



การวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุง



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุง



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุง"

ของ กล้า วาริพิทักษ์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชัย เทพกรณ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบปรับปรุง
ผู้วิจัย	กล้า วาริพิทักษ์
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	การวางแผนเครื่องจักร, วิธีการดมกลิ่นของฉลาม

บทคัดย่อ

การวางแผนเครื่องจักรคือการจัดเรียงเครื่องจักรภายในพื้นที่การผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด
 ฝั่งเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสามารถลดระยะทางขนถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักร และเวลาในการ
 ขนถ่ายวัสดุในกระบวนการผลิตได้ ด้วยปัญหาการวางแผนเครื่องจักรเป็นปัญหาประเภท Non-
 deterministic Polynomial-time hard (NP-hard) กล่าวคือ จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้จะเพิ่มขึ้น
 อย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการดม
 กลิ่นของฉลาม (Shark Smell Optimisation Algorithm: SSO) เพื่อแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร
 โดยมีจุดมุ่งหมายของการวิจัย คือ เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมแก้ปัญหาการวางแผน
 เครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบปรับปรุง เพื่อสืบหาคำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสม
 ของวิธีการดมกลิ่นของฉลามในการประยุกต์แก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร และเปรียบเทียบผล
 เฉลยที่ได้จากวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบปรับปรุงกับผลเฉลยที่ได้จากการใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์
 อื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการทดลองถูกดำเนินการผ่านชุดข้อมูลเทียบเคียง 5 ชุดข้อมูล
 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติพบว่า การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันในแต่ละ
 ชุดข้อมูลจะส่งผลกระทบต่อถึงสมรรถนะการหาคำตอบของวิธี SSO ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงวิธี
 SSO พัฒนาขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้น อีกทั้งยังให้ผลลัพธ์
 ที่ดีกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีเมตาฮิวริสติกส์รูปแบบอื่น ๆ ในชุดข้อมูลขนาดกลาง

Title MACHINE LAYOUT DESIGN USING MODIFIED SHARK
SMELL OPTIMISATION

Author KLA WAREEPITAK

Advisor Associate Professor Dr. Pupong Pongcharoen

Co-Advisor Dr. Saisumpan Sooncharoen

Academic Paper M.Eng. Thesis in Management Engineering, Naresuan
University, 2021

Keywords Machine Layout design, Shark Smell Optimisation

ABSTRACT

Machine layout is selection of a machine arrangement within a limited production shop floor. Efficient machine layout can lead to the reduction of material handling distance during production process. Machine layout problem can be classified as a Non-deterministic Polynomial-time hard (NP-hard) problem, which means the number of possible solutions increase exponentially when the problem size increase. In this work, Shark Smell Optimisation Algorithm (SSO) method has been applied for solving machine layout problem. The objectives of this work were to develop the computer aided layout designing program using modified SSO, investigate the appropriate setting of SSO parameters and To compare its performance with other metaheuristics. The computational experiments were conducted using five MLP benchmarking datasets. The analysis of computational experiments suggested that the SSO performance was depended on its parameter setting and results from modified SSO were significantly better than those obtained from conventional SSO in all datasets but it took longer computational time. Likewise, the proposed modified SSO outperformed other metaheuristics especially for medium problem size.

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับการอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณมากมายหลายท่าน ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณบิดามารดาผู้สนับสนุนการศึกษา ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ภูพงษ์ พงษ์เจริญ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. รัชชัย เทพภรณ์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. ศรีสัจจา วิทยศักดิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. โพธิ์งาม สมกุล กรรมการสอบข้อเสนอวิทยานิพนธ์ และ นางสาวธนัชพร สมใส ที่ได้สละเวลา ให้คำปรึกษา ชี้แนะถึงแนวทางการทำวิจัยให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งผู้วิจัยต้องขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

กล้า วารีพิทักษ์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศคุณูปการ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม (Manufacturing system)	6
1. การวางแผนการผลิตแบบคงตำแหน่ง (Fixed manufacturing layout).....	6
2. การวางแผนการผลิตตามกระบวนการผลิต (Process manufacturing layout)	6
3. การวางแผนการผลิตตามผลิตภัณฑ์ (Product manufacturing layout)	6
4. การวางแผนการผลิตแบบเซลล์ลาร์ (Cellular manufacturing layout)	7
ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible manufacturing system).....	7

ระบบขนถ่ายวัสดุภายในโรงงาน (Material handling system)	8
วัตถุประสงค์ของการจัดเรียงเครื่องจักร (Objectives)	10
ความซับซ้อนของปัญหา (Complexity of the problems)	10
วิวัฒนาการของการวางผัง (Layout evolution)	12
วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimisation algorithm)	13
1. วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์	13
2. วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่า	14
การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม Shark Smell Optimisation (SSO)	15
1. การคิดค้น และแรงบันดาลใจ	15
2. ข้อนั้นพื้นฐาน ที่ถูกใช้ในการสร้างวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม	17
3. การสร้างวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม	18
3.1 การค้นหาอนุภาคของกลิ่นในตอนเริ่มต้น (Finding initial odor particles)	18
3.2 การเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อของฉลาม (Shark movement toward the prey)	19
4. รหัสเทียมของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Pseudo – code of SSO)	22
ภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual Basic for Application (VBA)	24
การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ	25
1. การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)	25
2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	26

2.1 กรณีการทดลองมีปัจจัยที่สนใจ 2 ปัจจัย	26
2.2 กรณีที่มีปัจจัยในการทดลองมากกว่า 2 ปัจจัย	27
3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	27
วิธีการทวนสอบความถูกต้อง (Verification) ของเครื่องมือการวางแผนเครื่องจักร และ	
การตรวจสอบการใช้งานได้จริง (Validation) ของตัวแบบจำลอง	30
การปรับปรุงประสิทธิภาพในการหาคำตอบของวิธีเมตาฮีริสติกส์	30
1. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter setting)	30
2. การปรับปรุงกระบวนการ (Modifications)	32
3. การผสมผสานกับวิธีการอื่น (Hybridisations)	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวางแผนเครื่องจักร	34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาคำตอบโดยวิธีการดมกลืนของฉลาม	86
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	97
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	97
ข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	97
1. รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักร	97
2. ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ	98
3. ข้อมูลของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร	100
4. รายละเอียดของเครื่องจักร	103
การประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร	105
ขั้นตอนที่ 1 การรับเข้าข้อมูล และกำหนดค่าพารามิเตอร์	106
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างค่าคำตอบเริ่มต้นของกลุ่มประชากรฉลาม	106

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินค่าคำตอบเริ่มต้น.....	108
ขั้นตอนที่ 4 จัดเก็บค่าคำตอบเริ่มต้น.....	108
ขั้นตอนที่ 5 การนับรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (set counter $k = 1$).....	108
ขั้นตอนที่ 6 การกำหนดค่าเริ่มต้นของประชากรฉลาม (set counter $i = 1$)	108
ขั้นตอนที่ 7 การคำนวณค่าความเร็วของฉลาม.....	108
ขั้นตอนที่ 8 การคำนวณรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักรใน คำตอบ.....	109
ขั้นตอนที่ 9 และ 10 การสุ่มเลือก และการสลับเครื่องจักรสองตำแหน่งใน คำตอบ.....	111
ขั้นตอนที่ 11 และ 12 การตรวจสอบเงื่อนไข และการทำซ้ำของกระบวนการ ปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่.....	111
ขั้นตอนที่ 13 บันทึกคำตอบที่ได้จากการปรับปรุงคำตอบแบบฉลาม เคลื่อนที่.....	111
ขั้นตอนที่ 14 การคำนวณจุดหมุนวนของฉลาม	112
ขั้นตอนที่ 15 และ 16 การสุ่มเลือก และสลับเครื่องจักรสามตำแหน่งใน คำตอบ.....	112
ขั้นตอนที่ 17 บันทึกคำตอบใหม่ที่ได้จากการปรับปรุงแบบฉลามหมุนวน	113
ขั้นตอนที่ 18 และ 19 การตรวจสอบเงื่อนไข และการทำซ้ำของกระบวนการ ปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน.....	113
ขั้นตอนที่ 20 การประเมินคำตอบที่ได้จากการปรับปรุง.....	113
ขั้นตอนที่ 21 จัดลำดับคำตอบ	113

ขั้นตอนที่ 22 บันทึกคำตอบที่ให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดของฉลามปัจจุบัน.....	114
ขั้นตอนที่ 23 และ 24 การตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนประชากรฉลาม	114
ขั้นตอนที่ 25 บันทึกคำตอบที่ดีที่สุด.....	114
ขั้นตอนที่ 26 และ 27 การตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนรอบการวนซ้ำ.....	114
ขั้นตอนที่ 28 แสดงผลค่าคำตอบที่ดีที่สุด	114
การปรับปรุงคำตอบ	114
1. การปรับปรุงคำตอบโดยการ ผสมผสานวิธีการหาคำตอบของ SSO กับวิธีเชิงพันธุกรรม GA	115
2. การปรับปรุงคำตอบ ด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักร.....	116
2.1 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 2 mSSO2MaxFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดลำดับแรก.....	121
2.2 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3 mSSO3Max&SdFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดสองลำดับแรก.....	122
2.3 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 4 mSSO4MaxSdRdFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดสามลำดับแรก	123
2.4 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 5 mSSO5NoneFQ ปรับปรุงคำตอบโดยพิจารณาให้เครื่องจักรที่มีได้ขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันมีตำแหน่งอยู่ติดกัน.....	123

2.5 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 6 mSSO6Max-4thFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดลำดับแรก	123
2.6 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 7 mSSO7None-Max4thFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดลำดับแรก และห้ามมิให้เครื่องจักรที่ไม่มีการขนถ่ายวัสดุโดยตรงอยู่ติดกัน	124
3. วิธีการปรับปรุงกระบวนการทำงานของ SSO ในขั้นตอนหลามหมุนวนเข้า ร่วมกับการพิจารณาถึงความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร	125
3.1 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 8 mSSO8MaxFQ-EtR	125
3.2 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 9 mSSO9Max&SdFQ-EtR.....	125
ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมการวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธี SSO.....	126
1. ส่วนข้อมูลนำเข้า (Input phase)	126
2. ส่วนของการประมวลผล (Process phase).....	126
3. ส่วนของข้อมูลนำออก หรือส่วนการแสดงผล (Output phase)	130
การทดสอบการทำงานของโปรแกรมการประยุกต์ใช้วิธีการดมกลั่นของหลามในการ แก้ไขปัญหาการวางแผนเครื่องจักร.....	130
การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	133
1. การทดลองเพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของวิธีการดม กลั่นของหลามในการแก้ไขปัญหาการวางแผน.....	133
2. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลั่นของ หลามในการแก้ไขปัญหาการวางแผนเครื่องจักร	134

3. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลื่นของ ฉลามแบบปรับปรุงในการแก้ไข้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	135
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	136
ผลการออกแบบการทดลอง และผลการทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อสืบหา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของวิธีการดมกลื่นของฉลามในการ แก้ไข้ปัญหา MLP	136
1. การทดสอบการกระจายตัวของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ 1	138
2. การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง..	141
3. การวิเคราะห์ และสรุปผลการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	142
3.1 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M10P3	142
3.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M20P5	145
3.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M15P9	147
3.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M30P10	148
3.5 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M30P27	151
ผลการทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของ วิธีการดมกลื่นของฉลามแบบดั้งเดิมในการแก้ไข้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	154
ผลการทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของ วิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุงในการแก้ไข้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	158
1. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M10P3	159
2. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M20P5	161

3. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M15P9	164
4. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P10	166
5. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P27	169
การทวนสอบความถูกต้องของเครื่องมือการวางแผนเครื่องจักร	178
1. การแก้ไขจุดบกพร่อง (Debugging)	178
2. การตรวจสอบการรับเข้าของข้อมูลสู่กระบวนการคำนวณ	179
3. การตรวจสอบการสร้างคำตอบเริ่มต้น	180
4. การตรวจสอบลำดับขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรม	181
5. การตรวจสอบสูตรการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม	182
บทที่ 5 บทสรุป	183
สรุปผล และการอภิปรายผลการวิจัย	183
1. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธีการ ดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิม และแบบปรับปรุง	183
2. การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของฉลามในการประยุกต์ แก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร	183
3. การเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงกับผล เฉลยที่ได้จากการใช้วิธีเมต้าฮิวริสติกส์อื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	184
4. การอภิปรายผลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3	185
5. จุดเด่นและจุดด้อยของวิธีการดมกลืนของฉลาม	187

ข้อเสนอแนะ.....	188
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย General Linear Model ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป	191
ภาคผนวก ข. ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรของ 5 ชุดข้อมูล.....	196
ภาคผนวก ค. กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่นๆ ของชุดข้อมูล M10P3 M20P5 M15P9 M30P10 M30P27	201
ภาคผนวก ง. กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่นๆ ของชุดข้อมูล M10P3 M20P5 M15P9 M30P10 M30P27	206
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ SSO และวิธีการอื่นๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	211
บรรณานุกรม.....	213
ประวัติผู้วิจัย.....	271

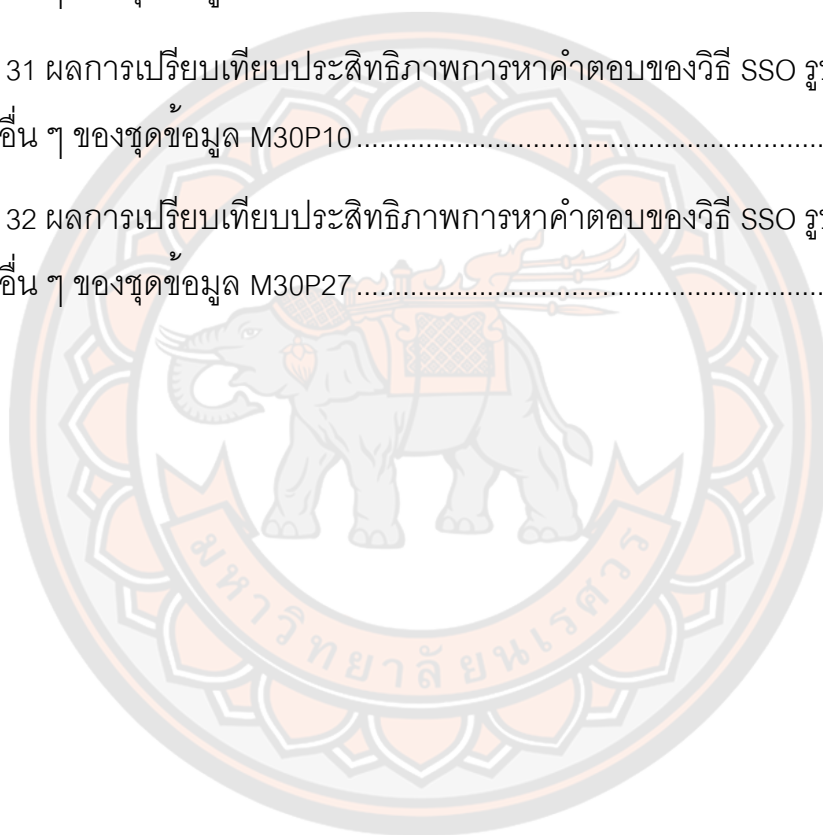
สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 จำนวนวิธีที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการจัดเรียงเครื่องจักร	11
ตาราง 2 ขั้นตอนของวิธีหาคำตอบเมื่อเทียบกับพฤติกรรม หรือเหตุการณ์ที่ เลียนแบบ	22
ตาราง 3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลกรณีที่มี 2 ปัจจัยการทดลอง.....	28
ตาราง 4 การวิเคราะห์ ANOVA ที่มีปัจจัยการทดลองจำนวน 2 ปัจจัย.....	29
ตาราง 5 รายละเอียดของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	35
ตาราง 6 สัดส่วนของบทความวิจัย สรุปตามวิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	82
ตาราง 7 รายละเอียดของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการหมุนเวียนของฉลาม (SSO)	87
ตาราง 8 ชุดของข้อมูล จำนวนเครื่องจักร และจำนวนผลิตภัณฑ์	100
ตาราง 9 ลำดับความต้องการในการใช้งานเครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 1, 2, 3, 4, 5.....	100
ตาราง 10 ความกว้างยาวของเครื่องจักร (เมตร).....	104
ตาราง 11 การสร้างคำตอบเริ่มต้นของประชากรฉลาม	107
ตาราง 12 ตัวอย่างวิธีการปรับปรุงคำตอบแบบทั้ง 9 วิธี.....	115
ตาราง 13 ปัจจัยและการแบ่งระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง	133
ตาราง 14 ปัจจัยและค่า P-Value ของชุดข้อมูลที่ 1-5.....	141
ตาราง 15 ตารางสรุปผลการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละชุดข้อมูล .	154
ตาราง 16 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO.....	155

ตาราง 17 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3.....	156
ตาราง 18 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M20P5.....	156
ตาราง 19 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M15P9.....	157
ตาราง 20 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P10.....	157
ตาราง 21 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P27.....	158
ตาราง 22 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบ ต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M10P3.....	159
ตาราง 23 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบ ต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M20P5.....	162
ตาราง 24 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบ ต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M15P9.....	164
ตาราง 25 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบ ต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P10.....	166
ตาราง 26 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบ ต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P27.....	169
ตาราง 27 วิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในแต่ละชุดข้อมูล และรายละเอียดวิธีการ mSSO ที่สามารถใช้งานร่วมกับชุดข้อมูลได้	171

ตาราง 28 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับ วิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3	173
ตาราง 29 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับ วิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M20P5	174
ตาราง 30 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับ วิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M15P9	175
ตาราง 31 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับ วิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P10	176
ตาราง 32 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับ วิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P27	177



สารบัญรูปภาพ

หน้า

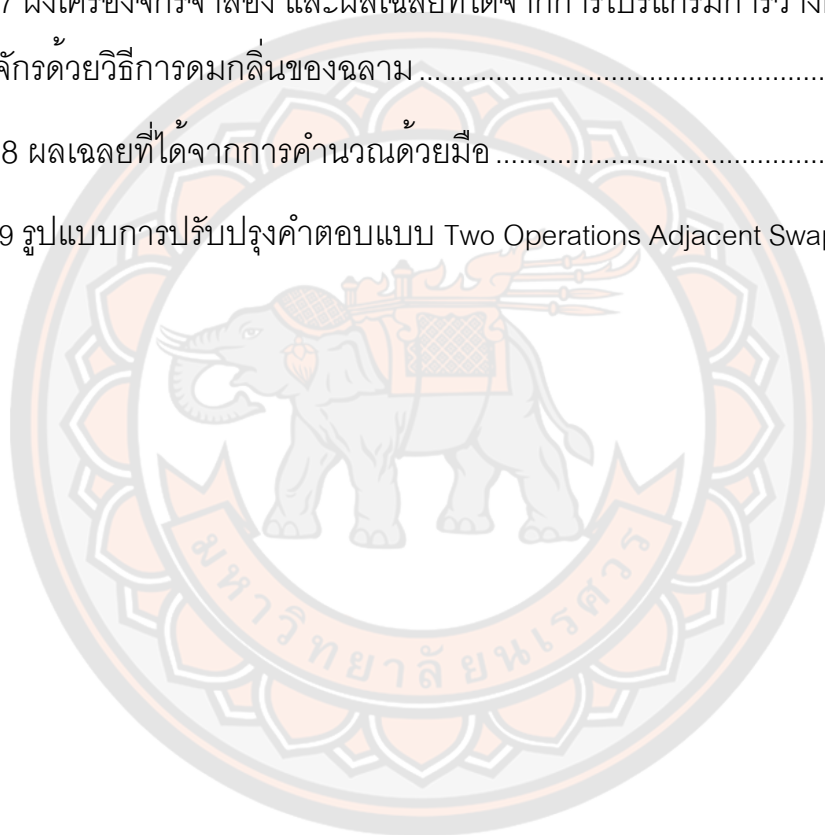
ภาพ 1 แผนภูมิการจำแนกคุณลักษณะของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร.....	5
ภาพ 2 ระบบขนถ่ายวัสดุภายในโรงงาน.....	9
ภาพ 3 การจำลองการวางผังแบบสถิต และแบบพลวัต.....	12
ภาพ 4 วิธีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด.....	13
ภาพ 5 ระยะเวลาการตรวจจับเหยื่อของฉลาม.....	16
ภาพ 6 การเคลื่อนที่ของฉลามเข้าหาเหยื่อ.....	17
ภาพ 7 รหัสเทียมของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิม.....	23
ภาพ 8 รหัสเทียมของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิม ฉบับแปลภาษาไทย.....	24
ภาพ 9 ปัจจัยต่างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทดลอง.....	26
ภาพ 10 กลยุทธ์ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์.....	31
ภาพ 11 วิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร.....	83
ภาพ 12 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามความสม่ำเสมอของรูปทรงเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง.....	83
ภาพ 13 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามรูปแบบเค้าโครงของการจัดเรียงเครื่องจักร.....	84
ภาพ 14 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามรูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง.....	85
ภาพ 15 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามวิวัฒนาการของผังเครื่องจักร.....	85
ภาพ 16 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามระบบการผลิต.....	86

ภาพ 17 สัดส่วนของบทความ สรุปตามสัดส่วนปัญหาที่ถูกแก้ไขด้วย วิธีการดมกลืนของฉลาม	94
ภาพ 18 สัดส่วนของบทความ สรุปตามวิธีการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบ ของวิธีการดมกลืนของฉลาม	94
ภาพ 19 แผนภูมิแสดงคุณลักษณะของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรในงานวิจัยครั้งนี้	96
ภาพ 20 การจัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายแถว (Multi-row layout)	98
ภาพ 21 การเดินทางของรถ AGV1 และตัวอย่างเส้นทางการขนถ่ายวัสดุ	99
ภาพ 22 รายละเอียดของเครื่องจักร	103
ภาพ 23 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธี SSO เพื่อแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	105
ภาพ 24 ภาพตัวอย่างคำตอบ 4 คำตอบที่มีสมาชิกภายในแตกต่างกัน.....	107
ภาพ 25 รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operation Random Swap	111
ภาพ 26 การปรับปรุงคำตอบแบบ Three Operation Random Swap	113
ภาพ 27 รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operations Adjacent Swap	116
ภาพ 28 รหัสเทียมของกลไกการกำหนดลำดับเครื่องจักรโดยพิจารณาถึงความถี่ในการส่งถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการ	116
ภาพ 29 ขั้นตอนการทำงานของวิธี SSO แบบปรับปรุงโดยพิจารณาถึงอัตราการขนถ่ายวัสดุระหว่างคู่เครื่องจักร	117
ภาพ 30 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 1....	118
ภาพ 31 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 2....	119
ภาพ 32 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 3....	119
ภาพ 33 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 4....	120
ภาพ 34 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 5....	120

ภาพ 35 ตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้โดยใช้การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 2	121
ภาพ 36 ตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้โดยใช้การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3	122
ภาพ 37 ตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้โดยใช้การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 5	124
ภาพ 38 หน้าจอแรกเริ่มการเข้าสู่โปรแกรมแสดงได้ดังภาพ.....	127
ภาพ 39 เมนูใหม่ติดตั้งค่าข้อมูลขาเข้า.....	128
ภาพ 40 การเลือกชุดข้อมูลผ่าน Graphic User Interface	129
ภาพ 41 ตัวอย่างส่วนของข้อมูลนำออกคำตอบเริ่มต้น.....	131
ภาพ 42 ตัวอย่างส่วนของข้อมูลนำออกแผนผังจำลอง	132
ภาพ 43 ขั้นตอนการทดลองเพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของ ฉลามเพื่อแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร	134
ภาพ 44 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ	137
ภาพ 45 การตั้งค่าการออกแบบการทดลองสำหรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4.....	137
ภาพ 46 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M10P3.....	138
ภาพ 47 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M20P5.....	139
ภาพ 48 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M15P9.....	139
ภาพ 49 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M30P10.....	140
ภาพ 50 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M30P27.....	140
ภาพ 51 กราฟผลกระทบบ้างชี้หลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M10P3.....	143
ภาพ 52 กราฟอันตรกิริยาระหว่างบ้างชี้ของ SSO ในชุดข้อมูล M10P3.....	143
ภาพ 53 กราฟผลกระทบบ้างชี้หลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M20P5.....	145
ภาพ 54 กราฟอันตรกิริยาระหว่างบ้างชี้ของ SSO ในชุดข้อมูล M20P5.....	146

ภาพ 55 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M15P9	147
ภาพ 56 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M15P9.....	148
ภาพ 57 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M30P10	149
ภาพ 58 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M30P10.....	149
ภาพ 59 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M30P27	152
ภาพ 60 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M30P27.....	153
ภาพ 61 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO8	160
ภาพ 62 การดูเข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO8	161
ภาพ 63 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9	163
ภาพ 64 การดูเข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO9	163
ภาพ 65 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9	165
ภาพ 66 การดูเข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO9	166
ภาพ 67 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9	168
ภาพ 68 การดูเข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO9	168
ภาพ 69 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO6	170
ภาพ 70 การดูเข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO6	171
ภาพ 71 หน้าตาแสดงฟังก์ชันตรวจสอบตามลำดับของ Microsoft Visual Basic for Application ในโปรแกรม Microsoft Excel.....	179
ภาพ 72 ตัวอย่างการทำงานของฟังก์ชันตรวจสอบของ Microsoft Visual Basic for Application ในโปรแกรม Microsoft Excel.....	179
ภาพ 73 การแสดงรายละเอียดของข้อมูลเครื่องจักร และลำดับการผลิต.....	180

ภาพ 74 การแสดงรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดขึ้นในแผนงาน (Work sheet)	180
ภาพ 75 การแสดงรายละเอียดคำตอบเริ่มต้น ลงในแผนงาน (Work sheet).....	181
ภาพ 76 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการวางผังเครื่องจักรเครื่องจักรด้วย วิธีการดมกลืนของฉลาม	181
ภาพ 77 ผังเครื่องจักรจำลอง และผลเฉลยที่ได้จากการโปรแกรมการวางผังเครื่องจักร เครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลาม	182
ภาพ 78 ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ	182
ภาพ 79 รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operations Adjacent Swap	186



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการแข่งขันกันอย่างสูงด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัย นำมาซึ่งความสามารถในการผลิตที่สูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตต่ำลง ทั้งนี้หนึ่งในกลยุทธ์ที่สำคัญเพื่อความสามารถได้เปรียบของธุรกิจในปัจจุบัน คือ การจัดสร้างผังการผลิตที่มีความเหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต จำนวนที่ต้องการผลิต และระบบการผลิต โดยผังการผลิตที่ดีสามารถลดต้นทุนได้สูงสุดถึงร้อยละ 50 (ธิปไตย โสเถียรธรรม, 2560) และยังสามารถนำซึ่งประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เช่น ช่วยให้เกิดความสมดุลมากยิ่งขึ้นในกระบวนการทำงาน ลดระยะเวลารอคอยของวัสดุ เกื้อหนุนให้การใช้ทรัพยากรในกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ลดโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ เพิ่มประสิทธิภาพสำหรับขั้นตอนการบำรุงรักษาเครื่องจักร ช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนย้ายวัสดุ เป็นต้น James A. Tompkins (2010) กล่าวว่าหากผังการผลิตมีเส้นทางการขนถ่ายวัสดุที่ดีจะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้สูงสุดถึงร้อยละ 30 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด โดยการจัดเรียงเครื่องจักรเพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นทางการขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุดจึงเป็นหนึ่งในวิธีการที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการจัดผังเครื่องจักรในระบบการผลิตต้องกระทำด้วยความรอบคอบเพื่อประสิทธิภาพของการผลิตและป้องกันผลเสียที่อาจเกิดขึ้นตามมาภายหลัง เช่น ต้องทำการปรับย้ายเครื่องจักรอันเนื่องมาจากความไม่ปลอดภัย ต้องจัดซื้อเครื่องจักรเพิ่มเติมโดยไม่จำเป็นเนื่องจากมีรูปแบบผังเครื่องจักรที่ไม่มีประสิทธิภาพ ต้องจัดผังเครื่องจักรใหม่เนื่องจากไม่สามารถตอบสนองต่อปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวการวางผังเครื่องจักรจึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยอยู่เสมอ ๆ

ปัญหาการวางผังเครื่องจักร จัดว่าเป็นหนึ่งในปัญหาขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน และเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial optimisation problem) อีกทั้งยังจัดอยู่ในประเภทปัญหาแบบ Non – Deterministic Polynomial Time - Hard (NP-Hard) โดยจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเป็นเท่าทวีคูณแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ปัญหาประเภทดังกล่าวไม่สามารถหาคำตอบได้โดยใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ (Mathematic optimisation algorithms) เช่น วิธีการหา

ค่าคำตอบด้วยการกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming: LP), วิธีการหาค่าตอบเชิงพลวัต (Dynamic Programming: DP) หรืออาจหาค่าตอบได้แต่ใช้ระยะเวลานาน จึงมีผู้คิดค้นวิธีการหาค่าคำตอบแบบการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยการประมาณ (Approximation Optimisation Algorithms) ซึ่งวิธีนี้สามารถหาค่าคำตอบได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการแบบที่กล่าวมา แม้ว่าคำตอบที่ได้อาจไม่เป็นค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่สุด แต่เป็นคำตอบที่สามารถยอมรับได้ ตัวอย่างของวิธีการหาค่าคำตอบโดยประมาณที่เป็นที่รู้จักและถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร เช่น วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu Search) เป็นต้น

ในส่วนของงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Shark Smell Optimisation: SSO) เพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร วิธีการหาค่าตอบแบบการดมกลิ่นของฉลามเป็นวิธีเมตาดิวริสติกส์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการค้นหาตำแหน่งของเหยื่อที่บาดเจ็บของฉลาม ซึ่งวิธีการดมกลิ่นของฉลามเป็นกระบวนการค้นหาค่าตอบแบบเฟ้นสุ่ม (Stochastic Search Algorithms) โดยมีการวนรอบซ้ำเพื่อหาค่าตอบที่ดีขึ้น สุดท้ายจะได้คำตอบที่สามารถยอมรับได้หลังสำเร็จการประมวลผล

การเลือกวิธีการดมกลิ่นของฉลาม SSO เข้ามาประยุกต์ใช้แก้ปัญหา NP – hard นั้นมีข้อดีมากมาย เช่น ง่ายต่อการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจาก SSO นั้นมีกลไกในการทำงานที่ไม่ซับซ้อน มีการควบคุมความสมดุลของกลไกการค้นหาคำตอบทั้งส่วนของกลไกการสำรวจเพื่อหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ใหม่ (Exploration) และ กลไกการเลือกผลเฉลยโดยอาศัยความรู้เดิมที่มีอยู่ (Exploitation) เป็นไปอย่างอัตโนมัติ จากข้อมูลงานวิจัยของ Abedinia, Amjadi, and Ghassemi (2014) แสดงให้เห็นว่าวิธี SSO ให้ผลลัพธ์ที่เหนือกว่าวิธีการอื่น ๆ เช่น Honeybee Mating Optimisation และ Artificial Bee Colony เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรโดยใช้วิธีแก้ปัญหาแบบเมตาดิวริสติกส์แบบต่าง ๆ เช่น Genetic Algorithm (Vitayasak & Pongcharoen, 2016), Simulated Annealing (A. S. Kheirkhah & Bidgoli, 2016), Particle Swarm Optimisation (Zha, Guo, Huang, Wang, & Huang, 2017), Teaching-Learning-Based Optimisation (Vitayasak & Pongcharoen, 2018), Monarch Butterfly Optimisation (Kim & Chae, 2019) Tabu Search (Ghassemi Tari & Ahadi, 2019) เป็นต้น แต่ยังไม่พบ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ประยุกต์ใช้ Shark Smell Optimisation ในการแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรมาก่อน ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุง
2. เพื่อสืบเสาะการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของฉลามในการประยุกต์แก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร
3. เพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงกับผลเฉลยที่ได้จากการใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์อื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยชุดนี้ใช้ชุดข้อมูล (Datasets) ทั้งหมด 5 ชุด โดยชุดข้อมูลที่ 1, 2, 3, 4 อ้างอิงมาจากการวิจัยของ Nearchou (2006) ชุดข้อมูลที่ 5 อ้างอิงมาจากการวิจัยของ ญัฏฐพงศ์ คำชาติ (2551)
2. ระบบการขนถ่ายวัสดุใช้รถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ AGV (Automated Guided Vehicle) ขนถ่ายชิ้นงานตลอดกระบวนการผลิต
3. ผลลัพธ์ของงานวิจัยจะแสดงในรูปแบบของโปรแกรมสำหรับการจัดเรียงเครื่องจักรโดยใช้ SSO ซึ่งโปรแกรมหดงกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดยภาษา Visual Basic for Application (VBA) และสามารถ แสดงรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรแบบ 2 มิติรวมถึงแสดงระยะทางการเคลื่อนที่ของรถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การจัดเรียงเครื่องจักรจะใช้รูปแบบการจัดเรียงแบบหลายแถว (Multiple rows layout)
2. การจัดเรียงเครื่องจักรภายในพื้นที่ที่กำหนดจะเริ่มจากการจัดเรียงตามแนวแกน X จากทางด้านซ้ายสุดไปยังขวา และเมื่อไม่สามารถจัดเรียงเครื่องจักรในแถวปัจจุบันได้แล้วจะเริ่มจัดเรียงเครื่องจักรในแถวใหม่โดยยึดรูปแบบเดิมนั้นจนการจัดเรียงครบตามจำนวน
3. พื้นที่ของโรงงานที่ใช้ในการจัดเรียงเครื่องจักรในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดให้ เป็นพื้นี่รูปร่างสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular shape)

4. พื้นที่ของเครื่องจักรทุกเครื่องที่นำมาใช้ในการจัดเรียงผังเครื่องจักร ถูกกำหนดตามความยาว และความกว้างสูงสุดของเครื่องจักรเป็นเกณฑ์การกำหนดพื้นที่ โดยพื้นที่ดังกล่าว เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก และมีจุดปฏิบัติงานอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรเสมอ
5. งานวิจัยในครั้งนี้นำกำหนดให้เครื่องจักรทุกเครื่องไม่สามารถหมุนเพื่อเปลี่ยนทิศทางการจัดวางได้
6. ขนาดพื้นที่ของเครื่องจักร (กว้าง X ยาว) ต้องน้อยกว่าขนาดของโรงงานเสมอ
7. ความสูงของเครื่องจักรและความสูงของพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงจะไม่นำมาพิจารณา
8. งานวิจัยในครั้งนี้นำไม่ได้การจัดตารางการผลิตมาพิจารณาร่วม
9. รถ AVG ถูกกำหนดให้สามารถเคลื่อนที่เป็นแนวตรงได้ในเฉพาะทิศทางจากทางซ้ายไปขวา หรือจากทางขวามาซ้ายและจากด้านบนขึ้นบนหรือจากด้านบนลงล่าง และกระบวนการรับส่งวัสดุรถ AGV จะเคลื่อนที่เข้าออกทางด้านหน้าของเครื่องจักรเสมอ
10. เวลาที่ใช้ในกระบวนการขนถ่ายวัสดุ และเวลารอคอยที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในแต่ละเครื่องจักรจะไม่ถูกนำมาคิด
11. สมมติให้ขนาดของการสั่งผลิต (Lot Size) ที่ต้องผลิตมีค่าเท่ากันในทุกผลิตภัณฑ์

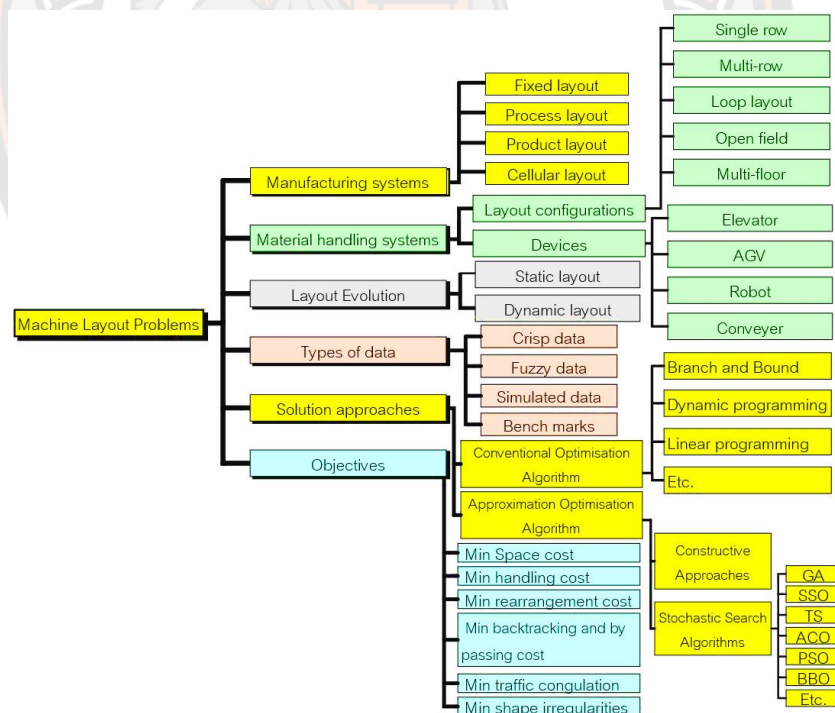
สมมุติฐานของการวิจัย

1. การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ของวิธีการดมกลืนของฉลามที่แตกต่างกัน มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลเฉลยที่ได้ในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร
2. การปรับปรุงขั้นตอนหรือกระบวนการของวิธีการดมกลืนของฉลาม มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลเฉลยที่ได้ในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงระบบการผลิตภายในโรงงาน ระบบการขนถ่ายที่ใช้ในอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของการจัดเรียงเครื่องจักร วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด รายงานการทบทวนวรรณกรรมและผลสรุปการทบทวนวรรณกรรม วิธีการดมกลืนของฉลาม ตลอดจนเนื้อหาในส่วนของการทฤษฎีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติต่าง ๆ ที่ถูกใช้ในการแก้ปัญหาและสรุปผลการทดลองของงานวิจัยนี้ โดยทั่วไปแล้วเพื่อความเหมาะสมของผังเครื่องจักรที่ต้องจัดเรียง จึงต้องพิจารณาถึงความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ (Product variety) และปริมาณในการผลิต (Product volume) (อารีรัตน์ เนือสีจัน, 2556) โดยการวางผังเครื่องจักรเป็นหนึ่งในปัญหาที่ได้ถูกทำการวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีลักษณะเฉพาะของปัญหาที่แตกต่างกันออกไป โดย Drira, Pierreval, and Hajri-Gabouj (2007) ได้จำแนกลักษณะของปัญหาการวางผังเครื่องจักรได้ดังภาพ 1



ภาพ 1 แผนภูมิการจำแนกคุณลักษณะของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร

ที่มา: ปรับปรุงจาก Drira et al. (2007)

ระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม (Manufacturing system)

การกำหนดรูปแบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นสิ่งสำคัญยิ่งที่ควรให้ความสำคัญ และถูกพิจารณาคำนึงถึงเป็นอันดับแรก เนื่องจากรูปแบบการผลิตที่เลือกใช้นั้น เป็นหนึ่งในปัจจัยพื้นฐานที่จะส่งผลต่อ ปัจจัยนำเข้าอื่น ๆ เช่น คน เครื่องจักร วัตถุดิบ เงินลงทุน ปริมาณผลิตภัณฑ์ ความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต เงินลงทุน ดังนั้นการ จัดรูปแบบการผลิตควรต้องมีความเหมาะสมกับปัจจัยในการผลิตอื่น ๆ ทั้งนี้การจัดรูปแบบการผลิตที่ เหมาะสมยังคงเป็นปัญหาที่โรงงานต้องเผชิญอยู่เสมอ ๆ โดยตัวอย่างที่พบเห็นได้แก่ กระบวนการ ผลิตมีการเปลี่ยนแปลง มีปริมาณที่ต้องทำการผลิตเพิ่มขึ้น หรือ ลดลง ขยายพื้นที่ใช้สอย การสร้าง โรงงานอุตสาหกรรมแห่งใหม่ การเปลี่ยนแปลงรุ่นของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ซึ่งปัญหาเหล่านี้ มักจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการผลิตของโรงงาน และเป็นเหตุที่ต้องเสียทั้ง ค่าใช้จ่ายและเวลา ดังนั้นก่อนเข้าสู่เนื้อหาเชิงลึกของงานวิจัย โดย James A. Tompkins (2010) ได้สรุปเรื่องรูปแบบของการจัดวางผังการผลิตที่มีอยู่ในปัจจุบัน ดังต่อไปนี้

1. การวางผังการผลิตแบบคงตำแหน่ง (Fixed manufacturing layout)

การวางผังการผลิตแบบคงตำแหน่ง กล่าวคือเป็นการวางผังที่ยึดผลิตภัณฑ์เป็นศูนย์กลาง ของกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตจะถูกคงไว้ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง แล้วนำ เครื่องจักรวัตถุดิบอุปกรณ์ที่จำเป็น เข้าไปหาตัวผลิตภัณฑ์ จึงเป็นระบบการผลิตที่มีความยืดหยุ่น สูง สามารถเปลี่ยนแปลงรุ่นและชนิดของผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย โดยผังชนิดนี้เหมาะสมกับ ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนสูง ใช้เวลาในการสร้างยาวนาน และเคลื่อนย้ายลำบาก เช่น เครื่องบิน เรือเดินสมุทร สิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น

2. การวางผังการผลิตตามกระบวนการผลิต (Process manufacturing layout)

การวางผังการผลิตตามกระบวนการผลิตเป็นรูปแบบของผังที่ใช้หลักการรวมหน่วย เครื่องจักรที่ทำงานเหมือนกันเข้าไว้ด้วยกันเป็นกลุ่ม เช่น เครื่องเจาะ เครื่องกลึง เครื่องกัด และอื่น ๆ ซึ่งเป็นการจัดแยกหน่วยงานตามกิจกรรมที่ทำการผลิต หรือการผลิตตามงาน (Job shop) การ จัดวางผังการผลิตแบบนี้เหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความหลากหลายสูง ขนาดของ ผลิตภัณฑ์ไม่แน่นอน มีความต้องการปริมาณในการผลิตไม่มากนัก (อาร์วรัตน์ เนื้อสีจัน, 2556)

3. การวางผังการผลิตตามผลิตภัณฑ์ (Product manufacturing layout)

การวางผังการผลิตตามผลิตภัณฑ์เป็นรูปแบบของการวางผังการผลิตที่กำหนดหน่วยงาน การผลิตเป็นไปโดยลำดับ ตามขั้นตอนการผลิต กล่าวคือ หน่วยงานใดผลิตก่อนจะจัดหน่วยงาน นั้นไว้ลำดับแรก หน่วยงานที่ผลิตลำดับถัดไปก็จัดไว้เป็นลำดับถัดจากกระบวนการแรกต่อเนื่องกัน จนถึงสิ้นสุดกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เครื่องจักรที่ถูกเรียงในระบบการผลิตนี้จึงเป็นการ

จัดเรียงตามลำดับการผลิต โดยผังการผลิตชนิดนี้เหมาะสมกับการผลิตที่ผลิตภัณฑ์เป็นชนิดเดียวกันและต้องการผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก โดยจัดการดำเนินการผลิตแบบนี้เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ลักษณะการผลิตจึงเป็นการผลิตแบบมาตรฐานมีขั้นตอนการผลิตแน่นอนตายตัว (สายสัมพันธ์ ชุ่นเจริญ, 2558)

4. การวางผังการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ (Cellular manufacturing layout)

การวางผังการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์เป็นการวางผังที่อาศัยกลุ่มของชิ้นงานที่แบ่งย่อยออกมาจากตัวผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์เข้าช่วยจัดกลุ่มของเครื่องจักร โดยภายในกลุ่มของเครื่องจักรที่ถูกแบ่งจะมีลำดับการผลิต วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องจักรที่ใช้ผลิตชิ้นงานนั้น ๆ ทั้งนี้โดยส่วนใหญ่แล้วชิ้นงานที่ทำการผลิตตามกลุ่มจะถูกผลิตจนเสร็จสิ้นกระบวนการโดยกลุ่มของเครื่องจักรใดเครื่องจักรหนึ่ง หรือเราอาจพิจารณาได้ว่าเป็นรูปแบบการวางผังที่เหมือนการสร้างโรงงานขนาดเล็ก หลายๆ โรงงาน ให้อยู่ภายใต้โรงงานหลักใหญ่โรงงานเดียว ซึ่งเราสามารถเรียกการวางผังเครื่องจักรแบบนี้ได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตแบบกลุ่ม

ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible manufacturing system)

ในโลกปัจจุบันความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่หลากหลายเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อการแข่งขันทางธุรกิจระบบการผลิตที่ยืดหยุ่นจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างหลากหลายและทันต่อความต้องการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นนั้น สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งในส่วนของ ชนิดผลิตภัณฑ์ และ ปริมาณการผลิต ได้ในเวลาอันสั้น อีกทั้งยังเป็นระบบการผลิตที่ทำให้การใช้งานเครื่องจักรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

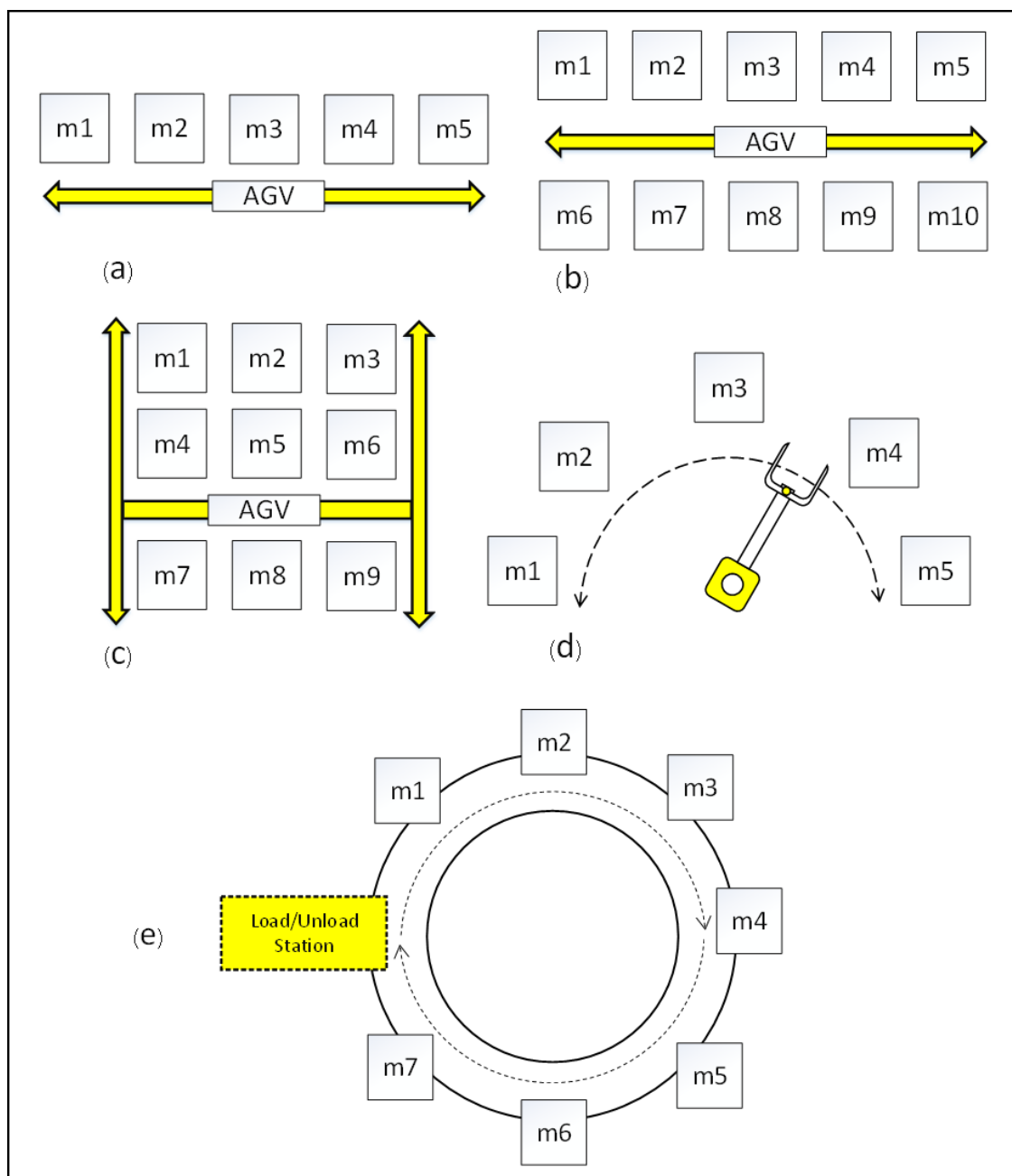
การผลิตแบบยืดหยุ่นนั้นเป็นกระบวนการผลิตที่ควบคุมให้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยให้การผลิตที่จะเกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดการผลิตที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าผ่านระบบการขนส่งแบบอัตโนมัติ โดยเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะถูกเชื่อมต่อและสั่งการอย่างเป็นลำดับผ่านระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมศูนย์กลาง (Nearchou, 2006)

โดยระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบที่สำคัญคือ องค์ประกอบทางด้านซอฟต์แวร์ (Software) เช่น โปรแกรมจัดการระบบขนถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการผลิต, โปรแกรมควบคุมเครื่องจักร และ องค์ประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) เช่น เครื่องจักรอัตโนมัติ (Computer Numerical Control: CNC) เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมกระบวนการผลิต รถ AGV ตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการเคลื่อนย้ายวัสดุแบบอัตโนมัติ เป็นต้น

ระบบขนถ่ายวัสดุภายในโรงงาน (Material handling system)

