

การจัดตารางการผลิตที่ให้ค่าปริมาณงานระหว่างกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแบบ
ไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน

เบญจพร ชัยเนตร

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2569

THE DETERMINATION OF JOB SCHEDULING WITH OPTIMAL WORK IN PROCESS FOR
FLEXIBLE FLOW SHOP WITH UNRELATED PARALLEL MACHINES

Benjaporn Chaiyanate

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology
Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology
Academic Year 2026

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจัดตารางการผลิตที่ให้ค่าปริมาณงานระหว่างกระบวนการ
ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่นที่มี
เครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน

โดย

เบญจพร ชัยเนตร

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล ศิลาวรรณ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล ศรีพุทธา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์)

เบญจพร ชัยเนตร: การจัดตารางการผลิตที่ให้ค่าปริมาณงานระหว่างกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน.
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์, 74 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible Flow Shop) ที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน โดยพัฒนาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร่วมที่บูรณาการผลรวมเวลารอคอยระหว่างกระบวนการ (WIP_wait_{total}) และผลรวมความล่าช้า (Total Tardiness) และใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ในการหาคำตอบ การทดลองครอบคลุม 18 ชุด ภายใต้ปัจจัยจำนวนงาน 20 งาน และ 50 งาน โครงสร้างเครื่องจักร 3 ระดับต่อ 3 กระบวนการที่แต่ละกระบวนการมีจำนวนเครื่องจักรเท่ากับ 2-2-2, 2-3-2 และ 3-3-3 และค่าระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน

ผลการวิจัยพบว่าจำนวนงานมีผลกระทบสูงสุดต่อทุกตัวชี้วัด โดย WIP_wait_{total} และ Total Tardiness เพิ่มขึ้นกว่า 7 เท่าเมื่อจำนวนงานเพิ่มจาก 20 งาน เป็น 50 งาน การเพิ่มจำนวนเครื่องจักรในแต่ละกระบวนการส่งผลให้ค่า Makespan และ Mean Flow Time ลดลงโดยโครงสร้าง 3-3-3 ให้ค่า Makespan และ Mean Flow Time ต่ำที่สุด ขณะที่โครงสร้าง 2-3-2 ลด WIP_wait_{total} ได้ดีกว่าในกรณีปัญหาขนาดกลาง และปัจจัยความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อการไหลของงาน เนื่องจากตัวชี้วัดดังกล่าวถูกกำหนดโดยโครงสร้างของระบบเป็นหลัก

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2569

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

BENJAPORN CHAIYANATE: THE DETERMINATION OF JOB SCHEDULING WITH OPTIMAL WORK IN PROCESS FOR FLEXIBLE FLOW SHOP WITH UNRELATED PARALLEL MACHINES. ADVISOR: ASSOC. PROF. ANCHALEE SUPITHAK, 74 PP.

This research investigates production scheduling in a Flexible Flow Shop with Unrelated Parallel Machines by developing a dual objective function integrating total interstage waiting time (WIP_wait_{total}) and Total Tardiness, solved by using a Genetic Algorithm (GA). Experiments covered 18 instances under three factors: number of jobs ($n=20$ and 50), number of machine of each operation ($2-2-2$, $2-3-2$, and $3-3-3$), and due-date tightness (θ).

Results show that number of jobs is significant effect on the total interstage uniting time and the total tardiness, which increase about seven times when the number of jobs increase from 20 jobs to 50 jobs. The increasing of the number of machines significantly decreases the makespan and average flow time. However, the due date tightness value does not significantly effect to makespan and average flow time.

Graduate Studies

Field of Engineering Technology

Academic Year 2026

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ความสามารถของรองศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและคอยชี้แนะแนวทางตลอดการทำวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกขอบคุณเป็นอย่างมากที่อาจารย์ให้เวลาและความใส่ใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล ศีลวรรณ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล ศรีพุทธาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะอันมีคุณค่า ซึ่งช่วยให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา งานชิ้นนี้จะสำเร็จไม่ได้เลยหากขาดความรักและความห่วงใยจากทุกคน

เบญจพร ชัยเนตร

TNI

TAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบการผลิต.....	4
2.2 การจัดตารางการผลิต.....	8
2.3 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของตารางการผลิต (Scheduling Performance Index).....	10
2.4 กฎ Little's Law.....	10
2.5 วิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต.....	11
2.6 สินค้าคงคลัง.....	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.8 ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap).....	19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 21
3.1	ขอบเขตปัญหาและสมมติฐานของระบบ..... 21
3.2	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตัวชี้วัดสมรรถนะ..... 22
3.3	แบบจำลองกรณีศึกษาสำหรับ ระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2..... 26
3.4	การทดลองระยะที่ 1 (Phase 1)..... 27
3.5	การพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการทดลองระยะที่ 2 (Phase 2)..... 30
3.6	การออกแบบการทดลองระยะที่ 3 (Phase3)..... 44
3.7	การวิเคราะห์การลู่เข้าของวิธีเชิงพันธุกรรม..... 47
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล..... 49
4.1	ภาพรวมผลลัพธ์การทดลองระยะที่ 3..... 49
4.2	ผลกระทบของจำนวนงาน (n)..... 51
4.3	ผลกระทบของโครงสร้างเครื่องจักร..... 51
4.4	ผลกระทบของความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ)..... 53
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)..... 54
4.6	การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effects Analysis)..... 55
4.7	การอภิปรายผลในเชิงระบบโดยอ้างอิงกฎของ Little..... 59
4.8	สรุปผล..... 60
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 61
5.1	สรุปผลการวิจัย..... 61
5.2	การอภิปรายผล..... 62
5.3	การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.4 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	63
5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	63
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก. โค้ด Python สำหรับสร้างชุดข้อมูลการทดลอง.....	70
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	74



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3.1 สัญลักษณ์และความหมาย.....	23
3.2 ข้อมูลเวลาการผลิต $P_{ij,k}$ (หน่วย: นาที) และกำหนดส่งงาน D_i	26
3.3 ผลลัพธ์ระยะที่ 1 [$\alpha = 278.75$, $k = 10$, $\bar{P} = 27.875$].....	29
3.4 สรุปพารามิเตอร์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	34
3.5 ประชากรเริ่มต้น (Generation 0).....	35
3.6 ตัวอย่างการถอดรหัสโครโมโซม C1 และเวลาเริ่ม-เวลาสิ้นสุดของแต่ละงาน.....	36
3.7 ขั้นตอนการทำ Crossover ลำดับงาน.....	38
3.8 ขั้นตอนการทำ Crossover เครื่องจักร.....	39
3.9 ขั้นตอนการ Swap Mutation สำหรับลำดับงาน.....	40
3.10 ขั้นตอนการ Random Reset Mutation สำหรับเครื่องจักร.....	41
3.11 ตัวอย่างโครโมโซมรุ่นที่ 1 (Generation 1).....	42
3.12 เปรียบเทียบผลลัพธ์ ระยะที่ 1 และระยะที่ 2.....	43
3.13 การออกแบบการทดลองในระยะที่ 3.....	45
4.1 ผลลัพธ์ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) จำกการทดลองระยะที่ 3 ทั้ง 18 ชุด [$k = 10$].....	50
4.2 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามจำนวนงาน (n) (เฉลี่ยจาก 9 ชุดการทดลองต่อระดับ).....	51
4.3 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามโครงสร้างเครื่องจักร (เฉลี่ยจาก 3 ชุดการทดลองต่อ ระดับ).....	52
4.4 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) (เฉลี่ย จาก 3 ชุดการทดลองต่อระดับ).....	53
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 5 ตัว.....	54

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ระบบเครื่องจักรเดี่ยว.....	4
2.2 ระบบเครื่องจักรขนาน.....	5
2.3 ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน.....	6
2.4 ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบสมบูรณ์.....	7
2.5 ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบทั่วไป.....	7
2.6 ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น.....	7
2.7 ลักษณะข้อจำกัดก่อน-หลังแบบต่างๆ.....	9
2.8 การจัดกลุ่มของวิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต.....	12
2.9 รอบเวลาที่ใช้ในการผลิต.....	14
3.1 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการผลิตของวิธี EDD+ECT [$\alpha = 278.75$].....	28
3.2 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการผลิตของวิธี Brute Force [$\alpha = 278.75$].....	29
3.3 โครงสร้างโครโมโซมสำหรับกรณีศึกษาระยะที่ 1 และ 2.....	31
3.4 ผังงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	33
3.5 โครโมโซมพ่อแม่ (Parents).....	37
3.6 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการผลิตของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [$\alpha = 278.75$].....	43
3.7 ตัวแทนกราฟการลู่เข้าของ GA สำหรับจำนวนงาน $n=20$ และโครงสร้างเครื่องจักร 2-2-2.....	47
3.8 ตัวแทนกราฟการลู่เข้าของ GA สำหรับจำนวนงาน $n=50$ และโครงสร้างเครื่องจักร 2-2-2.....	48
4.1 Main Effects Plot for Fitness.....	55
4.2 Main Effects Plot for WIP_wait _{total}	56
4.3 Main Effects Plot for Total Tardiness.....	56
4.4 Main Effects Plot for Makespan.....	57
4.5 Main Effects Plot for Mean Flow Time.....	57
ก .1 โค้ด Python.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานระหว่างกระบวนการ (Work in Process: WIP) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อทั้งต้นทุนการผลิตและประสิทธิภาพของระบบการผลิตโดยรวม หากระดับ WIP สูงเกินไปจะนำไปสู่การสะสมของงานในระบบ ซึ่งก่อให้เกิดความแออัด (congestion) และเพิ่มเวลาที่งานอยู่ในระบบ (Flow Time) ขณะเดียวกันยังเพิ่มความเสี่ยงในการส่งมอบงานล่าช้า ในทางตรงกันข้าม หากระดับ WIP ต่ำเกินไป อาจทำให้เครื่องจักรและทรัพยากรถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการผลิตของระบบ

ตามกฎของ Little (Little's Law) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนงานในระบบ อัตราการผลิต และเวลาที่งานอยู่ในระบบ แสดงให้เห็นว่าการสะสมของงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพฤติกรรมการไหลของงานในระบบการผลิต [1] ดังนั้น การทำความเข้าใจพฤติกรรมของ WIP จึงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการผลิต [2], [3]

ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible Flow Shop) ที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Parallel Machines) เป็นระบบที่พบได้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น ยานยนต์ [4] อิเล็กทรอนิกส์ [5] และอาหาร [6] โดยระบบดังกล่าวประกอบด้วยหลายขั้นตอนการผลิต และในแต่ละขั้นตอนมีเครื่องจักรหลายตัวที่สามารถทำงานแทนกันได้ แต่มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ปัญหาการจัดตารางการผลิตมีความซับซ้อน และจัดอยู่ในกลุ่มปัญหา NP-hard [7], [8]

ในบริบทของการจัดตารางการผลิต การสะสมของงานระหว่างกระบวนการมักสะท้อนผ่านเวลารอคอยระหว่างกระบวนการผลิต (interstage waiting time) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความไม่สมดุลของการใช้ทรัพยากรและการเกิดคอขวดในระบบ [9] ขณะเดียวกัน ความล่าช้าในการส่งมอบงาน (Tardiness) เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนถึงความสามารถในการตอบสนองความต้องการของลูกค้า

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการลดเวลาปิดงาน (Makespan) หรือเวลาล่าช้า (Tardiness) เป็นหลัก ขณะที่การพิจารณาการสะสมของงานระหว่างกระบวนการควบคู่กับตัวชี้วัดด้านการส่งมอบยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะในบริบทของ Flexible Flow Shop ที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน [10], [11]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบดังกล่าว โดยพิจารณาตัวชี้วัดเชิงเวลาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของงานในระบบและการส่งมอบงาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของตารางการผลิตภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบ Flexible Flow Shop ที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน

1.2.2. เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการสะสมของงานระหว่างกระบวนการในรูปของเวลารอคอยระหว่างกระบวนการการผลิต

1.2.3. เพื่อประเมินสมรรถนะของตารางการผลิตโดยใช้ตัวชี้วัดเชิงเวลา ได้แก่ เวลารอคอยระหว่างกระบวนการและความล่าช้าในการส่งมอบงาน

1.2.4. เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบดังกล่าว โดยใช้ตัวชี้วัดเชิงเวลาในการประเมินผล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible Flow Shop) ที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน

1.3.2 กำหนดให้ลำดับงานเป็นแบบ permutation schedule กล่าวคือ ลำดับงานเหมือนกันในทุกขั้นตอนการผลิต

1.3.3 จำลองระบบการผลิต 3 ขั้นตอน แต่ละผลิตภัณฑ์เป็นชิ้นงานที่มีความแตกต่างกัน และเครื่องจักรแต่ละเครื่องสามารถผลิตชิ้นงานได้หลายชนิด

1.3.4 พิจารณาการสะสมของงานระหว่างกระบวนการในเชิงเวลา ผ่านเวลารอคอยระหว่างกระบวนการการผลิต

1.3.5 ประเมินสมรรถนะของระบบการผลิตโดยใช้ตัวชี้วัดเชิงเวลา ได้แก่ เวลารอคอยระหว่างกระบวนการและความล่าช้าในการส่งมอบงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

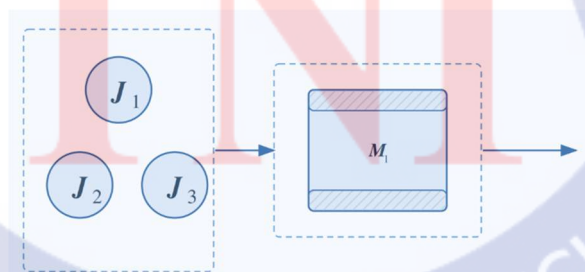
จากบทที่แล้วที่มีการพูดถึงถึงที่มาและความสำคัญของปริมาณงานระหว่างกระบวนการ (Work In Process) ไม่เหมาะสมนั้น ส่งผลต่อต้นทุนและกระบวนการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการผลิต งานระหว่างกระบวนการและวิธีการหาคำตอบของปัญหาการหาปริมาณงานระหว่างกระบวนการ (Work In Process) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ศึกษามาวิเคราะห์ โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

2.1 ระบบการผลิต

ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ [12] ได้กล่าวถึงความหมายของระบบการผลิต ว่าเป็นขั้นตอนหรือกระบวนการในการแปลงสภาพวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์หรือสินค้าสำเร็จรูป โดยทั่วไปสำหรับปัญหาทางด้านการจัดการการผลิต มักจะแบ่งระบบการผลิตออกตามลำดับของเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (Machine Routing) ดังต่อไปนี้

2.1.1 ระบบเครื่องจักรเดี่ยว (Single machine)

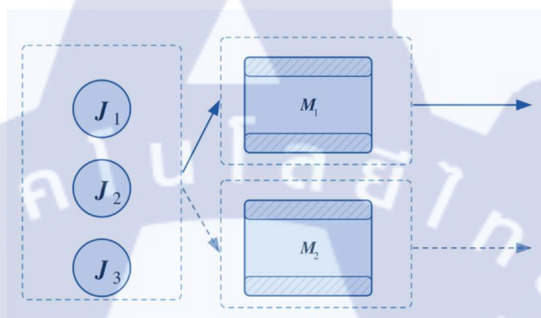
ระบบเครื่องจักรเดี่ยวจะประกอบไปด้วยงานชนิดขั้นตอนเดียวจำนวนหนึ่ง โดยที่งานเหล่านี้จะต้องทำบนเครื่องจักรเดียวกันเท่านั้น ลักษณะการทำงานของระบบเครื่องจักรเดี่ยวจะเป็นรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน รูปที่ 2.1 แสดงระบบเครื่องจักรเดี่ยวซึ่งประกอบด้วยงานขั้นตอนเดียวจำนวน 3 งาน ได้แก่ งาน J_1 , J_2 , และ J_3 โดยแต่ละงานจะต้องทำบนเครื่องจักร M_1



รูปที่ 2.1 ระบบเครื่องจักรเดี่ยว (ดัดแปลงจาก [12])

2.1.2 ระบบเครื่องจักรขนาน (Parallel machine)

ระบบเครื่องจักรขนานจะคล้ายกับระบบเครื่องจักรแบบเดี่ยวตรงที่แต่ละงานประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานเพียงขั้นตอนเดียว แต่ในด้านเครื่องจักรจะประกอบไปด้วยเครื่องจักรที่สามารถทำงานทดแทนกันได้ จำนวน m เครื่อง ดังนั้นในระบบเครื่องจักรขนานจะต้องมีกระบวนการตัดสินใจเพิ่มเติมว่าแต่ละงานควรจะทำบนเครื่องจักรเครื่องใด รูปที่ 2.2 แสดงระบบเครื่องจักรขนานที่ประกอบด้วยงาน J_1 , J_2 , และ J_3 โดยแต่ละงานสามารถทำบนเครื่องจักร M_1 หรือ M_2 ก็ได้



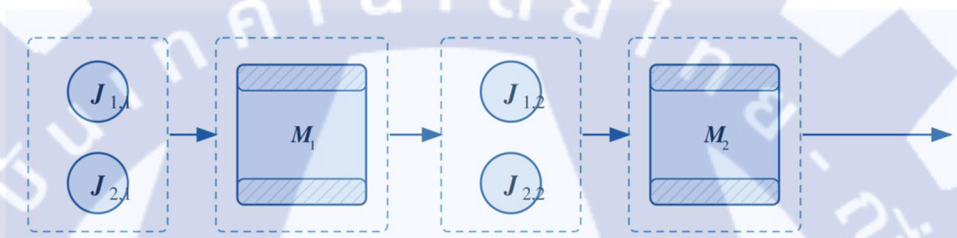
รูปที่ 2.2 ระบบเครื่องจักรขนาน (ดัดแปลงจาก [12])

เครื่องจักรที่นำมาขนานกันนี้อาจจะมีคุณสมบัติบางอย่างเหมือนกันหรืออาจมีคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งสามารถแบ่งระบบเครื่องจักรขนานออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

1. เครื่องจักรขนานที่เหมือนกัน (Identical Parallel Machines) ในระบบแบบนี้เครื่องจักรทั้งหมดที่ขนานกันจะมีความเร็วในการผลิตเท่ากัน
2. เครื่องจักรขนานที่มีความเร็วในการผลิตต่างกัน (Different Speed or Uniform Parallel Machines) ในระบบแบบนี้เครื่องจักรที่ขนานกันจะมีความเร็วในการผลิตไม่เท่ากัน เช่น เครื่องจักร M_1 จะมีความเร็วในการผลิตสูงกว่าเครื่องจักร M_2 และจะเป็นแบบนี้ไปตลอดไม่ว่าจะทำงานใดก็ตาม
3. เครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Parallel Machines) ในระบบนี้เครื่องจักรที่ขนานกันจะมีความเร็วในการผลิตไม่เท่ากันและจะเปลี่ยนไปตามงาน เช่น เครื่องจักร M_1 จะมีความเร็วในการผลิตสูงกว่าเครื่องจักร M_2 สำหรับงาน J_1 แต่จะเป็นในทางตรงกันข้ามสำหรับงาน J_2

2.1.3 ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow shop)

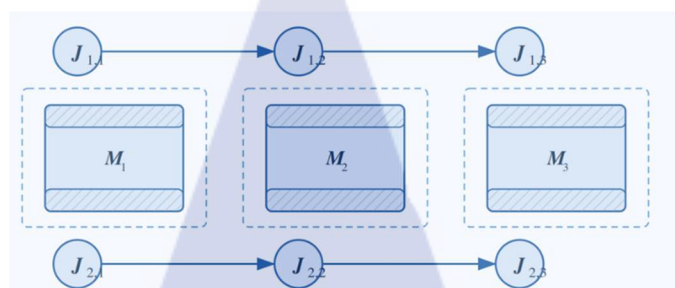
ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนจะประกอบด้วยงานที่มีขั้นตอนการทำงานมากกว่า 1 ขั้นตอน (J_{ij}) และจะมีเครื่องจักรที่ใช้ทำงานเหล่านี้ จำนวน m เครื่อง ที่เรียงต่อกันในลักษณะอนุกรม ในระบบการผลิตแบบนี้จะมีทิศทางในการทำงานหรือการไหลของงานไปในทิศทางเดียวกัน และจะต้องไม่วนกลับมาที่เครื่องจักรเดิม อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงเงื่อนไขก่อน-หลังในการทำงานด้วย ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ระบบการผลิตในลักษณะนี้ เช่น รถยนต์ สิ่งทอ (Textile) รูปที่ 2.3 แสดงระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยงาน 2 งาน ($i = 1, 2$) แต่ละงานมี 2 ขั้นตอน ($j = 1, 2$) โดยมีเงื่อนไขก่อน-หลังในการทำงาน คือ ขั้นตอนแรกของงาน 1 ($J_{1,1}$) จะต้องทำบนเครื่องจักร M_1 ก่อนเสมอ เมื่อเสร็จแล้วจึงสามารถทำขั้นตอนที่ 2 ($J_{1,2}$) บนเครื่องจักร M_2 ได้



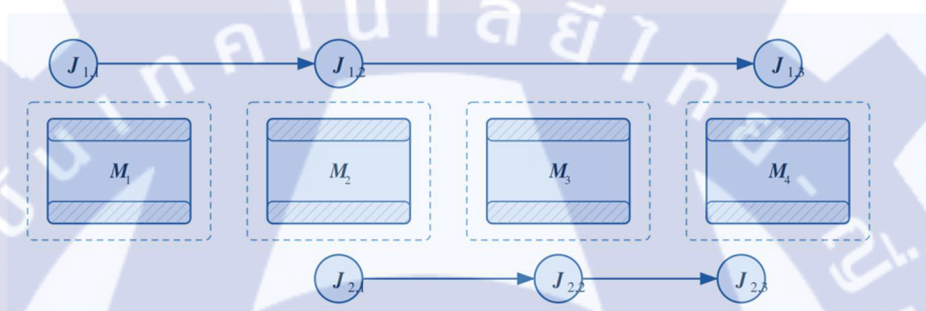
รูปที่ 2.3 ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (ดัดแปลงจาก [12])

ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

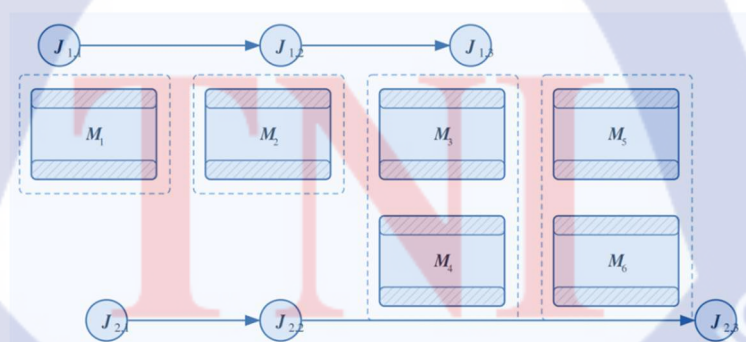
1. ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบสมบูรณ์ (Pure Flow shop) จะมีทิศทางการไหลของงานจะเหมือนกันสำหรับทุกงาน ดังรูปที่ 2.4
2. ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบทั่วไป (General Flow Shop) ทิศทางการไหลของงานจะไม่จำเป็นต้องเหมือนกันสำหรับทุกงาน แต่จะต้องมีเพียงทิศทางเดียว ดังรูปที่ 2.5
3. ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible or Hybrid Flow Shop) ระบบการผลิตแบบนี้จะมีลักษณะเฉพาะเพิ่มเติมจากระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบทั่วไปคือ ในแต่ละขั้นตอนการผลิตสามารถมีเครื่องจักรขนานกันได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบสมบูรณ์ (ดัดแปลงจาก [12])



รูปที่ 2.5 ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบทั่วไป (ดัดแปลงจาก [12])



รูปที่ 2.6 ระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (ดัดแปลงจาก [12])

2.1.4 ระบบการผลิตแบบดึง (Pull System)

นิพนธ์ บัวแก้ว [13] กล่าวถึงลักษณะของระบบการผลิตแบบดึงไว้ว่า เป็นการผลิตตามความต้องการของลูกค้า (Customer Demand) ไม่ได้ผลิตตามแผนการผลิตของบริษัท ซึ่งได้จากการพยากรณ์ความต้องการ เป็นลักษณะของ Made to order โดยแต่ละสถานีทำงาน (Work Station) มีความเชื่อมโยงกัน สัมพันธ์ซึ่งกันและกัน กระบวนการหน้าจะทำการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของกระบวนการหลังเท่านั้นและจะหยุดการผลิตเมื่อกระบวนการหลังผลิตไม่ทัน กระบวนการหลังจะร้องของานจากกระบวนการหน้าเมื่อมีความต้องการงานเกิดขึ้น โดยทำเท่าที่จำเป็นเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นการลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น (Waste) โดยเฉพาะการผลิตมากเกินไป (Over Production) การรอคอย (Waiting) และการมีสินค้าคงคลังเกินความจำเป็น (Unnecessary Inventory)

2.1.5 ระบบการผลิตแบบผลัก (Push System)

