยมากที่ใช้วิธีนี้ในการจัดตารางการผลิตที่ทำให้ได้สมรรถนะดีที่สุด

3. การแจงนับโดยนัย (Implicit enumeration) เป็นแนวทางในการหาคำตอบที่ใช้ขั้นตอนวิธีที่ชาญฉลาดในการตัดทอนคำตอบ หรือคำตอบแบบบางส่วน (Partial solution) ออกจากการพิจารณาเนื่องจากว่า คำตอบดังกล่าวนี้ไม่มีโอกาสที่จะนำไปสู่คำตอบสุดท้ายที่ดีที่สุดได้ โดยมากแล้วแนวทางนี้จะช่วยลดจำนวนของการค้นหาคำตอบลง จากจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดอย่างมาก วิธีการแจงนับโดยนัยอาจเป็นวิธีที่สามารถรับประกันว่าได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เช่น ไดนามิกโปรแกรม (Dynamic programming) หรือการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and Bound) เป็นต้น หรือเป็นวิธีที่ไม่สามารถรับประกันผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้ เช่น เมตาฮิวริสติกส์ต่าง ๆ เป็นต้น

วิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบตามงาน

ปารเมศ ชุติมา (2546) ระบบผลิตแบบตามงานเป็นระบบผลิตที่ซับซ้อนที่สุด มีฮิวริสติกจำนวนมากที่สามารถนำมาใช้จัดตารางระบบผลิตดังกล่าวได้ กฎหนึ่งที่ได้รับความนิยมและง่ายในการประยุกต์ คือ SPT (Shortest processing time) ซึ่งพบว่า SPT มีสมรรถนะที่ดีในการหาค่าเวลาปิดงานที่น้อยที่สุดสำหรับระบบผลิตแบบตามงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบผลิตมีภาระงานสูง

แต่กฎเดียวกันนี้จะทำให้งานที่มีเวลาการดำเนินงานยาวต้องอยู่ในระบบเป็นเวลานานมาก ซึ่งอาจจะทำให้งานประเภทดังกล่าวเกิดการล่าช้าเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกำหนดส่งมอบมีความกระชั้น

วิธีการใช้ข่ายงานมาช่วยในการแก้ปัญหาเป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่ว่ากับระบบที่มีภาระงานสมดุลหรือไม่สมดุลก็ตาม ฮิวริสติก MODSB (Modified shifted bottleneck) เป็นวิธีการที่มีสมรรถนะสูงในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเป็นกฎที่พยายามสร้างความสมดุลระหว่าง SPT ซึ่งจะทำให้งานที่มีเวลาดำเนินการมีการล่าช้าเป็นเวลานาน กับกฎที่มีประสิทธิภาพดีเกี่ยวกับการลดความล่าช้าของงาน ซึ่งจะทำให้ลำดับความสำคัญกับงานที่มีเวลาดำเนินการยาว ดังนั้นจึงทำให้งานจำนวนมากที่มีเวลาดำเนินการสั้นเกิดการล่าช้าขึ้น CEXSPT จะแบ่งงานออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยงานที่ล่าช้า หรืองานที่เลยกำหนดส่งมอบไปแล้ว

กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยงานที่มีการดำเนินการที่อยู่หลังจากกำหนดส่งมอบ

กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยงานที่มีการดำเนินการอยู่ก่อนกำหนดส่งมอบ

ฮิวริสติก CEXSPT จะนำมาใช้ในกรณีที่ทุกงานมีน้ำหนักเท่ากันและเฉพาะความล่าช้าเท่านั้นที่นำมาพิจารณา ในขณะที่ MODSB สามารถดัดแปลงเพื่อแสดงถึงค่าปรับที่แตกต่างกันของแต่ละงานได้ ขั้นตอนทั้งหมดในฮิวริสติกยังคงเหมือนเดิม ยกเว้น 2 ประการ ด้วยกันคือ

1. ในการแก้ปัญหาเครื่องจักรเดี่ยวเพื่อหาลำดับงานที่ค่าปรับต่ำสุดนั้น ค่าปรับที่เกิดจากการส่งงานก่อนและล่าช้ากว่ากำหนดจะถูกนำมาใช้

2. การคำนวณเวลาส่งมอบสำหรับแต่ละการดำเนินการ กำหนดให้ d_i หมายถึง กำหนดส่ง มอบของการดำเนินการ i ซึ่งค่านี้จะคำนวณเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นเท่านั้น

ฮิวริสติก MODSB นั้นยอมให้มีความแตกต่างระหว่างค่าปรับสำหรับแต่ละงาน และยังทำให้ค่าปรับทั้งหมดซึ่งเกิดจากการส่งงานก่อนและหลังจากกำหนดส่งมอบมีค่าน้อยที่สุดได้อีกด้วย

แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical programming model)

แบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical programming model) เป็นวิธีการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งประกอบด้วย Linear programming, Integer programming เป็นต้น โปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming model) เป็นเทคนิคของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเทคนิคนี้อาจใช้สำหรับการบริหารงานด้านต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์เชิงปริมาณและการวิจัยเชิงปฏิบัติการ จึงมีการใช้วิธีทางเลือกที่ดีที่สุด

ด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถใช้งานได้ง่ายบนโปรแกรมกระดาษคำนวณทั่วไป (Spreadsheet) หรือการเขียนกราฟเพื่อหาผลลัพธ์จากสมการ คุณลักษณะของการโปรแกรมเชิงเส้น คือ สามารถจัดสรรทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอย่างจำกัดได้อย่างเหมาะสม และตรงตามเป้าหมายมากที่สุด ต้องมีการกำหนดแหล่งทรัพยากรเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตการจัดสรรทรัพยากร ประกอบด้วย เงื่อนไขและข้อจำกัด (Constraint) การกำหนดวัตถุประสงค์ หรือเป้าหมายของการแก้ปัญหา สามารถเขียนเป็นสมการวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งต้องมีการกำหนดค่ามากสุด (Maximized) หรือน้อยสุด (Minimized) ในการแก้ปัญหา เช่น สมการวัตถุประสงค์สำหรับรายจ่ายควรกำหนดให้สมการมีค่าน้อยสุด โปรแกรมจำนวนเต็ม (Integer programming) เป็นส่วนขยายของโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) ซึ่งต้องใช้จำนวนเต็มในการแก้ปัญหา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. Pure integer programming เป็นปัญหาที่ตัวแปรตัดสินใจทั้งหมดเป็นจำนวนเต็ม
2. Mixed-integer programming เป็นปัญหาที่มีตัวแปรตัดสินใจบางตัวแต่ไม่ใช่ทั้งหมดเป็นจำนวนเต็ม
3. Binary integer programming เป็นปัญหาที่ตัวแปรตัดสินใจทั้งหมดเป็นจำนวนเต็ม 0 และ 1

การสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์เป็นการจัดรูปปัญหาจริงให้อยู่ในรูปแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ที่ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variable) วัตถุประสงค์ (Objective) และข้อจำกัดหรือเงื่อนไขบังคับ (Constraint) หากผู้ตัดสินใจต้องการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจำเป็นต้องใช้รูปแบบหรือสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงลักษณะทั้งสามดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตัวแปรการตัดสินใจ คือ สิ่งที่ต้องการหาผลลัพธ์ จากปัญหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในด้านต่าง ๆ เช่น การตัดสินใจ หาปริมาณสินค้าที่จะต้องขนส่ง เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ จะต้องใช้ สัญลักษณ์พยัญชนะภาษาอังกฤษใด ๆ แสดงแทนสิ่งที่ต้องการหาผลลัพธ์ดังกล่าว และจะเรียกสัญลักษณ์นั้นว่า ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variable) เช่น ใช้สัญลักษณ์ $x_1, x_2, \dots, x_k$ เป็นตัวแปรแทนการตัดสินใจปริมาณสินค้าที่ต้องการผลิต k ชนิด เป็นต้น

วัตถุประสงค์ (Objective) ของการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ทำให้บรรลุผลลัพธ์การตัดสินใจมีค่าต่ำสุดหรือสูงสุด เช่น การตัดสินใจหาปริมาณการผลิตสินค้าที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้

ผลกำไรสูงที่สุด หรือการตัดสินใจหาปริมาณสินค้าที่จะต้องขนส่งเพื่อให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด เป็นต้น เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหา วัตถุประสงค์ของปัญหาไม่ว่าจะมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็ตาม จะเกิดจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรการตัดสินใจที่จะนำมาบวก ลบ คูณ หรือหาร เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นั้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในรูปของ “ฟังก์ชันวัตถุประสงค์” ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

Maximize (หรือ Minimize): $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ หรือ

Maximize (หรือ Minimize) Z = $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

ข้อจำกัด (Constraint) เป็นสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับให้ผู้ตัดสินใจจะต้องเลือกทางเลือกที่อยู่ภายในขอบเขตข้อจำกัดในแต่ละด้าน เช่น ข้อจำกัดในด้านแรงงาน จำนวน ชั่วโมงในการผลิตที่ว่างอยู่ กำลังการผลิต เป็นต้น เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ปัญหาแบบจำลองนั้น จะต้องแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการตัดสินใจที่อยู่ในรูปฟังก์ชันให้อยู่ภายใต้ข้อจำกัด โดยมีรูปแบบทั่วไป 3 ลักษณะ คือ

น้อยกว่าหรือเท่ากับข้อจำกัด: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq$ b

มากกว่าหรือเท่ากับข้อจำกัด: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq$ b

เท่ากับข้อจำกัด: $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ = b

จากรูปแบบข้างต้นจะเห็นว่ามีการนำฟังก์ชันของตัวแปรการตัดสินใจ $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ มาเปรียบเทียบกับข้อจำกัด (ซึ่งแทนด้วย *b*) 3 กรณี ได้แก่ $\leq$, $\geq$ และ = ซึ่งหมายความว่า ฟังก์ชันข้อจำกัดอาจจะอยู่ในรูปแบบของทั้งสมการและอสมการก็ได้

ตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สามารถอธิบายในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

MAX (หรือ MIN): $f_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$

ภายใต้ข้อจำกัด: $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1$

$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_k$

$f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m$

รูปแบบเหล่านี้แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำให้เกิดค่ามากที่สุด (หรือน้อยที่สุด) รวมไปถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ของปัญหา การเพิ่ม *f()* และ *b* ในแต่ละสมการจะอธิบายวัตถุประสงค์และข้อจำกัด ได้แตกต่างกัน เป้าหมายในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ การหาค่าของตัวแปรการตัดสินใจที่มีค่ามาก ที่สุด (หรือน้อยที่สุด) ภายใต้ข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

หลังจากได้ศึกษาเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเทคนิคกำหนดการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical programming) เพื่อนำมาใช้

ในการแก้ปัญหา โดยมุ่งศึกษาที่กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming, ILP) และกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer linear programming, MILP)

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มและกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเป็นแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ที่มีฟังก์ชั่นความสัมพันธ์ของตัวแปรตัดสินใจในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยตัวแปรตัดสินใจบางตัวเป็นแบบจำนวนเต็ม และบางตัวเป็นแบบจำนวนจริง แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมมักใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนที่ต้องมีการตัดสินใจเชิงปริมาณผสมในรูปของจำนวนเต็มผสมกับจำนวนจริง เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินรถในการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้ารายต่าง ๆ ปัญหาการจัดตารางการผลิต ปัญหากำหนดการเชิงเส้นที่ต้องใช้ตัวแปรแบบจำนวนเต็มเข้ามาช่วยในการกำหนดเงื่อนไขบังคับ เป็นต้น

รูปแบบทั่วไปของปัญหากำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มหรือจำนวนเต็มผสม ประกอบไปด้วย ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับ ที่ลักษณะเป็นฟังก์ชั่นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ขณะที่ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวเป็นจำนวนเต็ม (หรือบางตัวเป็นจำนวนจริง) แสดงได้ดังนี้

$$\text{Max/Min} c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n + d_1y_1 + d_2y_2 + d_ny_n$$

Subject to

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \ (\leq,\geq,=)\ b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n \ (\leq,\geq,=)\ b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n \ (\leq,\geq,=)\ b_m$$

$$f_{11}y_1 + f_{12}y_2 + \ldots + f_{1n}y_n \ (\leq,\geq,=)\ g_1$$

$$f_{21}y_1 + f_{22}y_2 + \ldots + f_{2n}y_n \ (\leq,\geq,=)\ g_2$$

.....

$$f_{m1}y_1 + f_{m2}y_2 + \ldots + f_{mn}y_n \ (\leq,\geq,=)\ g_m$$

$x_j \geq 0$ สำหรับทุกค่า j

y_i เป็นจำนวนเต็มสำหรับทุกค่า j

จากสมการด้านบน ตัวแปร a, b, c, d, f และ g เป็นพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ ตัวแปรตัดสินใจ x_i เป็นตัวแปรที่เป็นจำนวนจริง ตัวแปรตัดสินใจ y_i เป็นตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม และสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับอสมการเงื่อนไขทั้งหมดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

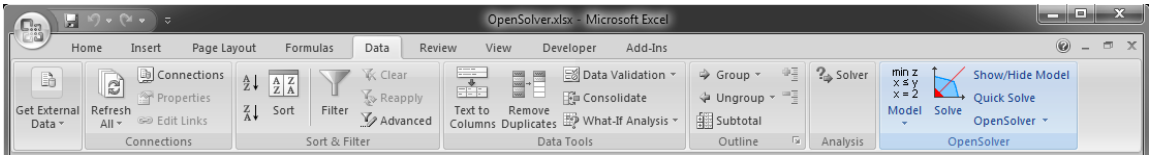
การหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยซอฟต์แวร์ OpenSolver

ซอฟต์แวร์สำหรับจำลองตัวแบบลงในคอมพิวเตอร์และหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับภาคธุรกิจ (Commercial software) เช่น AMPL, GAMS, MPL, LINGO/LINDO, CPLEX, Gurobi เป็นต้น มีราคาแพงมากกว่าการใช้ในงานด้านวิชาการและวิจัยหลายเท่าตัว และซอฟต์แวร์ประเภทติดตั้งเพิ่ม (Add-in) ในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลที่ไม่ต้องเขียนภาษาจำลองตัวแบบ เช่น Excel Solver, Premium Solver, AIMMS เป็นต้น ก็เป็นซอฟต์แวร์ที่มีการจำกัดจำนวนตัวแปรตัดสินใจและเงื่อนไขบังคับ หากต้องการใช้งานสำหรับปัญหาที่ไม่จำกัดจำนวนตัวแปรตัดสินใจและขอบข่ายในภาคธุรกิจ จะเป็นซอฟต์แวร์ที่มีราคาแพงมากเช่นกัน ทำให้มีผู้พัฒนาโอเพ่นซอร์สซอฟต์แวร์ สำหรับหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดที่มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้ง่าย โดยการออกแบบให้ทำงานได้บนโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลที่ในปัจจุบันมีสองโปรแกรมที่นิยมใช้และถูกพัฒนาประสิทธิภาพการคำนวณอย่างต่อเนื่อง คือ โปรแกรม OpenSolver (Mason, 2013) เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 และพัฒนาครั้งล่าสุดเดือนมีนาคม พ.ศ.2560 และโปรแกรม Solver Studio (Mason, 2013) เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 และพัฒนาครั้งล่าสุดเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2559

โครงงานนี้ใช้โปรแกรม OpenSolver ที่เป็นโอเพ่นซอร์สซอฟต์แวร์ (Open source software) ซึ่งเขียนโปรแกรมให้สามารถติดตั้งเพิ่มเติมในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Excel Add-in) ทำให้ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลและสูตรความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ในแผ่นงาน (Work sheet) แล้วเรียกใช้งาน OpenSolver เพื่อหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม โปรแกรม OpenSolver มีความสามารถในการให้หาผลลัพธ์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ที่มีไม่จำกัดจำนวนตัวแปรในการตัดสินใจและจำนวนขอบข่าย (Unlimited number of decision variables and constraints) ของกำหนดการเชิงเส้น (Linear programming) และกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming) ซึ่งรวมถึงกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมด้วย ภาษาที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ (Solver engine language) ถูกพัฒนาโดย COIN-OR (The computational infrastructure for operations research) คือ CBC solver (COIN-OR Branch and Cut solver) ที่มีความสามารถในการหาผลลัพธ์ได้รวดเร็วกว่าตัวหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่ติดมากับโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Solver built-in) ที่จำกัดจำนวนตัวแปรตัดสินใจและจำนวนขอบข่าย โปรแกรม OpenSolver ดาวน์โหลดได้จาก http://www.opensolver.org

การใช้งานโปรแกรม OpenSolver ทำได้โดยสร้างแผ่นงานที่มีการบันทึกข้อมูลนำเข้าและพารามิเตอร์ของปัญหาที่จำลองในกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์โดยสร้างสูตรความสัมพันธ์กับเซลล์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ให้เป็นตัวแปรตัดสินใจ โปรแกรม OpenSolver ที่พัฒนาครั้งล่าสุดยอมให้

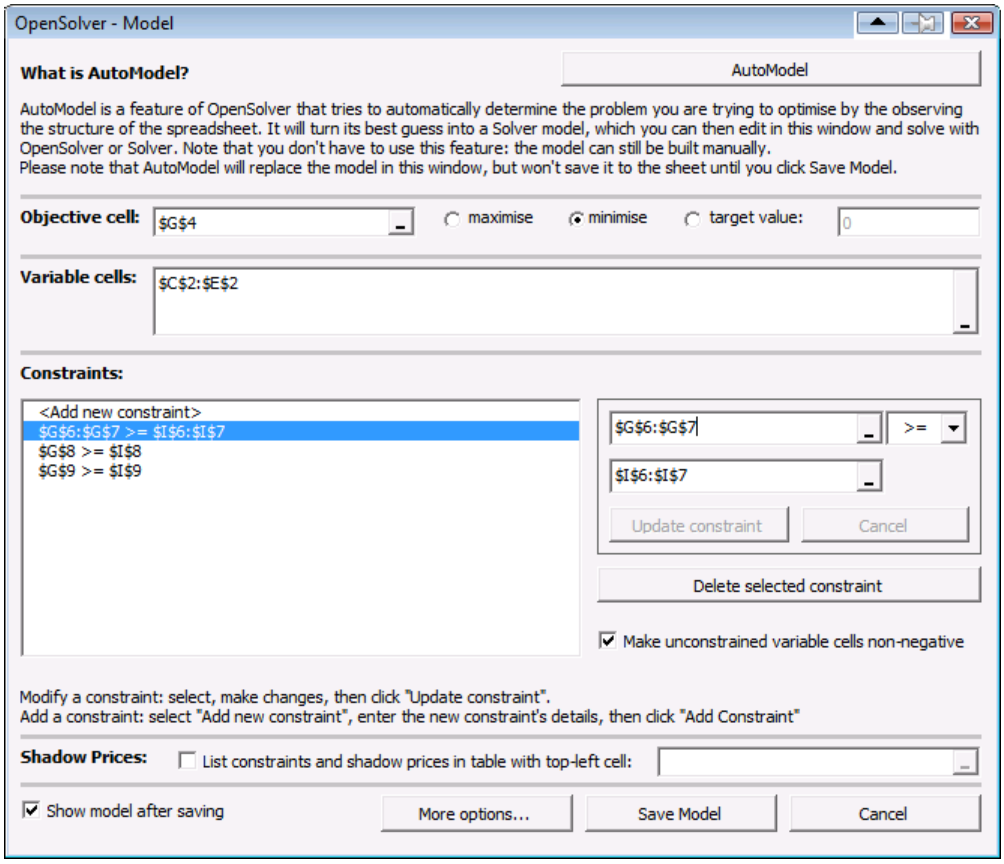
เซลล์ของตัวแปรตัดสินใจไม่จำเป็นต้องอยู่ติดกัน แต่ยังคงจำกัดให้จำนวนกลุ่มเซลล์ของตัวแปรตัดสินใจต้องมีจำนวนไม่มากเกินไป เมื่อออกแบบตำแหน่งเซลล์วัตถุประสงค์ (Objective cell) และเซลล์ค่าคำนวณของสมการหรืออสมการขอบข่ายแล้ว ผู้ใช้งานสามารถเรียกใช้โปรแกรม OpenSolver จากแถบเครื่องมือ “ข้อมูล (data)” ที่ปุ่ม “Model” ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การเรียกใช้งาน OpenSolver

หน้าต่าง “OpenSolver-Model” ปรากฏขึ้น ดังภาพที่ 2-4 เพื่อให้ผู้ใช้งานบันทึกเซลล์วัตถุประสงค์ลงในช่อง Objective cell แล้วเลือกวัตถุประสงค์การหาผลลัพธ์ตาม LP, ILP, หรือ MILP ที่สร้างไว้ว่าต้องการหาค่าสูงที่สุด (Maximise) ค่าต่ำที่สุด (Minimise) หรือค่าเป้าหมาย (Target) จากนั้นกำหนดตำแหน่งเซลล์ของตัวแปรตัดสินใจในช่อง Variable cells แล้วเพิ่มสมการหรืออสมการขอบข่าย รวมถึงลักษณะของตัวแปรตัดสินใจ (Binary, Integer) ลงในส่วนการเพิ่มขอบข่ายใหม่ เมื่อบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ครบแล้วให้กดปุ่ม “บันทึกตัวแบบ (Save model)”

โปรแกรม OpenSolver สามารถตรวจสอบตัวแบบที่สร้างและบันทึกแล้วตามที่ผู้ใช้ต้องการ ด้วยเครื่องมือ “Show/ Hide Model” บนแถบเครื่องมือในภาพที่ 2-4 เมื่อสั่งให้โปรแกรมแสดงตัวแบบ แผ่นงานที่สร้างไว้จะแสดงผลที่เซลล์วัตถุประสงค์ว่าต้องการหาผลลัพธ์เป็นค่าสูงที่สุด (Maximise) ค่าต่ำที่สุด (Minimise) หรือค่าเป้าหมาย (Target) ที่เซลล์ตัวแปรตัดสินใจจะแสดงผล เช่น ≥ 0, Binary (b), Integer (i) เป็นต้น และที่เซลล์การคำนวณสมการหรืออสมการขอบข่ายในแผ่นจะแสดงความสัมพันธ์ “ $=$ ”, “ $\geq$ ”, “ $\leq$ ” ตามที่กำหนดในตัวแบบโดยอ่านผลความสัมพันธ์จากซ้ายไปขวา หรือจากบนลงล่าง และเมื่อต้องการให้โปรแกรมคำนวณหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม ให้กดปุ่ม “Solve” บนแถบเครื่องมือในภาพที่ 2-4 รายละเอียดการใช้งานเพิ่มเติมศึกษาได้จาก www.opensolver.org



ภาพที่ 2-5 หน้าต่าง OpenSolver-Model และตัวอย่างการบันทึกตัวแบบ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kowmanee, 2014 ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดความสูญเปล่าของกระบวนการผลิต อันเนื่องมาจากการขาดการวางแผนที่เหมาะสมในการจัดตารางการผลิต โดยมุ่งเน้นการนำเอาวิธีซื้อก่อน-ใช้ก่อน (First in-First out method) มาใช้เป็นแนวทางจัดตารางการผลิตให้กับบริษัทที่ใช้เป็นกรณีศึกษา อีกทั้งยังใช้วิธีการฮิวริสติกเข้ามาช่วยในการจัดตารางการผลิต ได้แก่ การจัดตารางการผลิตโดยพิจารณาตาม เวลาการผลิตน้อยที่สุดเข้าก่อน (SPT) การจัดตารางการผลิตโดยพิจารณาที่เวลาการผลิตมากที่สุดเข้าก่อน (LPT) การจัดงานตามเวลาที่เหลือน้อยที่สุดก่อน (SRT) การจัดงานตามเวลาที่เหลือมากที่สุดก่อน (LRT) จากนั้นนำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาความสูญเปล่าของเครื่องจักร โดยจัดทำออกมาในรูปแบบของเทคนิคการจัดตารางเวลาการผลิตเพื่อหาวิธีการจัดตารางการผลิตที่ดีที่สุด และหลังจากการเปรียบเทียบได้ข้อสรุป คือ วิธี SPT เป็นวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากที่สุดจาก 10% (EDD) เพิ่มเป็น 35% และสามารถลดจำนวนงานล่าช้าจาก 17 งานเหลือ 3 งาน

ยอดดวงใจ นาคปฐม, 2555 ได้ทำการวิจัยและหาวิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแบบตามคำสั่งในโรงงานย้อมผ้า โดยวิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristics) เพื่อลดจำนวนานล่าช้า และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร โดยเปรียบเทียบวิธี FCFS, EDD, SPT, LPT, MST, EDD+LPT และ EDD+MST เพื่อหาจำนวนงานล่าช้าน้อยที่สุด พบว่า วิธี EDD+ LPT ได้ลดจำนวนงานล่าช้าจาก 166 งาน เหลือ 78 งาน หรือลดลง 53.01% และลดจำนวนครั้งในการปรับตั้งเครื่องจักรจาก 177 ครั้ง เหลือ 198 ครั้ง หรือลดลง 16.24%

ปารเมศ ชุติมา และวิชิต ศรีอ่อน, 2549 ได้ทำการวิจัยเพื่อจัดหาระบบการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสมในงานขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงตัวถังเครื่องปรับอากาศ โดยแบ่งการจัดตารางการผลิตออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การจัดลำดับงานจากใบสั่งผลิตใหม่ และอีกส่วนหนึ่งคือ การจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักร โดยเปรียบเทียบวิธีดังต่อไปนี้ EDD, SPT, LPT, SPT P1 (เลือกงานที่ใช้เวลาผลิตในขั้นตอนที่ 1 ที่สั้นที่สุดมาทำก่อน) LPT P2 (เลือกงานที่ใช้เวลาผลิตในขั้นตอนที่ 1 ที่นานที่สุดทำก่อน) และมีการจัดอันดับในด้านเวลาไหลของงานในระบบ (Flowtime) เวลาปิดงานของระบบ (Makespan) และจำนวนงานสาย (Number of tardy jobs) ผลการจัดอันดับดังภาพที่ 2-6

Measure of Performance	Dispatching Rule				
	EDD	SPT	SPT P1	LPT	LPT P1
Flow Time	3	2	1	5	4
Makespan	3	4	1	5	2
Number of Tardy Jobs	3	2	1	5	4
Total Score	9	8	3	15	10

ภาพที่ 2-6 ผลอันดับคะแนนการจัดลำดับงานด้วยกฎต่าง ๆ

นอกจากการพิจารณาจากผลอันดับคะแนนแล้วยังต้องพิจารณาจากค่าจริงของตัววัดประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ร่วมด้วย จากภาพที่ 2-6 วิธี EDD และ SPT มีคะแนนต่างกัน 1 คะแนน แต่จำนวนงานช้าที่เกิดขึ้นจริงนั้น แตกต่างกันถึง 4 งาน นอกจากนี้เวลาในการปิดงานวิธี EDD ได้ใช้เวลาน้อยกว่าวิธี SPT ไม่ถึง 1 ชั่วโมง ดังนั้นการจัดลำดับงานในการผลิตส่วนแรกด้วยวิธี EDD และการจัดลำดับงานเครื่องจักรด้วยวิธี SPT P1 จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นวิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงตัวถังเครื่องปรับอากาศของโรงงานกรณีศึกษา