ระบบขนถ่ายวัสดุภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำหน้าที่ขนถ่ายวัสดุตลอดจนผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการทำงาน จากตำแหน่งหนึ่งไปยังที่ใด ๆ ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ระบบการขนถ่ายภายในโรงงานมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตโดยรวม เนื่องด้วยเป็นระบบที่สามารถสนับสนุนการทำงานของกระบวนการผลิตให้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ลดเวลาในการขนถ่ายวัสดุระหว่างกิจกรรมการผลิต ลดการใช้แรงงานคนในการขนย้ายวัสดุ ลดโอกาสชำรุดของวัสดุระหว่างกระบวนการขนถ่าย เป็นต้น ระบบการผลิตที่ดีนั้นจะขาดซึ่งระบบการขนถ่ายวัสดุที่มีประสิทธิภาพมิได้ กล่าวคือ วัสดุจะต้องไม่เดินทางอย่างไรเหตุผล หรือ ปราศจากความจำเป็น จากการสำรวจพบว่ากว่าร้อยละ 20 ถึง 50 ของต้นทุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตมาจากการขนถ่ายวัสดุ ซึ่งหากผู้ผลิตสามารถจัดเส้นทางขนถ่ายวัสดุที่ดีได้นั้นจะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้กว่า ร้อยละ 10 ถึง 30 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด (James A. Tompkins, 2010)

จากที่กล่าวมานั้นหมายความว่าระบบการขนถ่ายวัสดุมีผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนในการผลิต และเป็นเรื่องสำคัญอย่างมากที่ต้องนำมาพิจารณา โดยเครื่องมือที่สามารถช่วยอำนวยความสะดวกในกระบวนการขนถ่ายวัสดุจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญยิ่ง โดยในปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้ในการขนถ่ายวัสดุที่พบเห็นและถูกนำมาใช้ได้ทั่วไปในระบบการผลิต (Nearchou, 2006) แสดงดังภาพ 2 โดยอุปกรณ์การขนถ่ายวัสดุที่นำมาใช้นั้นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสภาพของการออกแบบการจัดวาง (Layout configuration) ภาพ 2(a) แสดงถึงการใช้รถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ (AGV) เคลื่อนย้ายชิ้นงานภายในโรงงานที่มีรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรในแนวเส้นตรงแบบแถวเดียว (Single row layout) ภาพ 2(b) แสดงถึงการใช้รถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ (AGV) เคลื่อนย้ายชิ้นงานภายในโรงงานที่มีรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายแถว (Multiple rows layout) ซึ่งกรณีนี้ที่กล่าวมาในการจัดเรียงเครื่องจักรในแนวเส้นตรงแบบหลายแถวได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ภาพ 2(c) แสดงถึงการใช้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามตาราง (Gantry robot) ขนส่งชิ้นงานระหว่างเครื่องจักรภายในโรงงานโดยมีรูปแบบการจัดเรียงแบบกลุ่ม (Cluster layout) โดยพื้นที่ของโรงงานนั้นเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ภาพ 2(d) แสดงถึงการใช้หุ่นยนต์ (Robot) เคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างเครื่องจักรหนึ่งไปยังเครื่องจักรอื่น ๆ ในการผลิตที่มีรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรเป็นครึ่งวงกลม (Semi-circular) ภาพ 2(e) แสดงถึงการใช้สายพาน (Conveyor) ลำเลียงชิ้นงานในโรงงานที่มีรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรแบบวงปิด (Loop layout) นอกเหนือจากที่กล่าวมายังพบการใช้ลิฟต์ (Elevator) เป็นอุปกรณ์ช่วยในการลำเลียงวัสดุให้กับเครื่องจักรในระบบการผลิตที่จัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายชั้น (Multiple-floor layout) (Dira et al., 2007)



ภาพ 2 ระบบขนถ่ายวัสดุภายในโรงงาน

ที่มา: ปรับปรุงจาก Nearchou (2006)

วัตถุประสงค์ของการจัดเรียงเครื่องจักร (Objectives)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในหัวข้อเรื่องการจัดเรียงเครื่องจักรสามารถสรุปได้ว่า วัตถุประสงค์หลักของการจัดเรียงเครื่องจักรนั้นทำเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโดยให้มีการใช้ทรัพยากรที่ต้องนำเข้าไปให้น้อยที่สุด ซึ่ง Drira et al. (2007) ได้สรุปวัตถุประสงค์ของการจัดเรียงเครื่องจักรไว้ดังนี้

1. เพื่อให้ต้นทุนสำหรับการจัดหาพื้นที่สำหรับการจัดเรียงเครื่องจักรน้อยที่สุด (Minimize space cost)
2. เพื่อให้ต้นทุนสำหรับการขนถ่ายวัตถุดิบนั้นมีค่าน้อยที่สุด (Minimize handling cost)
3. เพื่อให้กระบวนการจัดวางผังเรียงเครื่องจักรใหม่นั้นมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด (Minimize rearrangement cost)
4. เพื่อให้มีการข้าม หรือย้อนกลับของขั้นตอนการผลิตน้อยที่สุด (Minimize Backtracking and bypassing)
5. เพื่อให้ระบบขนส่งภายในโรงงานเกิดความแออัดน้อยที่สุด (Minimize traffic congestion)
6. เพื่อให้การปฏิบัติงานสร้างความผิดพลาดน้อยที่สุด (Minimize shape irregularities)

นอกเหนือจากวัตถุประสงค์ทั้ง 6 ข้อที่กล่าวมานั้น การจัดเรียงเครื่องจักรที่ดีนั้นยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นอีกประการคือ ระยะทางในการขนถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักร โดยให้มีระยะทางในการขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุด เนื่องด้วยต้นทุนในการผลิตส่วนหนึ่งนั้นมาจากค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนถ่ายวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต

ความซับซ้อนของปัญหา (Complexity of the problems)

ความซับซ้อนของปัญหานั้นมีผลโดยตรงกับวิธีการแก้ปัญหานั้น ๆ ทั้งนี้ปัญหาบางประการที่มีความซับซ้อนสูงต้องอาศัยวิธีการการแก้ปัญหาที่ถูกต้องและเหมาะสมจึงจะสามารถแก้ไขได้ วิธีการแก้ปัญหาก็ใช้เวลาแบบพหุนาม (Polynomial-Time Algorithm) เหมาะสมที่จะใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่ยาก หรือ Tractable สำหรับวิธีการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนหรือ Intractable จะนิยมใช้วิธีแก้ปัญหแบบ No Polynomial – Time Algorithm โดยปัญหาที่ซับซ้อนมักจะเกี่ยวข้องกับปัญหาการตัดสินใจ (Decision problems) โดยคำตอบของปัญหาประเภทนี้นั้นจะมีอยู่เพียงสองคำตอบคือ ใช่ หรือ ไม่ เท่านั้น อีกปัญหาหนึ่งที่มีความซับซ้อนซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ปัญหาประเภทนี้ในการดำเนินงานวิจัยคือ ปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimisation problem) ซึ่งเป็นปัญหาที่มุ่งเน้นไปที่การหาค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุดของผลลัพธ์ตาม

วัตถุประสงคที่ไดตั้งไว โดยปัญหาที่วานี้สามารถเปลี่ยนใหกลายเป็นปัญหาการตัดสินใจไดโดยการกำหนดขอบเขตของผลลัพธ์ที่เป็นไปได (S. Vitayasak & P. Pongcharoen, 2015) การจัดกลุ่ของปัญหาโดยใช้ความซับซ้อนของปัญหาเป็นเกณฑ์การแบ่ง มีด้วยกัน 2 กลุ่ม (Talbi, 2009) ได้แก่

1. กลุ่ม P Problem คือปัญหาการตัดสินใจที่สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่เป็นฟังก์ชันแบบพหุนาม (Polynomial) โดยใช้วิธีการที่เป็นแบบแผน (Deterministic algorithm)

2. กลุ่ม NP Problem คือปัญหาการตัดสินใจที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่เป็นฟังก์ชันพหุนาม โดยต้องใช้วิธีการแบบ Non-deterministic ทั้งนี้หากปัญหาที่สามารถหาคำตอบได้โดยใช้วิธีการแบบ Deterministic แต่ภายในเวลาที่ไม่ใช่เป็นฟังก์ชันพหุนาม เช่น ฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล

อย่างไรก็ตามกลุ่มปัญหา P-Problem จัดได้ว่าเป็นหนึ่งในประเภทของปัญหาของกลุ่ม NP-Problem เนื่องจากเป็นปัญหาที่ไม่ยาก จึงสามารถใช้ได้ทั้งวิธีแบบ Deterministic และวิธีการแบบ Non - Deterministic ในการแก้ปัญหา

สำหรับปัญหาการวางผังเครื่องจักร (Machine Layout Problem: MLP) ที่ผู้ดำเนินการวิจัยนั้นเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยจัดว่าเป็นปัญหา NP Hard กล่าวคือจำนวนคำตอบที่เป็นไปไดและเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียล อธิบายได้ดังต่อไปนี้ หากให้ n แทนจำนวนเครื่องจักรที่ต้องการจัดเรียงจำนวนรูปแบบของการจัดเรียงที่เป็นไปไดทั้งหมดจะเท่ากับ $n!$ วิธี

ตาราง 1 จำนวนวิธีที่เป็นไปไดทั้งหมดในการจัดเรียงเครื่องจักร

ชุดข้อมูล	จำนวนเครื่องจักร (เครื่อง)	จำนวนวิธีที่เป็นไปไดทั้งหมดในการจัดเรียง (วิธี)
1	3	6
2	5	120
3	7	5,040
4	10	3,628,800
5	15	1,307,674,368,000
6	30	มากกว่า 2.5×10^{32}

วิวัฒนาการของการวางผัง (Layout evolution)

ความยืดหยุ่นของระบบการผลิตนั้นเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนการวางผังเสมอ เพราะหากระบบการผลิตไม่สามารถตอบสนองต่อยอดความต้องการของผลิตภัณฑ์ได้ในเวลาที่กำหนดจะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น ทั้งนี้ปริมาณความต้องการของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากลูกค้า สามารถส่งผลกระทบต่อรูปแบบและประเภทของผังการผลิต เพราะผังการผลิตต้องมีความเหมาะสมต่อปริมาณและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผลิต หากเราพิจารณาความผันแปรของความต้องการผลิตภัณฑ์ตามช่วงเวลา สามารถแยกลักษณะของปริมาณความต้องการของผลิตภัณฑ์ได้ 2 กลุ่ม คือ ปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความแน่นอน (Static) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา และ ปริมาณความต้องการที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic) ที่มีความไม่แน่นอนมาเกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงความต้องการที่จะเกิดขึ้นจะส่งผลต่อแผนการผลิต ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อทั้งระบบการผลิต และระบบสนับสนุนการผลิต (ศรีสัจจา วิทยศักดิ์, 2559)

ผังการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อความไม่แน่นอนของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลาต่าง ๆ ได้นั้น นั้นเราเรียกว่า แผนผังแบบพลวัต (Dynamic layout) โดยผังชนิดนี้เป็นผังที่มีความยืดหยุ่นกว่าแผนผังแบบสถิต (Static layout) เพราะในขั้นตอนการออกแบบได้คำนึงถึงการปรับเปลี่ยนไปของทั้งปริมาณผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนของชนิดผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา ในทางกลับกันผังการผลิตแบบ (Static layout) เป็นผังการผลิตที่ไม่เหมาะสมต่อปริมาณความต้องการที่ไม่คงที่ เพราะในขั้นตอนการออกแบบนั้นไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา (ปกรณ ศรีอัมพรศานต์, 2557)

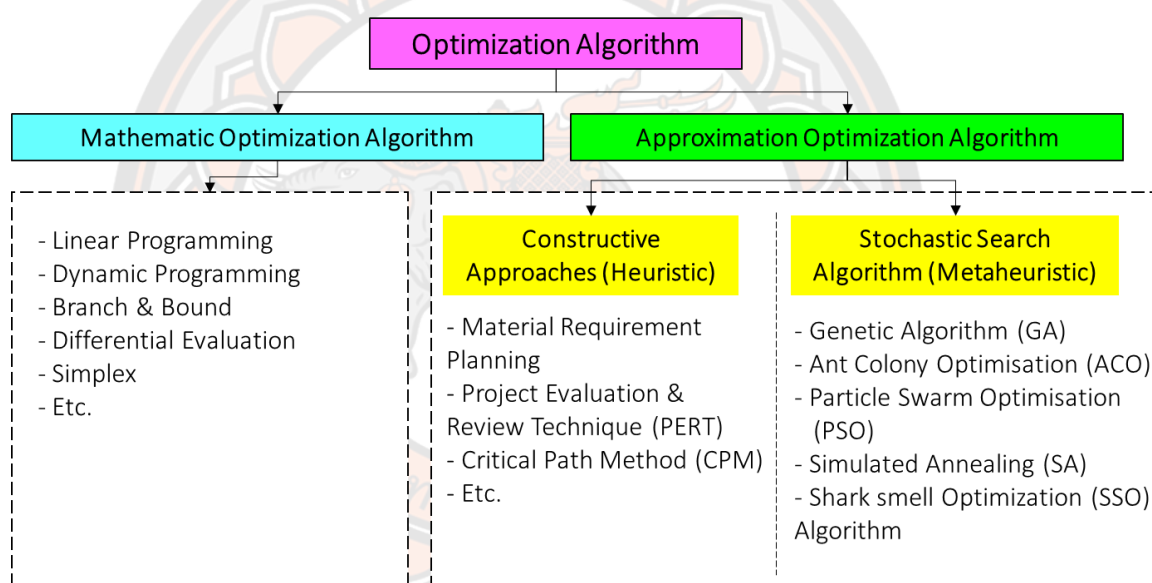


ภาพ 3 การจำลองการวางผังแบบสถิต และแบบพลวัต

ที่มา: ปรับปรุงจาก ปกรณ ศรีอัมพรศานต์ (2557)

วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimisation algorithm)

วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ (Conventional Optimisation Algorithms: COAs) และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่า (Approximation Optimisation Algorithms: AOAs) (P. Pongcharoen et al., 2001) แสดงดังภาพ 4 โดยที่ปัญหาที่ถูกนำมาแก้ไขนั้นมักจะเกี่ยวข้องกับการค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) คุณภาพของของผลเฉลยที่ได้วัดจากฟังก์ชันเป้าประสงค์ (Objective function) โดยผลเฉลยที่หามาได้ต้องไม่ละเมิดเงื่อนไขข้อจำกัด (Constraints) ที่ได้ตั้งไว้



ภาพ 4 วิธีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

ที่มา: ปรับปรุงจาก Pongcharoen et al. (2001)

1. วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์

วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ เป็นหลักการแก้ปัญหาโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์โดยผลของการหาคำตอบของวิธีดังกล่าวนี้จะได้ผลลัพธ์ที่เป็นค่าที่ดีที่สุดเสมอ ทั้งนี้หลักการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่มีขั้นตอนการแก้ปัญหา ตัวแปร และสมการทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน เช่น วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น

(Linear Programming: LP) วิธีการโปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic Programming: DP) วิธีการขยายและจำกัดเขต (Branch and Bound) เป็นต้น วิธีการหาคำตอบที่ได้กล่าวมานี้จะไม่เหมาะกับปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงและ/หรือมีข้อจำกัดมาก เช่น ปัญหาที่ถูกจัดอยู่ในหมวดของ NP-Hard ไม่ว่าจะเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ปัญหาการจัดเรียงตัวของเครื่องจักร ปัญหาการจัดตาราง เนื่องจากวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์นี้จะมีกฎเกณฑ์ในการค้นหาคำตอบที่ตายตัวทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการหาคำตอบและมักใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบยาวนานถึงแม้ว่าจะสุดท้ายแล้วได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดก็ตาม

2. วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่า

วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่า เป็นวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักการประมาณค่าเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนและ/หรือปัญหาที่มีขนาดใหญ่โดยค่าคำตอบที่ได้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดโดยที่ใช้เวลาในการหาคำตอบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการหาคำตอบแบบมีโครงสร้างในการค้นหาคำตอบ (Constructive Approach) และ วิธีการค้นหาคำตอบเชิงสุ่ม (Stochastic Search Algorithm)

2.1 วิธีการหาคำตอบแบบมีโครงสร้างในการหาคำตอบ (Constructive Approach) หรือ ฮิวริสติกส์ (Heuristics) ซึ่งวิธีนี้มีรูปแบบเฉพาะในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาใดปัญหาหนึ่ง เช่น วิธีการเส้นทางวิกฤติ (Critical Path Method) การวางแผนความต้องการวัสดุ (Material Requirement Planning) เป็นต้น

2.2 วิธีการค้นหาคำตอบเชิงสุ่ม (Stochastic Search Algorithm) หรือ เมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) ลักษณะของกลไกในการทำงานของวิธีการค้นหาคำตอบในรูปแบบนี้จะเป็นแบบสุ่ม (Stochastic search) และมีลักษณะการทำงานเพื่อค้นหาคำตอบที่เป็นการวนซ้ำ (Iterative) เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุด ณ บริเวณพื้นที่การค้นหาแรกเริ่ม โดยมักจะมีกลไกที่ใช้หลีกเลี่ยงการติดอยู่ในพื้นที่ค้นหาคำตอบเดิมไปยังพื้นที่คำตอบใหม่เพื่อพัฒนาคำตอบให้ที่ดีขึ้นจนได้มาซึ่งคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Near optimum solution) ซึ่งกลไกที่ว่านี้จะดำเนินไป จนกระทั่งถึงเงื่อนไขหรือข้อจำกัดที่ทำให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ ตัวอย่างของวิธีการค้นหาคำตอบในลักษณะนี้ (Pongpong Pongcharoen & Hicks, 2004) เช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) วิธีการ

ค้นหาต้องห้าม (Tabu Search) วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network: NN) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO) วิธีการแบบมด (Ant Colony Optimisation: ACO) วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimisation: BBO) วิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Shark Smell Optimisation: SSO) เป็นต้น ซึ่งวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่าเป็นวิธีการเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีเงื่อนไขข้อจำกัด ข้อบังคับมาก ยกตัวอย่าง เช่น ปัญหาที่ถูกจัดอยู่ในหมวด NP-Hard ไม่ว่าจะเป็นปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร ปัญหาการจัดตาราง เป็นต้น โดยค่าคำตอบที่ได้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดโดยที่ใช้เวลาในการหาคำตอบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (สายสัมพันธ์ ชุณ เจริญ, 2558)

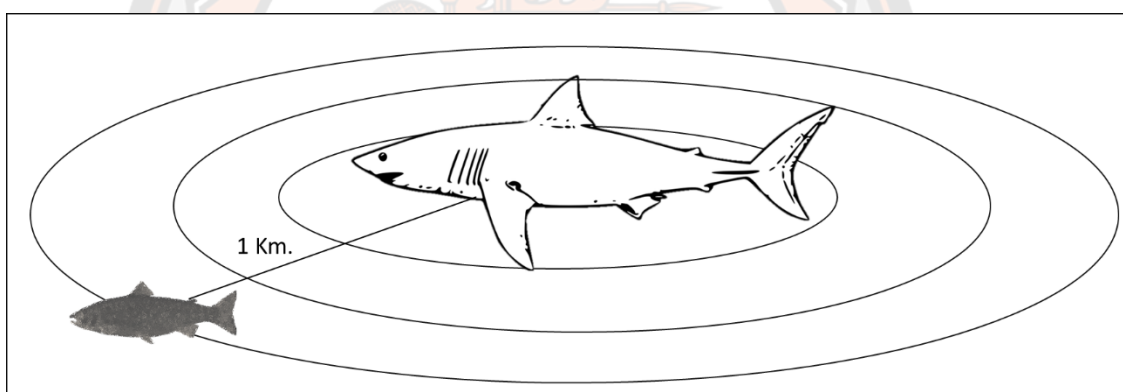
การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม Shark Smell Optimisation (SSO)

วิธีการดมกลิ่นของฉลามเป็นวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด วิธีดังกล่าวถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 2014 โดย Oveis Abedinia และคณะ วิธีการนี้ได้รับแรงบันดาลใจมาจาก ความสามารถในการค้นหาเหยื่อในกระบวนการหาอาหารของฉลาม ในธรรมชาติฉลามจัดว่าเป็นนักล่าที่เก่งกาจเนื่องจากความสามารถในการรับกลิ่นของเหยื่อที่ดีเยี่ยม แม้นเพียงได้กลิ่นที่เจือจางของเหยื่อในน้ำ ฉลามสามารถระบุตำแหน่งของเหยื่อได้อย่างแม่นยำ และเคลื่อนที่ไปในทิศทางบริเวณที่เหยื่ออยู่เพื่อทำการล่าได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลามจะคล้ายคลึงกับวิธีการที่ลอกเลียนแบบความฉลาดจากธรรมชาติในรูปแบบอื่น ๆ แต่ก็มีกลไกและกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แตกต่างและเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวซึ่งมีขั้นตอนในการหาคำตอบหลัก ๆ 2 ขั้นตอนคือ การค้นหาอนุภาคของกลิ่นในตอนเริ่มต้น (Finding initial odor particles) และขั้นตอนที่ 2 คือ การเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อของฉลาม (Shark movement toward the prey) ดังสามารถอธิบายได้โดยละเอียดตามหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

1. การคิดค้น และแรงบันดาลใจ

สิ่งมีชีวิตที่อยู่รอดมาจนถึงปัจจุบันซึ่งเราสามารถพบเห็นได้นั้น ล้วนแต่เป็นสายพันธุ์ที่ถูกคัดเลือกแล้วโดยธรรมชาติ ซึ่งหนึ่งในความสามารถที่สำคัญต่อการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะในสัตว์ คือ ความสามารถในการหาอาหาร ในบางสภาพแวดล้อมอาหารนั้นเป็นสิ่งที่หายากยิ่ง สิ่งมีชีวิตที่อาศัยนั้นจึงต้องปรับตัวเพื่อความอยู่รอด

เมื่อพูดถึงนักล่าในธรรมชาติ ฉลามถูกจัดว่าเป็นหนึ่งในผู้ล่ายอดเยี่ยมลำดับต้น ๆ ด้วยเหตุที่ว่าฉลามนั้นสามารถค้นหาเหยื่อได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำด้วยประสาทรับกลิ่น โดยหน่วยรับกลิ่นจะอยู่บริเวณโพรงจมูกด้านข้างของหัว ซึ่งจะมีช่องผ่านให้น้ำที่นำพากลิ่นสามารถเข้าและออกเมื่อตัวปลาเคลื่อนที่ที่จะทำให้น้ำผ่านเข้าออกในโพรงจมูกโดยภายในจะมีเซลล์ขนประสาทซึ่งจะทำหน้าที่รับกลิ่นที่มาในรูปแบบของสารเคมีโดยระบบรับกลิ่นของปลานั้นจะเชื่อมต่อโดยตรงเข้าสู่สมอง กล่าวคือ แรงกระตุ้นกลิ่นนั้นจะตรวจจับได้ด้วยป่องรับกลิ่น (Olfactory bulb) หรืออวัยวะส่วนหน้าของสมอง ด้วยพื้นผิวของหลุมรับกลิ่น (Olfactory pits) ที่กว้าง และศูนย์รับกลิ่นของสมองที่ใหญ่ ทำให้ประสาทรับกลิ่นของปลานั้นแข็งแรง โดยฉลามนั้นเป็นสัตว์ที่มีป่องรับกลิ่น (Olfactory bulb) ใหญ่ที่สุดในบรรดาสัตว์น้ำทำให้ฉลามนั้นสามารถรับกลิ่นของเหยื่อได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดย Abedinia et al. (2014) ได้กล่าวไว้ว่าฉลามสามารถตรวจจับเลือดหนึ่งหยดจากเหยื่อที่ได้รับบาดเจ็บได้ไกลถึง หนึ่งกิโลเมตร



ภาพ 5 ระยะการตรวจจับเหยื่อของฉลาม

ที่มา: ปรับปรุงจาก Abedinia and Amjady (2015)

ดังที่กล่าวมาประสาทรับกลิ่นของฉลามเปรียบเสมือนกับระบบนำทางเพื่อเข้าหาเหยื่อ กลไกที่ช่วยให้ฉลามตรวจจับทิศทางของเหยื่อได้นั้นคือทิศทางของกลิ่นที่เข้าสู่หลุมรับกลิ่น (Olfactory pit) หากกลิ่นมาจากทางซ้าย ซึ่งอนุภาคของกลิ่นจะเข้าสู่หลุมรับกลิ่นทางซ้ายก่อนเข้าสู่ทางขวา ทำให้ฉลามรับรู้ได้ถึงทิศทางของเหยื่อและกลิ่นจะยิ่งชัดเจนขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อฉลามเคลื่อนที่เข้าใกล้ตัวเหยื่อ กลไกนี้เองที่ทำให้ฉลามสามารถเข้าหาเหยื่อได้อย่างแม่นยำ ซึ่งนี่เป็นแนวคิดที่สำคัญที่ใช้เป็นแรงบันดาลใจในการสร้าง วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม เพื่อค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

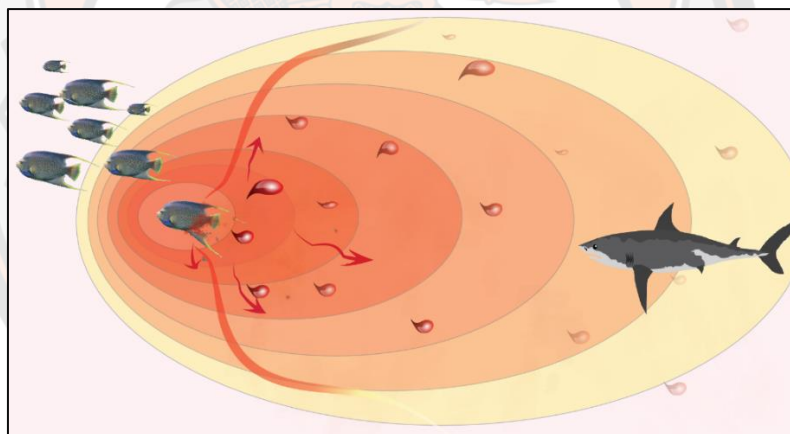
2. ข้อสันนิษฐาน ที่ถูกใช้ในการสร้างวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม

โดย Bozorg-Haddad (2018) ได้สรุปว่า ข้อสันนิษฐานจากผู้คิดค้นวิธีการดมกลิ่นแบบฉลามมีทั้งหมด 3 ข้อดังต่อไปนี้

2.1 กรณีที่พิจารณาเหยื่อที่บาดเจ็บจะปล่อยหยดเลือดลงในน้ำ เปรียบได้กับขอบเขตพื้นที่การค้นหา (Search space) เมื่อจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของเหยื่อที่บาดเจ็บเทียบกับฉลามที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วแล้ว เปรียบเสมือนว่าเหยื่อนั้นไม่เคลื่อนที่

2.2 เลือดที่ไหลออกจากตัวเหยื่อนั้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง อนุภาคของกลิ่นไม่ได้รับผลกระทบจากการไหลของน้ำ กลิ่นของเหยื่อจะยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่อเข้าใกล้ตัวเหยื่อ ดังนั้นแล้วการที่ฉลามติดตามอนุภาคของกลิ่น จะช่วยให้ฉลามเคลื่อนเข้าหาตัวเหยื่อ

2.3 ให้เหยื่อที่ได้รับบาดเจ็บ 1 ตัวสามารถเป็นแหล่งกำเนิดของกลิ่นได้เพียง 1 จุดเท่านั้น
Abedinia et al. (2014)



ภาพ 6 การเคลื่อนที่ของฉลามเข้าหาเหยื่อ

ที่มา: ปรับปรุงจาก Abedinia and Amjady (2015)

จากแนวคิดและข้อสันนิษฐานดังกล่าวถูกประยุกต์ได้เป็นวิธีการค้นหาคำตอบ โดยมีกลไกในการค้นหาคำตอบ 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การค้นหาอนุภาคของกลิ่นในตอนเริ่มต้น (Finding initial odor particles) ซึ่งเปรียบเสมือนการสร้างกลุ่มของประชากรเริ่มต้น และขั้นตอนที่ 2 คือ การเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อของฉลาม (Shark movement toward the prey) ซึ่งเปรียบเสมือนการเคลื่อนที่ของฉลามไปยังตำแหน่งที่คาดว่าจะพบเจอเหยื่อที่บาดเจ็บ อันหนึ่งว่าเป็นการย้ายพื้นที่ที่ทำการค้นหา เพื่อเริ่มกระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ อันจะนำมาซึ่งคำตอบที่ดีขึ้น

3. การสร้างวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและกลไกในการหาคำตอบของ อัลกอริทึมตลอดจนสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกสร้างจากแรงบันดาลใจ ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา กระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวิธีการดมกลิ่นของฉลามนั้นมีทั้งสิ้น 2 กระบวนการ (Abedinia et al., 2014) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การค้นหาอนุภาคของกลิ่นในตอนเริ่มต้น (Finding initial odor particles)

กระบวนการค้นหาอนุภาคนั้นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อฉลามเริ่มได้กลิ่นของเหยื่อที่บาดเจ็บเสียก่อนซึ่งเปรียบเสมือนการสร้างกลุ่มประชากรคำตอบเริ่มต้น โดยใช้แนวคิดจากการที่ฉลามจะค้นหาเหยื่อได้เจอนั้นฉลามต้องเข้าไปใกล้ภายในรัศมีระยะการตรวจจับกลิ่นเลือดคือ 1 กิโลเมตรจากเหยื่อที่บาดเจ็บ ดังนั้นการค้นหาอนุภาคกลิ่นเริ่มต้นนั้น คล้ายคลึงกับการคาดการณ์ว่าฉลามจะสามารถพบกลิ่นของเหยื่อได้ ณ ตำแหน่งใดบ้างในรัศมีการค้นหา แล้วจึงสร้างกลุ่มประชากรขึ้นโดยกลุ่มประชากรที่ว่านี้คือ กลุ่มประชากรของฉลาม ณ ตำแหน่งกลิ่นเริ่มต้นนั่นเอง โดย Abedinia et al. (2014) ได้กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของกลุ่มประชากรฉลามในรูปแบบเมทริกซ์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (1)

$$[X_1^1, X_2^1, X_3^1, \dots, X_{NP}^1] \quad (1)$$

โดยที่

X_1^1 คือ ตำแหน่งของประชากรฉลามเริ่มต้น ณ รอบการค้นหาคำตอบเริ่มต้น
โดย $i = 1, 2, 3, \dots, NP$

NP คือ ขนาดของกลุ่มประชากร

จากสมการที่ (1) สามารถยกตัวอย่างเพื่ออธิบายได้ว่า หากเป็นรอบเริ่มต้นกระบวนการค้นหาคำตอบซ้ำครั้งแรกกำหนดให้ $k = 1$ โดยกำหนดให้จำนวนประชากรฉลาม $NP = 4$ จะได้สมาชิกฉลามทั้งหมดคือ X_1^1, X_2^1, X_3^1 และ X_4^1 ฉลามตัวที่ 1, 2, 3, 4 ตามลำดับ

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นโดย ฉลาม 1 ตัว คือคำตอบ (Solution) 1 คำตอบ ดังนั้นคำตอบเริ่มต้นจึงมีทั้งหมด 4 คำตอบ

Abedinia et al. (2014) ได้กล่าวไว้ว่าฉลามแต่ละตัวนั้น ย่อมมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบกับการค้นหาคำตอบ ลักษณะเฉพาะเหล่านั้นก็เปรียบเสมือนตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งเป็นสิ่งทำให้คำตอบนั้น ๆ แตกต่าง โดยสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2) (Abedinia et al., 2014)

$$X_i^1 = X_{i,1}^1, X_{i,2}^1, X_{i,3}^1, \dots, X_{i,ND}^1 \quad (2)$$

โดยที่

X_i^1 คือ ตำแหน่งของประชากรฉลามเริ่มต้น ณ รอบการค้นหาคำตอบเริ่มต้น

โดย $i = 1, 2, 3, \dots, NP$

$X_{i,j}^1$ คือ ตัวแปรตัดสินใจลำดับที่ j ของคำตอบ ณ รอบการค้นหาคำตอบเริ่มต้น

โดย $i = 1, 2, 3, \dots, NP, j = 1, 2, 3, \dots, ND$

NP คือ ขนาดของกลุ่มประชากร

ND คือ จำนวนของตัวแปรตัดสินใจ

ซึ่งจากสมการ (2) สามารถอธิบายได้ว่า คำตอบ X_i^1 มีตัวแปรตัดสินใจซึ่งเข้ารหัสได้คือ $X_{i,j}^1$ หากมองว่า X_i^1 เป็นคำตอบที่เป็นชื่อของเซต ดังนั้นแล้ว สมาชิกภายในเซตทั้งหมดคือ $X_{i,1}^1, X_{i,2}^1, X_{i,3}^1, \dots, X_{i,ND}^1$ ซึ่งสมาชิก (ตัวแปรตัดสินใจ) ที่อยู่ภายใต้เซตคำตอบเหล่านี้เองที่ทำให้เกิดลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันในแต่ละคำตอบ

3.2 การเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อของฉลาม (Shark movement toward the prey)

การเคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อนั้นจะถูกพิจารณาจากความเร็วของฉลามที่คำนวณได้ ดังนั้นแล้ว ก่อนการเคลื่อนที่ของฉลามจะเกิดขึ้น ต้องทำการคำนวณความเร็วของฉลาม ณ ตำแหน่งปัจจุบันเสียก่อน โดยเมื่อกล่าวถึงการเคลื่อนที่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และทิศทางในการเคลื่อนที่ ทั้งนี้ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของฉลามจะขึ้นกับความเข้มข้นของกลิ่นที่พบ กล่าวคือหากกลิ่นเหยื่อ ชัดเจนขึ้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของฉลามจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ทั่วไปแล้วฉลามนั้นจะเคลื่อนที่อยู่เสมอซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่โดยปกติของฉลามมีค่าประมาณ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และสามารถเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วสูงสุดได้จนถึง 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยแนวคิดเหล่านี้ ผู้สร้างได้พัฒนาและสร้างเป็นสมการความเร็วของฉลาม ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (3) (Abedinia et al., 2014)

$$|V_{i,j}^k| = \min \left[\left| \eta_k \cdot R1 \cdot \frac{\partial(OF)}{\partial x_j} \right|_{x_{i,j}^k} + \alpha_k \cdot R2 \cdot V_{i,j}^{k-1} \right], |\beta_k \cdot V_{i,j}^{k-1}|, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, ND, \quad k = 1, \dots, k_{max}$$

โดยที่

$V_{i,j}^k$	คือ ความเร็วของฉลามในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำที่ k
β_k	คือ อัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม โดยมีค่าเป็นจำนวนจริงบวก
η_k	คือ ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
α_k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยหรืออัตราโมเมนตัม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
$R1$	คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
$R2$	คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
OF	คือ สมการของฟังก์ชันเป้าประสงค์
k_{max}	คือ จำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ

ค่าความเร็วที่คำนวณได้นั้นเป็นหนึ่งในกลไกที่สำคัญอย่างมากของกระบวนการหาคำตอบ โดยความเร็วถูกใช้เป็นตัวเปรียบเทียบค่าคำตอบระหว่างทำการปรับปรุงคำตอบ และความเร็วนั้นยังสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพของคำตอบ ยิ่งความเร็วมีค่ามากขึ้นค่าคุณภาพของคำตอบจะยิ่งดีขึ้น อีกทั้งความเร็วยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกใช้กระบวนการปรับปรุงคำตอบ โดยหากความเร็วในรอบปัจจุบันมีค่าน้อย กระบวนการปรับปรุงคำตอบจะถูกบังคับให้เป็นไปแนวทางการปรับปรุงคำตอบการสำรวจ (Exploration) ในทางตรงกันข้ามแนวทางการปรับปรุงคำตอบจะเป็นแบบ (Exploitation) หากมีค่าความเร็วที่สูง

เมื่อได้ความเร็วของฉลาม ณ ตำแหน่งปัจจุบันแล้วขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณหาตำแหน่งใหม่ของฉลามที่เกิดจากการเคลื่อนที่ หรือเราเรียกกระบวนการนี้ว่า การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของฉลาม (Forward movement) ซึ่งคำนวณดังสมการ (4) (Abedinia et al., 2014)

$$Y_i^{k+1} = X_i^k + V_i^k \cdot \Delta t_k \quad (4)$$

Y_i^{k+1}	คือ ตำแหน่งใหม่ของฉลามที่เคลื่อนที่ไปของฉลาม
X_i^k	คือ ตำแหน่งของประชากรฉลามเริ่มต้น ณ รอบการค้นหาคำตอบ
V_i^k	คือ ความเร็วของฉลามในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำที่ k
Δt_k	คือ ตัวระบุช่วงเวลาของรอบการทำซ้ำที่ k

ที่ทั้งนี้ฉลามนั้นมีกลไกที่น่าสนใจที่ช่วยในการค้นหาอนุภาคกลืน เรียกว่าเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotational movement) โดยจุดประสงค์ของการเคลื่อนที่ คือเพื่อค้นหาถิ่นที่อยู่บริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งกระบวนการนี้เปรียบเสมือนการค้นหาคำตอบอื่น ๆ ในพื้นที่บริเวณใกล้เคียง โดยการคำนวณการเคลื่อนที่แบบหมุนของฉลาม แสดงได้ดังสมการ (5) (Abedinia et al., 2014)

$$Z_i^{k+1,m} = Y_i^{k+1} + R3 \cdot V_i^k \quad (5)$$

$$m = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, k_{max}$$

$Z_i^{k+1,m}$ คือ ตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการเคลื่อนที่แบบหมุนของฉลาม
 Y_i^{k+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของฉลามที่เคลื่อนที่ไปของฉลาม
 V_i^k คือ ความเร็วของฉลามในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำที่ k
 $R3$ คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[-1,1]$
 M คือ จำนวนสูงสุดของจุดหมุนวน ที่ฉลามต้องเคลื่อนที่ไป
 m คือ จุดหมุนวนของฉลามในปัจจุบัน

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเคลื่อนที่ของฉลามทั้งสองกระบวนการ โดยฉลามได้ทำการเคลื่อนที่ไปแล้วถึงสองครั้งคือ เคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเคลื่อนที่แบบหมุน จนถึงตอนนี้ฉลามได้รับรู้แล้วว่าตรงจุดไหนที่จะสามารถพบเจออนุภาคกลืนที่ชัดเจนที่สุด เพื่อที่จะเข้าใกล้เหยื่อยิ่งกว่าเดิมฉลามจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้น หากเปรียบกับกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมคือกระบวนการพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดในรอบนั้น ๆ และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในรอบเป็นจุดเริ่มต้นกระบวนการค้นหาใหม่ในรอบถัดไป โดยสมการการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันเพื่อใช้เป็นคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป สามารถแสดงได้ดังสมการ (6) (Abedinia et al., 2014)

$$X_i^{k+1} = \arg \max \{Y_i^{k+1}, OF(Z_i^{k+1,M})\} \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, NP, \quad m = 1, \dots, M$$

$Z_i^{k+1,M}$ คือ ตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการเคลื่อนที่แบบหมุนของฉลาม
 Y_i^{k+1} คือ ตำแหน่งใหม่ของฉลามที่เคลื่อนที่ไปของฉลาม
 X_i^{k+1} คือ ตำแหน่งของประชากรฉลามเริ่มต้น ในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำถัดไป

ตาราง 2 ขั้นตอนของวิธีหาคำตอบเมื่อเทียบกับพฤติกรรม หรือเหตุการณ์ที่เลียนแบบ

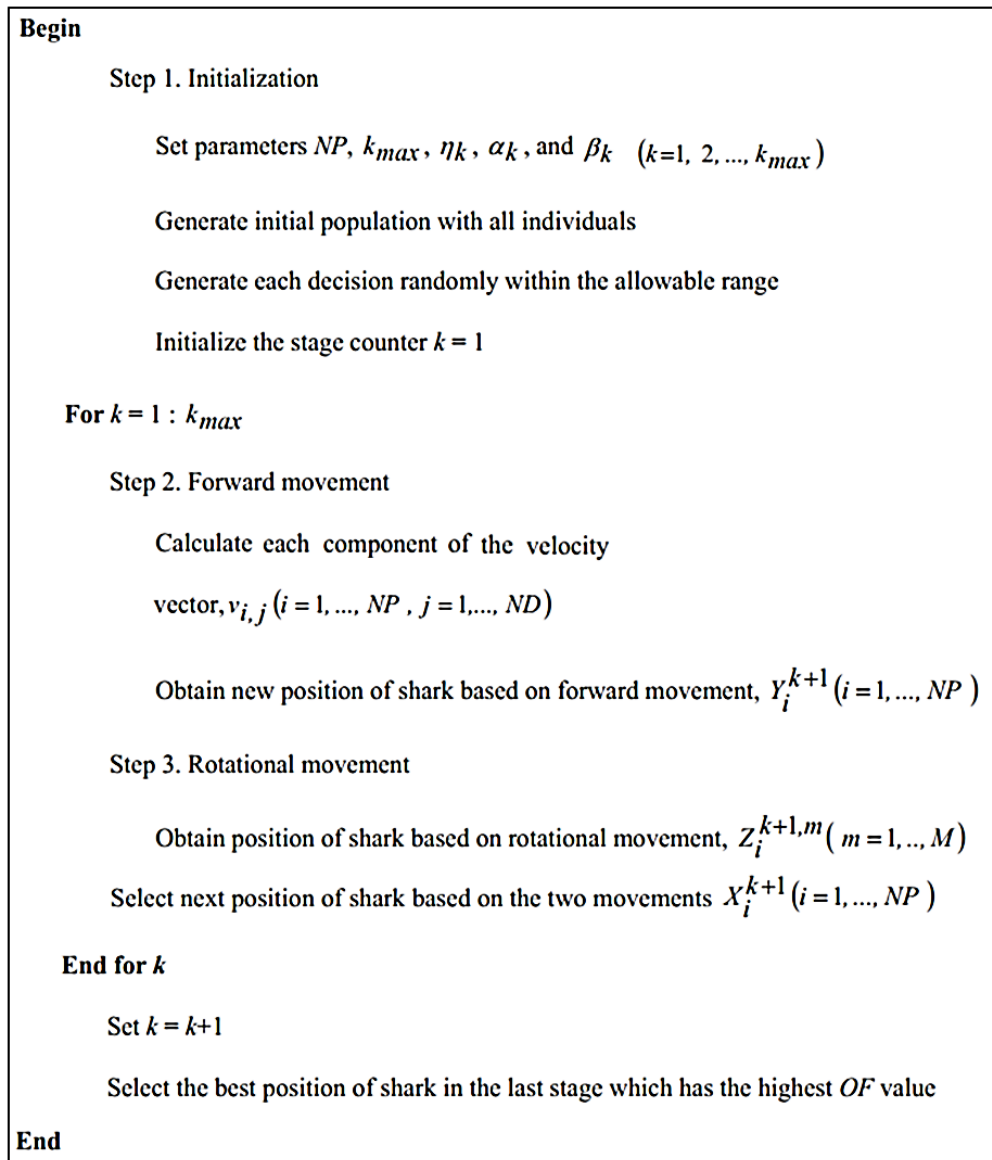
General algorithm	Shark Smell Optimisation Algorithms
Decision Variable	Odor particle which shows possible position of shark
Solution	Odor intensity
Old Solution	Old position of shark
New Solution	New position of shark
Best Solution	Position of shark with the best fitness function
Fitness Function	Odor particle intensity which represents the closer position of shark to prey
Initial Solution	Randomly generated position of shark
Selection	Select shark's position based on the forward and rotational movements
Process of Generating New Solution	Forward movement and rotational movement

ที่มา: Bozorg-Haddad (2018)

4. รหัสเทียมของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Pseudo – code of SSO)

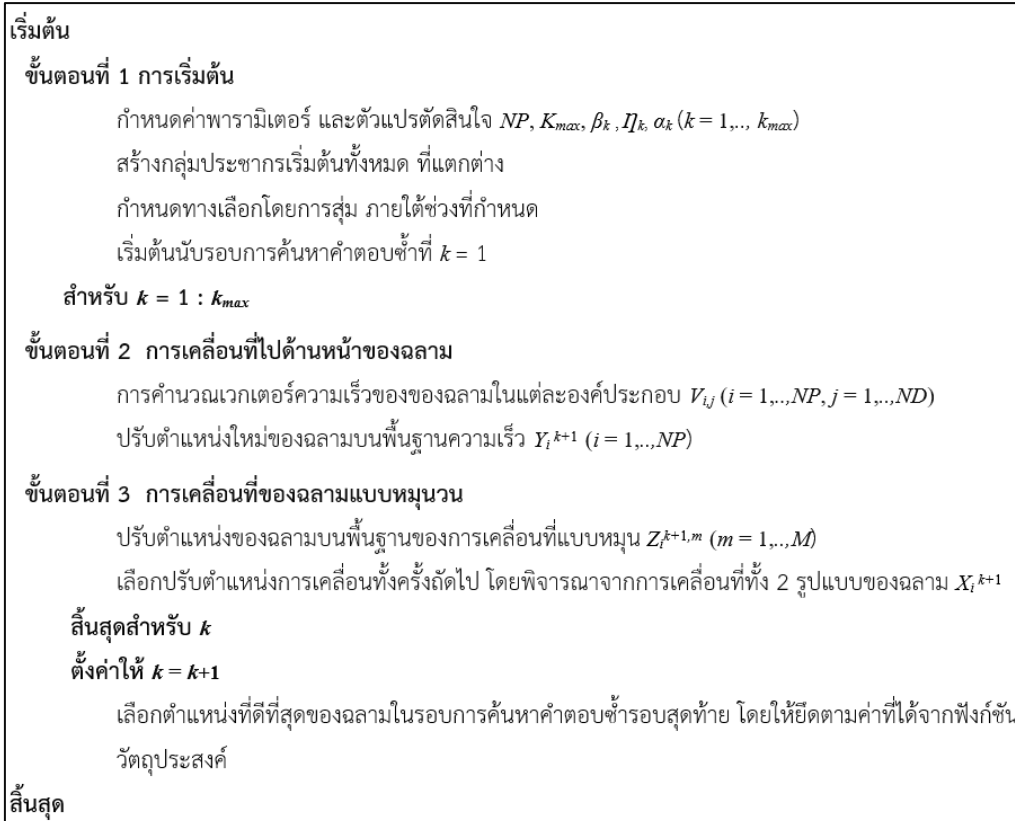
รหัสเทียมฉบับดั้งเดิมของวิธีหาคำตอบ มีทั้งหมด 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนแรกคือการเริ่มต้นสร้างกลุ่มประชากรซึ่งใช้เป็นกลุ่มของคำตอบ โดยในแต่ละคำตอบมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน ทั้งนี้แต่ละคำตอบที่แตกต่างกันนั้นเปรียบเสมือนฉลามที่มีลักษณะแตกต่างกัน และกลุ่มประชากรที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นนั้นก็คือ กลุ่มประชากรของฉลาม ขั้นตอนที่ 2 คือการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของฉลาม ซึ่งเป็นขั้นตอนการค้นหาคำตอบเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบใหม่ โดยเปรียบกับการที่ฉลามแต่ละตัวเคลื่อนที่ย้ายตำแหน่งจากจุดเดิมไปยังจุดค้นหาแห่งใหม่ด้วยความเร็ว โดยสมการความเร็วของฉลามถูกคำนวณได้จากสมการ (3) ขั้นตอนที่ 3 คือการเคลื่อนที่แบบหมุนของฉลาม ซึ่งเป็นขั้นตอนการค้นหาคำตอบใหม่เพิ่มเติม หรือเป็นการทำการค้นหาคำตอบบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง คำตอบแห่งใหม่ที่ฉลามเคลื่อนที่ไปถึงจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งท้ายสุดของขั้นตอนที่ 3 จะได้

คำตอบที่แตกต่างกัน เพื่อเลือกตำแหน่งของฉลามในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำต่อไป จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 และ 3 โดยรหัสเทียมแสดงดังภาพ 7 และ ภาพ 8



ภาพ 7 รหัสเทียมของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิม

ที่มา: Bozorg-Haddad (2018)



ภาพ 8 รหัสเทียมของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิม
ฉบับแปลภาษาไทย

ที่มา: Bozorg-Haddad (2018)

ภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual Basic for Application (VBA)

ภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นภาษาที่ถูกประดิษฐ์คิดค้นขึ้นเพื่อการสื่อสารชุดคำสั่งแก่เครื่องจักร ภาษาดังกล่าวถูกใช้เขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการ และ/หรือ ควบคุมเครื่องจักรให้เป็นไปตามประสงค์ของผู้เขียนโปรแกรมนั้น ๆ ภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual Basic for Application เป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นภายใต้ชุดคำสั่งของโปรแกรมหลักไมโครซอฟท์เอกเซลล์ โดยใช้โครงสร้างของภาษา Visual Basic ซึ่งลักษณะของภาษาเป็นแบบสคริปต์ (Script) ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน โดยทางภาษาไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการคอมไพล์ (Compile) ในส่วนของซอร์สโค้ด (Sources code) ให้เป็นภาษาของเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงทำให้เป็นหนึ่งในภาษาที่มีประสิทธิภาพในการประมวลผลเมื่อเทียบกับบางภาษา ที่ต้องผ่านกระบวนการคอมไพล์ซอร์สโค้ดก่อนการประมวลผลคำสั่ง โดยการทำงานของชุดคำสั่งที่เขียนจะเป็นการทำงานแบบคำสั่งต่อ

คำสั่ง โดยเขียนชุดคำสั่งผ่านโปรแกรมที่เรียกว่า Visual Basic Editor (VBE) โดยการเรียกใช้คำสั่ง การทดสอบคำสั่ง ตลอดจนการแก้จุดบกพร่องนั้น สามารถดำเนินการได้ผ่านโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ (สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ, 2563)

การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

การออกแบบการทดลองนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทดลอง อีกทั้งยังมีผลต่อความน่าเชื่อถือของงานวิจัยอีกด้วย เนื่องจากการทำการทดลองนั้นเราต้องทราบถึงผลกระทบจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองที่กำลังดำเนินการ ดังนั้นแล้วเราจึงต้องทำการออกแบบการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ให้ครบถ้วนโดยการวิเคราะห์ทางสถิติของผลลัพธ์ที่ได้มาจากการทดลองนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญด้วยเช่นกัน เนื่องจากหากไม่มีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแล้วผลสรุปที่ได้อาจขาดความน่าเชื่อถือ ดังนั้นก่อนทำการทดลองควรต้องออกแบบการทดลอง และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติเพื่อหาข้อสรุปของผลการทดลอง ซึ่งขั้นตอนการออกแบบการทดลอง สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การออกแบบการทดลองนั้นมักถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะการทดลองหนึ่งใด ที่มีวัตถุประสงค์เป็นการสืบทราบค่าข้อมูลที่ผู้ทำการทดลองต้องการทราบจากการทดลองนั้น โดยปกติแล้วการทดลองจะนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการอันจะนำเปลี่ยนปัจจัยให้เป็นในรูปแบบผลลัพธ์หรือผลตอบสนองให้ออกมาในรูปแบบที่ผู้ดำเนินการทดลองต้องการมากที่สุด