นิพนธ์ บัวแก้ว [13] กล่าวถึงลักษณะของระบบการผลิตแบบผลักไว้ว่า เป็นการทำการผลิตตามแผนการผลิต โดยไม่ได้คำนึงถึงความต้องการของลูกค้า (Customer Demand) เป็นลักษณะของ Made to Stock ทำให้มีสินค้าคงคลังมากเกินความจำเป็น เป็นระบบที่ต่างสถานีงาน ต่างคนต่างผลิตเป็นอิสระต่อกัน โดยไม่คำนึงว่ากระบวนการข้างหลังจะผลิตทันหรือไม่ ทำงานในกระบวนการของตนให้ได้มากที่สุด เพื่อผลัก (Push) งานไปกระบวนการหลังๆ

2.2 การจัดตารางการผลิต

ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ [12] กล่าวว่า ขั้นตอนการตัดสินใจว่าควรจะใช้เครื่องจักรใด ควรจะทำงานใดก่อนหรือหลัง ควรจะต้องเริ่มงานเมื่อไหร่และควรจะต้องทำงานให้เสร็จเมื่อไหร่ เราเรียกขั้นตอนนี้ว่า การจัดตารางการผลิต

2.2.1 ลักษณะของตารางการผลิต (Production Schedule Characteristics)

2.2.1.1 ตารางการผลิตที่มีลำดับงานบนทุกเครื่องจักรเหมือนกัน (Permutation Schedule)

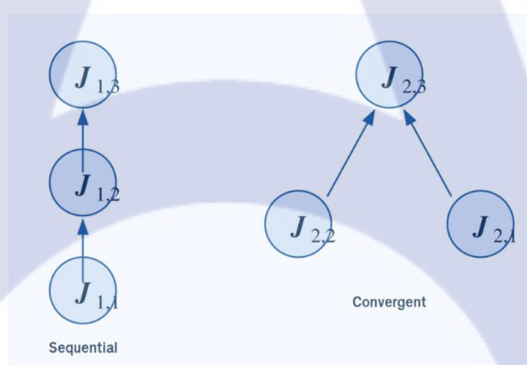
ตารางการผลิตลักษณะนี้จะมีลำดับของงานเหมือนกันทุกเครื่อง (การไหลของงานมีทิศทางเดียว) และมักจะพบได้ในระบบการผลิตแบบไหลเส้น (Flow Shop) โดยลำดับงานบนเครื่องจักรแรกหรือเครื่องจักรที่เป็นคอขวด (Bottleneck Machine) มักจะเป็นตัวลำดับงานบนเครื่องจักรอื่นๆ การจัดตารางการผลิตลักษณะนี้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลำดับของการทำงานบนเครื่องจักรใดจะต้องเปลี่ยนลำดับการทำงานบนเครื่องจักรอื่นๆด้วย เพื่อให้ทุกเครื่องจักรมีลำดับการทำงานเหมือนกันหมด

2.2.1.2 ตารางการผลิตที่มีลำดับงานบนเครื่องจักรไม่เหมือนกัน (Non-Permutation Schedule)

การจัดตารางแบบนี้จะพบในระบบการผลิตไหลเลื่อนแบบทั่วไปและแบบยืดหยุ่น (General Flow shop and Flexible Flow shop) หรือพบได้ในระบบการผลิตแบบตามงาน (Job Shop) การจัดตารางแบบนี้แตกต่างกับการจัดตารางแบบ Permutation ตรงที่ลำดับของงานบนเครื่องจักรไม่จำเป็นจะต้องเหมือนกัน

2.2.1.3 ตารางการผลิตที่มีข้อจำกัดด้านลำดับก่อน-หลัง (Precedence Constraint)

ในปัญหาการจัดตารางการผลิต ข้อจำกัดด้านลำดับก่อน-หลัง หมายถึง การดำเนินงานใดๆ จะเริ่มทำได้ก็ต่อเมื่อการดำเนินงานที่อยู่ก่อนหน้าได้ทำเสร็จสิ้นแล้วเท่านั้น ข้อจำกัดลักษณะนี้จะเกิดกับงานที่มีหลายขั้นตอน ซึ่งพบได้ในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนและระบบการผลิตแบบตามงาน ข้อจำกัดดังกล่าวนี้อาจมีลักษณะของความสัมพันธ์ก่อน-หลังแบบอนุกรม (Sequential Relationship) หรือแบบลู่เข้า (Convergent Relationship) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะข้อจำกัดก่อน-หลังแบบต่างๆ (ดัดแปลงจาก [12])

2.2.1.4 ตารางการผลิตที่ไม่มีการรอคอย (No Wait Schedule)

การไม่รอคอย หมายถึง การที่งานจะไม่สามารถหยุดรอคอยระหว่างเครื่องจักรได้ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายหรือความไม่สมบูรณ์ของงานนั้นๆ ดังนั้นการจัดตารางการผลิตจะต้องคำนึงถึงความพร้อมของเครื่องจักรในสถานงานถัดไป เพื่อให้งานที่ออกไปจากเครื่องจักรก่อนหน้าสามารถดำเนินงานต่อได้ทันที ข้อจำกัดนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนและแบบตามงาน

2.3 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของตารางการผลิต (Scheduling Performance Index)

ถูกกำหนดขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าตารางการผลิตที่ได้นั้นเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการหรือไม่ โดยตัวชี้วัดอาจจะเป็นเวลาที่งานเสร็จก่อนรวมน้อยที่สุด เวลาล่าช้ารวมน้อยที่สุด ซึ่งมีตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ของตารางการผลิตโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 เวลาล่าช้า (Tardiness: T)

หมายถึง เวลาที่ทำงานเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดส่ง หรือเวลาที่ส่งงานไม่ทันตามกำหนด เวลาล่าช้าของงานจะคำนวณได้จากผลต่างระหว่างเวลาเสร็จงานชิ้นสุดท้ายและกำหนดส่งงาน

2.3.2 เวลาที่งานอยู่ในระบบ (Flow Time: F)

เวลาที่งานอยู่ในระบบ หมายถึง เวลาทั้งหมดตั้งแต่เริ่มงานจนถึงเวลาที่ทำงานเสร็จสิ้น ซึ่งรวมไปถึงเวลารอคอยทุกชนิด เช่น เครื่องจักรไม่ว่าง เครื่องจักรเสีย การรอคอยหรือไม่มีวัตถุดิบ เวลาที่อยู่ในระบบจะเกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายด้านการจัดเก็บสินค้าของงานระหว่างกระบวนการ (Work In Process: WIP) และความเสียหายที่เกิดจากการจัดเก็บไว้นาน ดังนั้นการทำให้เวลาที่งานอยู่ในระบบมีค่าน้อยที่สุดจะหมายถึงการทำให้ระบบมีงานระหว่างผลิตน้อยที่สุดตามไปด้วย คำนวณได้จากผลต่างระหว่าง เวลาเสร็จงานน้อยสุดท้าย และเวลาที่ปล่อยงานน้อยแรกของงานใด ๆ เข้าสู่ระบบ

2.3.3 เวลาเสร็จงาน (Completion Time: C)

หมายถึง เวลาที่ทำงานน้อยสุดท้ายของงานใด ๆ เสร็จ

2.4 กฎ Little's Law

W. J. Hopp and M. L. Spearman [1] ได้พูดถึงเกี่ยวกับกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาเฉลี่ยที่ชิ้นงานอยู่ในระบบ อัตราการผลิตของระบบ (Throughput) และ ปริมาณงานระหว่างกระบวนการ (Work in process) ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

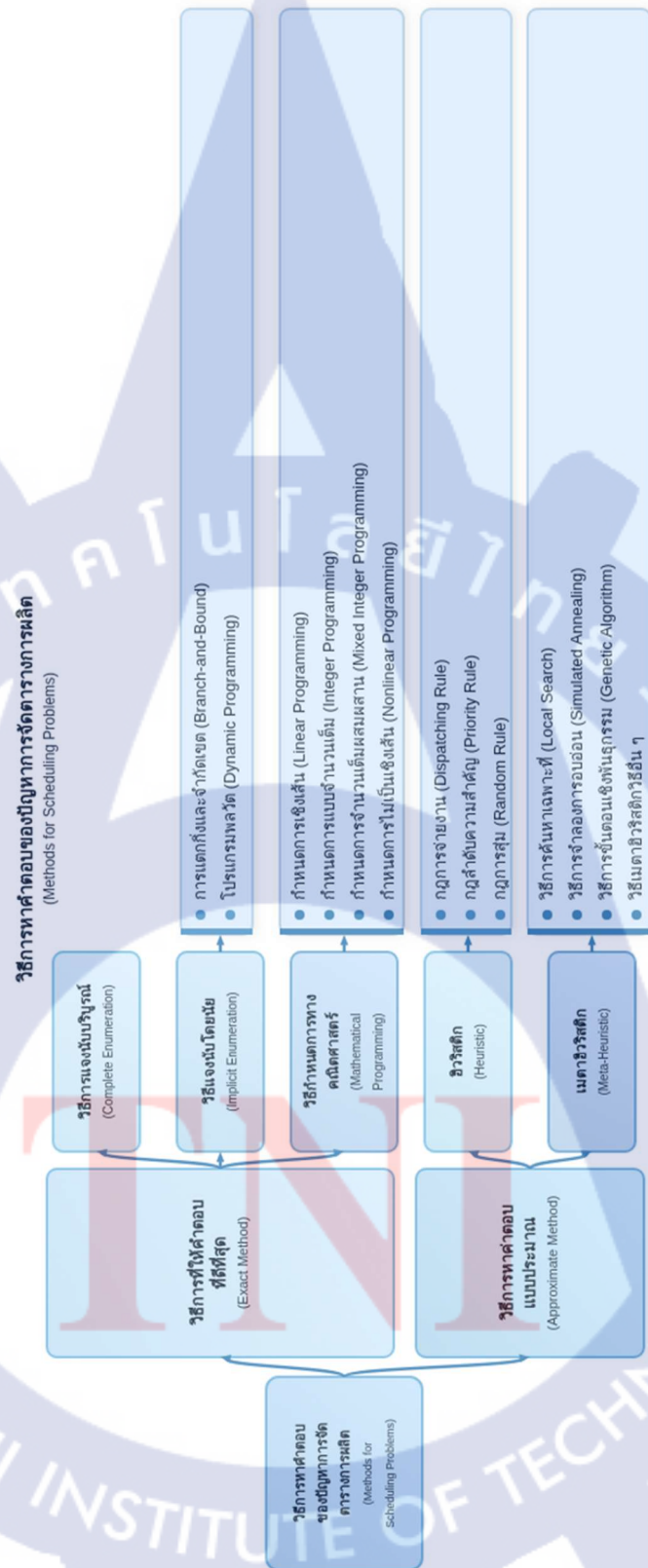
$$WIP = TH \times CT \quad (2.1)$$

โดยที่	WIP	แทนปริมาณงานระหว่างกระบวนการ
	TH	แทนอัตราการผลิตของระบบ
	CT	แทนเวลาเฉลี่ยที่ชิ้นงานอยู่ในระบบ

2.5 วิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต

วิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตมีอยู่หลายวิธีในการหาคำตอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะขนาดของปัญหา โดยสามารถแบ่ง ออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Exact Method) ซึ่งเป็นวิธีที่การันตีว่าตารางการผลิตที่ได้นั้นจะมีตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ต้องการดีที่สุดและวิธีที่ให้คำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด หรือเรียกว่าวิธีการหาคำตอบแบบประมาณ (Approximate Method) ใช้ในกรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้เร็วมากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Exact Method) โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 2.8





รูปที่ 2.8 การจัดกลุ่มของวิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต (ดัดแปลงจาก [12])

2.6 ลินค้ำคองคลั่ง

พิภพ ลลิตาภรณ์ [14] ได้นิยามคำว่า ของคองคลั่ง ไว้ว่า ของคองคลั่งคือวัสดุทุกอย่างการที่องค์กรถือครองไว้เพื่อรองรับการดำเนินการทางธุรกิจไม่ว่าจะเป็นเพื่อการผลิตหรือเพื่อการจำหน่ายผลิต แต่การมีของคองคลั่งมากเกินไปก็ทำให้ต้นทุนจมมากเกินไปและมีค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง แต่ถ้ามีน้อยเกินไปก็อาจทำให้ธุรกิจเกิดความเสียหายได้ ซึ่งองค์กรเกือบทุกแห่งมักจะมีของคองคลั่งเก็บไว้จำนวนหนึ่งทั้งนี้เพื่อให้เกิดความคล่องตัวและความมั่นใจในการดำเนินงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิต การขาดสต็อกวัตถุดิบในระหว่างการผลิตอาจทำให้การผลิตเกิดการหยุดชะงักทำให้ส่งของล่าช้า และอาจส่งผลกระทบต่อแรงถึงขั้นสูญเสียลูกค้าหรือส่วนแบ่งการตลาดไปได้ ดังนั้นเหตุผลที่องค์กรจำเป็นต้องถือครองของคองคลั่งไว้ มีดังนี้

2.6.1 เหตุผลที่จำเป็นต้องมีของคองคลั่ง

2.6.1.1 ของคองคลั่งที่เป็นสินค้าสำเร็จรูป

ช่วยป้องกันความผิดพลาดอันเกิดจากความต้องการสินค้าที่มีมากกว่าที่พยากรณ์ไว้ การผิดพลาดจะไม่ได้รับการตอบสนองถ้ากิจการไม่มีของคองคลั่งที่เป็นสินค้าสำเร็จรูปเก็บไว้ ทำให้ธุรกิจต้องขาดกำไรที่ควรจะได้ และอาจทำให้ความเชื่อถือของลูกค้าที่มีต่อธุรกิจลดลง และในกรณีที่รุนแรงก็อาจทำให้ลูกค้าหันไปซื้อสินค้าจากคู่แข่งได้ แต่ถ้าเรามีของคองคลั่งเก็บไว้จำนวนหนึ่ง ก็จะทำให้ความเสียหายดังกล่าวบรรเทาลงได้

ช่วยให้การผลิตสามารถดำเนินไปได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เช่นเดียวกับความต้องการสินค้า โรงงานไม่จำเป็นต้องหยุดงานหรือเปลี่ยนแปลงจำนวนคนงานบ่อยๆ ซึ่งจะทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิตและการดำเนินงาน ทั้งยังช่วยให้มีการใช้ประโยชน์จากเครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์การผลิต อาคาร และกำลังคนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ผลิตสินค้าคงเหลือเก็บไว้ในช่วงระหว่างมีเวลาว่าง เพื่อจำหน่ายในช่วงที่มีความต้องการสินค้าสูง โดยไม่ต้องเร่งการผลิตสินค้าหรือทำการผลิตนอกเวลา

2.6.1.2 ของคองคลั่งงานระหว่างทำ

ช่วยให้การผลิตในแต่ละหน่วยผลิตสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง ไม่จำเป็นต้องพึ่งพิงกันมากนัก ตัวอย่างเช่น การผลิตจากหน่วยผลิตที่หนึ่งแล้วส่งต่อไปยังหน่วยผลิตที่สอง หากการทำงานในหน่วยผลิตแรกต้องหยุดชะงักลง ก็ทำให้งานในหน่วยผลิตที่สองต้องหยุดชะงักไปด้วย ถ้าเราให้หน่วยงานแรกทำงานเกินไว้ส่วนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Buffer stock จะช่วยทำให้งานในหน่วยผลิตที่สองดำเนินต่อไปได้ถึงแม้ว่าหน่วยผลิตแรกจะหยุดชะงักไปชั่วคราว

ช่วยให้การผลิตสามารถดำเนินไปได้อย่างสม่ำเสมอ ถึงแม้ว่าการทำงานในแต่ละหน่วยผลิตจะมีความเร็วไม่เท่ากัน เช่น หน่วยผลิตที่มีความเร็วช้าเราอาจจะให้ผลิตเก็บไว้ล่วงหน้า

2.6.1.3 ของคงคลังที่เป็นวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนที่ซื้อจากที่อื่น

เพื่อป้องกันการขาดแคลนวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนอันเนื่องมาจากการล่าช้าด้วยเหตุผลหลายอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงกำหนดเวลาในการขนส่งของผู้ขาย ผู้ขายขาดแคลนสินค้าไม่สามารถจัดส่งมาให้ได้หรือเกิดการนัดหยุดงานที่โรงงานของผู้ขาย หรือเกิดอุทกภัย เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีวัตถุดิบคงเหลือไว้ให้เพียงพอ วัตถุดิบหรือชิ้นส่วนใดที่สำคัญต้องมีการเก็บไว้ให้มากพอ

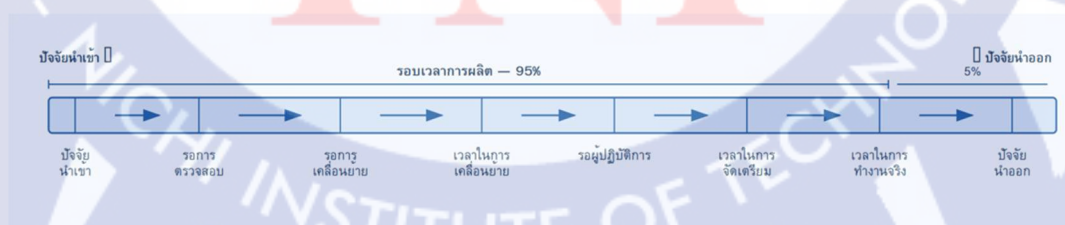
เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อหรือสั่งผลิต เพราะการสั่งซื้อครั้งละจำนวนมากๆ ราคาต่อหน่วยมักจะลดลง ตัวอย่างเช่น ถ้าเราซื้อวัตถุดิบมาเพื่อใช้ในการผลิตเป็นระยะเวลา 30 วัน จะประหยัดกว่าการซื้อวัตถุดิบมาเพื่อการผลิตหนึ่งวัน นอกจากนี้ การมีวัตถุดิบคงเหลือเก็บไว้ยังช่วยป้องกันการขาดทุนที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากวัตถุดิบราคาสูงขึ้นก็ได้

2.6.2 ประเภทของสินค้าคงคลัง

ไฮเซอร์ เจย์ และ เรนเดอร์ เบร์รี [15] ได้จำแนกประเภทของคงคลังออกเป็น 4 ประเภทที่สำคัญ คือ

2.6.2.1 สินค้าคงคลังประเภทวัตถุดิบ (Raw material inventory) หมายถึง สิ่งที่ต้องการจัดซื้อหรือจัดหา เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแปรผันจากผู้จัดหาวัตถุดิบในส่วนของคุณภาพ ปริมาณ หรือระยะเวลาในการส่งมอบ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา

2.6.2.2 สินค้าคงคลังประเภทงานระหว่างทำ [Work-in-process inventory (WIP)] หมายถึง วัสดุหรือวัตถุดิบที่ได้มีการเปลี่ยนสภาพแล้ว แต่ยังไม่เป็นสินค้าสำเร็จรูปโดยสมบูรณ์ งานระหว่างทำเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เนื่องจากในการผลิตนั้น จะมีรอบเวลาในการผลิต (Cycle time) เกิดขึ้น ดังนั้น การลดรอบเวลาในการผลิตจะลดปริมาณสินค้าคงคลังให้มีจำนวนน้อยลง รูปที่ 2.9 แสดงถึงรอบเวลาที่ใช้ในการผลิต ซึ่งจะเห็นได้ว่า 95% ของรอบเวลานั้น เป็นช่วงเวลาของสินค้าคงคลังประเภทงานระหว่างทำทั้งสิ้น



รูปที่ 2.9 รอบเวลาที่ใช้ในการผลิต (ดัดแปลงจาก [15])

2.6.2.3 สินค้าคงคลังประเภทอะไหล่สำหรับการซ่อมบำรุง [Maintenance / Repair / Operating (MROs)] หมายถึง วัสดุหรืออะไหล่ที่มีสำรองไว้ เพื่อการซ่อมบำรุง และการซ่อมแซม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภาวะอะไหล่ขาดแคลน หรือจัดหาไม่ได้ในยามที่เครื่องมือหรืออุปกรณ์ชำรุดเสียหาย

2.6.2.4 สินค้าคงคลังประเภทผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finished goods inventory) หมายถึง สินค้าที่ผ่านกระบวนการผลิตขั้นสุดท้ายออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่สมบูรณ์ และรอคอยการส่งมอบให้กับลูกค้าต่อไป ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปอาจถูกจัดเก็บเป็นสินค้าคงคลัง เนื่องจากความต้องการของลูกค้าในอนาคตไม่แน่นอน ผู้ผลิตจำเป็นต้องมีสินค้าจำนวนหนึ่งสำรองไว้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยด้านการจัดการตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นและการควบคุมปริมาณงานระหว่างกระบวนการ (WIP) มีการศึกษาในหลายมิติ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถจำแนกออกเป็น 4 กลุ่มแนวคิดหลัก ดังต่อไปนี้

2.7.1 กลุ่มที่ 1 แนวคิดพื้นฐานของระบบการผลิตและการวิเคราะห์สมรรถนะ

Hopp และ Spearman [1] ได้นำเสนอแนวคิด Factory Physics ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง WIP อัตราการผลิต (Throughput) และเวลาเฉลี่ยที่ชิ้นงานอยู่ในระบบ (Cycle Time) ผ่านกฎของ Little ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดพื้นฐานที่นำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของระบบการผลิตในงานวิจัยนี้ Prabhu และคณะ [16] ได้ศึกษา Workload Control ในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนพร้อมวิเคราะห์ บทบาทของเวลารอคอยระหว่างสถานีในฐานะตัวชี้วัด WIP สะสม แนวคิดดังกล่าวสนับสนุนการใช้ WIP_wait_{total} ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการอธิบายแนวคิดพื้นฐานและการวิเคราะห์ สมรรถนะของระบบในภาพรวม โดยไม่ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับการจัดการตารางการผลิตโดยตรง

2.7.2 กลุ่มที่ 2 การจัดการตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่น

Ruiz และ Vázquez-Rodríguez [7] ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับปัญหาการจัดการตารางการผลิต ในระบบ Hybrid Flow Shop และชี้ให้เห็นว่าปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง โดยเฉพาะในกรณีที่มีเครื่องจักรหลายเครื่องในแต่ละขั้นตอน ทำให้จำนวนทางเลือกของการจัดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนงานเพิ่มขึ้น Jungwattanakit และคณะ [8] ได้ศึกษาการจัดการตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Parallel Machines: UPM) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหลายรูปแบบ โดยพิจารณาตัวชี้วัดด้าน Makespan และ Tardiness ซึ่งเป็นระบบที่ตรงกับงานวิจัยนี้มาก

ที่สุดในด้านโครงสร้างระบบ ปรีตรตา จันทรจิระวัฒน์ [17] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิต ในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ หาดารางการผลิตที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดของระบบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความซับซ้อนของปัญหา การจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน Rocholl และ Mönch [10] ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรแบบประมวลผลเป็นชุด (Batch Processing Machines) และเสนอแนวทางการใช้ เมตาฮิวริสติกในการปรับปรุงคุณภาพของคำตอบสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ในบริบทของงานวิจัยในประเทศไทย อณจ ชัยมณี และวิสุทธิ์ สุพิทักษ์ [18] ได้ศึกษาการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบ Flexible Flow Shop โดยพิจารณาเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร ที่ขึ้นกับลำดับงาน ขณะที่ ธนวัฒน์ วงศ์เครือ และวรวิทย์ หวังวัชรกุล [19] ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรขนานในกระบวนการทดสอบวงจรรวม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการจัดตารางการผลิต โดยให้ความสำคัญกับตัวชี้วัดด้าน Makespan หรือ Tardiness เพียงอย่างเดียว ขณะที่ประเด็นด้านการสะสมของงานระหว่างกระบวนการที่วัดด้วย WIP_wait_{total} ยังไม่ได้รับการพิจารณาในฐานวัตถุประสงค์ร่วมกับ Tardiness อย่างชัดเจน

2.7.3 กลุ่มที่ 3 การจัดการปริมาณงานระหว่างกระบวนการและระบบการผลิตแบบดึง

แนวคิดสำคัญในการจัดการระบบการผลิตคือการควบคุมปริมาณงานระหว่างกระบวนการผ่านนโยบาย การปล่อยงาน (Work Release Policy) Spearman และ Zazanis [20] ได้เปรียบเทียบระบบ การผลิตแบบผลักและแบบดึง และแสดงให้เห็นว่าการควบคุมการปล่อยงานเข้าสู่ระบบสามารถช่วย ลดระดับ WIP และปรับปรุงสมรรถนะของระบบการผลิตได้ ระบบ CONWIP เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมระดับ WIP Braglia และคณะ [21] ได้ศึกษาการกำหนดจำนวนบัตร CONWIP ที่เหมาะสมในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน Raju และ Siddiqui [22] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับงานและระดับ WIP ในระบบ Cyclic CONWIP Flow Shop Srinivasan และ Viswanathan [23] ได้ศึกษาแบบจำลองสำหรับการกำหนดระดับ WIP ที่เหมาะสมในระบบการผลิตที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ Muhammad และคณะ [24] ได้ศึกษาการลดต้นทุน WIP ในศูนย์เครื่องจักร CNC และ Bokor และ Altendorfer [25] ได้เสนอการขยายแนวคิด CONWIP สำหรับระบบการผลิตหลายขั้นตอน สิ่งที่ต้องตระหนักคืองานวิจัยในกลุ่มนี้ทั้งหมดแก้ปัญหา WIP โดยผ่านนโยบาย การควบคุมการปล่อยงาน (WIP limit / CONWIP card) ซึ่งเป็นกลไกระดับระบบ แตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่แก้ปัญหา WIP สะสมโดยตรงผ่านการจัดตารางการผลิต (Scheduling)