Kunadilok and Kurz, 2005 ได้พัฒนาแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบตามงานที่มีความยืดหยุ่นภายใต้เงื่อนไขการผลิตต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์ของการจัดตารางการผลิตให้เวลาสายโดยรวมแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำที่สุด แบบจำลองแรกใช้สำหรับจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตแบบตามงานที่สถานีงานต่าง ๆ อาจมีเครื่องจักรแบบขนานได้ ระบบการผลิตทำงานภายใต้เงื่อนไขสามด้าน คือ เวลาการตั้งเครื่องจักรขึ้นอยู่กับลำดับงานก่อนหน้า (Sequence dependent setup time) เวลาที่งานพร้อมผลิต (Read time of job) และงานมีลำดับขั้นตอนการผลิตที่กลับมาผลิตที่เครื่องจักรเดิมได้ (Recirculation) และแบบจำลองที่สองเพิ่มเงื่อนไขการผลิต คือ มีการจำกัดจำนวนงานรอคอยก่อนการผลิตที่สถานีงานต่าง ๆ (Blocking) แบบจำลองถูกสร้างภายใต้การกำหนดตัวแปรตัดสินใจของการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย และกราฟแบบแบ่งแยก (Disjunctive graph) สำหรับแทนปัญหาการผลิตแบบตามงานที่มีเป้าหมายในการจัดตารางการผลิตที่มีผลรวมเวลาสายของงานต่ำที่สุด การหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมใช้ซอฟต์แวร์ ILOG OPL Studio พบว่า หาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดได้สำหรับปัญหาขนาดเล็กที่มีจำนวนงานสูงสุด 8 งาน และจำนวนสถานีงานสูงสุด 4 สถานีงาน ภายในเวลา 3,600 วินาที ผู้วิจัยได้สรุปว่าปัญหานี้เป็นปัญหาแบบ NP-hard ทำให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมในปัญหาที่มีจำนวนงานมากได้

ชัยวัฒน์ เสนีวงศ์ ณ อยุธยา, 2555 ได้ทำการวิจัยโดยนำโปรแกรม Dr. Chatpon M.'s Interactive production scheduling & Sequencing software (IPSS) ซึ่งเป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์การจัดตารางการผลิตและเป็นระบบวิเคราะห์การจัดสินใจแบบพหุเกณฑ์ ที่อยู่บนพื้นฐานของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic hierarchy process) มาทำการวิจัยเพื่อวิเคราะห์แก้ไขปัญหาในการวางแผนและการจัดตารางการผลิต เพื่อลดจำนวนงานล่าช้า รวมทั้งเพิ่มผลิตภาพในการจัดตารางการผลิต ให้แก่โรงงานกรณีศึกษาที่เป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics-Part factory) โดยวัตถุประสงค์ของการจัดตารางการผลิต คือ จำนวนงานล่าช้า (Number of tardy jobs) เวลาล่าช้า (Total tardiness) เวลารวมที่งานจะเสร็จก่อน (Total earliness) และผลรวมเวลาที่งานอยู่ในระบบ (Total flow time) วิธีจัดตารางการผลิตที่ใช้ในการทดลองมี 7 วิธี ได้แก่ ตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์โดยใช้กฎ EDD (Earliest due date) กฎ LWKR (Least work remaining) กฎ MWKR (Most work remaining) กฎ MOPNR (Most operation remaining) กฎ SMT (Smallest value obtained by multiplying processing time with total processing time) กฎ SPT (Shortest processing time) และกฎ STPT (Shortest total processing time)

ผลการใช้งานโปรแกรม IPSS วิธีการจัดตารางการผลิตแบบวิธีการจัดตารางการผลิตแบบแอคทีฟ โดยใช้กฎ MWKR (Most work remaining) เลือกทำการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับงานที่มีภาระงานที่เหลืออยู่มากที่สุดก่อน (นับการดำเนินงานปัจจุบันด้วย) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับตัววัดผลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับตัววัดผลที่เกี่ยวกับเวลาที่ระบบทำงานชิ้นสุดท้ายเสร็จสิ้น

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงการจัดตารางการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ของโรงงานกรณีศึกษาจากงานวิจัยในอดีต (Kowmanee, 2014) ที่มีระบบการผลิตเป็นแบบตามงาน (Job shop) โดยงานแต่ละงานต้องผ่านการผลิตหลายขั้นตอน และมีลำดับขั้นตอนการผลิตและเวลาที่ใช้ในการผลิตในแต่ละขั้นตอนเป็นไปตามกลุ่มงานหรือรุ่นของงานที่สั่งจากลูกค้า งานวิจัยนี้เสนอวิธีการเชิงประมาณ (Approximation method) สำหรับจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่างด้วยวิธีฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming based heuristic) ที่มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เวลาปิดงานในระบบต่ำที่สุดและเวลาสายสูงที่สุดของทุกงานมีค่าต่ำที่สุด ที่มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต การจัดลำดับงานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการแก้ไขปัญหา ลักษณะของปัญหาการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 2

2. ศึกษากระบวนการผลิตและวิธีการจัดตารางการผลิตในปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา จาก Kowmanee (2014) ได้แก่ ระบบการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา กระบวนการผลิต กลุ่มงานที่ต้องจัดตารางการผลิตในรอบการจัดตารางการผลิตรอบหนึ่ง ๆ วิธีการจัดตารางการผลิตในปัจจุบัน และประสิทธิภาพของตารางการผลิตในปัจจุบัน

3. วิเคราะห์ปัญหาการจัดตารางการผลิต

ขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ตารางการผลิตของปัญหาตัวอย่างจากกรณีศึกษาภายใต้สมมติฐานการจัดตารางการผลิตที่หากมีงานที่ผลิตไม่เสร็จก่อนกำหนดส่งมอบ จะต้องมีการวางแผนการทำงานล่วงเวลาเพื่อทำให้งานส่งทันตามกำหนดหรือส่งช้ากว่ากำหนดน้อยที่สุด

4. เสนอวิธีการในการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการเสนอวิธีการสำหรับจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่างด้วยวิธีฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming based heuristic) ที่มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เวลาปิดงานในระบบต่ำที่สุดและเวลาสาย

สูงที่สุดของทุกงานมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการผลิตน้อยและทำให้ต้นทุนด้านการทำงานล่วงเวลาในการส่งมอบงานให้ทันเวลาที่ไม่สูงเกินไป

5. ทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอ

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการสำหรับจัดตารางการผลิตแบบตามงานที่เสนอ ปัญหาที่ใช้ในการทดสอบเป็นปัญหาการจัดตารางการผลิตจริงในโรงงานจาก Kowmanee (2014) และปัญหาที่จำลองขึ้นจากภายใต้ลักษณะของปัญหาจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงาน ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD ของโรงงานตัวอย่าง รายละเอียดขั้นตอนนี้นำเสนอในบทที่ 4

6. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนนี้เป็นการสรุปผลการจัดตารางการผลิตแบบตามงานที่มีวัตถุประสงค์ในการทำให้เวลาปิดงานต่ำที่สุดและเวลาสายสูงที่สุดมีค่าต่ำที่สุด พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ รายละเอียดขั้นตอนนี้นำเสนอในบทที่ 5

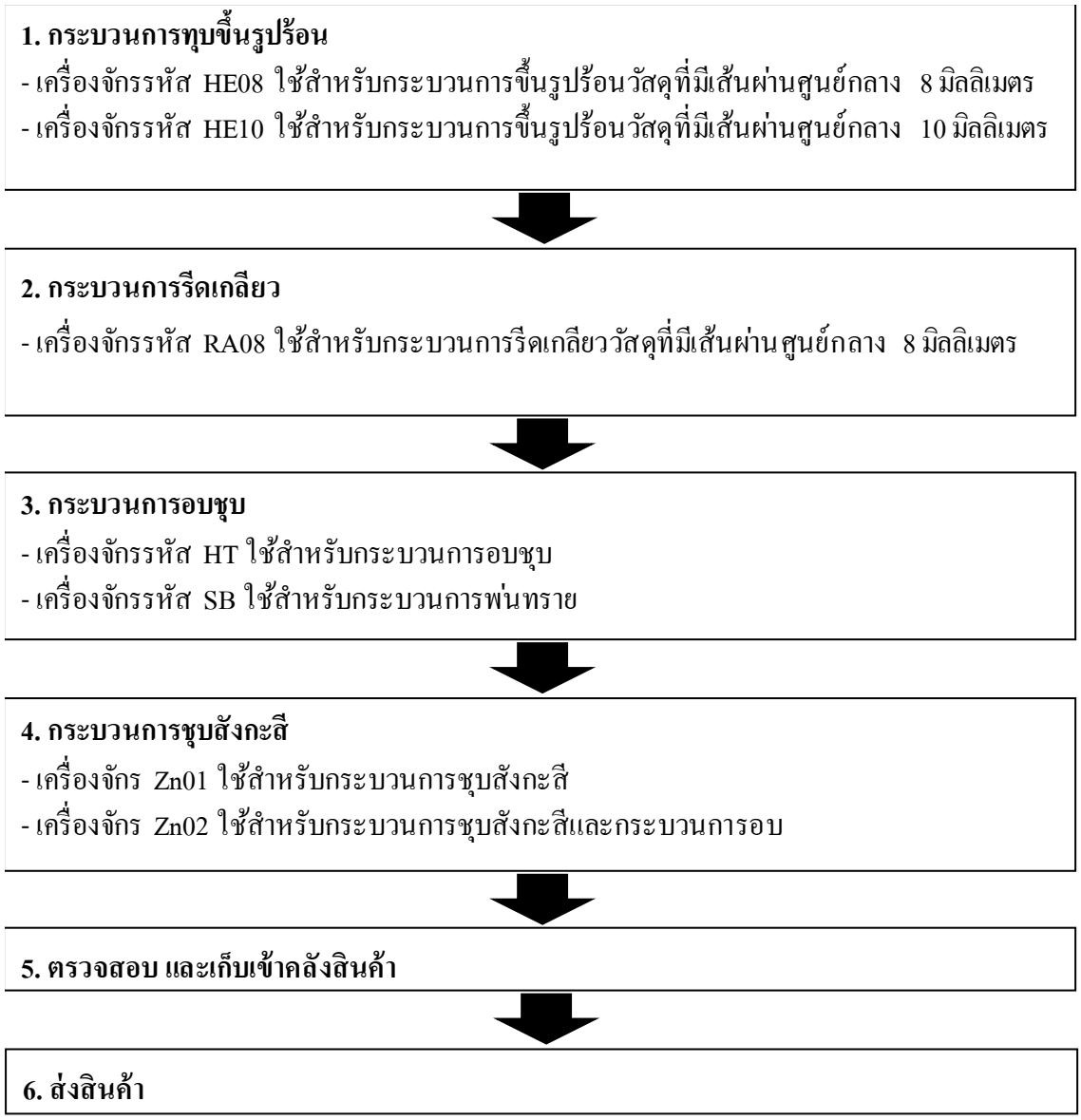
ศึกษากระบวนการผลิตและวิธีการจัดตารางการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา

ลักษณะของปัญหา

ปัญหาที่ดำเนินการศึกษาเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ยกตัวอย่างเช่น แป้นเกลียว สลักเกลียว ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ก้านลูกสูบ และฝาประกบเพลา ซึ่งในอดีตโรงงานมีรอบการจัดตารางการผลิตที่มีจำนวนงานที่ต้องจัดประมาณ 40 งาน โดยใช้เทคนิคการจัดตารางการผลิตโดยพิจารณาเวลาการส่งมอบก่อนให้ผลิตก่อน (Early due date; EDD) ประสิทธิภาพของตารางการผลิตที่จัดด้วยวิธีนี้พบว่า มีงานบางงานที่ใช้เวลาการผลิตนานแต่มีกำหนดส่งมอบเร็วจึงถูกจัดลำดับให้ผลิตก่อน และส่งผลต่อการมีงานที่ผลิตไม่ทันกำหนดส่งมอบเกิดขึ้นหลังจากจัดงานที่ใช้เวลาการผลิตนานผลิตเสร็จแล้ว Kowmanee (2014) ได้ทำการวิจัยเปรียบเทียบการจัดตารางการผลิตด้วยกฎการจัดลำดับงานหลายวิธี และสรุปได้ว่า การจัดตารางการผลิตโดยพิจารณาที่เวลารวมในการผลิตน้อยที่สุดเข้าก่อน (Short processing time; SPT) เป็นรูปแบบการจัดตารางการผลิตที่ดี และมีประสิทธิภาพมากกว่า EDD ในด้านการส่งมอบ แต่มีเวลาปิดงานมากกว่าวิธีการ EDD อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งสอง ไม่ได้นำการทำงานล่วงเวลาเข้ามาใช้ในการแก้ไขปัญหาการส่งมอบงานล่าช้า ซึ่งในทางปฏิบัติหากมีงานที่ผลิตไม่เสร็จก่อนกำหนดส่งมอบ จะมีการวางแผนการทำงานล่วงเวลาเพื่อทำให้งานส่งทันตามกำหนดหรือส่งช้ากว่ากำหนดน้อยที่สุด

ข้อมูลกระบวนการผลิต

กระบวนการหลักที่โรงงานใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โดยเริ่มจากการนำวัสดุมาผ่านกระบวนการผลิตแล้วได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ถูกแยกออกเป็น 9 กลุ่ม แต่ละกลุ่มต้องผ่านขั้นตอนการผลิต 4 ขั้นตอน คือ การทุบขึ้นรูปร้อน การรีดเกลียว การอบชุบด้วยความร้อน และการชุบสังกะสี โดยผลิตภัณฑ์แต่ละกลุ่มมีลำดับขั้นตอนต่างกัน ภาพรวมของขั้นตอนการผลิตดังภาพที่ 3-1 ในแต่ละขั้นตอนการผลิตมีเครื่องจักรหลายเครื่อง อัตราการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่องของสถานีงานสำหรับ 4 กระบวนการผลิต ดังภาพที่ 3-1 กลุ่มงานแต่ละกลุ่มนอกจากจะมีลำดับขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกันแล้ว แต่ละกลุ่มงานยังถูกกำหนดเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตในแต่ละขั้นตอนไว้ ดังรายละเอียดในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-1 กระบวนการหลักที่โรงงานใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

กระบวนการ	รายละเอียดการผลิตชิ้นส่วน	เครื่องจักร	ความสามารถในการผลิต	
			ชิ้น/นาที	กก./นาที
1. กระบวนการทุบขึ้นรูปร้อน	- ขนาด 8 มิลลิเมตร	M1	103	
	- ขนาด 10 มิลลิเมตร	M2	81	
2. กระบวนการรีดเกลียว	- ขนาด 8 มิลลิเมตร	M3	115	
	- ขนาด 10 มิลลิเมตร	M4	90	
	- รีดเกลียวและใส่แหวนรอง	M5	90	
3. กระบวนการอบชุบ	- กระบวนการอบชุบ	M6		7
	- กระบวนการพ่นทราย	M7		4
4. กระบวนการชุบสังกะสี	- กระบวนการชุบสังกะสี	M8		9
	- กระบวนการชุบสังกะสีและกระบวนการอบ	M9		13

ภาพที่ 3-2 รายละเอียดการผลิตในแต่ละกระบวนการ

กลุ่มงานที่	รหัสกลุ่มงาน	ลำดับเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต
1	A	M1 → M3 → M6 → M7
2	B	M1 → M3 → M6 → M8
3	C	M1 → M3 → M6 → M9
4	D	M1 → M6 → M5 → M8
5	E	M1 → M6 → M5 → M9
6	F	M2 → M4 → M6 → M9
7	G	M2 → M4 → M6 → M8
8	H	M2 → M6 → M5 → M9
9	I	M2 → M6 → M7 → M4

ภาพที่ 3-3 ลำดับการผลิตของกลุ่มงานและเครื่องจักรที่ใช้

ตัวอย่างกลุ่มงานที่นำมาจัดตารางการผลิต

ข้อมูลคำสั่งซื้อของลูกค้าในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ มีจำนวนงานรวมทั้งสิ้น 41 งาน โดยสามารถจำแนกออกเป็น 9 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A, B, C, D, E, F, G, H และ I ผู้วางแผนการผลิตต้องทำการจัดลำดับการผลิตของงานทั้ง 41 งานนี้ในรอบการจัดตารางการผลิตหนึ่ง ๆ รายละเอียดของงาน ดังภาพที่ 3-3 และเมื่อนำเอาข้อมูลของภาพที่ 3-1, 3-2 และ 3-3 มาวิเคราะห์รวมกัน ทำให้สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ผลิตจริงของแต่ละงาน ดังภาพที่ 3-4

งานที่	น้ำหนัก (กก./ชิ้น)	กลุ่มงาน	จำนวนผลิต (ชิ้น)	เวลาส่งมอบ (วัน)	เวลาส่งมอบ (นาที)	งานที่	น้ำหนัก (กก./ชิ้น)	กลุ่มงาน	จำนวนผลิต (ชิ้น)	เวลาส่งมอบ (วัน)	เวลาส่งมอบ (นาที)
A001	0.011	1	5,000	6	2,880	B017	0.014	2	300	10	4,800
A002	0.017	1	2,000	5	2,400	B018	0.011	2	50,000	7	3,360
A003	0.012	1	9,500	15	7,200	B019	0.022	2	12,000	6	2,880
A004	0.011	1	30,000	30	14,400	C001	0.014	3	13,300	4	1,920
A005	0.011	1	8,000	3	1,440	D001	0.018	4	100	3	1,440
B001	0.015	2	22,000	7	3,360	D002	0.015	4	48,500	4	1,920
B002	0.012	2	180	3	1,440	E001	0.01	5	1200	8	3,840
B003	0.017	2	17,000	30	14,400	E002	0.009	5	2,500	7	3,360
B004	0.01	2	1,500	7	3,360	E003	0.012	5	7,800	6	2,880
B005	0.015	2	1,250	7	3,360	E004	0.015	5	300	15	7,200
B006	0.015	2	2,000	5	2,400	E005	0.012	5	500	3	1,440
B007	0.018	2	2,000	6	2,880	E006	0.013	5	350	3	1,440
B008	0.013	2	36,500	7	3,360	E007	0.016	5	800	15	7,200
B009	0.015	2	3,300	4	1,920	E008	0.013	5	3,300	4	1,920
B010	0.05	2	110	5	2,400	E009	0.01	5	1200	30	14,400
B011	0.013	2	1,200	4	1,920	F001	0.027	6	700	15	7,200
B012	0.013	2	8,000	15	7,200	G001	0.018	7	1,800	30	14,400
B013	0.018	2	190	5	2,400	G002	0.025	7	600	7	3,360
B014	0.013	2	103,600	5	2,400	H001	0.024	8	2,850	7	3,360
B015	0.013	2	1,800	30	14,400	I001	0.02	9	4,870	4	1,920
B016	0.014	2	3,000	30	14,400						

ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างงานในรอบการจัดตารางการผลิต

ลำดับกลุ่มงาน	งานที่	เครื่องจักร				เวลาที่ใช้ผลิตจริง (นาที)*	ลำดับกลุ่มงาน	งานที่	เครื่องจักร				เวลาที่ใช้ผลิตจริง (นาที)*
		M1	M3	M6	M7				M1	M3	M6	M9	
1	A001	49	43	8	14	114	3	C001	126	116	27	14	286
	A002	19	17	5	9	50			M1	M6	M5	M8	
	A003	92	83	16	29	220	4	D001	1	1	1	1	4
	A004	291	261	47	83	682		D002	471	104	539	81	1195
	A005	78	70	13	22	183							
		M1	M3	M6	M8				M1	M6	M5	M9	
2	B001	214	191	47	37	489	5	E001	12	2	13	1	28
	B002	2	2	1	1	6		E002	24	3	28	2	57
	B003	165	148	41	32	386		E003	76	13	87	7	183
	B004	15	13	2	2	32		E004	3	1	3	1	8
	B005	12	11	3	2	28		E005	5	1	6	1	13
	B006	19	17	4	3	43		E006	3	1	4	1	9
	B007	19	17	5	4	45		E007	8	2	9	1	20
	B008	354	317	68	53	792		E008	32	6	37	3	78
	B009	32	29	7	6	74		E009	12	2	13	1	28
	B010	1	1	1	1	4			M2	M4	M6	M9	
	B011	12	10	2	2	26	6	F001	9	8	3	1	21
	B012	78	70	15	12	175			M2	M4	M6	M8	
	B013	2	2	1	1	6	7	G001	22	20	5	4	51
	B014	1006	901	192	150	2249		G002	7	7	2	2	18
	B015	17	16	3	3	39			M2	M6	M5	M9	
	B016	29	26	6	5	66	8	H001	35	10	32	5	82
	B017	3	3	1	1	8			M2	M6	M7	M4	
	B018	485	435	79	61	1060	9	I001	60	14	24	54	152
	B019	117	104	38	29	288	**ผลรวมเวลาที่ใช้ผลิตจริง (นาที)**						**9,298**

*ตัวอย่างการคำนวณเวลาที่ใช้ผลิตจริงของงานหนึ่ง ๆ แสดงในภาคผนวก ก

ภาพที่ 3-5 เวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตของแต่ละงาน

วิธีการจัดตารางการผลิต และประสิทธิภาพของตารางการผลิตในปัจจุบัน

Kowmanee (2014) มีแนวคิดปรับปรุงการจัดตารางการผลิตในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โดยประยุกต์วิธีการจัดตารางการผลิตในแบบต่าง ๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 4 ตัวชี้วัด ได้แก่ เวลาปิดงานของระบบ (Makespan) เวลารอคอยของงาน (Total idle time of job) เวลารอคอยของเครื่องจักร (Total idle time of machine) และประสิทธิภาพการทำงาน (% Utilization) ซึ่งวิธีการจัดตารางการผลิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 วิธี คือ

1. เวลารวมในการผลิตน้อยที่สุดเข้าก่อน (Short Processing Time; SPT)
2. เวลาการผลิตมากที่สุดเข้าก่อน (Longest Processing Time; LPT)
3. วิธีการจัดงานตามเวลาที่เหลือน้อยที่สุดเข้าก่อน (Shortest remaining processing time; SRT)
4. วิธีการจัดงานตามเวลาที่เหลือมากที่สุดเข้าก่อน (Longest remaining processing time; LRT)

เมื่อนำแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกันพบว่าวิธีการ SPT ทำให้ลดเวลาว่างของตัวงานอีกทั้งยังช่วยลดเวลาว่างของเครื่องจักร และยังเป็นวิธีที่ทำให้จำนวนงานที่ส่งล่าช้าน้อยกว่าวิธี EDD ซึ่งเป็นวิธีที่โรงงานเคยใช้ในอดีต แต่ตารางการผลิตที่จัดด้วยวิธีการ SPT ยังมีเวลาปิดงานของระบบสูงกว่าวิธีการ EDD มาก (รายละเอียดการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี SPT ของ Kowmanee (2014) (ภาคผนวก ข) ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD และวิธี SPT ดังภาพที่ 3-6

ประสิทธิภาพ	วิธี EDD	วิธี SPT	หน่วย
เวลาปิดงานของระบบ (Makespan)	4,490	5,130	นาที
จำนวนงานที่ส่งล่าช้า	17	3	งาน
ผลรวมเวลารอคอยงาน (Total idle time of job)	36,157	670	นาที
ผลรวมเวลารอคอยของเครื่องจักร (Total idle time of machine)	22,419	16,153	นาที
ประสิทธิภาพการทำงาน (% Utilization)	29.32	36.53	เปอร์เซ็นต์
ผลรวมเวลาสิ้นสุดการทำงานของเครื่องจักร	31,717	25,451	นาที

ภาพที่ 3-6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD และวิธี SPT

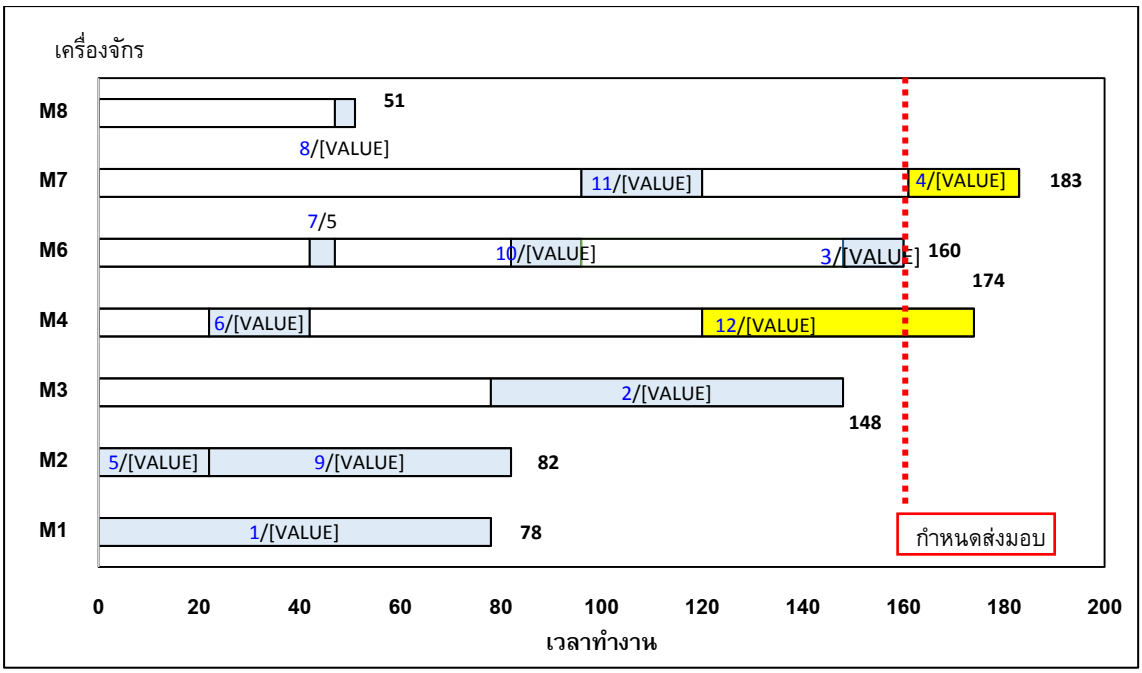
วิเคราะห์ปัญหาการจัดตารางการผลิตหากมีงานสายเกิดขึ้น

การทำงานล่วงเวลากรณีที่มีงานสายเกิดขึ้นนั้นอาจทำให้สามารถส่งงานได้ทันตามกำหนดเวลาหากเวลาการผลิตเสร็จของงานที่สายตามที่กำหนดในตารางการผลิตมีค่าไม่สูงเกินไป การจัดตารางการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาเดิม กำหนดให้ใช้เวลาทำงานปกติ 8 ชั่วโมงต่อวันเป็นพื้นฐานในการคำนวณจำนวนงานที่ส่งล่าช้า (ดังภาพที่ 3-6) และไม่พิจารณาเวลาสายของงานเป็นหนึ่งในประสิทธิภาพของตารางการผลิต งานวิจัยนี้เป็นการสร้างตารางการผลิตภายใต้เงื่อนไขเวลาการทำงานปกติ 8 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน แต่หากจัดตารางการผลิตแล้วพบว่ามีงานสายเกิดขึ้นจะพิจารณาให้ทำงานล่วงเวลาภายใต้เวลาไม่เกิน 480 นาทีต่อวัน เพื่อให้สามารถผลิตงานส่งมอบทันเวลาที่กำหนดไว้ในคำสั่งผลิตให้ได้มากที่สุด เวลาที่ใช้ในการทำงานล่วงเวลาจะส่งผลถึงค่าใช้จ่ายส่วนเพิ่มที่เกิดขึ้นเนื่องจากตารางการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการสร้างตารางการผลิตที่เกิดค่าใช้จ่ายจากการทำงานล่วงเวลาให้น้อยที่สุดโดยพยายามทำให้เวลาที่ใช้ในการทำงานล่วงเวลาต่ำที่สุด ซึ่งการกำหนดเวลาการทำงานล่วงเวลานี้กำหนดจากเวลาสายสูงสุดของทุกงานที่คำนวณจากตารางการผลิตที่สร้างขึ้น ดังแสดงตัวอย่างข้อมูลการผลิตในภาพที่ 3-7 และตารางการผลิตในภาพที่ 3-8