ดังที่ได้กล่าวมานี้สรุปได้ว่า การออกแบบการทดลอง คือ การทดลองเพียงครั้งเดียว หรือการทดสอบที่กระทำต่อเนื่องกันไป โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรนำเข้า (Input variable) ภายในระบบหรือกระบวนการที่กำลังทำการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเกตและระบุสาเหตุของตัวแปรนำเข้าอันมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือค่าตอบสนอง (Output หรือ Responses) ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งตัวแปรนำเข้าที่ได้จากการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factors) และตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors) (Montgomery, 2001)

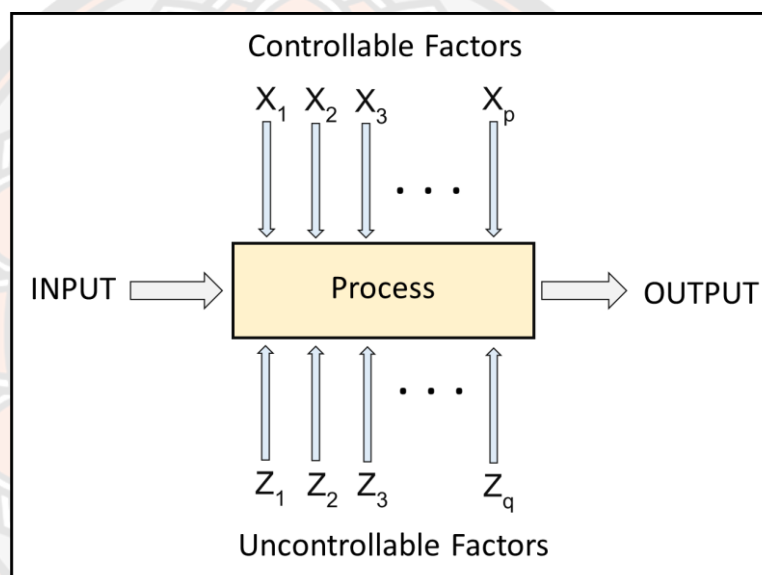
โดยปัจจัยการแปรผัน $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ในกระบวนการ และ $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_q$ เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยทำการทดลองเพื่ออธิบายประเด็นต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับ 4 ประเด็นหลัก ดังต่อไปนี้

1.1 การทดลองเพื่ออธิบายถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าผลลัพธ์หรือค่าตอบสนอง y ของกระบวนการทดลอง

1.2 การทดลองเพื่ออธิบายการกำหนดค่าตัวแปร x ที่มีผลกระทบต่อค่าของผลลัพธ์หรือค่าตอบสนองของตัวแปร y ที่ทำให้ค่าของ y อยู่ในช่วงค่าตอบที่ต้องการ

1.3 การทดลองเพื่ออธิบายถึงการกำหนดค่าตัวแปร x ที่มีอิทธิพลต่อค่าผลลัพธ์หรือค่าตอบสนอง y ที่ทำให้ค่าของ y มีค่าน้อย

1.4 การทดลองเพื่อทำการสืบหาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลกระทบต่อค่าตัวแปร y เพื่อให้ผลกระทบจากตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้มีย่านน้อยที่สุด



ภาพ 9 ปัจจัยต่างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทดลอง

ที่มา: Montgomery, 2001

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงความเป็นไปได้ของทุก ๆ ระดับ (Level) ของปัจจัย (Factor) การทดลองทั้งหมดที่มีความเป็นไปได้โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีได้แก่

2.1 กรณีการทดลองมีปัจจัยที่สนใจ 2 ปัจจัย

การทดลองที่ประกอบด้วยปัจจัย A และปัจจัย B โดยที่ระดับของแต่ละปัจจัยมีค่าเท่ากับ a และ b ระดับตามลำดับ ดังนั้นการทำซ้ำใน 1 รีพลิเคท (Replicate) ซึ่งมีจำนวนของการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ จำนวนการทดลอง

2.2 กรณีที่มีปัจจัยในการทดลองมากกว่า 2 ปัจจัย

การทดลองที่ประกอบด้วยปัจจัย A, B, C, ..., N ปัจจัยโดยที่ปัจจัยในแต่ละระดับมีค่า a, b, c, ..., n ระดับตามลำดับ ดังนั้นการทำซ้ำใน 1 เพลกเคชัน (Replication) จะมีจำนวนของการทดลองทั้งหมด $a \times b \times c \times d \times \dots \times n$ การทดลอง

ดังกล่าวแล้วผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้โดยลักษณะของผลกระทบหลัก (Main effect) ซึ่งเป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่าตอบสนองเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยนั้น ๆ และสามารถอธิบายได้ในแต่ละระดับของปัจจัยหนึ่งใดจะขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย

การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมีหลากหลายรูปแบบตามที่กล่าวมานั้นการนำมาประยุกต์ใช้งานจึงจำเป็นต้องเลือกวิธีให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ต้องใช้ในการดำเนินการทดลอง โดยการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปได้แก่ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial experimental design) และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k (3^k Factorial experimental design) ซึ่งในงานวิจัยนี้ Montgomery (2001) ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k มาประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการออกแบบการทดลอง

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เพื่อให้ได้บทสรุปในการทดลองที่น่าเชื่อถือจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยในงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังต่อไปนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variation) แบบ ANOVA และการทดสอบความแตกต่างระหว่างประชากรสองกลุ่ม (Two Groups Differential Test: t -test) มาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถูกใช้ในกรณีที่ต้องการทราบถึงความแปรปรวนที่เกิดขึ้นของค่าตอบสนอง ซึ่งได้จากการทดลอง สามารถทำได้โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการกำหนดปัจจัยการทดลองต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Statistical significance) ซึ่งทราบได้จากการวิเคราะห์อัตราส่วน 2 กรณี Montgomery (2017) ได้แก่ การวิเคราะห์อัตราส่วนของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม และ กรณีการวิเคราะห์อัตราส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นภายในกลุ่ม ซึ่งค่าของความแปรปรวนที่คำนวณได้นั้นถูกเรียกว่าค่าของความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดขึ้นกับการทดลองอันเป็นตัวบ่งบอกได้ถึงผลกระทบหลัก (Main effect) ของแต่ละปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า

ตอบสนอง และการปฏิสัมพันธ์หรือผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ได้อีกด้วย (Montgomery, 2001)

ตัวอย่างการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มีสองปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A และ B โดยในแต่ละปัจจัยประกอบด้วย a และ b ระดับตามลำดับดังนั้นในแต่ละรอบของการทดลองจะมีจำนวนการทดลองรวมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลองมีจำนวนการวนรอบซ้ำในการทำการทดลอง n ครั้งดังนั้นรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยและจะมีการวนรอบซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง โดยกำหนดให้ตัวแปร y_{ijk} คือค่าตอบสนองที่เกิดขึ้นจากระดับที่ i ของปัจจัย A เมื่อ ($i = 1, 2, 3, \dots, a$) และระดับที่ j ของปัจจัย B เมื่อ ($j = 1, 2, 3, \dots, b$) และรอบการทดลองที่ k ; $k = 1, 2, 3, \dots, n$ นั้นสามารถแสดงได้ดังตาราง

ตาราง 3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลกรณีที่มี 2 ปัจจัยการทดลอง

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$	...	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$	...	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	...	...	...	...	...
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$	...	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

ที่มา: Montgomery (2001)

จากตาราง 3 สามารถนำมาเขียนในรูปแบบการจำลองเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ได้ดังสมการ (7)

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

จากสมการ (7) สามารถอธิบายความหมายได้ดังต่อไปนี้ Montgomery (2017)

y_{ijk} = ผลตอบสนองที่สังเกตเห็นได้เมื่อปัจจัย A อยู่ในระดับที่ i และปัจจัย B อยู่ในระดับที่ j ณ รอบการทำการทดลองซ้ำที่ k

μ = ค่าผลกระทบเฉลี่ยรวม (Overall mean effect)

τ_i = ผลกระทบหรืออิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A

β_j = ผลกระทบหรืออิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B

$(\tau\beta)_{ij}$ = ผลกระทบที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่าง τ_i กับ β_j

ε_{ijk} = ผลกระทบที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่าง τ_i กับ β_j

สำหรับรูปแบบของตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลจะประกอบไปด้วย แหล่งความแปรปรวน (Source of variation) ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square: SS) ระดับความอิสระ (Degree of freedom: DF) ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square: MS) และค่าสถิติ (F - Value) ซึ่งแสดงได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 การวิเคราะห์ ANOVA ที่มีปัจจัยการทดลองจำนวน 2 ปัจจัย

Source of Variation	SS	DF	MS	F
Factor A	$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Factor B	$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AB	$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{i..}^2}{abn} - SS_A - SS_B$	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	Ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	$SS_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$	Abn-1		

ที่มา: Montgomery (2017)

ค่าสถิติ F อธิบายถึงอัตราส่วนของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม กับ ความแปรปรวนภายในกลุ่ม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยในแต่ละปัจจัย (MS_A) เมื่อ A คือปัจจัย แล้วจึงนำมหารด้วยค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (MS_E) จะได้ค่าทางสถิติ F เมื่อนำค่าสถิติ F เทียบ

กับตารางทางสถิติจะนำมาซึ่งค่าสถิติ P – Value โดยค่า P – Value ที่บ่งบอกถึงระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะกำหนดค่าความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% ขึ้นไปโดยใช้สัญลักษณ์ α เป็นตัวกำหนดระดับของค่าความเชื่อมั่น โดยค่า P – Value ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือ เท่ากับ 0.05 ถึงจะอยู่ในช่วงของค่าความเชื่อมั่นที่ 95 %

วิธีการทวนสอบความถูกต้อง (Verification) ของเครื่องมือการวางแผนเครื่องจักร และการตรวจสอบการใช้งานได้จริง (Validation) ของตัวแบบจำลอง

การทวนสอบความถูกต้อง (Verification) เป็นการทวนสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนหรือพัฒนาขึ้นเพื่อให้มั่นใจว่าโปรแกรมดังกล่าวสามารถประมวลผลได้จริง โดยผ่านกระบวนการทดสอบต่าง ๆ เช่น การแก้ไขจุดบกพร่อง (Debugging) การดึงข้อมูลเข้าสู่กระบวนการคำนวณ เป็นไปอย่างถูกต้อง สูตรการคำนวณถูกกำหนดได้อย่างถูกต้อง โปรแกรมสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่ผู้สร้างกำหนดขึ้น เป็นต้น (Bensalem et al., 2014)

การตรวจสอบการใช้งานได้จริงของแบบจำลอง (Validation) เป็นการตรวจสอบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลตัวแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีความถูกต้องสมจริงเมื่อเทียบกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง และมีความสามารถเพียงพอต่อการนำไปใช้งานได้จริง (Bensalem et al., 2014)

ในงานวิจัยในครั้งนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้แก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร ดังนั้นการทวนสอบความถูกต้องและการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลองถือเป็นเรื่องที่สำคัญยิ่ง สำหรับรายละเอียดขั้นตอนตลอดจนวิธีการดำเนินการ ผลการทดลองตัวอย่างรูปแบบเครื่องมือช่วยในการวางแผนเครื่องจักร จะแสดงในบทถัด ๆ ไป

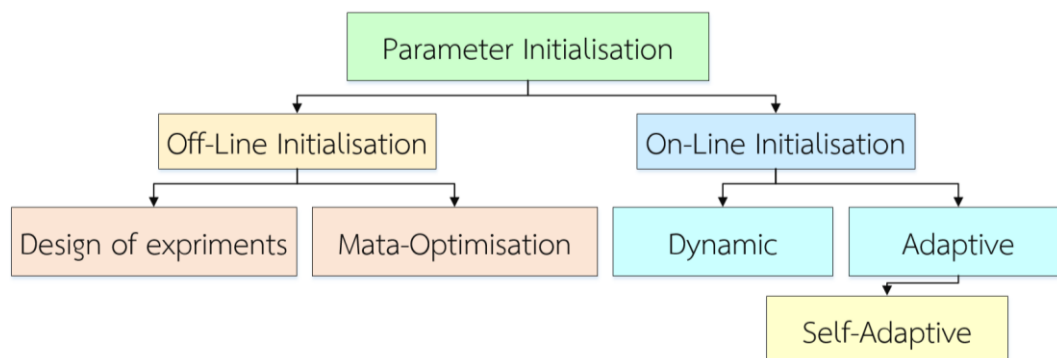
การปรับปรุงประสิทธิภาพในการหาคำตอบของวิธีเมตาฮิวริสติกส์

การปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีเมตาฮิวริสติกส์มีทั้งหมด 3 แนวทางด้วยกัน (ศิริกาญจน์ จันทน์สมบัติ, 2561) ได้แก่

1. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter setting)

หนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบของวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ คือ การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ ค่าจำเพาะของพารามิเตอร์สำหรับวิธีการเมตาฮิวริสติกส์จำเป็นต้องได้รับการปรับค่า (Parameter tuning) เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่สามารถทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับทุก ๆ ปัญหาได้ในครั้งเดียว เพราะการกำหนดค่าของพารามิเตอร์นั้น

ขึ้นอยู่กับปัญหาที่ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ด้วย (Talbi, 2009) โดยกลยุทธ์ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์สามารถแสดงได้ดังภาพ 10



ภาพ 10 กลยุทธ์ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์

ที่มา: Talbi (2009)

กลยุทธ์ที่ใช้ในการปรับพารามิเตอร์ (Parameter Tuning) มีอยู่ 2 กลยุทธ์ คือ แบบการกำหนดค่าพารามิเตอร์ก่อนการดำเนินการ (Off-Line Parameter Initialisation) และ แบบการปรับค่าพารามิเตอร์ระหว่างกระบวนการเมตาฮิวริสติกส์ (On-Line Parameter Initialisation) โดยในส่วนของการปรับค่าพารามิเตอร์ระหว่างกระบวนการทำงานนี้ค่าพารามิเตอร์จะถูกควบคุมรวมถึงปรับเปลี่ยนแบบพลวัต (Dynamic) ในระหว่างการดำเนินงานของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ (Talbi, 2009)

กำหนดค่าพารามิเตอร์ก่อนการดำเนินการ (Off-Line Parameter Initialisation) เป็นกลยุทธ์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพอย่างมากต่อการค้นหาพารามิเตอร์ของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ โดยผ่านกระบวนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้นำหลักการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติมาใช้ในการศึกษาผลกระทบหลัก (Main effects) และ ผลกระทบร่วม (Interaction) ของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งปัจจัยแต่ละปัจจัยถูกแบ่งทำการทดลองเป็นหลายระดับ ทำให้เราทราบอย่างแน่ชัดว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่กำลังถูกประยุกต์ใช้งาน (ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ, 2561)

โดยวิธีการดมกลืนของฉลามในปัจจุบันยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักรมาก่อนทำให้ผู้วิจัยจำเป็นต้องดำเนินการค้นการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมใหม่ทั้งหมด ซึ่งรายละเอียด และผลการทดลองจะอธิบายไว้อย่างชัดเจนต่อไป

2. การปรับปรุงกระบวนการ (Modifications)

การปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ด้วยการปรับปรุงกระบวนการทำงาน เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งนี้ประสิทธิภาพของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่ถูกปรับเปลี่ยนกระบวนการไปนั้นจะดีขึ้นหรือไม่ เป็นสิ่งที่ไม่อาจทราบได้จนกว่าจะได้ทำการทดลองและสรุปผล

วิธีการดมกลืนของฉลามเป็นหนึ่งในวิธีแบบเมตาฮิวริสติกส์ที่มีกระบวนการค้นหาคำตอบตอนต้นกระบวนการเป็นแบบ การสำรวจคำตอบ (Exploration) โดยจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่านักวิจัยได้พยายามปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของ SSO ซึ่งเน้นไปที่การปรับปรุงในกระบวนการสำรวจคำตอบ เช่น Ahmadigorji, Amjady, and Dehghan (2017) ได้ปรับปรุงสมการกำหนดความเร็วของฉลามไปจากเดิม ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีความโกลาหลเพื่อให้เกิดการกระจายที่มากขึ้นตัวของกลุ่มตัวอย่างเริ่มต้น Y. Zhou, Ye, Du, and Sheykhahmad (2020) ได้นำทฤษฎีความโกลาหลมาประยุกต์ใช้กับ SSO เพื่อทำให้เกิดความหลากหลายในประชากรฉลาม ทำให้คำตอบที่ปรับปรุงสามารถหลีกเลี่ยงการติดในพื้นที่การค้นหาท้องถิ่น (Local optimal) ได้ดียิ่งขึ้น

3. การผสมผสานกับวิธีการอื่น (Hybridisations)

การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่สนใจกับวิธีการอื่นนั้น เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นักวิจัยนิยมใช้ในการปรับปรุงวิธีการหาคำตอบในปัจจุบัน โดยวิธีการดังกล่าวเป็นการผสมผสานองค์ประกอบ หรือขั้นตอนการทำงานของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่กำลังสนใจกับอีกวิธีการหนึ่งเพื่อจุดประสงค์ทางด้านประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ ทั้งนี้ Blum, Puchinger, Raidl, and Roli (2011) ได้จำแนกประเภทของการผสมผสานไว้ 5 ประเภทได้แก่

3.1. Hybridising metaheuristic with metaheuristic การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่สนใจกับวิธีเมตาฮิวริสติกส์อีกชนิดหนึ่ง เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางโดย Blum et al. (2011) ได้กล่าวถึงหลักการของวิธีนี้ว่า เป็นการคัดเลือกวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่มีขั้นตอนการค้นหาคำตอบ หรือ มีเทคนิคในการค้นหาคำตอบ ที่สามารถใช้ได้กับเมตาฮิวริสติกส์เดิม เพื่อใช้ปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบ

3.2 Hybridising metaheuristics with constraint programming การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่สนใจควบคู่กับการเขียนโปรแกรมข้อจำกัด เป็นเทคนิคการปรับปรุงคำตอบที่ไม่นิยมในหมู่นักวิจัย เนื่องจากวิธีการหาคำตอบแบบ Metaheuristics และ Constraint programming (CP) ทั้งสองวิธีนี้มีจุดเด่นแตกต่างกันคนละขั้วซึ่งยากต่อการผสมผสานเข้าด้วยกันเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพ แต่ก็ยังมีตัวอย่างของการใช้งานวิธีนี้ให้เห็น เช่น CP-based large

neighborhood search, Ant Colony Optimisation and Constraint Programming (Blum et al., 2011)

3.3 Hybridising metaheuristics with tree search techniques การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์กับเทคนิคการค้นหาคำตอบแบบต้นไม้ (Tree search techniques) เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีเมตาฮิวริสติกส์โดยประยุกต์ใช้กับเทคนิคการค้นหาคำตอบแบบต้นไม้ ซึ่งมีจุดเด่น คือ การพิจารณาให้พื้นที่การค้นหาคำตอบ (Search space) นั้นเป็นกิ่งของต้นไม้ (Blum et al., 2011)

3.4 Hybridising metaheuristics with problem relaxation การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์ควบคู่กับการผ่อนคลายทางด้านเงื่อนไขของปัญหา คือ วิธีการที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยหลักการของวิธีการนี้ คือ การผ่อนคลายเงื่อนไขของปัญหาที่เราสนใจ เช่น การทำให้ปัญหานั้นง่ายขึ้น (Simplifying) ลดข้อจำกัดบางประการ (Removing constraints) เป็นต้น (Blum et al., 2011)

3.5 Hybridising metaheuristics with dynamic programming การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่สนใจกับกำหนดการพลวัตเป็นวิธีการสุดท้ายที่ Blum et al. (2011) ได้สรุปและกล่าวไว้ ซึ่งวิธีนี้อาศัยความได้เปรียบของกำหนดการพลวัต (Dynamic Programming) มาช่วยในหาคำตอบร่วมกับวิธีเมตาฮิวริสติกส์ แต่วิธีการผสมผสานนี้ยังมีข้อจำกัด คือ สามารถใช้แก้ไขปัญหได้เฉพาะปัญหาขนาดเล็กเท่านั้น

จากการทบทวนวรรณกรรม พบการปรับปรุง SSO ด้วยวิธีการผสมผสาน คือ การผสมผสานวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่สนใจกับวิธีเมตาฮิวริสติกส์อีกชนิดหนึ่ง (Hybridising metaheuristic with metaheuristic) ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ L. Xu, Si, Jiang, Sun, and Ebrahimian (2020) ได้ผสมผสาน Shark Smell Optimisation เข้ากับ World Cup Optimisation

ในส่วนของงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีการดมกลืนของฉลามด้วยกัน 2 แบบ คือ การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และการปรับปรุงขั้นตอนการหาคำตอบภายในของวิธีการดมกลืนของฉลาม ซึ่งผลลัพธ์และวิธีดำเนินการจะอธิบายไว้ในบทต่อ ๆ ไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวางผังเครื่องจักร

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะของปัญหาการวางผังเครื่องจักร แนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนความแตกต่างของช่องว่างงานวิจัยในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวางผังเครื่องจักรในโรงงาน โดยใช้คำสำคัญในการค้นหาคือ Facility Layout Design, และ Machine Layout Design จากฐานข้อมูล Scopus ตั้งแต่ปี 2015 – 2022 โดยกำหนดเนื้อหาขอบเขตงานวิจัยให้ครอบคลุมในด้านวิศวกรรม (Engineering) วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ (Computer sciences) วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (Environment science) พลังงาน (Energy) คณิตศาสตร์ (Mathematics) การบริหารธุรกิจ (Business management) วิทยาศาสตร์การตัดสินใจ (Decision science) และด้านเศรษฐศาสตร์ (Economics) โดยเลือกเฉพาะบทความที่เขียนขึ้นเป็นภาษาอังกฤษ พบงานวิจัยทั้งสิ้น 8,891 บทความ โดยเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ผู้วิจัยสนใจและกำลังศึกษาเป็นจำนวน 424 บทความ ทั้งนี้เพื่อความชัดเจนในการทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยได้จำแนกหมวดหมู่ขอข้อมูลสำคัญในบทความออกเป็น 3 หมวดหลัก ได้แก่ จุดประสงค์การวิจัย (Objective) คุณลักษณะของปัญหา (Problem's characteristic) และวิธีการแก้ปัญหา (Solution approaches) สำหรับคุณลักษณะของปัญหาจะเป็นหมวดที่แสดงให้เห็นถึงระบบการผลิตที่ถูกใช้ในงานวิจัย (Manufacturing system) วิวัฒนาการของผังเครื่องจักร (Layout evolution) รูปร่างลักษณะของเครื่องจักรที่จัดเรียง (Layout configuration) ความสม่ำเสมอของรูปร่างเครื่องจักรที่จัดเรียง (Facility shapes consistency) และรูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง (Facility shape) โดยรายละเอียดที่ได้กล่าวมา ตลอดจนชื่อผู้เจ้าของงานวิจัย ปีที่ได้เผยแพร่ แสดงได้ดังตาราง 5

ตาราง 5 รายละเอียดของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
1	García-Hernández, Arauzo-Azofra, Salas-Moreira, Pierreval, and Corchado (2015)	Generate and selecting the facility layout form simulation software	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Mathematical Optimisation
2	García-Hernández, Arauzo-Azofra, et al. (2015)	Minimize total material flow	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Multi-Objective Interactive Genetic Algorithm
3	García-Hernández, Palomo-Romero, Salas-Moreira, Arauzo-Azofra, and Pierreval (2015)	Satisfied the designer's preferences	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Hybrid Evolutionary Algorithms (GA, Clustering method, Niching techniques)
4	Ighrawe and Oke (2015)	Minimize workforce costs and Maximize efficiency	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Big-Bang Big-Crunch algorithm
5	Q. L. Lin, Liu, Wang, and Liu (2015)	N/A	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Heuristic Approach
6	L. Li, Li, Ma, and Tang (2015)	Minimize intercell material handling and machine relocation cost	Reconfigurable Manufacturing	Dynamic layout	Multiple Row	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
7	Moatari-Kazerouni, Chinniah, and Agard (2015b)	Minimize Transportation cost, safety aspects	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Safety-cost relationship diagram

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
8	Putri, Fithri, and Taufik (2015)	Minimize total distance of the displacement of material	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches Activity Relationship Chart (ACR)
9	Saraswat, Venkatadri, and Castillo (2015)	Minimize the material flow Minimize the number of material handling devices. Minimize the average WIP	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
10	Tavakkoli-Moghaddam, Torabi, and Ghaseminejad (2015)	Minimize material transportation cost	N/A	Static Layout	Multi-rows	N/A	Rectangular Shape	Quaternion Firefly Algorithm
11	Tu and Chiu (2015)	Design the actual office layout	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Fuzzy AHP, TOPSIS
12	S. Vitayasak and P. Pongcharoen (2015)	Minimizes total material handling distance	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
13	Allahyari and Azab (2015a)	Minimize total travel-distance flow cost	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
14	Allahyari and Azab (2015b)	Minimizing total travel-flow cost	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
15	Al-Saleh, Mir, and Hassanin (2015)	Minimizes material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization and Tabu Search
16	Asl and Wong (2015)	Minimizes material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
17	Azadeh, Moghaddam, Nazari-Doust, and Jalalvand (2015)	Minimizes multi-objective	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
18	Boolaki, Mahdavi, and Paydar (2015)	Minimizes inter-cell movements Maximize machine and worker utilization	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Percentage multi-choice goal programming
19	Bozorgi, Abedzadeh, and Zeinali (2015)	Minimize the total cost of rearrangement and flow costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Tabu Search
20	Caputo, Pelagagge, Palumbo, and Salini (2015)	Minimize an annual cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
21	Y. Chen, Jiang, Wahab, and Long (2015)	Minimize the total transportation costs	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Irregular Shape	Genetic Algorithm
22	Deep and Singh (2015)	Minimize the overall cost	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Genetic Algorithm
23	Erozan, Torkul, and Ustun (2015)	Minimize the multi-Objective	Cellular Manufacturing	N/A	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
24	Esmailnezhad, Fattahi, and Khairkhan (2015)	Maximizes the average effective arrival rate.	Cellular Manufacturing	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization
25	Forghani, Mohammadi, and Ghezavati (2015)	Minimizes material handling cost	Cellular Manufacturing	N/A	Multi-rows	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic method Lower bound
26	Ghassemi Tari and Neghabi (2015)	Maximize total adjacency ratings	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Mixed Integer Mathematical Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
27	Ghezavati (2015)	Minimizes total holding and backorder costs	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Branch and Bound (B&B) algorithm and a benchmark heuristic algorithm
28	Gonçalves and Resende (2015)	Minimizes the total cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
29	Hasani, Soltani, and Eskandarpour (2015)	Minimizes cost and reliability	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
30	Hungerländer and Anjos (2015)	Minimizes total weighted between departments	N/A	Static Layout	Multi-rows	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Global bounds Approaches
31	Izui et al. (2015)	N/A	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
32	Karhikeyan and Saravanann (2015)	Minimizing the number of voids and exceptional elements	Cellular Manufacturing	N/A	N/A	N/A	N/A	Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA)
33	A. Kheirkhan, Navidi, and Messi Bidgoli (2015)	Minimizes material handling cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm
34	Kia, Lashgari, and Jolai (2015)	Minimize total costs	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	Multi-rows	Heterogeneous size	N/A	N/A
35	Kia, Shirazi, Javadian, and Tavakkoli-Moghaddam (2015)	Minimize total costs	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Simulated Annealing
36	Krajcovic and Hancinsky (2015)	Material flow optimization	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithms

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
37	Kulturel-Konak and Konak (2015)	Minimizing the total cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
38	H. Ma, Tang, Li, and Li (2015)	Minimize the total cost of inter-cell material handling and machine relocation	Reconfigurable Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
39	Matal (2015)	Minimizes Multi-Objective	N/A	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
40	Mauricio, Montevechi, Leal, Miranda, and Lombardi (2015)	Layout Improvement	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Discrete event simulation
41	Moatari-Kazerouni, Chinniah, and Agard (2015a)	Minimize total cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic OHS
42	Neghabi and Ghassemi Tari (2015)	Maximizes the number of useful adjacencies among departments	N/A	Static Layout	Multi-floor	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
43	Nejabatkhsh, Shirzadi, Tavakkoli-Moghaddam, Ebrahimi, and Kia (2015)	Maximize the processing route's reliability	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	the ϵ -constraint method
44	Niroomand, Hadi-Vencheh, Şahin, and Vizvári (2015)	Satisfied benchmarking objectives	Flexible manufacturing	Static Layout	Closed loop layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Migrating Birds Optimization algorithm
45	Niroomand, Mirzaei, Şahin, and Vizvári (2015)	Minimizes transportation costs	N/A	Static Layout	Closed loop layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
46	Palominos, Valdivia, and Quezada (2015)	N/A	Cellular Manufacturing	Static Layout	U-shaped Multiple rows	N/A	N/A	NonLinear Integer Programming
47	Palubeckis (2015)	Minimize the sum of the products of the flows and distances between facilities	N/A	Static Layout	Single row	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
48	Pujo, El Khabous, and Ounnar (2015)	Minimize task duration	Cellular Manufacturing	Static Layout	Single row U-Shape	N/A	Rectangular Shape	Linear Programming
49	Qudeiri et al. (2015)	Maximize throughput	Flexible manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Artificial neural network
50	Salmani, Eshghi, and Neghabi (2015)	Minimize the total areas	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Programming
51	Samartha, Philip, Mall, and Singh (2015)	Minimize interdepartmental movement	Process Layout	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Artificial Bee Colony algorithm (ABC)
52	Saravanan and Arulkumar (2015)	Minimizing the total traveling distance of the product	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Artificial Bee Colony algorithm (ABC)
53	Saravanan and Kumar (2015)	Satisfied benchmarking objectives	Flexible manufacturing	Static Layout	Loop layout	N/A	Rectangular Shape	Sheep Flock Heredity algorithm
54	Tasadduq, Imam, and Ahmad (2015)	Minimize the cost of inter-module flow	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Construction-cum-improvement algorithm
55	Tavakkoli-Moghaddam, Kazemi, Shafiee-Gol, and Mostafayi (2015)	Satisfied Objective function	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Integer mathematical programming and Genetic Algorithm
56	Ulutas and Islier (2015)	Minimize the sum of handling and re-layout costs	Product Layout	Dynamic Layout	Multiple Rows	Heterogeneous size	N/A	Artificial Immune System

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
57	Vin and Boujraf (2015)	Minimize material-flow	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithms
58	Srisatja Vitayasak and Pongpong Pongcharoen (2015)	Minimize total material handling cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithms
59	Vitayasak, Pongcharoen, and Hicks (2015)	Minimize material flow and shifting costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Modified Backtracking Search Algorithm
60	H. F. Wang and Chang (2015)	Minimize material handling cost and enhanced flexibility in applications	N/A	Static Layout	Multi-floor Layout	N/A	Rectangular Shape	Mix Integer Programming
61	S. Wang, Zuo, Liu, Zhao, and Li (2015)	Minimize the sum of the total material flow cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	Double row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing and mathematical programming
62	M. Wen, Qin, Kang, and Yang (2015)	Minimize Total transportation costs	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
63	J. Xu and Song (2015)	Minimize material transportation costs and rearrangement costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Multi-objective position-based adaptive Particle Swarm Optimization
64	F. Zhao et al. (2015)	Satisfied Objective Function	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Particle Swarm Optimization based Genetic Algorithm
65	Y. Zhao and Wallace (2015)	Minimize the total expected material handling cost	N/A	Static Layout	Multi-Rows Layout	N/A	Rectangular Shape	Greedy heuristic

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
66	Atencio and Rodado (2016)	Minimize total cost of material handling	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithms
67	Azadeh, Heydari, Yazdanparast, and Keramati (2016)	Minimize total cost	N/A	Static Layout	Single Row U-shape	N/A	N/A	Fuzzy simulation-mathematical programming approach
68	Azadeh, Moghaddam, Nazari, and Sheikhalishahi (2016)	Minimize distance, Adjacency	N/A	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Fuzzy analytic hierarchy process (AHP) data envelopment analysis (DEA)
69	Cheng Ying, Ab-Samat, and Kamaruddin (2016)	To improve production efficiency	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	WITNESS simulation AHP decision-making approach
70	Jerin Leno, Saravana Sankar, and Ponnambalam (2016)	Minimize total material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing Genetic Algorithms
71	A. S. Kheirkhah and Bidgoli (2016)	Minimize total material handling cost Minimize rearrangement cost	N/A	Dynamic facility layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Simulated Annealing Imperialistic competitive algorithms
72	Sahragard and Bashiri (2016a)	Minimizes the total transportation cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Hybridized clustering based Heuristic method
73	Neghabi and Ghassemi Tari (2016)	Maximize adjacency rating	Process layout	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	A new phenomenon of closeness rating (Linear Programming)

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
74	Purnomo and Wiwoho (2016)	Minimizing material handling cost and re-layout cost Maximizing closeness rating	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Programming (MIP)
75	Raja and Anbumalar (2016)	Minimize the intra-cell part movement Maximize the machine utilization	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Heuristic approach based on modified flow matrix
76	Sharma and Singhal (2016)	To Analyze the procedural approaches	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	AHP Approach
77	Vitayasak and Pongcharoen (2016)	Minimize material handling cost and distance of material flow, Relocating machines/equipment	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
78	Y. Zhao and Wallace (2016)	Minimize material handling costs and total distance travelled	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
79	Ahmadi and Akbari Jokar (2016)	Minimize material handling costs Minimize desirable relations between departments	N/A	Static Layout	Single and multi-floor layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
80	Anjos and Vieira (2016)	Minimizes the total cost of the flow between departments	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
81	Bayram and Şahin (2016)	Minimize inter-cell and intra-cell material handling, machine purchasing	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Linear Programming Simulated Annealing
82	Chip, Low, and Kamaruddin (2016)	To Simulated the cellular layout	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	Multiple Rows	N/A	N/A	WITNESS simulation software
83	Derakhshan Asi, Wong, and Tiwari (2016)	Minimize material handling costs	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Particle Swarm Optimisation
84	Ghosh, Doloi, and Dan (2016b)	Minimizes the total inter-cellular material handling cost	Cellular manufacturing	N/A	N/A	N/A	N/A	Immune Genetic Algorithm
85	Ghosh, Doloi, and Dan (2016a)	Minimize the material flow cost and the rearrangement cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
86	Golmohammadi, Bani-Asadi, Esmaeeli, Hadian, and Bagheri (2016)	Minimize the total cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Hierarchical Genetic Algorithm
87	J. Guan and Lin (2016)	Minimizing the total cost	N/A	N/A	Single row Layout	N/A	Rectangular Shape	Multi-start local search algorithm
88	Hajipour, Fattahi, Tavana, and Di Caprio (2016)	Minimize sum of aggregate travel and waiting times, cost of establishing, idle probability	N/A	N/A	Multi-layer Layout	N/A	N/A	multi-objective Simulated Annealing

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
89	Hosseini and Seifbarghy (2016)	Minimize material handling equipment fixed costs and rearrangement costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Water Flow Like algorithm
90	S. W. Hou, Li, and Wang (2016)	Optimize exist splitting position	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Plane splitting method
91	Houshyar et al. (2016)	Minimize total cost of the system	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	Shop floor	Homogeneous size	Rectangular Shape	Linear mathematical model
92	Huawei, Guoping, Haining, Aimin, and Ruxin (2016)	Minimize logistic cost	Cellular manufacturing	N/A	N/A	Heterogeneous size	N/A	linearized mathematical model solved by GAMS software,
93	Jerin Leno et al. (2016)	Minimize total material handling cost	N/A	Static Layout	Shop floor	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Simulated Annealing
94	Kanduc and Rodic (2016)	Minimize the total distance the products travel between the machines.	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing and heuristic Approach
95	V. Kumar, Verma, Onkar, Singh, and Katiyar (2016)	Minimize material handling	Process layout	N/A	N/A	N/A	N/A	ARENA simulation
96	Lavic, Pasic, Vucijak, and Dukic (2016)	Developed facilities layout Alternatives model	N/A	N/A	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Fuzzy analytic hierarchy process
97	L. Ma et al. (2016)	Minimize operating cost.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	WITNESS simulation
98	Malikarjuna, Veeranna, and Reddy (2016)	Minimize make span	flexible manufacturing	Static layout	loop layout	Homogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Simulated Annealing
99	Manita, Chaieb, and Korbaa (2016)	Minimize total distance	flexible manufacturing	N/A	loop layout	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithms

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
100	Mehdizadeh and Rahimi (2016)	Minimize inter/intra cell and relocation movements with minimum cost	Cellular manufacturing	N/A	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
101	Menon, Zwimpfer, Hanne, and Domberger (2016)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	fuzzy logic with a Genetic Algorithm (GA)
102	Mohammadi and Forghani (2016b)	Minimize material handling cost	Cellular manufacturing	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Dynamic Programming and Simulated Annealing
103	Mohammadi and Forghani (2016a)	Minimize the total inter/intra-cell material handling Cost Maximize the machine similarity	Cellular manufacturing	Static layout	Single Row layout S-shape	N/A	Rectangular Shape	Dynamic programming and Simulated Annealing
104	Morinaga, Wakamatsu, Iwasaki, and Arai (2016)	Minimize material travel distance	N/A	Static layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
105	Niakan, Baboli, Moyaux, and Botta-Genoulaz (2016a)	Minimize total cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Irregular Shape	Genetic Algorithm Simulated Annealing
106	Niakan, Baboli, Moyaux, and Botta-Genoulaz (2016b)	Minimize total cost Satisfied social issues responsibility	Cellular manufacturing	N/A	N/A	Homogeneous size	N/A	Genetic Algorithm
107	Petrillo, De Felice, Silvestri, and Falcone (2016)	Minimize time and operation cost	Process Layout	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Heuristic Relationship diagram
108	Rubio-Sánchez, Gallego, Gortázar, and Duarte (2016)	Minimize travel distance and cost	N/A	Static layout	Single row layout	N/A	N/A	State-of-the-art algorithms and Heuristic Approaches

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
109	Sahragard and Bashiri (2016b)	Minimize total transportation cost	flexible manufacturing	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Neural network And Heuristic approaches
110	Saravanan, Kumar, and Rajkumar (2016)	Minimize materials handling cost	flexible manufacturing	Static layout	Single row layout	N/A	N/A	Artificial Immune System algorithm
111	Saravanan, Kumar, and Srinivasan (2016)	Minimize materials handling cost	flexible manufacturing	Static layout	Loop layout	N/A	N/A	Sheep flock heredity algorithm
112	Sikaroudi and Shahanaghi (2016)	Minimize materials handling cost	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic approaches
113	Suemitsu et al. (2016)	Minimize cycle time, manipulability and layout area	Cellular manufacturing	Static layout	Open field Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
114	Tinello, Jodin, and Winkler (2016)	Minimize internal transport costs	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic approaches
115	Y. J. Xiao, Zheng, Zhang, and Kuo (2016)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Simulated Annealing
116	Xie, Zhou, Xiao, and Chang (2016)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical Programming
117	Zarea Fazlelahi, Pourmader, Gharakhani, and Sadjadi (2016)	Minimize total cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
118	X. Q. Zuo, Murray, and Smith (2016)	Minimize both material flow cost and layout area	N/A	Static layout	Double-Row Layout	N/A	Rectangular Shape	Tabu Search
119	Altuntas and Dereli (2017)	To present an aggregation technique	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Linear Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
120	Amar and Abouabdellah (2017)	Minimizing material handling cost	N/A	N/A	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Linguistic evaluation and mathematical modeling
121	Asef-Vaziri, Jahandideh, and Modarres (2017)	Minimize the total loaded and empty flow	N/A	Static Layout	Loop Layout	Homogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
122	Azadeh, Jebreili, Chang, Saberi, and Hussain (2017)	Minimize the cost of material flow	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Integrated algorithm based on fuzzy simulation, fuzzy Linear Programming (FLP), and fuzzy data envelopment analysis (FDEA)
123	Hasda, Bhattachariya, and Bennis (2017)	Minimize material handling cost Minimize the cost of material flow	N/A	Static facility	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Modified Genetic Algorithm
124	C. K. Hu, Liu, and Hu (2017)	Minimize material handling cost Maximize adjacency scores and utilization of material-handling vehicle	Flexible manufacturing	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Hybrid fuzzy DEA/AHP approach
125	M. Hu (2017)	To applied virtual reality (VR) for the evaluation of passenger flow.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Three-dimensional (3D) virtual reality (VR) Simulation

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
126	C. Huang and Wong (2017)	Minimize total material transportation costs	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Binary Mixed Integer Linear Programming (BMILP)
127	Ingole and Singh (2017)	Minimize total material handling cost and transportation between the facilities.	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Firefly Algorithm
128	Moslemipour, Lee, and Loong (2017)	Minimize total material handling cost	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Dynamic Programming and Simulated Annealing
129	Puspita, Iqbal, Pratami, and Pratomo (2017)	To reduce distance	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Heuristic (BLOCPLAN algorithm)
130	Rabbani, Farrokhi-Asl, Rafiei, and Khaleghi (2017)	Minimize Machine relocation cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Hybrid Particle Swarm Optimisation (HPSO) Simulated Annealing
131	Su and Hwang (2017)	Maximize in-sequence movements Minimize backtracking movements, the total flow distance, and the total backtracking flow distance.	N/A	N/A	Loop Layout	N/A	Rectangular Shape	Hybrid Heuristic algorithm with a Mixed Integer Linear Programming (MILP)
132	Tayal, Gunasekaran, Singh, Dubey, and Papadopoulos (2017)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	Single Row U-Shape	N/A	N/A	Meta-heuristic techniques

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
133	Zha et al. (2017)	Minimize material handling cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Irregular Shape	Particle Swarm Optimization
134	Abdel-Baset, Wu, Zhou, and Abdel-Fatah (2017)	Minimize the total assignment cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Flower Pollination Algorithm
135	Adinarayanan, Uthayakumar, Prabhakaran, and Anbumalar (2017)	Minimize intra-cell material flows	Cellular manufacturing	Static Layout	Block Layout	Homogeneous size	Rectangular Shape	Modified Artificial Bee Colony
136	Anjos and Vieira (2017)	Minimize the travelling distance	N/A	Static Layout	Multi-floor layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Linear Programming
137	Azevedo, Crispim, and Pinho de Sousa (2017)	Minimize total material handling costs and re-layout cost	Reconfigurable layouts	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical Programming
138	Azimi and Soofi (2017)	Minimize material handling cost and work flow interference	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	N/A	Discrete event Simulation Neural Network Genetic Algorithm
139	Banduka, Mladineo, and Eric (2017)	Minimize traveling distance	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Schmigalla method Heuristic
140	Banduka, Peko, Crnjac, Bošnjak, and Duric (2017)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	Single Row Layout	N/A	N/A	ViSTABLE Software

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
141	Besbes, Afonso, Zolghadri, Masmoudi, and Haddar (2017)	Satisfied multi-objective	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic approaches
142	Che, Zhang, and Feng (2017)	Minimize the total material handling cost and Usage Space	N/A	Static Layout	Multi-floor Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Linear Programming
143	Choi, Kim, and Chung (2017)	Minimize the material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
144	Defersha and Hodiya (2017)	Minimize material handling cost and inter cellular movements	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
145	Derakhshan Asl and Wong (2017)	Minimize material handling and rearrangement costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Modified Particle Swarm Optimization
146	Egilmez, Singh, and Ozguner (2017)	Minimize the expected inter-cell material handling costs	Cellular manufacturing	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
147	Eronen, Kronqvist, Westerlund, Mäkelä, and Karimisa (2017)	Minimize the distance between consecutive department and Area	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Mixed-Integer NonLinear Programming And Extended supporting hyperplane method
148	Fahad, Naqvi, Atir, Zubair, and Shehzad (2017)	Minimize energy consumption and waste	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
149	Grobely and Michalski (2017)	Minimize psycho-physical costs of human work	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
150	Haddou-Benderbal, Dahane, and Benyoucef (2017)	Maximize machine utilization and alternative replacement machines	Reconfigurable Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
151	Hassan, Ibrahim, Kit, and Abdullah (2017)	Minimize enclosed area	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
152	Imran, Kang, Lee, Jahanzaib, and Aziz (2017)	Minimize the value-added work in process	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulation integrated hybrid Genetic Algorithm (SHGA)
153	Kang and Chae (2017)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static Layout	Block layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Harmony search Algorithm
154	Kazemi, Gol, Tavakkoli-Moghaddam, Kia, and Khorrami (2017)	Satisfied Multi-objective Minimize inter-cell movements and installation, overhead cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	multi-rows Layout	Homogeneous size	N/A	Mixed-Integer NonLinear Programming Simulated Annealing
155	Kovács (2017)	Minimize production cost and total workflow	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
156	Kulturel-Konak (2017)	Minimize total rearrange cost	N/A	Dynamic Layout	Block layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Tabu Search
157	R. Kumar and Singh (2017a)	Satisfied multi-criteria Objective	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Integer Linear Programming and Heuristics Approaches
158	R. Kumar and Singh (2017b)	Minimize inter/intracell material handling costs and rearrangement costs	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Mathematical Programming
159	Lakehal and Aitzaï (2017)	Minimize the cost resulting from the interaction	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical Programming Branch and Bound

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
160	Lim, Ponnambalam, and Izui (2017)	Minimize layout allocated components, Operating time Maximize machines manipulability	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Hybrid Genetic Algorithm
161	J. Liu, Wang, He, and Xue (2017)	Minimize material handling and rearrangement costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Wang–Landau sampling algorithm and heuristics
162	Masrom, Abidin, Omar, Rahman, and Rizman (2017)	Minimize resources flow and rearrangement cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm
163	Moslemipour and Tavakkoli-Moghaddam (2017)	Minimize rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Dynamic programming
164	Ng and Tran (2017)	Minimize total distance between locations	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Water Flow algorithm
165	Paes, Pessoa, and Vidal (2017)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
166	Ou-Yang and Ansari (2017)	Minimizes the total costs of traveled distance, Cost of opening facilities and vehicle assignment	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Hybrid Particle Swarm Optimization
167	Paes et al. (2017)	Minimize material handling cost	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
168	Palomo-Romero, Salas-Moreira, and García-Hernández (2017)	Minimize total cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
169	Peng and Fan (2017)	Minimize total cost of the workshop layout under dynamic environment	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
170	Phoon, Yap, Taha, and Pai (2017)	Minimize of material handling cost and reduction of total production time	Product layout	Dynamic Layout	Loop layout	N/A	N/A	Real time Virtual reality
171	Pourhassan and Raissi (2017)	Minimize arranging facilities such that material handling and the relevant costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm Simulated Annealing
172	Pourvaziri and Pierreval (2017)	Minimize handling and rearrangement costs	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
173	Rabbani, Elahi, and Javadi (2017)	minimize the total costs of material handling	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Memetic Algorithm
174	Rezazadeh and Khiali-Miab (2017)	Minimize Inter-cellular Transportation Costs	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
175	Sadeghi, Forghani, and Seidi (2017)	Minimize Inter-cellular parts movement	Cellular manufacturing	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Mathematical programming
176	Safarzadeh and Koosha (2017)	Minimize material handling and lost opportunity costs	N/A	Static layout	Multi-row Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
177	Shafigh, Defersha, and Moussa (2017)	Minimize total Cost	N/A	Static layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing Linear Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
178	Sharma and Singhal (2017)	Satisfied the quantitative constraints, objective	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic approaches
179	Shirzadi, Tavakkoli-Moghaddam, Kia, and Mohammadi (2017)	Minimize the total system costs	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Imperialist Competitive Algorithm
180	Tayal and Singh (2017)	Minimize the distance and maximize the adjacency	Product layout	Dynamic layout	Single row U-shape	Heterogeneous size	N/A	Simulated Annealing
181	Tubailien and Siam (2017)	Minimize material handling	flexible manufacturing	Static layout	multi-row Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Ant Colony Optimisation (ACO)
182	Vitayasak, Pongcharoen, and Hicks (2017)	Minimize material flow and redesign costs	N/A	Dynamic layout	multi-row Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Backtracking Search Algorithm
183	Y. Xiao, Xie, Kulturel-Konak, and Konak (2017)	Minimize material handling, re-layout, moving boundaries cost	N/A	Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Irregular Shape	Evolution Algorithm Mixed Integer Linear Programming
184	D. Zhao, Aranha, and Kanoh (2017)	Minimize transportation cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
185	B. Zhou and Lu (2017)	Minimize total cost	Cellular manufacturing	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Particle Swarm Optimization
186	J. Zhou, Love, Teo, and Luo (2017)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	N/A	Backtracking Search Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
187	Zupan, Herakovic, Zerovnik, and Berlec (2017)	Minimize material traveling time and cost	Cellular manufacturing	Static Layout	U-Shape Single row Layout	Heterogeneous size	Irregular Shape	Simulation by VisTable
188	Akca and Sahin (2018)	Satisfied multi-objective	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Multi-objective Mixed Integer Programming
189	Amri, Darmoui, and Hajri-Gabouj (2018)	Minimizes total cost of material handling	N/A	N/A	Shop floor Multiple floors	N/A	Rectangular Shape	Artificial Immune System
190	Amar, Abouabdellah, and El Ouazzani (2018)	Minimize Total flow and CO2 emissions	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Rule Based Algorithm
191	Durmusoglu (2018)	To present an approach for assessing sustainability aspect of facility layouts.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Activity relationship chart (ARC) and TOPSIS
192	Felecia, Halim, and Wulandari (2018)	to re-layout library facilities	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Computerized Relative Allocation of Facilities Technique (computer simulation tool)
193	Garcia, Zúñiga, Bruch, Moris, and Syberfeldt (2018)	N/A	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Simulation-Based Optimisation
194	Haddou Amar, Abouabdellah, and El Ouazzani (2018)	Minimize this amount by a smart location of the departments.	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical modeling
195	(X. Hu et al., 2018)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Homogeneous size	N/A	SA-PSO algorithm
196	Kalita and Datta (2018)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static Layout	Single row	N/A	N/A	Genetic Algorithm (GA)