กล่าวคือการเลือกลำดับงานและการมอบหมายเครื่องจักรที่เหมาะสม สามารถทำงานไหลผ่านระบบโดยไม่เกิดการรอคอยระหว่างสถานีได้ โดยไม่จำเป็นต้องกำหนด WIP limit ใด ๆ

2.7.4 กลุ่มที่ 4 การประยุกต์ใช้เมตาฮิวริสติกในการจัดตารางการผลิต

เนื่องจากปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่น เป็นปัญหา NP-hard วิธีเมตาฮิวริสติกจึงได้รับความนิยมในการค้นหาคำตอบที่มีคุณภาพในเวลาที่เหมาะสม Goldberg [26] ได้นำเสนออัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) ซึ่งอาศัยแนวคิดจากกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ Deb [27] ได้พัฒนาแนวคิด Evolutionary Algorithms สำหรับปัญหา ที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งช่วยให้สามารถพิจารณาความสมดุลระหว่างเป้าหมายที่ขัดแย้งกันได้พร้อมกัน Vallada และ Ruiz [28] ได้พัฒนา GA สำหรับปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน และแสดงให้เห็นว่าวิธีดังกล่าวสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ นอกจากนี้ Yu และคณะ [11] ได้เสนอ GA สำหรับการจัดตารางการผลิตในระบบ Hybrid Flow Shop โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลด Total Tardiness Davis [29] ได้เสนอ Order Crossover (OX) ซึ่งเป็นวิธีการผสมพันธุ์ที่รักษาคุณสมบัติเพอร์มิวเทชันไว้ได้อย่างสมบูรณ์ และถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้สำหรับยีนลำดับงาน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้มุ่งเน้นการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการจัดตารางการผลิตเป็นหลัก โดยยังไม่ได้พิจารณาการลด WIP_{wait_total} ร่วมกับ Total Tardiness ในฐานะฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวกันในระบบ FFS-UPM อย่างชัดเจน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย / แหล่งอ้างอิง	ระบบการผลิต	วัตถุประสงค์หลัก	วิธีการ	WIP	Tardiness	GA
Hopp and Spearman [1]	ทั่วไป	WIP, TH, CT (Little's Law)	Factory Physics	✓	-	-
Ruiz and Vázquez-Rodríguez [7]	Hybrid Flow Shop	Makespan	Literature Survey	-	-	-
Jungwattanakit et al. [8]	FFS-UPM	Makespan, Tardiness	Heuristic, GA	-	✓	✓
ปรีตรดา จันทร์จิระวัฒน์ [17]	FFS-UPM	Makespan	Math Model	-	-	-
Rocholl and Mönch [10]	FFS (batch)	Total Tardiness	Metaheuristic	-	✓	-
อนจ ชัยมณี และ วิสุทธิสุพิทักษ์ [18]	FFS	Makespan, Tardiness	Heuristic	-	✓	-
ธนวัฒน์ วงศ์เครือ และ วรวิทย์ [19]	Parallel Machine	Makespan	GA	-	-	✓
Yu et al. [11]	Hybrid Flow Shop	Total Tardiness	GA	-	✓	✓
Vallada and Ruiz [28]	Parallel Machine	Total Weighted Tardiness	GA	-	✓	✓
Spearman and Zazanis [20]	Flow Shop	WIP level, Throughput	Pull vs Push Analysis	-	-	-
Braglia et al. [21]	Flow Shop (CONWIP)	WIP level	Analytical Model	-	-	-
Raju and Siddiqui [22]	CONWIP Flow Shop	WIP, Flow Time	Cyclic CONWIP	-	-	-
Srinivasan and Viswanathan [23]	Multi-product	WIP level	Analytical Model	-	-	-
Muhammad et al. [24]	CNC Machining	WIP Cost	Assignment Model	-	-	-
Bokor and Altendorfer [25]	Multi-stage (CONWIP)	WIP, Capacity	CONWIP Extension	-	-	-
Prabhu et al. [16]	Flow Shop	WIP, Bottleneck	Workload Control	✓	-	-
Goldberg [26]	General	Optimization	GA Framework	-	-	✓
Deb [27]	General	Multi-objective	Evolutionary Algorithm	-	-	✓

2.8 ช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 2.7 สามารถสรุปช่องว่างของงานวิจัยได้ดังนี้

ประการที่หนึ่ง งานวิจัยด้านการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการลด Makespan หรือ Total Tardiness เป็นวัตถุประสงค์เดียว [7], [8], [17], [18] ยังไม่มีงานวิจัยที่พิจารณา WIP_wait_{total} (เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม) และ Total Tardiness รวมกันในรูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวม (Composite Objective Function) อย่างชัดเจนในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน

ประการที่สอง งานวิจัยที่พิจารณา WIP ในระบบการผลิตส่วนใหญ่แก้ปัญหาผ่านนโยบายการควบคุมการปล่อยงาน (WIP limit หรือ CONWIP) ซึ่งเป็นกลไกระดับระบบ [20], [21], [22], [23] ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาว่าการตัดสินใจด้านการจัดตารางการผลิต (Job Sequencing และ Machine Assignment) สามารถลด WIP_wait_{total} ได้โดยตรงพร้อมกับลด Tardiness ในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน โดยบูรณาการทั้งสองตัวชี้วัดไว้ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวกัน

ประการที่สาม แม้จะมีงานวิจัยที่ใช้วิธีการแก้ปัญหาหลายรูปแบบกับปัญหาระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่น เช่น วิธีฮิวริสติกแบบกฎการจ่ายงาน (Dispatching Rules) [18] และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming) [17] แต่วิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดในทางปฏิบัติ กล่าวคือ วิธีฮิวริสติกแบบกฎการจ่ายงานให้คุณภาพของคำตอบที่จำกัดเนื่องจากตัดสินใจเฉพาะหน้าโดยไม่พิจารณาภาพรวมของตาราง ขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งการันตีคำตอบที่ดีที่สุดนั้น ใช้เวลาการคำนวณที่เพิ่มขึ้นแบบทวีคูณเมื่อขนาดปัญหาใหญ่ขึ้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับปัญหขนาดใหญในทางปฏิบัติ

ในทางตรงกันข้าม งานวิจัยที่ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) พบว่าสามารถให้คำตอบที่มีคุณภาพสูงในเวลาที่เหมาะสมสำหรับปัญหขนาดใหญที่มีความซับซ้อน Jungwattanakit และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่า GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีฮิวริสติกพื้นฐานในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน อย่างมีนัยสำคัญ Vallada และ Ruiz [28] ยืนยันว่า GA สามารถจัดการกับปัญหาเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ Yu และคณะ [11] แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ GA ในการลด Total Tardiness ในระบบ Hybrid Flow Shop อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยที่ออกแบบ GA สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมที่พิจารณาทั้ง WIP_wait_{total} และ Total Tardiness พร้อมกันในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กันอย่างชัดเจน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน ยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน โดยพัฒนาฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวม (Composite Objective Function) ที่บูรณาการทั้ง WIP_wait_{total} และ Total Tardiness ไว้ในฟังก์ชันเดียวกัน และประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ในการค้นหาคำตอบ เนื่องจาก GA แสดงให้เห็นจากวรรณกรรมว่ามีความเหมาะสมกับปัญหาประเภทนี้มากกว่าวิธีฮิวริสติกพื้นฐานและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแง่ของสมดุลระหว่างคุณภาพของคำตอบและเวลาในการคำนวณ ซึ่งถือเป็นช่องว่างที่ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างชัดเจนในวรรณกรรมที่มีอยู่



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้นำเสนอวิธีการดำเนินงานวิจัยสำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible Flow Shop) ที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Parallel Machines) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาตารางการผลิตที่ลดการสะสมงานระหว่างกระบวนการและลดความล่าช้าในการส่งมอบงานได้พร้อมกัน เนื่องจากปัญหานี้จัดเป็นปัญหา NP-hard ที่ต้องพิจารณาทั้งการกำหนดลำดับงาน (Job Sequencing) และการเลือกเครื่องจักร (Machine Assignment) พร้อมกัน งานวิจัยจึงแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ระยะที่เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบ

ระยะที่ 1 (Phase 1): ศึกษาพฤติกรรมระบบด้วยกรณีปัญหาขนาดเล็ก ($n=4$ งาน) โดยใช้วิธีฮิวริสติก โดยใช้กฎการจ่ายงาน (Dispatching Rule) แบบ EDD (Earliest Due Date) ร่วมกับกฎการเลือกเครื่องจักร (Machine assignment rule) โดยเลือกเครื่องจักรที่ทำให้งานเสร็จเร็วที่สุดในขั้นตอนนั้น และวิธีการคำนวณแบบตรวจสอบทุกความเป็นไปได้ (Brute Force) เพื่อสร้างค่ามาตรฐานอ้างอิง

ระยะที่ 2 (Phase 2): ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) กับกรณีปัญหาชุดเดียวกับระยะที่ 1 เพื่อตรวจสอบว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาคำตอบที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับวิธีการคำนวณแบบตรวจสอบทุกความเป็นไปได้ ได้หรือไม่

ระยะที่ 3 (Phase 3): ขยายวิธีเชิงพันธุกรรมไปยังปัญหาขนาดใหญ่ ($n=20$ และ $n =$ งาน) พร้อมศึกษาผลกระทบของจำนวนงาน โครงสร้างเครื่องจักร และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบ (θ) ต่อสมรรถนะของระบบ

3.1 ขอบเขตปัญหาและสมมติฐานของระบบ

3.1.1 ลักษณะระบบการผลิต

ระบบการผลิตที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible Flow Shop) ซึ่งประกอบด้วยการดำเนินการ (Operation) จำนวน a การดำเนินการเรียงตามลำดับ ($j = 1, 2, \dots, a$) โดยในแต่ละการดำเนินการ j มีเครื่องจักร $k = 1, 2, \dots, m$ ที่เป็นเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Parallel Machines) กล่าวคือ เวลาการผลิต $p_{i,j,k}$ ของงาน i บนเครื่องจักร k ในการดำเนินการ j อาจแตกต่างกันไปตามเครื่องจักรที่เลือก ในระบบดังกล่าว งานทุกงานต้องผ่านการ

ดำเนินการครบทุกขั้นตอนตามลำดับแต่สามารถถูกกำหนดให้ผลิตบนเครื่องจักรที่แตกต่างกันได้ในแต่ละการดำเนินงาน

3.1.2 ลักษณะของงานและสมมติฐาน

งานทุกงานพร้อมเข้าสู่ระบบตั้งแต่เวลาเริ่มต้น ($R_i = 0$) ไม่มีการหยุดงานระหว่างการดำเนินการ (No Preemption) และใช้สมมติฐานของการจัดลำดับงานแบบเพอร์มิวเทชัน (Permutation Schedule) คือลำดับงาน π จะเหมือนกันทุกการดำเนินการ ในขณะที่การเลือกเครื่องจักร $m_{i,j}$ ในแต่ละการดำเนินงานสามารถแตกต่างกันได้

3.1.3 การวัดค่างานระหว่างกระบวนการ

เวลารอคอยระหว่างกระบวนการ $W_{i,j}$ ถูกใช้เป็นตัวแทนของงานระหว่างกระบวนการ (Work-in-Process: WIP) กล่าวคือ เมื่องาน i เสร็จสิ้นจากการดำเนินการ j แต่เครื่องจักรในการดำเนินการ $j+1$ ยังไม่ว่าง งานจะต้องรอในบัฟเฟอร์ เวลาที่รอกอยดังแสดงในสมการ (3.1)

$$W_{i,j} = \max(0, S_{i,j+1} - C_{i,j}) \quad (3.1)$$

ทั้งนี้ไม่นับรวมเวลาที่งานถูกประมวลผลบนเครื่องจักร เนื่องจากเป็นช่วงของการผลิตไม่ใช่การรอกอย

3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตัวชี้วัดสมรรถนะ

3.2.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์

จากตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์และความหมาย

i	ดัชนีของงาน (Job) โดย $i = 1, 2, \dots, n$
j	ดัชนีของการดำเนินการ (Operation) โดย $j = 1, 2, \dots, a$
k	ดัชนีของเครื่องจักร (Machine) โดย $k = 1, 2, \dots, m$
n	จำนวนงานทั้งหมดในระบบการผลิต
a	จำนวนการดำเนินการ (Operation) ทั้งหมด
m	จำนวนเครื่องจักรในแต่ละการดำเนินการ
J_i	งาน i
M_k	เครื่องจักร k
$P_{ij,k}$	เวลาในการผลิตของงาน i ในการดำเนินการ j บนเครื่องจักร k
D_i	กำหนดส่งงาน i
R_i	เวลาปล่อยงานเข้าสู่ระบบของงาน i (กำหนดให้ $R_i = 0$ ทุกงาน)
S_{ij}	เวลาเริ่มงาน i ในการดำเนินการ j
$S_{ij,k}$	เวลาเริ่มงาน i ในการดำเนินการ j บนเครื่องจักร k
C_{ij}	เวลาเสร็จงาน i ในการดำเนินการ j
$C_{ij,k}$	เวลาเสร็จงาน i ในการดำเนินการ j บนเครื่องจักร k
C_i	เวลาเสร็จงาน i ที่การดำเนินงานสุดท้าย
$C_{\max}$	เวลาปิดงานของระบบ (Makespan)
A_k	เวลาที่เครื่องจักร k วางและพร้อมรับงานใหม่
F_i	เวลาที่งาน i อยู่ในระบบ (Flow Time)
T_i	เวลาล่าช้าของงาน i
T_{ij}	เวลาล่าช้าของงาน i ในการดำเนินการ j
W_{ij}	เวลารอคอยระหว่างกระบวนการของงาน i ระหว่างการดำเนินการ j และ $j+1$
WIP_wait_{total}	เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวมของทุกงานในระบบ
Total Tardiness	ผลรวมเวลาล่าช้าของงานทั้งหมด $= \sum T_i$
Mean Flow Time	ค่าเฉลี่ย F_i ของทุกงาน
$\bar{P}$	ค่าเฉลี่ยภาระงานการผลิตต่อหนึ่งงาน ใช้ปรับสเกลในฟังก์ชันวัตถุประสงค์
k	ค่าคงที่สำหรับกำหนดน้ำหนักการลงโทษความล่าช้า (กำหนดให้ $k = 10$)
α	ค่าน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คำนวณจาก $\alpha = k\bar{P}$
π	ลำดับงานแบบเพอร์มิวเทชัน ที่ใช้ร่วมกันในทุกการดำเนินการ
m_{ij}	เครื่องจักรที่ถูกเลือกสำหรับงาน i ในการดำเนินการ j
Fitness	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ประเมินคุณภาพตารางการผลิต
θ	พารามิเตอร์ความตึงตัวของกำหนดส่งงาน (Due-date Tightness) ใช้ใน Phase 3
$P_{i,min}$	เวลาการผลิตขั้นต่ำของงาน i ใช้ใน Phase 3 สำหรับคำนวณ D_i

3.2.2 การคำนวณเวลารอคอยระหว่างกระบวนการ

เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม (WIP_wait_{total}) คำนวณจากผลรวมของ $W_{i,j}$ ทุกงานและทุกช่วงระหว่างการดำเนินงานดังสมการ (3.2)

$$WIP_{wait_{total}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a-1} W_{i,j} \quad (3.2)$$

3.2.3 การคำนวณความล่าช้าในการส่งมอบงาน

ความล่าช้าของงาน i (T_i) คือเวลาที่งานเสร็จเกินกำหนดส่ง D_i ดังสมการ (3.3) และ (3.4)

$$T_i = \max(0, C_i - D_i) \quad (3.3)$$

และ

$$\text{Total Tardiness} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.4)$$

3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมทั้งสองมิติ ได้แก่ การไหลของงานและการส่งมอบ ดังสมการ (3.5)

$$\text{Fitness} = WIP_wait_{total} + \alpha \cdot \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.5)$$

โดยที่ $\alpha = k\bar{P}$ และ $\bar{P}$ คือค่าเฉลี่ยภาระงานการผลิตต่อหนึ่งงาน คำนวณจากสมการ (3.6)

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^a \frac{1}{|M_j|} \sum_{k=1}^{|M_j|} P_{i,j,k} \right) \quad (3.6)$$

กำหนด $k = 10$ เพื่อปรับสมดุลระดับขนาดระหว่าง WIP_wait_{total} และ Total Tardiness ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวม เนื่องจาก WIP_wait_{total} เป็นการสะสมเวลารอคอยจากทุกงานและทุกสถานีในระบบ จึงมีระดับขนาดที่สูงกว่า Total Tardiness โดยธรรมชาติ การกำหนด $\alpha = k\bar{P}$ โดยที่ $k = 10$ ทำให้การลงโทษความล่าช้า 1 หน่วยเวลามีน้ำหนักเทียบเท่ากับ 10 เท่าของเวลาการผลิตเฉลี่ย ซึ่งทำให้ทั้งสองตัวชี้วัดอยู่ในระดับขนาดที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การศึกษาผลกระทบของค่า k ต่อคุณภาพของคำตอบอย่างเป็นระบบ (Sensitivity Analysis) ยังเป็นประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยอนาคต

3.2.5 การเลือกเครื่องจักรด้วยกฎ Earliest Completion Time (ECT)

เวลาสิ้นสุดของงาน i บนเครื่องจักร k ในการดำเนินการ j คำนวณจากสมการ (3.7)

$$C_{i,j,k} = \max(A_k, C_{i,j-1}) + P_{i,j,k} \quad (3.7)$$

เครื่องจักรที่เลือกคือเครื่องที่ทำให้ $C_{i,j,k}$ ต่ำที่สุด (Earliest Completion Time: ECT) ซึ่งช่วยลดเวลาการไหลของงานในระบบ

3.2.6 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่งานอยู่ในระบบ

$$\text{Mean Flow Time} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (3.8)$$

โดยในงานวิจัยนี้สมมติให้งานทุกงานพร้อมเข้าสู่ระบบการผลิตตั้งแต่เวลาเริ่มต้น ดังนั้นค่าเวลาการปล่อยงานเข้าสู่ระบบ (release time) ของงานทุกงานกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ($R_i = 0$) ดังสมการ (3.8)

3.2.7 เวลาปิดงานของระบบ (Makespan)

ดังแสดงในสมการ (3.9)

$$C_{\max} = \max_i C_i \quad (3.9)$$

3.2.8 ความสัมพันธ์ตามกฎของ Little (Little's Law)

เพื่อใช้เป็นกรอบแนวคิดในการอธิบายพฤติกรรมของระบบการผลิต งานวิจัยนี้อ้างอิงกฎของ Little (Little's Law) ในเชิงความสัมพันธ์ เพื่ออธิบายความเชื่อมโยงระหว่างจำนวนงานในระบบ (Work-in-Process: WIP) อัตราการผลิต (Throughput) และเวลาเฉลี่ยที่งานอยู่ในระบบ (Mean Flow Time) โดยไม่ได้นำเสนอสูตรไปใช้คำนวณโดยตรง ดังนี้

ในบริบทของงานวิจัยนี้ แทนที่จะวัด WIP ในหน่วยจำนวนชิ้นงานตามนิยามดั้งเดิม งานวิจัยนี้ใช้เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม (WIP_wait_{total}) ซึ่งมีหน่วยเป็นเวลา เป็นตัวแทนของการสะสมงานในระบบ แนวทางนี้สอดคล้องกับกฎของ Little ในเชิงความสัมพันธ์ที่ว่า WIP, Throughput และ Mean Flow Time มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน กล่าวคือการลด WIP_wait_{total} สะท้อนถึงการที่

งานใช้เวลารอคอยสะสมในระบบน้อยลง ซึ่งส่งผลให้ Mean Flow Time ลดลงและงานสามารถไหลผ่านระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.3 แบบจำลองกรณีศึกษาสำหรับ ระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2

ระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 ใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน โดยข้อมูลในตารางที่ 3.2 เป็นข้อมูลสมมติที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย $n=4$ งาน, $a=3$ การดำเนินการ, เครื่องจักร 2 เครื่องต่อการดำเนินการ ($k=1, 2$) โดยกำหนดส่ง D_i เป็นค่าคงที่ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ไม่ได้คำนวณจากพารามิเตอร์ θ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของทั้งสองระยะคือการเปรียบเทียบวิธีการจัดการตารางการผลิตภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลเวลาการผลิต $P_{i,j,k}$ (หน่วย: นาที) และกำหนดส่งงาน D_i

งาน (i)	การดำเนินการ j=1		การดำเนินการ j=2		การดำเนินการ j=3		D_i
	k=1	k=2	k=1	k=2	k=1	k=2	
1	15	6	5	9	8	8	45
2	7	6	15	13	6	14	40
3	11	5	5	6	8	8	50
4	13	14	5	13	8	15	42

โดย $\bar{P}$ ของแต่ละงานคำนวณจากค่าเฉลี่ยเวลาการผลิตในทุกการดำเนินการและทุกเครื่องจักร ดังนี้

งาน 1: $[(15+6)/2 + (5+9)/2 + (8+8)/2] = [10.5 + 7.0 + 8.0] = 25.5$ นาที งาน 2: $[(7+6)/2 + (15+13)/2 + (6+14)/2] = [6.5 + 14.0 + 10.0] = 30.5$ นาที งาน 3: $[(11+5)/2 + (5+6)/2 + (8+8)/2] = [8.0 + 5.5 + 8.0] = 21.5$ นาที งาน 4: $[(13+14)/2 + (5+13)/2 + (8+15)/2] = [13.5 + 9.0 + 11.5] = 34.0$ นาที

จากตารางที่ 3.2 คำนวณ $\bar{P} = (25.5 + 30.5 + 21.5 + 34.0) / 4 = 27.875$ นาที ดังนั้นค่าเฉลี่ยภาระงานการผลิตต่อหนึ่งงาน $\bar{P}$ เท่ากับ 27.875 นาที และเมื่อกำหนด $k = 10$ จะได้ค่าน้ำหนัก $\alpha = k\bar{P} = 10 \times 27.875 = 278.75$ ซึ่งหมายความว่าความล่าช้าในการส่งมอบงาน 1 นาทีจะถูกแปลงโทษในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 278.75 หน่วย ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมสะท้อนความสำคัญของการลดความล่าช้าและการลด WIP ไปพร้อมกัน

3.4 การทดลองระยะที่ 1 (Phase 1)

ระยะที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบการผลิตภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และสร้างค่ามาตรฐานอ้างอิง (Benchmark) สำหรับการประเมินวิธีเชิงพันธุกรรมในระยะที่ 2 โดยใช้สองวิธีการที่มีลักษณะต่างกันโดยสิ้นเชิง

3.4.1 ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานระยะที่ 1 (Phase 1)

1. นำเข้าข้อมูลกรณีศึกษาจากตารางที่ 3.2
2. คำนวณ $\bar{P}$ และ $\alpha = k\bar{P}$ สำหรับฟังก์ชัน Fitness
3. หาดารงการผลิตด้วยวิธี EDD+ECT (Heuristic Method)
4. หาดารงการผลิตด้วยวิธี Brute Force (Exact Method)
5. คำนวณ Fitness, WIP_wait_{total} , Total Tardiness, C_{max} สำหรับแต่ละวิธี
6. เปรียบเทียบผลลัพธ์ทั้งสองวิธีเพื่อวิเคราะห์ข้อดีข้อเสีย
7. นำผลลัพธ์ของ Brute Force ใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับระยะที่ 2 (Phase2)

3.4.2 วิธี EDD+ECT (Heuristic Method)

วิธีนี้ใช้กฎการจ่ายงานสองกฎร่วมกัน ได้แก่

1. Earliest Due Date (EDD): จัดลำดับงานโดยเรียงจากงานที่มี D_i น้อยที่สุดก่อน เพื่อลดความเสี่ยงการส่งล่าช้า
2. Earliest Completion Time (ECT): ในแต่ละการดำเนินการ j เลือกเครื่องจักร k ที่ทำให้ $C_{i,j,k}$ ต่ำที่สุดเพื่อลดเวลารอคอย

เมื่อเรียงลำดับงานตาม D_i จากน้อยไปมาก พบว่า $D_2=40$, $D_4=42$, $D_1=45$ และ $D_3=50$ จึงได้ลำดับงาน $\pi = [2, 4, 1, 3]$ วิธี EDD+ECT มีข้อดีคือสามารถคำนวณได้รวดเร็วและไม่ต้องใช้เวลาประมวลผลมาก อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่รับประกันคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากการจัดลำดับตามกำหนดส่งงานเพียงอย่างเดียวอาจทำให้เกิดการสะสมของงานระหว่างกระบวนการ (WIP) ได้