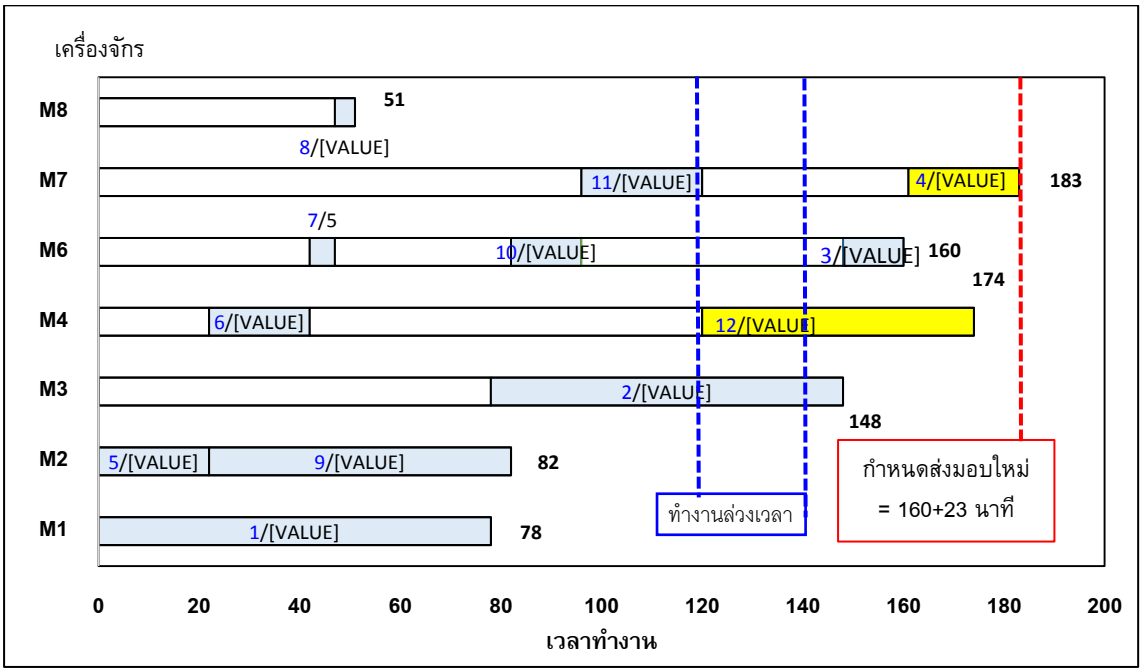
งานที่	เครื่องจักร								เวลาเสร็จงาน (นาที)	กำหนดส่งมอบ (นาที)	เวลางานสาย (นาที)
	M1	M2	M3	M4	M6	M7	M8	M4			
1	1 / 78		2 / 70		3 / 12	4 / 22			183	160	23
2		5 / 22		6 / 20	7 / 5		8 / 4		51	160	-109
3		9 / 60			10 / 14	11 / 24		12 / 54	174	160	14

* Operation / เวลาผลิต operation ที่ 1 ถึง 4 คือลำดับการผลิตของงานที่ 1

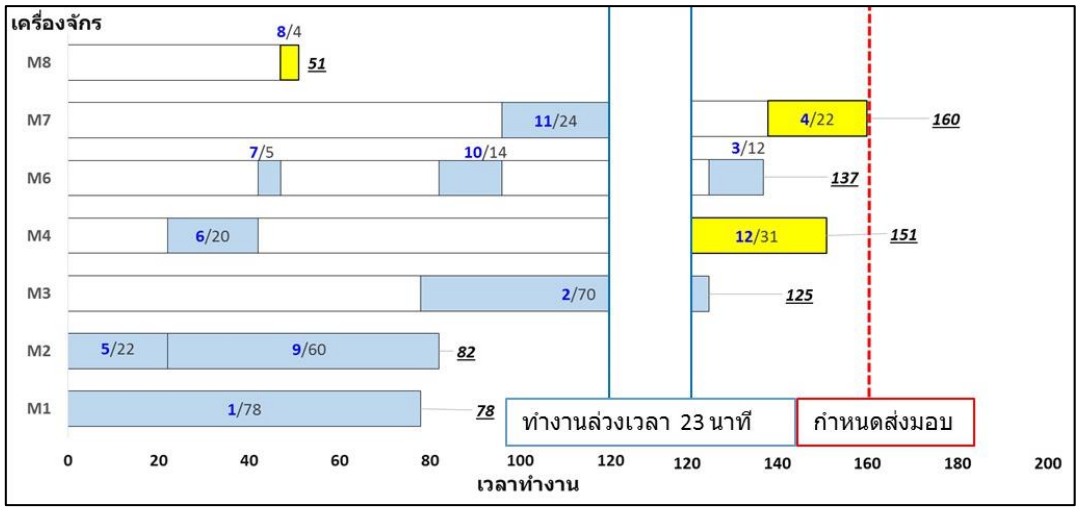
ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างข้อมูลการผลิต



ภาพที่ 3-8 ตัวอย่างตารางการผลิตก่อนพิจารณาการทำงานล่วงเวลา



ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างตารางการผลิตหลังพิจารณาการทำงานล่วงเวลาแบบเพิ่มกำหนดส่งมอบ



ภาพที่ 3-10 ตัวอย่างตารางการผลิตหลังพิจารณาการทำงานล่วงเวลาแบบลดเวลาการผลิตในช่วงเวลาปกติ

ภาพที่ 3-8 แสดงผลการจัดตารางการผลิตแบบไม่คำนึงถึงการทำงานล่วงเวลา พบว่างานที่ 1 และงานที่ 3 มีเวลาเสร็จงานเกินกว่ากำหนดส่งมอบโดยมีเวลาสายเท่ากับ 23 นาที และ 14 นาที ตามลำดับ ดังนั้นเวลาสายสูงสุดจึงเท่ากับ 23 นาที เมื่อกำหนดให้เพิ่มการทำงานล่วงเวลา 23 นาที ในช่วงเวลาที่เหมาะสมจะทำให้ไม่มีงานสายเกิดขึ้น การวิเคราะห์ตารางการผลิตเมื่อพิจารณาการทำงานล่วงเวลาสามารถอธิบายได้สองรูปแบบคือ แบบแรกเป็นการเพิ่มกำหนดส่งมอบ ดังภาพที่ 3-9 ให้เริ่มการทำงานล่วงเวลาหลังนาทีที่ 120 เป็นเวลา 23 นาที ทำให้กำหนดส่งมอบของงานที่ 3 (Operation 12) และงานที่ 1 (Operation 4) เพิ่มขึ้นจากเดิม 23 นาที เป็น 183 นาที (เนื่องจากเวลาการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 23 นาที) ทำให้ผลิตงานส่งได้ทันทุกงาน แบบที่สองเป็นการลดเวลาการผลิตจากช่วงเวลาทำงานปกติ ดังภาพที่ 3-10 กำหนดให้เริ่มการทำงานล่วงเวลาหลังนาทีที่ 120 เป็นเวลา 23 นาทีทำให้เหลือเวลาการผลิตงานที่ 1 บนเครื่องจักรที่ 3 (Operation 2) ในช่วงเวลาปกติเท่ากับ 47 นาที (จากเดิมใช้เวลาผลิต 70 นาที ดังภาพที่ 3-8) Operation 2 จึงผลิตเสร็จที่ 125 นาที (78+47 นาที) ทำให้ Operation 3 และ 4 เริ่มผลิตได้เร็วขึ้น 23 นาที จึงทำให้ Operation 4 ผลิตเสร็จใน 160 นาที ตรงตามกำหนดส่งมอบ ส่วนการผลิตงานที่ 3 บนเครื่องจักรที่ 4 (Operation 12) เหลือเวลาผลิตในช่วงเวลาปกติเท่ากับ 31 นาที (จากเดิมใช้เวลาผลิต 54 นาที ดังภาพที่ 3-8) ส่งผลให้เวลาผลิตเสร็จลดลงจากเดิม 174 นาทีเหลือ 151 นาที ทันตามกำหนดส่งมอบ

จากการวิเคราะห์การจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD และ SPT ของข้อมูลการผลิตเดิม พบว่า เวลาสายสูงสุดมีค่าเท่ากับ 655 และ 2,729 นาที ตามลำดับ ดังนั้นหากกำหนดให้ทำงาน

ล่วงเวลาตามค่าเวลาสายสูงสุดจะทำให้ไม่มีงานสายเกิดขึ้น และสามารถปิดงานได้ที่เวลา 3,835 และ 2,401 นาที ตามลำดับ การกำหนดช่วงเวลาในการทำงานล่วงเวลาจะถูกกำหนดเป็นรายวัน เช่น การทำงานล่วงเวลาทั้งหมด 655 นาที อาจกำหนดให้ทำงานล่วงเวลาวันละ 180 นาที เป็นเวลาสามวัน และ 115 นาที หนึ่งวัน เป็นต้น เมื่อพิจารณาการกำหนดเวลาการทำงานล่วงเวลาของตารางการผลิตที่สร้างด้วยวิธีการ EDD พบว่า สามารถกำหนดให้ทำงานล่วงเวลาได้วันละไม่เกิน 480 นาที แต่ตารางการผลิตที่สร้างด้วยวิธี SPT ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 6 วันในการทำงานล่วงเวลา (2,729/480 = 5.7 วัน) แต่งานสายจากตารางการผลิตที่จัดด้วยวิธี SPT มีกำหนดส่งมอบที่ 4 วัน (1,920 นาที) และ 5 วัน (2,400 นาที) ดังนั้นถึงแม้ว่าจะทำงานล่วงเวลาวันละ 480 นาทีก็ไม่สามารถผลิตงานให้ส่งมอบตามกำหนดได้ จึงสรุปได้ว่า การจัดตารางการผลิตของระบบการผลิตตามงานของโรงงานกรณีศึกษา ภายใต้เงื่อนไขการทำงานล่วงเวลา จึงควรเลือกใช้วิธีการ EDD เนื่องจากมีต้นทุนด้านการทำงานล่วงเวลาที่ต่ำกว่า และสามารถผลิตงานได้ตามกำหนดส่งมอบ

จากการวิเคราะห์ปัญหานี้ทำให้พบว่าการจัดตารางการผลิตภายใต้เงื่อนไขการทำงานล่วงเวลา สามารถกำหนดลำดับการผลิตที่ทำให้งานทุกงานส่งมอบได้ทันเวลา หรือส่งงานสายกว่ากำหนดไม่นานได้ และลำดับการผลิตที่เกิดจากวิธีการจัดตารางการผลิตแบบต่าง ๆ จะส่งต่อเวลาปิดงานและเวลาสายสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบวิธีการจัดตารางการผลิตภายใต้เงื่อนไขการทำงานล่วงเวลานี้เพื่อเป็นทางเลือกในการจัดตารางการผลิตที่ทำให้สามารถปิดงานได้อย่างรวดเร็ว ส่งมอบงานได้ทันตามกำหนด และมีต้นทุนในการทำงานล่วงเวลาต่ำที่สุด

บทที่ 4
ผลการศึกษาวิจัย

บทนี้นำเสนอเนื้อหาสองส่วน เริ่มจากส่วนแรกนำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตแบบตามงานด้วยฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม ส่วนที่สองนำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอโดยใช้ในการทดสอบเป็นปัญหาการจัดตารางการผลิตจริง และปัญหาที่จำลองขึ้นจากภายใต้ลักษณะของปัญหาจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่าง และทดสอบการจัดตารางการผลิตภายใต้เงื่อนไขทั้งการวางแผนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง

วิธีการในการจัดตารางการผลิตแบบตามงานด้วยฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการสำหรับจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่างด้วยวิธีฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming based heuristic) ที่มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เวลาปิดงานของระบบ (Makespan) ต่ำที่สุด และเวลาสายสูงที่สุดของทุกงาน (Maximum tardiness) มีค่าต่ำที่สุด ปัญหาการจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตแบบตามงานเป็นปัญหาแบบ NP-hard ทำให้การใช้กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed integer linear programming, MILP) สำหรับสร้างตารางการผลิตที่ทำให้เวลาปิดงานต่ำที่สุด หรือเวลาสายสูงสุดต่ำที่สุดสามารถทำได้ในกรณีที่จำนวนงานที่จัดตารางการผลิตมีไม่มากเกินไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการแยกงานที่ต้องการจัดตารางการผลิตในช่วงเวลาหนึ่ง ออกเป็นกลุ่มงานย่อย (Decomposition) จากนั้นทำการจัดตารางการผลิตด้วยตัวแบบ MILP ของงานย่อยกลุ่มแรก แล้วนำผลเวลาเสร็จงานบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องมากำหนดให้เป็นเวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักรสำหรับจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานย่อยถัดไปจนครบทุกกลุ่มย่อย วิธีการแยกกลุ่มงานในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการ EDD เนื่องจากเป็นวิธีที่คาดว่าจะทำให้เวลาสายสูงสุดมีค่าต่ำได้ (พิจารณาจากการวิเคราะห์ปัญหาในบทที่ 3)

เมื่อพิจารณาถึงเป้าหมายของตารางการผลิตในงานวิจัยนี้มี 2 จุดประสงค์ ทั้งด้านเวลาปิดงานของระบบและเวลาสายสูงสุด การสร้างตัวแบบ MILP ในการแก้ปัญหาสองจุดประสงค์นี้ทำได้หลายวิธี เช่น การกำหนดวัตถุประสงค์หนึ่งไว้ที่ฟังก์ชั่นเป้าหมายของตัวแบบ และกำหนดค่าสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ไว้ที่สมการขอบข่ายหรือเงื่อนไขบังคับของตัวแบบ เป็นต้น งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัว

แบบ MILP สำหรับสร้างตารางการผลิตที่มีค่าเวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุดก่อน แล้วพิจารณาว่ามีงานสายเกิดขึ้นหรือไม่ ภายใต้ความเชื่อว่าจำนวนคำสั่งซื้อของลูกค้าและเวลาส่งมอบในรอบเวลาของการจัดตารางการผลิตนั้นถูกประมาณการให้ผลิตได้ทันจากแผนการผลิตหลัก (Master production schedule, MPS) แล้ว หากผลการจัดตารางการผลิตพบว่าไม่มีงานสายเกิดขึ้น ก็สามารถใช้ตารางการผลิตที่สร้างขึ้นได้เลย กรณีที่มีงานสายเกิดขึ้นงานวิจัยนี้เสนอตัวแบบ MILP แบบสองจุดประสงค์สำหรับสร้างตารางการผลิตที่ทำให้ผลรวมของเวลาสายสูงสุดกับเวลาปิดงานของระบบแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำที่สุด โดยงานวิจัยนี้เสนอให้เวลาสายสูงสุดมีน้ำหนักความสำคัญมากกว่าเวลาปิดงานของระบบ 100 เท่า ภายใต้แนวคิดที่ไม่ต้องการให้เกิดการทำงานล่วงเวลาเพื่อผลิตงานที่ส่งมอบไม่ทันตามกำหนด เช่น หากตารางการผลิตที่สร้างขึ้นการจากตัวแบบแรก (Minimize makespan) มีค่าเวลาปิดงานของระบบเท่ากับ 5,000 นาที และมีค่าเวลาสายสูงสุด 300 นาที เมื่อพิจารณาการใช้ตัวแบบที่สองด้วยการถ่วงน้ำหนักขนาด 0.01 ให้กับค่าเวลาปิดงานของระบบจะทำให้ผลรวมของเวลาสายสูงสุดกับ เวลาปิดงานของระบบแบบถ่วงน้ำหนักที่เป็นฟังก์ชั่นเป้าหมายของตัวแบบจะมีค่าเท่ากับ 300 + (0.01 x 5,000) = 350 และเมื่อใช้ตัวแบบที่สองนี้ในการสร้างตารางการผลิต โปรแกรมจะประมวลผลโดยพยายามลดค่าฟังก์ชั่นเป้าหมายลงให้ต่ำที่สุด ซึ่งจะทำให้ค่าเวลาสายสูงสุดต่ำก่อน และกรณีที่สามารถทำให้เวลาสายสูงสุดเท่ากับศูนย์ได้ (ไม่มีงานสายเกิดขึ้น) หรือลดลงได้ต่ำมากแล้ว โปรแกรมจะประมวลผลต่อไปเพื่อที่จะลดค่าเวลาปิดงานลงให้ต่ำที่สุดได้

ฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับการจัดตารางการผลิตแบบตามงานของโรงงานตัวอย่าง แสดงรายละเอียด ดังภาพที่ 4-1 ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. นำข้อมูลคำสั่งซื้อในรอบเวลาการจัดตารางการผลิตมาคำนวณเวลาการผลิตในทุกลำดับการผลิตของงานแต่ละงาน จากอัตราการผลิตของเครื่องจักรสำหรับการผลิตงานในขั้นตอนการผลิตของงานแต่ละงาน

2. พิจารณาว่าจำนวนงานที่ต้องผลิตมีมากกว่า 25 งานหรือไม่

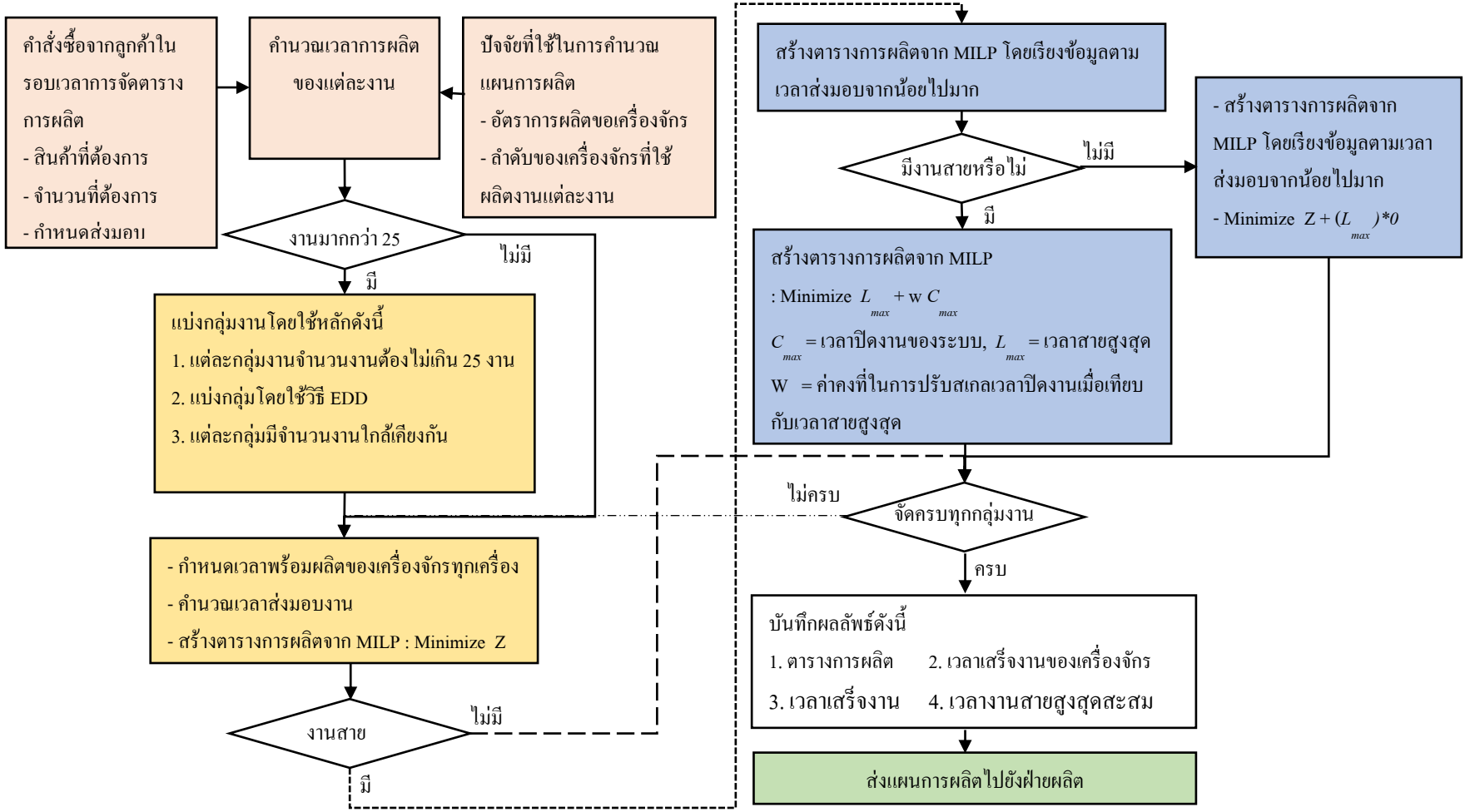
   2.1 ถ้าไม่เกิน 25 งาน ให้ดำเนินการจัดตารางการผลิตตามขั้นตอนที่ 3

   2.2 กรณีที่เกิน 25 งาน ให้เรียงลำดับงานจากกำหนดส่งมอบน้อยที่สุดไปมากที่สุด แล้วแบ่งงานออกเป็นกลุ่มย่อยโดยแต่ละกลุ่มย่อยให้มีปริมาณงานเท่า ๆ กัน โดยกลุ่มย่อยที่ 1 เป็นกลุ่มงานที่มีกำหนดส่งมอบเร็วที่สุด จะถูกนำไปจัดตารางการผลิตก่อน ตามขั้นตอนที่ 3

3. จัดตารางการผลิตด้วยกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับสร้างตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุด (MILP I) แล้วพิจารณาผลลัพธ์ต่อไปนี้

   3.1 หากไม่มีงานสายเกิดขึ้น ให้ดำเนินงานต่อในขั้นตอนที่ 7

   3.2 หากมีงานสายเกิดขึ้น ให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 4



ภาพที่ 4-1 วิธีการจัดตารางการผลิตด้วยฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

4. กำหนดค่าตั้งต้นของตัวแปรตัดสินใจตามลำดับการผลิตแบบ EDD แล้วพิจารณาลำดับการผลิตแบบ EDD ว่ามีงานสายเกิดขึ้นหรือไม่

4.1 หากไม่มีงานสายเกิดขึ้น ให้ดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 5

4.2 หากมีงานสายเกิดขึ้น ให้ดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 6

5. จัดตารางการผลิตด้วย MILP I โดยเพิ่มเงื่อนไขเวลาสายสูงสุดของทุกงานเท่ากับศูนย์ แล้วดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 7

6. จัดตารางการผลิตด้วยกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับสร้างตารางการผลิตที่ทำให้ผลรวมของเวลาสายสูงสุดกับเวลาปิดงานของระบบแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำที่สุด (MILP II) แล้วดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 7

7. พิจารณาว่าจัดงานครบทุกกลุ่มย่อยแล้วหรือไม่

7.1 หากยังไม่ครบ ให้กำหนดเวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่องสำหรับการจัดตารางการผลิตสำหรับงานในกลุ่มย่อยถัดไปตามเวลาผลิตเสร็จของตารางการผลิตที่จัดแล้วล่าสุด

7.2 หากครบแล้ว ให้บันทึกผลลัพธ์ตารางการผลิตรวมทุกกลุ่มย่อยเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับสร้างตารางการผลิตตามฮิวริสติกที่เสนอประกอบด้วยแบบจำลอง 2 ตัวแบบ ดัชนีและเซต พารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจ ของตัวแบบทั้งสองมีรายละเอียดดังนี้

ดัชนีและเซต

การกำหนดสัญญลักษณ์สำหรับใช้ในแบบจำลอง MILP ประกอบด้วยดัชนีและเซตดังต่อไปนี้

i, j = ดัชนีของการดำเนินงาน (Operation) โดยที่ Operation i หมายถึงขั้นตอนการผลิตหนึ่ง ๆ ของงานที่ต้องการผลิต เช่น การจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานทั้งหมด n งาน แต่ละงานใช้ขั้นตอนการผลิต 4 ขั้นตอน ดังนั้นงานที่ 1 จึงมี 4 Operations คือ Operation 1 ถึง Operation 4 และงานสุดท้ายคือ งานที่ n ประกอบด้วย Operation $4n$-3 ถึง Operation $4n$

B = เซตของ Operation แรกของแต่ละงาน เช่น การจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานทั้งหมด n งาน แต่ละงานใช้ขั้นตอนการผลิต 4 ขั้นตอน เซต B = {1, 5, 9, …, $4n$-3}

E = เซตของ Operation สุดท้ายของแต่ละงาน เช่น การจัดตารางการผลิตของกลุ่มงานทั้งหมด n งาน แต่ละงานใช้ขั้นตอนการผลิต 4 ขั้นตอน เซต E = {4, 8, 12, …, 4n}

K = เซตของเครื่องจักรที่ใช้ในรอบการจัดตารางการผลิต

k = ดัชนีของเครื่องจักร โดยที่ k = 1, 2, …ในเซต K

S_k = เซตของ Operation ที่ต้องผลิตบนเครื่องจักร k

พารามิเตอร์

สัญญลักษณ์ของข้อมูลนำเข้า ข้อมูลการผลิต และค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง MILP ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ข้อมูลนำเข้า

n = จำนวนงานที่ต้องการจัดตารางการผลิต

D_i = กำหนดส่งมอบของ Operation i (นาที) เมื่อ $i \in E$

R_k = เวลาพร้อมทำงานของเครื่องจักร k

ข้อมูลการผลิต

P_i = เวลาการผลิตของ Operation i (นาที)

ค่าคงที่

M = ค่าคงที่ที่มีค่ามากพอสำหรับการคำนวณเวลาผลิตเสร็จของทุก Operation

W = น้ำหนักของเวลาปิดงาน กำหนดให้เท่ากับ 0.01

ตัวแปรตัดสินใจ

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ เมื่อ Operation } j \text{ ผลิตต่อจาก Operation } i \\ 0, \text{ กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

c_i = เวลาการผลิตเสร็จของ Operation i (นาที)

c_{max} = เวลาปิดงานของระบบ

l_i = เวลาสายของงานที่ i

l_{max} = เวลาสายมากที่สุดจากงานทุกงาน

แบบจำลองสำหรับการจัดตารางการผลิตที่ทำให้ makespan ต่ำที่สุด (MILP I) เป็นแบบจำลองแรกที่ใช้ในการจัดตารางการผลิต ประกอบด้วยฟังก์ชั่นจุดประสงค์ และเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชั่นจุดประสงค์

$$\text{Minimize} \quad c_{max} \tag{4-1}$$

ข้อจำกัด

$$\sum_{j\in S_k} x_{0j} = 1 \qquad k \in K \tag{4-2}$$

$$\sum_{\substack{j\in S_k \cup \{4n+1\} \\ i\neq j}} x_{ij} = 1 \qquad \forall k = 1,\dots,m, \quad i \in S_k \tag{4-3}$$

$$\sum_{\substack{i\in S_k \cup \{0\} \\ i\neq j}} x_{ij} = 1 \qquad \forall k = 1,\dots,m, \quad j \in S_k \tag{4-4}$$

$$c_j \geq R_k + P_j - M(1 - x_{0j}) \quad \forall k = 1,\dots,m, \quad j \in S_k \tag{4-5}$$

$$c_j \geq c_i + P_j - M(1 - x_{ij}) \quad \forall k = 1,\dots,m, \quad i,j \in S_k \ , i \neq j \tag{4-6}$$

$$c_j \geq c_{j-1} + P_j \qquad j \in B' \tag{4-7}$$

$$c_{max} \geq c_j \qquad j \in E \tag{4-8}$$

$$x_{ij} = binary \qquad \forall i = 0,1,\dots,4n, \qquad \forall j = 1,\dots,4n+1 \tag{4-9}$$

$$c_j \geq 0 \qquad \forall\, j = 1,\dots 4n \tag{4-10}$$

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับจัดตารางการผลิตเริ่มจากสมการ 4-1 แสดงฟังก์ชั่นจุดประสงค์ที่ต้องการให้ตารางการผลิตมีเวลาปิดงานต่ำที่สุด สมการ 4-2 ถึง 4-4 ใช้สำหรับจัดลำดับ Operation บนเครื่องจักรแต่ละเครื่องที่เกี่ยวข้องกับการผลิต Operation นั้น ๆ สมการ 4-2 เป็นการเลือก Operation หนึ่ง ๆ เป็น Operation แรกของเครื่องจักร สมการ 4-3 ทำให้มั่นใจได้ว่า การผลิต Operation ใด ๆ จะต้องมี Operation หนึ่ง ๆ ที่ผลิตตามหลังเสมอ (กรณี Operation ที่ถูกจัดลำดับเป็นลำดับสุดท้ายในการผลิตบนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ จะต้องมี Operation เทียม (4n+1) เป็น Operation ที่ผลิตตามหลัง) สมการ 4-4 ทำให้มั่นใจได้ว่า การผลิต Operation ใด ๆ จะต้องมี Operation หนึ่ง ๆ ที่ผลิตก่อนหน้าเสมอบนทุกเครื่องจักร (กรณี Operation ที่ถูกจัดลำดับเป็นลำดับแรกในการผลิตบนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ จะต้องมี Operation เทียม (0) เป็น Operation ที่ผลิตก่อนหน้า)