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
197	Kang, Kim, and Chae (2018)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static Layout	Loop layout	N/A	Rectangular Shape	Cuckoo Search Algorithms
198	A. S. Kheirikhah and Bidgoli (2018)	Minimize material handling cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
199	Negahban (2018)	Minimizing the sum of adjustments Maximum adjustment, and number of adjusted elements	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Mixed-integer nonlinear programming and Heuristic algorithms
200	Papakostas, O'Connor Moneley, and Hargaden (2018)	Maximize adjustment distance of the WorkCentre position	Product Layout	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulation Software
201	Tayal and Singh (2018)	Minimize Rearrangement cost Minimize Material handling cost Minimize Material handling flow time	N/A	Dynamic Layout	Single Row U-shaped	N/A	Irregular Shape	Hybrid Meta-heuristic based on Firefly (FA) and Chaotic Simulated Annealing
202	Turgay (2018)	To satisfy the multiple objective	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
203	Vitayasak and Pongcharoen (2018)	Minimize the total material flow distance	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Teaching-Learning-Based Optimisation (TLBO)
204	R. Wang et al. (2018)	Minimize total cost	N/A	Static Layout	Multi-floor	N/A	N/A	Genetic Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
205	Y. Wen and Ting (2018)	Minimize Usage space	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Evolutionary Algorithm
206	Adinarayanan, Uthayakumar, and Prabhakaran (2018)	Minimize the aggregate cell load variation and aggregate inter cellular move	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
207	D. Agarwal and Singholi (2018)	Minimize material handling	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches AHP-TOPSIS and FAHP-FTOPSIS
208	Ahmad et al. (2018)	Minimize traveling distance	Product layout	Static Layout	N/A	N/A	N/A	ARENA simulation
209	Allahyari and Azab (2018)	Minimize material handling	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing (SA)
210	Anjos, Fischer, and Hungerländer (2018)	Minimize using space	N/A	Static Layout	Multi-row layout	Homogenous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Linear Programming
211	Arunyanart and Pruekthaisong (2018)	Satisfied multicriteria objective	Process layout	Static Layout	N/A	Heterogenous size	Irregular Shape	Heuristic Approaches And Linear Programming
212	Belic, Kunica, Opetuk, and Dukic (2018)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Single row	N/A	N/A	Heuristic Approaches Bloch - Schmigalla triangular method
213	Benderbal, Dahane, and Benyoucef (2018)	Maximize the benefits from its intrinsic capacities	Reconfigurable Manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
214	Cheung, Nair, Salter, Robinson, and Wattis (2018)	Minimize traveling distance and risk	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches Quantitative risk assessment

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
215	Ejeh, Liu, Chalchooghi, and Papageorgiou (2018)	Minimize total cost	Process layout	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Mathematic programming
216	(H. Feng, Xi, Xia, & Pan, 2018)	Minimize total cost MHC, Operating cost Subcontracting cost	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Simulated Annealing
217	J. Feng and Che (2018)	Maximize adjacent material flow	N/A	Static Layout	N/A	Homogenous size	Rectangular Shape	Integer Linear Programming
218	Friedrich, Klausnitzer, and Lasch (2018)	Minimize total transportation distance	N/A	Static Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	Superordinate Parallel Tempering algorithm
219	Golmohammadi, Asadi, Amiri, and Behzad (2018)	Minimize associate cost and inter/intra cellular movement total cost	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
220	Gothwal and Raj (2018)	Minimize the total transportation distance	Flexible manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Linear Integer Programming
221	Hao and Qi (2018)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Mixed Integer Linear Programming
222	J. Huang, Huang, Guang, Li, and Zhu (2018)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Multi-rows layout	Heterogenous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing Particle Swarm Optimization algorithm
223	Huchette, Dey, and Vielma (2018)	Minimize minimizes total communication costs	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Mixed Integer Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
224	Hunagund, Pillai, and Kempaiah (2018)	Minimize total cost (Total arrangement cost and material handling cost)	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
225	Jadram and Boongsood (2018)	Minimize material handling and maximize facilities utilization	N/A	Static Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
226	Jaramillo and McKendall (2018)	Minimize total cost (Investment, material handling)	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Memetic Algorithm
227	Jeong and Seo (2018)	Minimize total traveling distance	N/A	Static Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	hybrid Tabu Search-Simulated Annealing
228	Jerin Leno, Saravana Sankar, and Ponnambalam (2018)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Open field layout	Heterogenous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
229	J. Li, Tan, and Li (2018)	Minimize total cost and satisfied safety human factors constrains	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogenous size	Rectangular Shape	Artificial Bee Colony algorithm
230	J. Liu, Zhang, He, and Jiang (2018)	Minimize material handling cost with maximum utilization ratio of shop floor	N/A	Static Layout	Open field layout	Heterogenous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization algorithm
231	Y. S. Liu, Tang, Ma, and Yang (2018)	Minimize the inter-cell part travels distance	Cellular manufacturing	Static Layout	Open field layout	Heterogenous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
232	Lukose, Scaria, and George (2018)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	Multi-row layout	N/A	Rectangular Shape	Firefly Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
233	Maleki, Ketabi, and Mokhatab Rafiei (2018)	Minimize intra-cell and inter-cell movement costs Maximize cell allocating	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
234	Mohamadi, Ebrahimnejad, and Tavakkoli-Moghaddam (2018)	Minimize material handling cost and dead space	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm Particle Swarm Optimization Simulated Annealing
235	Moslemipour (2018)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	Single row U-Shape	Homogenous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
236	Nagarajan, Mahalingam, Gurusamy, and Dharmaraj (2018)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	Homogenous size	Rectangular Shape	Ant Colony Optimization Simulated Annealing
237	Nagarajan et al. (2018)	Minimize total flow distance and total length of the flow line	Product layout	Static layout	Single row Layout	N/A	N/A	Artificial Bee Colony algorithm
238	Ning and Li (2018)	Minimize total cost	N/A	Static layout	Single row Layout	N/A	N/A	Metaheuristic Approaches
239	Peng et al. (2018)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
240	Phanden, Demir, and Gupta (2018)	Minimize total cost	Process layout	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
241	Pradeepmon, Panicker, and Sridharan (2018)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Estimation of Distribution algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
242	Şahinkoç and Bilge (2018)	Satisfied multi-Objective minimum expected, worst situation, relative regret cost	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
243	Soewardi and Paramitha (2018)	Minimize material handling	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Simulation Software
244	Tambunan, Ginting, and Sari (2018)	Minimize traveling distance	N/A	Static layout	Open field layout	N/A	N/A	Heuristic Approaches
245	Tarigan, Tarigan, Rahman, and Rizkya (2018)	Satisfied Lean's objectives	N/A	Static layout	Multi-row layout	Heterogenous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
246	Turanoglu and Akkaya (2018)	Minimize the total relocation costs and material handling costs	N/A	Dynamic Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Bacterial Foraging Optimization
247	Uthayakumar, Adinarayanan, Prabhakaran, Sota, and Zajac (2018)	Minimize intercellular movement and cell load variation	Cellular manufacturing system	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Particle Swarm Optimization
248	Andrada and Biscocho (2019)	Minimize labor-intensive and costly activity	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approach
249	Benderbal and Benyoucef (2019b)	Maximize the machine utilization And machine replacement Minimize the layout evolution effort	Reconfigurable manufacturing system (RMS)	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
250	Benderbal and Benyoucef (2019a)	Satisfied Multi Objectives	Reconfigurable manufacturing system (RMS)	Static Layout	Loop layout	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
251	Boongsood and Jadram (2019)	Minimize total transportation distance	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
252	Ghassemi Tari and Ahadi (2019)	Minimize the total facility layout costs.	Cellular manufacturing system	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Tabu Search
253	Haddou Benderbal and Benyoucef (2019)	Maximize the machine utilization And machine replacement Minimize the layout evolution effort	Reconfigurable manufacturing system (RMS)	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Multi-objective Simulated Annealing (AMOSA),
254	Kim and Chae (2019)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Monarch Butterfly Optimisation
255	Kovács (2019)	Reduce the among of workflow	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approach facility layout design and lean methods
256	R. Kumar and Singh (2019a)	N/A	Cellular Manufacturing	N/A	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
257	R. Kumar and Singh (2019c)	Minimizes material handling distance Maximizes similarity score for multi-periods	Cellular Manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Modified Simulated Annealing (MSA)

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
258	Lamba, Kumar, Mishra, and Rajput (2019)	Minimize the aggregated cost of overall material handling	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing (SA)
259	Q. Lin and Wang (2019)	Minimize the cost Maximize the closeness	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Irregular Shape	fuzzy Analytic Hierarchy Process and human reliability tool
260	Masoud, Chowdhury, Son, Kubota, and Tronstad (2019)	Maximize the production capacity	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Simulation based optimisation
261	Suhardini and Rahmawati (2019)	Satisfied the objective	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Simulation software
262	Tarigan, Cahyo, Tarigan, and Ginting (2019)	Minimize transportation distance	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Lean Manufacturing Method and CORELAP Algorithm
263	Vitayasak, Pongcharoen, and Hicks (2019)	Minimize the material flow distance	N/A	Dynamic Layout	Multi-Rows	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm (GA)
264	Weng et al. (2019)	Minimize costs and yield satisfactory levels of care	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
265	H. Wang et al. (2019)	N/A	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Genetic and Simulated Annealings
266	Kong, Vine, and Liu (2019)	Minimize total Cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Layout	Mixed-Integer Non-Linear Programming
267	Ahamdi-Javid and Ramshe (2019)	Minimize material handling	N/A	Static Layout	Loop layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Cutting Plane algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
268	Amaral (2019)	Minimize the total cost of transporting materials	N/A	Static Layout	Double row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	A Mixed Integer Programming
269	Anjos, Hungerländer, and Maier (2019)	Minimize the material handling costs in a cellular manufacturing	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Integer Linear Programming
270	Ayough and Khorshidvand (2019)	Minimize the costs regarding and number of cells	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization Simulated Annealing
271	Azevedo, Crispim, and Pinho de Sousa (2019)	Minimize total cost, machine unsuitability Maximize adjacency between machines	Reconfigurable manufacturing system (RMS)	Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
272	Banjarat, Anucha, and Wiyarath (2019)	Minimize total traveling distance and working time	Product layout	Static Layout	Open field	Heterogeneous size	N/A	Heuristic Approaches
273	Behnia, Mahdavia, Shirazi, and Paydar (2019)	Minimize the number of voids, workload, cell balance	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing
274	Bortolini, Ferrari, Galizia, Mora, and Pilati (2019)	Minimize machine relocation, machine purchasing and intercellular flows	Cellular Manufacturing	N/A	N/A	N/A	N/A	Mathematical programming
275	Chaudhuri, Jana, Sharma, and Dan (2019)	Minimize multi-objective	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
276	W. Chen (2019)	Minimize material handling cost, equipment replacement cost, production loss	N/A	Static Layout	Multi-rows layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Evolutionary Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
277	Cravo and Amaral (2019)	Satisfied objective form benchmark problem	N/A	Static Layout	single row Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	GRASP algorithm
278	Elkassas and Elwakil (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Salp Swarm algorithm
279	Egilmez, Erenay, and Süer (2019)	Minimize relocation and worker hiring firing cost with maximum labor utilization	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Mathematical Programming and discrete event simulation
280	Febriandini and Yuniaristanto (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
281	Fischer, Fischer, and Hungerländer (2019)	Minimize total traveling distance	N/A	Static Layout	Double-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	mixed-integer Linear Programming
282	Forghani and Fatemi Ghomi (2019)	Minimize total costs (production, subcontracting, material handling, machine idleness, and holding costs)	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
283	Garcia-Hernandez, Salas-Moreira, Garcia-Hernandez, Salcedo-Sanz, and Valente de Oliveira (2019)	Minimize material flow	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Coral Reefs Optimization algorithm
284	Ghani, Jali, and Zulkifli (2019)	Satisfied GMP's objective	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
285	Goyal and Verma (2019)	Minimize material handling, machine utilization Maximize profitability	N/A	Static Layout	Open field	N/A	N/A	Heuristic Approaches
286	C. Guan, Zhang, and Liu (2019)	Minimize total material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Mathematical programming
287	C. Guan, Zhang, Liu, and Gong (2019)	Minimize total material handling cost, Number of workshop and utilization	N/A	Static Layout	Open field	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization
288	Gülen, Murray, and Smith (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Double row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical Programming
289	S. Hou, Wen, Feng, Wang, and Li (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Open field	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
290	B. Hu and Yang (2019)	Minimize the total transportation distance	N/A	Static Layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization
291	Hottenrott and Grunow (2019)	Minimize the number of opening workstations	Product layout	Static Layout	Multi-row layout	N/A	Rectangular Shape	Mathematical Programming
292	Klausnitzer and Lasch (2019)	Minimize total travel distances along the flow path	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Linear Programming
293	Krajčovič, Hančinský, Dulina, and Grznár (2019)	Minimize material handling cost and distance	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
294	R. Kumar and Singh (2019b)	Minimizes the total cost (MHC, rearrangement)	Cellular Manufacturing	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
295	La Scalia, Micale, Giallanza, and Marannano (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Block layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Firefly Algorithm
296	(H. Li, Liu, & Shi, 2019)	Minimize logistic cost of AGV	Product layout	Static Layout	Single row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Variable Neighborhood Search (VNS)
297	Z. Lin and Yingjie (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
298	J. Liu and Liu (2019)	Minimize material handling cost and criteria score	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Ant Colony Optimization algorithm
299	Mahmoodian, Jabbarzadeh, Rezazadeh, and Barzinpour (2019)	Minimize the number of voids	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization algorithm
300	Mohamadi, Ebrahimnejad, Soltani, and Khalilzadeh (2019b)	Minimize traveling distance and layout dead space	Process Layout	Static Layout	Open field Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
301	Mohamadi, Ebrahimnejad, Soltani, and Khalilzadeh (2019a)	Minimize total material handling cost	N/A	Static Layout	Open field Layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
302	Morales-Calvache, Vásquez-Méndez, Prada-Ariza, and Mejía-Moncayo (2019)	Minimize interconnection cost and material handling	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithms

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
303	Park and Seo (2019)	Minimize total material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
304	Pourhassan and Raissi (2019)	Minimize rearrangement, material handling and transporting costs.	N/A	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms
305	Pournaderi, Ghezavati, and Mozafari (2019)	Minimize material handling cost, facilities replacement and carried cost	N/A	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithms Simulated Annealing
306	Rathasari and Rochman (2019)	Minimize total cost	Cellular Manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
307	Ren, Wen, Guan, and Hu (2019)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Mathematical programming
308	Sakharwade, Sahu, and Rajput (2019)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
309	Shaker Abualsaud, Ahmed Alhosani, Youssef Mohamad, Nasser Al Eid, and Alsyouf (2019)	Minimize material handling distance	N/A	Static Layout	double row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Integer programming
310	Sembiring, Sitanggang, Budiman, and Aloina (2019)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	CRAFT algorithm
311	Shaker Abualsaud et al. (2019)	Minimize total cost Maximize performance	Product layout	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
312	Singh and Ingole (2019)	Minimize material handling costs, hazard movement	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Biogeography Based Optimization (BBO)

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
313	Suhardi, Juwita, and Astuti (2019)	Minimize total material handling cost	Product layout	Static Layout	Double Row layout	Homogeneous	Rectangular Shape	Arena simulation
314	(Sui, Hou, Duan, & Wu, 2019)	Minimize total logistics cost	Reconfigurable manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Particle Swarm Optimization algorithm
315	Targhi, Sabzehparvar, and Ebrahimzhad (2019)	Minimize transportation costs and distances between departments	N/A	Static Layout	Multi-floor layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical Programming
316	Tayal and Singh (2019a)	Minimize material handling cost and distance	N/A	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
317	Tayal and Singh (2019b)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic layout	Row layout	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
318	W. Wang, Hu, Xiao, and Guan (2019)	Minimize processing time and logistics cost	N/A	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Graph algorithm and search algorithm
319	X. Wei, Yuan, and Ye (2019)	Minimize material handling and equipment replacement cost Maximize Utilization of workshop area	Reconfigurable manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
320	X. Xiao, Hu, Wang, and Ren (2019)	Minimize material handling cost	N/A	Dynamic layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization (PSO)
321	X. Zhang, Wang, and Chen (2019)	Minimize material transfers distance	Product layout	Static Layout	Multi-row layout U-shape	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
322	X. Zuo, Gao, Zhou, Yang, and Zhao (2019)	Minimize material flow cost	N/A	Static Layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
323	Besbes, Zoighadri, Afonso, Masmoudi, and Haddar (2020)	minimize the material handling cost	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Layout	Genetic Algorithm
324	Zúñiga, Moris, Syberfeldt, Fathi, and Rubio-Romero (2020)	Minimizing the cost of a layout redistribution	N/A	N/A	Shop floor	N/A	N/A	Simulation-based Optimisation Nondominated sorting Genetic Algorithm
325	Kovács (2020)	To reduce total cost and improve the layout efficiency	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	LEAN manufacturing
326	S. L. Liu et al. (2020)	Minimize the material handling cost	N/A	N/A	Single row	N/A	N/A	Fireworks algorithm
327	Lamba, Kumar, Mishra, and Rajput (2020)	minimize the aggregated cost of overall material handling	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Mixed integer non-linear program
328	Sengazhani Murugesan, Sequeira, Shetty, and Jauhar (2020)	Minimum Layout Total Cost	Mixed Process Layout	N/A	N/A	N/A	Rectangular Layout	AHP methodology
329	Vadivel and Sequeira (2020)	To satisfies multi-objective	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Layout	Grey relational analysis AHP, TOPSIS and Fuzzy TOPSIS.
330	Vadivel, Sequeira, and Jauhar (2020)	Minimize total cost	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
331	S. K. Aganwal and Yadav (2020)	Minimize total usage area	N/A	Static Layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Artificial Bee Colony algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
332	Alduaji and Hassan (2020)	Minimize production and material handling cost	Flexible manufacturing	Static Layout	Open field layout	N/A	N/A	Mathematical programming
333	Amaral (2020)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Double row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
334	Arfiyanto, Cakravastia, and Priyatna Iskandar (2020)	Minimize material handling cost, re-layout cost, takt time process, shutdown period	Product layout	Static Layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
335	Ayuthaya, Kriengkorkot, and Sriboonchandr (2020)	Minimize the transporting cost maximize adjacency of facility	N/A	Static Layout	Multi-Floor layout	N/A	Rectangular Shape	Differential Evolution Algorithm
336	Besbes, Zolghadri, Costa Alfonso, Masmoudi, and Haddar (2020)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
337	Budianto, Halim, and Christine Sembiring (2020)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches Automated Layout Design Program (ALDEP) software
338	Chae and Regan (2020)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	Double row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Programming
339	T. J. Chen, Lee, and Chiang (2020)	Minimize total traveling distance	N/A	Static Layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Mathematical programming
340	Dahlbeck, Fischer, and Fischer (2020)	Minimize total traveling distance	N/A	Static Layout	Single-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Integer programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
341	Di Bari, Baiocchi, and Santucci (2020)	Minimize total traveling distance between departments	N/A	Static Layout	Single-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Algebraic differential evolution algorithm
342	Forghani, Fatemi Ghomi, and Kia (2020)	Minimize material handling costs	Cellular manufacturing	Static Layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
343	Garcia-Hernandez, Garcia-Hernandez, et al. (2020)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Coral Reefs Optimization
344	Garcia-Hernandez, Salas-Morera, Carmona-Munoz, Abraham, and Salcedo-Sanz (2020)	Minimize material handling costs	N/A	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Coral Reefs Optimization
345	Garcia-Hernandez, Salas-Morera, Carmona-Munoz, Abraham, and Salcedo-Sanz (2020)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Coral Reefs Optimization
346	Garcia-Hernandez, Salas-Morera, Carmona-Munoz, Garcia-Hernandez, and Salcedo-Sanz (2020)	Minimize material handling costs	N/A	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Coral Reefs Optimization

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
347	Golmohammadi, Honarvar, Hosseini-Nasab, and Tavakkoli-Moghaddam (2020)	Minimize the total cost of parts relocations, intra- and inter-cell movements	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm (GA), Keshnel Algorithm (KA) and Red Deer Algorithm (RDA)
348	Hunagund, Pillai, and Kempaiah (2020)	Satisfied multi- objective	N/A	Dynamic Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
349	Hungerländer, Maier, Pachatz, and Truden (2020)	Minimize traveling distance between machine	Flexible manufacturing	Static Layout	Single row Loop layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Integer Linear Programming
350	Kromer, Platos, and Snaasel (2020b)	Minimize total transportation cost	Product layout	Static Layout	Single row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Differential Evolution Algorithm
351	Kromer, Platos, and Snaasel (2020a)	Minimize total transportation cost	Product layout	Static Layout	Single row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Self-Organizing Migration algorithm
352	Lamba et al. (2020)	Minimize material handling and rearrangement costs.	Cellular manufacturing	Dynamic Layout	N/A	N/A	N/A	Simulated Annealing (SA)
353	M. L. Li (2020)	Minimize total intercell and intracell material handling costs	Cellular manufacturing	Static Layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Novel Algorithm
354	J. Liu, Liu, Yan, and Peng (2020)	Minimize material handling cost	N/A	Static Layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
355	J. Liu, Liu, and Li (2020)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Static Layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Evolutionary Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
356	Nagarajan, Mahalingam, Kandasamy, and Gurusamy (2020)	Minimize machine number, total flow distance, total length of the flow line and material handling	N/A	Static Layout	Single row layout	N/A	N/A	Artificial Immune System algorithm
357	Qamar, Meanazel, Alalawin, and Almomani (2020)	Maximize space utilization	N/A	Static Layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
358	Sarwar, Chowdhury, and Uddin (2020)	Minimize material handling cost and distance	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Firefly Algorithm
359	Savsar and Aldehaim (2020)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches
360	Seyed, Rahmani, and Moslemipour (2020)	Minimize Rearrangement cost, material handling cost	flexible manufacturing	Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
361	Shojaie and Bariran (2020)	Minimize material handling cost, dead space	N/A	Static layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization Simulated Annealing
362	Sitepu et al. (2020)	Minimize total distance between machine	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	CRAFT algorithm
363	Sudtachat (2020)	Minimize the expected total moving time.	Cellular manufacturing	N/A	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Dynamic Programming
364	Tarigan et al. (2020)	Minimize material handling cost	Process layout	Static layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic approaches
365	Vitayasak and Pongcharoen (2020)	Minimize both material handling and relocation costs	N/A	Dynamic layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Teaching-Learning-Based Optimisation
366	Wan, Zuo, Li, and Zhao (2020)	Minimize material flow cost and layout space	N/A	Static layout	multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Linear Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
367	S. Xu, Wang, and Feng (2020)	Minimize the total cost involving investment	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
368	X. Xu (2020)	Minimize the total time	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Simulation software
369	Zha, Guo, Huang, Wu, and Tang (2020)	Minimize material handling costs and rearrangement costs	N/A	Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization Simulated Annealing
370	Y. Zhao, Lu, Yan, Lai, and Xu (2020)	Minimize material handling and layout space	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
371	Y. Zhao, Lu, and Yi (2020)	Minimize total logistics distance	Cellular manufacturing	Static layout	Multi-floor layout	N/A	N/A	Mathematical programming
372	J. L. Zhou et al. (2020)	Minimize material handling cost and the maximize area utilization	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Particle Swarm Optimization Algorithm
373	Zúñiga et al. (2020)	Minimize lead time and processing time	Product layout	Static layout	Multi-row layout	N/A	N/A	Simulation Software
374	Adeyeri, Ayodeji, and Adeleye (2021)	Minimize total cost	N/A	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Mathematical programming
375	Ahmadi-Javid and Ardestani-Jaafari (2021)	Minimize material flow and maximize closeness relationship	N/A	Static layout	Single-row Loop layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
376	Akbilek (2021)	Minimize material handling cost and total clearance	N/A	Static layout	Single-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm Tabu Search

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
377	Amaral (2021)	Minimize total material handling	N/A	Static layout	Double-rows layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Integer programming
378	Anjos and Vieira (2021)	Minimize expectation flow	N/A	Static layout	Multi-rows layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
379	Aitari, Ala, Kolahi-Randji, and Jami (2021)	Minimize traveling time	N/A	Static layout	Multi-floor layout	N/A	N/A	Mathematical programming And Simulation
380	Besbes, Mahjoub, et al. (2021)	Minimize the Material Handling Cost and ensure human safety by applying safety bubble	Reconfigurable Manufacturing	Static layout	N/A	N/A	N/A	N/A
381	Besbes, Zolghadri, and Afonso (2021)	Minimize transportation distance	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
382	Besbes, Zolghadri, Costa Afonso, Masmoudi, and Haddar (2021)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static layout	Multi-floor layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
383	T. L. Chen, Chen, Huang, and Chang (2021)	Minimize transportation	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
384	Dahlbeck (2021)	Minimize traveling distance	N/A	Static layout	Row- layout T shape	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed-Integer Linear Programming
385	Deng et al. (2021)	Minimize transportation cost and material flow	N/A	Static layout	Single-row layout Close loop	N/A	Rectangular Shape	Harmony Search Algorithm

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
386	Erik and Kuvvetli (2021)	Minimize material transportations	N/A	Static layout/ Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mathematical programming
387	Eschemann, Krauskopf, Sauer, and Zernickel (2021)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
388	Guo et al. (2021)	Minimize total material handling	Product layout	Static layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulation
389	Golmohammadi, Honarvar, Tavakkoli-Moghaddam, and Hosseini-Nasab (2021)	Minimize the total inter/intra cell transportation cost and total breakdown cost	Cellular manufacturing	N/A	N/A	N/A	Rectangular Shape	Mathematic programming
390	Herrán, Manuel Colmenar, and Duarte (2021)	Minimize total material handling	N/A	Static layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Variable neighborhood search
391	Hosseini, Azimi, Sharifi, and Zandieh (2021)	Minimize material handling cost and rearrangement cost	N/A	Dynamic layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
392	Ingole and Singh (2021)	Minimize material handling and transportation cost	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Biogeography-based optimization algorithm
393	Ketabi, Ghandehari, and Khoshkrodi (2021)	Satisfied Multi- objective	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Heuristic Approaches/ Simulation
394	Khajemahalle, Emami, and Keshteli (2021)	Minimize material handling and rearrangement costs	N/A	Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing
395	Kim and Chae (2021)	Minimize material handling	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Monarch butterfly optimization
396	Lashgari, Kia, and Jolai (2021)	Minimize total cost	Cellular manufacturing	Dynamic layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulated Annealing

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
397	Lenin and Siva Kumar (2021)	Minimize total distance and layout space	N/A	Dynamic layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Harmony Search algorithm
398	Lista, Tortorella, Bouzoua, Mostafad, and Romero (2021)	Minimize movement distance and handling cost	Product layout	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
399	S. Liu, He, Guan, Gong, and Zhang (2021)	Minimize total material handling cost	N/A	Static layout	Double-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Programming
400	S. Liu, Zhang, et al. (2021)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	single-row Layout	N/A	Rectangular Shape	Fireworks algorithm
401	Mahalingam and Nagarajan (2021)	Minimize total traveling distance and layout space	N/A	Static layout	Multi-row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Cuckoo Search algorithm
402	Mansour, Afefy, and Taha (2021)	Minimize total inter-cell, intra-cell movements, operation, and defect costs	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	Rectangular Shape	Heuristic Approaches
403	McKendall and Hakobyan (2021)	Minimize material handling distance	N/A	Static layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
404	Modrak, Pandian, and Semanco (2021)	Minimize intercell movement and cell load variation	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	N/A	Genetic Algorithm
405	Ohmori and Yoshimoto (2021)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed Integer Programming
406	Palubeckis (2021)	Minimize traveling distance	N/A	Static layout	Loop layout	N/A	Rectangular Shape	Simulated Annealing
407	Pourvaziri, Pierreval, and Marian (2021)	Minimize total transported distance	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Mixed-integer Linear Programming

No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
408	Pourvaziri, Salimpour, Akhavan Niaki, and Azab (2021)	Minimize total cost	Flexible manufacturing	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm/Tabu Search
409	Ramesh, Arunkumar, and Viavaraj (2021a)	Minimize total cost and inter- and intra-cellular movements.	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Heuristic Clustering algorithm
410	Ramesh, Arunkumar, and Viavaraj (2021b)	Minimize material traveling distance and layout space	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	N/A	N/A	Mathematical Programming
411	Rifai, Windras Mara, Ridho, and Norcahyo (2021)	Minimize total distance between machines and satisfied safety factors	N/A	Static layout	Double-row layout	N/A	N/A	Variable Neighborhood Search approach
412	Ruiz Zúñiga, Flores Garcia, Urenda Moris, Fathi, and Syberfeldt (2021)	Minimize Lead time, distance between department, work in process, buffer capacity, number of transported	N/A	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Simulation base optimization
413	Salas-Moreira, García-Hernández, and Carmona-Muñoz (2021)	Minimize material handling cost	N/A	Static layout	Open field layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Coral Reef Optimization algorithm
414	Salimpour, Pourvaziri, and Azab (2021)	Minimizes material handling cost and the dissimilarity of machine	Cellular manufacturing	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
415	Suh and Choi (2021)	Minimizes material handling	Product layout	Static layout	Spin shape layout	Heterogeneous size	N/A	Genetic Algorithm
416	Z. H. Sun, Liang, Zhuang, Chen, and Ming (2021)	Minimize material flow	N/A	Static layout	N/A	N/A	N/A	Evolution programming

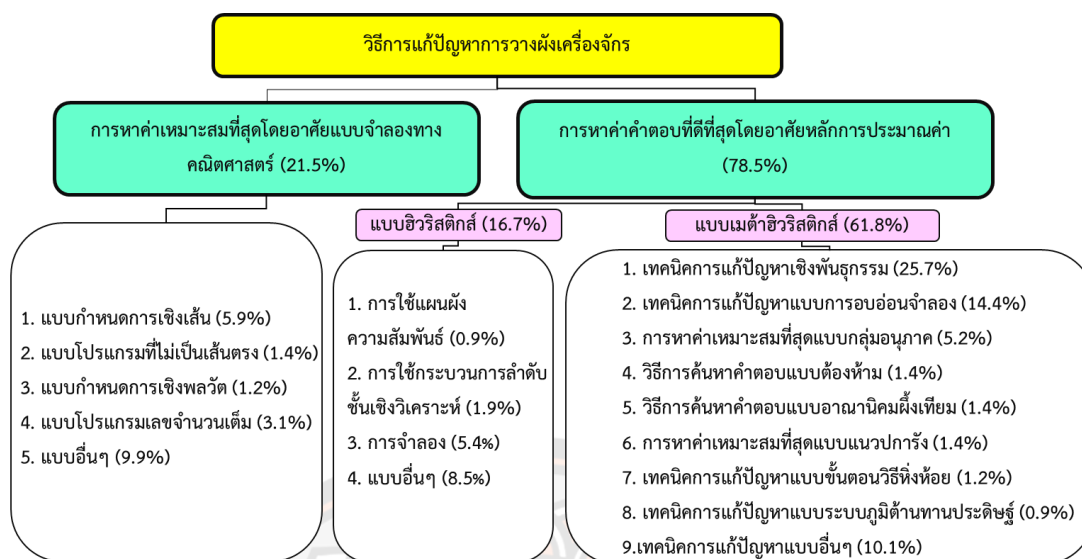
No.	Author	Objective	Problem's characteristic					Solution approaches
			Manufacturing system	Layout Evolution	Layout configuration	Facility shapes consistency	Facility shape	
417	Uribe, Herrán, Colmenar, and Duarte (2021)	Minimize total cost	N/A	Static layout	Multi-row layout	Homogeneous size	Rectangular Shape	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
418	Wan, Zuo, and Zhao (2021)	Minimize the total material handling cost	N/A	Static layout	Double-row layout	N/A	N/A	Mixed Integer Programming
419	C. X. Zhang et al. (2021)	Minimize logistics distance and size	Product layout	Static layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Genetic Algorithm
420	L. Zhao (2021)	Minimize material flow	Product layout	Static layout	Double-Row layout	Heterogeneous size	N/A	Heuristic Approaches
421	Zhun, Liyun, and Xufeng (2021)	Minimize total cost and layout space utilization	N/A	Dynamic layout	N/A	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Pigeon-Inspired Optimization Algorithm
422	X. Zuo et al. (2021)	Minimize total flow cost	N/A	Static layout	Double-Row layout	Heterogeneous size	Rectangular Shape	Evolutionary Algorithm Tabu Search
424	X. Sun, Chou, Koong, Wu, and Chen (2022)	Minimize total flow costs and distance between machine	N/A	Static layout	single-row layout	N/A	N/A	Simulated Annealing
425	<u>This Study</u>	Minimize transportation distances	Flexible manufacturing	Static Layout	Multiple Rows	Heterogeneous size	Rectangular Shape	SSO Shark Smell Optimisation Algorithm

จากการทบทวนวรรณกรรมด้านปัญหาการวางผังเครื่องจักร พบวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการวางผังอำนวยความสะดวก 2 วิธี คือ การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่า โดยจำนวนบทความที่พบสามารถสรุปได้ดังตาราง 6 วิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

ตาราง 6 สัดส่วนของบทความวิจัย สรุปตามวิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

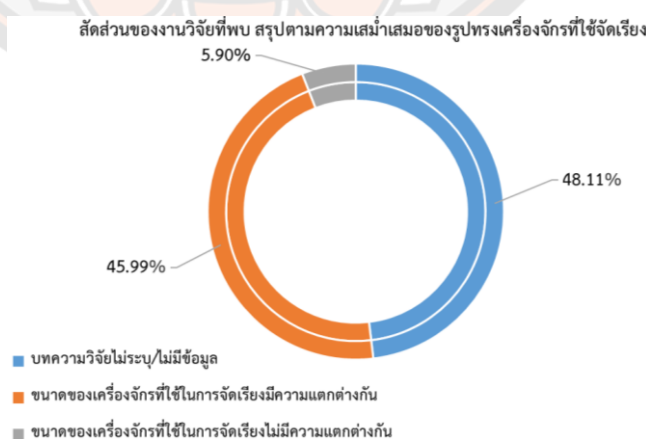
วิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร	
การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	การหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดโดยอาศัยหลักการประมาณค่า
91 บทความ	332 บทความ
คิดเป็นร้อยละ 21.5 ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	คิดเป็นร้อยละ 78.5 ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จึงสรุปได้ว่า ระหว่างปี ค.ศ. 2015 – 2022 วิธีการหาค่าคำตอบโดยอาศัยหลักการประมาณค่า นิยมใช้แก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร โดยนักวิจัยได้ใช้วิธีการดังกล่าวมากถึงร้อยละ 78.5 ทั้งนี้หากพิจารณาในเฉพาะส่วนของวิธีการนี้จะพบว่าวิธีการหาค่าคำตอบแบบเมตาฮิวริสติกส์เป็นวิธีที่มีบทความพูดถึง และถูกประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรมากที่สุด โดยมีสัดส่วนกว่าร้อยละ 61.8 โดยวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่เป็นที่ได้นำมาใช้แก้ไขปัญหานั้นได้แก่ วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการบอบบ์จำลอง และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค วิธีการค้นหาคำตอบแบบตองห้าม วิธีการค้นหาคำตอบแบบอาณานิคมผึ้งเทียม การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบแนวปการัง และแบบอื่น ๆ แต่ทั้งนี้ผู้วิจัยยังไม่พบว่าม้งานวิจัยชิ้นใดที่ใช้วิธีการดมกลืนของฉลาดในการแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร โดยรายละเอียดของวิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร สามารถแสดงได้ดังภาพ 11



ภาพ 11 วิธีการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

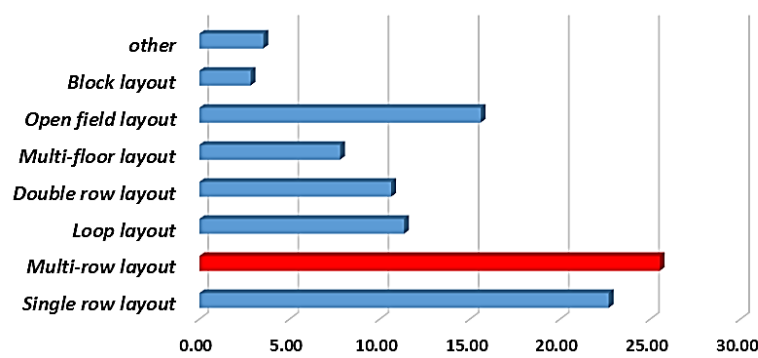
สืบเนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมด้านปัญหาการวางผังเครื่องจักร เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะของปัญหาด้านความสม่ำเสมอของรูปทรงของเครื่องจักรที่ใช้ในการจัดเรียง พบว่าบทความวิจัยส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 46 จากบทความทั้งหมด มีแนวโน้มที่จะมุ่งเน้นแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรที่มีขนาดของเครื่องจักรไม่เท่ากัน กล่าวคือเครื่องจักรมีขนาดความกว้างและยาวแตกต่างกัน ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้สามารถจำลองรูปผังเครื่องจักรได้เสมือนจริงมากกว่าการกำหนดให้ขนาดของเครื่องจักรมีขนาดเดียวกันทั้งหมด โดยรายละเอียดดังกล่าวแสดงได้ดังภาพ 12



ภาพ 12 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปรตามความสม่ำเสมอของรูปทรงเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง

สำหรับคุณลักษณะของปัญหาด้านเค้าโครงของการจัดเรียงของผังเครื่องจักร จากบทความทั้งหมด 424 บทความ พบงานวิจัยที่สามารถสรุปผลได้ตามหัวข้อดังกล่าวทั้งสิ้น 141 บทความ ทั้งนี้สามารถสรุปผลได้ว่าเค้าโครงของผังเครื่องจักรที่นิยมที่สุดคือ การกำหนดเค้าโครงของผังเครื่องจักรแบบหลายแถว (Multi-row layout) ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกันกับงานวิจัยในครั้งนี้ โดยรายละเอียดของสัดส่วนงานวิจัยตามเค้าโครงของการจัดเรียงเครื่องจักรแสดงได้ดังภาพ 13

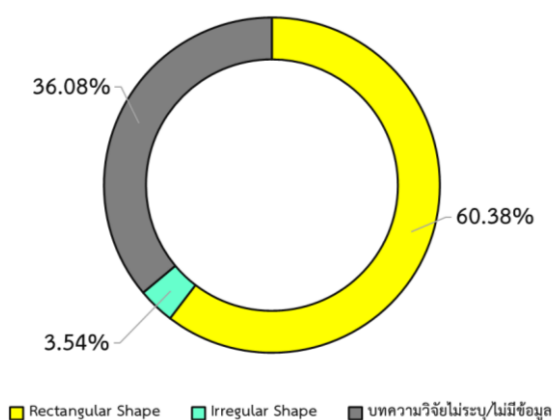
สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามรูปแบบเค้าโครงของการจัดเรียงเครื่องจักร



ภาพ 13 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามรูปแบบเค้าโครงของการจัดเรียงเครื่องจักร

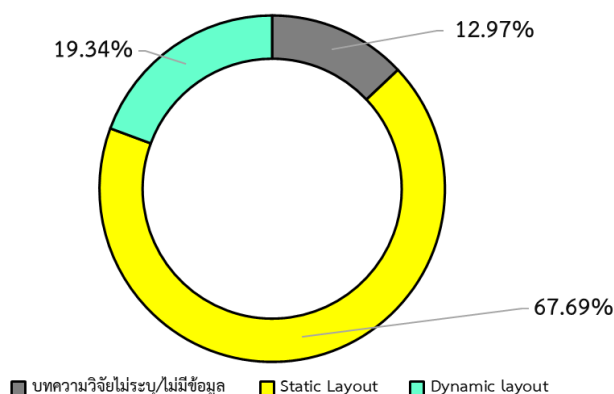
สำหรับลักษณะของรูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง (Facility shape) ผู้วิจัยพบบทความที่แสดงข้อมูลในส่วนนี้ทั้งสิ้น 271 บทความ ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่านักวิจัยส่วนมากกว่าร้อยละ 60.4 กำหนดให้รูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียงเป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากและมีรูปแบบการวิวัฒนาการของผัง (Layout evolution) เป็นแบบสถิต (Static layout) เช่นเดียวกับงานวิจัยในครั้ง นี้ที่ได้กำหนดให้รูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียงเป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากและเป็นผังเครื่องจักรแบบสถิต โดยรายละเอียดของสัดส่วนงานวิจัยที่ได้พบสรุปตามรูปร่างของเครื่องจักร และวิวัฒนาการของผังเครื่องจักร แสดงได้ดัง ภาพ 14 และ ภาพ 15

สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามรูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง



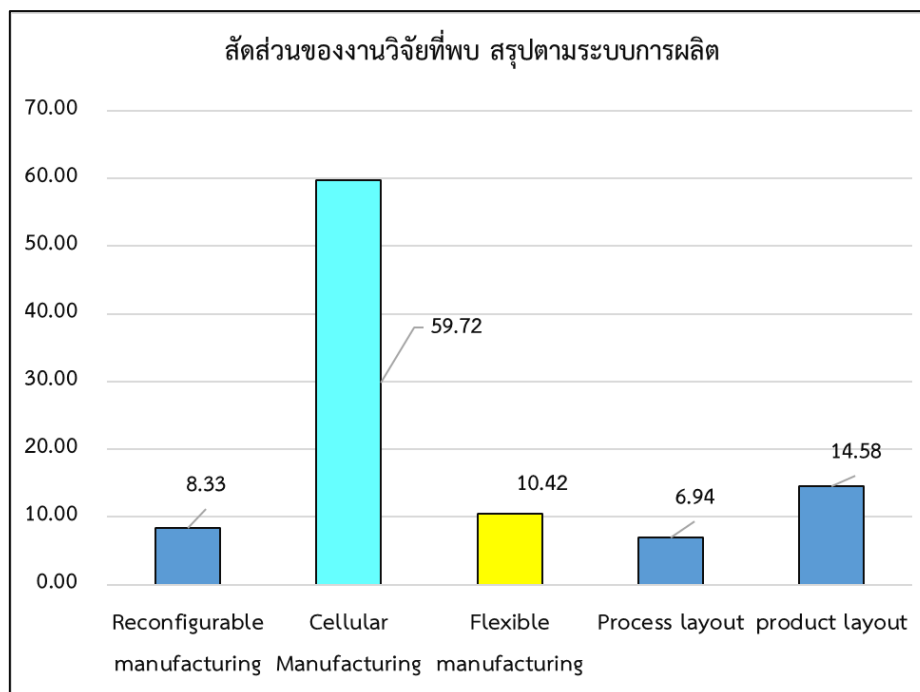
ภาพ 14 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามรูปร่างของเครื่องจักรที่ใช้จัดเรียง

สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามวิวัฒนาการของผังเครื่องจักร



ภาพ 15 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามวิวัฒนาการของผังเครื่องจักร

ทั้งนี้จากทั้งหมด 424 บทความ พบว่ามีงานวิจัยที่ระบุได้ถึงระบบการผลิตอยู่ทั้งสิ้น 144 บทความ โดยพบว่ากว่าร้อยละ 59.7 ของบทความเหล่านั้นมีผังการผลิตตั้งอยู่บนระบบการผลิตแบบเซลล์ลาร์ (Cellular manufacturing system) ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยในครั้งนี้ โดยงานวิจัยในครั้งนี้เป็นระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible manufacturing system) ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่ผู้วิจัยได้สนใจเนื่องด้วยเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่ได้ใช้ระบบการผลิตประเภทนี้ โดยสัดส่วนของงานวิจัยที่พบสรุปตามระบบการผลิตแสดงได้ดังภาพ



ภาพ 16 สัดส่วนของงานวิจัยที่พบ สรุปตามระบบการผลิต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาคำตอบโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหาคำตอบโดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม โดยใช้คำสำคัญในการค้นหาคือ "Shark Smell" จากฐานข้อมูล Scopus, Web of science และ IEEE ตั้งแต่วันที่ 2015 – 2022 พบงานวิจัยทั้งสิ้น 61 บทความ เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ศึกษาสนใจ 58 บทความ เพื่อศึกษาถึงเนื้อหา และแนวทางในการทำวิจัย ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้กำหนดรายละเอียดของตารางการทบทวนวรรณกรรมได้แก่ จุดประสงค์การวิจัย รูปแบบปัญหาที่ถูกแก้ไข โดยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม และสิ่งใหม่ที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการดมกลิ่นของฉลาม ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังตาราง 7

ตาราง 7 รายละเอียดของการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีการดมกลืนของฉลาม (SSO)

No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
1	Abedinia and Amjady (2015)	Forecasting	Maximum The number of hidden nodes in a neural network	Neural network – Based Chaotic-SSO	N/A	N/A	4	0.9	0.1
2	Abedinia et al. (2014)	Power Load frequency control problem	N/A	Original SSO	N/A	N/A	4	0.9	0.1
3	Ahmadigorji and Amjady (2016)	Electric power distribution	Minimizing the total investment and operation costs.	Binary Chaotic-SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Gnanasekaran, Chandramohan, Kumar, and Mohamed Imran (2016)	Economic load dispatch	Evaluate the balance between cost and risk	Original SSO	100	N/A	4	0.9	0.5
5	Gnanasekaran et al. (2016)	Capacitors Utilization	Minimizing the energy loss and the cost of reactive power compensation	Original SSO	75	20	4	0.9	0.1
6	Ahmadigorji et al. (2017)	Multiyear expansion planning of distribution systems (MEPDS)	Minimizes the total investment, operation, and emission costs	Improved Shark Smell Optimisation (ISSO)	100	80	N/A	N/A	N/A
7	Setayeshi, Rad, Noruzi, and Yousefi (2017)	Power system control	N/A	Chaotic-Shark Smell Optimisation Algorithm (CSSO)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
8	Bagheri et al. (2018)	The reactive power dispatch problem	Satisfy Voltage deviation, the total voltage stability and real power loss.	Multi-objective Shark Smell Optimisation (MOSSO) Algorithm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Fouladi and Mojallali (2018)	Adaptive backstepping controller	Minimize the proposed cost function	Original SSO	30	50	2.49 82	0	1.4e -7
10	Juma, Muriithi, and Ngoo (2018)	Power system control	Minimize power losses while maintaining the operating constraints	Modified SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
11	Liang et al. (2018)	Fuel cell system islanding detection and control	Optimal signal selection to reduce the detection failure	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Mohammad-Azari, Bozorg-Haddad, and Chu (2018)	N/A	N/A	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
13	Mohammadi, Talebpour, Safaei, Ghadimi, and Abedinia (2018)	Short term load forecast (STLF)	Maximize the relevancy and minimizing the redundancy.	Original SSO	100	30	N/A	N/A	N/A
14	Shao et al. (2018)	Signal selection	Minimize prediction error	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
15	Fawzi, El-Fergany, and Hasanien (2019)	Polarization curves Prediction	Minimize the sum of squared deviations (SSD)	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Han, Li, Yu, and Ebrahimi (2019)	Parameter estimation	N/A	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
17	Nastase et al. (2019)	Hydropower Optimisation Problem,	Optimal values of the storage capacity	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
18	Rao, Shao, Ahangamejad, Gholamalizadeh, and Sobhani (2019)	Benchmark Problem	Minimized is in SSE (sum of squared error)	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
19	Salami, Umoh, Adedokun, Mu'Azu, and Ajao (2019)	Internet protocol traceback	Find the DOS attacker by flash back and IP traceback	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
20	Sedaghat and Hosseinzadeh (2019)	Medical image classification	Maximize the space between the 2 mentioned hyper-planes	Chaotic-SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
21	Suliman, Yousif, and Bashir (2019)	Cloud Job scheduling	Minimize Jobs execution time	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
22	Verma and Om (2019)	Multi-document summarization	Minimize the redundancy and Maximize the coverage.	Original SSO	100	100	0.37	0.75	0.56
23	L. X. Wei, Zhao, Fan, and Zhou (2019)	Parameter Finding	N/A	Improved SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
24	Y. Wei and Stanford (2019)	Solid oxide fuel cell Parameters finding	Optimum parameters of the solid oxide fuel cell	Chaotic Binary SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
25	S. Chen, Gholami Farkoush, and Leto (2020)	Benchmark Problem	N/A	Improved SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
26	Hosseinzadeh (2020)	Gabor filters	N/A	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
27	L. Li, Yin, Jia, and Sobhani (2020)	Numerical Weather Forecasting	N/A	Combination of SSO and fuzzy clustering	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
28	Seifi, Moradi, Abedini, and Jahangiri (2020)	Wind power storage management	N/A	Combination of GWO and SSO	200	100	N/A	N/A	N/A
29	Sreedharan and Pete (2020)	Decision making problem	Minimize communication cost of intracluster	Hybrid SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	L. Wang, Wang, Sheng, and Lu (2020)	Velocity Trajectory optimization	Satisfied the objective	Improved Multi-objective SSO	200	40	1.3	0.2	0.15
31	L. Xu et al. (2020)	Fusion of the medical images	N/A	Hybrid SSO - WCO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
32	Y. Zhou et al. (2020)	Medical imaging	N/A	Modified SSO	100	N/A	4	0.9	0.1
33	Ahamad, Alam Hameed, and Akhtar (2020)	Cloud Security	Minimize cyber cloud security risk	Hybrid Jaya – SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
34	Ahmed and Abdulhameed (2020)	Fingerprint recognition	Minimize Fingerprint recognition	Modified SSO	N/A	128	N/A	1	1
35	Anwit, Tomar, and Jana (2020)	Data acquisition and planning (Multi Sink tour planning problem)	Minimize the overall tour length	Original SSO	N/A	N/A	4	0.9	0.1
36	Z. Huang, Liu, Du, and Yang (2020)	Thermal error analysis	Minimize the number of temperature sensors	Artificial neural network (ANN)-SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