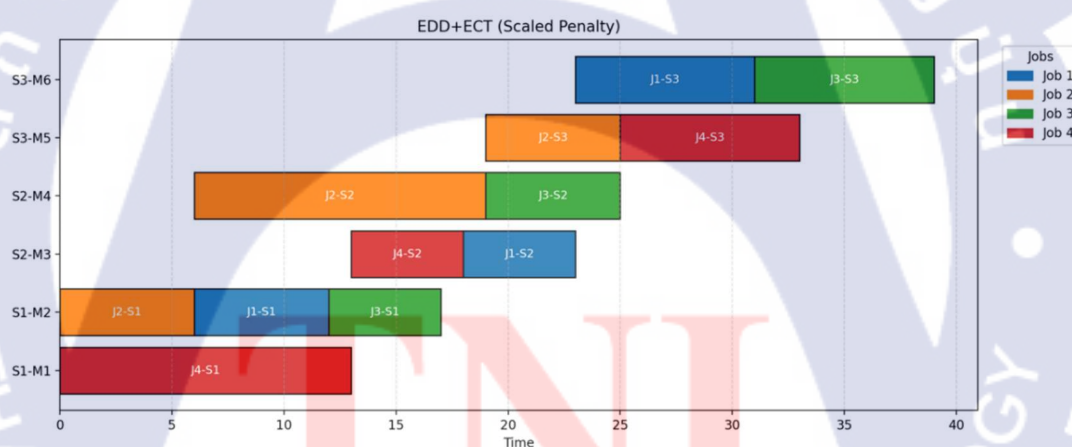
3.4.3 วิธี Brute Force (Exact Method)

ตรวจสอบทุกการจัดเรียงที่เป็นไปได้ $n! = 4! = 24$ แบบ และทุกการเลือกเครื่องจักรที่เป็นไปได้ในแต่ละการดำเนินงาน ($2 \text{ เครื่อง} \times 3 \text{ การดำเนินงาน} \times 4 \text{ งาน} = 2^{12} = 4,096$ แบบต่อหนึ่งลำดับ) รวมทั้งสิ้น $24 \times 4,096 = 98,304$ การประเมิน แล้วคำนวณ Fitness เพื่อเลือกคู่ (ลำดับ

งาน, การเลือกเครื่องจักร) ที่ให้ค่าต่ำที่สุด วิธี Brute Force รับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดเสมอ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีข้อจำกัดสำคัญด้านเวลาการคำนวณ เนื่องจากจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนงานและจำนวนเครื่องจักร เนื่องจากต้องพิจารณาทั้งการกำหนดลำดับงาน $n!$ แบบ และการเลือกเครื่องจักรสำหรับทุกงานในทุกการดำเนินการพร้อมกัน ($n! \times m^{(n \times a)}$) ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไปใช้กับปัญหามหาศาลได้ เช่น กรณี $n=20, a=3, m=2$ มีการประเมินที่เป็นไปได้ถึง $20! \times 2^{60} \approx 2.8 \times 10^{36}$ แบบ

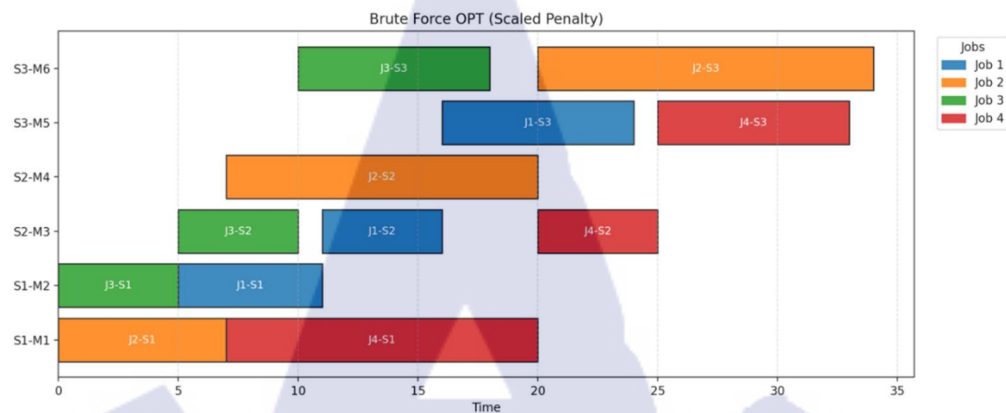
3.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองระยะที่ 1 (Phase1)

รูปที่ 3.1 แสดงตารางการผลิตที่ได้จากวิธี EDD+ECT ซึ่งมีลำดับงาน $\pi = [2, 4, 1, 3]$ จะเห็นได้ว่าการดำเนินงานที่ 1 งาน 2 และงาน 4 เริ่มผลิตพร้อมกันบนเครื่องจักรคนละเครื่อง แต่เมื่อเข้าสู่การดำเนินการที่ 2 และ 3 เกิดการรอคอยสะสมขึ้น โดยเฉพาะงาน 1 และงาน 3 ที่ต้องรอเครื่องจักรว่างในการดำเนินงานถัดไป ส่งผลให้ค่า WIP_wait_{total} รวมเท่ากับ 21 นาที และ Makespan ยืดออกไปถึง 39 นาที



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการผลิตของวิธี EDD+ECT [$\alpha = 278.75$]

รูปที่ 3.2 แสดงตารางการผลิตที่ได้จากวิธี Brute Force ซึ่งมีลำดับงาน $\pi = [3, 1, 2, 4]$ และการเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมที่สุด จะเห็นได้ว่างานทุกงานไหลเข้าสู่การดำเนินการถัดไปได้ทันที โดยไม่มีการรอคอย ส่งผลให้ค่า WIP_wait_{total} เท่ากับศูนย์ และ Makespan ลดลงเหลือ 34 นาที การเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเลือกลำดับงานและเครื่องจักรที่เหมาะสมสามารถกำจัดการรอคอยระหว่างกระบวนการได้โดยสิ้นเชิง



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการผลิตของวิธี Brute Force [$\alpha = 278.75$]

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์ระยะที่ 1 [$\alpha = 278.75$, $k = 10$, $\bar{P} = 27.875$]

วิธีการ	ลำดับงาน (π)	Total Tardiness	Mean Flow Time	Cmax (Makespan)	WIP_wait (j_1 to j_2)	WIP_wait (j_2 to j_3)	WIP_wait _{total}	Fitness
EDD+ECT	[2, 4, 1, 3]	0	32	39	8	13	21	21
Brute Force	[3, 1, 2, 4]	0	27.25	34	0	0	0	0

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3 พบว่า วิธี EDD+ECT ได้ลำดับงาน $\pi=[2,4,1,3]$ ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงความล่าช้าในการส่งมอบงานได้ โดยงานทุกงานมีค่าเวลาล่าช้า (T_i) เท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังก่อให้เกิดการสะสมงานระหว่างการดำเนินงาน โดยมีค่า WIP_wait_{total} เท่ากับ 21 นาที ทั้งนี้เป็นเพราะวิธี EDD พิจารณาเฉพาะกำหนดส่งงาน โดยไม่คำนึงถึงการกระจายภาระงานระหว่างเครื่องจักรในแต่ละการดำเนินการ

วิธี Brute Force ได้ลำดับงาน $\pi=[3,1,2,4]$ ซึ่งให้ค่า WIP_wait_{total} และ Total Tardiness เท่ากับศูนย์พร้อมกัน ส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness) มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการจัดลำดับงานและการเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมร่วมกันสามารถทำให้งานไหลผ่านการดำเนินการต่าง ๆ ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการรอคอย

ผลการทดลองใน Phase 1 ชี้ให้เห็นว่าการพิจารณาเฉพาะกำหนดส่งงาน D_i เพียงอย่างเดียวตามวิธี EDD ไม่เพียงพอสำหรับการควบคุมการไหลของงานในระบบ จำเป็นต้องพิจารณาการจัดสรรงานบนเครื่องจักรในทุกการดำเนินการพร้อมกันด้วย แม้วิธี EDD+ECT จะมีการเลือกเครื่องจักรด้วยกฎ ECT แล้ว แต่การตัดสินใจดังกล่าวเป็นแบบ Greedy ที่พิจารณาทีละงาน จึงไม่

สามารถหาการจับคู่ระหว่างลำดับงานและเครื่องจักรที่เหมาะสมในภาพรวมได้ ข้อสรุปนี้เป็นแรงจูงใจสำคัญในการนำ GA มาใช้ใน Phase 2 เนื่องจากเมื่อขนาดปัญหาใหญ่ขึ้น จำนวนทางเลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนวิธี Brute Force ไม่สามารถคำนวณได้ในเวลาที่เหมาะสม ขณะที่วิธี EDD+ECT ซึ่งตัดสินใจแบบ Greedy ก็ไม่สามารถค้นหาพื้นที่คำตอบได้อย่างครอบคลุม GA จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณ (Approximate Method) สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนสูง

3.5 การพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและการทดลองระยะที่ 2 (Phase 2)

ระยะที่ 2 นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) มาประยุกต์ใช้กับกรณีปัญหาชุดเดียวกับระยะที่ 1 (ตารางที่ 3.2) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแบบประมาณ (Approximate Method) สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณแบบตรวจสอบทุกความเป็นไปได้ (Brute Force) ได้หรือไม่ เนื่องจากวิธีการคำนวณแบบตรวจสอบทุกความเป็นไปได้จำเป็นต้องประเมินคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งในกรณีศึกษานี้มีจำนวนถึง 98,304 แบบ ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นระยะที่ 2 จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของ GA ก่อนนำไปใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ในระยะที่ 3

3.5.1 ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานในระยะที่ 2

ในการทดลองระยะที่ 2 ได้กำหนดให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทำงานเพียง 1 ครั้ง ต่อหนึ่งชุดข้อมูล (instance) โดยกำหนดขนาดประชากรเท่ากับ 80 โครโมโซม และจำนวนรุ่นเท่ากับ 250 รุ่น พร้อมทั้งกำหนดค่า random seed คงที่ เพื่อให้สามารถทำซ้ำผลการทดลองได้ (reproducibility)

ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในระยะที่ 2 มีดังนี้

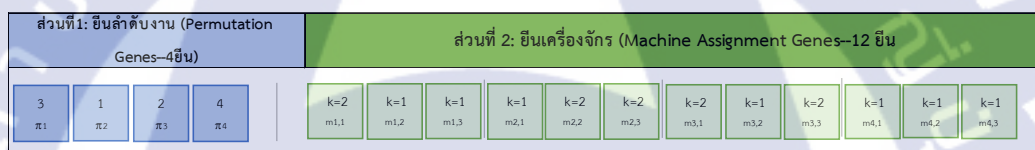
1. นำเข้าข้อมูลกรณีศึกษาชุดเดียวกับระยะที่ 1 (ตารางที่ 3.2)
2. กำหนดพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) ตามตารางที่ 3.4
3. คำนวณค่าเฉลี่ยภาระงาน $\bar{P} = 27.875$ นาที และค่าน้ำหนัก $\alpha = 278.75$
4. สร้างประชากรเริ่มต้นจำนวน 80 โครโมโซมแบบสุ่ม
5. ดำเนินการวิวัฒนาการเป็นจำนวน 250 รุ่น โดยในแต่ละรุ่นประกอบด้วยขั้นตอนการคัดเลือก การผสมพันธุ์ การกลายพันธุ์ และการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness)
6. บันทึกคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่น
7. เปรียบเทียบผลลัพธ์ GA กับ EDD+ECT และ Brute Force จากระยะที่ 1

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ทำงานแบบ 1 ครั้ง (single run) ต่อหนึ่ง instance โดยการกำหนดค่า random seed คงที่ เพื่อให้สามารถทำซ้ำผลลัพธ์ได้

ทั้งนี้ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษามุ่งเน้นการประเมินความสามารถของ GA ในการหาคำตอบโดยประมาณ (Approximate Method) สำหรับปัญหาที่มีพื้นที่การค้นหาคำนวณขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถประเมินคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดได้อย่างครบถ้วน

3.5.2 โครงสร้างโครโมโซม

คำตอบหนึ่งชุดของปัญหาการจัดตารางการผลิตถูกแทนด้วยโครโมโซม (Chromosome) ซึ่งประกอบด้วยยีนสองส่วน ได้แก่ ยีนลำดับงานและยีนเครื่องจักร สำหรับกรณีศึกษาระยะที่ 1 และ 2 $n=4$ งาน $a=3$ การดำเนินงาน เครื่องจักร 2 เครื่องต่อการดำเนินงาน โครโมโซมหนึ่งชุดมีทั้งหมด $4 + (4 \times 3) = 16$ ยีน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโครโมโซมสำหรับกรณีศึกษาระยะที่ 1 และ 2

ยีนส่วนที่ 1 คือยีนลำดับงาน (Permutation Genes) จำนวน $n = 4$ ยีน แทนลำดับการผลิตในรูปแบบเพอร์มิวเทชัน ใช้ลำดับเดียวกันทุกการดำเนินงาน ส่วนที่ 2 คือยีนเครื่องจักร (Machine Assignment Genes) จำนวน $n \times a = 4 \times 3 = 12$ ยีน แต่ละยีน $m_{i,j}$ แทนเครื่องจักร k ที่เลือกสำหรับงาน i ในการดำเนินการ j โดยยีนเครื่องจักรเรียงลำดับตาม i ก่อน j กล่าวคือ ยีน 3 ตัวแรกของส่วนที่ 2 แทนเครื่องจักรของงาน $i=1$ ในการดำเนินการ $j=1, 2, 3$ ตามลำดับ และวนซ้ำสำหรับงาน $i=2, 3, 4$ ต่อไป

3.5.3 กระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)

วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ทำงานตามลำดับขั้นตอนดังแสดงใน pseudo-code ด้านล่างนี้และสรุปเป็นผังงานในรูปที่ 3.4

ข้อมูลนำเข้า (Input): $n, a, P_{i,j,k}, D_i$, พารามิเตอร์ GA

ข้อมูลส่งออก (Output): ตารางการผลิตที่มีค่า Fitness ต่ำที่สุด

1. คำนวณค่าเฉลี่ยภาระงาน $P = 27.875$ นาที่ และ $\alpha = k\bar{P} = 278.75$
2. สร้างประชากรเริ่มต้น 80 โครโมโซมแบบสุ่ม
3. ประเมิน Fitness ทุกโครโมโซม หลังจากนั้นกำหนดคำตอบที่ดีที่สุด ณ ปัจจุบัน
4. วงซ้ำจนครบ 250 รุ่น:

4.1 Elitism: คัดลอก 2 โครโมโซมที่ดีที่สุดเข้ารุ่นถัดไป

4.2 การคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament Selection): สุ่ม 3 ตัวเลือกโครโมโซม แล้วคัดโครโมโซมที่มีค่า Fitness ต่ำที่สุดเป็นพ่อแม่

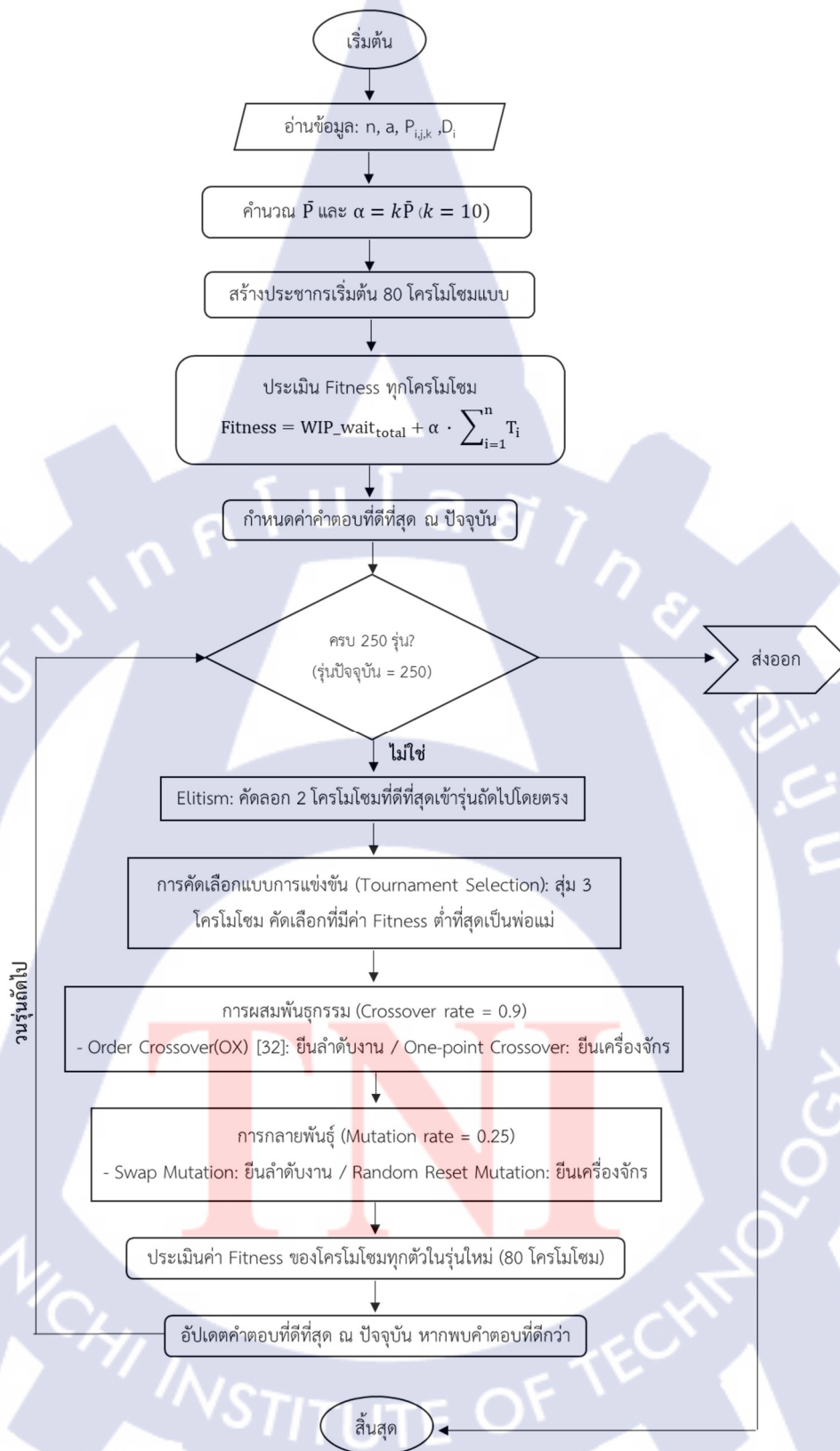
4.3 การผสมพันธุกรรม: ใช้ Crossover OX [32] (ยีนลำดับงาน) + One-point crossover (ยีนเครื่องจักร) โดยมีอัตราการผสมพันธุกรรม = 0.90 โดยกำหนดค่า 0.9 แทนการใช้ค่า 1.00 เพื่อหลีกเลี่ยงการผสมพันธุกรรมในทุกโครโมโซม ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างคำตอบที่ดีถูกเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ทั้งนี้ค่า 0.90 ยังคงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลในระดับสูง ขณะเดียวกันยังคงรักษาคำตอบที่มีคุณภาพบางส่วนไว้ได้

4.4 การกลายพันธุ์: ใช้ Mutation Swap (ยีนลำดับงาน) + Random Reset (ยีนเครื่องจักร) โดยมีอัตราการกลายพันธุ์ = 0.25 เพื่อเพิ่มความหลากหลายของประชากรในปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ช่วยลดโอกาสการติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ (local optimum) และยังคงสมดุลไม่ให้เกิดการค้นหาคำตอบเป็นการสุ่มมากเกินไป

4.5 ประเมิน Fitness แล้วอัปเดตคำตอบที่ดีที่สุด ณ ปัจจุบัน ถ้าดีกว่า

5. ส่งออกโครโมโซมที่มี Fitness ต่ำที่สุด

จำนวน 250 รุ่นร่วมกับประชากร 80 โครโมโซม ให้ Total Evaluations = 20,000 ครั้ง โดยกำหนดจำนวนการประเมินเท่ากันทั้งระยะที่ 2 และระยะที่ 3 เพื่อให้มั่นใจว่าความแตกต่างในผลลัพธ์ที่สังเกตได้มาจากปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ n , โครงสร้างเครื่องจักร และ θ เท่านั้น ไม่ใช่ความแตกต่างของพารามิเตอร์ GA



รูปที่ 3.4 ผังงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ตารางที่ 3.4 สรุปพารามิเตอร์ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	เหตุผลในการกำหนดค่า
ขนาดประชากร	80 โครโมโซม	จำนวนคำตอบที่ดูในแต่ละรุ่น มากพอให้ความหลากหลาย ไม่มากจนใช้เวลาคำนวณนาน
จำนวนรุ่น	250 รุ่น	กำหนดจำนวนการประเมินทั้งสิ้น 20,000 ครั้ง เท่ากันทั้ง Phase 2 และ Phase 3 เพื่อให้มั่นใจว่าความแตกต่างของผลลัพธ์มาจากปัจจัยที่ศึกษาเท่านั้น
อัตราการผสมพันธุกรรม	0.9	ความน่าจะเป็นการสร้างโครโมโซมลูกจากพ่อแม่
อัตราการกลายพันธุ์	0.25	ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงยีน เพื่อเพิ่มความหลากหลายและหลีกเลี่ยง Local Optimum
Elitism	2 โครโมโซม	คัดลอก 2 โครโมโซมที่ดีที่สุดเข้ารุ่นถัดไปโดยตรง ป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดี
วิธีคัดเลือก	Tournament Selection (สุ่ม 3 โครโมโซม)	สุ่มเลือกโครโมโซม 3 ตัวจากประชากร คัดโครโมโซมที่มีค่า Fitness ต่ำที่สุดเป็นพ่อแม่ วิธีนี้สร้างแรงกดดันในการคัดเลือกที่เหมาะสม ไม่เข้มงวดเกินไปจนสูญเสียความหลากหลาย
Crossover ยีนลำดับงาน	Order Crossover (OX)	รักษาคูณสมบัติเพอร์มิวเทชัน ไม่ให้เกิดงานซ้ำหรือขาดหาย เสนอโดย Davis [29]
Crossover ยีนเครื่องจักร	One-point Crossover	ตัดต่อที่จุดสุ่ม ส่วนก่อนจาก Parent A ส่วนหลังจาก Parent B
Mutation ยีนลำดับงาน	Swap Mutation	สลับตำแหน่งงาน 2 งานแบบสุ่ม
Mutation ยีนเครื่องจักร	Random Reset Mutation	สุ่มเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่จากชุดที่ใช้งานได้ในการดำเนินงานนั้น

3.5.4 อธิบายตัวอย่างการทำงานของ GA แบบทีละขั้นตอน

เพื่อให้เห็นภาพการทำงานของอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) อย่างชัดเจน ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการทำงานทีละขั้นตอน โดยใช้ข้อมูลกรณีศึกษาจากตารางที่ 3.2 ซึ่งมีจำนวนงาน $n=4$ และจำนวนการดำเนินการ $a=3$ พร้อมค่าพารามิเตอร์ $\alpha=278.75$ โดยแสดงประชากร 4 โครโมโซมเพื่อความกระชับ (การทดลองจริงใช้ 80 โครโมโซม)

3.5.4.1 สร้างประชากรเริ่มต้น (Generation 0)

สุ่มสร้างโครโมโซม 4 ตัว ยีนลำดับงานสุ่มเรียงแบบเพอร์มิวเทชัน ยีนเครื่องจักรสุ่มจากเครื่องที่ใช้งานได้ จากนั้นถอดรหัสโครโมโซมเป็นตารางการผลิตแล้วคำนวณ Fitness โดยเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละการดำเนินการถูกกำหนดจากยีนเครื่องจักรในโครโมโซมที่สุ่มสร้างขึ้นโดยตรง

ตารางที่ 3.5 ประชากรเริ่มต้น (Generation 0)

โครโมโซม	ลำดับงาน π	เครื่องจักรที่เลือก (คู่)	WIP_wait_{total}	$\sum T_i$	C_{max}	Fitness
C1	[3, 1, 2, 4]	$i1:(k2,k1,k1) \ i2:(k1,k2,k2) \ i3:(k2,k1,k2) \ i4:(k1,k1,k1)$ => (6,5,8,7,13,14,5,5,8,13,5,8)	0	0	34	0
C2	[2, 1, 4, 3]	$i1:(k1,k1,k1) \ i2:(k2,k2,k2) \ i3:(k2,k1,k2) \ i4:(k2,k2,k1)$ => (15,5,8,6,13,14,5,5,8,14,13,8)	3	0	41	3
C3	[1, 2, 4, 3]	$i1:(k1,k1,k1) \ i2:(k2,k2,k2) \ i3:(k1,k2,k1) \ i4:(k2,k1,k1)$ => (15,5,8,6,13,14,11,6,8,14,5,8)	7	0	44	7
C4	[1, 4, 3, 2]	$i1:(k1,k1,k1) \ i2:(k2,k2,k1) \ i3:(k1,k1,k2) \ i4:(k2,k1,k2)$ => (15,5,8,6,13,6,11,5,8,14,5,15)	15	0	48	15

จากตารางที่ 3.5 พบว่าโครโมโซม C1 ให้ค่า Fitness เท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดในการประชากรเริ่มต้น เนื่องจากไม่มีการรอคอยระหว่างกระบวนการผลิต ($WIP_wait_{total} = 0$) และไม่มี ความล่าช้าในการส่งมอบงาน ($\sum T_i = 0$) ในขณะที่โครโมโซมอื่นมีค่า Fitness สูงกว่า เนื่องจากเกิด การรอคอยระหว่างกระบวนการการผลิตทำให้ค่า WIP_wait_{total} เพิ่มขึ้น และเนื่องจากค่ากำหนดส่งมอบงาน (D_i) ในกรณีศึกษาที่มีความผ่อนคลาย จึงไม่เกิดความล่าช้าในการส่งมอบงานในทุกโครโมโซม ทำให้ความแตกต่างของค่า Fitness ขึ้นอยู่กับค่า WIP_wait_{total} เป็นหลัก