สมการ 4-5 ถึง 4-7 แสดงการคำนวณเวลาผลิตเสร็จของทุก Operation สมการ 4-5 เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเวลาผลิตเสร็จของ Operation *j* ใด ๆ ที่ผลิตเป็นลำดับแรกบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะไม่เร็วกว่าเวลาพร้อมทำงานของเครื่องจักร (ซึ่งเป็นเวลาเริ่มผลิตที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในการเริ่มผลิตของ Operation *j*) รวมกับเวลาการผลิตของ Operation *j* นั้น สมการ 4-6 เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเวลาผลิตเสร็จของ Operation *j* ใด ๆ ที่ไม่ได้ผลิตเป็นลำดับแรกบนเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะไม่เร็วกว่า

เวลาการผลิตเสร็จของ Operation ถูกผลิตในลำดับก่อนหน้าบนเครื่องจักรเดียวกัน (ซึ่งเป็นเวลาเริ่มผลิตที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในการเริ่มผลิตของ Operation *j*) รวมกับเวลาการผลิตของ Operation *j* นั้น สมการ 4-7 เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเวลาผลิตเสร็จของ Operation *j* ใด ๆ จะไม่เร็วกว่าเวลาการผลิตเสร็จของ Operation ขั้นตอนก่อนหน้าของงานเดียวกัน (ซึ่งเป็นเวลาเริ่มผลิตที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ในการเริ่มผลิตของ Operation *j*) รวมกับเวลาการผลิตของ Operation *j* นั้น จากเงื่อนไขบังคับในชุดสมการ 4-5 ถึง 4-7 นี้ เมื่อพิจารณา Operation *j* ใด ๆ จะพบว่าเวลาการผลิตเสร็จของ Operation *j* ต้องไม่น้อยกว่าผลรวมของเวลาเริ่มผลิตกับเวลาการผลิตของ Operation *j* นั่นเอง

สมการ 4-8 แสดงการคำนวณเวลาปิดงานของระบบที่จะไม่เร็วกว่าเวลาการผลิตเสร็จของทุกงาน สมการ 4-9 และ 4-10 แสดงเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับสร้างตารางการผลิตที่ทำให้ผลรวมของ Maximum lateness กับ Makespan แบบถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำที่สุด (MILP II) ประกอบด้วยฟังก์ชั่นจุดประสงค์ และเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชั่นจุดประสงค์

$$\text{Minimize} \quad l_{max} + Wc_{max} \tag{4-11}$$

ข้อจำกัด

สมการที่ (4-2) ถึง (4-10)

$$l_j \geq c_j - D_j \qquad j \in E \tag{4-12}$$

$$l_j \geq 0 \qquad j \in E \tag{4-13}$$

$$l_{max} \geq l_j \qquad j \in E \tag{4-14}$$

$$l_{max} \geq 0 \qquad j \in E \tag{4-15}$$

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับจัดตารางการผลิตที่มีสองวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้เวลาสายมากที่สุดของทุกงานมีค่าต่ำที่สุดและเพื่อให้เวลาปิดงานในระบบต่ำที่สุด (MILP II) ประกอบด้วย สมการ 4-11 แสดงฟังก์ชั่นจุดประสงค์ที่ต้องการให้ตารางการผลิตไม่เกิดงานสาย หรือหากจำเป็นต้องเกิดงานสาย ให้มีเวลาสายสูงที่สุดของทุกงานมีค่าต่ำที่สุด จากนั้นจึงสร้างตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานต่ำที่สุด สมการ 4-2 ถึง 4-10 เป็นสมการที่นำมาจากแบบจำลองเดิมที่ใช้สำหรับจัดลำดับ Operation บนเครื่องจักรทุกเครื่อง สมการ 4-12 และ 4-13 ใช้สำหรับคำนวณเวลาสายของงาน เมื่อเวลาผลิตเสร็จของ Operation สุดท้ายของงานหนึ่ง ๆ ล่าช้ากว่า

กำหนดส่งมอบ (c_j-D_j มีค่าเป็นบวก) สมการ 4-14 ใช้สำหรับคำนวณเวลาสายมากที่สุดของงานสายทุกงาน สมการ 4-15 แสดงเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ (ตัวอย่าง MILP I และ MILP II ดังภาคผนวก ข)

ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตจากปัญหาจริงของโรงงานตัวอย่าง

การแก้ปัญหาจริงของโรงงานตัวอย่างในบทที่ 3 จำนวน 41 งาน ด้วยการใช้ฮิวริสติกที่งานวิจัยนี้เสนอ แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1. จากข้อมูลคำสั่งซื้อดังภาพที่ 3-4 ทำการคำนวณเวลาการผลิตตามลำดับการผลิตของงานแต่ละงาน (ภาพที่ 3-3) จากอัตราการผลิตของงานบนเครื่องจักรต่าง ๆ ดังภาพที่ 3-2 ได้ผลดังภาพที่ 3-5

2. จำนวนงานทั้งหมดที่ต้องจัดตารางการผลิตเท่ากับ 41 งาน จึงแบ่งงานออกเป็นกลุ่มย่อยสองกลุ่มตามกำหนดส่งมอบจากน้อยไปมากได้ผลดังนี้

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	กลุ่ม
5	A005	1440	กลุ่มที่ 1 จำนวน 21 งาน
7	B002	1440	
26	D001	1440	
32	E005	1440	
33	E006	1440	
14	B009	1920	
16	B011	1920	
25	C001	1920	
27	D002	1920	
35	E008	1920	
41	I001	1920	
2	A002	2400	
11	B006	2400	
15	B010	2400	
18	B013	2400	
19	B014	2400	
1	A001	2880	
12	B007	2880	
24	B019	2880	
30	E003	2880	
6	B001	3360	

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	กลุ่ม
9	B004	3360	กลุ่มที่ 2 จำนวน 20 งาน
10	B005	3360	
13	B008	3360	
23	B018	3360	
29	E002	3360	
39	G002	3360	
40	H001	3360	
28	E001	3840	
22	B017	4800	
3	A003	7200	
17	B012	7200	
31	E004	7200	
34	E007	7200	
37	F001	7200	
4	A004	14400	
8	B003	14400	
20	B015	14400	
21	B016	14400	
36	E009	14400	
38	G001	14400	

ภาพที่ 4-2 ผลการแบ่งกลุ่มงานด้วยวิธี EDD จากปัญหาตัวอย่าง

3. นำงานในกลุ่มย่อยที่ 1 มาจัดตารางการผลิตด้วย MILP I ได้ผลดังภาพที่ 4-3 พบว่ามีเวลาปิดงานของระบบ 2,375 นาที และมีงานสายเกิดขึ้นโดยเวลาสายสูงสุดของงานเท่ากับ 935 นาที ดังนั้นจึงต้องจัดตารางการผลิตใหม่ในขั้นตอนถัดไป

Machine# 1

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B014	81	1006	0	1006	0	0
A001	53	49	1006	1054	0	0
B013	13	2	1054	1056	0	0
B006	33	19	1056	1076	0	0
B002	9	2	1076	1077	0	0
B007	37	19	1077	1097	0	0
E006	17	3	1097	1100	0	0
D001	1	1	1100	1101	0	0
E008	49	32	1101	1133	0	0
E005	21	5	1133	1138	0	0
D002	77	471	1138	1609	0	0
E003	65	76	1609	1685	0	0
B010	5	1	1685	1686	0	0
A005	61	78	1686	1764	0	0
A002	41	19	1823	1842	0	0
B011	29	12	1842	1854	0	0
C001	69	129	1854	1983	0	0
B009	45	32	1983	2015	0	0
B019	73	117	2015	2131	0	0

Machine# 2

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G002	25	7	0	7	0	0
I001	57	60	7	68	0	0

Machine# 3

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B014	82	901	1006	1907	0	0
A005	62	70	1912	1982	0	0
B010	6	1	1982	1983	0	0
C001	70	116	1983	2098	0	0
A001	54	43	2098	2142	0	0
B011	30	10	2142	2152	0	0
B006	34	17	2152	2170	0	0
B019	74	104	2170	2274	0	0
B013	14	2	2274	2276	0	0
A002	42	17	2276	2293	0	0
B002	10	2	2293	2295	0	0
B007	38	17	2310	2328	0	0
B009	46	29	2328	2357	0	0

Machine# 4

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G002	26	7	7	14	0	0
I001	60	54	2321	2375	1920	455

Machine# 5

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E008	51	37	1139	1176	0	0
D001	3	1	1176	1177	0	0
E006	19	4	1177	1181	0	0
D002	79	539	1713	2252	0	0
E005	23	6	2252	2258	0	0
E003	67	87	2263	2350	0	0

Machine# 6

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
D001	2	0	1133	1133	0	0
E008	50	6	1133	1139	0	0
E006	18	1	1139	1140	0	0
D002	78	104	1609	1713	0	0
G002	27	2	1905	1907	0	0
B014	83	192	1907	2099	0	0
B010	7	1	2188	2189	0	0
A005	63	13	2189	2201	0	0
C001	71	27	2201	2228	0	0
E005	22	1	2228	2229	0	0
B011	31	2	2229	2231	0	0
E003	66	13	2231	2244	0	0
B006	35	4	2244	2249	0	0
A001	55	8	2268	2276	0	0
B013	15	0	2276	2276	0	0
I001	58	14	2276	2290	0	0
B019	75	38	2290	2328	0	0
B007	39	5	2328	2333	0	0
B002	11	0	2333	2333	0	0
A002	43	5	2348	2352	0	0
B009	47	7	2357	2364	0	0

Machine# 7

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
I001	59	24	2290	2314	0	0
A005	64	22	2314	2336	1440	896
A002	44	9	2352	2361	2400	0
A001	56	14	2361	2375	2880	0

Machine# 8

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G002	28	2	1907	1908	3360	0
D001	4	0	1908	1909	1440	469
B014	84	150	2099	2249	2400	0
B006	36	3	2249	2252	2400	0
D002	80	81	2252	2333	1920	413
B013	16	0	2333	2333	2400	0
B002	12	0	2333	2334	1440	894
B007	40	4	2334	2338	2880	0
B010	8	1	2338	2338	2400	0
B019	76	29	2338	2367	2880	0
B011	32	2	2367	2369	1920	449
B009	48	6	2369	2375	1920	455

Machine# 9

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E005	24	0	2258	2258	1440	818
E003	68	7	2350	2357	2880	0
E008	52	3	2357	2360	1920	440
C001	72	14	2360	2374	1920	454
E006	20	0	2374	2375	1440	935

เวลาปิดงานของระบบ

เวลาสายสูงสุด

ภาพที่ 4-3 ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP I กลุ่มงานที่ 1

4. จัดตารางการผลิตตามวิธีการ EDD ได้ผลดังภาพที่ 4-4 พบว่ามีเวลาปิดงานของระบบ 3,090 นาที และมีงานสายเกิดขึ้น โดยเวลาสายสูงสุดของงานเท่ากับ 655 นาที ดังนั้นจึงต้องจัดตารางการผลิตใหม่ด้วย MILP II

Machine# 1

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
D001	1	1	0	1	0	0
B002	5	2	1	3	0	0
E006	9	3	3	6	0	0
E005	13	5	6	11	0	0
A005	17	78	11	89	0	0
B011	21	12	89	100	0	0
B009	25	32	100	132	0	0
E008	29	32	132	164	0	0
C001	37	129	164	293	0	0
D002	41	471	293	764	0	0
B010	45	1	764	765	0	0
B013	49	2	765	767	0	0
B006	53	19	767	787	0	0
A002	57	19	787	806	0	0
B014	61	1006	806	1812	0	0
B007	65	19	1812	1831	0	0
A001	69	49	1831	1880	0	0
E003	73	76	1880	1956	0	0
B019	77	117	1956	2072	0	0

Machine# 2

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
I001	33	60	0	60	0	0
G002	81	7	60	68	0	0

Machine# 3

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B002	6	2	3	4	0	0
A005	18	70	89	158	0	0
B011	22	10	158	169	0	0
B009	26	29	169	197	0	0
C001	38	116	293	409	0	0
B010	46	1	765	766	0	0
B013	50	2	767	769	0	0
B006	54	17	787	804	0	0
A002	58	17	806	824	0	0
B014	62	901	1812	2713	0	0
B007	66	17	2713	2730	0	0
A001	70	43	2730	2774	0	0
B019	78	104	2774	2878	0	0

Machine# 4

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
I001	36	54	249	303	1920	0
G002	82	7	303	310	0	0

Machine# 5

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
D001	3	1	1	2	0	0
E006	11	4	7	11	0	0
E005	15	6	12	17	0	0
E008	31	37	211	247	0	0
D002	43	539	868	1407	0	0
E003	75	87	2932	3018	0	0

Machine# 6

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
D001	2	0	1	1	0	0
B002	7	0	4	5	0	0
E006	10	1	6	7	0	0
E005	14	1	11	12	0	0
A005	19	13	158	171	0	0
B011	23	2	171	173	0	0
B009	27	7	197	204	0	0
E008	30	6	204	211	0	0
I001	34	14	211	224	0	0
C001	39	27	409	436	0	0
D002	42	104	764	868	0	0
B010	47	1	868	869	0	0
B013	51	0	869	870	0	0
B006	55	4	870	874	0	0
A002	59	5	874	879	0	0
B014	63	192	2713	2905	0	0
B007	67	5	2905	2910	0	0
A001	71	8	2910	2918	0	0
E003	74	13	2918	2932	0	0
B019	79	38	2932	2969	0	0
G002	83	2	2969	2971	0	0

Machine# 7

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
A005	20	22	171	193	1440	0
I001	35	24	224	249	0	0
A002	60	9	879	887	2400	0
A001	72	14	2918	2932	2880	52

Machine# 8

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
D001	4	0	2	3	1440	0
B002	8	0	5	5	1440	0
B011	24	2	173	175	1920	0
B009	28	6	204	210	1920	0
D002	44	81	1407	1488	1920	0
B010	48	1	1488	1489	2400	0
B013	52	0	1489	1489	2400	0
B006	56	3	1489	1492	2400	0
B014	64	150	2905	3055	2400	655
B007	68	4	3055	3059	2880	179
B019	80	29	3059	3088	2880	208
G002	84	2	3088	3090	3360	0

Machine# 9

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E006	12	0	11	11	1440	0
E005	16	0	17	18	1440	0
E008	32	3	247	251	1920	0
C001	40	14	436	450	1920	0
E003	76	7	3018	3025	2880	145

เวลาปิดงานของระบบ
เวลาสายสูงสุด

ภาพที่ 4-4 ตารางการผลิตที่สร้างจากวิธี EDD กลุ่มงานที่ 1

5. จัดตารางการผลิตด้วย MILP II ได้ผลดังภาพที่ 4-5 พบว่ามีเวลาปิดงานของระบบ 2,514 นาที และมีงานสายเกิดขึ้น โดยเวลาสายสูงสุดของงานเท่ากับ 415 นาที ตารางการผลิตที่ได้จากขั้นตอนนี้จะนำไปใช้สำหรับการผลิตจริงสำหรับงานในกลุ่มนี้

Machine# 1

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B002	5	2	0	2	0	0
B011	21	12	2	13	0	0
A005	17	78	13	91	0	0
B014	61	1006	91	1097	0	0
E008	29	32	1097	1129	0	0
D002	41	471	1129	1600	0	0
E003	73	76	1600	1676	0	0
D001	1	1	1676	1677	0	0
B006	53	19	1677	1696	0	0
B013	49	2	1696	1698	0	0
E005	13	5	1698	1703	0	0
E006	9	3	1703	1706	0	0
B007	65	19	1706	1725	0	0
B009	25	32	1725	1757	0	0
A002	57	19	1757	1777	0	0
A001	69	49	1777	1825	0	0
B010	45	1	1825	1827	0	0
B019	77	117	1827	1943	0	0
C001	37	129	1943	2072	0	0

Machine# 2

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G002	81	7	0	7	0	0
I001	33	60	7	68	0	0

Machine# 3

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B002	6	2	90	91	0	0
A005	18	70	91	161	0	0
B011	22	10	161	171	0	0
B014	62	901	1097	1998	0	0
A002	58	17	1998	2015	0	0
B013	50	2	2015	2017	0	0
B009	26	29	2017	2046	0	0
B006	54	17	2046	2063	0	0
B010	46	1	2063	2064	0	0
B007	66	17	2064	2081	0	0
A001	70	43	2081	2125	0	0
C001	38	116	2125	2240	0	0
B019	78	104	2240	2345	0	0

Machine# 4

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G002	82	7	7	14	0	0
I001	36	54	2281	2335	1920	415

Machine# 5

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E008	31	37	1135	1172	0	0
E005	15	6	1705	1710	0	0
E006	11	4	1710	1714	0	0
D001	3	1	1714	1715	0	0
D002	43	539	1715	2254	0	0
E003	75	87	2316	2403	0	0

Machine# 6

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B011	23	2	171	173	0	0
G002	83	2	173	175	0	0
A005	19	13	175	188	0	0
E008	30	6	1129	1135	0	0
D002	42	104	1600	1704	0	0
E005	14	1	1704	1705	0	0
D001	2	0	1705	1705	0	0
E006	10	1	1706	1707	0	0
B002	7	0	1707	1707	0	0
B014	63	192	1998	2190	0	0
A002	59	5	2190	2195	0	0
B007	67	5	2195	2200	0	0
B010	47	1	2200	2201	0	0
B009	27	7	2201	2208	0	0
I001	34	14	2208	2222	0	0
B006	55	4	2222	2226	0	0
B013	51	0	2226	2227	0	0
A001	71	8	2227	2235	0	0
C001	39	27	2276	2303	0	0
E003	74	13	2303	2316	0	0
B019	79	38	2381	2418	0	0

Machine# 7

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
A005	20	22	1833	1855	1440	415
A002	60	9	2195	2204	2400	0
I001	35	24	2256	2281	0	0
A001	72	14	2282	2296	2880	0

Machine# 8

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
D001	4	0	1715	1715	1440	275
B002	8	0	1855	1855	1440	415
B013	52	0	2227	2227	2400	0
B009	28	6	2227	2233	1920	313
G002	84	2	2233	2234	3360	0
B011	24	2	2234	2236	1920	316
B006	56	3	2236	2239	2400	0
B007	68	4	2239	2243	2880	0
B010	48	1	2253	2254	2400	0
D002	44	81	2254	2335	1920	415
B014	64	150	2335	2485	2400	85
B019	80	29	2485	2514	2880	0

Machine# 9

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E006	12	0	1844	1845	1440	405
E005	16	0	1854	1855	1440	415
E008	32	3	1902	1906	1920	0
C001	40	14	2321	2335	1920	415
E003	76	7	2507	2514	2880	0

เวลาปิดงานของระบบ

เวลาสายสูงสุด

ภาพที่ 4-5 ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP II (W = 0.01) กลุ่มงานที่ 1

จากนั้นพิจารณาต่อไปพบว่ายังจัดงานยังไม่ครบทุกกลุ่มย่อย จึงดำเนินการกำหนดเวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักรสำหรับจัดตารางการผลิตงานในกลุ่มย่อยที่ 2 จากเวลาที่เครื่องจักรแต่เครื่องผลิตงานกลุ่มแรกเสร็จหักด้วยเวลาสายสูงสุดซึ่งเป็นเวลาการผลิตแบบล่วงเวลา ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 เวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักรก่อนการจัดตารางการผลิตงานในกลุ่มย่อยถัดไป

เครื่องจักร	เวลาเสร็จงาน-เวลาสายสูงสุด	เวลาพร้อมผลิต
1	2,072-415	1,657
2	68-415	0
3	2,345-415	1,930
4	2,335-415	1,920
5	2,316-415	1,988
6	2,418-415	2,003
7	2,296-415	1,881
8	2,514-415	2,099
9	2,514-415	2,099

6. จัดตารางการผลิตสำหรับกลุ่มงานย่อยที่สองเริ่มจากการใช้ MILP I ได้ผลดังภาพที่ 4-6 พบว่า มีเวลาปิดงานของระบบ 3,719 นาที และมีงานสายเกิดขึ้น โดยเวลาสายสูงสุดของงานเท่ากับ 359 นาที ดังนั้นจึงต้องจัดตารางการผลิตใหม่ในขั้นตอนถัดไป

Machine# 1

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	25	485	1657	2143	0	0
A003	53	92	2143	2235	0	0
B001	17	214	2235	2449	0	0
E004	37	3	2449	2451	0	0
A004	77	291	2451	2743	0	0
E001	29	12	2743	2754	0	0
B008	21	354	2754	3109	0	0
B004	5	15	3109	3123	0	0
B003	73	165	3123	3288	0	0
B016	69	29	3288	3317	0	0
B012	49	78	3317	3395	0	0
B005	1	12	3395	3407	0	0
B017	33	3	3407	3410	0	0
E009	57	12	3410	3422	0	0
E007	41	8	3422	3430	0	0
B015	61	17	3430	3447	0	0
E002	9	24	3447	3471	0	0

Machine# 2

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
H001	13	35	0	35	0	0
G001	65	22	1898	1920	0	0
F001	45	9	1931	1940	0	0

Machine# 3

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	26	435	2143	2577	0	0
A003	54	83	2577	2660	0	0
B001	18	191	2660	2851	0	0
A004	78	261	2851	3112	0	0
B008	22	317	3112	3430	0	0
B017	34	3	3430	3432	0	0
B003	74	148	3432	3580	0	0
B015	62	16	3580	3596	0	0
B012	50	70	3596	3665	0	0
B016	70	26	3665	3691	0	0
B005	2	11	3691	3702	0	0
B004	6	13	3702	3715	0	0

Machine# 4

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G001	66	20	1920	1940	0	0
F001	46	8	1940	1948	0	0

Machine# 5

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
H001	15	32	2769	2800	0	0
E001	31	13	3631	3644	0	0
E007	43	9	3644	3653	0	0
E002	11	28	3672	3699	0	0
E009	59	13	3699	3713	0	0
E004	39	3	3715	3719	0	0

Machine# 6

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	27	79	2577	2656	0	0
A003	55	16	2660	2676	0	0
E001	30	2	2754	2756	0	0
F001	47	3	2756	2759	0	0
H001	14	10	2759	2769	0	0
B001	19	47	2851	2899	0	0
E002	10	3	3471	3475	0	0
B008	23	68	3475	3542	0	0
A004	79	47	3542	3589	0	0
B017	35	1	3589	3590	0	0
B015	63	3	3596	3599	0	0
E009	58	2	3599	3601	0	0
B003	75	41	3601	3642	0	0
E007	42	2	3642	3644	0	0
B012	51	15	3665	3680	0	0
B016	71	6	3691	3697	0	0
B005	3	3	3702	3705	0	0
G001	67	5	3709	3714	0	0
E004	38	1	3715	3715	0	0
B004	7	2	3715	3717	0	0

Machine# 7

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
A003	56	29	3022	3051	7200	0
A004	80	83	3637	3719	14400	0

Machine# 8

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	28	61	2656	2717	3360	0
B001	20	37	2899	2935	3360	0
B008	24	53	3542	3595	3360	235
B003	76	32	3642	3674	14400	0
B015	64	3	3674	3677	14400	0
B012	52	12	3680	3692	7200	0
B005	4	2	3707	3709	3360	349
B016	72	5	3709	3713	14400	0
B017	36	0	3713	3714	4800	0
G001	68	4	3714	3717	14400	0
B004	8	2	3717	3719	3360	359

Machine# 9

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
H001	16	5	2800	2805	3360	0
E009	60	1	3713	3714	14400	0
E007	44	1	3714	3715	7200	0
F001	48	1	3715	3716	7200	0
E001	32	1	3716	3717	3840	0
E002	12	2	3717	3719	3360	359
E004	40	0	3719	3719	7200	0

เวลาปิดงานของระบบ
เวลาสายสูงสุด

ภาพที่ 4-6 ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP I กลุ่มงานที่ 2

7. จัดตารางการผลิตตามวิธีการ EDD ได้ผลดังภาพที่ 4-7 พบว่า มีเวลาปิดงานของระบบ 3,931 นาที และไม่มีงานสายเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องจัดตารางการผลิตใหม่ด้วย MILP II โดยกำหนดให้ W = 1 และเพิ่มเงื่อนไข $l_{max} = 0$ เพื่อให้การประมวลผลแบบจำลอง MILP II พิจารณาเฉพาะเวลาปิดงานของระบบ

Machine# 1

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B005	1	12	1657	1669	0	0
B004	5	15	1669	1684	0	0
E002	9	24	1684	1708	0	0
B001	17	214	1708	1922	0	0
B008	21	354	1922	2276	0	0
B018	25	485	2276	2762	0	0
E001	29	12	2762	2773	0	0
B017	33	3	2773	2776	0	0
E004	37	3	2776	2779	0	0
E007	41	8	2779	2787	0	0
B012	49	78	2787	2865	0	0
A003	53	92	2865	2957	0	0
E009	57	12	2957	2968	0	0
B015	61	17	2968	2986	0	0
B016	69	29	2986	3015	0	0
B003	73	165	3015	3180	0	0
A004	77	291	3180	3471	0	0

Machine# 2

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
H001	13	35	0	35	0	0
F001	45	9	35	44	0	0
G001	65	22	44	66	0	0

Machine# 3

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B005	2	11	1930	1941	0	0
B004	6	13	1941	1954	0	0
B001	18	191	1954	2145	0	0
B008	22	317	2276	2594	0	0
B018	26	435	2762	3196	0	0
B017	34	3	3196	3199	0	0
B012	50	70	3199	3269	0	0
A003	54	83	3269	3351	0	0
B015	62	16	3351	3367	0	0
B016	70	26	3367	3393	0	0
B003	74	148	3393	3541	0	0
A004	78	261	3541	3802	0	0

Machine# 4

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
F001	46	8	1920	1928	0	0
G001	66	20	1928	1948	0	0

Machine# 5

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E002	11	28	2011	2039	0	0
H001	15	32	2039	2071	0	0
E001	31	13	3277	3290	0	0
E004	39	3	3290	3293	0	0
E007	43	9	3293	3302	0	0
E009	59	13	3369	3383	0	0

Machine# 6

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B005	3	3	2003	2006	0	0
B004	7	2	2006	2008	0	0
E002	10	3	2008	2011	0	0
H001	14	10	2011	2021	0	0
B001	19	47	2145	2192	0	0
B008	23	68	2594	2661	0	0
B018	27	79	3196	3275	0	0
E001	30	2	3275	3277	0	0
B017	35	1	3277	3277	0	0
E004	38	1	3277	3278	0	0
E007	42	2	3278	3280	0	0
F001	47	3	3280	3282	0	0
B012	51	15	3282	3297	0	0
A003	55	16	3351	3367	0	0
E009	58	2	3367	3369	0	0
B015	63	3	3369	3373	0	0
G001	67	5	3373	3377	0	0
B016	71	6	3393	3399	0	0
B003	75	41	3541	3582	0	0
A004	79	47	3802	3849	0	0