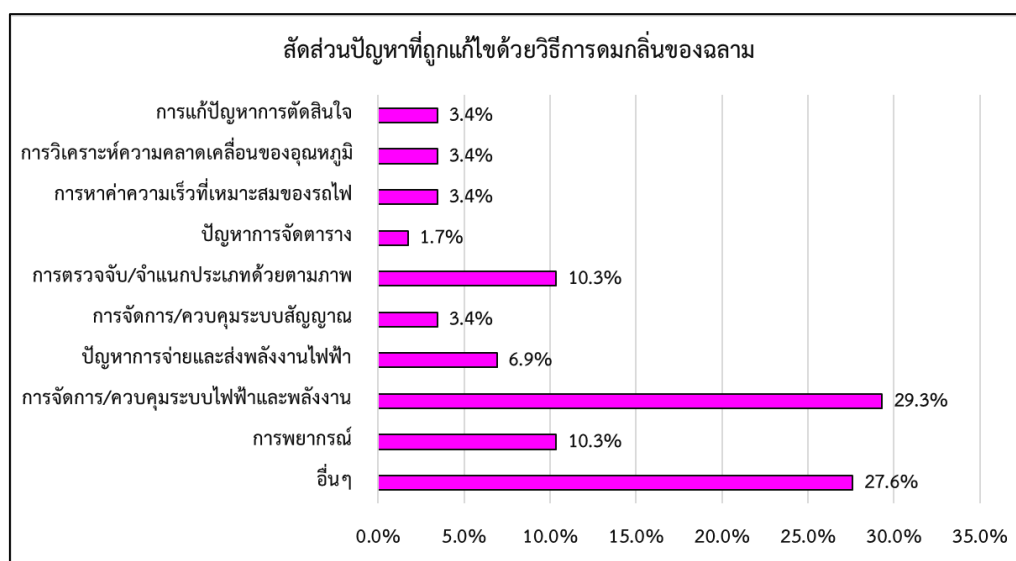
No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
37	Seifi, Ehteram, and Soroush (2020)	Instantaneous influent flow predictions	Minimize mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE)	Hybrid Multi-objective SSO	600	500	1	N/A	0.7
38	Sreedharan and Pete (2020)	Multicriteria decision-making problem	Minimize energy utilization of the sensor node	Hybrid SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
39	L. Wang, Wang, Liu, and Sheng (2020)	Train operation process	Minimize total energy, Accurate parking, and comfort index	Multi-objective SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
40	Q. Wu and Shafiee (2020)	Solid Oxide Fuel Cell problem	Minimize mean square error (MSE)	Binary SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
41	Z. Wu, Qi, Shang, and Shen (2020)	Grid-connected equivalent	Satisfied objective function	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
42	Anteneh, Khan, Mahela, Alhelou, and Guerrero (2021)	Network reconfiguration problem	Minimize power loss	Modified SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
43	Cuevas, Castillo, and Cortes (2021)	Type-2 fuzzy logic controller	Maximize tracking performance Minimized disturbance	Variant of SSO	1500	30	N/A	N/A	N/A
44	Cuevas, Castillo, and Cortes-Antonio (2021)	Benchmark control problems.	Maximize tracking performance	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
45	Dudi and Rajesh (2021)	Plant leaf classification	Maximize classification accuracy	SSO-based whale optimization algorithm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
46	Femila (2021)	Wireless ad hoc sensor networks	Maximize Energy utilization	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
47	Z. Huang, Liu, Liao, and Cao (2021)	Thermal error analysis	Minimize thermal error predictions	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
48	Nazif (2021)	Urban transport network design	Maximize the direct travelers per unit length	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
49	Rezaei, Mousavi, Moridi, Eshaghi Gordji, and Karami (2021)	Prediction of groundwater level	Minimize prediction error	Original SSO	100	200	4	N/A	N/A
50	Rui, Wu, Zhao, and Khamesinia (2021)	Internet Load balancing	Maximize Energy utilization	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
51	Shekhar Singh (2021)	Power Allocation	Maximize the minimum signal to noise ratio, Maximize network throughput utility and energy efficiency	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
52	Tian, Liao, and Farkoush (2021)	Power management	Minimize energy prediction error	Improved SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
53	L. Wang and Xue (2021)	Power management	Minimize predictions error (RMSE)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

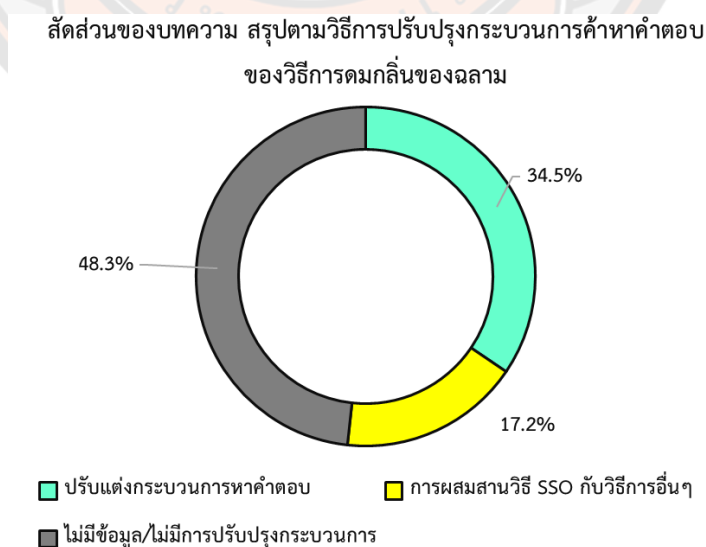
No.	Authors	Optimisation problems	Objectives	Type of SSO	Parameters Settings				
					K_{max}	NP	β_k	η_k	α_k
54	Cuevas, Castillo, and Cortes-Antonio (2022)	Tracking controllers Benchmarking Problem	N/A	Fuzzy- SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
55	L. P. Huang (2022)	Zone-level building energy management	Minimize energy consumption Maximize energy utilization	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
56	Madhusudhan, Udaya Rani, and Hegde (2022)	Finger Vein Recognition	Maximize recognition accuracy	Original SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
57	Manjunath, Kodanda Ramaiah, and GiriPrasad (2022)	Audio steganography (Secret messages)	Minimizes the distortion error Mean Squared Error (MSE)	Improved SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
58	Niranjan Singh and Khaiyum (2022)	Catastrophic forgetting problem	N/A	Hybrid SSO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
59	This study	Machine layout problems	Minimize internal transportation distances	Modified Shark Smell Optimisation	[1*]	[1*]	[0.4]	[0,1]	[0,1]

หมายถึง SSO หมายถึง Shark Smell Optimisation algorithm, [1] หมายถึงเป็นสมการของจำนวนเต็มบวก

จากตาราง 7 แสดงให้เห็นถึงบทความวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไข้ปัญหาต่าง ๆ ทั้งนี้สัดส่วนปัญหาที่ถูกแก้ไข้ด้วยวิธีการดมกลืนของฉลาม และสัดส่วนของวิธีการปรับปรุงกระบวนการค้าหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลาม แสดงได้ดังภาพ 17 และภาพ 18



ภาพ 17 สัดส่วนของบทความ สรุ้ตามสัดส่วนปัญหาที่ถูกแก้ไข้ด้วยวิธีการดมกลืนของฉลาม

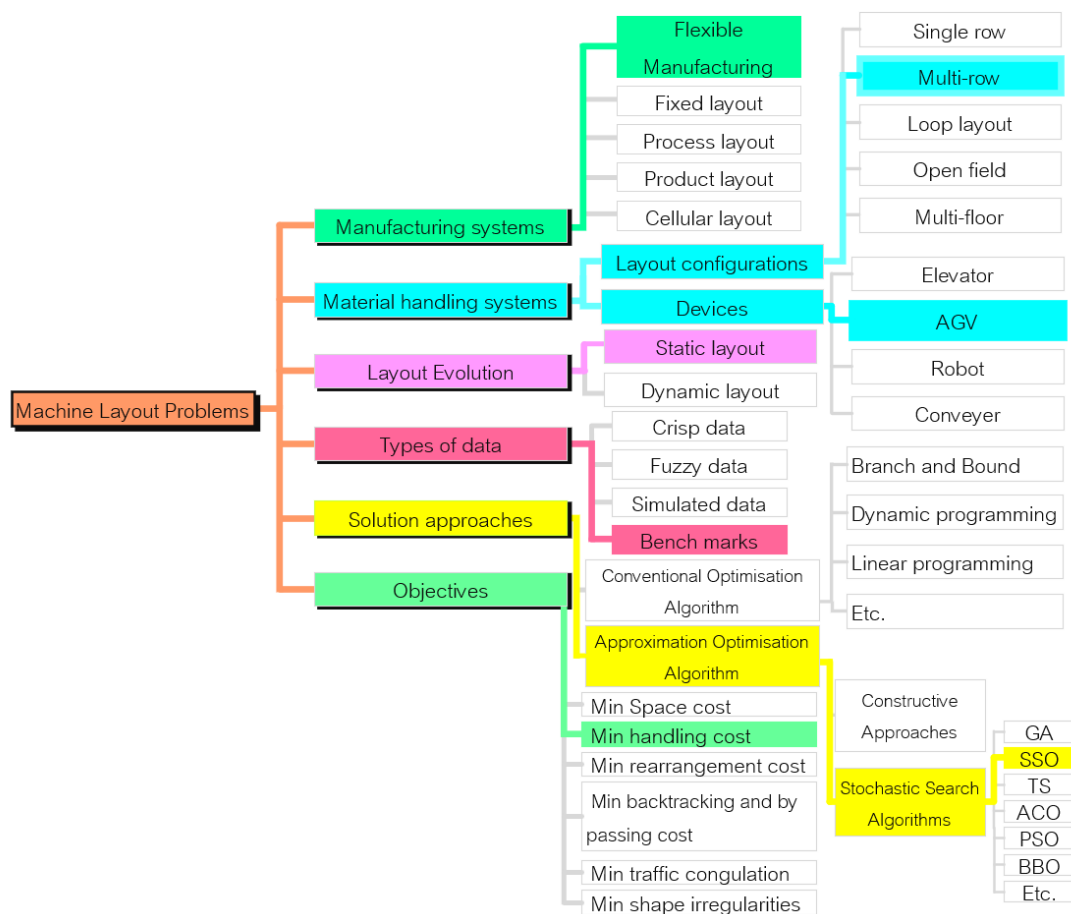


ภาพ 18 สัดส่วนของบทความ สรุ้ตามวิธีการปรับปรุงกระบวนการค้าหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลาม

จากภาพ 17 พบว่าวิธีการดมกลืนของฉลาม ถูกใช้ในการแก้ไขปัญหามากมาย โดยกว่าร้อยละ 29.3 ของบทความวิจัยเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ และการจัดการพลังงาน และอีกกว่าร้อยละ 10.3 ถูกนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาคอมพิวเตอร์ การจัดการจราจร ภาพ และการพยากรณ์ และมีส่วนน้อยที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาอื่น ๆ เช่น ปัญหาคอมพิวเตอร์ การส่งสัญญาณ, การสรุปความคล้ายคลึงของเอกสาร, การหาค่าความเร็วระหว่างการเดินรถไฟ และการติดตามสัญญาณอินเตอร์เน็ตย้อนกลับ แต่ทั้งนี้ยังไม่พบบทความที่ใช้วิธี SSO ในการแก้ไขปัญหาวางผังเครื่องจักรมาก่อน

ในส่วนการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการค้นหาคำตอบของวิธี SSO ผู้วิจัยพบว่าจากบทความทั้งสิ้น 58 บทความ กว่าร้อยละ 34.5 นั้นได้ปรับปรุงวิธีการดมกลืนของฉลามโดยใช้กลยุทธ์แบบการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบ (Modification) และกว่าร้อยละ 17.2 ใช้กลยุทธ์การปรับปรุงคำตอบแบบผสมผสาน (Hybridization) ดังรายละเอียดภาพ 18

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาในเรื่องของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรตลอดจนวิธีการแก้ปัญหา พบว่างานวิจัยในครั้งนี้นี้มีความสามารถที่จะเติมเต็มช่องว่างระหว่างงานวิจัย (Research Gap) ได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามแก้ไขปัญหาวางผังเครื่องจักรมาก่อน โดยคุณลักษณะของปัญหาวางผังเครื่องจักร และวิธีการแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยสามารถแสดงได้ดังภาพ 19



ภาพ 19 แผนภูมิแสดงคุณลักษณะของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรในงานวิจัยครั้งนี้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ เครื่องมือและการพัฒนาเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การดำเนินการวิจัยให้บรรลุตามจุดมุ่งหมายของการศึกษาที่กำหนด ข้อมูลและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงานมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

คอมพิวเตอร์แบบพกพา 1 เครื่องสำหรับการสร้างแบบจำลองการทำงานตามขั้นตอนของกระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวิธีการดมกลืนของฉลาม สำหรับการหาการจัดเรียงเครื่องจักรโดยมีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core i5 2.30GHz, หน่วยความจำหลัก (RAM) 8GB., ความจุ (Hard Disk) 1.0 TB. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 10 , และโปรแกรม Microsoft Office Excel สำหรับการเรียกใช้งาน Visual Basic for Applications (VBA) เป็นเครื่องมือหลักในการพัฒนาโปรแกรม เพื่อเก็บรวบรวมผลการทดลองและเวลาที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม Minitab 16 เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

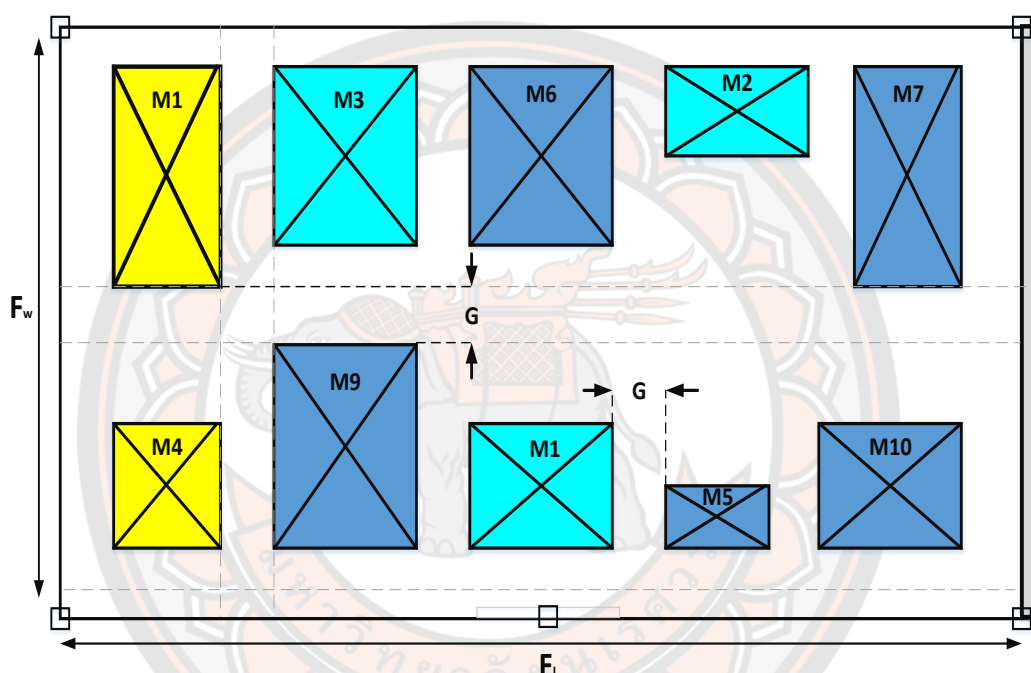
ข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 4 ประเภทคือ รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักร ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขนถ่ายวัสดุ ข้อมูลลำดับการผลิต และข้อมูลเครื่องจักร โดยผังการผลิตตั้งอยู่บนระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่สามารถควบคุมให้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ทำให้การผลิตที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดการผลิตที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า โดยลำดับการขนถ่ายวัสดุจะยึดตามกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบ ทั้งนี้รายละเอียดของชุดข้อมูลแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักร

การจัดเรียงเครื่องจักรในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบ โดยงานวิจัยในครั้งนี้ผู้ดำเนินงานวิจัยศึกษาเฉพาะการจัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายแถว (Multiple rows layout) ที่ใช้รถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ (Automated Guided Vehicle: AGV) เป็นระบบขนถ่ายวัสดุ

สำหรับในส่วนในพื้นที่โรงงานที่ถูกใช้ในการจัดเรียงเครื่องจักรถูกกำหนดให้มีพื้นที่รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยมีทราบความกว้าง (Floor width: F_w) และความยาว (Floor length: F_L)

นอกจากนี้งานวิจัยยังได้กำหนดให้มีช่องว่างระหว่างเครื่องจักรแต่ละเครื่อง (Gap: G) ซึ่งได้ถูกกำหนดให้ช่องว่างดังกล่าวนี้เป็นระยะห่างระหว่างของผนังเครื่องจักรกับเครื่องจักรซึ่งถูกใช้เป็นเส้นทางการเดินทางของรถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ โดยค่า G ดังกล่าวกำหนดให้มีหน่วยนับเป็นเมตร แสดงได้ดังภาพ 20

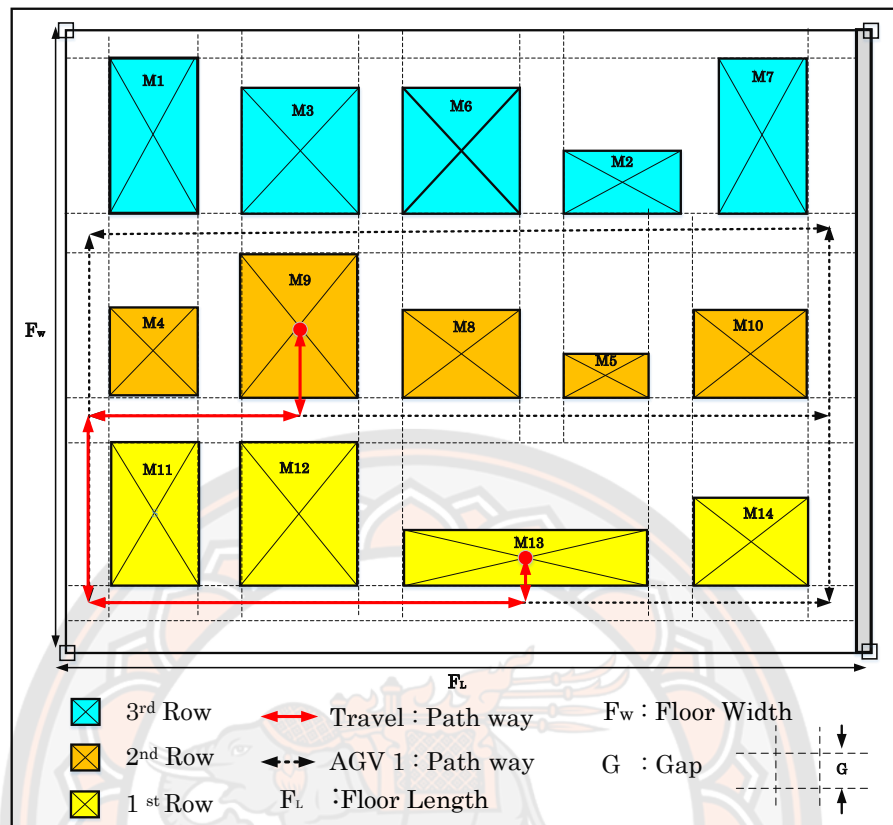


ภาพ 20 การจัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายแถว (Multi-row layout)

ที่มา: ปรับปรุงจาก Drira et al. (2007)

2. ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ

ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติให้เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น โดยตัวอย่างของลักษณะการเคลื่อนที่สามารถจำลองได้ดังภาพ 21



ภาพ 21 การเดินทางของรถ AGV1 และตัวอย่างเส้นทางการขนถ่ายวัสดุ

ที่มา: ปรับปรุงจาก พัทธกรธรณ์ อริยะวงษ์ (2550)

ระยะทางการเดินทางของรถ AGV มีฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) สำหรับปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายแถว พงศ์อมร วังตา (2554) แสดงได้ดังสมการ (8)

$$\text{Min } Z \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M f_{ij} D_{ij} \quad ; i \neq j \quad (8)$$

โดยที่

Z = ระยะทางรวมที่น้อยที่สุด

M = จำนวนเครื่องจักรทั้งหมด

f_{ij} = ความถี่ของการไหลของผลิตภัณฑ์ระหว่างเครื่องจักร i ไป j ครั้ง

D_{ij} = ระยะทางจากจุดกึ่งกลางเครื่องจักร i เครื่องจักรไปกึ่งกลางเครื่องจักร j เมตร

3. ข้อมูลของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร

เพื่อความหลากหลายของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง งานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำรูปแบบของปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรที่แตกต่างกัน ทั้งหมด 5 ชุดปัญหามาใช้ในการทดลองซึ่งรายละเอียดของชุดข้อมูลสามารถแสดงได้ดังตาราง 8

ตาราง 8 ชุดของข้อมูล จำนวนเครื่องจักร และจำนวนผลิตภัณฑ์

ชุดข้อมูล	จำนวนเครื่องจักร	จำนวนผลิตภัณฑ์	แหล่งที่มาของข้อมูล
1	10	3	Nearchou (2006)
2	15	9	Nearchou (2006)
3	20	5	Nearchou (2006)
4	30	10	Nearchou (2006)
5	30	27	ณัฐพงษ์ คำขาด (2551)

จากตาราง 8 แต่ละชุดข้อมูลจะมีจำนวนผลิตภัณฑ์ และลำดับความต้องการใช้เครื่องจักรที่แตกต่างกันออกไป สามารถแสดงได้ดังตาราง 9 และตาราง 10

ตาราง 9 ลำดับความต้องการในการใช้งานเครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 1, 2, 3, 4, 5

Dataset	Required Machine Sequence
(1) 10 Machine, 3 Parts	
Part no. 1	2-1-6-5-8-9-3-4
Part no. 2	10-8-7-5-9-6-1
Part no. 3	9-2-7-4
(2) 20 Machine, 5 Parts	
Part no. 1	4-2-3-12-1-9-16-18-5-8-20-15-14-6-11
Part no. 2	10-9-1-3-18-17-5-6-2-11-4
Part no. 3	17-11-6-8-7-15-16-9-1-20
Part no. 4	14-17-11-3-16-5-13-18-20-19-12-10-6-8-15
Part no. 5	6-18-8-4-2-7-5-9-14-19-1-20-10-16-11-15-13-12

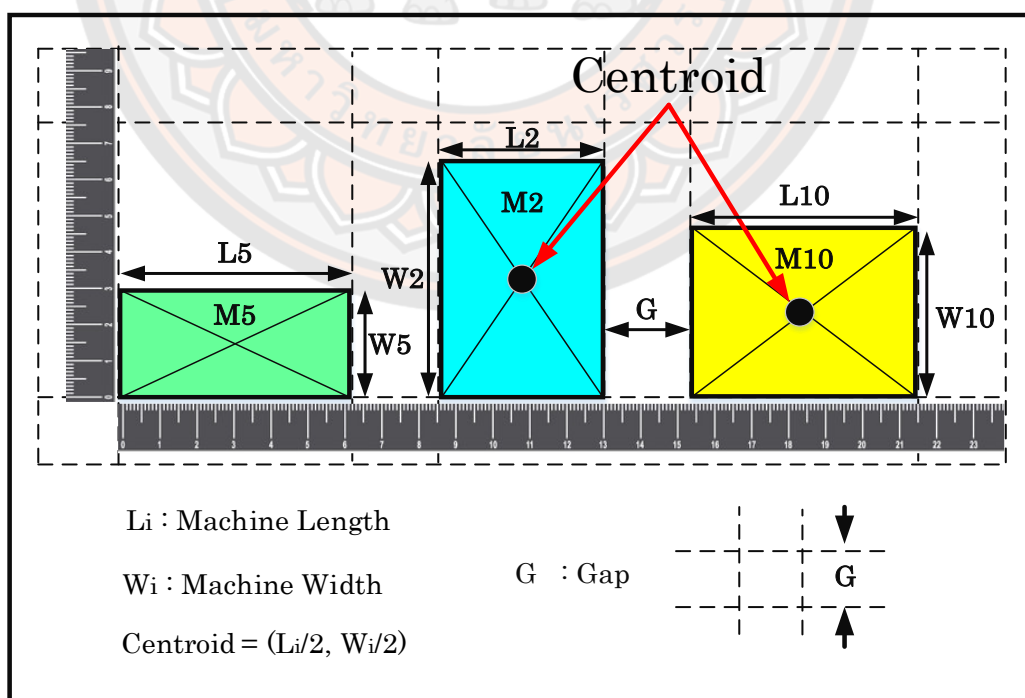
Dataset	Required Machine Sequence
(3) 15 Machine, 9 Parts	
Part no. 1	4-2-5-1-6-8-14-9-11-3-15-12
Part no. 2	3-2-11-14-11-1-7-10-4-5-13-6-9
Part no. 3	5-6-11-15-2-12-3-4
Part no. 4	10-9-4-14-2-3-15-8
Part no. 5	11-2-4-14-5-3-15
Part no. 6	8-10-12-11-15-13-1-14-4-5-3
Part no. 7	5-11-10-3-7-13-9-1
Part no. 8	7-3-2-8-4-10-6-15-13-9-1
Part no. 9	11-13-3-1-12-14-4-8-9-2
(4) 30 Machine, 10 Parts	
Part no. 1	6-3-4-18-5-1-14-24-26-7-11-30-23-21-13-27-9-16-17-2-25-8-15
Part no. 2	17-9-11-8-10-22-24-13-2-29-23-21-25-16-4-29-26-18-15-12-27-6-3-7-28
Part no. 3	13-2-6-29-21-3-14-24-12-15-17-8-1-22-28-10-7-30-20-19
Part no. 4	7-2-6-11-21-8-16-30-1
Part no. 5	3-17-1-2-20-22-8-6-26-19-14-11-15-12-7-16-21-10-28-23-18-4-27-24-25-13-30-9-5
Part no. 6	30-9-2
Part no. 7	15-9-30-19-12-3-6-5-8-14-7-28-23-1-29-24-27-2-13-4-26-16-11-10-25-21-22-20-18
Part no. 8	7-19-5-4-9-16-3-14-28-13-11-2-21-10-17-22-26-23-29-30
Part no. 9	21-4-1-6-11-22
Part no. 10	12-6-17-15-13-30-26-18-14-9-7-11-23-2-4-25-24

Dataset	Required Machine Sequence
(5) 30 Machine, 27 Parts	
Part no. 1	2-1-6-5-8-9-3-4
Part no. 2	10-8-7-5-9-6-1
Part no. 3	9-2-7-4
Part no. 4	4-2-3-12-1-9-16-18-5-8-20-15-14-6-11
Part no. 5	10-9-1-3-18-17-5-6-2-11-4
Part no. 6	17-11-6-8-7-15-16-9-1-20
Part no. 7	14-17-11-3-16-5-13-18-20-19-12-10-6-8-15
Part no. 8	6-18-8-4-2-7-5-9-14-19-1-20-10-16-11-15-13-12
Part no. 9	4-2-5-1-6-8-14-9-11-3-15-12
Part no. 10	3-2-15-14-11-1-7-10-4-5-13-6-9
Part no. 11	5-6-11-15-2-12-3-4
Part no. 12	10-9-4-14-2-3-15-8
Part no. 13	11-2-4-14-5-3-15
Part no. 14	8-10-12-11-15-13-1-14-4-5-3
Part no. 15	5-11-10-3-7-13-8
Part no. 16	7-3-2-8-4-10-6-15-13-9-1
Part no. 17	11-13-3-1-12-14-4-8-9-2
Part no. 18	6-3-4-18-5-1-14-24-26-7-11-30-23-21-13-27-9-16-17-2-25-8-15
Part no. 19	17-9-11-8-10-22-24-13-2-29-23-21-25-16-4-20-26-18-15-12-27-6-3-7-28
Part no. 20	13-2-6-29-21-3-14-24-12-15-17-8-1-22-28-10-7-30-20-19
Part no. 21	7-2-6-11-21-8-16-30-1
Part no. 22	3-17-1-2-20-22-8-6-26-19-14-11-15-12-7-16-21-10-28-23-18-4-27-24-25-13-30-9-5
Part no. 23	30-9-2

Dataset	Required Machine Sequence
Part no. 24	15-9-30-19-12-3-6-5-8-14-7-28-23-1-29-24-27-2-13-4-26-16-11-10-25-21-22-20-18
Part no. 25	7-19-5-4-9-16-3-14-28-13-11-2-21-10-17-22-26-23-29-30
Part no. 26	21-4-1-6-11-22
Part no. 27	12-6-17-15-13-30-26-18-14-9-7-11-23-2-4-25-24

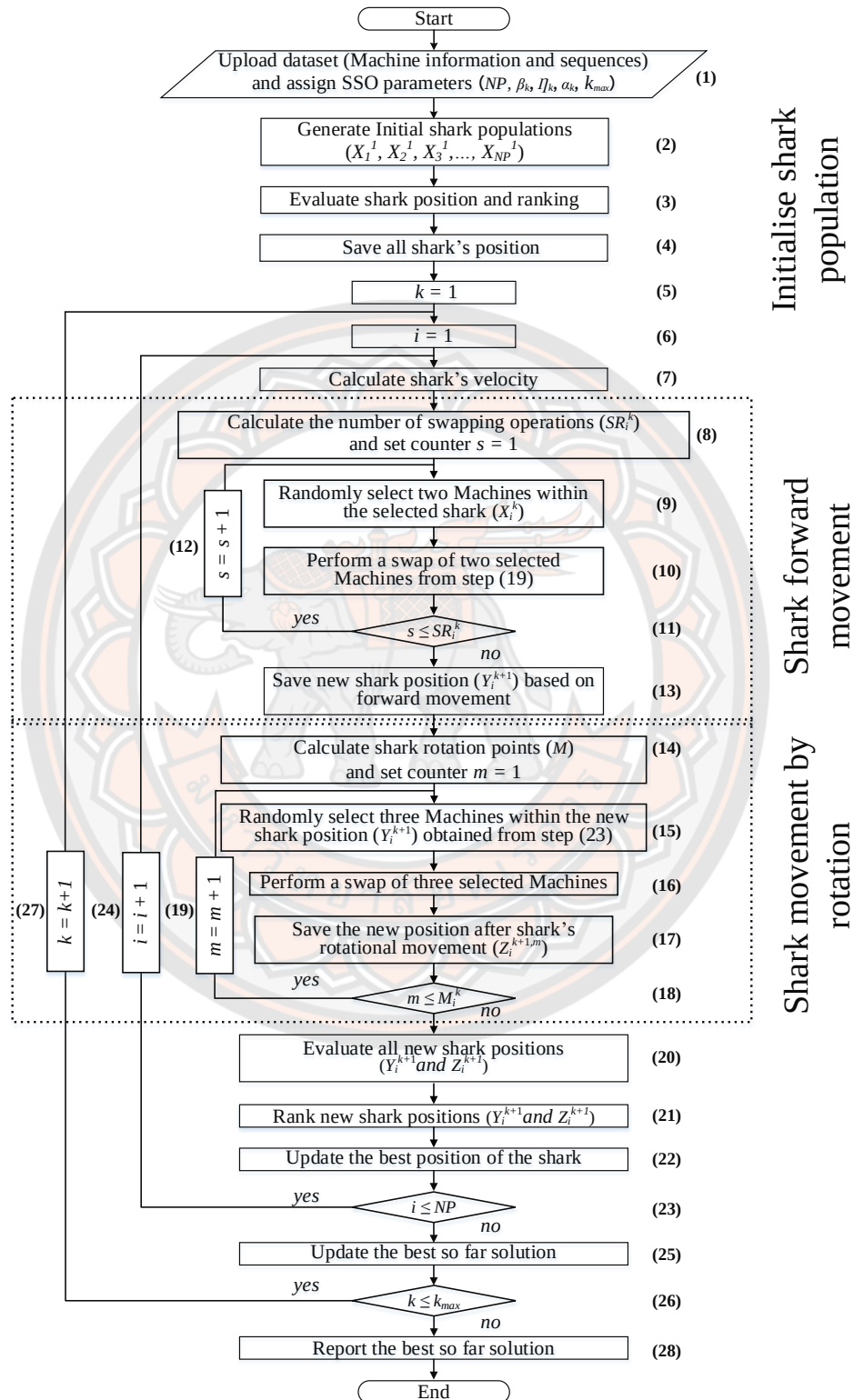
4. รายละเอียดของเครื่องจักร

ข้อมูลเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องจักร (Machine: M) ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยมีด้านกว้างแทนด้วยสัญลักษณ์ W_i และด้านยาวแทนด้วยสัญลักษณ์ L_i โดยที่ i เป็นเลขกำกับของเครื่องจักรนั้น ๆ ที่จะถูกวางห่างกันเป็นระยะ G (Gap) ทั้งนี้ตำแหน่งการปฏิบัติงานของเครื่องจักรให้อยู่ที่จุดกึ่งกลางเครื่องจักร (Centroid) ทั้งนี้ให้หน่วยนับระยะของการจัดเรียงผังเครื่องจักรมีค่าเป็น เมตร (Meter) โดยแสดงได้ดังภาพ 22 ข้อมูลตัวเลขของความกว้างยาวผู้ดำเนินการวิจัยได้แสดงไว้ดังตาราง 10



ภาพ 22 รายละเอียดของเครื่องจักร

การประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร



ภาพ 23 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธี SSO เพื่อแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

ในปี 2014 วิธีการดมกลืนของฉลามได้ถูกคิดค้นขึ้น โดยถูกนำไปใช้แก้ไขปัญหามหาสมุทรทางคณิตศาสตร์ และปัญหาแบบต่อเนื่อง (Continuous problem) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามแก้ไขปัญหาวางผังเครื่องจักร (Machine Layout Problem: MLP) ซึ่งเป็นปัญหาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete problem) และเป็นปัญหาเชิงการจัด (Combinatorial problem) ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา โดยขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธี SSO เพื่อแก้ปัญหาวางผังเครื่องจักรแสดงได้ดังภาพ 23

กระบวนการทำงานของวิธี SSO เพื่อแก้ปัญหาวางผังเครื่องจักร มีทั้งสิ้น 28 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 เป็นกระบวนการสร้างกลุ่มประชากรฉลามเริ่มต้น ขั้นตอนที่ 7 ถึง 13 เป็นการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Shark forward movement) ขั้นตอนที่ 14 ถึง 18 เป็นการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่หมุนวน (Shark movement by rotation) และขั้นตอนที่ 19 ถึง 28 เป็นกระบวนการการเปรียบเทียบและจัดเก็บคำตอบ โดยรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

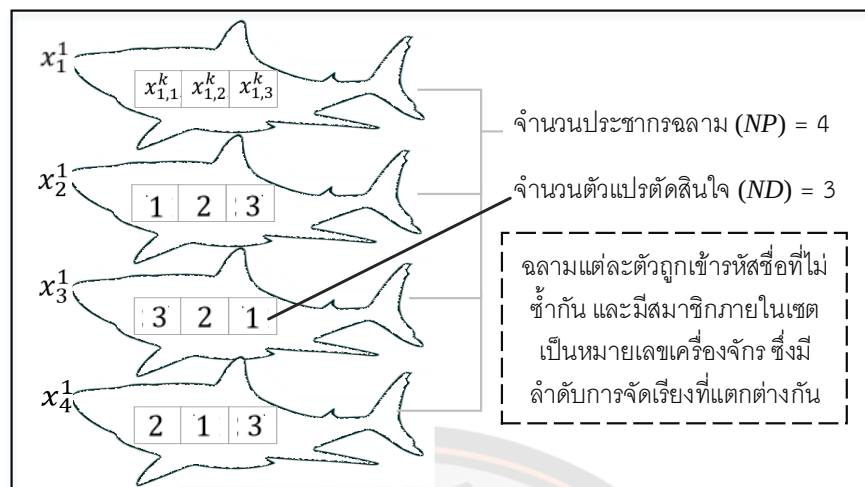
ขั้นตอนที่ 1 การรับเข้าข้อมูล และกำหนดค่าพารามิเตอร์

รับเข้ารายละเอียดข้อมูลของชุดปัญหา ได้แก่ ขนาดของเครื่องจักร จำนวนเครื่องจักรสูงสุด (N_m) ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นกระบวนการค้นหาคำตอบของ SSO ได้แก่ ขนาดของจำนวนประชากรฉลาม (NP), จำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (k_{max}), อัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม (β_k), ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม (η_k), สัมประสิทธิ์ความเฉื่อยของฉลามหรืออัตราโมเมนตัม (α_k)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างคำตอบเริ่มต้นของกลุ่มประชากรฉลาม

สร้างคำตอบเริ่มต้นตามขนาดของจำนวนประชากรฉลาม (NP) และจำนวนเครื่องจักรสูงสุด (N_m) ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 โดยคำตอบที่สร้างขึ้นเปรียบเสมือนตำแหน่งของฉลามที่ว่ายอยู่ในน้ำ ณ ตำแหน่งที่ต่างกัน กล่าวอีกนัยหนึ่ง ฉลาม 1 ตัว คือ 1 คำตอบ (Solution) ที่มีลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ที่แตกต่างกัน เนื่องจากสมาชิกตัวการแปรตัดสินใจ (ND) มีค่าแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของเครื่องจักรที่ถูกจัดเรียง

จากภาพภาพ 24 สามารถอธิบายได้ว่า คำตอบเริ่มต้นทั้งหมดจะถูกสร้างขึ้นอย่างสุ่มให้มีจำนวนคำตอบ (Solutions) ทั้งหมดเท่ากับ (NP) คำตอบ ทั้งนี้คำตอบจะถูกกำหนดโดยมีรูปแบบการจัดเก็บในลักษณะของเซต (Set) โดยมีสมาชิก (Subset) ถูกแทนด้วยหมายเลขเครื่องจักร ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก (Positive integer)



ภาพ 24 ภาพตัวอย่างคำตอบ 4 คำตอบที่มีสมาชิกภายในแตกต่างกัน

ตัวอย่างการสร้างคำตอบเริ่มต้นของ Dataset 1 ที่มีจำนวนเครื่องจักรที่ต้องทำการจัดเรียงหรือตัวแปรการตัดสินใจ (ND) ทั้งหมด 10 เครื่องประกอบด้วยเครื่องจักรรหัส M1, M2, M3, ..., M10 และสมมุติให้จำนวนประชากรของฉลาม (NP) เท่ากับ 5 ดังนั้นคำตอบเริ่มต้น $k = 1$ ที่เป็นไปได้สามารถแสดงได้ดังตาราง 11

ตาราง 11 การสร้างคำตอบเริ่มต้นของประชากรฉลาม

X_i^1	$X_{i,1}^1$	$X_{i,2}^1$	$X_{i,3}^1$	$X_{i,4}^1$	$X_{i,5}^1$	$X_{i,6}^1$	$X_{i,7}^1$	$X_{i,8}^1$	$X_{i,9}^1$	$X_{i,10}^1$
ฉลามตัวที่ X_1^1	M3	M6	M1	M2	M4	M9	M8	M10	M5	M7
ฉลามตัวที่ X_2^1	M8	M6	M1	M7	M10	M9	M3	M4	M5	M2
ฉลามตัวที่ X_3^1	M3	M4	M10	M5	M6	M7	M8	M1	M2	M9
ฉลามตัวที่ X_4^1	M2	M7	M1	M3	M4	M10	M8	M9	M5	M6
ฉลามตัวที่ X_5^1	M1	M6	M8	M3	M5	M9	M2	M10	M4	M7

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินค่าคำตอบเริ่มต้น

การประเมินค่าคำตอบเริ่มต้น ทำได้โดยจำลองจัดเรียงเครื่องจักรตามรูปแบบการจัดเรียงทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 2 ลงในเซตพื้นที่ฝังที่กำหนด ทั้งนี้รูปแบบการจัดเรียงฝังเครื่องจักรให้เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ ในบทที่ 1 โดยเกณฑ์การประเมินนั้นได้ยี้ระยะทางรวมที่รถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติเคลื่อนที่ไป พิจารณาได้ตามสมการ (8)

การประเมินดังกล่าวทำให้ทราบถึงค่าระยะทางรวมที่รถขนถ่ายวัสดุต้องเคลื่อนที่จากเครื่องจักรหนึ่งไปยังเครื่องจักรหนึ่ง จากต้นจนจบกระบวนการ เพื่อดูว่าคำตอบแต่ละค่าที่สร้างขึ้นนั้นดีแ่ประการใดก่อนทำการจัดลำดับและจัดเก็บบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูล

ขั้นตอนที่ 4 จัดเก็บค่าคำตอบเริ่มต้น

หลังจากการประเมินค่าตอบเราทราบแล้วว่าคำตอบที่สร้างขึ้น ซึ่งเปรียบเสมือนกับตำแหน่งเริ่มต้นของฉลามในแต่ละตำแหน่ง ให้ค่าตามฟังก์ชันเป้าประสงค์ของเรามากน้อยอย่างไรบ้างดังนั้นเราจึงทำการจัดเก็บคำตอบเพื่อใช้ในกระบวนการอื่นต่อไป

โดยหลักการของจัดเก็บค่าคำตอบเริ่มต้นนั้นคือเพื่อบันทึกรายละเอียดรูปแบบการจัดเรียงหรือ คำตอบ (Solution) โดยทำการจัดอันดับคำตอบผ่านการพิจารณาจากผลของค่าคำตอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ โดยเรียงจากระยะทางรวมของรถขนถ่ายอัตโนมัติที่วัดได้และเรียงจากค่ามากที่สุดไปยังค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 การนับรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (set counter $k = 1$)

กำหนดให้การรอบการค้นหาคำตอบซ้ำเริ่มแรก เพื่อเริ่มต้นกระบวนการค้นหาคำตอบ ขั้นตอนนี้มีหน้าที่กำหนดรอบการวนซ้ำของการดำเนินการค้นหาคำตอบเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 1 ก่อนเข้าสู่กระบวนการในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 6 การกำหนดค่าเริ่มต้นของประชากรฉลาม (set counter $i = 1$)

กำหนดให้ตัวนับรอบของประชากรฉลามมีค่าเท่ากับ 1 ก่อนเข้าสู่กระบวนการถัดไป เปรียบเสมือนกับการนำฉลามตัวที่ 1 เข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคำตอบ กลไกการปรับปรุงคำตอบของวิธีดมกลืนของฉลามมีด้วยกัน 2 กลไก ได้แก่ การปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Shark forward movement) และการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่หมุนวน (Shark movement by rotation)

ขั้นตอนที่ 7 การคำนวณค่าความเร็วของฉลาม

การคำนวณความเร็วของฉลามเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อกลไกการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ โดยความเร็วของฉลามนั้นเป็นค่าเฉพาะกล่าวคือ ฉลามแต่ละตัวที่ถูกสร้างขึ้นนั้นมีค่าความเร็วที่แตกต่างกัน โดยความเร็วจะส่งผลโดยตรงกับการปรับปรุงคำตอบ อีกทั้งยังถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของค่าคำตอบปัจจุบัน โดยหากความเร็วในรอบปัจจุบันมีค่ามากกว่าความเร็ว

ในรอบที่ผ่านมา แสดงว่าคำตอบในรอบปัจจุบันดีกว่าคำตอบในรอบที่ผ่านมา นั่นเอง ความเร็วของฉลามนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (9) (Abedinia et al., 2014)

$$|V_i^k| = \min \left[\left| \eta_k \cdot R1 \cdot \nabla(OF) \right|_{x_i^k} + \alpha_k \cdot R2 \cdot V_i^{k-1} \right], \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, k_{max}$$

V_i^k	คือ ความเร็วของฉลามตัวที่ i ในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำที่ k
β_k	คือ อัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม โดยมีค่าเป็นจำนวนจริงบวก
η_k	คือ ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
α_k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยหรืออัตราโมเมนตัม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
$R1$	คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
$R2$	คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$
OF	คือ สมการของฟังก์ชันเป้าหมาย
k_{max}	คือ จำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ
NP	คือ จำนวนประชากรฉลาม

โดยเมื่อเสร็จสิ้นการคำนวณความเร็วของฉลามในขั้นตอนต่อไป จะเป็นการคำนวณรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักร (Machine sequence)

ขั้นตอนที่ 8 การคำนวณรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักรในคำตอบ

ในงานวิจัยของ Abedinia et al. (2014) ได้ปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Shark forward movement) ผ่านสมการ (4) ซึ่งสามารถตีความหมายได้ว่า ตำแหน่งใหม่ของฉลามที่เกิดจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าแปรผันตามความเร็ว และตำแหน่งเริ่มต้นของฉลาม โดยหากความเร็วฉลามมีค่ามาก ตำแหน่งใหม่ที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างมาก ซึ่งเปรียบเสมือนการสำรวจคำตอบ (Exploration) และหากความเร็วฉลามมีค่าน้อย ตำแหน่งใหม่ที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อย ซึ่งเปรียบเสมือนการปรับปรุงคำตอบแบบแสวงหาผลประโยชน์ (Exploitation) โดยในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ผ่าน จำนวนรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักร (SR_i^k) ซึ่งเป็นกลไกที่ถูกใช้ในการกำหนดความเปลี่ยนแปลงไปของคำตอบ (Solution) โดยอ้างอิงจากความเร็วของฉลามในรอบการวนซ้ำปัจจุบัน (k) ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 7

ในกรณีที่ความเร็วในรอบปัจจุบันมีค่าน้อยกว่าความเร็วในรอบก่อนหน้า ซึ่งหมายความว่าคุณภาพของคำตอบในปัจจุบันนั้นแย่กว่าเดิม หรือยังห่างไกลจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงให้กระบวนการปรับปรุงคำตอบเป็นไปในแนวทางการปรับปรุงคำตอบแบบสำรวจคำตอบ

(Exploration) ในทางปฏิบัติกระบวนการปรับปรุงคำตอบสามารถเลือกได้อย่างหลากหลายตามความเหมาะสมของโจทย์ปัญหา แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์และดำเนินการผ่านกลไกการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operation Random Swap โดยนำคำตอบเริ่มต้นของรอบปัจจุบัน (X_i^k) ใช้เป็นต้นแบบในการปรับปรุงใหม่หนึ่งคำตอบ โดยกำหนดให้กระบวนการปรับปรุงดังกล่าวเกิดขึ้นซ้ำเท่ากับ จำนวนรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักร (SR_i^k) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (10) กล่าวได้ว่าเมื่อความเร็วของฉลามลดลงแสดงว่าตำแหน่งของฉลามในปัจจุบันนั้นอยู่ห่างจากเหยื่อมากกว่าเดิม จึงต้องทำให้คำตอบในปัจจุบันเกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างมากเพื่อสร้างผลลัพธ์ที่แตกต่าง

$$|SR_i^k| = \min \left[\text{round} \left[\frac{V_i^{k-1} * N_m}{V_i^k} \right], |N_m| \right] \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, k_{max}$$

SR_i^k คือ จำนวนรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักรของฉลามตัวที่ i ในรอบที่ k

N_m คือ จำนวนสูงสุดของเครื่องจักรของชุดข้อมูล

k_{max} คือ จำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำสูงสุด

NP คือ จำนวนประชากรฉลาม

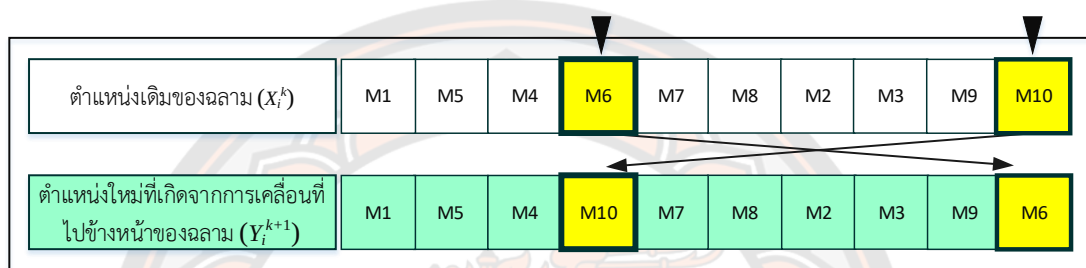
V_i^k คือ ความเร็วของฉลามตัวที่ i ในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำที่ k

V_i^{k-1} คือ ความเร็วของฉลามตัวที่ i ในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำก่อนหน้า ($k - 1$)

กรณีที่ความเร็วในรอบปัจจุบันมีค่ามากกว่าความเร็วในรอบก่อนหน้า ซึ่งหมายความว่าคำตอบในปัจจุบันนั้นมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีนี้จึงกำหนดให้กระบวนการปรับปรุงคำตอบเป็นไปในแนวทางการปรับปรุงคำตอบแบบแสวงหาผลประโยชน์ (Exploitation) เพื่อทำการค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียง ในทางปฏิบัติกระบวนการปรับปรุงคำตอบ จะถูกประยุกต์และดำเนินการผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบ Two operation random swap (2ORS) (Murata & Ishibuchi, 1994) เช่นเดียวกันกับกรณีแรก หากแต่จำนวนรอบในการเกิดขึ้นซ้ำนั้นจะมีค่าต่ำอย่างมาก เนื่องด้วยในกรณีนี้มีค่าความเร็วปัจจุบันมีค่ามากนั้นหมายถึงคำตอบในปัจจุบันมีค่าที่ดี จึงไม่ควรมีการรบกวนคำตอบมากนัก สำหรับขั้นตอนต่อไปเป็นการอธิบายถึงกลไกการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักร

ขั้นตอนที่ 9 และ 10 การสุ่มเลือก และการสลับเครื่องจักรสองตำแหน่งในคำตอบ

ขั้นตอนนี้เป็นการอธิบายถึงกระบวนการทำงานของกลไกการสลับตำแหน่งของเครื่องจักรผ่านการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operation Random Swap (2ORS) (Murata & Ishibuchi, 1994) ซึ่งเริ่มจากขั้นตอนที่ 9 การสุ่มเลือกเครื่องจักรสองตำแหน่งในคำตอบ และขั้นตอนที่ 10 การสลับตำแหน่งของคู่เครื่องจักรที่ได้เลือกไว้ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของคำตอบ ซึ่งเปรียบเสมือนฉลามนั้นได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอื่น โดยกลไกในขั้นตอนที่ 9 และ 10 แสดงดังภาพ 25



ภาพ 25 รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operation Random Swap

ที่มา: ปรับปรุงจาก Murata and Ishibuchi (1994)

ขั้นตอนที่ 11 และ 12 การตรวจสอบเงื่อนไข และการทำซ้ำของกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่

ขั้นตอนที่ 11 เป็นการตรวจสอบเงื่อนไขข้อกำหนด โดยหากจำนวนรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักรในปัจจุบันมีค่าน้อยกว่า จำนวนรอบการสลับตำแหน่งของลำดับเครื่องจักรสูงสุด (SR_i^k) ให้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 12 โดยเป็นเพิ่มค่ารอบนับการสลับตำแหน่งเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย เพื่อเป็นการเริ่มกระบวนการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 9 และ 10 โดยกระบวนการจะเกิดขึ้นเช่นนี้จนกระทั่งครบตามเงื่อนไขที่กำหนด แล้วจึงดำเนินการต่อไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 13 บันทึกคำตอบที่ได้จากการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่