เพื่อแสดงตัวอย่างกระบวนการถอดรหัสโครโมโซมและการคำนวณตารางการผลิต จึงแสดงโครโมโซม C1 ซึ่งมีลำดับงาน $\pi = [3, 1, 2, 4]$ โดยกำหนดให้ i แทนดัชนีของงาน และแต่ละงานมีการเลือกเครื่องจักรในแต่ละการดำเนินการแตกต่างกัน สามารถแสดงได้ดังนี้

งานที่ 1 ($i1$) เลือกเครื่องจักร ($k2, k1, k1$)

งานที่ 2 ($i2$) เลือกเครื่องจักร ($k1, k2, k2$)

งานที่ 3 ($i3$) เลือกเครื่องจักร ($k2, k1, k2$)

งานที่ 4 ($i4$) เลือกเครื่องจักร ($k1, k1, k1$)

โดยจากข้อมูลเวลาการผลิต (Processing Time) ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องจักรที่เลือก สามารถกำหนดเวลาในการดำเนินการของแต่ละงานในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

งานที่ 1 ($i1$) ใช้เวลา (6, 5, 8)

งานที่ 2 ($i2$) ใช้เวลา (7, 13, 14)

งานที่ 3 ($i3$) ใช้เวลา (5, 5, 8)

งานที่ 4 ($i4$) ใช้เวลา (13, 5, 8)

จากลำดับงานและการเลือกเครื่องจักรดังกล่าว สามารถคำนวณเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของแต่ละงานในแต่ละกระบวนการ โดยพิจารณาข้อจำกัดของลำดับงานและความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างการถอดรหัสโครโมโซม C1 และเวลาเริ่ม-เวลาสิ้นสุดของแต่ละงาน

งาน (i)	การดำเนินการ (j)	เครื่องจักรที่เลือก (k)	เวลาเริ่ม (Start)	เวลาสิ้นสุด (Finish)	เวลารอคอยระหว่างการดำเนินการ (WIP_wait)
3	1	k2	0	5	-
3	2	k1	5	10	0
3	3	k2	10	18	0
1	1	k2	5	11	-
1	2	k1	11	16	0
1	3	k1	16	24	0
2	1	k1	0	7	-
2	2	k2	7	20	0
2	3	k2	20	34	0
4	1	k1	7	20	-
4	2	k1	20	25	0
4	3	k1	25	33	0

จากตารางที่ 3.6 พบว่าโครโมโซม C1 สามารถจัดตารางการผลิตได้โดยไม่เกิดการรอคอยระหว่างสถานะการผลิต เนื่องจากทุกงานสามารถเข้าสู่สถานะถัดไปได้ทันทีเมื่อเสร็จจากสถานะก่อนหน้า จึงทำให้ค่า WIP_wait_{total} เท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ ทุกงานสามารถเสร็จสิ้นได้ภายในกำหนดส่ง ส่งผลให้ค่า Total Tardiness เท่ากับศูนย์ และมีค่าเวลาปิดงานของระบบ (Makespan; C_{max}) เท่ากับ 34 หน่วยเวลา ดังนั้น ค่า Fitness ของโครโมโซม C1 จึงเท่ากับ 0

3.5.4.2 วิวัฒนาการรุ่นที่ 1 (Generation 1)

การสร้างรุ่นที่ 1 ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. Elitism: คัดลอกโครโมโซม C1 (Fitness = 0) และ C2 (Fitness = 3) ซึ่งเป็นสองโครโมโซมที่มีค่า Fitness ดีที่สุดในรุ่นปัจจุบัน เข้าสู่รุ่นถัดไปโดยตรงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง
2. Tournament Selection: สุ่มเลือกโครโมโซม 3 ตัวจากประชากร แล้วคัดเลือกโครโมโซมที่มีค่า Fitness ต่ำที่สุดเป็นพ่อแม่ ตัวอย่างเช่น สุ่มได้ {C1, C2, C4} จึงเลือก C1 เป็น Parent A และสุ่มรอบถัดไปได้ {C2, C3, C4} จึงเลือก C2 เป็น Parent B ดังรูปที่ 3.5

Parent A = C1	3	1	2	4
Parent B = C2	2	1	4	3

รูปที่ 3.5 โครโมโซมพ่อแม่(Parents)

3. Crossover และ Mutation: ตารางที่ 3.7 แสดงตัวอย่างการทำ OX crossover กับยีนลำดับงาน และ ตารางที่ 3.8 แสดง one-point crossover กับยีนเครื่องจักร ซึ่งอาจถูกปรับเปลี่ยนเพิ่มเติมด้วย random reset mutation

ในการทดลองนี้กำหนดอัตราการผสมพันธุ์ (Crossover Rate) เท่ากับ 0.90 และอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Rate) เท่ากับ 0.25 โดยอัตราการผสมพันธุ์ทำงานในระดับคู่พ่อแม่ กล่าวคือ เมื่อเลือกโครโมโซมพ่อแม่สองตัวได้แล้ว จะสุ่มตัดสินใจว่าจะทำการผสมพันธุ์หรือไม่ หากค่าที่สุ่มได้น้อยกว่า 0.90 จะดำเนินการผสมพันธุ์ระหว่างพ่อแม่ทั้งสอง หากค่าที่สุ่มได้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.90 จะคัดลอกโครโมโซมพ่อแม่ทั้งสองเข้าสู่รุ่นถัดไปโดยไม่ผสมยีน ในทั้งสองกรณีโครโมโซมที่ได้จะผ่านกระบวนการกลายพันธุ์ต่อไป

ส่วนอัตราการกลายพันธุ์ 0.25 หมายความว่า แต่ละยีนเครื่องจักรมีโอกาสร้อยละ 25 ที่จะถูกสุ่มเปลี่ยนค่าใหม่ และลำดับงานมีโอกาสร้อยละ 25 ที่จะถูกสลับตำแหน่งระหว่างสองตำแหน่งที่สุ่มเลือก

สำหรับการกำหนดตำแหน่งตัดในการทำ OX crossover นั้น จะสุ่มเลือกตำแหน่ง 2 ตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันจากยีนทั้งหมด แล้วเรียงลำดับได้เป็นตำแหน่ง a และ b โดยที่ $a < b$ จากนั้นคัดลอกยีนลำดับงานในช่วงดังกล่าวจาก Parent A ส่วนยีนที่เหลือนำมาเติมตามลำดับที่ปรากฏใน Parent B

สำหรับยีนเครื่องจักร ใช้การสุ่มตำแหน่งตัด 1 จุดจากช่วงที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยยีนเครื่องจักรตั้งแต่ตำแหน่งแรกจนถึงตำแหน่งตัดมาจาก Parent A และยีนตั้งแต่ตำแหน่งถัดจากจุดตัดจนถึงตำแหน่งสุดท้ายมาจาก Parent B

ตารางที่ 3.7 ขั้นตอนการทำ Crossover ลำดับงาน

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียดและผลลัพธ์								
1	สุ่มเลือก 2 ตำแหน่งจากยีนทั้ง 4 ตัวโดยไม่ซ้ำกัน แล้วเรียงลำดับได้เป็นตำแหน่ง a และ b (a < b) ในตัวอย่างนี้สมมติได้ตำแหน่งที่ 2 และ 3 จึงคัดลอกยีนตำแหน่งที่ 2 ถึง 3 จาก Parent A (C1) ได้ค่า [1, 2]	คัดลอกยีนตำแหน่งที่ [1,2] จาก Parent A (C1) = [3, <u>1</u> , <u>2</u> ,4] ลูกชั่วคราว = [_, 1, 2, _] Parent A = C1 <table><tr><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td></tr></table> Offspring <table><tr><td>-</td><td>1</td><td>2</td><td>-</td></tr></table> สีเขียว = คัดลอกตรงจาก Parent A (C1)	3	1	2	4	-	1	2	-
3	1	2	4							
-	1	2	-							
2	เลือกยีนจาก Parent B และข้ามงานที่มีแล้วในโครโมโซมของลูกชั่วคราว (Offspring)	Parent B (C2) = [2, 1, 4, 3] สแกน C2 ตามลำดับ: 2 (ข้าม — มีในลูกแล้ว), 1 (ข้าม — มีในลูกแล้ว), 4 (เก็บ), 3 (เก็บ)								
3	เติมช่องว่างจากซ้ายไปขวา	เติม 4 และ 3 ตามลำดับในตำแหน่งว่าง → ได้ลูกจาก OX = [4, 1, 2, 3] Parent B = C2 <table><tr><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>3</td></tr></table> Offspring <table><tr><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr></table> สีเขียว = จาก Parent A (C1) สีฟ้า = ลำดับจาก Parent B (C2)	2	1	4	3	4	1	2	3
2	1	4	3							
4	1	2	3							
4	one-point crossover ของยีนเครื่องจักร	กำหนดจุดตัดบนยีนเครื่องจักร 1 จุด แล้วนำส่วนหน้าจาก Parent A และส่วนหลังจาก Parent B มาประกอบกัน (ดูรายละเอียดในตารางที่ 3.8 ด้านล่าง)								
5	Mutation (ถ้าเกิด)	สุ่มสลับตำแหน่งงาน 2 ตำแหน่งใน permutation gene และ/หรือสุ่มรีเซ็ตเครื่องจักรบางยีนในช่วงที่เป็นไปได้								

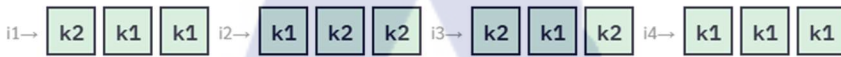
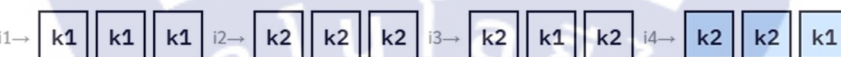
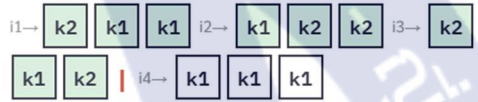
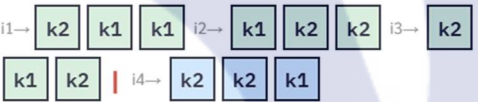
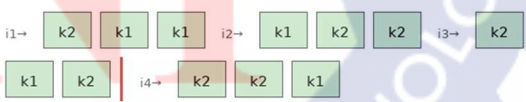
หมายเหตุ: ในการอธิบายนี้นับตำแหน่งยีนจาก 1 เพื่อความสะดวกในการอ่าน

หมายเหตุ: ตารางข้างต้นแสดงการสร้างโครโมโซมลูกตัวที่ 1 เท่านั้น โดยในทางปฏิบัติ OX Crossover จะสร้างลูก 2 ตัวพร้อมกัน ลูกตัวที่ 2 ใช้กระบวนการเดียวกันแต่สลับบทบาทของ Parent A และ Parent B

เมื่อได้ลำดับงานของโครโมโซมลูกจากกระบวนการ OX Crossover แล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการกำหนดการมอบหมายเครื่องจักรให้แก่แต่ละงานในแต่ละ stage โดยใช้วิธี one-point crossover กับยีนเครื่องจักร

ยีนเครื่องจักรของโครโมโซมแต่ละตัวประกอบด้วยการมอบหมายเครื่องจักรสำหรับทุกงาน ในทุก stage รวมทั้งสิ้น 4 งาน $\times$ 3 stage = 12 ยีน เรียงตามลำดับ (i1,s1), (i1,s2), (i1,s3), (i2,s1), ..., (i4,s3) โดยสุ่มตำแหน่งตัด 1 จุดจากช่วง [1, 11] ยีนตำแหน่งที่ 1 ถึง cut มาจาก Parent A และ ยีนตำแหน่งที่ cut+1 ถึง 12 มาจาก Parent B ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ขั้นตอนการทำ Crossover เครื่องจักร

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียดและผลลัพธ์
Parent A (C1): 12 ยีนเครื่องจักร  Parent B (C2): 12 ยีนเครื่องจักร 		
1	สุ่มจุดตัด สมมติได้ cut = 9 $\rightarrow$ ส่วนหน้า ตำแหน่งที่ 1-9 (9 ยีน) จาก Parent A, ส่วนหลัง ตำแหน่งที่ 10-12 (3 ยีน) จาก Parent B	แบ่งยีนเครื่องจักร 12 ตัว ที่ index 9 (หลังยีนที่ 9):  สืบเชื้อ (ตำแหน่งที่ 1-9, 9 ยีน) = จาก Parent A (C1) ส่วนหลัง (index 10-12) รวจาก Parent B (C2)
2	นำส่วนหลังจาก Parent B (C2)	ส่วนหลัง Parent B (C2) ที่ index [10-12] = i4: (k2, k2, k1)  สืบเชื้อ = ส่วนหลังจาก Parent B (C2)
3	ได้ลูก (Offspring) เครื่องจักร	Offspring machine = i1:(k2,k1,k1) i2:(k1,k2,k2) i3:(k2,k1,k2) i4:(k2,k2,k1) i4 เปลี่ยนจาก C1 = (k1,k1,k1) $\rightarrow$ ได้ (k2,k2,k1) จาก C2 

หมายเหตุ: ตารางที่ 3.8 แสดงเฉพาะการสร้างโครโมโซมลูกตัวที่ 1 เท่านั้น โดยในทางปฏิบัติ one-point crossover จะสร้างลูก 2 ตัวพร้อมกัน ลูกตัวที่ 2 ใช้กระบวนการเดียวกันแต่สลับบทบาทของ Parent A และ Parent B กล่าวคือ ยีนตำแหน่งที่ 1 ถึง cut มาจาก Parent B และยีนตำแหน่งที่ cut+1 ถึง 12 มาจาก Parent A

หลังจากได้โครโมโซมลูกจากการบวนการ crossover แล้ว จะนำโครโมโซมดังกล่าวผ่านกระบวนการ mutation โดยมี $\text{mut_rate} = 0.25$ ซึ่งหมายความว่าแต่ละยีนมีโอกาส ร้อยละ 25 ที่จะถูกกลายพันธุ์ โดยสุ่มค่า $r \sim \text{Uniform}(0,1)$ สำหรับแต่ละยีน ถ้า $r < 0.25$ จึงทำ mutation ยีนนั้น โดยใช้ Swap Mutation สำหรับลำดับงาน สุ่มค่า r เพียงครั้งเดียวสำหรับยีนลำดับงานทั้งหมด ถ้า $r < 0.25$ จึงสุ่มเลือก 2 ตำแหน่งจากลำดับงานทั้งหมดแล้วสลับค่ากัน ในตัวอย่างนี้สมมติว่า $r = 0.18 < 0.25$ จึงสุ่มได้ตำแหน่งที่ 1 และ 3 ดังนั้นจึงสลับยีน 4 กับ 2 ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3. 9 ขั้นตอนการ Swap Mutation สำหรับลำดับงาน

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียดและผลลัพธ์
1	โครโมโซมก่อน mutation (ได้จากลูก OX ในตารางที่ 3.7)	
2	สุ่มค่า r เพียงครั้งเดียว (สมมติว่า $r = 0.18 < 0.25$ และสุ่มได้ตำแหน่ง [1,3])	
3	ผลลัพธ์หลัง Swap Mutation	หลัง mutation (สลับตำแหน่ง 1 $\leftrightarrow$ 3):  ลำดับงานใหม่ = [2, 1, 4, 3] (สีแดง = ตำแหน่งที่ถูก swap)

และใช้ Random Reset Mutation สำหรับเครื่องจักร สุ่มค่า r สำหรับ แต่ละยีนเครื่องจักร แยกกัน ถ้า $r < 0.25$ จะสุ่มเปลี่ยนเครื่องจักรของยีนนั้น ใหม่จากตัวเลือกที่เป็นไปได้ของการดำเนินการนั้น ในตัวอย่างนี้แสดงเฉพาะยีนของ งาน i3 ที่ผ่านการ crossover มาแล้วในตารางที่ 3.8 (3 การดำเนินการ) ดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ขั้นตอนการ Random Reset Mutation สำหรับเครื่องจักร

ลำดับ	ขั้นตอน	รายละเอียดและผลลัพธ์																								
1	ยีนเครื่องจักรของ i3 ก่อน mutation	k2 k1 k2 เครื่องจักรของ i3 ที่ได้จาก crossover = (k2, k1, k2)																								
2	สุ่ม r ต่อยีน เทียบกับ mut_rate	<table><tr><th>ยีน (i, j)</th><th>ค่า ปัจจุบัน</th><th>r ที่สุ่มได้</th><th>r < 0.25?</th><th>สุ่มใหม่ จาก</th><th>ค่าใหม่</th></tr><tr><td>i3, j1</td><td>k2</td><td>0.11</td><td>✓ ใช่</td><td>{k1, k2}</td><td>k1 ★</td></tr><tr><td>i3, j2</td><td>k1</td><td>0.07</td><td>✓ ใช่</td><td>{k1, k2}</td><td>k1 ★</td></tr><tr><td>i3, j3</td><td>k2</td><td>0.52</td><td>X ไม่</td><td>—</td><td>k2 (คงเดิม)</td></tr></table> ★ = สุ่มใหม่จากตัวเลือกของการดำเนินการนั้น อาจได้ค่าเดิมหรือค่าใหม่ก็ได้	ยีน (i, j)	ค่า ปัจจุบัน	r ที่สุ่มได้	r < 0.25?	สุ่มใหม่ จาก	ค่าใหม่	i3, j1	k2	0.11	✓ ใช่	{k1, k2}	k1 ★	i3, j2	k1	0.07	✓ ใช่	{k1, k2}	k1 ★	i3, j3	k2	0.52	X ไม่	—	k2 (คงเดิม)
ยีน (i, j)	ค่า ปัจจุบัน	r ที่สุ่มได้	r < 0.25?	สุ่มใหม่ จาก	ค่าใหม่																					
i3, j1	k2	0.11	✓ ใช่	{k1, k2}	k1 ★																					
i3, j2	k1	0.07	✓ ใช่	{k1, k2}	k1 ★																					
i3, j3	k2	0.52	X ไม่	—	k2 (คงเดิม)																					
3	ผลลัพธ์หลัง Reset Mutation	k1★ k1★ k2 i3 เปลี่ยนจาก (k2, k1, k2) → (k1, k1, k2) (สีแดง = ยีนที่ถูก reset)																								

จากตัวอย่างข้างต้นเป็นเพียงการสาธิตกระบวนการสร้างโครโมโซมลูกจากพ่อแม่ 1 คู่ เท่านั้น ในทางปฏิบัติขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะดำเนินการกระบวนการคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament Selection) การผสมพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนได้ประชากรรุ่นถัดไปครบตามขนาดประชากรที่กำหนด

เพื่อสรุปผลของกระบวนการคัดเลือกแบบ elitism และการสร้างโครโมโซมลูกจากตัวอย่างที่อธิบายข้างต้น ตารางที่ 3.11 แสดงโครโมโซม elite ที่ถูกเก็บรักษาไว้ และโครโมโซมลูก G1-3 ที่ได้จากกระบวนการคัดเลือก การผสมพันธุ์ และการกลายพันธุ์ พร้อมค่าตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้อง

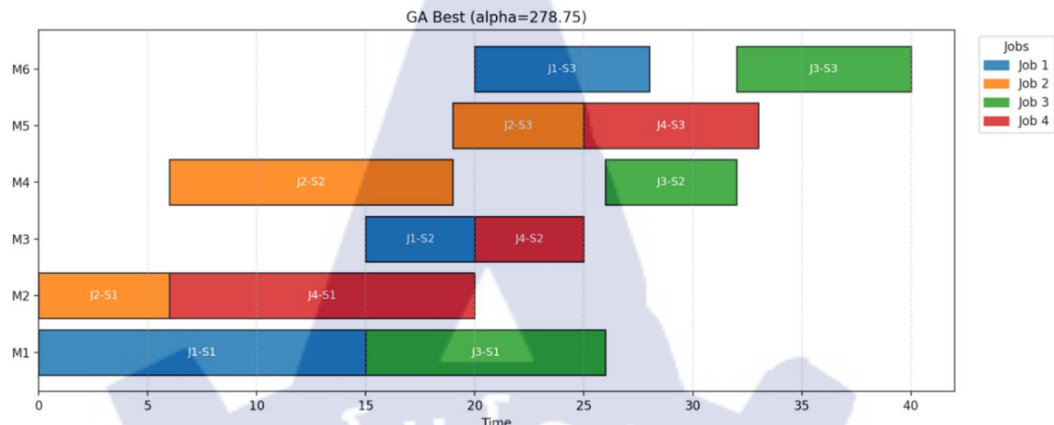
ตารางที่ 3.11 ตัวอย่างโครโมโซมรุ่นที่ 1 (Generation 1)

โครโมโซม	ลำดับงาน [π]	เครื่องจักรที่เลือก (กลุ่ม)	WIP_wait _{total}	ΣT_i	C _{max}	Fitness
C1 (Elite)	[3, 1, 2, 4]	i1:(k2,k1,k1) i2:(k1,k2,k2) i3:(k2,k1,k2) i4:(k1,k1,k1) => (6,5,8,7,13,14,5,5,8,13,5,8)	0	0	34	0
C2 (Elite)	[2, 1, 4, 3]	i1:(k1,k1,k1) i2:(k2,k2,k2) i3:(k2,k1,k2) i4:(k2,k2,k1) => (15,5,8,6,13,14,5,5,8,14,13,8)	3	0	41	3
G1-3 (โครโมโซมลูก จากตัวอย่าง)	[2, 1, 4, 3]	i1:(k2,k1,k1) i2:(k1,k2,k2) i3:(k1,k1,k2) i4:(k2,k2,k1) => (6,5,8,7,13,14,11,5,8,14,13,8)	11	0	42	11
←		ทำจนครบ G1-80				→

จากตารางที่ 3.11 พบว่าโครโมโซม C1 และ C2 ถูกเก็บรักษาไว้ด้วยวิธี elitism เนื่องจากเป็นโครโมโซมที่มีค่า Fitness ดีที่สุดในประชากรรุ่นก่อนหน้า ขณะที่โครโมโซมลูก G1-3 ซึ่งได้จากตัวอย่างกระบวนการสร้างประชากรรุ่นใหม่ มีค่า WIP_wait_{total} เท่ากับ 11 ค่า Total Tardiness เท่ากับ 0 และค่า Makespan เท่ากับ 42 ส่งผลให้มีค่า Fitness เท่ากับ 11 ซึ่งสูงกว่าโครโมโซม elite ที่ถูกเก็บรักษาไว้

ในการทดลองนี้ กำหนดขนาดประชากรเท่ากับ 80 โครโมโซม โดยในแต่ละรุ่นจะมีการเก็บรักษาโครโมโซมที่มีค่า Fitness ดีที่สุดจำนวน 2 โครโมโซมไว้ด้วยวิธี Elitism จากนั้นจึงสร้างโครโมโซมใหม่อีก 78 โครโมโซม โดยในแต่ละรอบจะคัดเลือกพ่อแม่จำนวน 1 คู่ด้วยวิธี Tournament Selection แล้วดำเนินการผสมพันธุ์ตามอัตราการผสมพันธุ์ที่กำหนด หากเกิดการผสมพันธุ์จะได้โครโมโซมลูก 2 ตัว แต่หากไม่เกิดการผสมพันธุ์จะใช้สำเนาของพ่อแม่แทน หลังจากนั้นโครโมโซมที่ได้แต่ละตัวจะผ่านกระบวนการกลายพันธุ์ก่อนเข้าสู่ประชากรรุ่นถัดไป เมื่อสร้างโครโมโซมใหม่ครบ 78 โครโมโซมแล้ว จึงนำมารวมกับโครโมโซม elite อีก 2 โครโมโซม ทำให้ได้ประชากรรุ่นใหม่ครบ 80 โครโมโซม จากนั้นจะประเมินค่า Fitness ของประชากรรุ่นใหม่นี้และบันทึกคำตอบที่ดีที่สุดที่พบในรุ่นนั้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดที่เคยพบตลอดการทำงานของอัลกอริทึม (best-so-far) กระบวนการดังกล่าวจะถูกทำซ้ำในลักษณะเดียวกันจนครบ 250 รุ่น (generations) และเมื่อสิ้นสุดการทำงาน จะเลือกโครโมโซมที่ให้ค่า Fitness ดีที่สุดจากทั้งหมดที่พบตลอดการทำงานของอัลกอริทึม มาเป็นคำตอบสุดท้ายของวิธีเชิงพันธุกรรม

3.5.5 ผลการทดลองของระยะที่ 2 และการเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.6 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการผลิตของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [$\alpha = 278.75$]