Machine# 7

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
A003	56	29	3367	3396	7200	0
A004	80	83	3849	3931	14400	0

Machine# 8

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B005	4	2	2099	2101	3360	0
B004	8	2	2101	2103	3360	0
B001	20	37	2192	2229	3360	0
B008	24	53	2661	2714	3360	0
B018	28	61	3275	3336	3360	0
B017	36	0	3336	3337	4800	0
B012	52	12	3337	3348	7200	0
B015	64	3	3373	3375	14400	0
G001	68	4	3377	3381	14400	0
B016	72	5	3399	3404	14400	0
B003	76	32	3582	3614	14400	0

Machine# 9

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
E002	12	2	2099	2101	3360	0
H001	16	5	2101	2106	3360	0
E001	32	1	3290	3291	3840	0
E004	40	0	3293	3294	7200	0
E007	44	1	3302	3303	7200	0
F001	48	1	3303	3305	7200	0
E009	60	1	3383	3383	14400	0

เวลาปิดงานของระบบ

เวลาสายสูงสุด

ภาพที่ 4-7 ตารางการผลิตที่สร้างจากวิธี EDD กลุ่มงานที่ 2

8. จัดตารางการผลิตด้วย MILP II ได้ผลดังภาพที่ 4-8 พบว่ามีเวลาปิดงานของระบบ 3,789 นาที และไม่มีงานสายเกิดขึ้น ตารางการผลิตที่ได้จากขั้นตอนนี้จะนำไปใช้สำหรับการผลิตจริงสำหรับงานในกลุ่มนี้

Machine# 1

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	25	485	1657	2143	0	0
B015	61	17	2143	2160	0	0
E007	41	8	2174	2181	0	0
B004	5	15	2181	2196	0	0
B008	21	354	2196	2550	0	0
B012	49	78	2550	2628	0	0
B005	1	12	2628	2640	0	0
B017	33	3	2640	2643	0	0
B001	17	214	2643	2857	0	0
E001	29	12	2857	2868	0	0
E004	37	3	2868	2871	0	0
E002	9	24	2871	2896	0	0
A004	77	291	2896	3187	0	0
B016	69	29	3187	3216	0	0
E009	57	12	3216	3228	0	0
B003	73	165	3228	3393	0	0
A003	53	92	3393	3485	0	0

Machine# 2

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G001	65	22	0	22	0	0
F001	45	9	22	31	0	0
H001	13	35	31	66	0	0

Machine# 3

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	26	435	2143	2577	0	0
B008	22	317	2577	2895	0	0
B015	62	16	2895	2911	0	0
B004	6	13	2911	2924	0	0
B001	18	191	2924	3115	0	0
B012	50	70	3115	3184	0	0
B005	2	11	3184	3195	0	0
A004	78	261	3195	3456	0	0
B017	34	3	3456	3459	0	0
B016	70	26	3459	3485	0	0
A003	54	83	3485	3567	0	0
B003	74	148	3567	3715	0	0

Machine# 4

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
G001	66	20	1920	1940	0	0
F001	46	8	2864	2872	0	0

Machine# 5

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
H001	15	32	3220	3251	0	0
E002	11	28	3251	3279	0	0
E007	43	9	3279	3288	0	0
E004	39	3	3288	3291	0	0
E001	31	13	3508	3522	0	0
E009	59	13	3773	3787	0	0

Machine# 6

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	27	79	2577	2656	0	0
G001	67	5	2656	2661	0	0
E004	38	1	2871	2872	0	0
F001	47	3	2872	2875	0	0
B008	23	68	3132	3200	0	0
E007	42	2	3200	3202	0	0
B005	3	3	3202	3205	0	0
E002	10	3	3205	3208	0	0
B004	7	2	3208	3210	0	0
H001	14	10	3210	3220	0	0
B001	19	47	3220	3267	0	0
B012	51	15	3267	3282	0	0
B017	35	1	3459	3459	0	0
A004	79	47	3459	3507	0	0
E001	30	2	3507	3508	0	0
B015	63	3	3508	3512	0	0
A003	55	16	3567	3584	0	0
E009	58	2	3584	3585	0	0
B016	71	6	3709	3715	0	0
B003	75	41	3715	3757	0	0

Machine# 7

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
A004	80	83	3678	3760	14400	0
A003	56	29	3760	3789	7200	0

Machine# 8

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
B018	28	61	3206	3267	3360	0
B001	20	37	3267	3304	3360	0
B008	24	53	3304	3356	3360	0
B005	4	2	3356	3358	3360	0
B004	8	2	3358	3360	3360	0
G001	68	4	3709	3712	14400	0
B015	64	3	3712	3715	14400	0
B017	36	0	3715	3715	4800	0
B016	72	5	3715	3720	14400	0
B012	52	12	3745	3757	7200	0
B003	76	32	3757	3789	14400	0

Machine# 9

Job	Oper_n	P	st	c	d	l
H001	16	5	3274	3279	3360	0
E002	12	2	3279	3281	3360	0
E001	32	1	3522	3522	3840	0
E004	40	0	3785	3785	7200	0
F001	48	1	3785	3787	7200	0
E009	60	1	3787	3788	14400	0
E007	44	1	3788	3789	7200	0

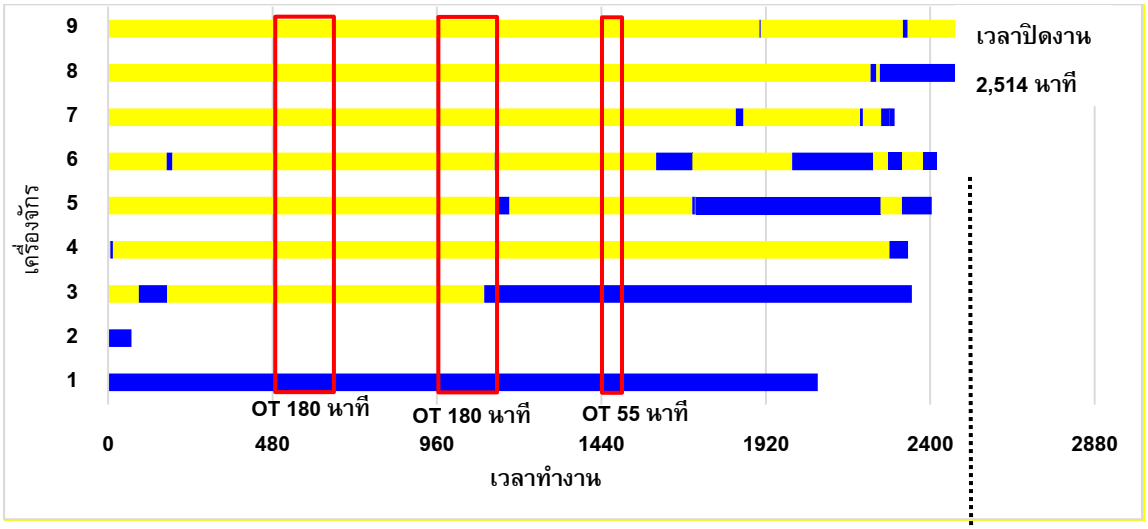
เวลาปิดงานของระบบ

เวลาสายสูงสุด

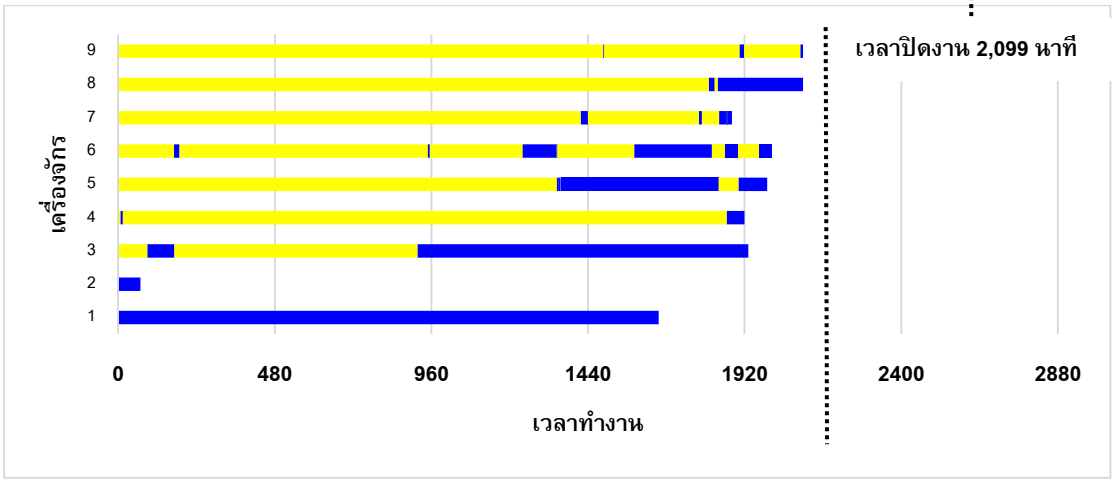
ภาพที่ 4-8 ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP II (W = 1, l_{max} = 0) กลุ่มงานที่ 2

จากนั้นพิจารณาต่อไปพบว่ายังจัดงานครบทุกกลุ่มย่อยแล้ว จึงสรุปผลที่ได้จากตารางการผลิตที่สร้างขึ้นจากทั้งสองกลุ่มงาน ได้ว่าวิธีการที่เสนอสามารถจัดตารางการผลิตของงานทั้งหมด 41 งานให้ส่งมอบได้ทันตามกำหนด โดยต้องทำงานล่วงเวลา 415 นาที จากตารางการผลิตของกลุ่มงานที่ 1 กำหนดให้ทำงานล่วงเวลา 415 นาที (จากภาพที่ 4-5 เวลาสายสูงสุดเท่ากับ 415 นาที)

ผู้วางแผนต้องกำหนดช่วงเวลาในการทำงานล่วงเวลา จากตัวอย่างนี้กำหนดให้ทำงานล่วงเวลา 180 นาที หลังการผลิตไปแล้วในเวลาทำงานปกติ 480 และ 960 นาที รวมทำงานล่วงเวลา 360 นาที และหลังการผลิตไปแล้วในเวลาทำงานปกติ 1,440 นาที ให้ทำงานล่วงเวลาอีก 55 นาที และจากตารางการผลิตของกลุ่มที่สองไม่มีงานสายเกิดขึ้นจึงไม่ต้องกำหนดการทำงานล่วงเวลา สรุปผลภาพร่างของตารางการผลิตก่อนและหลังการทำงานล่วงเวลา ดังภาพที่ 4-9 และเวลาผลิตเสร็จของงานทุกงานเมื่อเทียบกับกำหนดส่งมอบหลังการทำงานล่วงเวลา ดังตารางที่ 4-2 ส่วนแรเงาแสดงงานที่เสร็จช้ากว่ากำหนดหากไม่มีการทำงานล่วงเวลา



ก่อนการทำงานล่วงเวลา



หลังการทำงานล่วงเวลา

ภาพที่ 4-9 ตารางการทำงานของเครื่องจักรก่อนและหลังการทำงานล่วงเวลา

ตารางที่ 4-2 เวลาผลิตเสร็จเทียบกับกำหนดส่งมอบหลังการทำงานล่วงเวลา

งาน	กำหนดส่งมอบ	เวลาผลิตเสร็จ	
		ก่อนการทำงานล่วงเวลา	หลังการทำงานล่วงเวลา
A001	2880	2296	1881
A002	2400	2204	1789
A003	7200	3789	3789
A004	14400	3760	3760
A005	1440	1855	1440
B001	3360	3304	3304
B002	1440	1855	1440
B003	14400	3789	3789
B004	3360	3360	3360
B005	3360	3358	3358
B006	2400	2239	1824
B007	2880	2243	1828
B008	3360	3356	3356
B009	1920	2233	1818
B010	2400	2254	1839
B011	1920	2236	1821
B012	7200	3757	3757
B013	2400	2227	1812
B014	2400	2485	2070
B015	14400	3715	3715
B016	14400	3720	3720
B017	4800	3715	3715
B018	3360	3267	3267
B019	2880	2514	2099
C001	1920	2335	1920
D001	1440	1715	1300

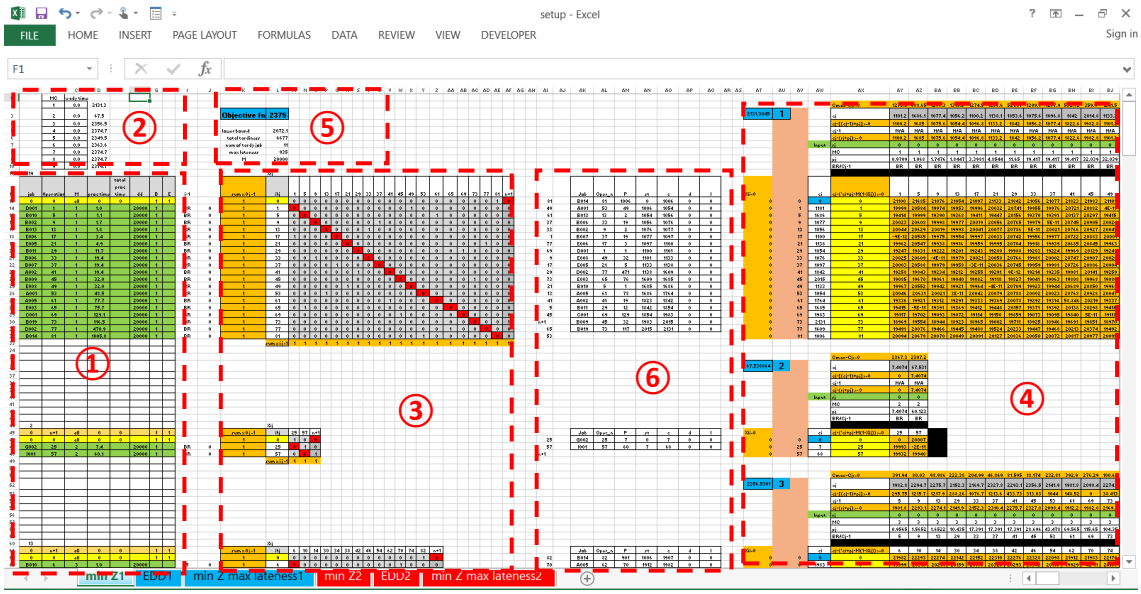
ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

งาน	กำหนดส่งมอบ	เวลาผลิตเสร็จ	
		ก่อนการทำงานล่วงเวลา	หลังการทำงานล่วงเวลา
D002	1920	2335	2335
E001	3840	3522	3522
E002	3360	3281	3281
E003	2880	2514	2099
E004	7200	3785	3785
E005	1440	1855	1440
E006	1440	1845	1430
E007	7200	3789	3789
E008	1920	1906	1491
E009	14400	3788	3788
F001	7200	3787	3787
G001	14400	3712	3712
G002	3360	2234	1819
H001	3360	3279	3279
I001	1920	2335	1920

การใช้ซอฟต์แวร์ OpenSolver สำหรับหาผลลัพธ์ของ MILP

งานวิจัยนี้เลือกใช้โอเพ่นซอร์สซอฟต์แวร์ (Open source software) สำหรับหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่จำกัดจำนวนตัวแปรในการตัดสินใจ คือ โปรแกรม OpenSolver เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ประเภท Add-in ในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลที่ไม่ต้องเขียนภาษาจำลองตัวแบบ ส่วนตัวประมวลผล (Solver engine) เลือกใช้โปรแกรม Gurobi 7.0.2 เนื่องจากมีความสามารถในการเริ่มค้นหาผลลัพธ์จากผลลัพธ์ตั้งต้นที่เป็นไปได้ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของฮิวริสติกแบบ MILP ที่เสนอที่ต้องการค้นหาผลลัพธ์บางขั้นตอนต้องเริ่มค้นหาตารางการผลิตที่สร้างจากวิธีการ EDD รายละเอียดในการใช้ซอฟต์แวร์ OpenSolver สำหรับสร้างตารางการผลิตในงานวิจัยนี้ดังภาพที่ 4-10 แสดงตัวอย่างไฟล์ Setup ที่ประกอบด้วยแผ่นงาน 6 แผ่นงาน แผ่นงานที่ 1-3

และ 4-6 สำหรับการสร้างตารางการผลิตในกลุ่มย่อยที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ในชุดแผ่นงานที่ 1 และ 4 แสดงตัวแบบ MILP I แผ่นงานที่ 2 และ 5 แสดงค่าตัวแปรตัดสินใจและฟังก์ชั่นจุดประสงค์ตามตัวแบบ MILP ที่มีลำดับงานบนแต่ละเครื่องจักรตามวิธีการ EDD แผ่นงานที่ 3 และ 6 แสดงตัวแบบ MILP II หมายเลขต่าง ๆ บนภาพที่ 4-10 แสดงรายละเอียดของตัวแบบดังนี้



ภาพที่ 4-10 ตัวอย่างแผ่นงาน MILP I ของไฟล์เอ็กเซลสำหรับจัดตารางการผลิต

หมายเลข 1 แสดงส่วนของข้อมูลนำเข้าบนเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ได้แก่ ชื่องาน ลำดับ Operation เวลาการผลิต กำหนดส่งมอบ

หมายเลข 2 แสดงเวลาพร้อมผลิตของเครื่องจักร

หมายเลข 3 แสดงตัวแปรตัดสินใจลำดับงานบนเครื่องจักร x_{ijk} และข้อจำกัดตามสมการที่ 4-2 ถึง สมการที่ 4-4

หมายเลข 4 แสดงตัวแปรตัดสินใจเวลาผลิตเสร็จ c_i และข้อจำกัดตามสมการที่ 4-5 ถึง สมการที่ 4-8

หมายเลข 5 แสดงตัวแปรตัดสินใจเวลาปิดงาน c_{max} และฟังก์ชั่นจุดประสงค์ตามสมการที่ 4-1

หมายเลข 6 แสดงตารางการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง

สำหรับแผ่นงานอื่น ๆ จะมีลักษณะโครงสร้างตัวแบบเอ็กเซลใกล้เคียงกัน การใช้งานตัวแบบเอ็กเซลนี้ทำได้โดยการกำหนดข้อมูลนำเข้าของปัญหาหนึ่ง ๆ ลงบนส่วนข้อมูลนำเข้าหมายเลข 1 และ 2 แล้วใช้โปรแกรม OpenSolver ที่มีการกำหนดเชื่อมโยงเซลล์ฟังก์ชั่นจุดประสงค์และสมการข้อจำกัดไว้เพื่อเตรียมตัวแบบคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปแบบการคำนวณของโปรแกรม OpenSolver ด้วยวิธีการตามบทที่ 2 จากนั้นเมื่อโปรแกรมหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมเสร็จแล้ว จะแสดงตารางการผลิตที่มีรายละเอียดประกอบด้วย ลำดับการผลิตบนเครื่องจักรทุกเครื่อง เวลาเริ่มผลิต เวลาผลิตเสร็จ ของทุก Operation และกำหนดส่งมอบกับเวลาสายของ Operation สุดท้ายของทุกงาน

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการจัดตารางการผลิต

การทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมที่เสนอเริ่มจากการกำหนดปริมาณงานขั้นต่ำที่ต้องแยกปัญหาเป็นกลุ่มย่อย การสร้างกลุ่มปัญหาตัวอย่าง จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการจัดตารางการผลิตกับการจัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

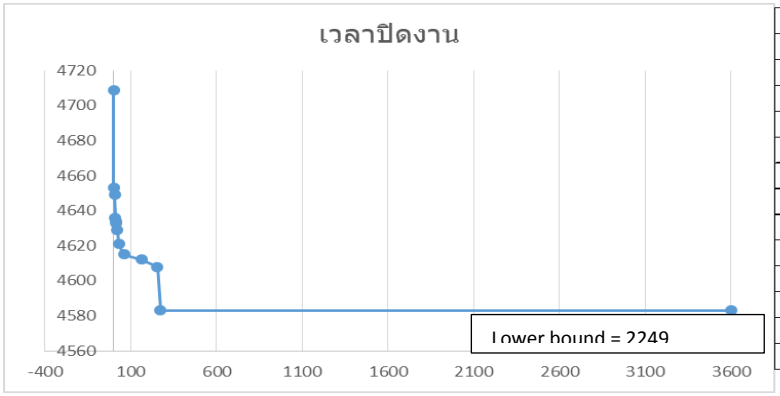
1. การกำหนดปริมาณงานขั้นต่ำที่ต้องแยกปัญหาเป็นกลุ่มย่อย เป็นการกำหนดว่าเมื่อใดต้องแบ่งงานออกเป็นกลุ่มย่อย เนื่องจากปัญหาจริงจากกรณีศึกษามีเพียง 1 ปัญหา จึงทำการทดสอบการจัดตารางการผลิตจากปัญหาจริงจำนวน 41 งานนี้ และเปรียบเทียบผลการจัดตารางการผลิตจากการทดสอบสามแบบด้วยโปรแกรม OpenSolver บนซอฟต์แวร์ Microsoft Excel และโปรแกรมประมวลผล Gurobi 7.0.2 ประกอบด้วย ตัวแบบ MILP ของทุกงาน ตัวแบบ MILP โดยแบ่งงานแยกเป็น 2 กลุ่มเท่า ๆ กัน (กลุ่มละประมาณ 20 งาน) และ 3 กลุ่มเท่า ๆ กัน (กลุ่มละประมาณ 15 งาน) การค้นหาผลลัพธ์กำหนดให้ใช้ตัวแบบ MILP I (Mininmize makespan) ที่เวลาการประมวลผลสูงสุด 3,600 วินาที (1 ชั่วโมง) ได้ผลดังตารางที่ 4-3 และผลลัพธ์ระหว่างการรันโปรแกรมที่ช่วงเวลาการประมวลผลต่าง ๆ ดังภาพที่ 4-10

ตารางที่ 4-3 เวลาปิดงานเมื่อจัดตารางการผลิตด้วย MILP ของปัญหากรณีศึกษา 41 งาน

จำนวนงานในกลุ่มย่อย	เวลาการประมวลผล (วินาที)	เวลาที่พบผลลัพธ์* (วินาที)	เวลาปิดงานของระบบ* (นาที)
41 งาน	3,600	274	4,583
กลุ่มย่อยที่ 1/ 2 จำนวน 21/ 20 งาน	1,800/ 1,800	1,010**	3,992
กลุ่มย่อยที่ 1/ 2/ 3 จำนวน 15/ 13/ 13 งาน	1,200/ 1,200/ 1,200	520**	4,091

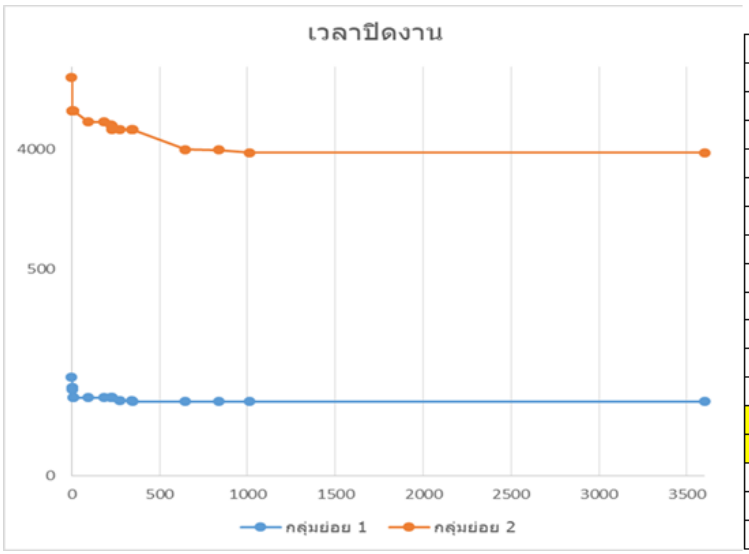
หมายเหตุ: *เป็นผลลัพธ์ดีที่สุดที่โปรแกรมประมวลได้ภายใต้เวลาประมวลผลสูงสุดที่กำหนด

**แสดงค่ามากที่สุดของทุกกลุ่มย่อย



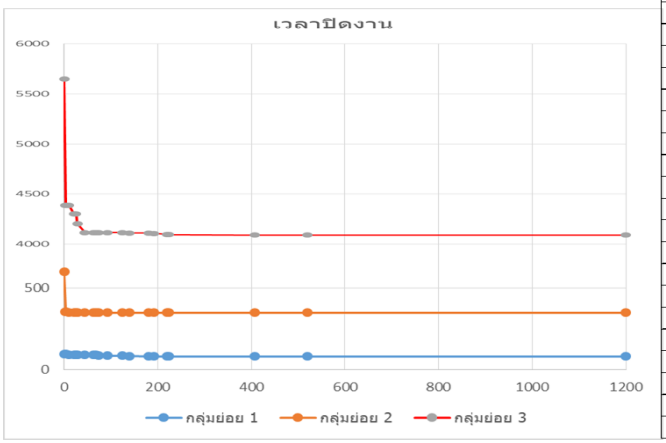
เวลาการประมวล	เวลาปิดงาน
0	4709
1	4653
7	4649
9	4636
12	4634
14	4633
21	4629
32	4621
62	4615
162	4612
255	4608
274	4583
3600	4583

(ก) ผลการรันโปรแกรมของปัญหา 41 งาน



	เวลาปิดงาน	
เวลาการประมวล	กลุ่มย่อย 1	กลุ่มย่อย 2
0	239	4174
1	213	4093
3	211	4093
4	208	4093
7	189	4093
95	189	4066
223	189	4059
228	189	4057
229	189	4047
271	182	4047
343	181	4047
348	179	4047
646	179	3999
834	179	3998
1010	179	3992
1800	179	3992
Lower bound	51	2414

(ข) ผลการรันโปรแกรมของปัญหากลุ่มย่อยที่ 1/2 จำนวน 21/20 งาน



	เวลาปิดงาน		
เวลาประมวลผล	กลุ่มย่อย 1	กลุ่มย่อย 2	กลุ่มย่อย 3
0	96	600	5646
3	96	355	4387
5	96	355	4387
10	91	352	4387
21	91	349	4303
25	91	350	4303
28	91	350	4205
44	91	350	4117
63	91	349	4117
67	90	349	4117
73	87	349	4117
92	86	349	4117
125	85	349	4117
140	83	349	4111
180	82	349	4111
192	82	349	4106
219	82	349	4099
223	82	349	4095
408	82	349	4091
520	81	349	4091
1200	81	349	4091
Lower bound	30	179	2481

(ค) ผลการรันโปรแกรมของปัญหากลุ่มย่อยที่ 1/2 จำนวน 21/20 งาน

ภาพที่ 4-11 ผลลัพธ์ระหว่างการรันโปรแกรมที่ช่วงเวลาการประมวลผลต่าง ๆ

ผลลัพธ์เวลาปิดงานของระบบจากตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-11 พบว่า ปริมาณงานในกลุ่มย่อยประมาณ 20 งานให้ผลเวลาปิดงานของระบบดีที่สุด และหลังจากประมวลผลไปแล้วประมาณ 1,000 วินาที โปรแกรมไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้จนกระทั่งประมวลผลครบ 1,800 วินาที จากที่งานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานของปริมาณงานสำหรับการจัดตารางการผลิตว่า มีจำนวนงานที่ต้องจัดตารางการผลิตต่อรอบประมาณ 40-50 งาน ดังนั้นวิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้แบ่งงานย่อยออกเป็นสองกลุ่มในปริมาณเท่ากันประมาณ 20-25 งาน และกำหนดเวลาสูงสุดในการประมวลผลที่ 900 วินาทีต่อการรันหนึ่งครั้ง เนื่องจากฮิวริสติกส์ที่เสนออาจต้องประมวลผล MILP รวมสูงสุด 4 ครั้ง ซึ่งจะทำให้เวลาประมวลผลทั้งหมดไม่เกิน 1 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-9 (ข) การใช้เวลาประมวลผล 900 วินาทีให้ผลลัพธ์ที่ดีเพียงพอ

อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบเวลาปิดงานที่คำนวณได้ (Best solution หรือ Best feasible solution, BFS) กับเวลาปิดงานที่ดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (Best possible solution หรือ Lower bound, LB) พบว่ามีความแตกต่างกันไม่น้อยกว่า 39% (คำนวณจาก [(BFS-LB)/BFS]*100%) ซึ่งเป็นค่าที่มากสำหรับการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมจากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม แต่สำหรับกรณีการประมวลนี้ที่เสนอนี้จัดเป็นลักษณะตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาที่ซับซ้อนทำให้โปรแกรม Gurobi ไม่สามารถหาค่า Lower bound ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของปัญหาได้ จากปัญหาที่ทดสอบ Lower bound จากโปรแกรมมีค่าเท่ากับ 2,249 นาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ผลรวมของเวลาการผลิตของทุกงานบนเครื่องจักรที่ 1 ซึ่งใช้สำหรับผลิตงานในขั้นตอนแรกของงาน 36 งาน จาก 41 งานที่ทดสอบ มีค่าเท่ากับ 3,890 นาที (ซึ่งเป็นค่าเวลาปิดงานต่ำที่สุดที่ยังไม่สามารถเป็นไปได้ของปัญหานี้)

2. การสร้างกลุ่มปัญหาจำลองสำหรับทดสอบ กลุ่มปัญหาจำลองประกอบด้วยปัญหา 15 ปัญหา แต่ละปัญหามีปริมาณงาน 41 ถึง 50 งาน ประเภทของปัญหาจำลองแบ่งออกเป็น 3 แบบ แบบแรกเป็นปัญหาต้นแบบ 1 ปัญหา (มีอัตราส่วนผลรวมเวลาส่งมอบทั้หมดต่อผลรวมเวลาผลิตทั้งหมดเท่ากับ 21.5) แบบที่สองเป็นปัญหาที่ปรับแต่งจากปัญหาต้นแบบ 3 ปัญหา และแบบที่สามเป็นปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ภายใต้การสุ่มปริมาณคำสั่งซื้อของกลุ่มงานที่ใกล้เคียงกับปัญหาจริงจำนวน 2 ชุด ความแตกต่างของชุดปัญหาจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ คือ ชุดที่ 1 มี 6 ปัญหา โดยจำลองกำหนดส่งมอบด้วยอัตราส่วนผลรวมเวลาส่งมอบทั้หมดต่อผลรวมเวลาผลิตทั้งหมดสูงกว่าชุดที่ 2 (5 ปัญหา) สรุปปัญหาที่ใช้ในการทดสอบได้ดังตารางที่ 4-4 และรายละเอียดคำสั่งซื้อของปัญหาที่ 2 ถึง 15 ดังภาคผนวก ค

ตารางที่ 4-4 ปัญหาสำหรับทดสอบ

ปัญหาที่	รายละเอียด
1	ปัญหาต้นแบบ
2	เพิ่มปริมาณคำสั่งซื้อจากปัญหาต้นแบบ 3.2%*
3	ลดปริมาณคำสั่งซื้อจากปัญหาต้นแบบ 20.34%*
4	เปลี่ยนกำหนดส่งมอบจากปัญหาต้นแบบ 29.66%*
5-10	ปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จำนวนงานเท่ากับ 45-50 งาน อัตราส่วนผลรวมเวลาส่งมอบทั้งหมดต่อผลรวมเวลาผลิตทั้งหมดประมาณ 21
11-15	ปัญหาจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จำนวนงานเท่ากับ 45-50 งาน อัตราส่วนผลรวมเวลาส่งมอบทั้งหมดต่อผลรวมเวลาผลิตทั้งหมดประมาณ 18

หมายหตุ: * เป็นค่าที่ประมาณจากการเปลี่ยนแปลงคำสั่งซื้อและกำหนดส่งมอบจากข้อมูลโรงงานแห่งหนึ่ง

3. การทดสอบประสิทธิภาพวิธีการจัดตารางการผลิต

การสร้างตารางการผลิตด้วยโปรแกรม OpenSolver ของงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผล Gurobi 7.0.2 โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการประมวลผล 2 ค่า คือ เวลาสูงสุดของการประมวลผล (เวลาซีพียู) ที่ 900 วินาที ภายใต้สมมติฐานของการสร้างตารางการผลิตให้เสร็จภายใน 1 ชั่วโมง (3,600 วินาที) โดยที่วิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอมีจำนวนครั้งสูงสุดที่ต้องรันโปรแกรม 4 ครั้ง และค่าเผื่อการแตกกิ่งและขอบเขต 0.01% ค่าพารามิเตอร์สองค่านี้กำหนดจากการทดลองโดยผลการทดลองดังได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ก่อนหน้านี้

การทดสอบประสิทธิภาพวิธีการจัดตารางการผลิตที่เสนอ (MILP_H) ด้วยการเปรียบเทียบกับวิธีการ EDD โดยมีดัชนีชี้วัด 2 ค่า คือ เวลาปิดงานของระบบ และเวลาสายสูงที่สุดของงานทุกงาน การทดสอบนี้เป็นการจัดตารางการผลิตครั้งละ 1 ปัญหา ทุกปัญหามีเวลาพร้อมทำงานของเครื่องจักรทุกเครื่อง พร้อมกันเท่ากับศูนย์นาที และหากต้องมีการทำงานล่วงเวลากำหนดให้ทำงานล่วงเวลาได้วันละไม่เกิน 480 นาที ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4-5 พบว่าในภาพรวมของการทดสอบ ตารางการผลิตที่สร้างจาก MILP_H มีเวลาปิดงานของระบบเมื่อพิจารณาเฉพาะเวลาทำงานปกติและรวมการทำงานล่วงเวลาลดลง 3.02% และ 4.22% ตามลำดับ เวลาสายสูงสุดของทุกงานลดลง 74 นาทีคิดเป็นการลดลง 22.62% เมื่อพิจารณาเฉพาะปัญหาที่ไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้ไม่มีงานสายได้ด้วยวิธี EDD ทั้งสิ้น 9 ปัญหา พบว่า วิธีการ MILP_H

สามารถจัดตารางการผลิตลดเวลาสายสูงสุดลงได้ทุกปัญหา โดยมี 1 ปัญหา (ปัญหาที่ 4) ที่วิธี MILP_H สร้างตารางการผลิตที่ไม่มีงานสายได้ และมี 2 ปัญหา (ปัญหาที่ 5 และ 13) ที่เวลาปิดงานรวมการทำงานล่วงเวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนอีก 6 ปัญหาที่วิธีการ EDD สร้างตารางการผลิตที่ไม่มีงานสายนั้น พบว่า วิธีการ MILP_H สามารถสร้างตารางการผลิตที่ไม่มีงานสายเช่นกัน และยังสามารถลดเวลาปิดงานของระบบได้ 5 ปัญหา ส่วนอีกหนึ่งปัญหา (ปัญหาที่ 6 มีเวลาปิดงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย)

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบ

ปัญหาที่	จำนวนงาน	เวลาปิดงาน*		เวลาสายสูงสุด*		เวลาปิดงานรวมทำงานล่วงเวลา*	
		EDD	MILP_H**	EDD	MILP_H	EDD	MILP_H
1	41	3,925	3,789	655	415	4,580	4,224
2	41	3,974	3,907	655	399	4,625	4,306
3	41	3,860	4,043	319	117	4,179	4,160
4	41	2,517	2,501	115	0	2,632	2501
5	49	4,846	4,921	632	581	5,478	5,502
6	45	5,174	5,218	0	0	5,174	5,218
7	49	4,846	4,872	632	538	5,478	5,410
8	49	5,979	5,618	0	0	5,979	5,618
9	50	6,660	5,753	0	0	6,660	5,753
10	50	5,418	4,753	649	525	6,067	5,278
11	49	4840	4,823	638	634	5,478	5,457
12	45	5,174	5,150	0	0	5,174	5,150
13	49	4840	4902	638	608	5,478	5,510
14	49	5,984	5,618	0	0	5,984	5,618
15	50	5,403	5,357	0	0	5,403	5,357
เฉลี่ย	46.5	4,896	4,748	329	254	5225	5004
diff		148		74		220	
%***		3.02%		22.62%		4.22%	

หมายเหตุ: * หน่วยเวลา : นาที

** MILP_H = ฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

*** diff = ผลลัพธ์เฉลี่ยจาก EDD - ผลลัพธ์เฉลี่ยจาก MILP_H

% = (diff / ผลลัพธ์จาก EDD)*100%

บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผล

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการในการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบตามงานของปัญหากรณีศึกษาของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากงานวิจัยของ Kowmanee (2014) ที่มีกระบวนการผลิตทั้งหมด 4 ขั้นตอน จำนวนเครื่องจักรรวมทุกขั้นตอนการผลิตเท่ากับ 9 เครื่อง กลุ่มชิ้นส่วนที่ผลิตมีทั้งหมด 9 กลุ่ม แต่ละกลุ่มงานอาจต้องผ่านขั้นตอนการผลิตทุกขั้นตอนหรือไม่ก็ได้ แต่จะถูกกำหนดเครื่องจักรสำหรับการผลิตของแต่ละกลุ่มงานไว้ ในรอบการจัดตารางการผลิตหนึ่งมีงานที่ต้องจัดตารางการผลิตประมาณ 40-50 งาน งานวิจัยนี้ได้เสนอฮิวริสติกแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed integer linear programming based heuristic) สำหรับจัดตารางการผลิตที่ทำให้เวลาปิดงานในระบบและเวลาสายสูงสุดของทุกงานต่ำที่สุด

ฮิวริสติกที่เสนอถูกออกแบบให้มีการแบ่งงานที่ต้องจัดตารางการผลิตออกเป็นสองกลุ่ม โดยใช้เกณฑ์การแบ่งกลุ่มตามกำหนดส่งมอบของงานกลุ่มแรกที่เร็วกว่ากลุ่มที่สอง แล้วใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมในการจัดตารางการผลิตที่ทำให้เวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุด (MILP I) ครั้งละกลุ่มย่อย หากพบว่าสามารถส่งงานได้ตามกำหนดทุกงานแสดงว่าตารางการผลิตนี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตได้ กรณีที่พบงานที่ส่งไม่ทันตามกำหนดเวลาให้จัดตารางการผลิตด้วยวิธี EDD ก่อน แล้วใช้เป็นผลลัพธ์ตั้งต้น (Initial solution) สำหรับการสร้างตารางการผลิตด้วยแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมที่ทำให้ผลรวมถ่วงน้ำหนักของเวลาปิดงานและเวลาสายสูงสุดของทุกงานมีค่าน้อยที่สุด (MILP II) โดยกรณีที่จัดตารางด้วยวิธี EDD แล้วไม่มีงานสายเกิดขึ้นจะถ่วงน้ำหนัก 100% ให้กับเวลาปิดงานแล้วเพิ่มเงื่อนไขของแบบจำลองให้เวลาผลิตเสร็จของงานต้องไม่เกินกำหนดส่งมอบ หากมีงานสายเกิดขึ้นจะถ่วงน้ำหนัก 1% ให้กับเวลาปิดงาน เพื่อให้การประมวลผลของโปรแกรมให้น้ำหนักไปกับการลดเวลาสายสูงสุดของทุกงาน ซึ่งจะทำให้ได้ตารางการผลิตที่ใช้เวลาการทำงานล่วงเวลาน้อยที่สุด ขณะที่ยังสามารถลดเวลาปิดงานของระบบลงได้ด้วย โปรแกรม OpenSolver และตัวหาผลลัพธ์ (Solver engine) Gurobi 7.0.2 ถูกนำมาใช้สำหรับประมวลผลสร้างตารางการผลิตในงานวิจัยนี้

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง MILP เริ่มจากการกำหนดขนาดกลุ่มงานย่อย พบว่าสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตกรณีศึกษาจำนวน 41 งานนั้น การแบ่งงานออกเป็นสองกลุ่ม ๆ ละเท่า ๆ กัน ทำให้ได้ผลเวลาปิดงานที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับการไม่แบ่งกลุ่มงาน

หรือการแบ่งกลุ่มงานเป็น 3 กลุ่มย่อย และการกำหนดเวลาการประมวลผลสูงสุดในการหาผลลัพธ์ MILP ครั้งหนึ่ง ๆ ที่ 900 วินาทีนั้นเพียงพอที่จะทำให้ได้ตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานของระบบต่ำ

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอกับวิธีการ EDD ซึ่งเป็นวิธีการเดิมที่บริษัทกรณีศึกษาใช้ในการจัดตารางการผลิต ทำได้โดยการจัดตารางการผลิตของปัญหาจริง 1 ปัญหา และปัญหาที่จำลองจากคอมพิวเตอร์จำนวน 14 ปัญหา ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับปัญหาจริง พบว่าตารางการผลิตที่สร้างจากวิธีการที่เสนอมีเวลาปิดงานรวมการทำงานล่วงเวลาลดลงโดยเฉลี่ย 220 นาที และมีเวลาสายสูงสุดลดลงโดยเฉลี่ย 74 นาที คิดเป็นการลดลง 4.22% และ 22.62% เมื่อเทียบกับตารางการผลิตที่สร้างจากวิธี EDD จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่เสนอสำหรับแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงานของบริษัทกรศึกษาได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ทฤษฎีการวิจัยการดำเนินงานโดยการพัฒนาแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-integer linear programming: MILP) เพื่อใช้สำหรับการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน เมื่อนำแบบจำลองมาใช้ในการสร้างตารางการผลิตจากปัญหาจริงของบริษัทกรณีศึกษาที่มีจำนวนงาน 41 งาน โดยมีจุดประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบต่ำที่สุด พบว่าไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้ เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน (NP-hard) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการจัดตารางการผลิต ดังนั้นการแก้ไขปัญหานี้สำหรับการจัดตารางการผลิตที่มีจำนวนงานที่ต้องจัดเป็นจำนวนมากจึงต้องใช้ฮิวริสติกหรือเมตาฮิวริสติกเข้าช่วย

งานวิจัยนี้เลือกใช้ฮิวริสติกแบบกำหนดเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมภายใต้แนวคิดในการแบ่งงานออกเป็นกลุ่มย่อย แล้วนำตารางการผลิตของกลุ่มย่อยมาต่อกัน เพื่อให้สามารถใช้โปรแกรมเอ็กเซลในการประมวลผลสร้างตารางการผลิตได้จากโปรแกรม OpenSolver โดยไม่เลือกออกแบบเมตาฮิวริสติกในการแก้ปัญหานี้เพราะต้องอาศัยความชำนาญในการเขียนโปรแกรมประมวลผล ปัญหานี้ยังมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นเมื่อกำหนดสมมติฐานว่าหากผลิตงานไม่ทันกำหนดส่งมอบต้องแก้ปัญหาเบื้องต้นด้วยการทำงานล่วงเวลาก่อนการดำเนินการอย่างอื่น จึงทำให้ปัญหานี้เป็นการจัดตารางการผลิตแบบสองจุดประสงค์ คือ การลดเวลาปิดงานของระบบ และการทำให้เวลาการทำงานล่วงเวลาต่ำที่สุดด้วย ซึ่งทำให้วิธีการที่เสนอมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และต้องใช้เวลาในการสร้างตารางการผลิตนานขึ้นด้วย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอแสดงให้เห็นว่าฮิวริสติกกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยมีผลเวลาปิดงานของระบบโดยเฉลี่ยลดลงเมื่อเทียบกับวิธีการ EDD และสามารถลดเวลาเฉลี่ยในการทำงานล่วงเวลาลงได้ด้วย (เวลาสายสูงสุด

เฉลี่ยลดลง) อย่างไรก็ตามปัญหาหนึ่งที่การจัดตารางการผลิตด้วยวิธีการ EDD แล้วไม่เกิดงานสาย และยังมีเวลาปิดงานของระบบต่ำกว่าวิธีการที่เสนอ ทั้งที่วิธีการที่เสนอได้ออกแบบให้แยกกลุ่มงานออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ตามลำดับกำหนดส่งมอบและเริ่มประมวลผลจากลำดับงานที่สร้างขึ้นจากวิธี EDD จึงคาดว่าการประมวลผลสร้างตารางการผลิตครั้งละกลุ่มงานย่อยอาจทำให้ตารางการผลิตที่สร้างจากวิธีการที่เสนอมีเวลาปิดงานของระบบที่สูงกว่าวิธีการ EDD ใน 1 ปัญหาทดสอบที่ไม่พบงานสาย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรสร้างระบบช่วยในการตัดสินใจ (Decision support system) ด้วย Excel VBA มาจัดการกับไฟล์แบบจำลองเอ็กเซล เพื่อให้กระบวนการประมวลผลเป็นอัตโนมัติ โดยผู้จัดตารางเพียงป้อนข้อมูลนำเข้าของรอบการจัดตารางการผลิตหนึ่ง ๆ จะทำให้วิธีการที่เสนอสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย (User friendly)

2. การแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตนี้ควรใช้วิธีการหลาย ๆ วิธี แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพตารางการผลิตที่สร้างขึ้นก่อนเลือกนำไปใช้จริง และอาจออกแบบเมตาฮิวริสติกสำหรับแก้ไขปัญหานี้เพิ่มเติมเพราะเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนภายใต้เวลาการประมวลที่รวดเร็ว

บรรณานุกรม

ชัยวัฒน์ เสนีวงค์ ณ อยุธยา. (2555). การจัดตารางการผลิตแบบแอคทีฟสำหรับการจัดตารางการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์ : กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการโซ่อุปทานแบบบูรณาการ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

ชุมพล ศฤงคารศิริ. (2536). การวางแผนและควบคุมการผลิต (ฉบับปรับปรุง).พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

บรรหาญ ลิลา. (2553). การวางแผนและควบคุมการผลิต. กรุงเทพฯ: ท้อป.

พิภพ ลลิตาภรณ์. (2553). การกำหนดตารางการผลิตและการควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 15 สำนักพิมพ์ ส.ส.ท

ยอดดวงใจ นาคปฐม. (2555). การจัดตารางการผลิตแบบสั่ง สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ปารเมศ ชุติมา. (2546). *เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน*, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปารเมศ ชุติมา และวิชิต ศรีอ่อน. (2549). การจัดตารางการผลิตในงานขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงตัวถังเครื่องปรับอากาศ, *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย*. *26*(1). 27-37.

Garey M.R., & Johnson D.S., (1979). Computers and intractability: a guide to the theory of NP completeness. New York: Freeman.

Kowmanee W., (2014). Job-Shop scheduling by using heuristic method for FIFO management system development. Master's thesis, Manufacturing Engineering, Faculty of Engineer, University of Malaya.

Kunadilok, J., & Kurz, M. E. (2005). Mixed integer programming for scheduling flexible reentrant job shop problems. In Proceedings of the Annual Industrial Engineering Research Conference (IERC), Atlanta.

Mason, A. J. (2013). "SolverStudio: A new tool for better optimisation and simulation modelling in Excel", *INFORMS Trans. Ed*. *14*(1): 45–52.

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

Ragsdale, C. T. (2011). *Managerial Decision Modeling* (6th ed.). Mason, OH: South-Western.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณการผลิต

ตัวอย่างการคำนวณเวลาที่ใช้ในการผลิตงานที่ A001

งาน A001

จำนวน 5,000 ชิ้น

น้ำหนักต่อชิ้น 0.011 กก.

เครื่องจักรที่ใช้ผลิต

1. เครื่องจักร M1 กำลังการผลิต 103 ชิ้นต่อนาที
2. เครื่องจักร M3 กำลังการผลิต 115 ชิ้นต่อนาที
3. เครื่องจักร M6 กำลังการผลิต 7 กิโลกรัมต่อนาที
4. เครื่องจักร M7 กำลังการผลิต 4 กิโลกรัมต่อนาที

เวลาในการผลิตเครื่องจักร M1 = 5000 ÷ 103 = 48.54 นาที

เวลาในการผลิตเครื่องจักร M3 = 5000 ÷ 115 = 43.48 นาที

เวลาในการผลิตเครื่องจักร M6 = (5000 × 0.011) ÷ 7 = 7.86 นาที

เวลาในการผลิตเครื่องจักร M7 = (5000 × 0.011) ÷ 4 = 13.75 นาที

เวลาที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด = 48.54+ 43.48+ 7.86+ 7.86 = 113.66 ~ 114 นาที

ตารางภาคผนวก ก-1 ตัวอย่างการคำนวณเวลาการผลิตของงานก่อนการปรับปรุง

ลำดับงาน	งาน	เวลารวม	น้ำหนัก	จำนวนผลิต	เวลาส่งมอบ	เวลาส่งมอบ	M1			M2			M3			M4			M5			M6			M7			M8			M9			เวลาที่เริ่มผลิต	เวลาที่ผลิตเสร็จ	เวลาที่อยู่ในกระบวนการ	เวลาที่ใช้ผลิตจริง	เวลารอคอยงาน	เวลาที่ส่งมอบจริง	จำนวนงานล่าช้า
		(นาที)	(กก./ชิ้น)	(ชิ้น)	(วัน)	(นาที)	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	เริ่ม	ทำงาน	สิ้นสุด	(นาที)	(นาที)	(นาที)	(นาที)	(นาที)		
1	A005	183	0.011	8,000	3	1,440	-	78	78				78	70	148							148	13	161	161	22	183							-	183	183	183	-	1,257	-
2	B002	6	0.012	180	3	1,440	78	2	80				148	2	150							161	1	162				162	1	163				78	163	85	6	79	1,277	-
3	E005	13	0.012	500	3	1,440	80	5	85										163	6	169	162	1	163							169	1	170	80	170	90	13	77	1,270	-
4	E006	9	0.013	350	3	1,440	85	3	88										169	4	173	163	1	164							173	1	174	85	174	89	9	80	1,266	-
5	D001	4	0.018	100	3	1,440	88	1	89										173	1	174	164	1	165				174	1	175				88	175	87	4	83	1,265	-
6	B009	74	0.015	3,300	4	1,920	89	32	121				150	29	179							179	7	186				186	6	192				89	192	103	74	29	1,728	-
7	B011	26	0.013	1,200	4	1,920	121	12	133				179	10	189							189	2	191				192	2	194				121	194	73	26	47	1,726	-
8	C001	286	0.014	13,300	4	1,920	133	129	262				262	116	378							378	27	405							405	14	419	133	419	286	286	-	1,501	-
9	D002	1,195	0.015	48,500	4	1,920	262	471	733										837	539	1,376	733	104	837				1,376	81	1,457				262	1,457	1,195	1,195	-	463	-
10	E008	78	0.013	3,300	4	1,920	733	32	765										1,376	37	1,413	837	6	843							1,413	3	1,416	733	1,416	683	78	605	504	-
11	I001	152	0.02	4,870	4	1,920				-	60	60				881	54	935				843	14	857	857	24	881							-	935	935	152	783	985	-
12	B014	2,249	0.013	103,600	5	2,400	765	1,006	1,771				1,771	901	2,672							2,672	192	2,864				2,864	150	3,014				765	3,014	2,249	2,249	-	614	1
13	A002	50	0.017	2,000	5	2,400	1,771	19	1,790				2,672	17	2,689							2,864	5	2,869	2,869	9	2,878							1,771	2,878	1,107	50	1,057	478	1
14	B006	43	0.015	2,000	5	2,400	1,790	19	1,809				2,689	17	2,706							2,869	4	2,873				3,014	3	3,017				1,790	3,017	1,227	43	1,184	617	1
15	B010	4	0.05	110	5	2,400	1,809	1	1,810				2,706	1	2,707							2,873	1	2,874				3,017	1	3,018				1,809	3,018	1,209	4	1,205	618	1
16	B013	6	0.018	190	5	2,400	1,810	2	1,812				2,707	2	2,709							2,874	1	2,875				3,018	1	3,019				1,810	3,019	1,209	6	1,203	619	1
17	B019	288	0.022	12,000	6	2,880	1,812	117	1,929				2,709	104	2,813							2,875	38	2,913				3,019	29	3,048				1,812	3,048	1,236	288	948	168	1
18	E003	183	0.012	7,800	6	2,880	1,929	76	2,005										2,926	87	3,013	2,913	13	2,926							3,013	7	3,020	1,929	3,020	1,091	183	908	140	1
19	A001	114	0.011	5,000	6	2,880	2,005	49	2,054				2,813	43	2,856							2,926	8	2,934	2,934	14	2,948							2,005	2,948	943	114	829	68	1
20	B007	45	0.018	2,000	6	2,880	2,054	19	2,073				2,856	17	2,873							2,934	5	2,939				3,048	4	3,052				2,054	3,052	998	45	953	172	1
21	B001	489	0.015	22,000	7	3,360	2,073	214	2,287				2,873	191	3,064							3,064	47	3,111				3,111	37	3,148				2,073	3,148	1,075	489	586	212	-
22	B008	792	0.013	36,500	7	3,360	2,287	354	2,641				3,064	317	3,381							3,381	68	3,449				3,449	53	3,502				2,287	3,502	1,215	792	423	142	1
23	B004	32	0.01	1,500	7	3,360	2,641	15	2,656				3,381	13	3,394							3,449	2	3,451				3,502	2	3,504				2,641	3,504	863	32	831	144	1
24	B018	1,060	0.011	50,000	7	3,360	2,656	485	3,141				3,394	435	3,829							3,829	79	3,908				3,908	61	3,969				2,656	3,969	1,313	1,060	253	609	1
25	E002	57	0.009	2,500	7	3,360	3,141	24	3,165										3,911	28	3,939	3,908	3	3,911							3,939	2	3,941	3,141	3,941	800	57	743	581	1
26	H001	82	0.024	2,850	7	3,360				60	35	95							3,939	32	3,971	3,911	10	3,921							3,971	5	3,976	60	3,976	3,916	82	3,834	616	1
27	B005	28	0.015	1,250	7	3,360	3,165	12	3,177				3,829	11	3,840							3,921	3	3,924				3,969	2	3,971				3,165	3,971	806	28	778	611	1
28	G002	18	0.025	600	7	3,360				95	7	102				935	7	942				3,924	2	3,926				3,971	2	3,973				95	3,973	3,878	18	3,860	613	1
29	E001	28	0.01	1,200	8	3,840	3,177	12	3,189										3,971	13	3,984	3,926	2	3,928							3,984	1	3,985	3,177	3,985	808	28	780	145	1
30	B017	8	0.014	300	10	4,800	3,189	3	3,192				3,840	3	3,843							3,928	1	3,929				3,973	1	3,974				3,189	3,974	785	8	777	826	-
31	B012	175	0.013	8,000	15	7,200	3,192	78	3,270				3,843	70	3,913							3,929	15	3,944				3,974	12	3,986				3,192	3,986	794	175	619	3,214	-
32	F001	21	0.027	700	15	7,200				102	9	111				942	8	950				3,944	3	3,947							3,985	1	3,986	102	3,986	3,884	21	3,863	3,214	-
33	E004	8	0.015	300	15	7,200	3,270	3	3,273										3,984	3	3,987	3,947	1	3,948							3,987	1	3,988	3,270	3,988	718	8	710	3,212	-
34	A003	220	0.012	9,500	15	7,200	3,273	92	3,365				3,913	83	3,996							3,996	16	4,012	4,012	29	4,041							3,273	4,041	768	220	548	3,159	-
35	E007	20	0.016	800	15	7,200	3,365	8	3,373										4,014	9	4,023	4,012	2	4,014							4,023	1	4,024	3,365	4,024	659	20	639	3,176	-
36	A004	682	0.011	30,000	30	14,400	3,373	291	3,664				3,996	261	4,257							4,257	47	4,304	4,304	83	4,387							3,373	4,387	1,014	682	332	10,013	-
37	B003	386	0.017	17,000	30	14,400	3,664	165	3,829				4,257	148	4,405							4,405	41	4,446				4,446	32	4,478				3,664	4,478	814	386	428	9,922	-
38	B015	39	0.013	1,800	30	14,400	3,829	17	3,846				4,405	16	4,421							4,446	3	4,449				4,478	3	4,481				3,829	4,481	652	39	613	9,919	-
39	B016	66	0.014	3,000	30	14,400	3,846	29	3,875				4,421	26	4,447							4,449	6	4,455				4,481	5	4,486				3,846	4,486	640	66	574	9,914	-
40	E009	28	0.01	1,200	30	14,400	3,875	12	3,887										4,457	13	4,470	4,455	2	4,457							4,470	1	4,471	3,875	4,471	596	28	568	9,929	-
41	G001	51	0.018	1,800	30	14,400				111	22	133				950	20	970				4,457	5	4,462				4,486	4	4,490				111	4,490	4,379	51	4,328	9,910	-
		9,298	**1**	**411,100**	**417**	**200,160**	**71,430**	**3,887**	**75,317**	**368**	**133**	**501**	**66,956**	**2,903**	**69,859**	**3,708**	**89**	**3,797**	**29,920**	**772**	**30,692**	**113,295**	**802**	**114,097**	**15,137**	**181**	**15,318**	**67,818**	**493**	**68,311**	**33,532**	**38**	**33,570**	**71,798**	**117,253**	**45,455**	**9,298**	**36,157**	**82,907**	**17**