เมื่อผ่านเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 11 และ 12 แล้ว คำตอบใหม่ที่ได้จากการปรับปรุงจะถูกเรียกว่าตำแหน่งใหม่ของฉลามอันเกิดจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Y_i^{k+1}) โดยขั้นตอนที่ 13 นี้เป็นการบันทึกจัดเก็บคำตอบดังกล่าว และเป็นจุดสิ้นสุดของกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ โดยขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark movement by rotation)

ขั้นตอนที่ 14 การคำนวณจุดหมุนวนของฉลาม

การปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่หมุนวน (Shark movement by rotation) เป็นการค้นหาคำตอบบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งใหม่ของฉลามอันเกิดจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Y_i^{k+1}) โดย Abedinia et al. (2014) ผู้คิดค้นวิธี SSO ได้กล่าวไว้ว่าการปรับปรุงแบบฉลามเคลื่อนที่หมุนวนเป็นกระบวนการปรับปรุงคำตอบในลักษณะแบบสำรวจคำตอบ (Exploration) โดยเป็นการค้นหาเฉพาะพื้นที่ (Local search) โดยให้การสำรวจคำตอบเท่ากับจำนวนจุดหมุนวนเปรียบเสมือนฉลามเคลื่อนที่เป็นวงกลมไปรอบ ๆ ตำแหน่งใกล้เคียงเพื่อค้นหากลืนของเหยื่อ ทั้งนี้เนื่องจากผู้คิดค้นมิได้กำหนดจำนวนจุดหมุนวนที่แน่ชัด ดังนั้นแล้วในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนที่ 14 เป็นการคำนวณจุดหมุนวนที่ฉลามต้องเคลื่อนที่ไป (M_i^k) โดยกำหนดมิให้จุดหมุนวนดังกล่าวมากเกินกว่าจำนวนเครื่องจักรสูงสุดของชุดข้อมูล โดย (M_i^k) สามารถคำนวณได้จากสมการ (11)

$$|M_i^k| = \max[\text{round}[N_m * R3], |, N_m * 0.3|] \quad (11)$$

$$i = 1, \dots, NP; \quad k = 1, \dots, k_{\max}$$

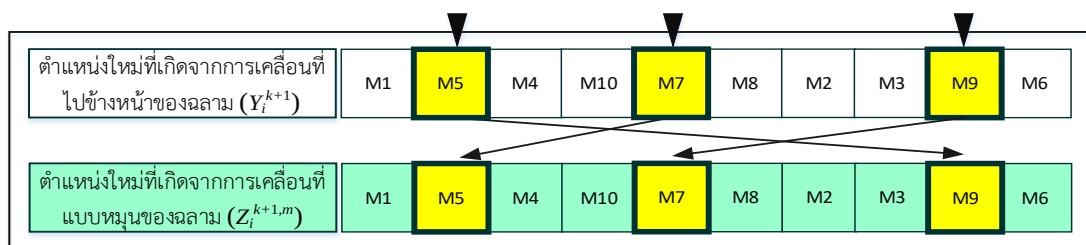
- M_i^k คือ จำนวนจุดหมุนวนที่ฉลามต้องเคลื่อนที่ไป ของฉลามตัวที่ i ในรอบการค้นหา คำตอบซ้ำที่ k
- N_m คือ จำนวนสูงสุดของเครื่องจักรของชุดข้อมูล
- $R3$ คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$

ในทางปฏิบัติการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวนนั้น จะนำค่าคำตอบที่ได้จากการปรับปรุงในขั้นตอนที่ 13 มาใช้เป็นต้นแบบในการปรับปรุงคำตอบ เพื่อสร้างคำตอบใหม่ขึ้นเป็นจำนวนทั้งสิ้นเท่ากับ M_i^k ทั้งนี้กลไกการปรับปรุงคำตอบสามารถเลือกได้อย่างหลากหลายตามความเหมาะสมของโจทย์ปัญหา แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ประยุกต์และดำเนินการผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบ Three Operation Random Swap (3ORS) ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงคำตอบแบบสำรวจคำตอบ (Exploration) ทำให้คำตอบมีโอกาสเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้มากกว่าวิธีแบบ 2ORS ในขั้นตอนที่ 9 โดยเนื้อหาหลักการสลับตำแหน่งของเครื่องจักรเพื่อปรับปรุงคำตอบแบบ 3ORS แสดงไว้ดังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 15 และ 16 การสุ่มเลือก และสลับเครื่องจักรสามตำแหน่งในคำตอบ

ขั้นตอนนี้เป็นการอธิบายถึงกระบวนการทำงานของกลไกการสลับตำแหน่งเครื่องจักรในคำตอบผ่านการปรับปรุงคำตอบแบบ Three Operation Random Swap (Murata & Ishibuchi, 1994) ซึ่งเริ่มจากขั้นตอนที่ 15 การสุ่มเลือกเครื่องจักรสามตำแหน่งจากคำตอบที่ได้จากปรับปรุงแบบฉลามเคลื่อนที่ และทำการสลับตำแหน่งของเครื่องจักรที่ได้เลือกไว้ ในขั้นตอนที่ 16 เพื่อให้

คำตอบเกิดการเปลี่ยนแปลง เปรียบเสมือนฉลามนั้นได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งหมุนวน โดยขั้นตอนที่ 15 และ 16 แสดงได้ดังภาพ 26



ภาพ 26 การปรับปรุงคำตอบแบบ Three Operation Random Swap

ที่มา: ปรับปรุงจาก Murata and Ishibuchi (1994)

ขั้นตอนที่ 17 บันทึกคำตอบใหม่ที่ได้จากการปรับปรุงแบบฉลามหมุนวน

ในขั้นตอนนี้เป็นการจัดเก็บและบันทึกคำตอบที่ถูกปรับปรุงโดยขั้นตอนที่ 15 และ 16 เพื่อสร้างคำตอบใหม่ขึ้นใหม่ โดยคำตอบที่ได้จากการปรับปรุงจะถูกเรียกว่าตำแหน่งใหม่ของฉลามอันเกิดจากการเคลื่อนแบบหมุน ($Z_i^{k+1,m}$)

ขั้นตอนที่ 18 และ 19 การตรวจสอบเงื่อนไข และการทำซ้ำของกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน

ขั้นตอนที่ 18 เป็นการตรวจสอบเงื่อนไขข้อกำหนด โดยหากจุดหมุนของฉลามในปัจจุบันมีค่าต่ำกว่า จุดหมุนวนที่ฉลามต้องเคลื่อนที่ไป (M_i^k) ให้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 19 โดยเป็นเพิ่มค่ารอบนับการจุดหมุนของฉลาม ซึ่งเป็นการเริ่มกระบวนการทำซ้ำในขั้นตอนที่ 15 ถึงขั้นตอนที่ 17 เพื่อสร้างคำตอบใหม่ให้เกิดขึ้น โดยกระบวนการเช่นนี้จะเกิดขึ้นซ้ำจนกระทั่งได้คำตอบใหม่ทั้งสิ้นจำนวนเท่ากับ M_i^k คำตอบ และถือเป็นจุดสิ้นสุดของการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark movement by rotation)

ขั้นตอนที่ 20 การประเมินคำตอบที่ได้จากการปรับปรุง

ขั้นตอนที่ 20 เป็นการประเมินคำตอบใหม่ ที่ได้จากกระบวนการปรับปรุงแบบฉลามเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Shark forward movement) และการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark movement by rotation) โดยขั้นตอนและเงื่อนไขการประเมินคำตอบเป็นเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 21 จัดลำดับคำตอบ

นำคำตอบที่ถูกประเมินในขั้นตอนที่ 20 มาเรียงลำดับจากน้อยไปมาก เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด เปรียบดังฉลามที่ประเมินว่าหลังจากการเคลื่อนที่ค้นหาถิ่นเลือดของเหยื่อ ตำแหน่งใดมีถิ่นเลือดเข้มข้นและจุดเด่นที่สุด

ขั้นตอนที่ 22 บันทึกคำตอบที่ให้ผลเฉลยดีที่สุดของฉลามปัจจุบัน

บันทึกคำตอบที่ให้ผลเฉลยดีที่สุดของฉลามตัวที่ i ในรอบการทำซ้ำปัจจุบัน (k) และกำหนดคำตอบดังกล่าวให้เป็นคำตอบเริ่มต้นของการปรับปรุงในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำถัดไป (X_i^{k+1}) เปรียบได้กับฉลามจะเริ่มค้นหาเหยื่อใหม่โดยจะย้อนกลับมายังตำแหน่งที่กลิ่นเลือดมีความเข้มข้นมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 23 และ 24 การตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนประชากรฉลาม

ขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบเงื่อนไขของประชากรฉลาม โดยหากตัวนับของจำนวนประชากรฉลามในปัจจุบันมีค่าน้อยกว่าจำนวนประชากรฉลามสูงสุด (NP) ให้ดำเนินการต่อให้ขั้นตอนที่ 24 โดยเพิ่มค่าตัวนับของจำนวนประชากรฉลามขึ้นหนึ่งหน่วย ก่อนดำเนินการขั้นตอนที่ 7 ถึง 22 ซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าฉลามทุกตัวในกลุ่มประชากรที่สร้างขึ้นได้รับการปรับปรุงคำตอบเรียบร้อยแล้ว

ขั้นตอนที่ 25 บันทึกคำตอบที่ดีที่สุด

หลังจาก ปรับปรุงฉลามทุกตัวในกลุ่มประชากร ในขั้นตอนนี้เป็นการจัดเก็บและบันทึกคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำปัจจุบัน เปรียบได้กับว่าตั้งแต่กลุ่มประชากรฉลามเริ่มสำรวจกลิ่นเลือดของเหยื่อในน้ำ ตำแหน่งใดมีกลิ่นเลือดเข้มข้นที่สุด

ขั้นตอนที่ 26 และ 27 การตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนรอบการวนซ้ำ

จำนวนรอบการวนซ้ำ (Iterations) เป็นหนึ่งในเงื่อนไขที่กำหนดจำนวนรอบของการทำงานเพื่อวนซ้ำหาคำตอบ เมื่อจำนวนรอบการวนซ้ำเท่ากับจำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (k_{max}) ที่กำหนดไว้แล้วให้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 28 ทั้งนี้ถ้าหากยังไม่ครบตามเงื่อนไขให้เพิ่มค่าให้กับตัวนับรอบการวนซ้ำหนึ่งหน่วย เพื่อดำเนินขั้นตอนที่ 6 ถึง 25 ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 28 แสดงผลค่าคำตอบที่ดีที่สุด

เมื่อจำนวนรอบของการวนซ้ำมีค่ามากกว่า (k_{max}) ที่ได้กำหนดไว้ กระบวนการจะสิ้นสุดลงโดยอัตโนมัติ และแสดงคำตอบ พร้อมผลเฉลยที่ดีที่สุดในรูปแบบของระยะทางขนถ่ายวัสดุ (เมตร)

การปรับปรุงคำตอบ

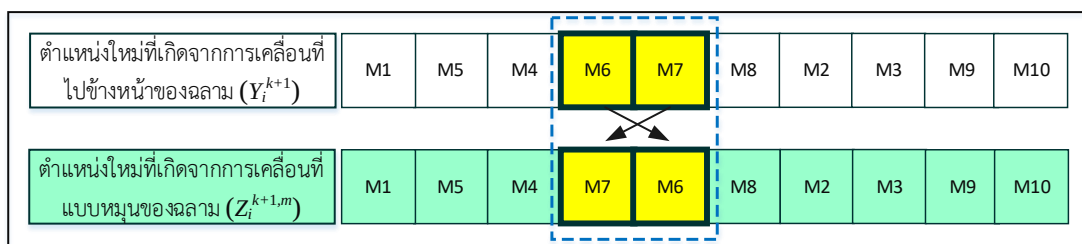
เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงได้ปรับปรุงวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบต่าง ๆ โดยการปรับปรุงวิธีการค้นหาคำตอบในงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่การปรับปรุงการหาคำตอบด้วยวิธีการผสมผสานวิธีการดมกลิ่นของฉลามเข้ากับวิธีการเมตาฮิวริสติกส์อื่น ๆ วิธีการปรับปรุงคำตอบโดยการพิจารณาถึงความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร และวิธีการปรับปรุงกระบวนการทำงานของ SSO ในขั้นตอนฉลามหมุนวนเข้าร่วมกับการพิจารณาถึงความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร โดยการปรับปรุงคำตอบในงานวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 9 รูปแบบดังตาราง 12

ตาราง 12 ตัวอย่างวิธีการปรับปรุงคำตอบแบบทั้ง 9 วิธี

ตัวย่อ	วิธีการปรับปรุงคำตอบ
mSSO1HyGA	การผสมผสานวิธีการหาคำตอบของ SSO กับวิธีการปรับปรุงคำตอบของ GA
mSSO2MaxFQ	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุดอันดับแรก ให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน
mSSO3Max&SdFQ	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุด 2 อันดับแรกให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน
mSSO4MaxSdRdFQ	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุด 3 อันดับแรกให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน
mSSO5NoneFQ	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาให้เครื่องจักรที่มีได้ขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันอยู่ติดกัน
mSSO6Max-4thFQ	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุด 4 อันดับแรกให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน
mSSO7None-Max4thFQ	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุด 3 อันดับแรกให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน และกำหนดให้เครื่องจักรที่มีได้ขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันอยู่ติดกัน
mSSO8MaxFQ-EtR	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุดอันดับแรก ให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน และเปิดโอกาสให้ฉลามสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนได้มากกว่าปกติ
mSSO9Max&SdFQ-EtR	การปรับปรุงกระบวนการหาคำตอบ โดยพิจารณาความถี่ของการใช้งานเครื่องจักรที่สูงที่สุด 2 อันดับแรกให้มีตำแหน่งอยู่ติดกัน และเปิดโอกาสให้ฉลามสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนได้มากกว่าปกติ

1. การปรับปรุงคำตอบโดยการ ผสมผสานวิธีการหาคำตอบของ SSO กับวิธีเชิงพันธุกรรม GA

รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบที่ 1 นี้ มีกระบวนการทำงานเช่นเดียวกันกับวิธี SSO แบบดั้งเดิม หากแต่ผู้วิจัยได้นำการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operations Adjacent Swap (2OAS) (Murata & Ishibuchi, 1994) ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงคำตอบที่สามารถให้ผลเฉลยเฉลี่ยที่ดีที่สุดของวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) (P. Pongcharoen et al., 2001) เข้ามาใช้เป็นกลไกการสลับตำแหน่งของเครื่องจักร แทนรูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบเดิม Two Operation Random Swap (2ORS) ในขั้นตอนที่ 14 โดยหลักการแบบ 2OAS สามารถอธิบายได้ดังภาพ 27

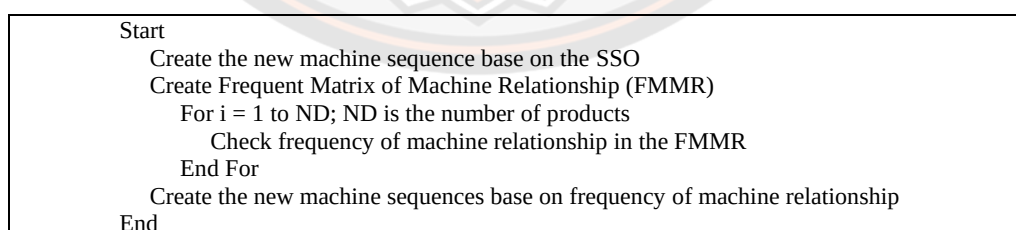


ภาพ 27 รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operations Adjacent Swap

ที่มา: ปรับปรุงจาก Murata & Ishibuchi (1944)

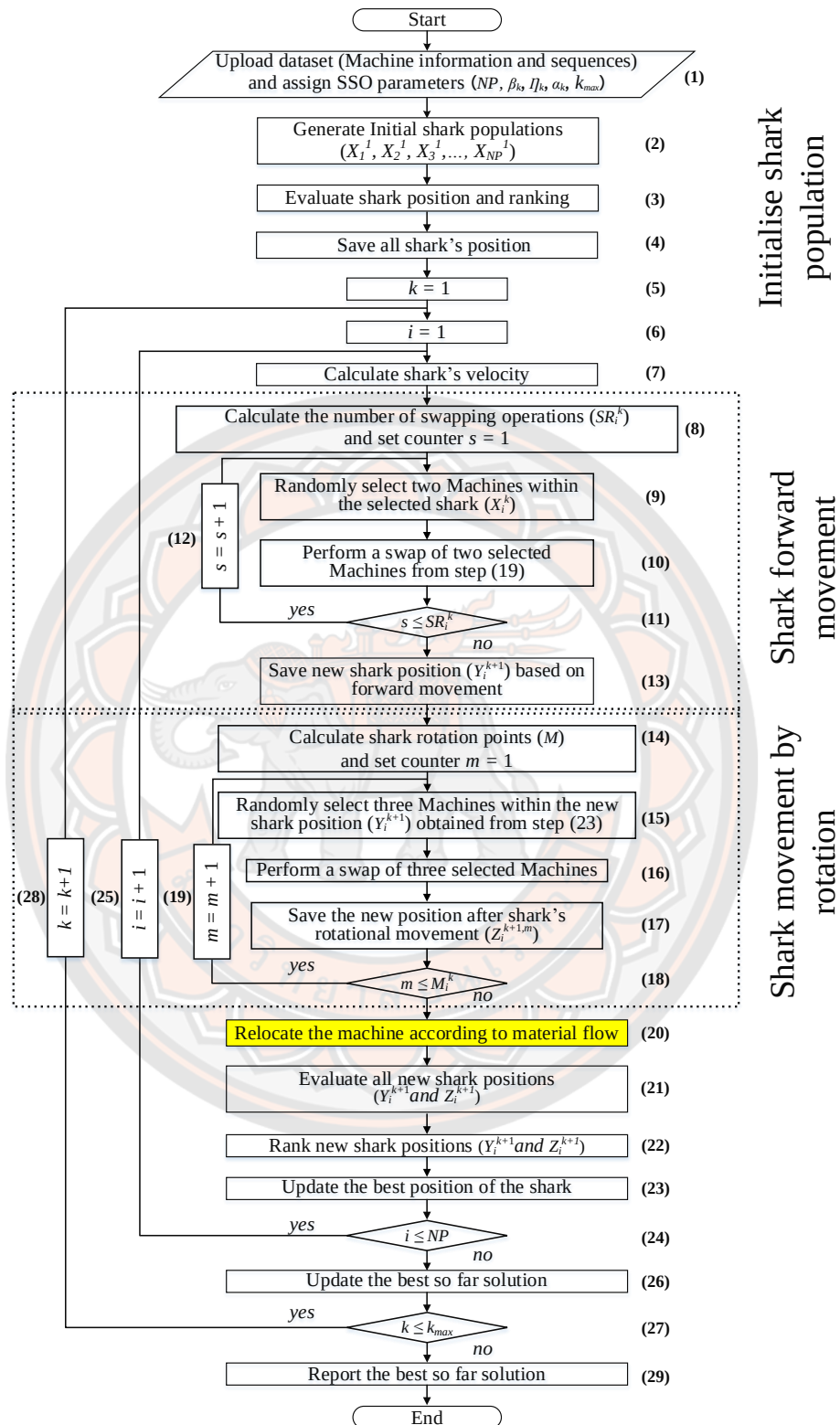
2. การปรับปรุงคำตอบ ด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักร

วิธีการปรับปรุงคำตอบแบบกลุ่มนี้ เป็นการปรับปรุงโดยพิจารณาความถี่ของการขนส่งวัสดุหรือชิ้นงาน ระหว่างเครื่องจักรที่ทำงานต่อเนื่องกัน กล่าวคือ คู่เครื่องจักรที่ต้องขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันบ่อยครั้งในระหว่างกระบวนการผลิตนั้นมีความถี่ตำแหน่งการจัดเรียงตัวที่ห่างกัน โดยผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถี่ของความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักรที่ละคู่ในข้อมูลลำดับการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ในทั้ง 5 ชุดข้อมูล โดยกำหนดให้ความถี่ระหว่างเครื่องจักรที่มากที่สุดจะถูกจัดให้มีตำแหน่งการจัดวางที่ติดกัน ในกรณีที่ไม่มีค่าความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่เครื่องจักร คู่เครื่องจักรดังกล่าวจะไม่ถูกจัดวางอยู่ติดกัน โดยรหัสเทียม (Pseudo code) ของกลไกการกำหนดลำดับเครื่องจักรโดยพิจารณาถึงความถี่ในการส่งถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการ และกระบวนการทำงานของวิธี SSO แบบปรับปรุงในกลุ่มนี้ แสดงได้ดังภาพ 28 และภาพ 29



ภาพ 28 รหัสเทียมของกลไกการกำหนดลำดับเครื่องจักรโดยพิจารณาถึงความถี่ในการส่งถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการ

ปรับปรุงจาก: พรพิมล สร้อยมาต, 2554



ภาพ 29 ขั้นตอนการทำงานของวิธี SSO แบบปรับปรุงโดยพิจารณาถึงอัตราการขนถ่ายวัสดุระหว่างคู่เครื่องจักร

สำหรับกลไกการปรับปรุงคำตอบในลักษณะนี้ ผู้วิจัยได้สร้างไว้หลายกรณี ประกอบด้วย การปรับปรุงคำตอบโดยการกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มามีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดอยู่ติดกันเสมอ (mSSO2MaxFQ) การปรับปรุงคำตอบโดยการกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มามีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสองอันดับแรกอยู่ติดกัน (mSSO3Max&SdFQ) การปรับปรุงคำตอบโดยการกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มามีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสามอันดับแรกอยู่ติดกัน (mSSO4MaxSdRdFQ) การปรับปรุงคำตอบโดยการกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีได้มีการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันอยู่ติดกัน (mSSO5NoneFQ) การปรับปรุงคำตอบโดยการกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มามีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสี่อันดับแรกอยู่ติด (mSSO6Max-4thFQ) และรูปแบบสุดท้าย การปรับปรุงคำตอบโดยการกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มามีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสี่อันดับแรกอยู่ติด และห้ามมิให้คู่เครื่องจักรที่มีได้มีการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันอยู่ติดกัน (mSSO7None-Max4thFQ) โดยข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรจะถูกคิดจากลำดับความถี่ในการใช้งานเครื่องจักรในตาราง 9 โดยข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่เครื่องจักรที่ถูกใช้ในกระบวนการปรับปรุงคำตอบของชุดข้อมูลทั้ง 5 ชุด สามารถแสดงได้ดังภาพ 30 ถึง ภาพ 34

สำหรับการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบโดยอาศัยหลักการพิจารณาถึงความถี่ในการขนถ่ายวัสดุระหว่างคู่เครื่องจักร คือ รูปแบบการปรับปรุงที่ 2 ถึง 7 โดยรายละเอียดเนื้อหาของวิธีการปรับปรุงคำตอบดังกล่าว จะแสดงในหัวข้อถัดไป

Machine No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x	1	0	0	0	2	0	0	1	0
2	1	x	0	0	0	0	1	0	1	0
3	0	0	x	1	0	0	0	0	1	0
4	0	0	1	x	0	0	1	0	0	1
5	0	0	0	0	x	1	1	1	1	0
6	2	0	0	0	1	x	0	0	1	0
7	0	1	0	1	1	0	x	1	0	0
8	0	0	0	0	1	0	1	x	1	1
9	1	1	1	0	1	1	0	1	x	0
10	0	0	0	1	0	0	0	1	0	x

ภาพ 30 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 1

Machine No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	x	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
2	0	x	1	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	x	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
4	0	2	0	x	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	x	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
6	0	1	0	0	1	x	0	2	0	1	2	0	0	1	1	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	1	0	x	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	1	2	1	x	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
9	3	0	0	0	1	0	0	0	x	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	x	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
11	0	1	1	1	0	2	0	0	0	1	x	0	0	0	1	1	2	0	0	0
12	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	x	1	0	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	x	0	1	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	x	1	0	1	0	1	1
15	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	x	1	0	0	0	1
16	0	0	1	0	1	0	0	0	2	1	1	0	0	0	1	x	0	1	0	0
17	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	x	1	0	0
18	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	x	0	1
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	x	1
20	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	x

ภาพ 31 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 2

Machine No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	x	0	1	0	1	1	1	0	1	0	2	1	1	1	0
2	0	x	3	2	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	2
3	1	3	x	1	3	0	2	0	0	1	1	2	1	0	3
4	0	2	1	x	2	0	0	2	1	3	0	0	0	4	0
5	1	1	3	2	x	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0
6	1	0	0	0	1	x	0	1	1	1	1	0	1	0	1
7	1	0	2	0	0	0	x	1	0	1	0	0	1	0	0
8	0	1	0	2	0	1	1	x	1	1	1	0	1	1	2
9	1	1	0	1	1	1	0	1	x	1	1	0	1	1	0
10	0	0	1	3	0	1	1	1	1	x	1	1	0	0	0
11	2	1	1	0	1	1	0	1	1	1	x	1	1	1	2
12	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	1	x	0	1	1
13	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	x	0	2
14	1	1	0	4	1	0	0	1	1	0	1	1	0	x	1
15	0	2	3	0	0	1	0	2	0	0	2	1	2	1	x

ภาพ 32 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 3

Machine No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	x	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1		
2	1	x	0	1	0	2	1	0	1	0	1	0	3	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0		
3	1	0	x	1	0	3	1	0	0	0	0	1	0	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	1	1	1	x	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0		
5	1	0	0	1	x	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
6	1	2	3	0	1	x	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0		
7	0	1	1	0	0	0	x	0	1	1	2	1	0	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	
8	1	0	0	0	1	1	0	x	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0		
9	0	1	0	1	1	0	1	0	x	0	1	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
10	0	0	0	0	0	0	1	1	0	x	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	2	0	0	0	
11	0	1	0	0	0	2	2	1	1	1	x	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
12	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	x	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
13	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	x	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	2	0	2	0	
14	1	0	2	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	x	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	
15	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	3	1	0	x	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	0	1	0	0	0	x	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	
17	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	3	1	x	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	x	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	
19	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	x	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
20	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	x	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
21	0	1	1	1	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	x	1	2	0	2	0	0	0	0	1	1	
22	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	x	0	1	0	1	0	1	0	0	0	
23	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	x	0	0	1	0	2	2	1	0	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	x	2	1	2	0	1	0	0	
25	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	2	x	0	0	0	0	0	0	
26	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	1	0	1	1	1	0	x	0	0	0	1	0	
27	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	x	0	0	0	0	
28	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	x	0	0	0	
29	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	x	1	0	
30	1	0	0	0	1	0	1	0	3	0	1	0	2	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0

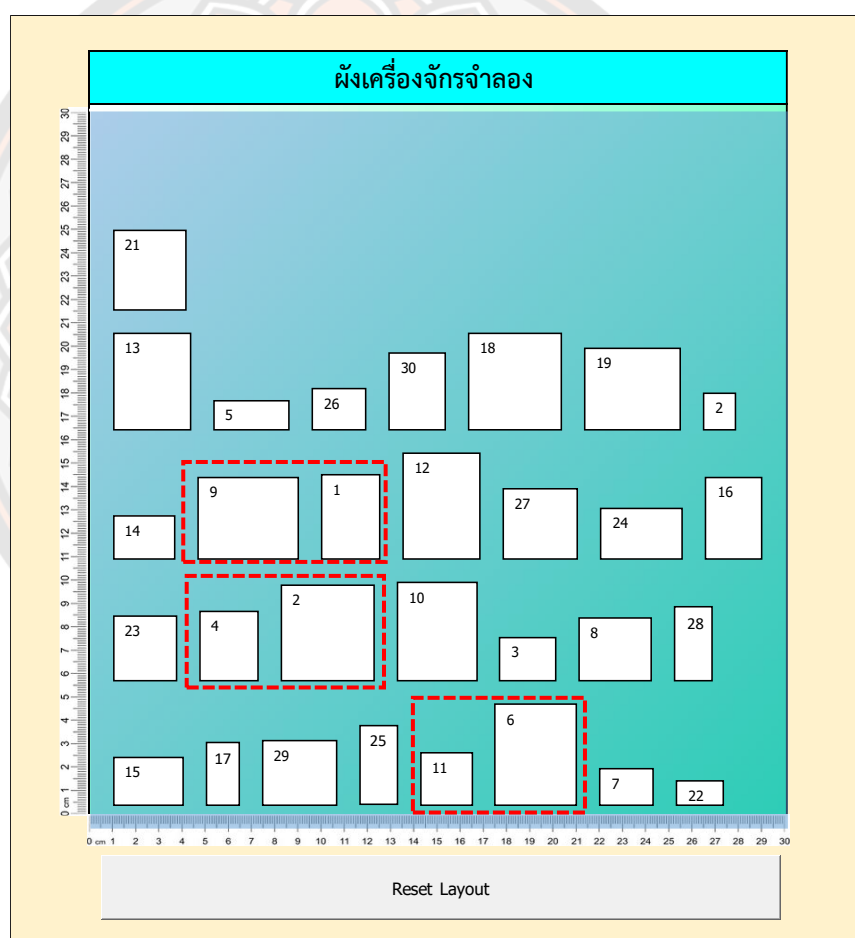
ภาพ 33 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 4

Machine No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	x	2	3	1	2	4	1	1	5	0	2	2	1	2	0	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	
2	2	x	4	5	1	4	3	1	3	0	3	1	3	1	3	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	
3	3	4	x	3	3	3	3	0	1	1	2	4	1	2	3	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	1	5	3	x	3	0	1	3	2	4	1	1	1	4	0	1	1	2	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
5	2	1	3	3	x	4	2	3	4	0	1	0	2	1	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
6	4	4	3	0	4	x	0	4	2	5	1	1	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	
7	1	3	3	1	2	0	x	3	1	2	2	1	1	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	
8	1	1	0	3	4	3	x	2	3	2	0	1	2	4	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
9	5	3	1	2	4	2	1	2	x	2	2	0	1	3	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
10	0	0	1	4	0	2	2	3	2	x	3	2	0	0	0	1	1	0	0	1	2	1	0	0	1	0	0	2	0	0	
11	2	3	2	1	1	5	2	2	2	3	x	1	2	2	4	2	2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	
12	2	1	4	1	0	1	1	0	0	2	1	x	1	1	4	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	
13	1	3	1	1	2	1	1	1	1	0	2	1	x	0	4	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	2	0	2	
14	2	1	2	4	1	1	1	2	3	0	2	1	0	x	2	0	1	1	2	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	
15	0	3	3	0	0	2	1	4	1	0	4	4	4	2	x	1	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	2	1	1	0	1	1	4	1	2	0	0	0	1	x	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	
17	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	0	0	1	3	1	x	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	0	0	1	2	2	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	x	0	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	
19	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	x	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
20	2	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	2	2	x	0	2	0	0	0	1	0	0	0	1	
21	0	1	1	1	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	x	1	2	0	2	0	0	0	1	1	
22	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	x	0	1	0	1	0	1	0	0	
23	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	x	0	0	1	0	2	2	1	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	x	2	1	2	0	1	0	0	
25	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	2	x	0	0	0	0	0	
26	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	1	0	1	1	1	0	x	0	0	0	1	
27	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	x	0	0	0	
28	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	x	0	0	
29	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	x	1	
30	1	0	0	0	1	0	1	0	3	0	1	0	2	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	x

ภาพ 34 ข้อมูลความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างแต่ละคู่เครื่องจักรของข้อมูลชุดที่ 5

2.1 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 2 mSSO2MaxFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดลำดับแรก

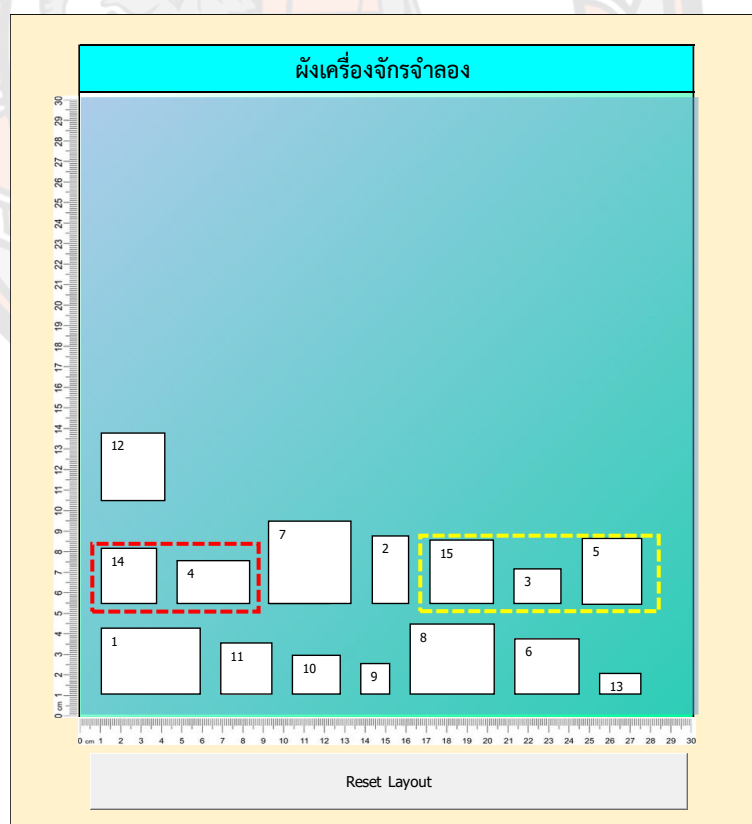
การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 2 นี้เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดมีลำดับอยู่ติดกัน การปรับปรุงนี้ผู้แต่งได้นำแนวคิดมาจากการวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ยกตัวอย่างเช่น ในชุดข้อมูล M30P27 เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุด ได้แก่คู่เครื่องจักร หมายเลข 4 – 2 หมายเลข 9 -1 และ หมายเลข 11 - 6 โดยสามารถแสดงตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้ดังภาพ 35



ภาพ 35 ตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้โดยใช้การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 2

2.2 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3 mSSO3Max&SdFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดสองลำดับแรก

การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3 นี้เป็นรูปแบบการปรับปรุงที่ผู้แต่งได้นำแนวคิดมาจากงานวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ซึ่งเป็นโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดสองลำดับแรกให้มีลำดับอยู่ติดกัน เพื่อคงไว้ซึ่งคู่ประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้เริ่มจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่ของคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดมากที่สุดอันดับที่สอง ก่อนเริ่มจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดที่สุดอันดับแรก ด้วยมีความเป็นไปได้ที่คู่เครื่องจักรที่มีความถี่การขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันระหว่างกระบวนการมากที่สุดสองอันดับแรกอาจถูกใช้งานร่วมกัน โดยเป็นการป้องกันห้ามมิให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการสูงที่สุดถูกใช้ร่วมกันเครื่องจักรอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ในชุดข้อมูล M15P9 ซึ่งเครื่องจักรที่มีความถี่การทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดอันดับแรกได้แก่เครื่องจักรหมายเลข 14 – 4 (เส้นประสีแดง) โดยมีคู่เครื่องจักรที่มีความถี่การขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันระหว่างกระบวนการมากเป็นอันดับสอง ได้แก่ คู่เครื่องจักร หมายเลข 4 – 2, 5 – 3, 10 – 4 และ 15 – 3 (เส้นประสีเหลือง) โดยสามารถแสดงตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้ดังภาพ 36



ภาพ 36 ตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้โดยใช้การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3

2.3 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 4 mSSO4MaxSdRdFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดสามลำดับแรก

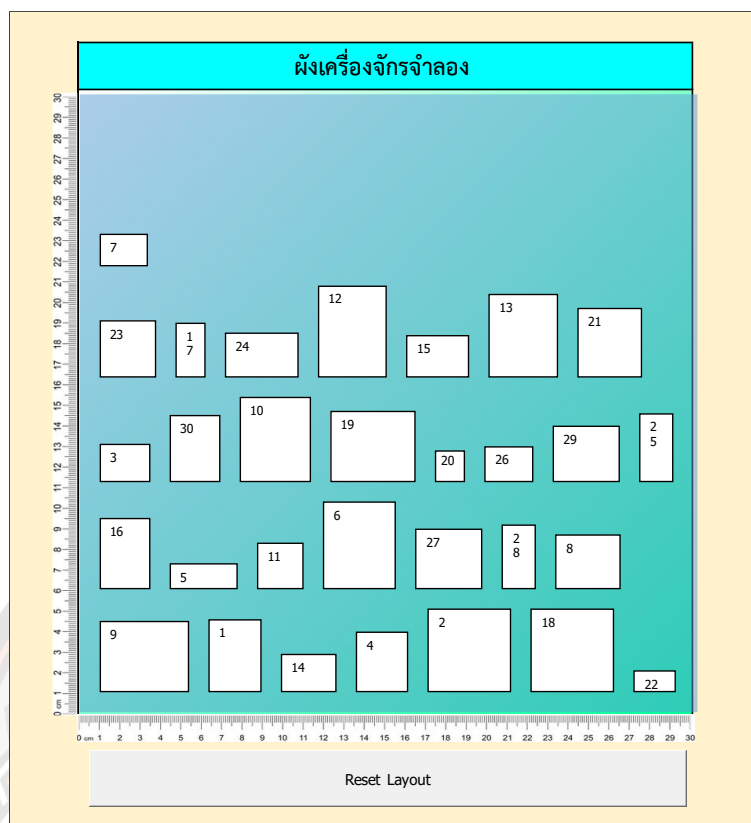
การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 4 นี้เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดสามลำดับแรกให้มีลำดับอยู่ติดกัน เพื่อคงไว้ซึ่งคู่ประสิทธิภาพ เช่นเดียวกันกับการปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3 mSSO3Max&SdFQ การจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่ของคู่เครื่องจักรจะเริ่มจาก จัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดมากที่สุดอันดับที่สาม และลำดับที่สอง ก่อนเริ่มจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดที่สุดอันดับแรก เพื่อป้องกันห้ามมิให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการสูงที่สุดถูกใช้ร่วมกันเครื่องจักรอื่น ๆ

2.4 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 5 mSSO5NoneFQ ปรับปรุงคำตอบโดยพิจารณาให้เครื่องจักรที่มีได้ขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันมีตำแหน่งอยู่ติดกัน

การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 5 เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยพิจารณาถึงพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรอีกรูปแบบหนึ่ง โดยผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขให้คู่เครื่องจักรที่ไม่มีการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันมีตำแหน่งอยู่ติดกัน ตัวอย่างคู่เครื่องจักรที่ไม่ได้ขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกัน ในชุดข้อมูล M30P27 เช่น 3 – 2, 30 – 8, 20 – 6, 26 – 17, 30 – 27, 30 – 28, 27 – 1, 13 – 7, 17 – 13, 20 – 1, 20 – 13, 16 – 1 เป็นต้น โดยสามารถแสดงตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้ดังภาพ 37

2.5 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 6 mSSO6Max-4thFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดสี่ลำดับแรก

การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 6 นี้เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดสี่ลำดับแรกให้มีลำดับอยู่ติดกัน เพื่อคงไว้ซึ่งคู่ประสิทธิภาพ เช่นเดียวกันกับการปรับปรุงคำตอบแบบที่ 4 mSSO4MaxSdRdFQ การจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่ของคู่เครื่องจักรจะเริ่มจาก จัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดมากที่สุดอันดับที่สี่ ลำดับที่สาม และลำดับที่สองตามลำดับ ก่อนเริ่มจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดที่สุดอันดับแรก เพื่อป้องกันห้ามมิให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการสูงที่สุดถูกใช้ร่วมกันเครื่องจักรอื่น ๆ



ภาพ 37 ตัวอย่างของผลเฉลยหนึ่งที่เป็นไปได้โดยใช้การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 5

2.6 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 7 mSSO7None-Max4thFQ ปรับปรุงคำตอบด้วยการพิจารณาความถี่ของการส่งถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรที่สูงที่สุดสี่ลำดับแรก และห้ามมิให้เครื่องจักรที่ไม่มีการขนถ่ายวัสดุโดยตรงอยู่ติดกัน

การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 7 นี้เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดสี่ลำดับแรก และคู่เครื่องจักรที่ไม่มีการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นการรวมความสามารถของรูปแบบการปรับปรุงที่ 5 และ 6 เข้าด้วยกัน

โดยเริ่มจากการจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่ของคู่เครื่องจักรที่ไม่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายซึ่งกันและกัน ตามด้วยจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดมากที่สุดอันดับที่สี่ ลำดับที่สาม และลำดับที่สอง และคู่เครื่องจักรที่มีความถี่ระหว่างการขนถ่ายสูงสุดที่สุดตามลำดับ

3. วิธีการปรับปรุงกระบวนการทำงานของ SSO ในขั้นตอนฉลามหมุนวนเข้าร่วมกับการพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร

3.1 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 8 mSSO8MaxFQ-EtR

การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 8 นี้เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดมีตำแหน่งติดกันเสมอ โดยมีหลักการจัดเรียงเครื่องจักร และเงื่อนไขเชกเชนเดียวกันกับการปรับปรุงคำตอบแบบที่ 2 หากแต่การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 8 ได้เพิ่มเติมเงื่อนไขในขั้นตอนการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark rotation movement) โดยเป็นการเปิดโอกาสให้ฉลามสามารถทำการค้นหาแบบหมุนวนได้ไกลยิ่งขึ้นตามจุดหมุนวน (Rotation points) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (12)

$$|M_i^k| = \max[\text{round}[4N_m * R3], |, N_m * 0.3|] \quad (12)$$

$$i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, k_{\max}$$

- M_i^k คือ จำนวนสูงสุดของจุดหมุนวน ที่ฉลามต้องเคลื่อนที่ไป ของฉลามตัวที่ i ในรอบการค้นหาคำตอบซ้ำที่ k
- m คือ จุดหมุนวนของฉลามในปัจจุบัน
- N_m คือ จำนวนสูงสุดของเครื่องจักรของชุดข้อมูล
- $R3$ คือ ค่าตัวแปรสุ่ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$

3.2 การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 9 mSSO9Max&SdFQ-EtR

การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 9 เป็นรูปแบบการปรับปรุงคำตอบโดยกำหนดให้คู่เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันสูงที่สุดสองลำดับแรกมีตำแหน่งติดกันเสมอ โดยมีหลักการจัดเรียงเครื่องจักร และเงื่อนไขเชกเชนเดียวกันกับการปรับปรุงคำตอบแบบที่ 3 หากแต่การปรับปรุงคำตอบแบบที่ 9 ได้เพิ่มเติมเงื่อนไขในขั้นตอนการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark rotation movement) โดยเป็นการเปิดโอกาสให้ฉลามสามารถทำการค้นหาแบบหมุนวนได้ไกลยิ่งขึ้นตามจุดหมุนวน (Rotation points) ซึ่งมีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกันกับสมการ (12) ในรูปแบบการปรับปรุงที่ 8

ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมการวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธี SSO

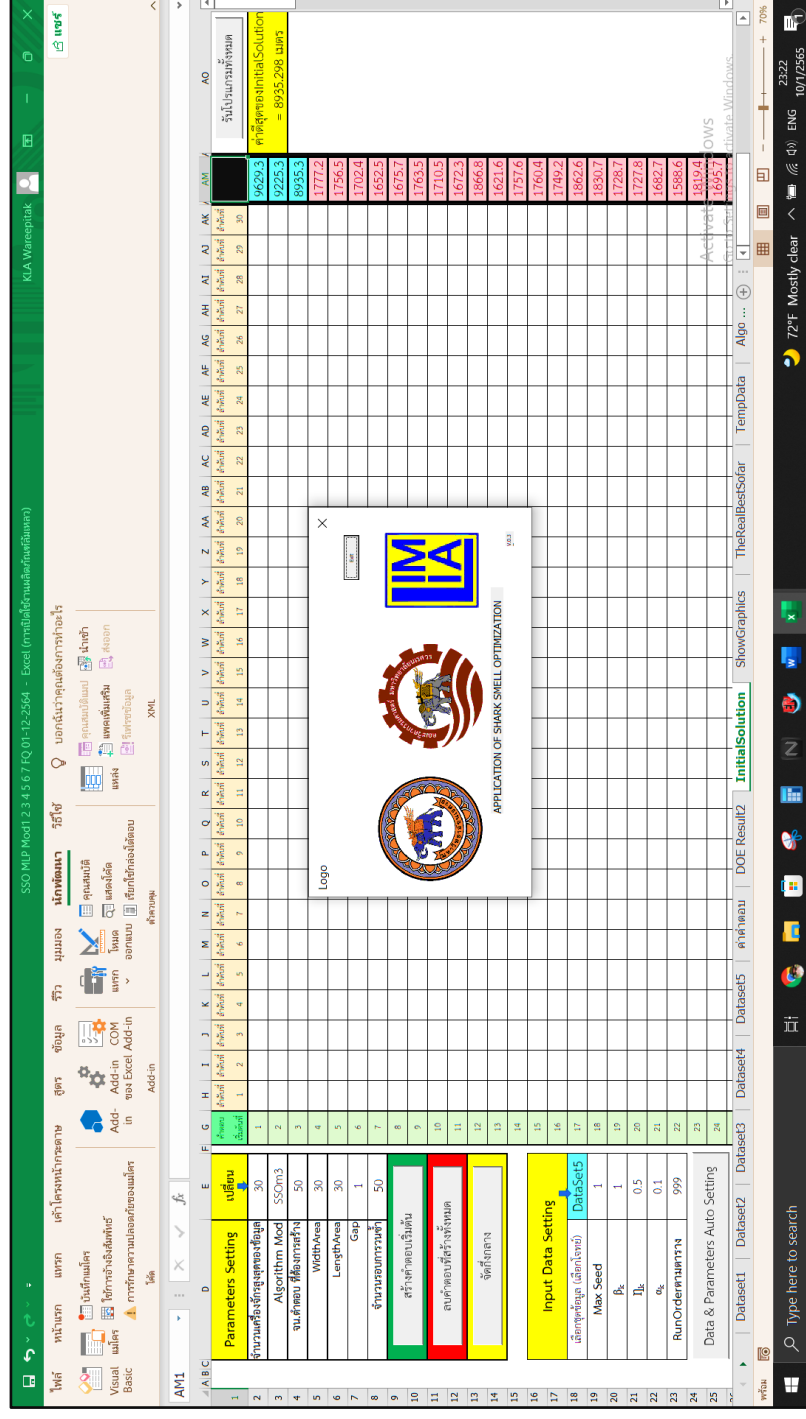
โปรแกรมการวางแผนเครื่องจักรเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลาม ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ ทั้งนี้โปรแกรมหังกล่าวประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนข้อมูลนำเข้า (Input phase) ส่วนของการประมวลผล (Process phase) และส่วนของข้อมูลนำออก หรือส่วนการแสดงผล (Output phase) ทั้งนี้ในแต่ละส่วนของโปรแกรมจะถูกควบคุมโดยผู้ใช้งานผ่านทาง Graphic User Interface (GUI) ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากฟังก์ชันพัฒนา (Developer) และเขียนคำสั่งการด้วยภาษา Visual Basic for Application (VBA) ในโปรแกรม Microsoft Office Excel

1. ส่วนข้อมูลนำเข้า (Input phase)

ข้อมูลนำเข้าจะเป็นข้อมูลที่โปรแกรมจำเป็นต้องใช้ในระบบการคำนวณ ได้แก่ จำนวนเครื่องจักรทั้งหมดที่ใช้ (Total machine), หมายเลขเครื่องจักร (Machine ID), รายละเอียดความกว้างของเครื่องจักร (W_i), ความยาวของเครื่องจักร (L_i) จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ผลิต (Total product) ประเภทของผลิตภัณฑ์ (Product ID) ลำดับการทำงานของเครื่องจักรในการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ (Sequence) หรือเป็นกำหนดการทำงานของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะเก็บรายละเอียดในส่วน of จำนวนเครื่องจักรและลำดับการทำงานของเครื่องจักรในการผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งฐานข้อมูลดังกล่าวจะถูกบันทึกในแผ่นงาน (Worksheet) ภายใน Microsoft Office Excel ในหน้าจอแรกเริ่มการเข้าสู่โปรแกรมแสดงได้ดังภาพ 38 และ ภาพ 39

2. ส่วนของการประมวลผล (Process phase)

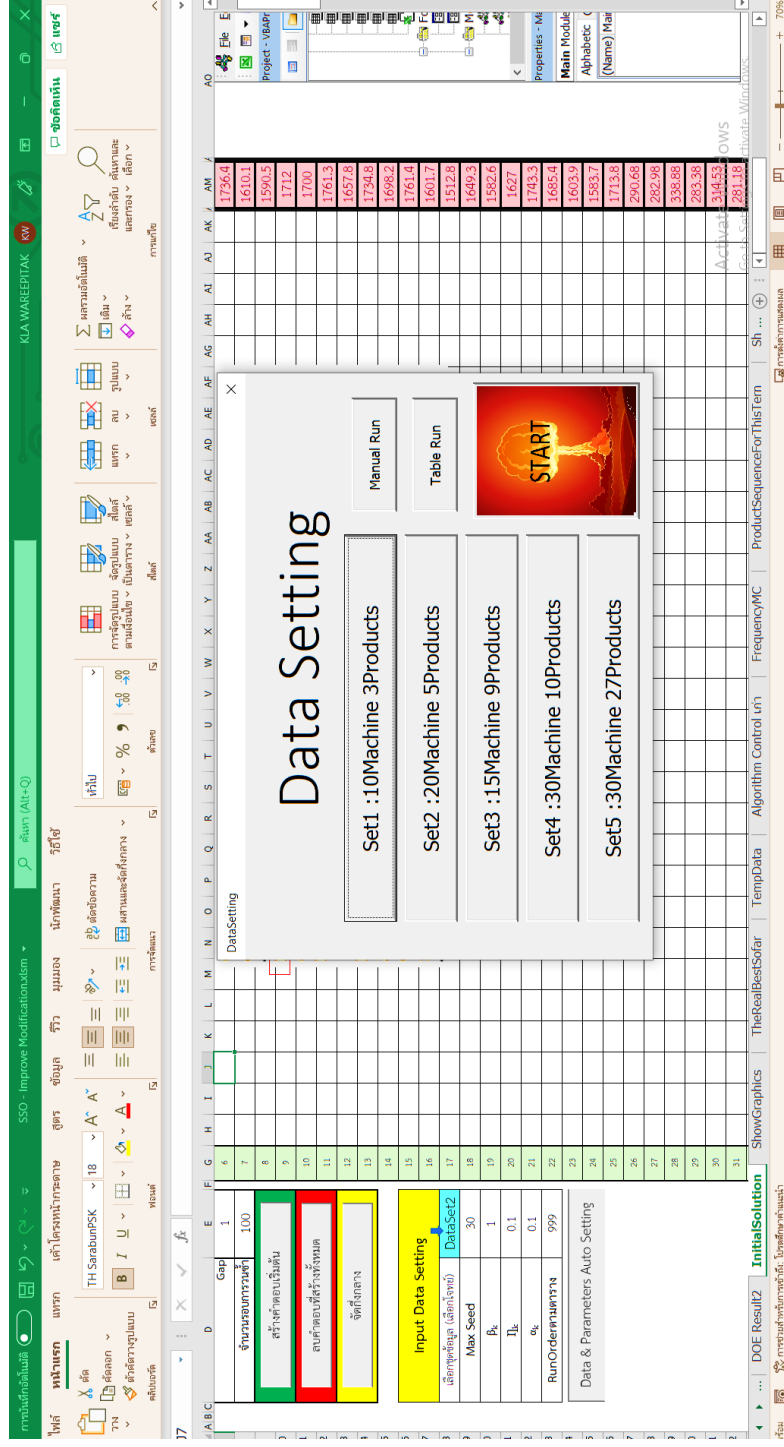
แนวคิดของลักษณะการทำงานในส่วนของการประมวลผลจะเกี่ยวข้องกับระบบการจัดเรียงเครื่องจักรของโปรแกรม โดยผู้ใช้งานต้องเลือกชุดข้อมูล (Datasets) ที่ต้องการเพื่อให้โปรแกรมทำการโหลดข้อมูล นำเข้าตามชุดของข้อมูลที่ถูกเลือกเก็บค่าของชุดข้อมูลนั้นไว้คำนวณในขั้นตอนต่อไปซึ่งขั้นตอนการเลือกชุดข้อมูลนี้จะทำผ่าน Graphic User Interface ดังภาพ 40