รูปที่ 3.6 แสดงแผนภูมิแกนต์ของตารางการผลิตที่ได้จากวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ภายใต้ค่า $\alpha = 278.75$ ซึ่งแสดงลำดับการประมวลผลของงานแต่ละงานในแต่ละสถานีการผลิต พร้อมการเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน จากรูปจะเห็นได้ว่างานแต่ละงานสามารถไหลผ่านแต่ละสถานีการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการรอคอยระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลให้ค่าการสะสมงานระหว่างกระบวนการเท่ากับศูนย์ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการจัดลำดับงานและการเลือกเครื่องจักร อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิธีเชิงพันธุกรรมจะสามารถลดการรอคอยระหว่างกระบวนการได้ทั้งหมด แต่ยังคงมีการกระจายภาระงานที่ส่งผลให้เวลาปิดงานของระบบ (Makespan; $C_{\max}$) เท่ากับ 40 หน่วยเวลา ซึ่งสูงกว่าวิธี Brute Force ที่ให้ค่า Makespan ต่ำกว่า

ตารางที่ 3.12 เปรียบเทียบผลลัพธ์ ระยะที่ 1 และระยะที่ 2

วิธีการ	ลำดับงาน (π)	Total Tardiness	Mean Flow Time	$C_{\max}$ (Makespan)	WIP_wait (j_1 to j_2)	WIP_wait (j_2 to j_3)	WIP_wait _{total}	Fitness
EDD+ECT	[2, 4, 1, 3]	0	32	39	8	13	21	21
Brute Force	[3, 1, 2, 4]	0	27.25	34	0	0	0	0
GA	[1, 2, 4, 3]	0	31.5	40	0	0	0	0

ตารางที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการจัดตารางการผลิตในระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 ได้แก่ วิธี EDD+ECT, วิธี Brute Force และวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) โดยพิจารณาจากตัวชี้วัด สมรรถนะ ได้แก่ Total Tardiness, Mean Flow Time, C_{max} (Makespan), WIP_wait_{total} และค่า Fitness

จากผลการทดลองพบว่า วิธี EDD+ECT สามารถหลีกเลี่ยงความล่าช้าในการส่งมอบงานได้ (Total Tardiness = 0) อย่างไรก็ตาม ยังเกิดการรอคอยระหว่างกระบวนการผลิต โดยมีค่า WIP_wait_{total} เท่ากับ 21 หน่วยเวลา ส่งผลให้ค่า Fitness สูงกว่าวิธีอื่น ในขณะที่วิธี Brute Force ซึ่งเป็นวิธีที่ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกตัวชี้วัด โดยไม่เกิดการรอคอย ระหว่างกระบวนการและไม่มีค่าความล่าช้า พร้อมทั้งให้ค่า C_{max} (Makespan) ต่ำที่สุดที่ 34 หน่วยเวลา สำหรับวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) พบว่าสามารถหาคำตอบที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับวิธี Brute Force ได้ โดยสามารถลด WIP_wait_{total} และ Total Tardiness ให้เท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ค่า C_{max} (Makespan) และ Mean Flow Time ของ GA ยังคงสูงกว่าวิธี Brute Force เล็กน้อย (Makespan = 40, Mean Flow Time = 31.5)

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าวิธีเชิงพันธุกรรมมีศักยภาพในการหาคำตอบที่มีคุณภาพ ใกล้เคียงกับวิธี Brute Force อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นวิธีการหาคำตอบแบบประมาณ (approximate method) จึงไม่สามารถรับประกันคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ในทุกกรณี

จากผลการทดลองในระยะที่ 2 ที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ GA จึงนำวิธีดังกล่าวไป ประยุกต์ใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ในระยะที่ 3

3.6 การออกแบบการทดลองระยะที่ 3 (Phase3)

ระยะที่ 3 มุ่งศึกษาประสิทธิภาพของ GA เมื่อขนาดปัญหาเพิ่มขึ้นเป็น $n=20$ และ $n=50$ งาน สิ่งที่แตกต่างกันจากระยะที่ 1 และ 2 อย่างชัดเจนมีสองประการ ได้แก่ ขนาดปัญหาที่ใหญ่ขึ้นจนไม่สามารถใช้ วิธีการคำนวณแบบตรวจสอบทุกความเป็นไปได้ (Brute Force) ได้ และการใช้ พารามิเตอร์ θ สำหรับกำหนด D_i เนื่องจากข้อมูลเวลาการผลิตถูกสุ่มขึ้นใหม่แต่ละชุดข้อมูล (instance)

3.6.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของระยะที่ 3

ระยะที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักร ขนาดที่ไม่สัมพันธ์กัน ภายใต้ขนาดปัญหาที่มีจำนวนงานเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สามารถใช้วิธี Brute Force ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ โดยการทดลองในระยะนี้มุ่งเน้นการประเมินความสามารถของ GA

ในการจัดการกับปัญหาขนาดใหญ่ และวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ จำนวนงาน ระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (due date tightness; θ) และโครงสร้างจำนวนเครื่องจักร ในแต่ละสถานี (machine structure) ต่อประสิทธิภาพของผลลัพธ์ที่ได้

ตารางที่ 3.13 การออกแบบการทดลองในระยะที่ 3

ปัจจัย	ระดับ / รายละเอียด
จำนวนงาน (n)	20, 50
จำนวนการดำเนินการ (a)	3 (คงที่ทุกการทดลอง)
โครงสร้างเครื่องจักรต่อการดำเนินการ	2-2-2 2-3-2 3-3-3
เวลาการผลิต	Uniform U[1, 99]
Due-date tightness (θ)	0.95 (ตึงมาก) 1.15 (ปานกลาง) 1.40 (ผ่อนคลาย)
วิธีแก้ปัญหา	Genetic Algorithm (GA) — ใช้พารามิเตอร์เดียวกับระยะที่ 2 ทุกประการ
จำนวน base instances	6 ชุด (สุ่มเวลาการผลิต 1 ครั้งต่อ combination ของ n และ โครงสร้างเครื่องจักร)
จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด	18 ชุด (ได้จาก 6 base instances $\times$ 3 ระดับของ θ)
ตัวชี้วัดที่บันทึก	Fitness, WIP_wait _{total} , Total Tardiness, Mean Flow Time, $C_{\max}$ (Makespan)

ตารางที่ 3.13 แสดงปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองในระยะที่ 3 ประกอบด้วย จำนวนงาน (n) ได้แก่ 20 และ 50 งาน โครงสร้างเครื่องจักรในแต่ละสถานี (machine structure) ได้แก่ 2-2-2, 2-3-2 และ 3-3-3 และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) ได้แก่ 0.95, 1.15 และ 1.40

สำหรับแต่ละ combination ของจำนวนงานและโครงสร้างเครื่องจักร จะทำการสุ่มค่า เวลาการผลิต (processing time) จากการแจกแจง Uniform U[1, 99] เพียง 1 ครั้ง เพื่อสร้างข้อมูล พื้นฐาน (base instance) โดยค่าเวลาการผลิตดังกล่าวถูกสุ่มสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากการ แจกแจง Uniform U[1, 99] ซึ่งแต่ละ base instance จะใช้ค่า processing time ชุดเดียวกัน แต่ กำหนด due date ต่างกันตามระดับค่า θ ทั้ง 3 ระดับ ดังนั้นจะได้ base instances ทั้งหมดจำนวน 2 จำนวนงาน $\times$ 3 โครงสร้างเครื่องจักร = 6 ชุด จากนั้น สำหรับแต่ละ base instance จะมีการ กำหนดกำหนดส่งมอบงาน (due date) ภายใต้อัตรา θ ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ โดยใช้ค่า processing time เดิม ทำให้ได้ชุดข้อมูลสำหรับการทดลองทั้งหมด $6 \times 3 = 18$ ชุดการทดลองดังกล่าวช่วยให้ สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของค่า θ ได้อย่างเป็นธรรมชาติ เนื่องจากความแตกต่างของผลลัพธ์เกิด จากระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงานเพียงอย่างเดียว ขณะที่ปัจจัยอื่นคงที่ กำหนดให้กำหนด ส่งมอบงานของแต่ละงานคำนวณได้ดังสมการ (3.10) และ (3.11)

$$D_i = \lceil \theta \cdot P_{i,min} \rceil \quad (3.10)$$

$$\text{โดยที่ } P_{i,min} = \sum_{j=1}^a \min_k \{P_{i,j,k}\} \quad (3.11)$$

และ θ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน

ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถทำซ้ำการทดลองได้ (reproducibility) ได้มีการกำหนดค่า seed สำหรับการสุ่มข้อมูลในแต่ละชุดการทดลอง และมีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในระยะที่ 3 ดังนี้

3.6.1.1 สร้างชุดข้อมูลการทดลองตามค่าปัจจัยที่กำหนด

3.6.1.2 ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) โดยใช้ขนาดประชากร 80 โคโรโมโซม และจำนวนรุ่น 250 generations เพื่อหาคำตอบของแต่ละกรณี

3.6.1.3 บันทึกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness) และตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ได้แก่ WIP_wait_{total} , Total Tardiness, Mean Flow Time, C_{max} (Makespan)

3.6.1.4 ทำซ้ำทุก instance

3.6.1.5 วิเคราะห์ผลด้วย ANOVA และ Main Effects Analysis

3.6.2 การวิเคราะห์ผลและตัวชี้วัดสมรรถนะ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองสำหรับแต่ละชุดข้อมูล (instance) ประกอบด้วย ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness) และตัวชี้วัดสมรรถนะของระบบ ได้แก่ เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม (WIP_wait_{total}), ความล่าช้ารวม (Total Tardiness), ค่าเฉลี่ยเวลาที่งานอยู่ในระบบ (Mean Flow Time) และเวลาปิดงานของระบบ (Makespan: C_{max}) ผลลัพธ์จากทุกชุดการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติและการวิเคราะห์เชิงผลกระทบ ดังนี้

3.6.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA): ใช้เพื่อทดสอบว่าปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ จำนวนงาน (n), โครงสร้างเครื่องจักร (machine structure) และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบ (θ) มีผลกระทบต่อตัวชี้วัดสมรรถนะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) หรือไม่

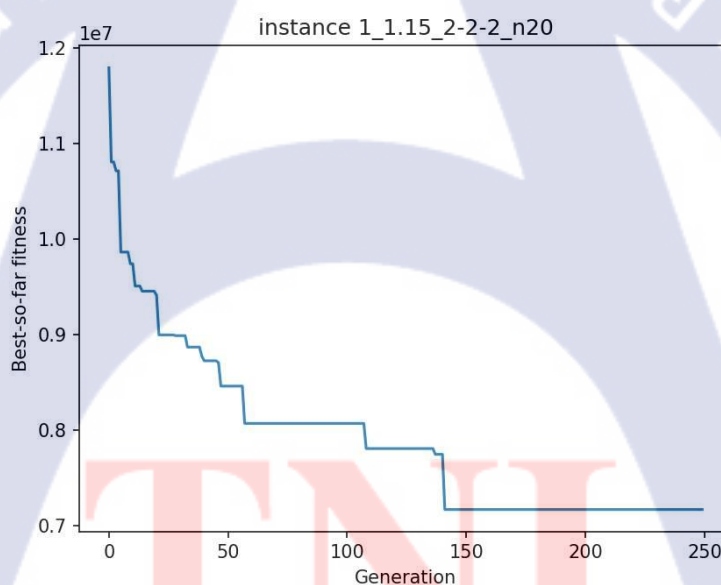
3.6.2.2 การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effects Analysis): ใช้เพื่อแสดงแนวโน้มของค่าตัวชี้วัดเมื่อระดับของแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลง เพื่ออธิบายทิศทางและขนาดของผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อสมรรถนะของระบบ

นอกจากนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาอธิบายในเชิงระบบ โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ตามกฎของ Little (Little's Law) ในเชิงความสัมพันธ์เพื่อเชื่อมโยงระหว่างการสะสมงานในระบบ (WIP), อัตราการผลิต (Throughput) และเวลาเฉลี่ยการไหลของงาน (Mean Flow Time) ซึ่งช่วยให้สามารถ

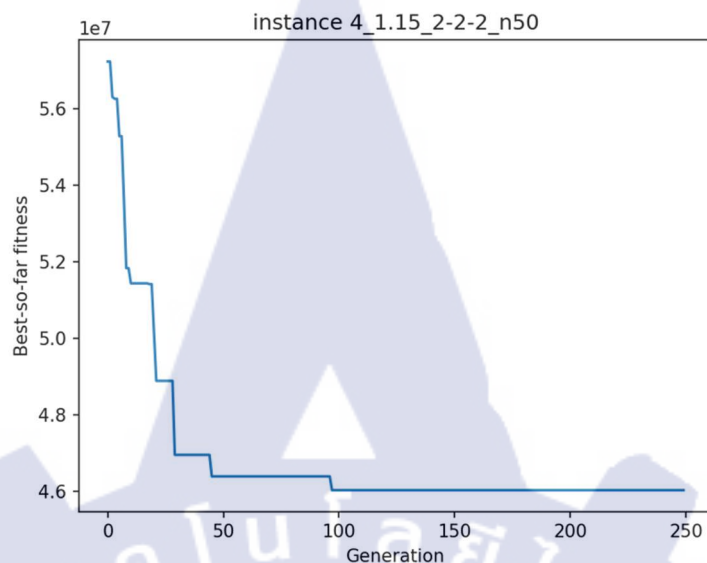
อธิบายพฤติกรรมของระบบการผลิตได้อย่างเป็นองค์รวม ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดจะถูกนำเสนอและอภิปรายในบทที่ 4

3.7 การวิเคราะห์การลู่เข้าของวิธีเชิงพันธุกรรม

นอกจากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ตัวชี้วัดแล้ว งานวิจัยนี้ยังพิจารณาพฤติกรรมการลู่เข้า (Convergence Behavior) ของ GA ตลอดกระบวนการวิวัฒนาการ 250 รุ่น โดยติดตามค่า Best-so-far Fitness ในแต่ละรุ่น เพื่อประเมินว่า GA ใช้จำนวนรุ่นทั้งหมดอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงกราฟการลู่เข้าของ instance ตัวอย่าง โดยเลือก instance ที่ใช้โครงสร้างเครื่องจักรเดียวกัน (2-2-2) แต่มีจำนวนงานต่างกัน เพื่อแสดงพฤติกรรมการลู่เข้าภายใต้ขนาดปัญหาที่แตกต่างกันโดยควบคุมปัจจัยโครงสร้างเครื่องจักรไว้



รูปที่ 3.7 ตัวแทนกราฟการลู่เข้าของ GA สำหรับจำนวนงาน $n=20$ และโครงสร้างเครื่องจักร 2-2-2



รูปที่ 3.8 ตัวแทนกราฟการลู่เข้าของ GA สำหรับจำนวนงาน $n=50$ และโครงสร้างเครื่องจักร 2-2-2

จากรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็น instance ขนาดเล็ก ($n = 20$, โครงสร้าง 2-2-2) สังเกตได้ว่าค่า Best-so-far Fitness ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงรุ่นที่ 0–50 และเริ่มคงตัวในช่วงรุ่นที่ 140–150 โดยหลังจากนั้นแทบไม่มีการปรับปรุงค่า Fitness ที่มีนัยสำคัญอีกเลยจนครบรุ่นที่ 250 ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.7 ซึ่งเป็น instance ขนาดใหญ่ ($n = 50$, โครงสร้าง 2-2-2) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงค่า Fitness หลักเกิดขึ้นในช่วงรุ่นที่ 0–50 และค่า Fitness เริ่มคงตัวราวรุ่นที่ 100 โดยแทบไม่มีการปรับปรุงที่มีนัยสำคัญในช่วงรุ่นที่ 100–250

ข้อสังเกตดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สำหรับ instance ที่ทดสอบทั้งสองกรณี ค่า Fitness ที่ดีที่สุดที่ GA ค้นพบได้ในการทดลองนี้ถูกพบก่อนครบ 250 รุ่น กล่าวคือ GA อาจไม่จำเป็นต้องรันจนครบ 250 รุ่นในทุกกรณี การกำหนดเงื่อนไขหยุด (Stopping Criterion) เพิ่มเติม เช่น การหยุดเมื่อค่า Fitness ไม่มีการปรับปรุงเกินกว่ากี่รุ่นๆติดต่อกัน อาจช่วยลดเวลาการคำนวณได้โดยไม่กระทบต่อคุณภาพของคำตอบ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนรุ่นคงที่ 250 รุ่นเพื่อให้จำนวนการประเมินรวม (Total Evaluations = 20,000 ครั้ง) เท่ากันทั้งระยะที่ 2 และระยะที่ 3 การศึกษาเงื่อนไขหยุดที่เหมาะสมจึงเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาในงานวิจัยอนาคต รวมไปถึงอีกประเด็นคือ การลู่เข้าดังกล่าวอาจสะท้อนว่า GA ติด local optimum มากกว่าที่จะบ่งชี้ว่าคำตอบมีคุณภาพเพียงพอแล้ว

ดังนั้นการลดจำนวนรุ่นจึงควรศึกษาร่วมกับกลไกการหลีกเลี่ยง local optimum ในงานวิจัยอนาคตด้วยเช่นกัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

บทนี้นำเสนอผลการทดลองของการวิจัยในระยะที่ 3 ซึ่งเป็นการนำวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดตารางการผลิตขนาดใหญ่ ($n = 20$ และ $n = 50$ งาน) ภายในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน ทั้งนี้ ในบทที่ 3 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า GA สามารถหาคำตอบที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับวิธี Brute Force บนกรณีปัญหาขนาดเล็ก ($n = 4$ งาน) โดยได้ค่า WIP_wait_{total} และ Total Tardiness เท่ากับศูนย์ เช่นเดียวกัน จึงถือว่า GA มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปขยายผลในระยะที่ 3

การทดลองในระยะที่ 3 ออกแบบโดยพิจารณาปัจจัย 3 ประการ ได้แก่ จำนวนงาน (n) โครงสร้างเครื่องจักร (Machine Structure) และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) รวมทั้งสิ้น 18 ชุดการทดลอง ผลลัพธ์ที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effects Analysis) พร้อมทั้งอธิบายพฤติกรรมของระบบโดยอ้างอิงกฎของ Little (Little's Law) เพื่อให้ได้ข้อสรุปในเชิงระบบที่ครอบคลุม

4.1 ภาพรวมผลลัพธ์การทดลองระยะที่ 3

ตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ของ GA จากการทดลองทั้ง 18 ชุด ครอบคลุมทุกการผสมผสานระหว่างจำนวนงาน ($n = 20$ และ 50) โครงสร้างเครื่องจักร (2-2-2, 2-3-2 และ 3-3-3) และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน ($\theta = 0.95, 1.15$ และ 1.40) โดยตัวชี้วัดที่บันทึกได้แก่ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness) เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม (WIP_wait_{total}) ความล่าช้ารวม (Total Tardiness) เวลาปิดงานของระบบ (Makespan; C_{max}) และค่าเฉลี่ยเวลาที่งานอยู่ในระบบ (Mean Flow Time) ทั้งนี้ค่าเวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม (WIP_wait_{total}) ในงานวิจัยนี้วัดในหน่วยเวลา โดยแทนปริมาณงานสะสมระหว่างกระบวนการด้วยผลรวมของเวลารอคอยของทุกงานในระบบ ตามที่นิยามไว้ในหัวข้อ 3.1.3

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) จากการทดลองระยะที่ 3 ทั้ง 18 ชุด [$k=10$]

ชุดข้อมูล	n	โครงสร้าง เครื่องจักร	θ	Fitness ($\times 10^6$)	WIP_wait _{total}	Total Tardiness	Makespan (Cmax)	Mean Flow Time
กรณีปัญหา n = 20 งาน								
1	20	2-2-2	0.95	7.483	1,318	4,438	709	331.2
1	20	2-2-2	1.15	7.169	979	4,252	613	343.8
1	20	2-2-2	1.4	6.222	1,208	3,690	663	340.5
2	20	2-3-2	0.95	5.856	433	3,823	645	284.1
2	20	2-3-2	1.15	4.908	586	3,204	598	272.15
2	20	2-3-2	1.4	4.579	756	2,989	595	284.9
3	20	3-3-3	0.95	5.485	914	3,393	503	252.15
3	20	3-3-3	1.15	5.262	823	3,255	505	261.2
3	20	3-3-3	1.4	4.42	683	2,734	506	256.7
กรณีปัญหา n = 50 งาน								
4	50	2-2-2	0.95	47.353	5,255	31,321	1464	722.64
4	50	2-2-2	1.15	46.026	6,982	30,442	1449	725.3
4	50	2-2-2	1.4	44.04	6,904	29,128	1377	724.1
5	50	2-3-2	0.95	38.966	5,067	26,591	1315	616.6
5	50	2-3-2	1.15	38.47	5,608	26,252	1244	627.48
5	50	2-3-2	1.4	36.899	5,608	25,180	1244	627.48
6	50	3-3-3	0.95	39.325	6,837	25,358	1151	582.28
6	50	3-3-3	1.15	36.543	6,289	23,564	1137	562.04
6	50	3-3-3	1.4	35.31	6,173	22,769	981	564.82

หมายเลขชุดข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงถึง base instance ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเวลาการผลิตที่สุ่มสร้างขึ้น 1 ครั้งต่อการผสมผสานระหว่าง n และโครงสร้างเครื่องจักร โดย base instance หนึ่งชุดจะถูกนำไปทดลองซ้ำภายใต้ค่า θ ทั้ง 3 ระดับ จึงปรากฏหมายเลข Instance เดิมซ้ำกัน 3 แถวติดต่อกัน วิธีการออกแบบดังกล่าวทำให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของ θ ได้อย่างยุติธรรมเนื่องจากความแตกต่างของผลลัพธ์มาจากระดับ θ เพียงอย่างเดียว

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า Fitness มีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างกรณี n = 20 และ n = 50 โดยกรณี n = 50 ให้ค่า Fitness สูงกว่ากรณี n = 20 ประมาณ 6-8 เท่า ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าขนาดปัญหาที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อความยากในการจัดตาราง นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่าเมื่อค่า θ เพิ่มขึ้น (กำหนดส่งงานผ่อนคลายเป็นขั้น) ค่า Total Tardiness มีแนวโน้มลดลงในทุกชุดการทดลอง โดยตัวอย่างเช่น Instance 1 (2-2-2, n=20) Total Tardiness ลดลงจาก 4,438 ($\theta=0.95$) เป็น

3,690 ($\theta=1.40$) ในขณะที่ผลกระทบของโครงสร้างเครื่องจักรต่อ WIP_wait_{total} มีความซับซ้อนกว่า ซึ่งจะวิเคราะห์โดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2 ผลกระทบของจำนวนงาน (n)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวชี้วัดสมรรถนะเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณี $n = 20$ งาน และ $n = 50$ งาน โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของ 9 ชุดการทดลองในแต่ละระดับ n

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามจำนวนงาน (n) (เฉลี่ยจาก 9 ชุดการทดลองต่อระดับ)

n (งาน)	WIP_wait_{total}	Total Tardiness	Makespan (Cmax)	Mean Flow Time	Fitness (เฉลี่ย) ($\times 10^6$)
20	856	3,531	593	291.86	5.709
50	6,080	26,734	1,262	639.19	40.326

หมายเหตุ: ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง 9 ชุดต่อระดับ n (3 โครงสร้างเครื่องจักร $\times$ 3 ระดับ θ)

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อจำนวนงานเพิ่มขึ้นจาก $n = 20$ เป็น $n = 50$ ค่า WIP_wait_{total} เพิ่มขึ้นจากเฉลี่ย 856 หน่วยเวลา เป็น 6,080 หน่วยเวลา คิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 7.1 เท่า ในขณะที่ Total Tardiness เพิ่มขึ้นจาก 3,531 เป็น 26,734 หน่วยเวลา หรือประมาณ 7.6 เท่า ส่วนค่า Makespan เพิ่มขึ้นจาก 593 เป็น 1,262 หน่วยเวลา คิดเป็นประมาณ 2.1 เท่า ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของ Makespan น้อยกว่า WIP และ Tardiness อย่างมีนัยสำคัญ

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีของปัญหา NP-hard ที่ความซับซ้อนของปัญหาเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นตามจำนวนงาน เมื่อจำนวนงานมากขึ้น พื้นที่การค้นหา (Search Space) ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ GA ที่ใช้จำนวนการประเมินคงที่ 20,000 ครั้ง มีโอกาสค้นหาคำตอบที่มีคุณภาพในพื้นที่การค้นหาได้อย่างครอบคลุมน้อยลง ส่งผลให้การประสานงานระหว่างกระบวนการและความล่าช้าในการส่งมอบเพิ่มสูงขึ้น

4.3 ผลกระทบของโครงสร้างเครื่องจักร

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามโครงสร้างเครื่องจักร 3 รูปแบบ ได้แก่ 2-2-2, 2-3-2 และ 3-3-3 โดยแยกวิเคราะห์ระหว่าง $n = 20$ และ $n = 50$

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามโครงสร้างเครื่องจักร (เฉลี่ยจาก 3 ชุดการทดลอง ต่อระดับ)

โครงสร้าง เครื่องจักร	n	WIP_wait _{total}	Total Tardiness	Makespan (Cmax)	Mean Flow Time	Fitness (เฉลี่ย) ($\times 10^6$)
2-2-2	20	1,168	4,127	662	338.5	6.958
2-3-2	20	592	3,339	613	280.38	5.115
3-3-3	20	807	3,127	505	256.68	5.056
2-2-2	50	6,380	30,297	1,430	724.01	45.806
2-3-2	50	5,428	26,008	1,268	623.85	38.112
3-3-3	50	6,433	23,897	1,090	569.71	37.06

หมายเหตุ: ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง 3 ชุดต่อระดับ (3 ระดับ θ)