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

ปัญหาตัวอย่าง

ตารางภาคผนวก ค-1 งานสำหรับแสดงรายละเอียดแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

งานที่	เครื่องจักร				กำหนดส่งมอบ (d)
	M1	M3	M6	M7	
1	78	70	13	22	220
งานที่	เครื่องจักร				กำหนดส่งมอบ (d)
	M2	M4	M6	M8	
2	22	20	5	4	150
งานที่	เครื่องจักร				กำหนดส่งมอบ (d)
	M2	M6	M7	M4	
3	60	14	24	54	350

กำหนดชื่อ operation *i*

งานที่ 1 บนเครื่องจักร M1 M3 M6 และ M7 เรียกชื่อ operation 1, 2, 3, และ 4 ตามลำดับ

งานที่ 2 บนเครื่องจักร M2 M4 M6 และ M8 เรียกชื่อ operation 5, 6, 7, และ 8 ตามลำดับ

งานที่ 3 บนเครื่องจักร M2 M6 M7 และ M4 เรียกชื่อ operation 9, 10, 11, และ 12 ตามลำดับ

เซต

$B = \{1, 5, 9\}$

$S_1 = \{1\}, S_2 = \{5, 9\}, S_3 = \{2\}, S_4 = \{6, 12\}, S_6 = \{3, 7, 10\}, S_7 = \{4, 11\}, S_8 = \{8\}$

$E = \{4, 8, 12\}$

พารามิเตอร์

$p_1 = 78, p_2 = 70, \ldots, p_{12} = 54$

$R_k = 0$ สำหรับทุกเครื่องจักร

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับจัดตารางการผลิตที่มีเวลาปิดงานต่ำที่สุด

ฟังก์ชั่นจุดประสงค์

Minimize c_{max}

ข้อจำกัด

สมการ 4-2

k = 1: $x_{01} = 1$ k = 6: $x_{03} + x_{07} + x_{0,10} = 1$

k = 2: $x_{05} + x_{09} = 1$ k = 7: $x_{04} + x_{0,11} = 1$

k = 3: $x_{02} = 1$ k = 8: $x_{08} = 1$

k = 4: $x_{06} + x_{0,12} = 1$

สมการ 4-3

k = 1: i = 1 $x_{1,13} = 1$

k = 2: i = 5 $x_{59} + x_{5,13} = 1$, i = 9 $x_{95} + x_{9,13} = 1$

k = 3: i = 2 $x_{2,13} = 1$

k = 4: i = 6 $x_{6,12} + x_{6,13} = 1$, i = 12 $x_{12,6} + x_{12,13} = 1$

k = 6: i = 3 $x_{37} + x_{3,10} + x_{3,13} = 1$, i = 7 $x_{73} + x_{7,10} + x_{7,13} = 1$

i = 10 $x_{10,3} + x_{10,7} + x_{10,13} = 1$

k = 7: i = 4 $x_{4,11} + x_{4,13} = 1$ i = 11 $x_{11,4} + x_{11,13} = 1$

k = 8: i = 8 $x_{8,13} = 1$

สมการ 4-4

k = 1: j = 1 $x_{01} = 1$

k = 2: j = 5 $x_{05} + x_{95} = 1$, j = 9 $x_{09} + x_{59} = 1$

k = 3: j = 2 $x_{02} = 1$

k = 4: j = 6 $x_{06} + x_{12,6} = 1$, j = 12 $x_{0,12} + x_{6,12} = 1$

k = 6: j = 3 $x_{03} + x_{73} + x_{10,3} = 1$, j = 7 $x_{07} + x_{37} + x_{10,7} = 1$

j = 10 $x_{0,10} + x_{3,10} + x_{7,10} = 1$

k = 7: j = 4 $x_{04} + x_{11,4} = 1$ j = 11 $x_{0,11} + x_{4,11} = 1$

k = 8: j = 8 $x_{08} = 1$

สมการ 4-5

k = 1: j = 1 $c_1 >= R_1 + p_1 - M(1 - x_{01})$

k = 2: j = 5 $c_5 >= R_2 + p_5 - M(1- x_{05})$

j = 9 $c_9 >= R_2 + p_9 - M(1- x_{09})$

k = 3: j = 2 $c_2 >= R_3 + p_2 - M(1- x_{02})$

k = 4: j = 6 $c_6 >= R_4 + p_6 - M(1- x_{06})$

j = 12 $c_{12} >= R_4 + p_{12} - M(1- x_{0,12})$

k = 6: j = 3 $c_3 >= R_6 + p_3 - M(1- x_{03})$

j = 7 $c_7 >= R_6 + p_7 - M(1- x_{0,7})$

j = 10 $c_{10} >= R_6 + p_{10} - M(1- x_{0,10})$

k = 7: j = 4 $c_4 >= R_7 + p_4 - M(1- x_{04})$

j = 11 $c_{11} >= R_7 + p_{11} - M(1- x_{0,11})$

k = 8: j = 8 $c_8 >= R_8 + p_8 - M(1- x_{08})$

สมการ 4-6

k = 1: i = 1 & j = ไม่มี

k = 2: i = 5 & j = 9 $c_9 >= c_5 + p_9 - M(1- x_{59})$

i = 9 & j = 5 $c_5 >= c_9 + p_5 - M(1- x_{95})$

k = 3: i = 2 & j = ไม่มี

k = 4: i = 6 & j = 12 $c_{12} >= c_6 + p_{12} - M(1- x_{6,12})$

i = 12 & j = 6 $c_6 >= c_{12} + p_6 - M(1- x_{12,6})$

k = 6: i = 3 & j = 7 $c_7 >= c_3 + p_7 - M(1- x_{37})$

i = 3 & j = 10 $c_{10} >= c_3 + p_{10} - M(1- x_{3,10})$

i = 7 & j = 3 $c_3 >= c_7 + p_3 - M(1- x_{73})$

i = 7 & j = 10 $c_{10} >= c_7 + p_{10} - M(1- x_{7,10})$

i = 10 & j = 3 $c_3 >= c_{10} + p_3 - M(1- x_{10,3})$

i = 10 & j = 7 $c_7 >= c_{10} + p_7 - M(1- x_{10,7})$

k = 7: i = 4 & j = 11 $c_{11} >= c_4 + p_{11} - M(1- x_{4,11})$

i = 11 & j = 4 $c_4 >= c_{11} + p_4 - M(1- x_{11,4})$

k = 8: i = 8 & j = ไม่มี

สมการ 4-7

j = 2 $c_2 >= c_1 + p_2$, j = 3 $c_3 >= c_2 + p_3$, j = 2 $c_4 >= c_3 + p_4$

j = 6 $c_6 >= c_5 + p_6$, j = 7 $c_7 >= c_6 + p_7$, j = 8 $c_8 >= c_7 + p_8$

j = 10 $c_{10} >= c_9 + p_{10}$, j = 11 $c_{11} >= c_{10} + p_{11}$, j = 12 $c_{12} >= c_{11} + p_{12}$

สมการ 4-8

j = 4 $c_{max} >= c_4$

j = 8 $c_{max} >= c_8$

j = 12 $c_{max} >= c_{12}$

สมการ 4-9, 4-10

$c_j \geq 0$ $\forall j = 1, \ldots 12$

$x_{ij} = binary$ $\forall i = 0, 1, \ldots, 12, \quad \forall j = 1, \ldots, 13$

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับจัดตารางการผลิตที่มีผลรวมของเวลาปิดงานกับเวลาสายสูงสุดแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำสุด

ฟังก์ชั่นจุดประสงค์

Minimize l_{max}+W c_{max}

ข้อจำกัด

สมการ 4-2 ถึง 4-10

สมการ 4-12

j = 4 $l_4 => c_4 - D_4$

j = 8 $l_8 => c_8 - D_8$

j = 12 $l_{12} => c_{12} - D_{12}$

สมการ 4-13

j = 4 $l_4 => 0$

j = 8 $l_8 => 0$

j = 12 $l_{12} => 0$

สมการ 4-14

j = 4 $l_{max} => l_4$

j = 8 $l_{max} => l_8$

j = 12 $l_{max} => l_{12}$

สมการ 4-15

$l_{max} => 0$

ภาคผนวก ค

ปัญหาสำหรับการทดสอบ

ตารางภาคผนวก ค-1 ปัญหาต้นแบบ

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	2880	49	-	43	-	-	8	14	-	-
2	A002	2400	19	-	17	-	-	5	9	-	-
3	A003	7200	92	-	83	-	-	16	29	-	-
4	A004	14400	291	-	261	-	-	47	83	-	-
5	A005	1440	78	-	70	-	-	13	22	-	-
6	B001	3360	214	-	191	-	-	47	-	37	-
7	B002	1440	2	-	2	-	-	-	-	-	-
8	B003	14400	165	-	148	-	-	41	-	32	-
9	B004	3360	15	-	13	-	-	2	-	2	-
10	B005	3360	12	-	11	-	-	3	-	2	-
11	B006	2400	19	-	17	-	-	4	-	3	-
12	B007	2880	19	-	17	-	-	5	-	4	-
13	B008	3360	354	-	317	-	-	68	-	53	-
14	B009	1920	32	-	29	-	-	7	-	6	-
15	B010	2400	1	-	1	-	-	1	-	1	-
16	B011	1920	12	-	10	-	-	2	-	2	-
17	B012	7200	78	-	70	-	-	15	-	12	-
18	B013	2400	2	-	2	-	-	-	-	-	-
19	B014	2400	1,006	-	901	-	-	192	-	150	-
20	B015	14400	17	-	16	-	-	3	-	3	-
21	B016	14400	29	-	26	-	-	6	-	5	-
22	B017	4800	3	-	3	-	-	1	-	-	-
23	B018	3360	485	-	435	-	-	79	-	61	-

ตารางภาคผนวก ค-1 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
24	B019	2880	117	-	104	-	-	38	-	29	-
25	C001	1920	129	-	116	-	-	27	-	-	14
26	D001	1440	1	-	-	-	1	-	-	-	-
27	D002	1920	471	-	-	-	539	104	-	81	-
28	E001	3840	12	-	-	-	13	2	-	-	1
29	E002	3360	24	-	-	-	28	3	-	-	2
30	E003	2880	76	-	-	-	87	13	-	-	7
31	E004	7200	3	-	-	-	3	1	-	-	-
32	E005	1440	5	-	-	-	6	1	-	-	-
33	E006	1440	3	-	-	-	4	1	-	-	-
34	E007	7200	8	-	-	-	9	2	-	-	1
35	E008	1920	32	-	-	-	37	6	-	-	3
36	E009	14400	12	-	-	-	13	2	-	-	1
37	F001	7200	-	9	-	8	-	3	-	-	1
38	G001	14400	-	22	-	20	-	5	-	4	-
39	G002	3360	-	7	-	7	-	2	-	2	-
40	H001	3360	-	35	-	-	32	10	-	-	5
41	I001	1920	-	60	-	54	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-2 ปัญหาที่ 2

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	2880	50	-	45	-	-	8	14	-	-
2	A002	2400	20	-	18	-	-	5	9	-	-
3	A003	7200	95	-	85	-	-	17	29	-	-
4	A004	14400	301	-	269	-	-	49	85	-	-
5	A005	1440	80	-	72	-	-	13	23	-	-
6	B001	3360	220	-	197	-	-	49	-	38	-
7	B002	1440	2	-	2	-	-	-	-	-	-
8	B003	14400	170	-	153	-	-	43	-	33	-
9	B004	3360	15	-	13	-	-	2	-	2	-
10	B005	3360	13	-	11	-	-	3	-	2	-
11	B006	2400	20	-	18	-	-	4	-	3	-
12	B007	2880	20	-	18	-	-	5	-	4	-
13	B008	3360	366	-	327	-	-	70	-	54	-
14	B009	1920	33	-	30	-	-	7	-	6	-
15	B010	2400	1	-	1	-	-	1	-	1	-
16	B011	1920	12	-	11	-	-	2	-	2	-
17	B012	7200	80	-	72	-	-	15	-	12	-
18	B013	2400	2	-	2	-	-	1	-	-	-
19	B014	2400	1,038	-	930	-	-	199	-	154	-
20	B015	14400	18	-	16	-	-	3	-	3	-
21	B016	14400	30	-	27	-	-	6	-	5	-
22	B017	4800	3	-	3	-	-	1	-	-	-
23	B018	3360	501	-	449	-	-	81	-	63	-
24	B019	2880	120	-	108	-	-	39	-	30	-

ตารางภาคผนวก ค-2 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
25	C001	1920	133	-	119	-	-	27	-	-	15
26	D001	1440	1	-	-	-	1	-	-	-	-
27	D002	1920	389	-	-	-	445	86	-	67	-
28	E001	3840	12	-	-	-	14	2	-	-	1
29	E002	3360	25	-	-	-	29	3	-	-	2
30	E003	2880	78	-	-	-	89	14	-	-	7
31	E004	7200	3	-	-	-	3	1	-	-	-
32	E005	1440	5	-	-	-	6	1	-	-	-
33	E006	1440	4	-	-	-	4	1	-	-	-
34	E007	7200	8	-	-	-	9	2	-	-	1
35	E008	1920	33	-	-	-	38	6	-	-	3
36	E009	14400	12	-	-	-	14	2	-	-	1
37	F001	7200	-	9	-	8	-	3	-	-	2
38	G001	14400	-	23	-	21	-	5	-	4	-
39	G002	3360	-	8	-	7	-	2	-	2	-
40	H001	3360	-	36	-	-	33	10	-	-	5
41	I001	1920	-	62	-	56	-	14	25	-	-

ตารางภาคผนวก ค-3 ปัญหาที่ 3

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	2880	58	-	52	-	-	9	17	-	-
2	A002	2400	39	-	35	-	-	10	17	-	-
3	A003	7200	73	-	66	-	-	13	23	-	-
4	A004	14400	232	-	208	-	-	38	66	-	-
5	A005	1440	62	-	55	-	-	10	18	-	-
6	B001	3360	199	-	178	-	-	44	-	34	-
7	B002	1440	11	-	10	-	-	2	-	2	-
8	B003	14400	229	-	205	-	-	57	-	44	-
9	B004	3360	31	-	28	-	-	5	-	4	-
10	B005	3360	87	-	78	-	-	19	-	15	-
11	B006	2400	15	-	14	-	-	3	-	3	-
12	B007	2880	19	-	17	-	-	5	-	4	-
13	B008	3360	282	-	253	-	-	54	-	42	-
14	B009	1920	26	-	23	-	-	6	-	4	-
15	B010	2400	13	-	11	-	-	9	-	7	-
16	B011	1920	19	-	17	-	-	4	-	3	-
17	B012	7200	62	-	55	-	-	12	-	9	-
18	B013	2400	12	-	10	-	-	3	-	2	-
19	B014	2400	801	-	718	-	-	153	-	119	-
20	B015	14400	24	-	21	-	-	5	-	4	-
21	B016	14400	23	-	21	-	-	5	-	4	-
22	B017	4800	19	-	17	-	-	4	-	3	-
23	B018	3360	387	-	346	-	-	63	-	49	-
24	B019	2880	93	-	83	-	-	30	-	23	-

ตารางภาคผนวก ค-3 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
25	C001	1920	103	-	92	-	-	21	-	-	11
26	D001	1440	37	-	-	-	42	10	-	8	-
27	D002	1920	472	-	-	-	540	104	-	81	-
28	E001	3840	29	-	-	-	33	4	-	-	2
29	E002	3360	29	-	-	-	33	4	-	-	2
30	E003	2880	99	-	-	-	113	18	-	-	9
31	E004	7200	22	-	-	-	26	5	-	-	3
32	E005	1440	72	-	-	-	82	13	-	-	7
33	E006	1440	22	-	-	-	25	4	-	-	2
34	E007	7200	26	-	-	-	29	6	-	-	3
35	E008	1920	26	-	-	-	29	5	-	-	3
36	E009	14400	19	-	-	-	22	3	-	-	2
37	F001	7200	-	56	-	51	-	18	-	-	9
38	G001	14400	-	30	-	27	-	6	-	5	-
39	G002	3360	-	31	-	28	-	9	-	7	-
40	H001	3360	-	28	-	-	25	8	-	-	4
41	I001	1920	-	60	-	54	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-4 ปัญหาที่ 4

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	1440	49	-	43	-	-	8	14	-	-
2	A002	1440	19	-	17	-	-	5	9	-	-
3	A003	4800	92	-	83	-	-	16	29	-	-
4	A004	9600	194	-	174	-	-	31	55	-	-
5	A005	480	78	-	70	-	-	13	22	-	-
6	B001	1920	214	-	191	-	-	47	-	37	-
7	B002	480	2	-	2	-	-	-	-	-	-
8	B003	9600	165	-	148	-	-	41	-	32	-
9	B004	1920	15	-	13	-	-	2	-	2	-
10	B005	1920	12	-	11	-	-	3	-	2	-
11	B006	1440	19	-	17	-	-	4	-	3	-
12	B007	1440	19	-	17	-	-	5	-	4	-
13	B008	1920	160	-	143	-	-	31	-	24	-
14	B009	960	32	-	29	-	-	7	-	6	-
15	B010	1440	1	-	1	-	-	1	-	1	-
16	B011	960	12	-	10	-	-	2	-	2	-
17	B012	4800	78	-	70	-	-	15	-	12	-
18	B013	1440	2	-	2	-	-	-	-	-	-
19	B014	1440	229	-	205	-	-	44	-	34	-
20	B015	9600	17	-	16	-	-	3	-	3	-
21	B016	9600	29	-	26	-	-	6	-	5	-
22	B017	2880	3	-	3	-	-	1	-	-	-
23	B018	1920	233	-	209	-	-	38	-	29	-
24	B019	1440	117	-	104	-	-	38	-	29	-

ตารางภาคผนวก ค-4 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
25	C001	960	129	-	116	-	-	27	-	-	14
26	D001	480	1	-	-	-	1	-	-	-	-
27	D002	960	277	-	-	-	317	61	-	48	-
28	E001	2400	12	-	-	-	13	2	-	-	1
29	E002	1920	24	-	-	-	28	3	-	-	2
30	E003	1440	76	-	-	-	87	13	-	-	7
31	E004	4800	3	-	-	-	3	1	-	-	-
32	E005	480	5	-	-	-	6	1	-	-	-
33	E006	480	3	-	-	-	4	1	-	-	-
34	E007	4800	8	-	-	-	9	2	-	-	1
35	E008	960	32	-	-	-	37	6	-	-	3
36	E009	8640	12	-	-	-	13	2	-	-	1
37	F001	4800	-	9	-	8	-	3	-	-	1
38	G001	9600	-	22	-	20	-	5	-	4	-
39	G002	1920	-	7	-	7	-	2	-	2	-
40	H001	1920	-	35	-	-	32	10	-	-	5
41	I001	960	-	60	-	54	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-5 ปัญหาที่ 5

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	4320	174	-	156	-	-	28	49	-	-
2	A002	6720	78	-	70	-	-	19	34	-	-
3	A003	1920	224	-	201	-	-	40	69	-	-
4	A004	13920	149	-	133	-	-	24	42	-	-
5	A005	480	64	-	57	-	-	10	18	-	-
6	A006	7200	151	-	136	-	-	25	43	-	-
7	B001	10560	95	-	85	-	-	21	-	16	-
8	B002	5280	291	-	261	-	-	51	-	40	-
9	B003	3840	197	-	177	-	-	49	-	38	-
10	B004	9120	150	-	134	-	-	22	-	17	-
11	B005	5760	140	-	125	-	-	31	-	24	-
12	B006	8640	136	-	122	-	-	30	-	23	-
13	B007	9600	76	-	68	-	-	20	-	16	-
14	B008	6240	38	-	34	-	-	7	-	6	-
15	B009	960	272	-	243	-	-	60	-	47	-
16	B010	7200	99	-	89	-	-	73	-	57	-
17	B011	3360	117	-	104	-	-	22	-	17	-
18	B012	6240	77	-	69	-	-	15	-	11	-
19	B013	11520	330	-	296	-	-	87	-	68	-
20	B014	4320	311	-	278	-	-	59	-	46	-
21	B015	1440	44	-	39	-	-	8	-	7	-
22	B016	7200	243	-	217	-	-	50	-	39	-
23	B017	8640	231	-	207	-	-	48	-	37	-
24	B018	2400	291	-	261	-	-	60	-	47	-

ตารางภาคผนวก ค-5 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
25	B019	3360	50	-	45	-	-	8	-	6	-
26	C001	960	126	-	113	-	-	26	-	-	14
27	C002	1440	121	-	109	-	-	25	-	-	13
28	D001	1440	127	-	-	-	146	34	-	26	-
29	D002	1920	243	-	-	-	278	54	-	42	-
30	D003	2400	175	-	-	-	200	39	-	30	-
31	D004	2400	146	-	-	-	167	32	-	25	-
32	D005	1920	97	-	-	-	111	21	-	17	-
33	E001	10560	16	-	-	-	18	2	-	-	1
34	E002	4320	27	-	-	-	31	4	-	-	2
35	E003	9120	72	-	-	-	82	13	-	-	7
36	E004	12000	22	-	-	-	26	5	-	-	3
37	E005	8160	29	-	-	-	33	5	-	-	3
38	E006	7680	19	-	-	-	22	4	-	-	2
39	E007	7200	40	-	-	-	46	9	-	-	5
40	E008	9120	7	-	-	-	8	2	-	-	1
41	E009	3360	2	-	-	-	2	-	-	-	-
42	F001	9120	-	7	-	7	-	2	-	-	1
43	F002	8640	-	9	-	8	-	3	-	-	1
44	G001	12000	-	9	-	8	-	2	-	1	-
45	G002	2400	-	31	-	28	-	9	-	7	-
46	H001	2880	-	35	-	-	31	10	-	-	5
47	I001	960	-	37	-	33	-	9	15	-	-
48	I002	1440	-	25	-	22	-	6	10	-	-

ตารางภาคผนวก ค-5 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
49	I003	1440	-	59	-	53	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-6 ปัญหาที่ 6

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	12960	39	-	35	-	-	6	11	-	-
2	A002	15000	80	-	71	-	-	20	35	-	-
3	A003	10080	65	-	58	-	-	11	20	-	-
4	A004	9600	151	-	136	-	-	27	47	-	-
5	A005	11040	260	-	233	-	-	46	80	-	-
6	A006	10560	105	-	94	-	-	17	30	-	-
7	B001	8160	151	-	136	-	-	33	-	26	-
8	B002	8640	117	-	105	-	-	21	-	16	-
9	B003	960	66	-	59	-	-	17	-	13	-
10	B004	5760	25	-	23	-	-	4	-	3	-
11	B005	1440	194	-	174	-	-	43	-	33	-
12	B006	7200	291	-	261	-	-	64	-	50	-
13	B007	4320	146	-	130	-	-	39	-	30	-
14	B008	9120	319	-	286	-	-	61	-	48	-
15	B009	8640	231	-	207	-	-	51	-	40	-
16	B010	4800	282	-	252	-	-	207	-	161	-
17	B011	6720	240	-	215	-	-	46	-	36	-
18	B012	5280	154	-	138	-	-	30	-	23	-

ตารางภาคผนวก ค-6 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
19	B013	3840	147	-	131	-	-	39	-	30	-
20	B014	8640	325	-	291	-	-	62	-	48	-
21	B015	9120	357	-	320	-	-	68	-	53	-
22	B016	5280	117	-	104	-	-	24	-	19	-
23	B017	3840	276	-	247	-	-	57	-	44	-
24	B018	6240	73	-	65	-	-	12	-	9	-
25	C001	960	117	-	104	-	-	24	-	-	13
26	C002	1440	34	-	30	-	-	7	-	-	4
27	D001	1440	101	-	-	-	116	27	-	21	-
28	D002	1920	78	-	-	-	89	21	-	16	-
29	D003	1920	49	-	-	-	56	13	-	10	-
30	D004	1440	43	-	-	-	49	9	-	7	-
31	D005	2880	87	-	-	-	100	19	-	15	-
32	E001	1920	1	-	-	-	1	-	-	-	-
33	E002	3360	27	-	-	-	31	4	-	-	2
34	E003	9600	65	-	-	-	74	11	-	-	6
35	E004	2880	13	-	-	-	14	3	-	-	2
36	E005	7680	24	-	-	-	28	4	-	-	2
37	E006	1920	19	-	-	-	22	4	-	-	2
38	E007	7680	18	-	-	-	21	4	-	-	2
39	F001	2400	-	6	-	6	-	2	-	-	1
40	F002	1440	-	10	-	9	-	3	-	-	2
41	G001	12480	-	15	-	13	-	3	-	2	-
42	H001	2880	-	36	-	-	32	10	-	-	5

ตารางภาคผนวก ค-6 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
43	H002	2400	-	35	-	-	32	10	-	-	5
44	I001	960	-	57	-	51	-	13	23	-	-
45	I002	1440	-	57	-	51	-	13	23	-	-

ตารางภาคผนวก ค-7 ปัญหาที่ 7

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	4320	110	-	99	-	-	18	31	-	-
2	A002	6720	47	-	42	-	-	12	20	-	-
3	A003	1920	135	-	121	-	-	24	42	-	-
4	A004	13920	89	-	80	-	-	14	25	-	-
5	A005	480	38	-	34	-	-	6	11	-	-
6	A006	7200	91	-	81	-	-	15	26	-	-
7	B001	10560	57	-	51	-	-	13	-	10	-
8	B002	5280	344	-	308	-	-	61	-	47	-
9	B003	3840	118	-	106	-	-	30	-	23	-
10	B004	9120	90	-	80	-	-	13	-	10	-
11	B005	5760	107	-	96	-	-	24	-	18	-
12	B006	8640	82	-	73	-	-	18	-	14	-
13	B007	9600	45	-	41	-	-	12	-	9	-
14	B008	6240	23	-	20	-	-	4	-	3	-
15	B009	960	191	-	171	-	-	42	-	33	-
16	B010	7200	118	-	105	-	-	87	-	67	-