ภาพ 38 หน้าที่แรกเริ่มการเข้าสู่โปรแกรมแสดงที่ตั้งภาพ

[illegible]

ภาพ 39 เมฆใหม่ตุงคาอมูลเขาเขา



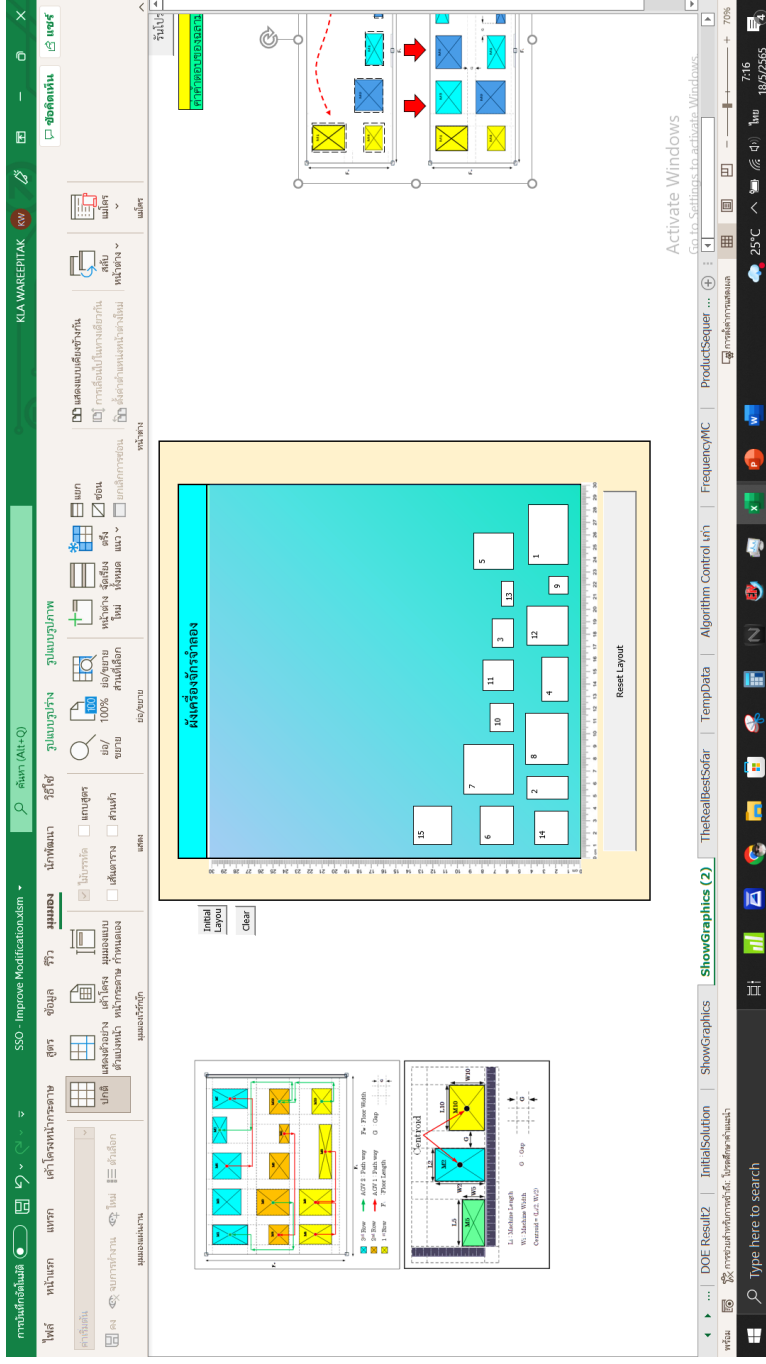
ภาพ 40 การเลือกชุดข้อมูลผ่าน Graphic User Interface

3. ส่วนของข้อมูลนำออก หรือส่วนการแสดงผล (Output phase)

ในส่วนการนำส่งข้อมูลขาออกของโปรแกรมนั้น สามารถจำแนกข้อมูลได้ 2 ประเภท ได้แก่ ผลลัพธ์ในรูปแบบของข้อความ (Text) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้รวมถึงขนาดของพื้นที่โรงงานที่ใช้จัดเรียงเครื่องจักร (กว้าง X ยาว) ระยะห่างระหว่างเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ลำดับของการจัดเรียงเครื่องจักรที่ดีที่สุด ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการวนซ้ำหาคำตอบในปัจจุบัน (Best Value) ค่าคำตอบที่ดีที่สุดตั้งแต่เริ่มกระบวนการค้นหาคำตอบ (Best so far) ค่าเฉลี่ยของคำตอบ (Average) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ในแต่ละรอบการค้นหา ลำดับการผลิตรวมถึงระยะทางรวมของรถขนถ่ายวัสดุที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิต การจัดเรียงเครื่องจักรในแต่ละแถว และข้อมูลนำออกในรูปแบบกราฟฟิคที่แสดงผลการจัดเรียงเครื่องจักรที่ดีที่สุด โดยสามารถระบุถึงตำแหน่งการจัดเรียงเครื่องจักรพร้อมทั้งระบุหมายเลขของเครื่องจักรแต่ละเครื่องได้ ซึ่งการแสดงผลข้อมูลในส่วนนี้ถูกจัดแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการแสดงผลรายงาน การแสดงผลการค้นหาคำตอบของโปรแกรม การแสดงผลผลลัพธ์ของลำดับการผลิต และการแสดงผลการจัดเรียงเครื่องจักรในแต่ละแถวโดยมีรูปแบบเป็น Graphic result โดยตัวอย่างการแสดงผลของการสร้างคำตอบเริ่มต้น และการจัดเรียงเครื่องจักรลงในผังของโปรแกรมแสดงได้ดังภาพ 41 และภาพ 42

การทดสอบการทำงานของโปรแกรมประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรด้วยโปรแกรมการวางผังเครื่องจักรที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นด้วยภาษา Visual Basic for Application (VBA) ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าโปรแกรมห้ทำงานได้อย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบโปรแกรมก่อนทำการทดลองด้วยการสอบเทียบผลเฉลย กล่าวคือเมื่อโปรแกรมได้จัดเรียงผังเครื่องจักรดำเนินการค้นหาคำตอบเสร็จสิ้น ผู้วิจัยจะดำเนินการสอบเทียบผลเฉลย ผ่านกระบวนการทดสอบได้แก่ การแก้ไขจุดบกพร่อง (Debugging) การตรวจสอบการรับเข้าของข้อมูลสู่กระบวนการคำนวณ การตรวจสอบการสร้างคำตอบเริ่มต้น การตรวจสอบลำดับขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรม การตรวจสอบสูตรการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม โดยรายละเอียดเนื้อหาการตรวจสอบจะแสดงไว้ในบทที่ 4 ในหัวข้อ การทวนสอบความถูกต้องของเครื่องมือการวางผังเครื่องจักร



ภาพ 42 ตัวอย่างส่วนของข้อมูลนำออกแผนผังจำลอง

การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการออกแบบการจำลองเหตุการณ์ หรือสภาพความเป็นจริงที่ผู้วิจัยต้องการศึกษา ให้อยู่ในสภาพที่สามารถควบคุมได้ เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถ สังเกต ทดสอบ ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรนำเข้า (Input variables) และผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรนำเข้า (Responses) จากการทดลองได้ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถทดสอบสมมติฐาน และบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังต่อไปนี้

1. การทดลองเพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางผัง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางผัง เนื่องจากสำหรับวิธีการหาคำตอบแบบเมต้าฮีวริสติกส์นั้น การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญ และมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลเฉลยที่ได้รับ โดยในการทดลองนี้จะถูกดำเนินการผ่านกระบวนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ (Full factorial experimental design) แบบ 3^K ตามจำนวนและระดับปัจจัย 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ดังตาราง 13 โดยทำการทดลองกับโจทย์ปัญหาที่มีขนาดแตกต่างกันทั้งหมด 5 โจทย์ที่อ้างอิงมาจาก ญัฎฐพงศ์ คำขาด (2551), Nearchou (2006) ผ่านการกำหนดหมายเลขสุ่มคงที่เพื่อทำการทดลองซ้ำ (Random seed value) 5 ค่าคือ 123, 234, 345, 456, 567 เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัยหลัก และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งการทดลองครั้งที่ 1 นี้จะนำมาซึ่งแนวทางในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการดมกลืนของฉลามที่เหมาะสมต่อการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

ตาราง 13 ปัจจัยและการแบ่งระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ต่ำ	กลาง	สูง
จำนวนประชากรฉลาม (NP) / รอบของการค้นหาซ้ำ (K_{max})	25/100	50/50	100/25
อัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม (β_k)	1	2	4
ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม (η_k)	0.1	0.5	0.9
สัมประสิทธิ์ความเฉื่อย (α_k)	0.1	0.5	0.9

เมื่อดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้เสร็จสิ้นแล้ว ข้อมูลที่ได้จะถูกวิเคราะห์และสรุปผลโดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แบบตัวแบบเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model: GLM) เพื่อสืบหาค่าวิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร โดยขั้นตอนของการทดลองที่ 1 นั้น แสดงได้ดังภาพ 43



ภาพ 43 ขั้นตอนการทดลองเพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของ
ฉลามเพื่อแก้ปัญหการวางผังเครื่องจักร

2. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลืนของ ฉลามในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร โดยนำผลเฉลยที่ได้จากวิธีการดังกล่าวเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์อื่น ๆ ได้แก่ วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) วิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu Search) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO) วิธีการแบบมด (Ant Colony Optimisation: ACO) วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimisation: BBO) วิธีการหาคำตอบแบบผึ้งผึ้ง (Artificial Bee Colony: ABC) วิธีการหาคำตอบแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) วิธีสับเปลี่ยนการกระโดดของกบ (Shuffled Frog Leaping Algorithm: SFLA)

เพื่อการเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้จากการทดลอง ขนาดของประชากรฉลาม (NP) และรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (k_{max}) ได้ตั้งค่าตาม (ณัฐพงษ์ คำขาด, 2551) ค่าอัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม สัมประสิทธิ์ความเฉื่อย จะถูกกำหนดตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อสรุปผลความแตกต่างระหว่างผลเฉลี่ยของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม และวิธีการอื่น ๆ จะถูกวิเคราะห์โดยการทดสอบที (t -test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variation: ANOVA) โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05

3. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบปรับปรุงในการแก้ไขปัญหาการวางผังเครื่องจักร

การทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบปรับปรุง เพื่อแก้ไขปัญหาการวางผังเครื่องจักร เพื่อเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้จากวิธีการดังกล่าวกับค่าคำตอบที่ได้จากวิธีการเมตาฮิวริสติกส์อื่น ๆ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 เพื่อการเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้จากการทดลอง ขนาดของประชากรฉลาม (NP) และรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (k_{max}) ได้ตั้งค่าตาม (ณัฐพงษ์ คำขาด, 2551) ค่าอัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม สัมประสิทธิ์ความเฉื่อย จะถูกกำหนดตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 ทั้งนี้ การวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อสรุปผลความแตกต่างระหว่างผลเฉลี่ยของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม และวิธีการอื่น ๆ จะถูกวิเคราะห์โดยการทดสอบที (t -test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variation: ANOVA) โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05

บทที่ 4

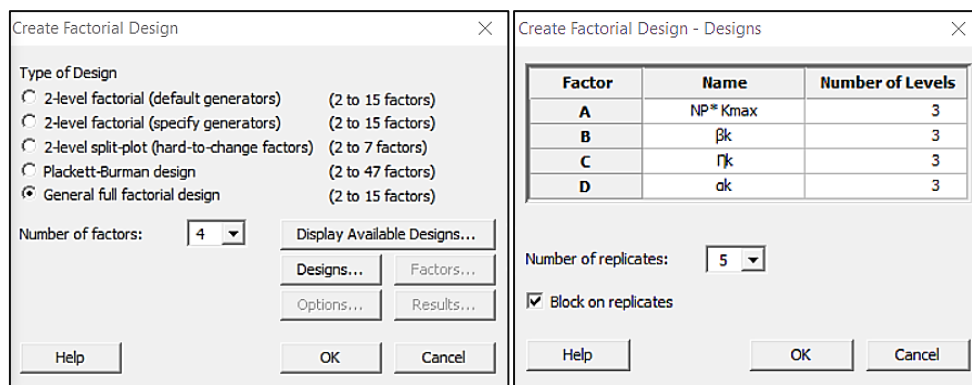
ผลการดำเนินงาน

ในบทที่ 4 นี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการดำเนินงาน ซึ่งจะได้แสดงถึงรายละเอียดของกระบวนการออกแบบการทดลอง ผลการทดลอง การอภิปรายการทดลอง และผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมการประยุกต์ใช้วิธีการดมกลิ่นของฉลามในการแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักรตามที่ได้วางแผนไว้ดังบทที่ 3 การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ทดลอง โดยผลการออกแบบการทดลอง และผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

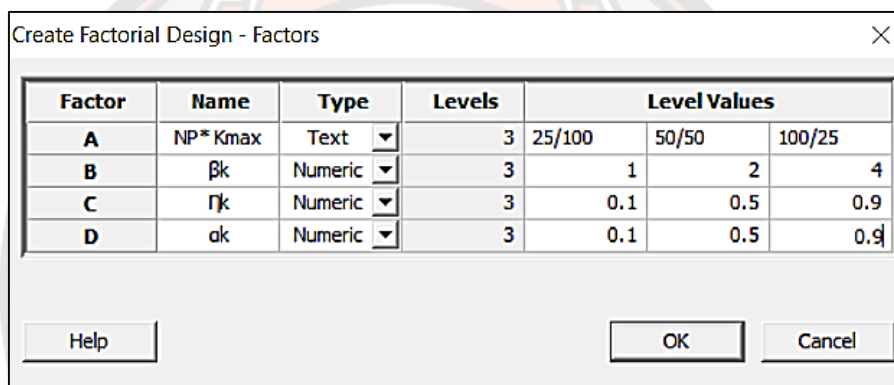
ผลการออกแบบการทดลอง และผลการทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของวิธีการดมกลิ่นของฉลามในการแก้ปัญหา MLP

การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Shark Smell Optimisation: SSO) เป็นกระบวนการทดลองที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการทำงานของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องทำการสืบหาทั้งสิ้น 4 ค่า ได้แก่ การคูณกันระหว่างจำนวนประชากรฉลามและจำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำสูงสุด ($NP * K_{max}$) อัตราส่วนความเร็วจำกัดของฉลาม (β_k) ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม (η_k) และค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยหรืออัตราโมเมนตัม (α_k) ในงานวิจัยนี้ดำเนินการออกแบบการทดลองผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติโดยใช้การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ซึ่งได้แบ่งระดับปัจจัยของวิธีการดมกลิ่นของฉลามทั้ง 4 ปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ ดังตาราง 13 โดยมีการทดลองรวมกัน 81 การทดลอง จาก 3^k โดย k คือจำนวนปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ที่การทดลองซ้ำ 5 ครั้ง รวมการทดลองรวมทั้งสิ้น $81 \times 5 = 405$ การทดลองต่อ 1 ชุดข้อมูล รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ดังภาพ 44 และภาพ 45

โดยได้ทำการทดลองกับ 5 โจทย์ปัญหาที่ต่างกัน โดยรายละเอียดของโจทย์ปัญหาดังกล่าวแสดงได้ตาราง 8 ชุดของข้อมูล จำนวนเครื่องจักร และจำนวนผลิตภัณฑ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังเนื้อหาต่อไปนี้



ภาพ 44 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ



ภาพ 45 การตั้งค่าการออกแบบการทดลองสำหรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4

โดยหลังจากดำเนินการทดลองตามลำดับการทดลองที่ได้ทำการออกแบบไว้ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล และทำการบันทึกผลการทดลอง

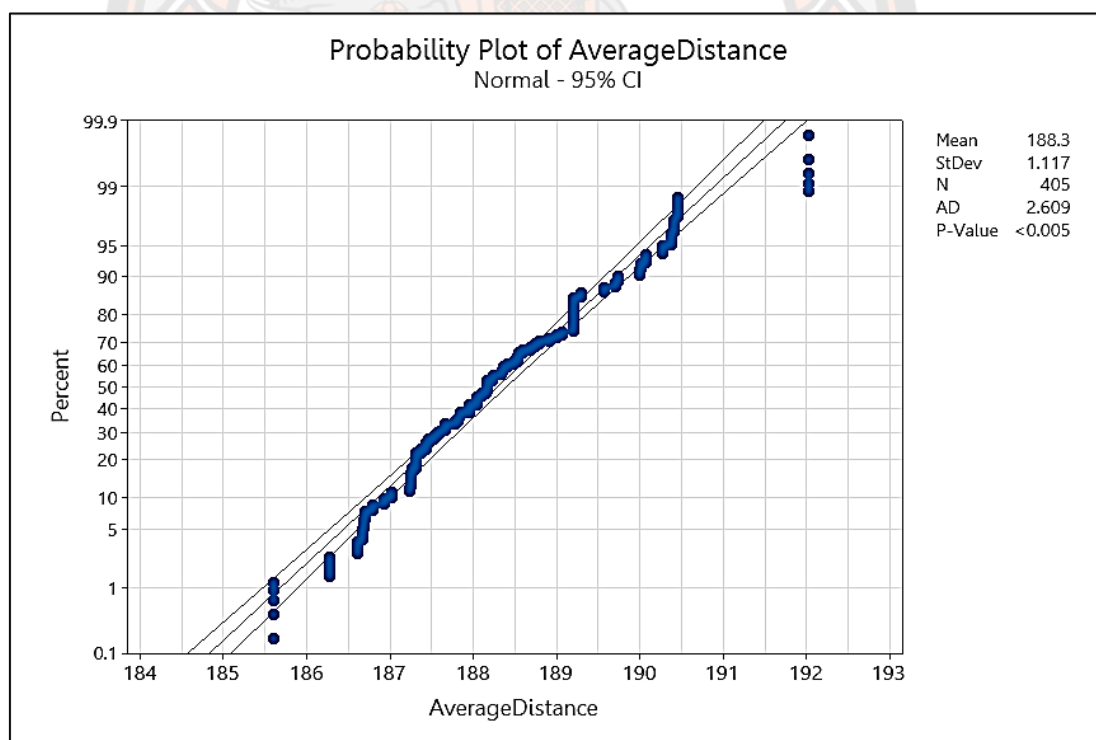
การวิเคราะห์ผลการทดลองเริ่มจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของผลลัพธ์ เพื่อทดสอบว่าผลลัพธ์ดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ ก่อนนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แบบตัวแบบเชิงเส้นทั่วไป (GLM) เพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการดมกลิ่นของฉลาม ทั้ง 4 ค่าที่ทำให้ค่าระยะทางทางการขนถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรซึ่งเป็นผลเฉลยของปัญหามีค่าต่ำที่สุด

สำหรับในการทดลองที่ 1 นี้ เพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ข้อมูลจะถูกวิเคราะห์และสรุปผล ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของผลลัพธ์ เพื่อทดสอบว่าผลลัพธ์ดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ ก่อนนำไปวิเคราะห์ความ

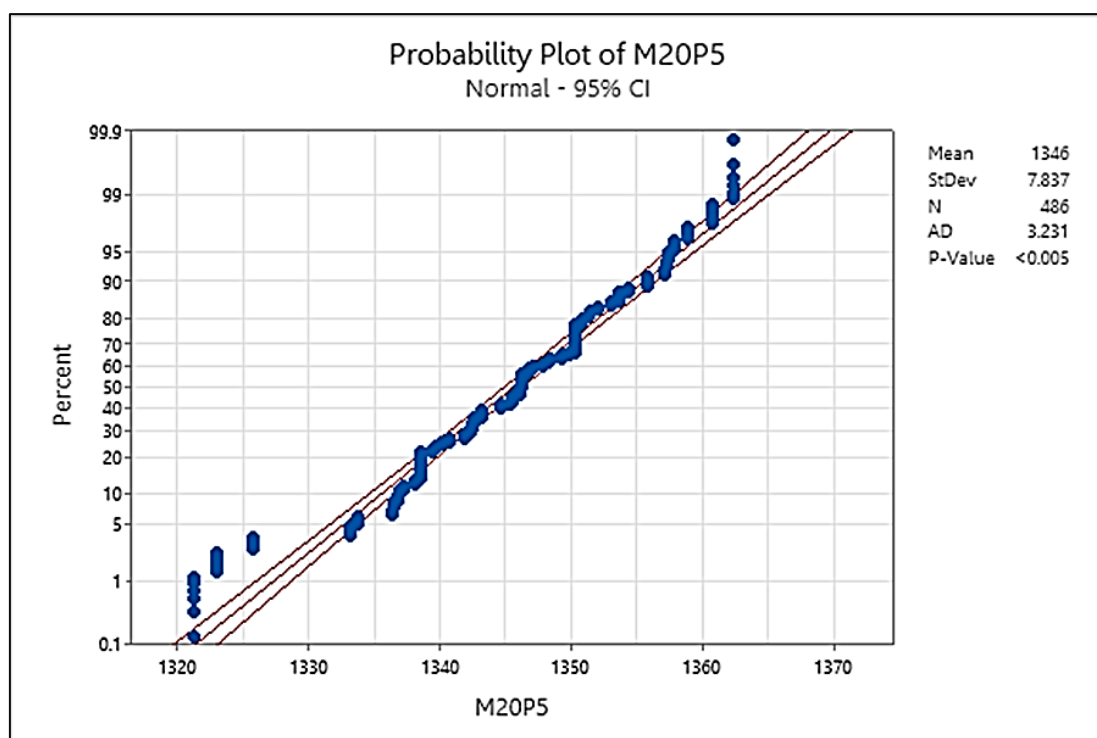
แปรปรวน (ANOVA) ด้วยแบบตัวแบบเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model: GLM) เพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการตกมันของฉลามทั้ง 4 ค่าที่ทำให้ค่าระยะทางทางการขนถ่ายวัสดุระหว่างเครื่องจักรซึ่งเป็นผลเฉลยของปัญหามีค่าต่ำที่สุด โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ผลในแต่ละขั้นตอนแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. การทดสอบการกระจายตัวของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ 1

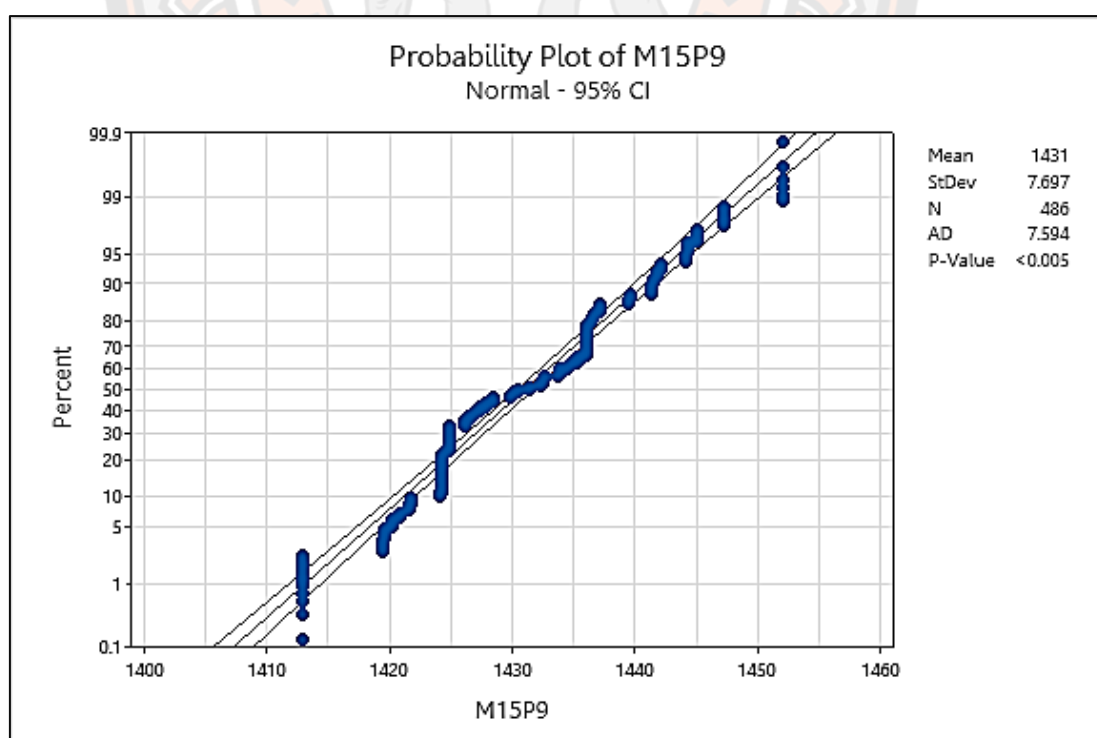
จากการทำการทดสอบการกระจายตัวของผลลัพธ์ของชุดข้อมูลทั้ง 5 ชุด ด้วยการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Probability Plot) ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ พบว่า ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าผลลัพธ์ของชุดข้อมูลทั้ง 5 ชุดข้อมูล นั้นมีการแจกแจงแบบปกติที่ร้อยละความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 โดยรายละเอียดกราฟการกระจายตัวของข้อมูล และผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของชุดข้อมูลทั้ง 5 แสดงได้ดังภาพ 46 ถึง ภาพ 50



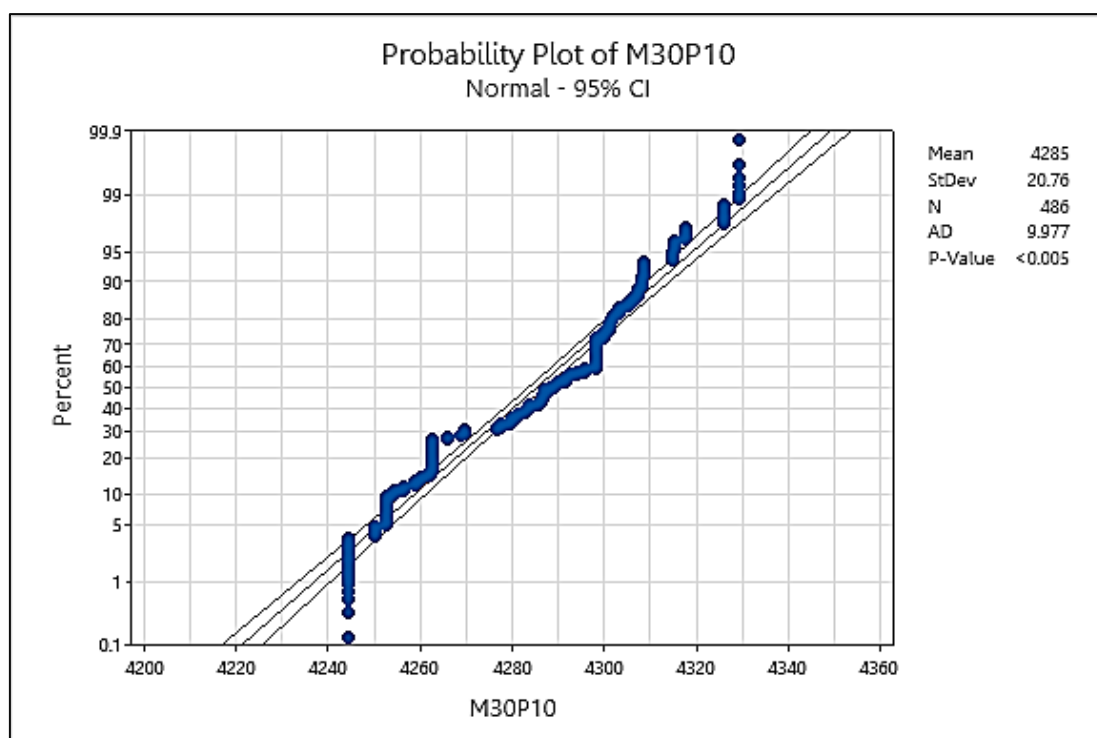
ภาพ 46 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M10P3



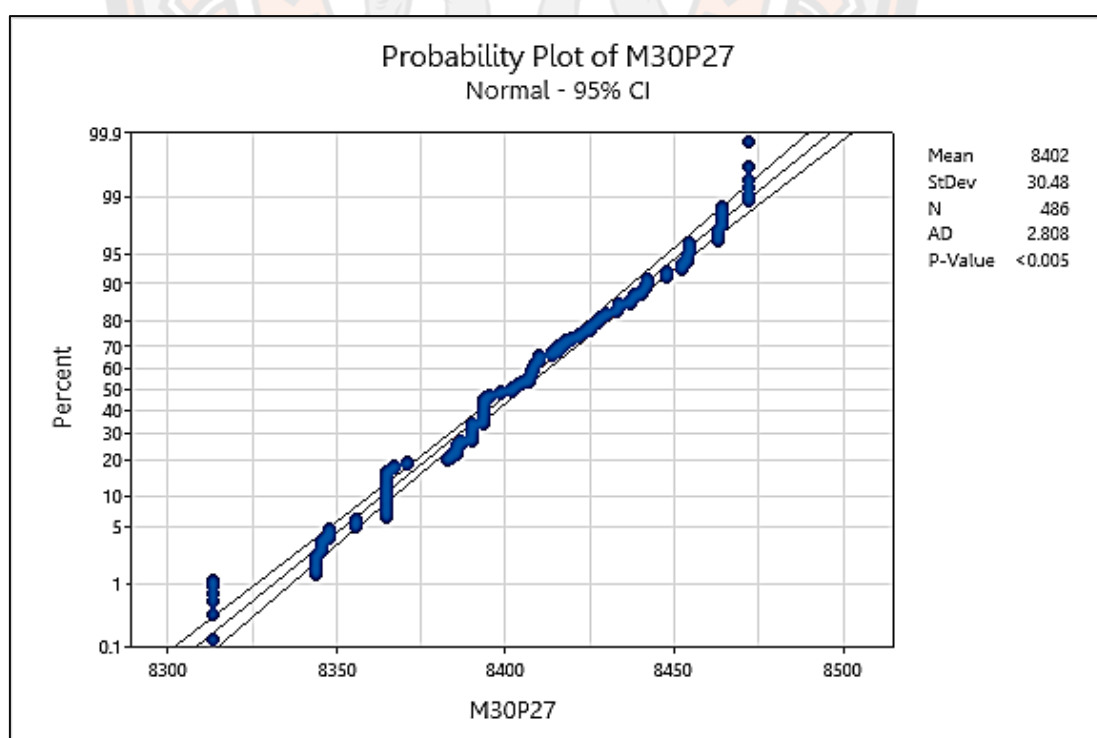
ภาพ 47 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M20P5



ภาพ 48 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M15P9



ภาพ 49 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M30P10



ภาพ 50 กราฟแสดงผลการกระจายตัวแบบปกติของชุดข้อมูล M30P27

2. การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

เพื่อให้การทำงานของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหาการวางผังเครื่องจักรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบว่าค่าพารามิเตอร์ใดบ้างที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ในการแก้ปัญหา อีกทั้งยังสามารถสนับสนุนให้การทดลองเพื่อสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของฉลาม เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในการวิเคราะห์นั้นจะทำการวิเคราะห์จากค่า P-Value โดยถ้าหากค่า P-Value ของผลกระทบใดมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จะสรุปได้ว่าปัจจัยตัวนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละความเชื่อมั่น 95 โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติสำเร็จรูปของชุดข้อมูลทั้ง 5 สามารถสรุปได้ดังตาราง 14

ตาราง 14 ปัจจัยและค่า P-Value ของชุดข้อมูลที่ 1-5

ปัจจัย	ค่า P-Value				
	M10P3	M20P5	M15P9	M30P10	M30P27
NP/K_{max}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
β_k	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
η_k	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
α_k	0.003	0.023	0.000	0.000	0.000
$NP/K_{max} * \beta_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$NP/K_{max} * \eta_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$NP/K_{max} * \alpha_k$	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
$\beta_k * \eta_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
$\beta_k * \alpha_k$	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000
$\eta_k * \alpha_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$NP/K_{max} * \beta_k * \eta_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$NP/K_{max} * \beta_k * \alpha_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$NP/K_{max} * \eta_k * \alpha_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\beta_k * \eta_k * \alpha_k$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Model Summary (R-Sq)	83.94%	79.27%	83.62%	93.40%	79.81%

จากตาราง 14 พบว่าค่า P-Value ของค่าปัจจัยหลักได้แก่การคูณกันระหว่างจำนวนประชากรฉลามและจำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำสูงสุด ($NP * K_{max}$) อัตราส่วนความเร็วจำกัดของฉลาม (β_k) ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม (η_k) และค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยหรืออัตราโมเมนตัม (α_k) รวมถึงผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่าง 3

ปัจจัย มีค่าน้อยกว่า 0.05 ในชุดข้อมูลที่ 1-5 จึงสรุปได้ว่าค่าปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมดังกล่าวมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย GLM พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแบบ (R-Square) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของแต่ละชุดข้อมูลนั้นอยู่ในระดับสูง โดยเป็นสิ่งที่แสดงว่าตัวแบบการพยากรณ์ดังกล่าวนั้นมีความน่าเชื่อถือ ทั้งนี้รายละเอียดผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูปเพิ่มเติม สามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก.

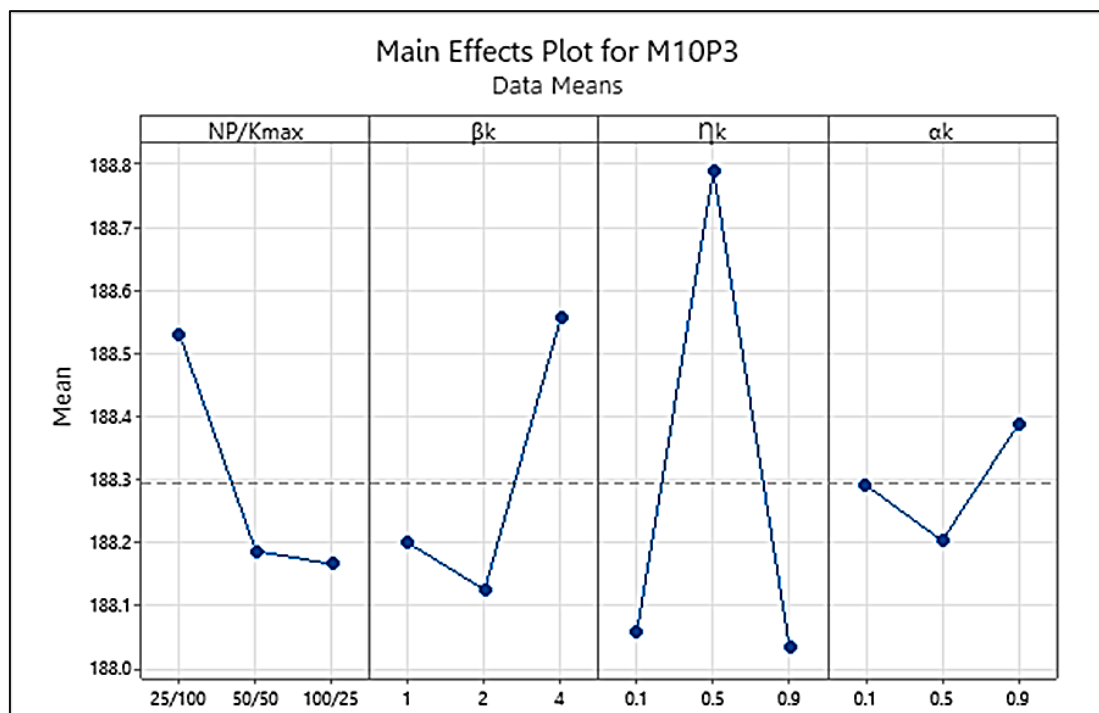
3. การวิเคราะห์ และสรุปผลการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้เป็น การวิเคราะห์ และสรุปผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร วิเคราะห์จากกราฟผลกระทบหลัก (Main effect plot) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยแบบตัวแบบเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model: GLM) โดยการวิเคราะห์ผลจากกราฟผลกระทบหลักนี้ ถูกใช้ในการระบุถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ในกรณีที่ว่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกราฟผลกระทบหลัก (Main effect plot) ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติสำเร็จรูปของชุดข้อมูลทั้ง 5 ชุด สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

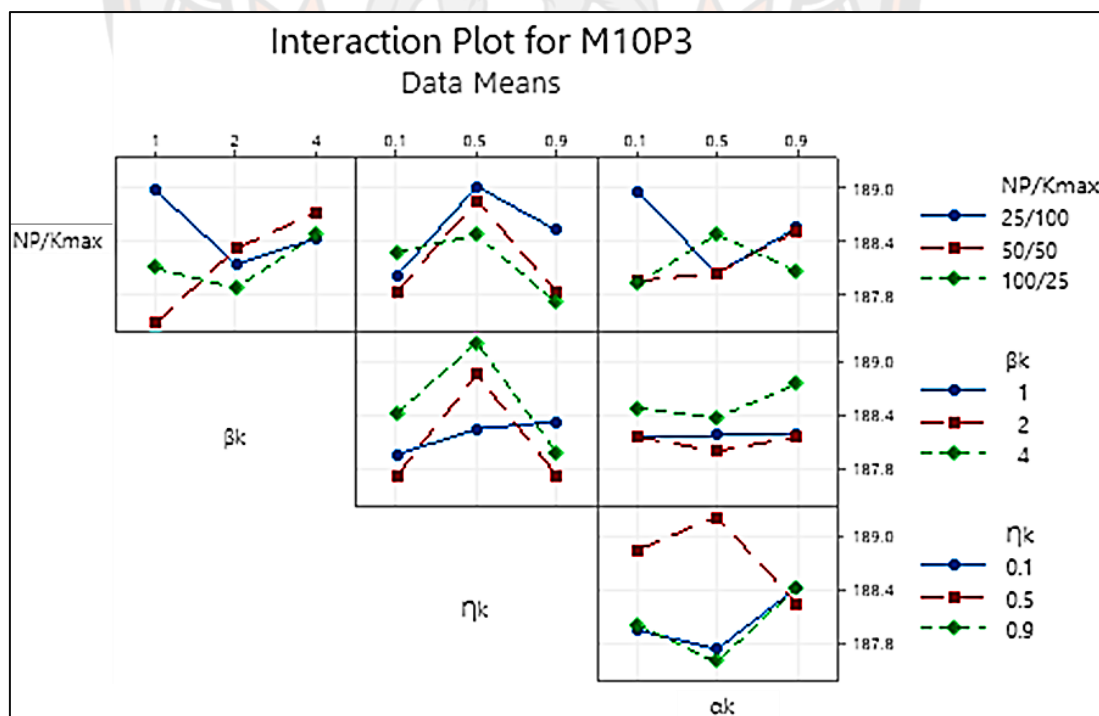
3.1 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M10P3

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M10P3 จากภาพ 51 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของพบว่าหากกำหนดให้ $NP * K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 100/25 ส่งผลให้เกิดระยะทางการเดินทางของรถขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุดได้ในการหาค้นคำตอบ ในทำนองเดียวกันสำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ หากพิจารณาจากกราฟปัจจัยหลักจะพบว่าควรกำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 2 ควรกำหนด η_k ให้เท่ากับ 0.9 และควรกำหนด α_k ให้เท่ากับ 0.5

ทั้งนี้เมื่อกลับไปพิจารณากราฟของปัจจัยหลักพบว่าพารามิเตอร์บางตัวที่แน่นอนจะมีรูปแบบการกำหนดค่าต่างกันแต่กลับให้คำตอบของผลลัพธ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ $NP * K_{max}$ ที่การกำหนดค่า 50/50 และ 100/25 พารามิเตอร์ β_k ที่การกำหนดค่า 1 และ 2 ค่าพารามิเตอร์ η_k ที่การกำหนดค่า 0.1 และ 0.9 ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) ของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อพิสูจน์ยืนยันรูปแบบการกำหนดค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95



ภาพ 51 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M10P3



ภาพ 52 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M10P3

หลังจากการทดสอบความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยระหว่างประชากรสองกลุ่ม คือ กลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า $NP * K_{max}$ เท่ากับ 50/50 และกลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า $NP * K_{max}$ เท่ากับ 100/25 พบว่าประชากรทั้งสองกลุ่มนั้นไม่มีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ $NP * K_{max}$ ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 50/50 หรือ 100/25 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ $NP * K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 50/50 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

เช่นเดียวกับค่า β_k หลังจากการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) พบว่าผลเฉลยระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยที่ได้จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้ ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ β_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 1 หรือ 2 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ β_k มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

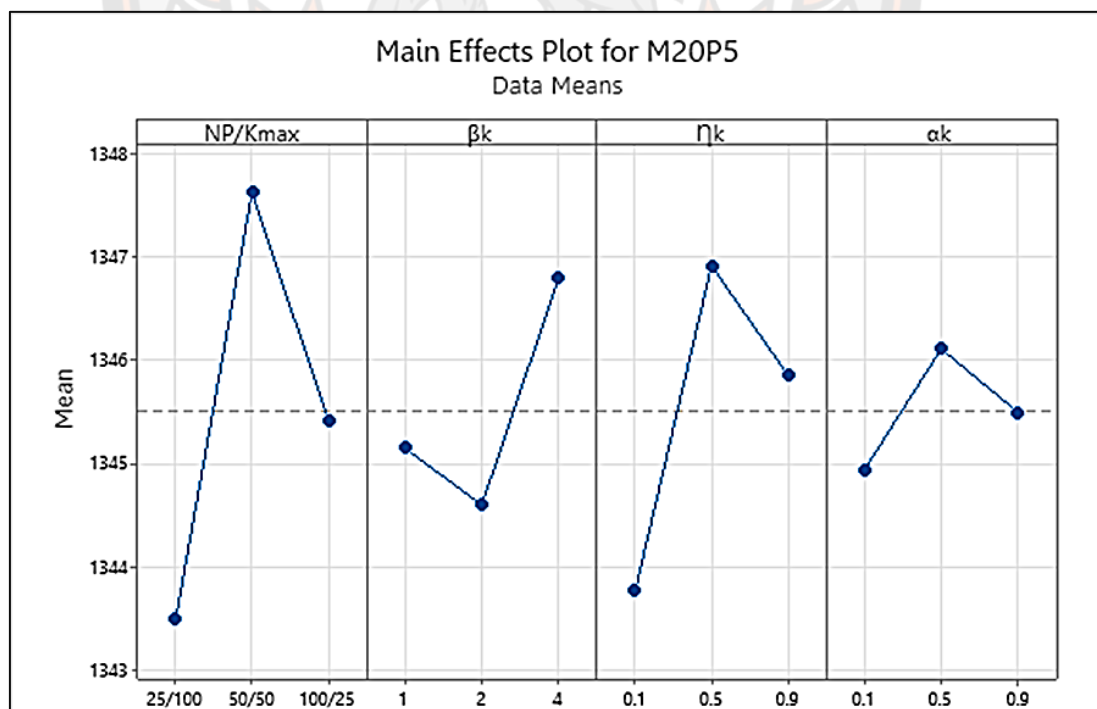
ทั้งนี้สำหรับค่าพารามิเตอร์ η_k หลังจากการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) พบว่าผลคำตอบเฉลี่ยของค่าปัจจัยไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ η_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 0.1 หรือ 0.9 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ η_k มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

สำหรับชุดข้อมูล M10P3 เมื่อทำการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบปัจจัยหลัก และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย สามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าของวิธีการดมกลื่นของฉลามควรมีการกำหนด $NP * K_{max}$ ให้มีค่าเท่ากับ 50/50 กำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 1 กำหนด η_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 และกำหนดค่า α_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 เพื่อให้การแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลามได้ผลลัพธ์ระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยสั้นที่สุด

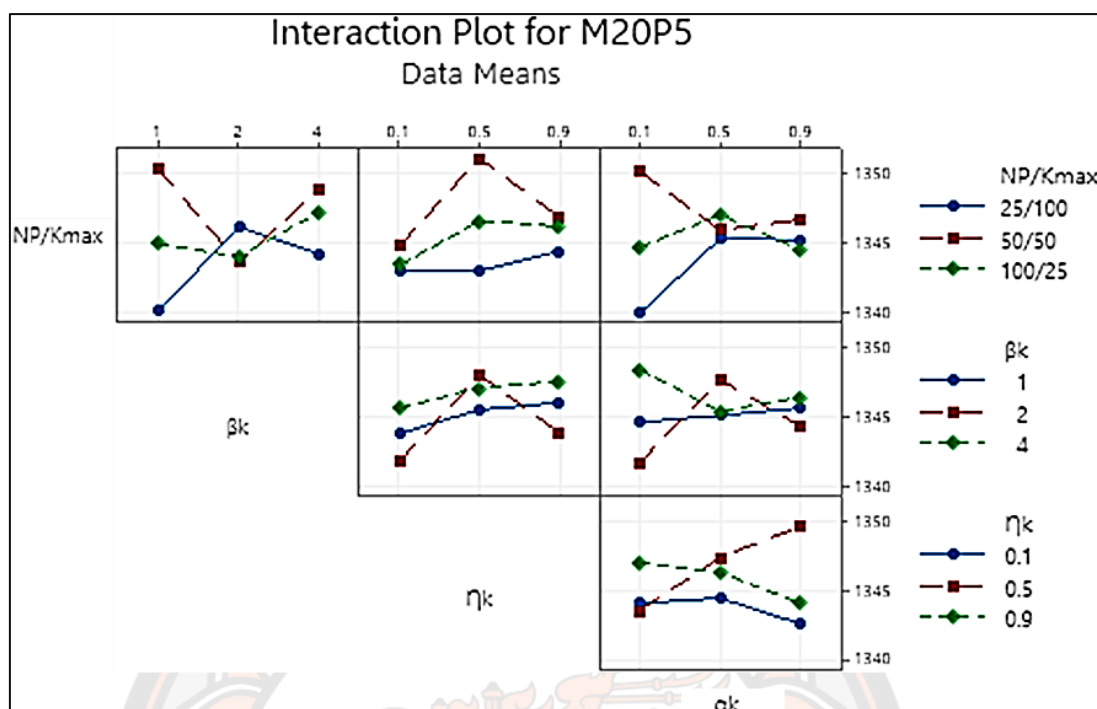
3.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M20P5

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M20P5 จากภาพ 53 กราฟ ผลกระทบปัจจัยหลักของพบว่าหากกำหนดให้ $NP * K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 25/100 ส่งผลให้เกิดระยะทางการเดินทางของรถขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุดได้ในการหาค้นคำตอบ ในทำนองเดียวกันสำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ หากพิจารณาจากกราฟปัจจัยหลักจะพบว่าควรกำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 2 ควรกำหนด η_k ให้เท่ากับ 0.1 และควรกำหนด α_k ให้เท่ากับ 0.1

ทั้งนี้เมื่อกลับไปพิจารณากราฟของปัจจัยหลักพบว่าพารามิเตอร์บางตัวที่แน่นอนจะมีรูปแบบการกำหนดค่าต่างกันแต่กลับให้ค่าคำตอบของผลลัพธ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันได้แก่ β_k ที่การกำหนดค่า 1 และ 2 ค่าพารามิเตอร์ α_k ที่การกำหนดค่า 0.1 และ 0.9 ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t -test) ของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อพิสูจน์ยืนยันรูปแบบการกำหนดค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t -test) ของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อพิสูจน์ยืนยันรูปแบบการกำหนดค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95



ภาพ 53 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M20P5



ภาพ 54 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M20P5

หลังจากการทดสอบความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยระหว่างประชากรสองกลุ่ม คือ กลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า β_k เท่ากับ 1 และกลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า β_k เท่ากับ 2 พบว่าประชากรทั้งสองกลุ่มนั้นไม่มีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ β_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 1 หรือ 2 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ β_k มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