จากตารางที่ 4.3 สังเกตได้ว่าโครงสร้าง 3-3-3 ให้ค่า Makespan ต่ำที่สุดในทั้งสองกรณี n โดยสำหรับ n = 20 ค่า Makespan เฉลี่ยของโครงสร้าง 3-3-3 เท่ากับ 504.67 หน่วยเวลา เปรียบเทียบกับ 661.67 และ 612.67 หน่วยเวลาของโครงสร้าง 2-2-2 และ 2-3-2 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากโครงสร้าง 3-3-3 มีเครื่องจักรมากกว่าในทุกสถานี ทำให้งานสามารถกระจายภาระได้อย่าง สมดุลและลดคอขวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสำหรับ n = 50 ค่า Makespan เฉลี่ยของโครงสร้าง 3-3-3 เท่ากับ 1,090 หน่วยเวลา ซึ่งต่ำกว่าโครงสร้าง 2-2-2 และ 2-3-2 ที่มีค่า 1,430 และ 1,268 หน่วยเวลาตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวชี้วัด WIP_wait_{total} พบว่าโครงสร้าง 2-3-2 ให้ค่าต่ำที่สุดเมื่อ n = 20 (เฉลี่ย 591.67 หน่วยเวลา) ซึ่งต่ำกว่าโครงสร้าง 2-2-2 และ 3-3-3 อย่างชัดเจน โครงสร้าง 2-3-2 มีสถานีกลาง (j = 2) ที่มีเครื่องจักร 3 เครื่อง ซึ่งมักเป็นจุดคอขวดหลักของการเพิ่มเครื่องจักร เฉพาะที่สถานีนี้จึงช่วยลดการรอคอยสะสมระหว่างกระบวนการได้อย่างตรงจุดโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่ม ทรัพยากรในทุกสถานี ช่วยลด WIP ได้อย่างตรงจุดโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มทรัพยากรในทุกสถานี สำหรับ n = 50 พบว่าโครงสร้าง 3-3-3 ให้ Total Tardiness ต่ำที่สุด (เฉลี่ย 23,897 หน่วยเวลา) ขณะที่โครงสร้าง 2-2-2 ให้ค่าสูงสุด (30,297 หน่วยเวลา) แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดปัญหาขยายขึ้น การมีเครื่องจักรจำนวนมากในทุกสถานียังมีความสำคัญมากขึ้นในแง่ของการลดความล่าช้าในการส่งมอบงาน

4.4 ผลกระทบของความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามระดับ θ ทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ $\theta = 0.95$ (ตึงมาก) $\theta = 1.15$ (ปานกลาง) และ $\theta = 1.40$ (ผ่อนคลาย)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะจำแนกตามระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ)
(เฉลี่ยจาก 3 ชุดการทดลองต่อระดับ)

θ	n	WIP_wait _{total}	Total Tardiness	Makespan (Cmax)	Mean Flow Time	Fitness (เฉลี่ย) ($\times 10^6$)
0.95	20	888	3,885	619	289.15	6.275
1.15	20	796	3,570	572	292.38	5.78
1.4	20	882	3,138	588	294.03	5.074
0.95	50	5,720	27,757	1,310	640.51	41.882
1.15	50	6,293	26,753	1,277	638.27	40.346
1.4	50	6,228	25,692	1,201	638.8	38.75
หมายเหตุ: ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากชุดการทดลอง 3 ชุดต่อระดับ (3 โครงสร้างเครื่องจักร)						

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า Total Tardiness มีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อ θ เพิ่มขึ้น สำหรับ $n = 20$ ค่า Total Tardiness ลดลงจาก 3,885 หน่วยเวลา ($\theta = 0.95$) เป็น 3,138 หน่วยเวลา ($\theta = 1.40$) คิดเป็นการลดลงประมาณร้อยละ 19.2 สำหรับ $n = 50$ ลดลงจาก 27,757 เป็น 25,692 หน่วยเวลา คิดเป็นร้อยละ 7.4 ผลดังกล่าวเป็นไปตามที่คาดไว้ เนื่องจากกำหนดส่งงานที่ผ่อนคลายกว่าทำให้งานมีโอกาสส่งมอบทันกำหนดมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ค่า WIP_wait_{total} ไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจนเมื่อ θ เปลี่ยนแปลง โดยสำหรับ $n = 20$ ค่า WIP เฉลี่ยอยู่ในช่วง 796–888 หน่วยเวลาโดยไม่มีทิศทางที่แน่นอน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการสะสมงานระหว่างกระบวนการถูกควบคุมโดยโครงสร้างเครื่องจักรและลำดับงานเป็นหลักมากกว่าระดับความตึงตัวของกำหนดส่งงาน (θ) ในทำนองเดียวกัน ค่า Mean Flow Time แทบไม่เปลี่ยนแปลงตาม θ ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่า Flow Time ขึ้นอยู่กับการจัดสรรทรัพยากรและลำดับงาน ไม่ใช่กำหนดส่งงาน

4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสามปัจจัย (Three-Way ANOVA) ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบว่าปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ จำนวนงาน (n) โครงสร้างเครื่องจักร (Machine Structure) และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) ต่อตัวชี้วัดสมรรถนะแต่ละตัวหรือไม่ โดยใช้ข้อมูลจากชุดการทดลองทั้ง 18 ชุด วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ผ่านคำสั่ง General Linear Model

ทั้งนี้ข้อสังเกตสำคัญเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้คือ แต่ละ combination ของปัจจัยมีจำนวนการทดลองซ้ำ (replications) เพียง 1 ครั้ง เนื่องจากการกำหนดค่า random seed คงที่เพื่อให้สามารถทำซ้ำผลได้ (reproducibility) ดังนั้น ANOVA ในที่นี้จึงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบแนวโน้มเชิงสถิติระหว่างระดับของปัจจัย การตีความผลจึงควรพิจารณาควบคู่กับการวิเคราะห์ Main Effects และการอธิบายในเชิงระบบประกอบด้วย

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 5 ตัว

Source / ปัจจัย	Fitness	WIP_wait _{total}	Total Tardiness	Makespan (Cmax)	Mean Flow Time
	F p	F p	F p	F p	F p
n (จำนวนงาน)	1417.13 0.000 *	542.95 0.000 *	1184.67 0.000 *	569.56 0.000 *	1442.06 0.000 *
Machine Structure	13.51 0.001 *	4.34 0.038 *	10.50 0.002 *	26.39 0.000 *	57.68 0.000 *
θ (Due-date Tightness)	1.85 0.199	0.54 0.599	1.45 0.273	2.10 0.165	0.01 0.990
* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$ DF Error = 12					

จากตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA สรุปได้เป็น 3 ประเด็นหลักดังนี้

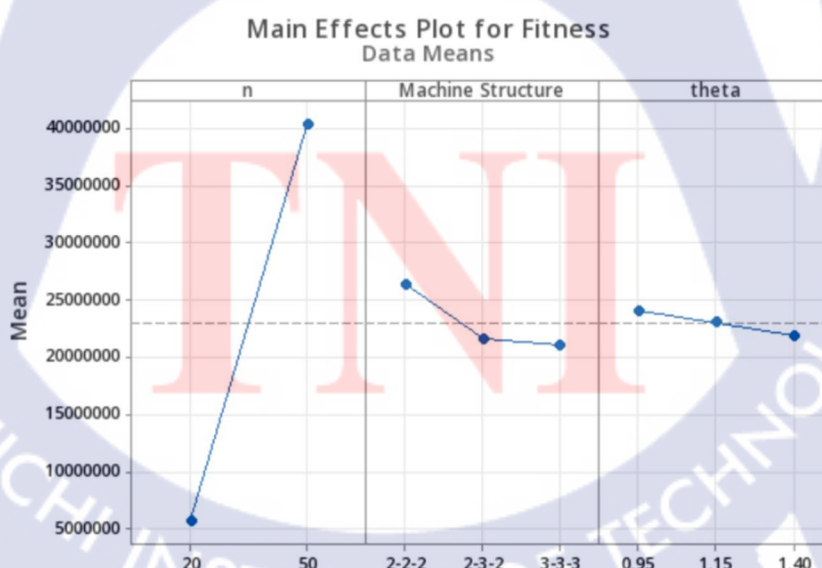
ประเด็นที่ 1 จำนวนงาน (n) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อตัวชี้วัดทุกตัว ($p < 0.001$ ทุกกรณี) โดยมี F-Value สูงที่สุดในทุกตัวชี้วัด ได้แก่ Fitness ($F = 1,417.13$) Mean Flow Time ($F = 1,442.06$) Total Tardiness ($F = 1,184.67$) Makespan ($F = 569.56$) และ WIP_wait_{total} ($F = 542.95$) ผลดังกล่าวยืนยันว่าจำนวนงานมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบสูงกว่าปัจจัยอื่นในการทดลองนี้

ประเด็นที่ 2 โครงสร้างเครื่องจักร มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อตัวชี้วัดทุกตัวเช่นกัน ($p \leq 0.038$ ทุกกรณี) โดย F-Value สูงที่สุดในตัวชี้วัด Mean Flow Time ($F = 57.68$) และ Makespan ($F = 26.39$) แสดงให้เห็นว่าการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรมีผลสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการไหลของงานและเวลาปิดระบบอย่างมีนัยสำคัญ ต่อประสิทธิภาพการไหลของงานและเวลาปิดระบบ

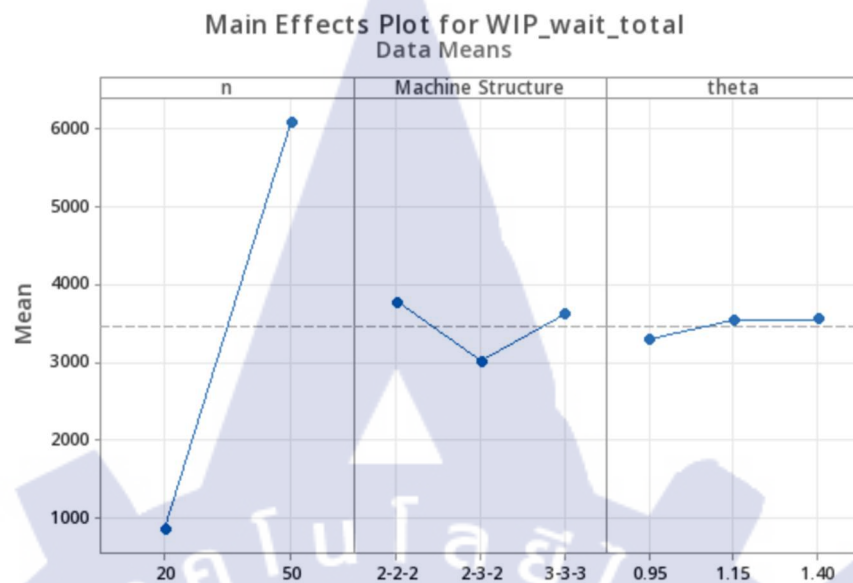
ประเด็นที่ 3 ระดับ θ ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อตัวชี้วัดใดเลย ($p \geq 0.165$ ทุกกรณี) โดยเฉพาะ Mean Flow Time ที่มี $p = 0.990$ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า θ ไม่มีผลต่อพฤติกรรมของการไหลของงานในระบบแต่อย่างใด ทั้งนี้แม้การวิเคราะห์แนวโน้มในหัวข้อ 4.4 จะพบว่า Total Tardiness มีทิศทางลดลงเมื่อ θ เพิ่มขึ้น แต่ขนาดของผลกระทบดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะผ่านระดับนัยสำคัญทางสถิติภายใต้จำนวนการทดลองซ้ำ 1 ครั้งต่อ combination ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.6 การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effects Analysis)

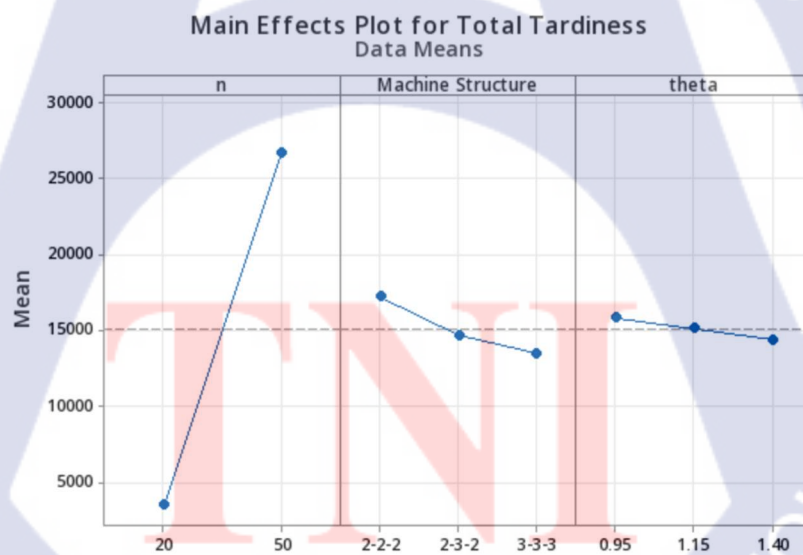
การวิเคราะห์อิทธิพลหลักใช้เพื่อแสดงแนวโน้มของตัวชี้วัดเมื่อระดับของปัจจัยแต่ละตัวเปลี่ยนแปลง โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของตัวชี้วัดในแต่ละระดับของปัจจัยนั้น ขณะที่ปัจจัยอื่นถูกเฉลี่ยรวมกัน ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.5 (Main Effects Plot จาก Minitab)



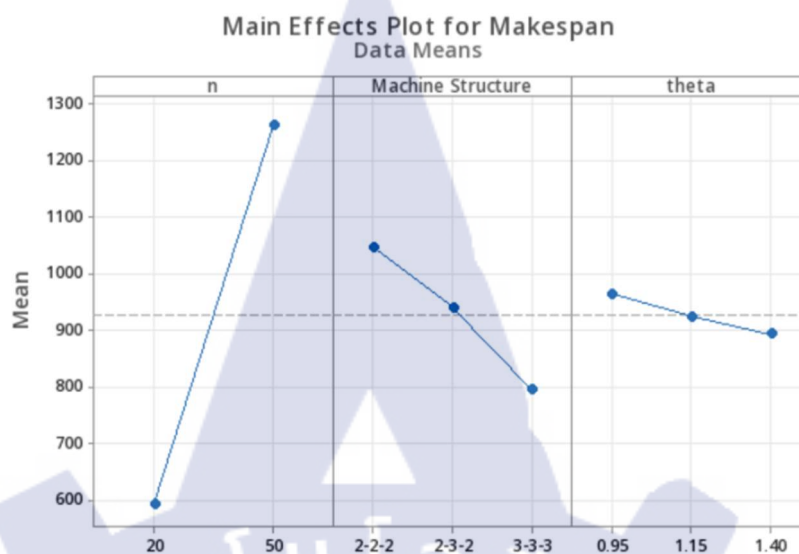
รูปที่ 4.1 Main Effects Plot for Fitness



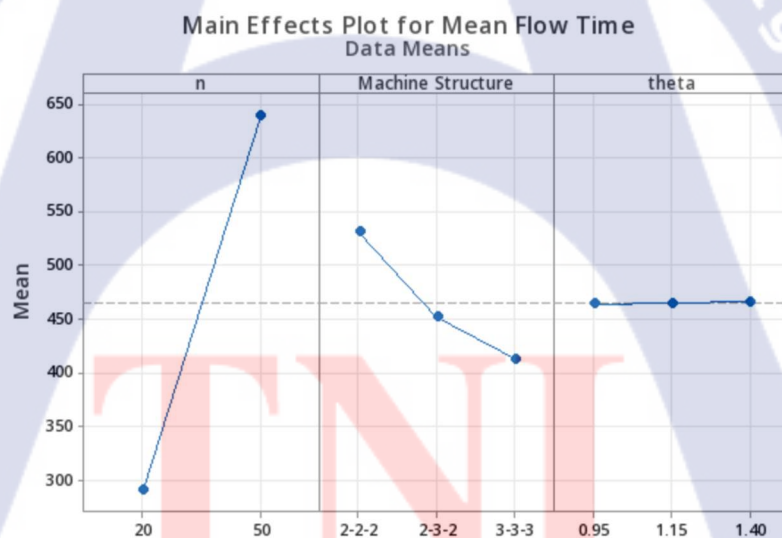
รูปที่ 4.2 Main Effects Plot for WIP_wait_total



รูปที่ 4.3 Main Effects Plot for Total Tardiness



รูปที่ 4.4 Main Effects Plot for Makespan



รูปที่ 4.5 Main Effects Plot for Mean Flow Time

4.6.1 อิทธิพลของจำนวนงาน (n)

จากกราฟ Main Effects Plot ทุกตัวชี้วัด เส้นในส่วนปัจจัย n มีความชันสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่น แสดงให้เห็นว่า n มีความชันสูงที่สุดในทุกตัวชี้วัด ซึ่งให้เห็นว่า n มีอิทธิพลสูงกว่าปัจจัยอื่นในการทดลองนี้ โดยเมื่อ n เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 50 ตัวชี้วัดทุกตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญ ได้แก่ WIP_wait_{total} เพิ่มขึ้นจาก 856 เป็น 6,080 หน่วยเวลา (เพิ่ม 7.1 เท่า) Total Tardiness เพิ่มขึ้นจาก 3,531 เป็น 26,734 หน่วยเวลา (เพิ่ม 7.6 เท่า) Makespan เพิ่มขึ้นจาก 593 เป็น 1,262 หน่วยเวลา (เพิ่ม 2.1 เท่า) และ Mean Flow Time เพิ่มขึ้นจาก 292 เป็น 639 หน่วยเวลา (เพิ่ม 2.2 เท่า) อัตราการเพิ่มขึ้นของ WIP และ Total Tardiness ที่สูงกว่า Makespan และ Mean Flow Time อย่างมากสะท้อนให้เห็นว่าเมื่อจำนวนงานมากขึ้น ปัญหาการแย่งใช้เครื่องจักร และการสะสมงานระหว่างกระบวนการทวีความรุนแรงขึ้นแบบไม่เชิงเส้น ทำให้ GA ที่ใช้จำนวนการประเมินคงที่ 20,000 ครั้ง มีโอกาสค้นหาคำตอบที่มีคุณภาพในพื้นที่การค้นหาลดลงอย่างจำกัดมากขึ้น

4.6.2 อิทธิพลของโครงสร้างเครื่องจักร

กราฟ Main Effects Plot ในส่วนโครงสร้างเครื่องจักรแสดงแนวโน้มที่แตกต่างกันตามตัวชี้วัด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ Makespan และ Mean Flow Time ลดลงต่อเนื่องจาก 2-2-2 → 2-3-2 → 3-3-3 อย่างชัดเจน โดยโครงสร้าง 3-3-3 ให้ค่าต่ำที่สุดในทั้งสองตัวชี้วัด (Makespan เฉลี่ย 797 หน่วยเวลา และ Mean Flow Time เฉลี่ย 413 หน่วยเวลา) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าสอดคล้องกับการที่ Makespan ลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบสามารถประมวลผลงานได้เร็วขึ้นเมื่อมีเครื่องจักรมากขึ้น ในทุกการดำเนินการ ส่วน Total Tardiness มีแนวโน้มลดลงจาก 2-2-2 (เฉลี่ย 17,212) → 2-3-2 (เฉลี่ย 14,673) → 3-3-3 (เฉลี่ย 13,512) เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่มีเครื่องจักรมากกว่าช่วยลดโอกาสที่งานจะส่งมอบล่าช้ากว่ากำหนด WIP_wait_{total} แสดงแนวโน้มรูปตัว V โดยโครงสร้าง 2-3-2 ให้ค่าต่ำที่สุด (เฉลี่ย 3,010 หน่วยเวลา) ต่ำกว่าทั้ง 2-2-2 (เฉลี่ย 3,774) และ 3-3-3 (เฉลี่ย 3,620) ผลนี้แตกต่างจากตัวชี้วัดอื่น เนื่องจากการสะสมงานระหว่างกระบวนการเกิดขึ้นเฉพาะที่ช่วงรอยต่อระหว่างสถานี การเพิ่มเครื่องจักรที่การดำเนินการกลาง ($j = 2$) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมระหว่างการดำเนินการแรกและการดำเนินการสุดท้ายจึงช่วยลด WIP_wait_{total} ได้ตรงจุดกว่าการเพิ่มเครื่องจักรในทุกการดำเนินการพร้อมกัน ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเลือกโครงสร้างเครื่องจักรที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์หลักของระบบ หากต้องการลด Makespan และ Mean Flow Time โครงสร้าง 3-3-3 ให้ผลดีกว่าโครงสร้างอื่นที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ในการทดลองนี้พบว่าหากต้องการลด WIP_wait_{total} สะสมระหว่างกระบวนการเป็นหลัก โครงสร้าง 2-3-2 ให้ผลดีกว่า

4.6.3 อิทธิพลของ θ

กราฟ Main Effects Plot ในส่วน θ แสดงเส้นที่แบนราบใกล้เคียงกันในทุกตัวชี้วัด โดยเฉพาะ Mean Flow Time ที่เส้นแบนราบสนิทที่ $p = 0.990$ แสดงให้เห็นว่า θ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อพฤติกรรมการทำงานของงานในการทดลองนี้ สำหรับ Total Tardiness พบว่ามี

แนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อ θ เพิ่มขึ้น (จาก $\sim 15,657$ ที่ $\theta = 0.95$ เป็น $\sim 14,416$ ที่ $\theta = 1.40$) แต่ความชันของเส้นน้อยมากและไม่ถึงระดับมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.273$) ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัดด้านจำนวนการทดลองซ้ำที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.5 อย่างไรก็ตาม ทิศทางของแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปตามที่คาดไว้ตามนิยามของ θ กล่าวคือ กำหนดส่งงานที่ผ่อนคลายกว่ากำหนดส่งงานที่ผ่อนคลายกว่าทำให้งานมีโอกาสไม่เกิดความล่าช้ามากขึ้น ผลของ θ ต่อ WIP_wait_{total} และ Mean Flow Time ที่ไม่มีนัยสำคัญยืนยันข้อสรุปสำคัญที่ว่า ตัวชี้วัดเหล่านี้ถูกกำหนดโดยโครงสร้างทางกายภาพของระบบ (จำนวนงานและจำนวนเครื่องจักร) เป็นหลัก ไม่ใช่โดยนโยบายกำหนดส่งงาน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับกรอบแนวคิดของ Little's Law ในแง่ที่ว่า Mean Flow Time และ WIP_wait_{total} เป็นตัวแปรที่สะท้อนพฤติกรรมการไหลของงาน ขณะที่กำหนดส่งงานเป็นพารามิเตอร์ด้านการประเมินความล่าช้า มิได้เปลี่ยนโครงสร้างการไหลของงานโดยตรง ขณะที่กำหนดส่งงานเป็นพารามิเตอร์ด้านการประเมินความล่าช้า มิได้เปลี่ยนโครงสร้างการไหลของงานโดยตรง

4.7 การอภิปรายผลในเชิงระบบโดยอ้างอิงกฎของ Little

กฎของ Little (Little's Law) ระบุว่า $L = \lambda W$ โดยที่ L คือจำนวนงานในระบบ (WIP) λ คืออัตราการผลิต (Throughput) และ W คือเวลาเฉลี่ยที่งานอยู่ในระบบ (Mean Flow Time) กฎนี้ใช้เป็นกรอบแนวคิดในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัดในงานวิจัยนี้ โดยประมาณ WIP ด้วย WIP_wait_{total} และใช้ Mean Flow Time แทนค่า W

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า กรณี $n = 50$ มีทั้ง WIP_wait_{total} สูงและ Mean Flow Time สูง ซึ่งสอดคล้องกับกฎของ Little ในแง่ที่ว่า WIP_wait_{total} ที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับ Mean Flow Time ที่สูงขึ้นด้วย กล่าวคือกรณีที่ GA ไม่สามารถลด WIP_wait_{total} ให้เหลือน้อยได้ในกรณีปัญหาขนาดใหญ่ ส่งผลสะสมให้งานแต่ละชิ้นใช้เวลาในระบบนานขึ้น

โครงสร้าง 3-3-3 ที่ให้ค่า Makespan ต่ำกว่า สะท้อนว่าระบบสามารถประมวลผลงานทั้งหมดได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกรอบแนวคิดของ Little's Law ที่ระบุว่า Makespan ที่ต่ำกว่าเอื้อให้ Mean Flow Time ลดลงด้วย อดคล้องกับกรอบแนวคิดของ Little's Law ที่ Makespan ที่ต่ำกว่าเอื้อให้ Mean Flow Time ลดลงด้วย ผลการทดลองที่โครงสร้าง 3-3-3 ให้ทั้ง Makespan ต่ำและ Mean Flow Time ต่ำ จึงเป็นการยืนยันความสอดคล้องกันของผลลัพธ์กับกฎของ Little อย่างเป็นรูปธรรม

สำหรับผลกระทบของ θ ต่อ Total Tardiness ที่ลดลงเมื่อกำหนดส่งงานผ่อนคลายขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ว่า θ ไม่ได้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของงานในระบบ (ซึ่งสะท้อนผ่าน WIP_wait_{total} และ Mean Flow Time) แต่เปลี่ยนเฉพาะเกณฑ์การตัดสินว่างานนั้น "ล่าช้า" หรือไม่