ตารางภาคผนวก ค-7 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
17	B011	3360	233	-	209	-	-	45	-	35	-
18	B012	6240	46	-	41	-	-	9	-	7	-
19	B013	11520	198	-	177	-	-	52	-	41	-
20	B014	4320	400	-	358	-	-	76	-	59	-
21	B015	1440	26	-	23	-	-	5	-	4	-
22	B016	7200	302	-	270	-	-	62	-	48	-
23	B017	8640	197	-	176	-	-	41	-	32	-
24	B018	2400	355	-	318	-	-	73	-	57	-
25	B019	3360	30	-	27	-	-	5	-	4	-
26	C001	960	76	-	68	-	-	16	-	-	8
27	C002	1440	73	-	65	-	-	15	-	-	8
28	D001	1440	76	-	-	-	87	20	-	16	-
29	D002	1920	353	-	-	-	404	78	-	61	-
30	D003	2400	365	-	-	-	418	81	-	63	-
31	D004	2400	329	-	-	-	376	73	-	56	-
32	D005	1920	388	-	-	-	444	86	-	67	-
33	E001	10560	9	-	-	-	11	1	-	-	1
34	E002	4320	16	-	-	-	19	2	-	-	1
35	E003	9120	43	-	-	-	49	8	-	-	4
36	E004	12000	13	-	-	-	15	3	-	-	2
37	E005	8160	30	-	-	-	34	5	-	-	3
38	E006	7680	12	-	-	-	13	2	-	-	1
39	E007	7200	24	-	-	-	27	6	-	-	3
40	E008	9120	4	-	-	-	5	1	-	-	1

ตารางภาคผนวก ค-7 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
41	E009	3360	1	-	-	-	1	-	-	-	-
42	F001	9120	-	4	-	4	-	1	-	-	1
43	F002	8640	-	5	-	5	-	2	-	-	1
44	G001	12000	-	5	-	5	-	1	-	1	-
45	G002	2400	-	19	-	17	-	5	-	4	-
46	H001	2880	-	21	-	-	19	6	-	-	3
47	I001	960	-	34	-	30	-	8	14	-	-
48	I002	1440	-	31	-	28	-	7	12	-	-
49	I003	1440	-	35	-	32	-	8	14	-	-

ตารางภาคผนวก ค-8 ปัญหาที่ 8

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	2880	49	-	43	-	-	8	14	-	-
2	A002	4320	66	-	59	-	-	17	29	-	-
3	A003	2400	19	-	17	-	-	3	6	-	-
4	A004	5280	185	-	166	-	-	30	53	-	-
5	A005	7680	67	-	60	-	-	11	19	-	-
6	B001	11520	70	-	63	-	-	15	-	12	-
7	B002	1440	88	-	79	-	-	16	-	12	-
8	B003	7200	35	-	31	-	-	9	-	7	-
9	B004	4320	186	-	167	-	-	27	-	21	-
10	B005	5760	159	-	143	-	-	35	-	27	-

ตารางภาคผนวก ค-8 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
11	B006	11040	44	-	39	-	-	10	-	8	-
12	B007	3840	69	-	62	-	-	18	-	14	-
13	B008	6240	213	-	190	-	-	41	-	32	-
14	B009	7200	237	-	212	-	-	52	-	41	-
15	B010	2400	340	-	304	-	-	250	-	194	-
16	B011	2880	22	-	20	-	-	4	-	3	-
17	B012	2400	178	-	159	-	-	34	-	26	-
18	B013	4320	708	-	634	-	-	187	-	146	-
19	B014	1920	369	-	330	-	-	71	-	55	-
20	B015	12480	132	-	118	-	-	25	-	20	-
21	B016	10560	118	-	106	-	-	24	-	19	-
22	B017	4320	197	-	177	-	-	41	-	32	-
23	B018	5760	278	-	249	-	-	45	-	35	-
24	B019	12000	496	-	444	-	-	80	-	62	-
25	B020	10560	316	-	283	-	-	51	-	40	-
26	B021	6720	70	-	63	-	-	11	-	9	-
27	C001	960	78	-	70	-	-	16	-	-	9
28	C002	1440	121	-	109	-	-	25	-	-	13
29	D001	1440	86	-	-	-	99	23	-	18	-
30	D002	1440	89	-	-	-	102	20	-	15	-
31	D003	1920	12	-	-	-	13	3	-	2	-
32	E001	8160	25	-	-	-	29	4	-	-	2
33	E002	8640	41	-	-	-	47	5	-	-	3
34	E003	12960	41	-	-	-	47	7	-	-	4

ตารางภาคผนวก ค-8 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
35	E004	7200	42	-	-	-	48	9	-	-	5
36	E005	10080	29	-	-	-	33	5	-	-	3
37	E006	5760	14	-	-	-	16	3	-	-	1
38	E007	9600	4	-	-	-	4	1	-	-	-
39	E008	8160	38	-	-	-	43	7	-	-	4
40	E009	8640	25	-	-	-	29	6	-	-	3
41	E010	2400	20	-	-	-	23	4	-	-	2
42	F001	5280	-	9	-	8	-	3	-	-	1
43	G001	12480	-	22	-	20	-	5	-	4	-
44	G002	14880	-	9	-	8	-	102	-	79	-
45	G003	3360	-	19	-	17	-	5	-	4	-
46	H001	2880	-	34	-	-	31	9	-	-	5
47	H002	2400	-	35	-	-	31	10	-	-	5
48	I001	960	-	61	-	55	-	14	25	-	-
49	I002	1440	-	59	-	53	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-9 ปัญหาที่ 9

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	13440	158	-	142	-	-	26	45	-	-
2	A002	14880	134	-	120	-	-	34	59	-	-
3	A003	7680	7	-	6	-	-	1	2	-	-
4	A004	7680	112	-	100	-	-	18	32	-	-
5	A005	4320	21	-	19	-	-	3	6	-	-
6	B001	7680	182	-	163	-	-	40	-	31	-
7	B002	5760	181	-	162	-	-	32	-	25	-
8	B003	9120	174	-	156	-	-	43	-	34	-
9	B004	8640	215	-	192	-	-	32	-	25	-
10	B005	9600	197	-	177	-	-	44	-	34	-
11	B006	4800	250	-	223	-	-	55	-	43	-
12	B007	8640	167	-	150	-	-	44	-	34	-
13	B008	7200	176	-	157	-	-	34	-	26	-
14	B009	6240	115	-	103	-	-	25	-	20	-
15	B010	5760	224	-	201	-	-	165	-	128	-
16	B011	10560	308	-	276	-	-	59	-	46	-
17	B012	4320	148	-	132	-	-	28	-	22	-
18	B013	7680	97	-	87	-	-	19	-	14	-
19	B014	3840	288	-	258	-	-	55	-	43	-
20	B015	4320	162	-	145	-	-	31	-	24	-
21	B016	5280	137	-	123	-	-	26	-	20	-
22	B017	12000	215	-	192	-	-	57	-	44	-
23	B018	6720	149	-	133	-	-	28	-	22	-
24	B019	4320	115	-	103	-	-	22	-	17	-

ตารางภาคผนวก ค-9 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
25	B020	12480	243	-	217	-	-	50	-	39	-
26	B021	9600	107	-	96	-	-	22	-	17	-
27	C001	3360	131	-	117	-	-	27	-	-	15
28	C002	2880	117	-	104	-	-	24	-	-	13
29	D001	2880	118	-	-	-	136	31	-	24	-
30	D002	2880	153	-	-	-	176	34	-	26	-
31	D003	3360	113	-	-	-	129	25	-	19	-
32	E001	6720	13	-	-	-	14	2	-	-	1
33	E002	4320	6	-	-	-	7	1	-	-	-
34	E003	3360	34	-	-	-	39	6	-	-	3
35	E004	2880	33	-	-	-	38	7	-	-	4
36	E005	3840	45	-	-	-	51	8	-	-	4
37	E006	6720	5	-	-	-	6	1	-	-	1
38	E007	4320	19	-	-	-	22	5	-	-	2
39	E008	3840	15	-	-	-	17	218	-	-	117
40	E009	12000	38	-	-	-	43	1,123	-	-	605
41	E010	6240	10	-	-	-	11	431	-	-	232
42	E011	4800	25	-	-	-	29	5	-	-	3
43	F001	4320	-	10	-	9	-	3	-	-	2
44	F002	4800	-	7	-	7	-	2	-	-	1
45	G001	10080	-	14	-	12	-	3	-	2	-
46	H001	4800	-	32	-	-	29	9	-	-	5
47	H002	4320	-	34	-	-	31	9	-	-	5
48	H003	3840	-	35	-	-	31	10	-	-	5

ตารางภาคผนวก ค-9 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
49	I001	4320	-	58	-	52	-	13	23	-	-
50	I002	4320	-	57	-	52	-	13	23	-	-

ตารางภาคผนวก ค-10 ปัญหาที่ 10

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	10560	146	-	130	-	-	24	41	-	-
2	A002	12000	5	-	4	-	-	1	2	-	-
3	A003	7680	31	-	28	-	-	5	10	-	-
4	A004	7680	123	-	110	-	-	22	38	-	-
5	A005	7200	119	-	107	-	-	19	34	-	-
6	A006	10560	17	-	16	-	-	3	5	-	-
7	B001	12000	156	-	140	-	-	35	-	27	-
8	B002	5760	189	-	170	-	-	33	-	26	-
9	B003	8160	10	-	9	-	-	2	-	2	-
10	B004	2880	79	-	70	-	-	12	-	9	-
11	B005	16800	117	-	105	-	-	26	-	20	-
12	B006	9600	286	-	257	-	-	63	-	49	-
13	B007	15360	89	-	80	-	-	24	-	18	-
14	B008	3840	357	-	320	-	-	68	-	53	-
15	B009	3360	456	-	409	-	-	101	-	78	-
16	B010	10080	353	-	317	-	-	260	-	202	-
17	B011	3360	376	-	337	-	-	72	-	56	-

ตารางภาคผนวก ค-10 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
18	B012	9120	349	-	312	-	-	67	-	52	-
19	B013	7200	134	-	120	-	-	26	-	20	-
20	B014	8640	111	-	99	-	-	21	-	16	-
21	B015	5760	49	-	43	-	-	9	-	7	-
22	B016	3840	39	-	35	-	-	7	-	6	-
23	B017	5280	263	-	236	-	-	70	-	54	-
24	B018	5760	178	-	159	-	-	34	-	26	-
25	B019	3840	270	-	242	-	-	52	-	40	-
26	B020	5280	55	-	50	-	-	11	-	9	-
27	B021	4800	38	-	34	-	-	8	-	6	-
28	C001	3360	126	-	113	-	-	26	-	-	14
29	C002	2880	121	-	109	-	-	25	-	-	13
30	C003	3840	131	-	117	-	-	27	-	-	15
31	C004	3360	117	-	104	-	-	24	-	-	13
32	D001	3360	81	-	-	-	92	21	-	17	-
33	D002	3840	43	-	-	-	49	9	-	7	-
34	D003	3360	18	-	-	-	21	4	-	3	-
35	D004	3360	79	-	-	-	90	17	-	14	-
36	E001	7680	65	-	-	-	74	10	-	-	5
37	E002	2880	48	-	-	-	54	6	-	-	3
38	E003	6720	36	-	-	-	41	6	-	-	3
39	E004	6240	11	-	-	-	12	2	-	-	1
40	E005	5280	9	-	-	-	10	2	-	-	1
41	E006	4800	4	-	-	-	4	1	-	-	-

ตารางภาคผนวก ค-10 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
42	E007	5280	61	-	-	-	70	14	-	-	8
43	E008	10080	46	-	-	-	52	682	-	-	367
44	E009	6720	59	-	-	-	68	1,757	-	-	946
45	E010	12960	15	-	-	-	17	646	-	-	348
46	E011	11520	21	-	-	-	24	4	-	-	2
47	F001	6240	-	10	-	9	-	3	-	-	2
48	F002	6240	-	7	-	7	-	2	-	-	1
49	F003	6720	-	9	-	8	-	3	-	-	1
50	F004	6720	-	9	-	8	-	3	-	-	2
51	G001	12480	-	5	-	4	-	1	-	1	-
52	G002	9120	-	14	-	12	-	3	-	2	-
53	H001	4800	-	34	-	-	31	9	-	-	5
54	H002	4320	-	35	-	-	31	10	-	-	5
55	H003	4320	-	35	-	-	32	10	-	-	5
56	I001	3840	-	60	-	54	-	14	24	-	-
57	I002	3840	-	57	-	51	-	13	23	-	-
58	I003	3360	-	59	-	53	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-11 ปัญหาที่ 11

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	3360	174	-	156	-	-	28	49	-	-
2	A002	4800	78	-	70	-	-	19	34	-	-
3	A003	1920	224	-	201	-	-	40	69	-	-
4	A004	13920	149	-	133	-	-	24	42	-	-
5	A005	480	64	-	57	-	-	10	18	-	-
6	A006	4800	151	-	136	-	-	25	43	-	-
7	B001	10560	95	-	85	-	-	21	-	16	-
8	B002	3840	291	-	261	-	-	51	-	40	-
9	B003	2880	197	-	177	-	-	49	-	38	-
10	B004	6240	150	-	134	-	-	22	-	17	-
11	B005	4320	140	-	125	-	-	31	-	24	-
12	B006	5760	136	-	122	-	-	30	-	23	-
13	B007	9600	76	-	68	-	-	20	-	16	-
14	B008	4320	38	-	34	-	-	7	-	6	-
15	B009	960	272	-	243	-	-	60	-	47	-
16	B010	5280	99	-	89	-	-	73	-	57	-
17	B011	2880	117	-	104	-	-	22	-	17	-
18	B012	4320	77	-	69	-	-	15	-	11	-
19	B013	11520	330	-	296	-	-	87	-	68	-
20	B014	3360	311	-	278	-	-	59	-	46	-
21	B015	1440	44	-	39	-	-	8	-	7	-
22	B016	5280	243	-	217	-	-	50	-	39	-
23	B017	5760	231	-	207	-	-	48	-	37	-

ตารางภาคผนวก ค-11 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
24	B018	2400	291	-	261	-	-	60	-	47	-
25	B019	2880	50	-	45	-	-	8	-	6	-
26	C001	960	126	-	113	-	-	26	-	-	14
27	C002	1440	121	-	109	-	-	25	-	-	13
28	D001	1440	127	-	-	-	146	34	-	26	-
29	D002	1920	243	-	-	-	278	54	-	42	-
30	D003	2400	175	-	-	-	200	39	-	30	-
31	D004	2400	146	-	-	-	167	32	-	25	-
32	D005	1920	97	-	-	-	111	21	-	17	-
33	E001	10560	16	-	-	-	18	2	-	-	1
34	E002	3840	27	-	-	-	31	4	-	-	2
35	E003	9120	72	-	-	-	82	13	-	-	7
36	E004	12000	22	-	-	-	26	5	-	-	3
37	E005	5760	29	-	-	-	33	5	-	-	3
38	E006	5760	19	-	-	-	22	4	-	-	2
39	E007	5760	40	-	-	-	46	9	-	-	5
40	E008	9120	7	-	-	-	8	2	-	-	1
41	E009	2880	2	-	-	-	2	-	-	-	-
42	F001	9120	-	7	-	7	-	2	-	-	1
43	F002	6240	-	9	-	8	-	3	-	-	1
44	G001	12000	-	9	-	8	-	2	-	1	-
45	G002	2400	-	31	-	28	-	9	-	7	-
46	H001	2880	-	35	-	-	31	10	-	-	5

ตารางภาคผนวก ค-11 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
47	I001	960	-	37	-	33	-	9	15	-	-
48	I002	1440	-	25	-	22	-	6	10	-	-
49	I003	1440	-	59	-	53	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-12 ปัญหาที่ 12

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	12960	39	-	35	-	-	6	11	-	-
2	A002	15000	80	-	71	-	-	20	35	-	-
3	A003	10080	65	-	58	-	-	11	20	-	-
4	A004	9120	151	-	136	-	-	27	47	-	-
5	A005	11040	260	-	233	-	-	46	80	-	-
6	A006	10560	105	-	94	-	-	17	30	-	-
7	B001	5760	151	-	136	-	-	33	-	26	-
8	B002	6240	117	-	105	-	-	21	-	16	-
9	B003	960	66	-	59	-	-	17	-	13	-
10	B004	4320	25	-	23	-	-	4	-	3	-
11	B005	1440	194	-	174	-	-	43	-	33	-
12	B006	4800	291	-	261	-	-	64	-	50	-
13	B007	3360	146	-	130	-	-	39	-	30	-
14	B008	7680	319	-	286	-	-	61	-	48	-
15	B009	6720	231	-	207	-	-	51	-	40	-
16	B010	3360	282	-	252	-	-	207	-	161	-

ตารางภาคผนวก ค-12 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
17	B011	4320	240	-	215	-	-	46	-	36	-
18	B012	3840	154	-	138	-	-	30	-	23	-
19	B013	3360	147	-	131	-	-	39	-	30	-
20	B014	7200	325	-	291	-	-	62	-	48	-
21	B015	8160	357	-	320	-	-	68	-	53	-
22	B016	3840	117	-	104	-	-	24	-	19	-
23	B017	3360	276	-	247	-	-	57	-	44	-
24	B018	4320	73	-	65	-	-	12	-	9	-
25	C001	960	117	-	104	-	-	24	-	-	13
26	C002	1440	34	-	30	-	-	7	-	-	4
27	D001	1440	101	-	-	-	116	27	-	21	-
28	D002	1920	78	-	-	-	89	21	-	16	-
29	D003	1920	49	-	-	-	56	13	-	10	-
30	D004	1440	43	-	-	-	49	9	-	7	-
31	D005	2880	87	-	-	-	100	19	-	15	-
32	E001	1920	1	-	-	-	1	-	-	-	-
33	E002	3360	27	-	-	-	31	4	-	-	2
34	E003	9600	65	-	-	-	74	11	-	-	6
35	E004	2880	13	-	-	-	14	3	-	-	2
36	E005	4800	24	-	-	-	28	4	-	-	2
37	E006	1920	19	-	-	-	22	4	-	-	2
38	E007	5280	18	-	-	-	21	4	-	-	2
39	F001	2400	-	6	-	6	-	2	-	-	1

ตารางภาคผนวก ค-12 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
40	F002	1440	-	10	-	9	-	3	-	-	2
41	G001	12480	-	15	-	13	-	3	-	2	-
42	H001	2880	-	36	-	-	32	10	-	-	5
43	H002	2400	-	35	-	-	32	10	-	-	5
44	I001	960	-	57	-	51	-	13	23	-	-
45	I002	1440	-	57	-	51	-	13	23	-	-

ตารางภาคผนวก ค-13 ปัญหาที่ 13

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	3840	110	-	99	-	-	18	31	-	-
2	A002	4800	47	-	42	-	-	12	20	-	-
3	A003	1920	135	-	121	-	-	24	42	-	-
4	A004	13920	89	-	80	-	-	14	25	-	-
5	A005	480	38	-	34	-	-	6	11	-	-
6	A006	4800	91	-	81	-	-	15	26	-	-
7	B001	10560	57	-	51	-	-	13	-	10	-
8	B002	3840	344	-	308	-	-	61	-	47	-
9	B003	3840	118	-	106	-	-	30	-	23	-
10	B004	6240	90	-	80	-	-	13	-	10	-
11	B005	4320	107	-	96	-	-	24	-	18	-
12	B006	5760	82	-	73	-	-	18	-	14	-
13	B007	9600	45	-	41	-	-	12	-	9	-

ตารางภาคผนวก ค-13 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
14	B008	4320	23	-	20	-	-	4	-	3	-
15	B009	960	191	-	171	-	-	42	-	33	-
16	B010	4800	118	-	105	-	-	87	-	67	-
17	B011	3360	233	-	209	-	-	45	-	35	-
18	B012	4320	46	-	41	-	-	9	-	7	-
19	B013	11520	198	-	177	-	-	52	-	41	-
20	B014	3840	400	-	358	-	-	76	-	59	-
21	B015	1440	26	-	23	-	-	5	-	4	-
22	B016	5280	302	-	270	-	-	62	-	48	-
23	B017	5760	197	-	176	-	-	41	-	32	-
24	B018	2400	355	-	318	-	-	73	-	57	-
25	B019	3360	30	-	27	-	-	5	-	4	-
26	C001	960	76	-	68	-	-	16	-	-	8
27	C002	1440	73	-	65	-	-	15	-	-	8
28	D001	1440	76	-	-	-	87	20	-	16	-
29	D002	1920	353	-	-	-	404	78	-	61	-
30	D003	2400	365	-	-	-	418	81	-	63	-
31	D004	2400	329	-	-	-	376	73	-	56	-
32	D005	1920	388	-	-	-	444	86	-	67	-
33	E001	10560	9	-	-	-	11	1	-	-	1
34	E002	3840	16	-	-	-	19	2	-	-	1
35	E003	7200	43	-	-	-	49	8	-	-	4
36	E004	12000	13	-	-	-	15	3	-	-	2

ตารางภาคผนวก ค-13 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
37	E005	5760	30	-	-	-	34	5	-	-	3
38	E006	5280	12	-	-	-	13	2	-	-	1
39	E007	5280	24	-	-	-	27	6	-	-	3
40	E008	7200	4	-	-	-	5	1	-	-	1
41	E009	3360	1	-	-	-	1	-	-	-	-
42	F001	9120	-	4	-	4	-	1	-	-	1
43	F002	6240	-	5	-	5	-	2	-	-	1
44	G001	12000	-	5	-	5	-	1	-	1	-
45	G002	2400	-	19	-	17	-	5	-	4	-
46	H001	2880	-	21	-	-	19	6	-	-	3
47	I001	960	-	34	-	30	-	8	14	-	-
48	I002	1440	-	31	-	28	-	7	12	-	-
49	I003	1440	-	35	-	32	-	8	14	-	-

ตารางภาคผนวก ค-14 ปัญหาที่ 14

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	2400	49	-	43	-	-	8	14	-	-
2	A002	3360	66	-	59	-	-	17	29	-	-
3	A003	2400	19	-	17	-	-	3	6	-	-
4	A004	3840	185	-	166	-	-	30	53	-	-
5	A005	5760	67	-	60	-	-	11	19	-	-
6	B001	8160	70	-	63	-	-	15	-	12	-

ตารางภาคผนวก ค-14 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
7	B002	1440	88	-	79	-	-	16	-	12	-
8	B003	5280	35	-	31	-	-	9	-	7	-
9	B004	3360	186	-	167	-	-	27	-	21	-
10	B005	4320	159	-	143	-	-	35	-	27	-
11	B006	7680	44	-	39	-	-	10	-	8	-
12	B007	3360	69	-	62	-	-	18	-	14	-
13	B008	4800	213	-	190	-	-	41	-	32	-
14	B009	5280	237	-	212	-	-	52	-	41	-
15	B010	2400	340	-	304	-	-	250	-	194	-
16	B011	2400	22	-	20	-	-	4	-	3	-
17	B012	2400	178	-	159	-	-	34	-	26	-
18	B013	3840	708	-	634	-	-	187	-	146	-
19	B014	1920	369	-	330	-	-	71	-	55	-
20	B015	12480	132	-	118	-	-	25	-	20	-
21	B016	7200	118	-	106	-	-	24	-	19	-
22	B017	3840	197	-	177	-	-	41	-	32	-
23	B018	4320	278	-	249	-	-	45	-	35	-
24	B019	8160	496	-	444	-	-	80	-	62	-
25	B020	7680	316	-	283	-	-	51	-	40	-
26	B021	4800	70	-	63	-	-	11	-	9	-
27	C001	960	78	-	70	-	-	16	-	-	9
28	C002	1440	121	-	109	-	-	25	-	-	13
29	D001	1440	86	-	-	-	99	23	-	18	-

ตารางภาคผนวก ค-14 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
30	D002	1440	89	-	-	-	102	20	-	15	-
31	D003	1920	12	-	-	-	13	3	-	2	-
32	E001	5760	25	-	-	-	29	4	-	-	2
33	E002	6720	41	-	-	-	47	5	-	-	3
34	E003	12960	41	-	-	-	47	7	-	-	4
35	E004	5280	42	-	-	-	48	9	-	-	5
36	E005	7200	29	-	-	-	33	5	-	-	3
37	E006	4800	14	-	-	-	16	3	-	-	1
38	E007	7200	4	-	-	-	4	1	-	-	-
39	E008	6240	38	-	-	-	43	7	-	-	4
40	E009	7200	25	-	-	-	29	6	-	-	3
41	E010	2400	20	-	-	-	23	4	-	-	2
42	F001	3840	-	9	-	8	-	3	-	-	1
43	G001	12480	-	22	-	20	-	5	-	4	-
44	G002	14880	-	9	-	8	-	102	-	79	-
45	G003	2880	-	19	-	17	-	5	-	4	-
46	H001	2880	-	34	-	-	31	9	-	-	5
47	H002	2400	-	35	-	-	31	10	-	-	5
48	I001	960	-	61	-	55	-	14	25	-	-
49	I002	1440	-	59	-	53	-	14	24	-	-

ตารางภาคผนวก ค-15 ปัญหาที่ 15

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
1	A001	12000	158	-	142	-	-	26	45	-	-
2	A002	13440	134	-	120	-	-	34	59	-	-
3	A003	6240	7	-	6	-	-	1	2	-	-
4	A004	6240	112	-	100	-	-	18	32	-	-
5	A005	2400	21	-	19	-	-	3	6	-	-
6	B001	6240	182	-	163	-	-	40	-	31	-
7	B002	4320	181	-	162	-	-	32	-	25	-
8	B003	7680	174	-	156	-	-	43	-	34	-
9	B004	7200	215	-	192	-	-	32	-	25	-
10	B005	8160	197	-	177	-	-	44	-	34	-
11	B006	3360	250	-	223	-	-	55	-	43	-
12	B007	7200	167	-	150	-	-	44	-	34	-
13	B008	5760	176	-	157	-	-	34	-	26	-
14	B009	4800	115	-	103	-	-	25	-	20	-
15	B010	4320	224	-	201	-	-	165	-	128	-
16	B011	9120	308	-	276	-	-	59	-	46	-
17	B012	2400	148	-	132	-	-	28	-	22	-
18	B013	6240	97	-	87	-	-	19	-	14	-
19	B014	1920	288	-	258	-	-	55	-	43	-
20	B015	2400	162	-	145	-	-	31	-	24	-
21	B016	3840	137	-	123	-	-	26	-	20	-
22	B017	10560	215	-	192	-	-	57	-	44	-
23	B018	5280	149	-	133	-	-	28	-	22	-

ตารางภาคผนวก ค-15 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
24	B019	2400	115	-	103	-	-	22	-	17	-
25	B020	11040	243	-	217	-	-	50	-	39	-
26	B021	8160	107	-	96	-	-	22	-	17	-
27	C001	1440	131	-	117	-	-	27	-	-	15
28	C002	960	117	-	104	-	-	24	-	-	13
29	D001	960	118	-	-	-	136	31	-	24	-
30	D002	1440	153	-	-	-	176	34	-	26	-
31	D003	1440	113	-	-	-	129	25	-	19	-
32	E001	5280	13	-	-	-	14	2	-	-	1
33	E002	2400	6	-	-	-	7	1	-	-	-
34	E003	1440	34	-	-	-	39	6	-	-	3
35	E004	1440	33	-	-	-	38	7	-	-	4
36	E005	1920	45	-	-	-	51	8	-	-	4
37	E006	5280	5	-	-	-	6	1	-	-	1
38	E007	2880	19	-	-	-	22	5	-	-	2
39	E008	1920	15	-	-	-	17	218	-	-	117
40	E009	10560	9	-	-	-	10	259	-	-	140
41	E010	4800	10	-	-	-	11	431	-	-	232
42	E011	3360	25	-	-	-	29	5	-	-	3
43	F001	2880	-	10	-	9	-	3	-	-	2
44	F002	3360	-	7	-	7	-	2	-	-	1
45	G001	8640	-	14	-	12	-	3	-	2	-
46	H001	3360	-	32	-	-	29	9	-	-	5

ตารางภาคผนวก ค-15 (ต่อ)

งานที่	ชื่องาน	เวลาส่งมอบ (นาที)	เวลาการผลิต (นาที)								
			M/C1	M/C2	M/C3	M/C4	M/C5	M/C6	M/C7	M/C8	M/C9
47	H002	2880	-	34	-	-	31	9	-	-	5
48	H003	1920	-	35	-	-	31	10	-	-	5
49	I001	2880	-	58	-	52	-	13	23	-	-
50	I002	2880	-	57	-	52	-	13	23	-	-