ดังนั้น WIP_wait_{total} และ Mean Flow Time จึงไม่ตอบสนองต่อ θ อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ Total Tardiness แสดงแนวโน้มตอบสนองต่อ θ ตามที่คาดไว้ แม้ผลดังกล่าวยังไม่ถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติ

4.8 สรุปผล

บทนี้ได้นำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดลองระยะที่ 3 ครอบคลุม 18 ชุดการทดลองภายใต้ปัจจัย 3 ประการ ได้แก่ จำนวนงาน โครงสร้างเครื่องจักร และระดับ θ ข้อค้นพบหลักสรุปได้ดังนี้

จำนวนงาน (n) มีผลกระทบมากที่สุดต่อทุกตัวชี้วัด โดย WIP_wait_{total} และ Total Tardiness เพิ่มขึ้นมากกว่า 7 เท่าเมื่อ n เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 50 ซึ่งสะท้อนความซับซ้อนของปัญหา NP-hard ที่เพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น

โครงสร้างเครื่องจักร มีผลกระทบต่อ Makespan และ Total Tardiness อย่างชัดเจน โดยโครงสร้าง 3-3-3 ให้ผลดีกว่าโครงสร้างอื่นที่ทดสอบในภาพรวม ขณะที่ 2-3-2 เหมาะสำหรับการลด WIP สะสมในกรณีปัญหาขนาดกลาง

ระดับ θ มีผลต่อ Total Tardiness ในทิศทางที่คาดไว้ แต่ไม่ถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.273$) และไม่มีผลต่อ WIP_wait_{total} และ Mean Flow Time เนื่องจากตัวชี้วัดเหล่านี้ถูกกำหนดโดยโครงสร้างระบบ ไม่ใช่นโยบายกำหนดส่งงาน

ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสอดคล้องกับกฎของ Little และกรอบแนวคิดทางทฤษฎีที่ตั้งไว้ในบทที่ 3 สอดคล้องกับกรอบแนวคิดทางทฤษฎีที่ตั้งไว้ในบทที่ 3 ข้อค้นพบเหล่านี้จะถูกนำไปสู่บทสรุปและข้อเสนอแนะในบทที่ 5 ต่อไป

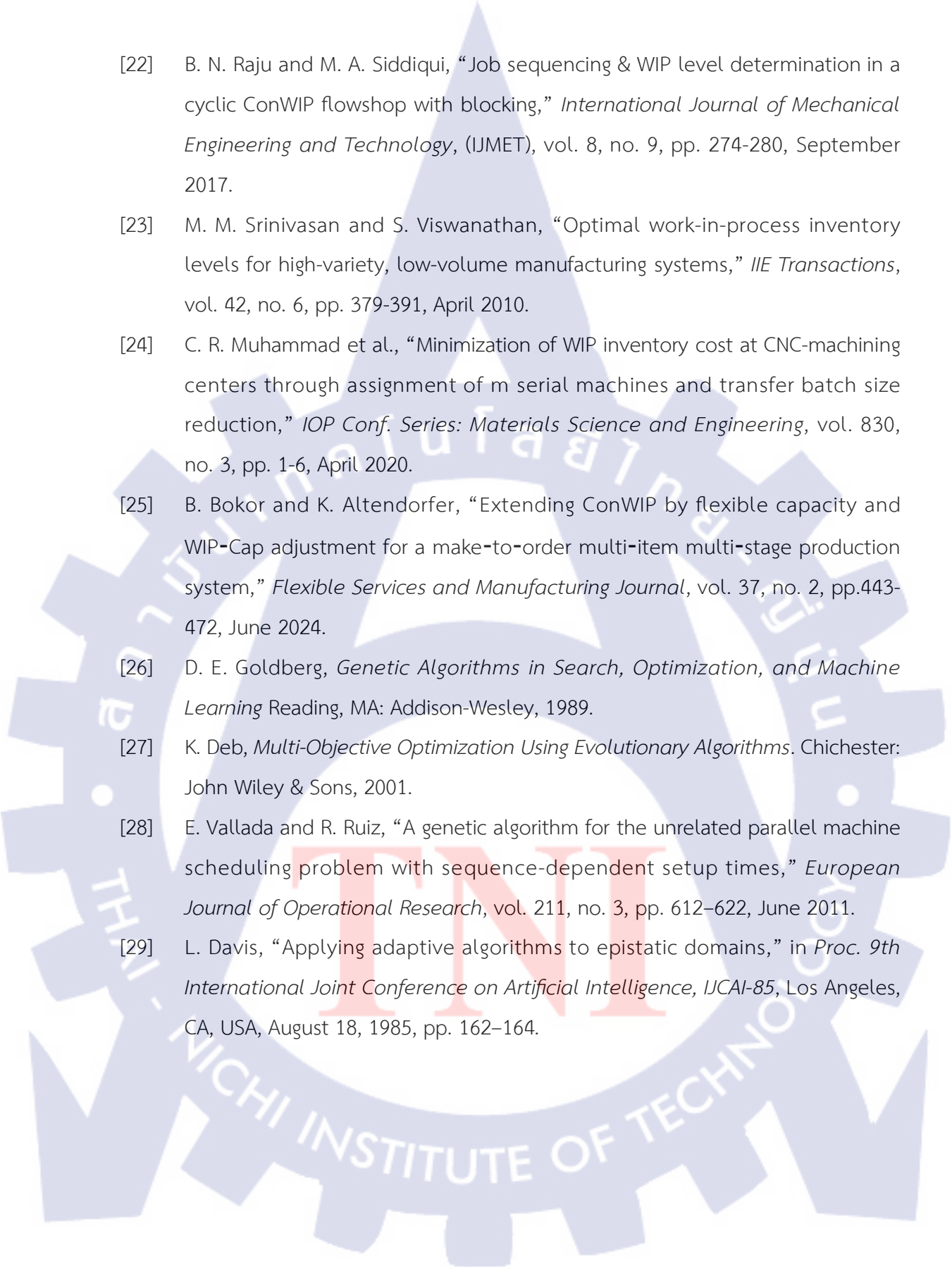
บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] W. J. Hopp and M. L. Spearman, *Factory Physics*, 2nd ed., New York: McGraw Hill, 2000.
- [2] H. J. Goldratt, *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*, 2nd ed., Great Barrington, MA: North River Press, 2004.
- [3] S. Nahmias, *Production and Operations Analysis*, 7th ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2013.
- [4] N. Tyagi et al., “Flexible flowshop scheduling model with four stages,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 43, pp. 1–11, November 2016.
- [5] H. Gong et al., “Multi-objective flexible flow shop production scheduling problem based on the double deep q-network algorithm,” *Processes*, vol. 11, no. 12, pp. 3321–3337, November 2023.
- [6] D. Zorzenon et al., “Switched max-plus linear-dual inequalities for makespan minimization: The case study of an industrial bakery shop,” *ScienceDirect*, vol. 56, no. 2, pp. 8628–8634, November 2023.
- [7] R. Ruiz and J. A. Vázquez-Rodríguez, “The hybrid flow shop scheduling problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 205, no. 1, pp. 1–18, August 2010.
- [8] J. Jungwattanakit et al., “A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines,” *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 2, pp. 358–378, February 2009.
- [9] H. Foster, “Work-in-Progress (WIP) in Manufacturing: The Complete Guide,” [Online]. Available: <https://www.machinemetrics.com/blog/wip-in-manufacturing-work-in-progress-guide>. [Accessed: September 10, 2025].
- [10] J. Rocholl and L. Mönch, “Metaheuristics for solving a flexible flow-shop scheduling problem with s-batching machines,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 32, no. 1, pp. 38–68, June 2024.

- [11] C. Yu et al., “A genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines and machine eligibility,” *Computers & Operations Research*, vol. 100, pp. 211–229, December 2018.
- [12] ชีรเดช วุฒิพรพันธ์, *วิธีการจัดลำดับและการจัดตารางการผลิต*, กรุงเทพฯ: อมรินทร์, 2559.
- [13] นิพนธ์ บัวแก้ว, *รู้จัก... ระบบการผลิตแบบลีน (Introduction to Lean Manufacturing)*, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [14] พิภพ ลลิตาภรณ์, *ระบบการวางแผนและควบคุมการผลิต (ฉบับปรับปรุง)*, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.
- [15] ไฮเซอร์ เจย์ และ เรนเดอร์ เบร์รี, *การจัดการการผลิตและปฏิบัติการ*, แปลโดย จินตน์ย ไพโรจน์ และคณะ, กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า, 2555.
- [16] A. Prabhu et al., “Workload control in flow shops with bottleneck shifting and process time variability,” *Production Engineering Archives*, vol. 30, no 1, pp. 48–56, March 2024.
- [17] ปรีตรตา จันทร์จิระวัฒน์, *แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่นที่มีเครื่องจักรขนานที่ไม่สัมพันธ์กัน*, วิทยานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมอุตสาหกรรม), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2563.
- [18] อณจ ชัยมณี และ วิสุทธิ์ สุพิทักษ์, “การจัดตารางการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนยืดหยุ่นโดยมีเวลาปรับตั้งเครื่องจักรซึ่งขึ้นกับลำดับงานภายใต้นโยบายการผลิตแบบทันเวลาพอดี,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 2, หน้า 219–231, พฤษภาคม 2558.
- [19] ธนวัฒน์ วงศ์เครือ และ วรวิทย์ หวังวัชรกุล, “การจัดตารางการผลิตเครื่องจักรขนานในกระบวนการทดสอบวงจรรวม,” *วารสารการวิจัยปฏิบัติการไทย (TJOR)*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 153–164, พฤษภาคม 2564.
- [20] M. L. Spearman and M. A. Zazanis, “Push and pull production systems: Issues and comparisons,” *Operations Research*, vol. 40, no. 3, pp. 521–532, June 1992.
- [21] M. Braglia et al., “CONWIP card setting in a flow-shop system with a batch production machine,” *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 2, no. 1, pp. 1–18, January 2011.

- 
- [22] B. N. Raju and M. A. Siddiqui, "Job sequencing & WIP level determination in a cyclic ConWIP flowshop with blocking," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, (IJMET), vol. 8, no. 9, pp. 274-280, September 2017.
- [23] M. M. Srinivasan and S. Viswanathan, "Optimal work-in-process inventory levels for high-variety, low-volume manufacturing systems," *IIE Transactions*, vol. 42, no. 6, pp. 379-391, April 2010.
- [24] C. R. Muhammad et al., "Minimization of WIP inventory cost at CNC-machining centers through assignment of m serial machines and transfer batch size reduction," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 830, no. 3, pp. 1-6, April 2020.
- [25] B. Bokor and K. Altendorfer, "Extending ConWIP by flexible capacity and WIP-Cap adjustment for a make-to-order multi-item multi-stage production system," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 37, no. 2, pp.443-472, June 2024.
- [26] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [27] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- [28] E. Vallada and R. Ruiz, "A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times," *European Journal of Operational Research*, vol. 211, no. 3, pp. 612-622, June 2011.
- [29] L. Davis, "Applying adaptive algorithms to epistatic domains," in *Proc. 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-85*, Los Angeles, CA, USA, August 18, 1985, pp. 162-164.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนแบบยืดหยุ่น (Flexible Flow Shop) ที่มีเครื่องจักรขนานแบบไม่สัมพันธ์กัน (Unrelated Parallel Machines) โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบผ่านตัวชี้วัดที่ครอบคลุมทั้งด้านประสิทธิภาพการไหลของงานและการส่งมอบงาน ได้แก่ เวลารอคอยระหว่างกระบวนการรวม (WIP_wait_{total}) และความล่าช้ารวม (Total Tardiness) ซึ่งถูกรวมอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว

ผลการทดลองในระยะที่ 3 ซึ่งครอบคลุม 18 ชุดการทดลอง ภายใต้ปัจจัยจำนวนงาน (n) โครงสร้างเครื่องจักร และระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) แสดงให้เห็นว่า วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ได้อย่างเหมาะสม และให้ผลลัพธ์ที่สะท้อนพฤติกรรมของระบบได้อย่างสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จำนวนงาน (n)

มีผลกระทบต่อทุกตัวชี้วัดอย่างชัดเจน โดยเมื่อจำนวนงานเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 50 พบว่า WIP_wait_{total} และ Total Tardiness เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่า Makespan และ Mean Flow Time อย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่าการสะสมงานระหว่างกระบวนการและความล่าช้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดปัญหาเพิ่มขึ้น

2. โครงสร้างเครื่องจักร (Machine Structure)

มีผลต่อสมรรถนะของระบบในลักษณะที่แตกต่างกันตามตัวชี้วัด โดยโครงสร้าง 3-3-3 ให้ค่า Makespan และ Mean Flow Time ต่ำที่สุด ขณะที่โครงสร้าง 2-3-2 ให้ค่า WIP_wait_{total} ต่ำที่สุดในบางกรณี แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนเครื่องจักรในทุกสถานีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของงานโดยรวม ในขณะที่การเพิ่มเครื่องจักรในสถานีที่เป็นคอขวดสามารถลดการสะสมของงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ)

มีผลต่อ Total Tardiness ในเชิงแนวนอน โดยค่าความล่าช้าลดลงเมื่อ θ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่พบผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อ WIP_wait_{total} และ Mean Flow Time ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวชี้วัดดังกล่าวขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบมากกว่าการกำหนด due date

5.2 การอภิปรายผล

จากผลการทดลองสามารถอภิปรายในเชิงระบบได้ดังนี้

ประการแรก การเพิ่มจำนวนงานส่งผลให้เกิดการสะสมของงานระหว่างกระบวนการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ Mean Flow Time และ Total Tardiness ผลดังกล่าวสะท้อนลักษณะของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีความซับซ้อนสูง (NP-hard) ซึ่งพื้นที่คำตอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนงาน ส่งผลให้วิธีเชิงค้นหาไม่สามารถครอบคลุมคำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้งบประมาณการคำนวณที่จำกัด

ประการที่สอง โครงสร้างเครื่องจักรมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของระบบ โดยการเพิ่มจำนวนเครื่องจักรในทุกสถานีช่วยลดระยะเวลาการทำงานรวมของระบบ (Makespan) และเวลาเฉลี่ยที่งานอยู่ในระบบ (Mean Flow Time) อย่างไรก็ตาม การลดการสะสมของงานระหว่างกระบวนการ (WIP_{wait_total}) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนเครื่องจักรโดยรวมเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของคอขวดในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่พบว่าโครงสร้าง 2-3-2 สามารถลด WIP ได้ดีกว่าในบางกรณี

ประการที่สาม ระดับความตึงตัวของกำหนดส่งมอบงาน (θ) ไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของงานในระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะต่อ WIP_{wait_total} และ Mean Flow Time เนื่องจากตัวชี้วัดดังกล่าวถูกกำหนดโดยข้อจำกัดด้านทรัพยากรและลำดับการผลิตเป็นหลัก ขณะที่ θ ส่งผลต่อการประเมินความล่าช้าของงานเท่านั้น

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Little ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณงานในระบบ เวลาเฉลี่ยที่งานอยู่ในระบบ และอัตราการผลิต โดยพบว่าเมื่อ WIP_{wait_total} เพิ่มขึ้น Mean Flow Time มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับกรอบแนวคิดทางทฤษฎี

ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ WIP ถูกพิจารณาในรูปของเวลารอคอยระหว่างกระบวนการ ซึ่งเป็นตัวแทนเชิงเวลา (time-based proxy) ของการสะสมงานในระบบ มิใช่จำนวนชิ้นงานโดยตรง

5.3 การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ได้ดังนี้

5.3.1 สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ Flexible Flow Shop ที่มีเครื่องจักรแบบ UPM ได้อย่างเป็นระบบ

5.3.2 สามารถแสดงให้เห็นถึงการสะสมของงานในระบบผ่านตัวชี้วัด WIP_{wait_total}

5.3.3 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง WIP_{wait_total} และ Total Tardiness ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ

5.3.4 สามารถพัฒนาแนวทางการจัดการตารางการผลิตโดยใช้ GA ที่พิจารณาทั้งประสิทธิภาพของระบบและการส่งมอบงานร่วมกัน

5.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

5.4.1 การทดลองในแต่ละชุดข้อมูลมีการทำซ้ำเพียง 1 ครั้ง ซึ่งอาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

5.4.2 วิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีเชิงสุ่ม (stochastic) ผลลัพธ์อาจแตกต่างกันได้ในแต่ละการรัน

5.4.3 การใช้ WIP_wait_{total} เป็นตัวแทนของ WIP เป็นการพิจารณาในเชิงเวลา ไม่ใช่จำนวนงานจริงในระบบ

5.4.4 งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาข้อจำกัด WIP ในลักษณะของจำนวนชิ้นงาน (WIP limit) ซึ่งอาจมีผลต่อพฤติกรรมของระบบ งานวิจัยนี้กำหนดค่า $k = 10$ โดยอาศัย reasoning เชิงระดับขนาด (scale-based reasoning) การศึกษาผลกระทบของค่า k ที่แตกต่างกันต่อคุณภาพของคำตอบยังเป็นข้อจำกัดที่ควรศึกษาต่อไป

5.4.5 งานวิจัยนี้ สมมติให้เวลาการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างสถานีการผลิต (Transportation Time) เท่ากับศูนย์ ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับระบบการผลิตจริงที่การเคลื่อนย้ายชิ้นงานต้องใช้เวลาและทรัพยากร การละเว้นปัจจัยดังกล่าวอาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ประเมินค่า WIP_wait_{total} และ Total Tardiness ต่ำกว่าความเป็นจริง

5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต อาจพิจารณาต่อยอดงานวิจัยนี้ในประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.5.1 ศึกษาการกำหนดระดับ WIP ในระบบการผลิตที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น เช่น Hybrid Flow Shop หรือระบบที่มีจำนวนขั้นตอนการผลิตมากกว่านี้

5.5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมกับวิธีเมตาฮิวริสติกอื่น เช่น Particle Swarm Optimization หรือ Simulated Annealing

5.5.3 ศึกษาผลกระทบของปัจจัยอื่นของระบบการผลิต เช่น เวลาการตั้งเครื่องจักร การเสียของเครื่องจักร หรือข้อจำกัดด้านทรัพยากร

5.5.4 ทดลองประยุกต์ใช้แบบจำลองกับข้อมูลจากระบบการผลิตจริง เพื่อประเมินความเหมาะสมของแนวทางที่เสนอในสถานการณ์จริง

5.5.5 ขยายแบบจำลองโดยรวมเวลาการเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างการดำเนินการ (Transportation Time) เข้าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในงานวิจัยนี้สมมติให้เวลาการเคลื่อนย้าย

ชิ้นงานระหว่างการดำเนินการการผลิตเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม ในระบบการผลิตจริงการเคลื่อนย้ายชิ้นงานมักใช้เวลาและทรัพยากรที่ไม่สามารถละเว้นได้ การรวม Transportation Time เข้าในแบบจำลองจะทำให้ WIP_wait_{total} สะท้อนการสะสมของงานในระบบได้ครบถ้วนยิ่งขึ้น รวมถึงอาจส่งผลต่อการจัดลำดับงานและการเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมในลักษณะที่แตกต่างออกไป ซึ่งถือเป็นประเด็นที่ควรศึกษาในงานวิจัยอนาคต



ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

โค้ด Python สำหรับสร้างชุดข้อมูลการทดลอง

TNI

โค้ด Python สำหรับสร้างชุดข้อมูลการทดลอง

โค้ดนี้ใช้สำหรับสร้างชุดข้อมูลการทดลองในระยะที่ 3 โดยสุ่มเวลาการผลิต $P_{i,j,k}$ จากการแจกแจง Uniform[1, 99] และคำนวณกำหนดส่งงาน D_i ตามสูตร $D_i = \lceil \theta \times P_{i,\min} \rceil$ เมื่อรันโค้ดจะได้ไฟล์ Excel จำนวน 3 ไฟล์ต่อหนึ่ง base instance แยกตามระดับ θ (0.95, 1.15 และ 1.40) โดยแต่ละไฟล์ประกอบด้วย 3 sheet ได้แก่ Config, DueDates และ ProcessingTimes

ค่า random seed จะถูกฝังไว้ในชื่อไฟล์โดยอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถตรวจสอบและทำซ้ำผลการทดลองได้ทุกครั้ง หากต้องการกำหนด seed คงที่สามารถระบุได้ที่พารามิเตอร์ seed และหากต้องการเปลี่ยนโครงสร้างเครื่องจักรสามารถแก้ไขได้ที่พารามิเตอร์ machines_by_stage

```
import time
import random
import math
import pandas as pd

def _theta_tag(theta: float) -> str:
    """Format theta like 0.95 -> 0p95 for filenames."""
    s = f"{theta:.2f}".rstrip("0").rstrip(".")
    return s.replace(".", "p")

def generate_phase3_style_instances(
    n_jobs: int = 50,                # เปลี่ยนเป็น 5 ได้
    n_stages: int = 3,
    theta_list: tuple[float, ...] = (0.95, 1.15, 1.40),
    proc_low: int = 1,
    proc_high: int = 99,
    seed: int | None = None,         # None = สุ่มใหม่ทุกครั้ง
    prefix: str = "instance",       # ชื่อไฟล์ต้นฉบับ
    machines_by_stage: dict[int, list[int]] | None = None,
):
    """
    Generate random FFS-UPM instance (ProcessingTimes ~ U{proc_low, proc_high})
    and DueDates using Phase-3 rule:
        d_j = ceil(theta * sum_s min_m p_{j,s,m})

    Export 3 Excel files (one per theta) with sheets:
    - Config (Key, Value)
    - DueDates (Job, DueDate)
    - ProcessingTimes (Job, Stage, Machine, ProcTime)

    Notes:
    - If seed is None, seed is generated from time -> different every run.
    - Seed is printed and embedded in filename for traceability.
    """
    # ----- Seed handling (best practice) -----
    if seed is None:
```

```

# nanoseconds helps avoid same seed when running quickly
seed = int(time.time_ns() % (2**32 - 1))
rng = random.Random(seed)
print("SEED =", seed)

# ----- Default machines_by_stage (Option 1) -----
if machines_by_stage is None:
    if n_stages != 3:
        raise ValueError("Default machines_by_stage is defined for n_stages=3. "
                          "Please pass machines_by_stage for other n_stages.")
    machines_by_stage = {
        1: [1, 2],
        2: [3, 4],
        3: [5, 6],
    }

# Basic validation
if proc_low > proc_high:
    raise ValueError("proc_low must be <= proc_high")
for s in range(1, n_stages + 1):
    if s not in machines_by_stage or not machines_by_stage[s]:
        raise ValueError(f"Stage {s} has no machines in machines_by_stage")

# =====
# 1) Generate Processing Times
# =====
proc_rows = []
for j in range(1, n_jobs + 1):
    for s in range(1, n_stages + 1):
        for m in machines_by_stage[s]:
            p = rng.randint(proc_low, proc_high)
            proc_rows.append({"Job": j, "Stage": s, "Machine": m, "ProcTime": float(p)})
dfP = pd.DataFrame(proc_rows)

# =====
# 2) Compute Minimum Processing Path per Job
# Pmin_j = sum_s min_m p_{j,s,m}
# =====
min_path = {}
for j in range(1, n_jobs + 1):
    total_min = 0.0
    for s in range(1, n_stages + 1):
        stage_times = dfP[(dfP["Job"] == j) & (dfP["Stage"] == s)]["ProcTime"]
        total_min += float(stage_times.min())
    min_path[j] = total_min

# ----- Config Sheet (same for all theta) -----
config_rows = [
    {"Key": "n_jobs", "Value": n_jobs},
    {"Key": "n_stages", "Value": n_stages},
]
for s in range(1, n_stages + 1):
    config_rows.append({"Key": f"machines_stage{s}", "Value": ",".join(map(str, machines_by_stage[s]))})
dfC = pd.DataFrame(config_rows)

# =====
# 3) Export 3 files (one per theta)
# - ProcessingTimes identical across the 3 files (fair comparison)
# - DueDates differ by theta
# =====
for theta in theta_list:
    due_rows = [{"Job": j, "DueDate": float(math.ceil(theta * min_path[j]))} for j in range(1, n_jobs + 1)]
    dfD = pd.DataFrame(due_rows)

    theta_str = _theta_tag(float(theta))
    file_name = f"{prefix}_seed{seed}_theta{theta_str}.xlsx"

    with pd.ExcelWriter(file_name, engine="openpyxl") as writer:
        dfC.to_excel(writer, sheet_name="Config", index=False)
        dfD.to_excel(writer, sheet_name="DueDates", index=False)
        dfP.to_excel(writer, sheet_name="ProcessingTimes", index=False)

    print(f"Saved: {file_name}")

print("\nAll instances generated successfully.")

# =====
# RUN
# =====

```

รูปที่ ก.1 โค้ด Python (ต่อ)

```
if __name__ == "__main__":  
    generate_phase3_style_instances(  
        n_jobs=50,          # เปลี่ยนเป็น 5 ใจ  
        seed=None,          # None = ทุกครั้งรันใหม่ (ถ้าอยาก fix ให้ได้เลขรัน 42)  
        theta_list=(0.95, 1.15, 1.40),  
        prefix="instance"  
    )
```

รูปที่ ก.1 โค้ด Python (ต่อ)