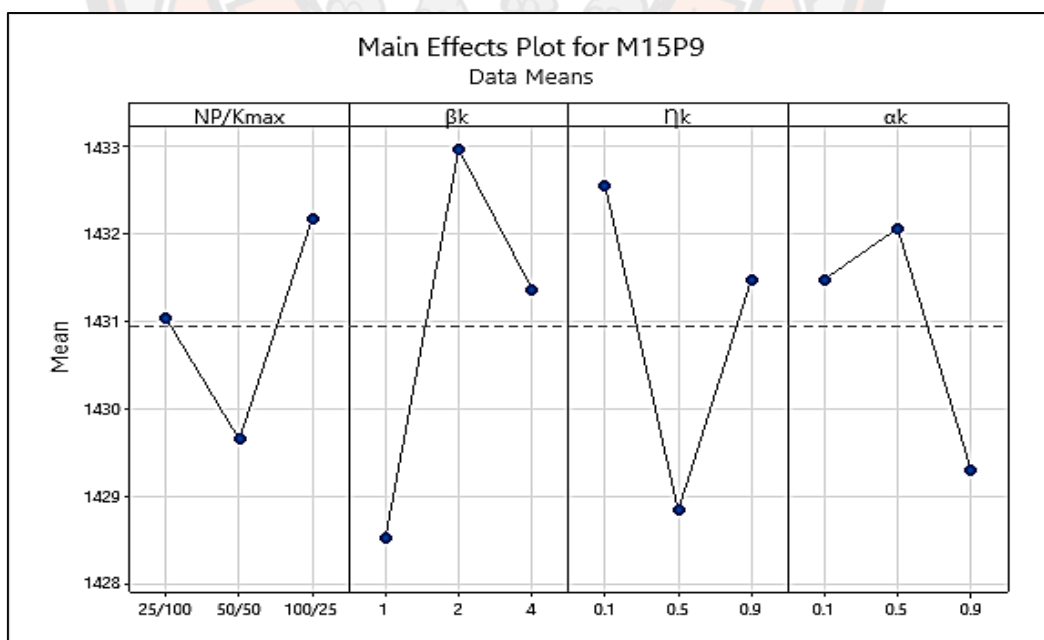
สำหรับค่าพารามิเตอร์ α_k หลังจากการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t -test) พบว่าผลคำตอบเฉลี่ยของค่าปัจจัยไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ α_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 0.1 หรือ 0.9 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ α_k มีค่าเท่ากับ 0.9 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

สำหรับชุดข้อมูล M20P5 เมื่อทำการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบปัจจัยหลัก และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย สามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าของวิธีการดมกลืนของฉลามควรมีการกำหนด $NP * K_{max}$ ให้มีค่าเท่ากับ 25/100 กำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 1 กำหนด η_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 และกำหนดค่า α_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.9 เพื่อให้การแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลามได้ผลลัพธ์ระยะทางขอย้ายวัสดุเฉลี่ยสั้นที่สุด

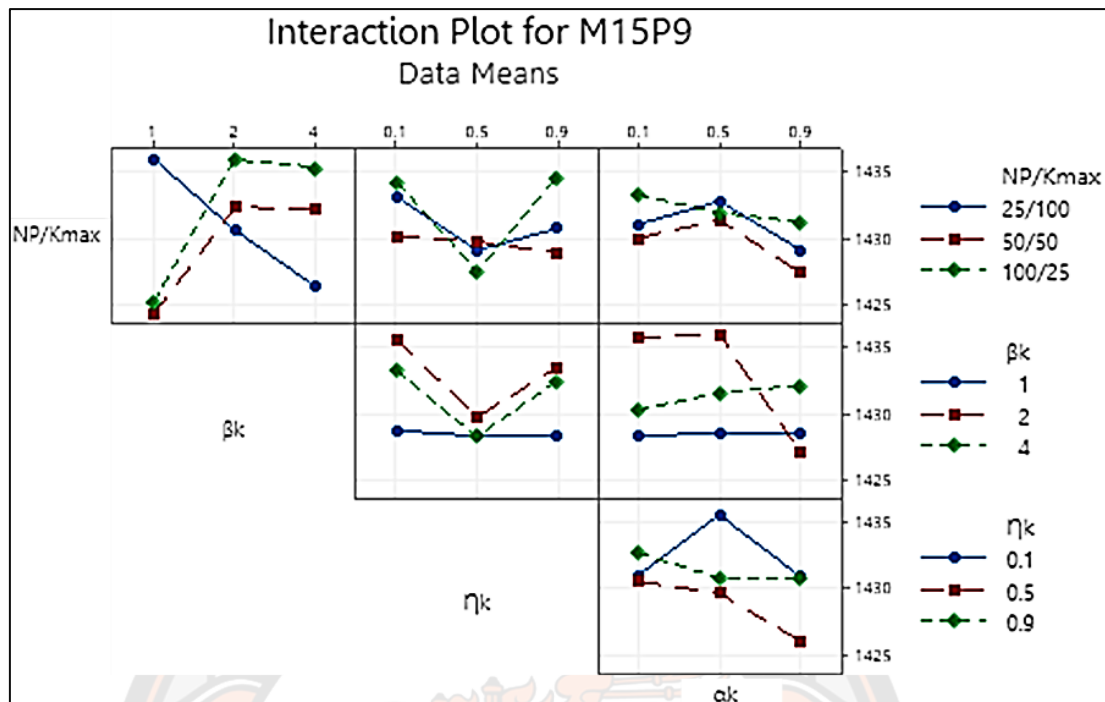
3.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M15P9

สำหรับชุดข้อมูล M15P9 เมื่อทำการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบปัจจัยหลัก และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ซึ่งมีผลลัพธ์สอดคล้องตรงกันว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าของวิธีการดมกลืนของฉลามควรมีการกำหนด $NP * K_{max}$ ให้มีค่าเท่ากับ 50/50 กำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 กำหนด η_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.9 และกำหนดค่า α_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.9 เพื่อให้การแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลามได้ผลลัพธ์ระยะทางขอย้ายวัสดุเฉลี่ยสั้นที่สุด

รายละเอียดกราฟผลกระทบปัจจัยหลัก และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย แสดงได้ดังภาพ 55 และภาพ 56



ภาพ 55 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M15P9

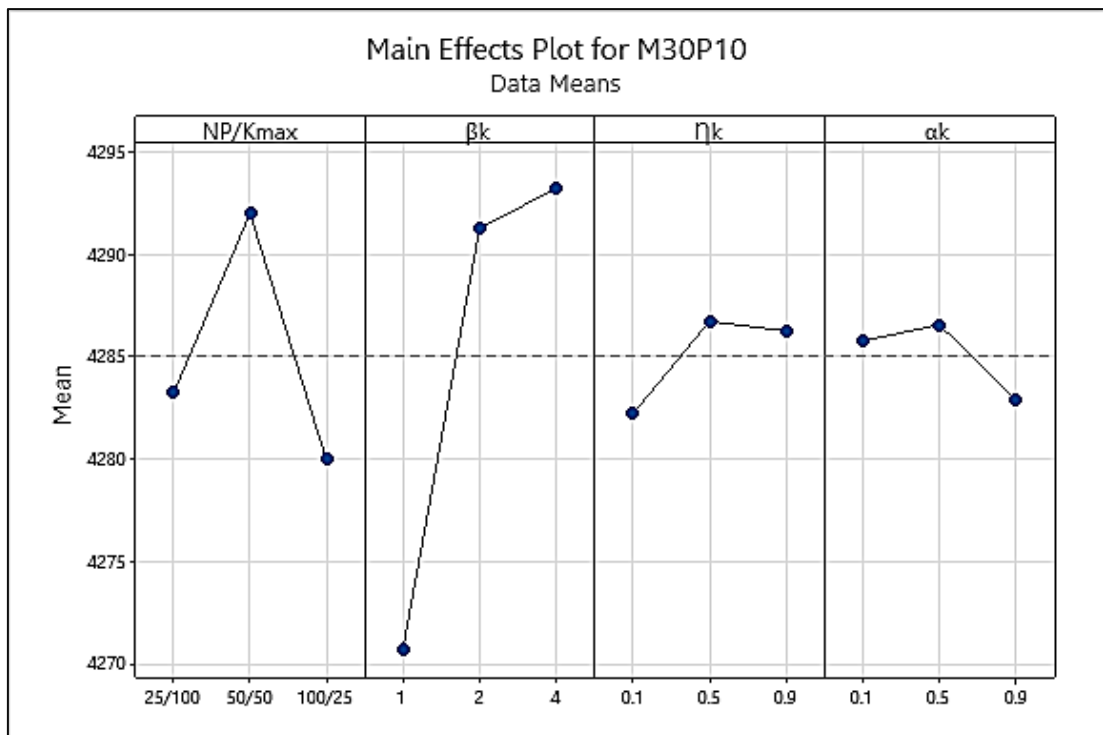


ภาพ 56 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M15P9

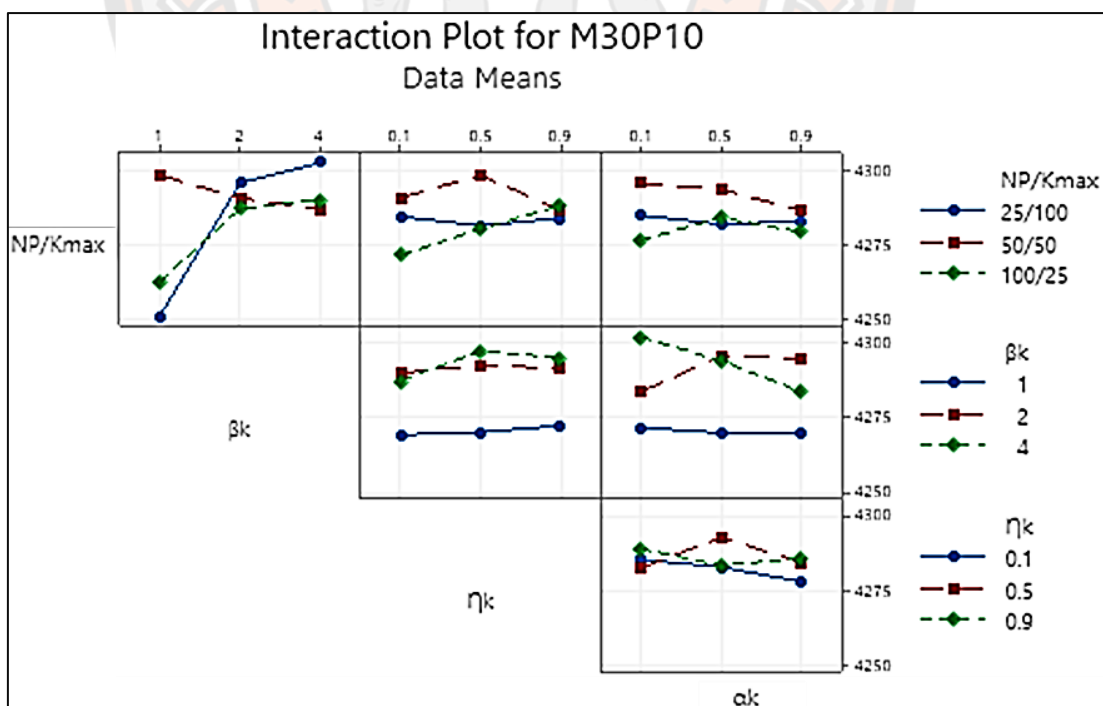
3.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M30P10

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชุดข้อมูล M30P10 จากภาพ 57 กราฟ ผลกระทบปัจจัยหลักของพบว่าหากกำหนดให้ $NP * K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 100/25 ส่งผลให้เกิดระยะทางการเดินทางของรถขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุดได้ในการหาค้นคำตอบ ในทำนองเดียวกันสำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ หากพิจารณาจากกราฟปัจจัยหลักจะพบว่าควรกำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 1 ควรกำหนด η_k ให้เท่ากับ 0.1 และควรกำหนด α_k ให้เท่ากับ 0.9

ทั้งนี้เมื่อกลับไปพิจารณากราฟของปัจจัยหลักพบว่าพารามิเตอร์บางตัวที่แน่นอนจะมีรูปแบบการกำหนดค่าต่างกันแต่กลับให้ค่าคำตอบของผลลัพธ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ $NP * K_{max}$ ที่การกำหนดค่า 25/100 และ 100/25 พารามิเตอร์ η_k ที่การกำหนดค่า 0.1 และ 0.9 ค่าพารามิเตอร์ α_k ที่การกำหนดค่า 0.1 และ 0.9 ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) ของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อพิสูจน์ยืนยันรูปแบบการกำหนดค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95



ภาพ 57 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M30P10



ภาพ 58 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M30P10

หลังจากการทดสอบความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยระหว่างประชากรสองกลุ่ม คือ กลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า $NP * K_{max}$ เท่ากับ 25/100 และกลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า $NP * K_{max}$ เท่ากับ 100/25 พบว่าประชากรทั้งสองกลุ่มนั้นไม่มีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ $NP * K_{max}$ ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 25/100 หรือ 100/25 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ $NP * K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 25/100 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยดังภาพ 58

เช่นเดียวกับค่า η_k หลังจากการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) พบว่าผลเฉลี่ยระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยที่ได้จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ η_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 0.1 หรือ 0.9 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ η_k มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีที่สุดในกราฟปัจจัยหลักแต่เดิม อีกทั้งยังสอดคล้องกับกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

ทั้งนี้สำหรับค่าพารามิเตอร์ α_k หลังจากการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) พบว่าผลคำตอบเฉลี่ยของค่าปัจจัยไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ α_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 0.1 หรือ 0.9 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการขนถ่ายวัสดุเฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ α_k มีค่าเท่ากับ 0.9 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

สำหรับชุดข้อมูล M30P10 เมื่อทำการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบปัจจัยหลัก และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย สามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าของวิธีการดมกลืนของฉลามควรมีการกำหนด $NP * K_{max}$ ให้มีค่าเท่ากับ 25/100 กำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 1 กำหนด η_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 และกำหนดค่า α_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.9 เพื่อให้การแก้ไขปัญหาการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลามได้ผลลัพธ์ระยะทางขนถ่ายวัสดุเฉลี่ยสั้นที่สุด

3.5 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับชุดข้อมูล M30P27

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชุดข้อมูล M30P27 จากภาพ 59 กราฟ ผลกระทบปัจจัยหลักของพบว่าหากกำหนดให้ $NP^* K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 50/50 ส่งผลให้เกิดระยะทางการเดินทางของรถยนต์ที่สั้นที่สุดได้ในการหาค้นคำตอบ ในทำนองเดียวกันสำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ หากพิจารณาจากกราฟปัจจัยหลักจะพบว่าควรกำหนด β_k ให้มีค่าเท่ากับ 1 ควรกำหนด η_k ให้เท่ากับ 0.5 และควรกำหนด α_k ให้เท่ากับ 0.1

ทั้งนี้เมื่อกลับไปพิจารณากราฟของปัจจัยหลักพบว่าพารามิเตอร์บางตัวที่แน่นอนจะมีรูปแบบการกำหนดค่าต่างกันแต่กลับให้ค่าคำตอบของผลลัพธ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ $NP^* K_{max}$ ที่การกำหนดค่า 25/100 และ 50/50 พารามิเตอร์ η_k ที่การกำหนดค่า 0.1 และ 0.5 ค่าพารามิเตอร์ α_k ที่การกำหนดค่า 0.1 และ 0.9 ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) ของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อพิสูจน์ยืนยันรูปแบบการกำหนดค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95

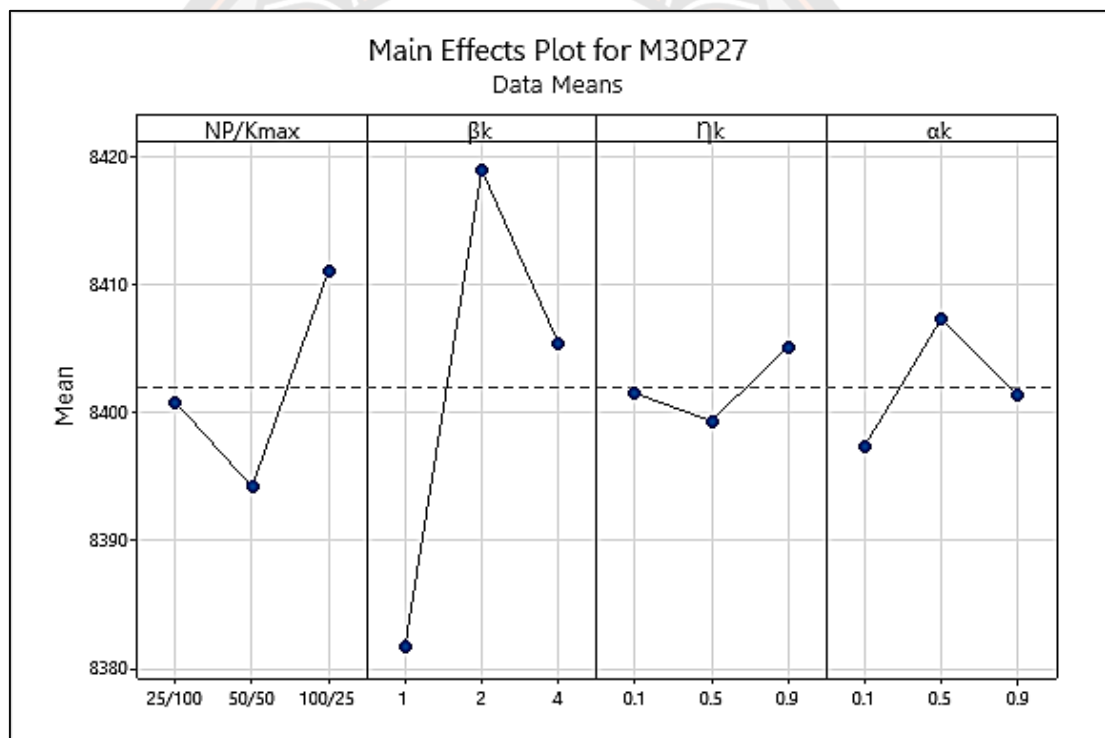
หลังจากการทดสอบความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ระยะทางรถยนต์เฉลี่ยระหว่างประชากรสองกลุ่ม คือ กลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า $NP^* K_{max}$ เท่ากับ 25/100 และกลุ่มผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่า $NP^* K_{max}$ เท่ากับ 50/50 พบว่าประชากรทั้งสองกลุ่มนั้นไม่มีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ $NP^* K_{max}$ ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 25/100 หรือ 50/50 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการรถยนต์เฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ $NP^* K_{max}$ มีค่าเท่ากับ 50/50 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

เช่นเดียวกับค่า η_k หลังจากการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) พบว่าผลเฉลยระยะทางรถยนต์เฉลี่ยที่ได้จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ η_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 0.1 หรือ 0.5 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการรถยนต์เฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ η_k มีค่าเท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีที่สุดในกราฟปัจจัยหลักแต่เดิม อีกทั้งยังสอดคล้องกับกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

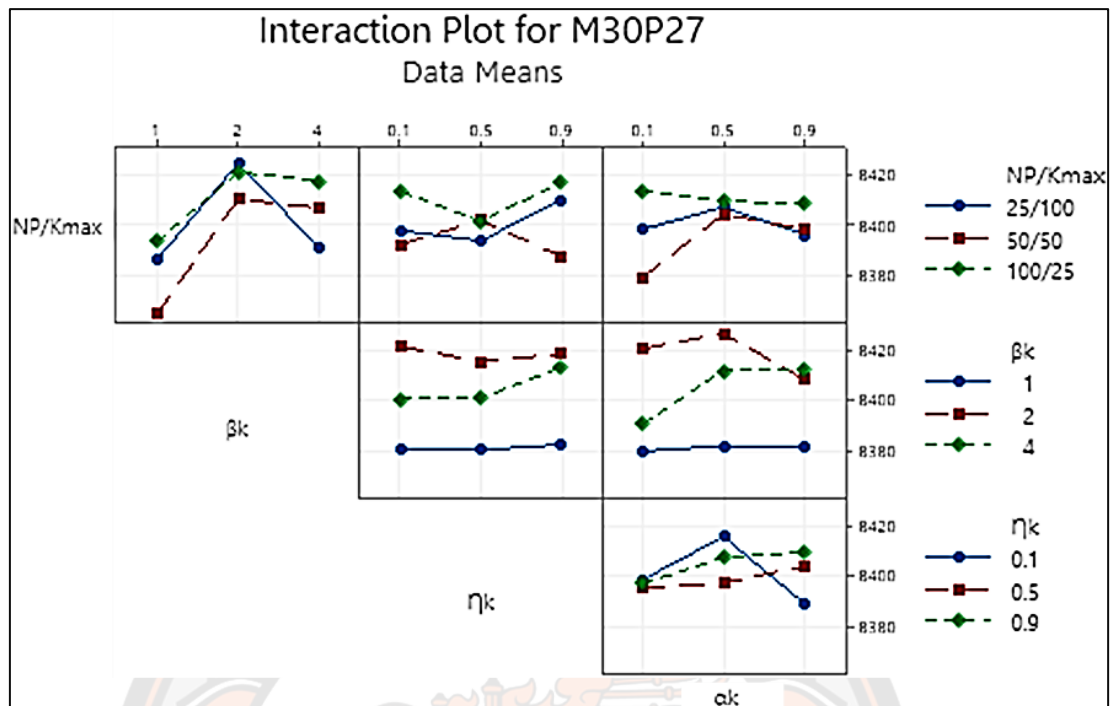
ทั้งนี้สำหรับค่าพารามิเตอร์ α_k หลังจากการทดสอบสมมุติฐานของผลต่างของค่าเฉลี่ยประชากรสองกลุ่ม (t-test) พบว่าผลคำตอบเฉลี่ยของค่าปัจจัยไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ α_k ไม่ว่าจะกำหนดค่าให้เป็น 0.1 หรือ 0.9 ก็จะทำให้ผลลัพธ์ค่าระยะทางการรถยนต์เฉลี่ย ที่ไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในที่นี้

ผู้วิจัยจะเลือกกำหนดให้ α_k มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ผลคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดในกราฟปัจจัยหลักแต่เดิม อีกทั้งยังสอดคล้องกับกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

สำหรับชุดข้อมูล M30P27 เมื่อทำการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบปัจจัยหลัก และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย สามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าของวิธีการดมกลืนของฉลามควรมีการกำหนดผลคูณของจำนวนประชากรฉลามและจำนวนรอบการค้นหาซ้ำ $NP * K_{max}$ ให้มีค่าเท่ากับ 50/50 กำหนดอัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม β_k ให้มีค่าเท่ากับ 1 กำหนดค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม η_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.5 และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย α_k ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 เพื่อให้การแก้ไขปัญหาการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลามได้ผลลัพธ์ระยะทางขอยาววัสดุเฉลี่ยสั้นที่สุด



ภาพ 59 กราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ SSO สำหรับชุดข้อมูล M30P27



ภาพ 60 กราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของ SSO ในชุดข้อมูล M30P27

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองที่มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหารูปแบบการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหาการวางผังเครื่องจักร โดยกระบวนการทดลองได้เริ่มจาก การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็ม (Full factorial design) การดำเนินการทดลองเพื่อเก็บผล การวิเคราะห์ผลการกระจายตัวของข้อมูลด้วยกราฟความน่าจะเป็น (Probability Plot) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แบบตัวแบบเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model: GLM) การวิเคราะห์ผลเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยกราฟผลกระทบปัจจัยหลักของ (Main effect plot) และกราฟอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (Interaction plot)

จากการดำเนินการสามารถสรุปผลการทดลองที่ 1 ได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าได้แก่ การคูณกันระหว่างจำนวนประชากรฉลามและจำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำสูงสุด ($NP * K_{max}$) อัตราส่วนความเร็วจำกัดของฉลาม (β_k) ค่าบ่งชี้ความสามารถ ในการทำความเร็วของฉลาม (η_k) และค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อหรืออัตราไม่แน่นอน (α_k) มีผลกระทบต่อผลเฉลยที่ได้จากการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กล่าวคือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันย่อมให้ผลเฉลยในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรที่แตกต่าง

สำหรับรูปแบบการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักรผู้วิจัยพบว่า ชุดข้อมูลทั้ง 5 ชุดนั้น มีรูปแบบการตั้งค่าที่เหมาะสมแตกต่างกัน ทั้งนี้ผลสรุปวิธีการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักรของแต่ละชุดข้อมูลแสดงได้ดังตาราง 15

ตาราง 15 ตารางสรุปผลการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละชุดข้อมูล

ปัจจัย	ชุดข้อมูล				
	M10P3	M20P5	M15P9	M30P10	M30P27
NP/K_{max}	50/50	25/100	50/50	25/100	50/50
β_k	1	1	1	1	1
η_k	0.1	0.1	0.9	0.1	0.5
α_k	0.1	0.9	0.9	0.9	0.1

ผลการทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร โดยได้นำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 เข้ามาใช้ในการทดลองเพื่อให้วิธี SSO มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ทั้งนี้หลังทำการทดลอง เผลยที่ได้จากการแก้ปัญหการวางผังเครื่องจักร จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากวิธีการเมตาดิววิสิติกส์อื่น ๆ ได้แก่ วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) วิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu Search) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO) วิธีการแบบมด (Ant Colony Optimisation: ACO) วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimisation: BBO) วิธีการหาคำตอบแบบผึ้งผึ้ง (Artificial Bee Colony: ABC) วิธีการหาคำตอบแบบผึ้งผึ้งแบบปรับปรุง (Modified Artificial Bee Colony) วิธีการหาคำตอบแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) วิธีสับเปลี่ยนการกระโดดของกบ (Shuffled Frog Leaping Algorithm: SFLA) ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของผลเฉลยที่จะถูกใช้เปรียบเทียบจะถูกคิดจากการเฉลี่ยของผลเฉลย 30 ครั้ง ทำซ้ำผ่านชุดเลขสุ่ม (Random seed value) จำนวน 30 หมายเลข ประกอบด้วยหมายเลข 111, 222, 333, 444, 555, 666, 777, 888, 911, 999, 599, 699, 811, 199, 299, 55, 99, 125, 155, 255, 355, 399, 411, 499, 511, 611, 711, 799, 855

และ 955 ทั้งนี้เพื่อการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลเฉลย ค่าพารามิเตอร์ $NP \cdot K_{max}$ จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีผลคูณเท่ากับ 2,500 ในทุกชุดข้อมูล โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักรด้วยวิธีดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมของ 5 ชุดข้อมูล แสดงได้ดังตาราง 16

ตาราง 16 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO

ชุดข้อมูล	ค่าต่ำที่สุด (เมตร)	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร)	เวลา (วินาที)
M10P3	187.68	198.08	4.11	25.04
M20P5	1,301.200	1,344.51	21.02	48.00
M15P9	1,396.750	1,431.05	13.02	36.89
M30P10	4,203.875	4,281.22	37.91	87.55
M30P27	8,228.954	8,382.45	66.08	162.77

ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมกับวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาของ พัทธราภรณ์ อริยะวงษ์ (2550) และ ญัฐพงศ์ คำขาด (2551), ธนภัทร เอี่ยมตาล (2553), พงศ์อมร วังตา (2554), พรพิมล สร้อยมาต (2554), กิตติพงษ์ ดาพา (2555) และงานวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558)

ทั้งนี้สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้แก่ ระยะทางการเดินทางของรถขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุด, ค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมกับวิธีการอื่น ๆ แสดงได้ดังตาราง 17 ถึงตาราง 21

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมร่วมกับวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ พบว่า สำหรับชุดข้อมูล M30P10, M30P27 ค่าระยะทางการเดินทางของรถขนถ่ายวัสดุที่สั้นที่สุด และค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ที่ได้จากการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมนั้นมีค่าดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) วิธีการค้นหาตอห้าม (Tabu Search) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO) วิธีการแบบมด (Ant Colony Optimisation: ACO) วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimisation: BBO) วิธีการหา

คำตอบแบบฝูงผึ้ง (Artificial Bee Colony: ABC) วิธีการหาค่าคำตอบแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) วิธีสับเปลี่ยนการกระโดดของกบ (Shuffled Frog Leaping Algorithm: SFLA)

ตาราง 17 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M10P3	GA	186.98	187.36	0.29
	ABC	186.98	187.73	1.37
	ACO	186.98	187.75	1.92
	SFLA	186.97	187.92	1.81
	SA	186.98	189.46	5.45
	TS	186.98	190.16	2.41
	BA	186.97	193.84	5.91
	SSO	187.68	198.08	4.11
	PSO	187.58	202.18	8.42
	BBO	188.88	206.35	8.85

ตาราง 18 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M20P5

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M20P5	SA	1,230.05	1,273.60	35.44
	TS	1,198.15	1,275.37	36.42
	ACO	1,258.05	1,296.26	24.30
	SSO	1,301.20	1,344.51	18.86
	GA	1,231.65	1,361.16	49.23
	ABC	1,311.70	1,366.80	23.80
	SFLA	1,312.50	1,375.37	38.43
	BA	1,250.10	1,387.96	57.57
	BBO	1,344.25	1,397.14	24.67
	PSO	1,292.30	1,429.72	60.07

ตาราง 19 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M15P9

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M15P9	SA	1,336.25	1,364.51	20.30
	TS	1,336.25	1,368.23	18.50
	GA	1,347.75	1,382.01	22.12
	ACO	1,362.65	1,392.50	15.32
	ABC	1,345.25	1,398.70	26.30
	SFLA	1,355.25	1,412.38	21.87
	BA	1,345.05	1,427.78	32.58
	SSO	1,396.75	1,431.05	13.02
	PSO	1,359.05	1,464.29	42.35
	BBO	1,422.25	1,474.94	21.42

ตาราง 20 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P10

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M30P10	SSO	4,203.88	4,281.22	37.91
	BBO	4,321.33	4,408.25	42.28
	SA	4,261.53	4,414.08	90.17
	TS	4,269.18	4,463.70	89.20
	ACO	4,504.03	4,624.53	77.92
	GA	4,524.43	4,770.54	141.75
	SFLA	4,680.48	4,884.42	96.28
	ABC	4,658.53	4,919.80	88.10
	PSO	4,728.38	4,978.78	139.84
	BA	4,602.37	5,013.51	154.78

ตาราง 21 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P27

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M30P27	SSO	8,228.95	8,382.45	66.08
	BBO	8,471.40	8,603.38	75.20
	SA	8,209.55	8,625.25	180.63
	TS	8,324.75	8,693.18	189.59
	ACO	8,745.50	9,121.14	174.14
	ABC	9,031.45	9,553.00	204.00
	SFLA	8,820.65	9,591.10	249.97
	BA	8,856.80	9,782.60	371.04
	PSO	8,947.70	9,826.13	345.82
	GA	10,000.05	10,040.73	87.64

จากผลการทดลองที่ 2 พบว่าวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมนั้นให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาคำตอบแบบอื่น ๆ ในชุดข้อมูลขนาดใหญ่ได้แก่ ชุดข้อมูล M30P10 และ ชุดข้อมูล M30P27 อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในชุดข้อมูลขนาดเล็ก และขนาดกลาง จะพบว่าวิธีการดมกลืนของฉลามให้ผลเฉลยเฉลี่ยสูงกว่าวิธีการอื่น ๆ โดยวิธีการแก้ปัญหาที่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุดของชุดข้อมูล M10P3 คือวิธีการเชิงพันธุกรรม และวิธีการบอซอนจำลองสำหรับชุดข้อมูล M20P5 และชุดข้อมูล M15P9 ทั้งนี้ผลเฉลี่ยที่ได้จากการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการดมกลืนของฉลามจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ผลการทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงในการแก้ไขปัญหการวางผังเครื่องจักร

การทดลองที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงทั้งสิ้น 9 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 mSSO1HyGA รูปแบบที่ 2 mSSO2MaxFQ รูปแบบที่ 3 mSSO3Max&SdFQ รูปแบบที่ 4 mSSO4MaxSdRdFQ รูปแบบที่ 5 mSSO5NoneFQ รูปแบบที่ 6 mSSO6Max-4thFQ รูปแบบที่ 7 mSSO7None-Max4thFQ รูปแบบที่ 8 mSSO8MaxFQ-EtR รูปแบบที่ 9 mSSO9Max&SdFQ-EtR โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

ทดสอบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบต่าง ๆ โดยผลการทดลอง และผลการอภิปราย สามารถอธิบายได้ตามชุดปัญหาดังนี้

1. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M10P3

จากตาราง 22 พบว่า วิธี mSSO8MaxFQ-EtR สามารถหาผลเฉลย และผลเฉลยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการดมกลืนของฉลามในรูปแบบอื่นๆ โดยมีค่าเท่ากับ 186.98 และ 188.30 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า ผลลัพธ์ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าวิธี SSO ทั้งสองค่า หลังจากทำการทดสอบทดสอบความแตกต่างประชากรสองกลุ่มแล้วพบว่าค่า P – value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างประชากรทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในชุดปัญหา M10P3 วิธี mSSO8MaxFQ-EtR สามารถค้นหาผลเฉลย และผลเฉลยเฉลี่ยได้ดีกว่าวิธี SSO แบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลให้คำตอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.93 แต่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยใช้เวลาเพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 1261.1

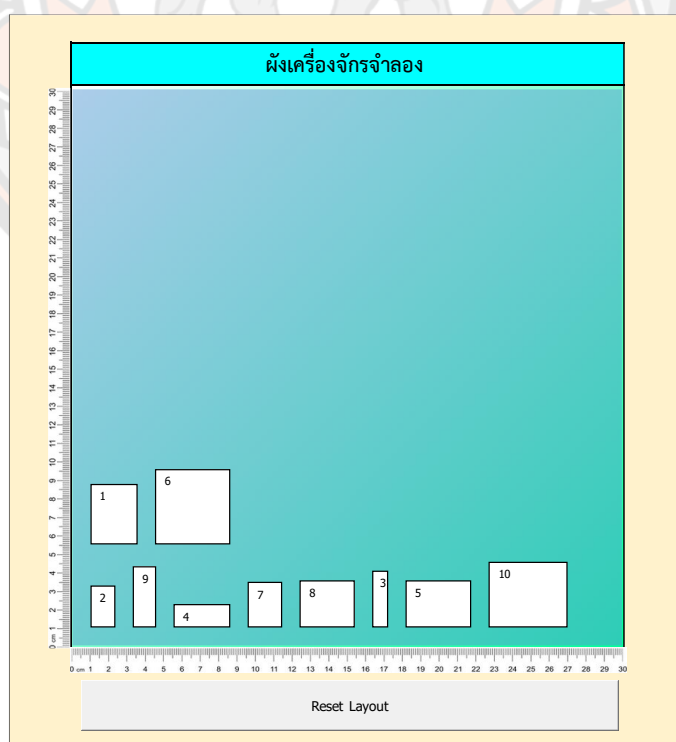
ตาราง 22 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M10P3

Methods	ค่าคำตอบที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม						
	Min	Mean	SD	Time (Sec.)	P-value	%Improve	%Time increase
mSSO8	186.98	188.30	1.39	<u>340.88</u>	0.00	4.93	1,261.10
mSSO2	186.98	191.14	2.90	25.56			
mSSO5	189.48	196.06	3.31	25.43			
SSO	187.68	198.08	4.11	<u>25.04</u>			
mSSO1	188.88	198.79	4.53	29.83			
mSSO9	201.23	201.36	0.32	340.31			
mSSO3	201.23	201.90	1.14	25.52			
mSSO4	-	-	-	-			
mSSO6	-	-	-	-			
mSSO7	-	-	-	-			

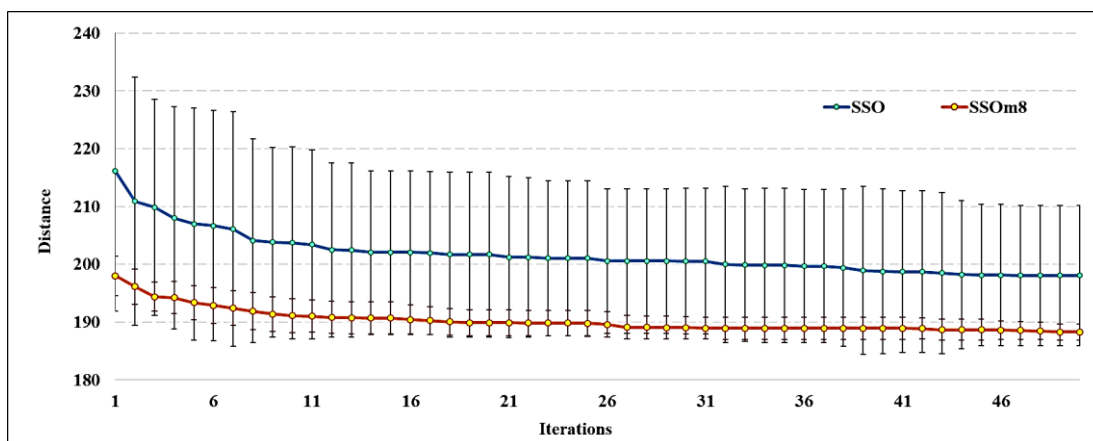
* หมายเหตุ วิธีการ mSSO4 mSSO6 mSSO7 ไม่ถูกเปิดใช้งานเนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าวมีลำดับความถี่ของคู่เครื่องจักรไม่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยชุดข้อมูล M10P3 มีความถี่ระหว่างคู่เครื่องจักรสูงสุดเพียง 2 ลำดับ

ภาพ 61 แสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO8 ได้จากการพิจารณาเครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการผลิตมากที่สุดลำดับแรก และการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน ซึ่งในกระบวนการปรับปรุงนั้นเครื่องจักรที่ตรงตามเงื่อนไขดังกล่าวจะถูกจัดเรียงโดยมีตำแหน่งอยู่ติดกันเสมอ

ภาพ 62 แสดงถึงการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ที่ได้จากวิธี SSO และวิธี mSSO8 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้คำตอบเฉลี่ยที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ พบว่าคำตอบที่ได้จากวิธี SSO และ mSSO8 มีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีขึ้นอยู่ตลอดเวลาเมื่อรอบการค้นหาเพิ่มขึ้น แต่วิธี mSSO8 สามารถเกิดการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าเนื่องจากวิธี mSSO8 ได้พิจารณาเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดให้ถูกจัดเรียงไว้ติดกันเป็นผลให้เกิดการจำกัดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีกว่าอยู่เสมอ ประกอบกับวิธี mSSO8 นั้นได้เปิดโอกาสให้ฉลามสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Shark rotation movement) ได้ไกลขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ค้นหาในกระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (Local search) ทำให้วิธีการนี้มีโอกาสค้นหาคำตอบเพิ่มเติมได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้คำตอบที่ได้ในแต่ละรอบการค้นหาจึงมีค่าดีกว่าวิธี SSO แบบดั้งเดิม ตั้งแต่รอบการค้นหาซ้ำที่ 1 และทำให้คำตอบที่ได้ในแต่ละรอบการค้นหาไม่มีการกระจายตัวจากค่าเฉลี่ยกลางมากนัก



ภาพ 61 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO8



ภาพ 62 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSOm8

2. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M20P5

จากตาราง 23 พบว่า วิธี mSSOm9Max&SdFQ-EtR เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดมกลืนของฉลามในรูปแบบอื่น ๆ พบว่าวิธีดังกล่าวให้ผลเฉลยเฉลี่ย ในที่นี้หมายถึงค่าเฉลี่ยของระยะทางการขนถ่ายวัสดุระหว่างกระบวนการเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,262.40 เมตร อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่สามารถค้นหาคำตอบได้ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1220.15 เมตร

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า ผลลัพธ์ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี SSO แบบดั้งเดิม ทั้งนี้หลังจากทำการทดสอบทดสอบความแตกต่างประชากรสองกลุ่มแล้วผู้วิจัยพบว่าค่า P – value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างประชากรทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในชุดปัญหา M20P5 วิธี mSSOm9 สามารถค้นหาค่าเฉลยเฉลี่ยได้ดีกว่าวิธี SSO แบบดั้งเดิมได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเป็นผลให้คำตอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.11 หากแต่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยใช้เวลามากขึ้นกว่าร้อยละ 1430.84

ตาราง 23 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M20P5

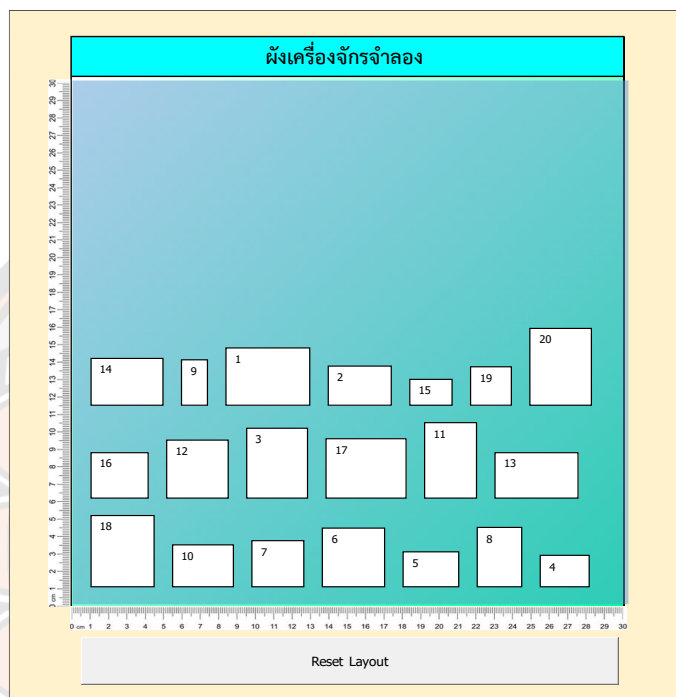
Methods	ค่าคำตอบที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม						
	Min	Mean	SD	Time (Sec.)	P-value	% Improve	%Time increase
mSSO9	1,220.15	1,262.40	15.65	<u>734.86</u>	0.000	6.11	1,430.84
mSSO4	1,244.90	1,279.28	17.80	93.17			
mSSO7	1,258.95	1,285.21	13.93	93.87			
mSSO3	1,242.55	1,286.68	19.10	92.08			
mSSO8	1,239.00	1,292.67	14.03	732.83			
mSSO5	1,282.05	1,337.56	24.17	92.39			
mSSO2	1,237.20	1,342.36	28.41	92.07			
SSO	1,301.20	1,344.51	18.86	<u>48.00</u>			
mSSO1	1,321.25	1,358.66	17.55	123.60			
mSSO6	-	-	-	-			

* หมายเหตุ วิธีการ mSSO6 ไม่ถูกเปิดใช้งานเนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าวมีลำดับความถี่ของคู่เครื่องจักรไม่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยชุดข้อมูล M20P5 มีความถี่ระหว่างคู่เครื่องจักรสูงสุด 3 ลำดับ

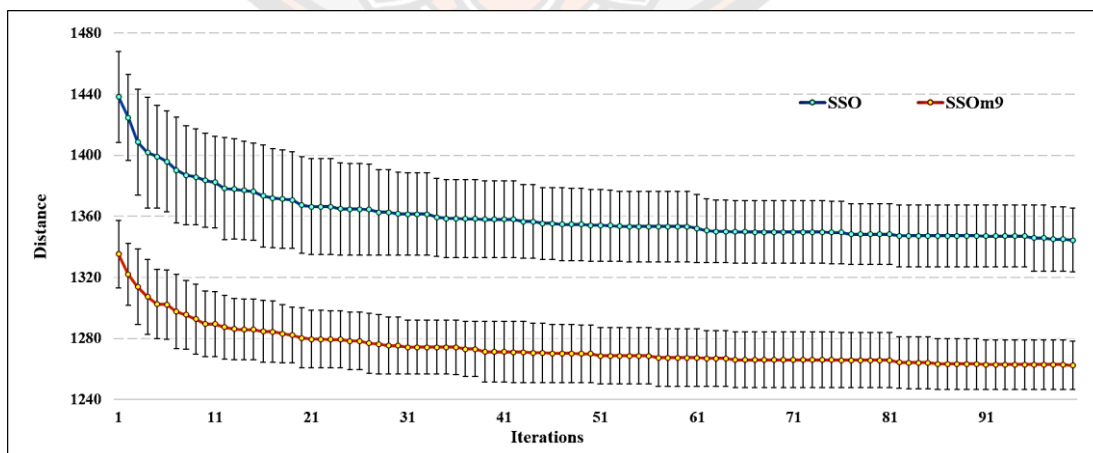
ภาพ 63 แสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9 MaxSdRdFQ ที่ได้จากการพิจารณาเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสองลำดับแรก และการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน โดยในกระบวนการปรับปรุงนั้นคู่เครื่องจักรที่ตรงตามเงื่อนไขดังกล่าวจะมีตำแหน่งอยู่ติดกันเสมอ โดยจะเริ่มจากการจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุสูงที่สุดลำดับที่ 2 เมื่อแล้วเสร็จจึงดำเนินการจัดเรียงให้คู่เครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุสูงที่สุดลำดับแรก ให้มีตำแหน่งที่ติดกัน

ภาพ 64 แสดงถึงการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ที่ได้จากวิธี SSO และวิธี mSSO9 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้คำตอบเฉลี่ยที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ โดยพบว่าคำตอบที่ได้จากวิธี SSO และ mSSO9 มีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีขึ้นอยู่ตลอดเวลาเมื่อรอบการค้นหาเพิ่มขึ้น แต่วิธี mSSO9 สามารถเกิดการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าเนื่องจากวิธี mSSO9 ได้พิจารณาให้เครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุด 2 ลำดับแรกจัดเรียงไว้ติดกัน เป็นผลให้เกิดการจำกัดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีกว่าอยู่เสมอ ประกอบกับวิธี mSSO9 นั้นได้เปิดโอกาสให้ฉลามสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Shark rotation

movement) ได้ไกลขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ค้นหาในกระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (Local search) ทำให้วิธีการนี้มีโอกาสค้นหาคำตอบเพิ่มเติมได้มากขึ้น ด้วยเหตุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้คำตอบที่ได้แตกต่างจากวิธี SSO แบบดั้งเดิมตั้งแต่รอบการค้นหาซ้ำที่ 1 และส่งผลให้คำตอบที่ได้ในรอบการค้นหาถัดไปเกิดการกระจายตัวจากค่าเฉลี่ยกลางไม่มากนัก



ภาพ 63 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9



ภาพ 64 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO9

3. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M15P9

จากตาราง 24 พบว่า วิธี mSSO9Max&SdFQ-EtR สามารถค้นหาผลเฉลยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการดมกลิ่นของฉลามในรูปแบบอื่นๆ โดยมีค่าเท่ากับ 1,377.62 เมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า ผลลัพธ์ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าวิธี SSO แบบดั้งเดิม ทั้งนี้หลังจากทำการทดสอบทดสอบความแตกต่างประชากรสองกลุ่มแล้วพบว่า ค่า P – value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างประชากรทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในชุดปัญหา M15P9 วิธี mSSO9 สามารถค้นหาผลเฉลย และผลเฉลยเฉลี่ยที่ดีกว่าวิธี SSO อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็นผลให้คำตอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.73 โดยใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นอย่างมาก กว่าร้อยละ 589.94

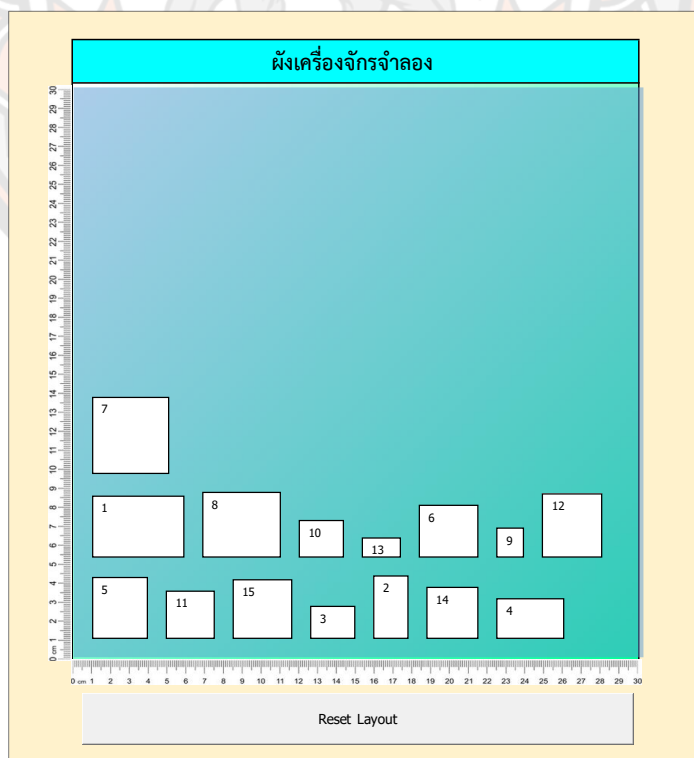
ตาราง 24 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M15P9

Methods	ค่าคำตอบที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม						
	Min	Mean	SD	Time (Sec.)	P-value	% Improve	%Time increase
mSSO9	1,350.75	1,377.62	12.68	<u>254.51</u>	0.000	3.73	589.94
mSSO8	1,348.15	1,389.41	12.88	257.55			
mSSO3	1,375.15	1,402.34	14.99	76.36			
mSSO2	1,375.45	1,413.18	16.67	36.30			
mSSO4	1,378.55	1,416.75	15.24	36.99			
mSSO6	1,379.35	1,417.26	13.64	37.87			
mSSO7	1,379.35	1,417.92	14.65	38.14			
SSO	1,396.75	1,431.05	13.02	<u>36.89</u>			
mSSO5	1,394.95	1,432.23	18.49	36.54			
mSSO1	1,394.45	1,439.37	16.21	100.34			

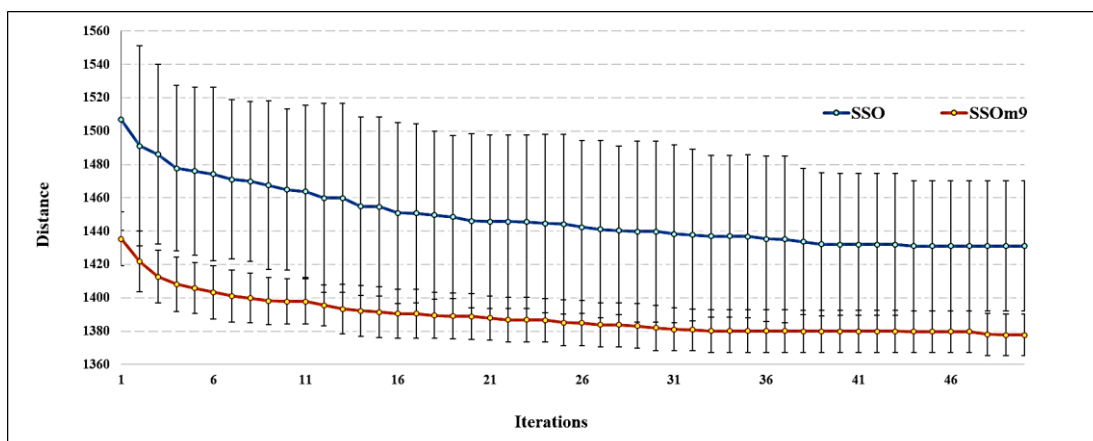
ภาพ 65 แสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9 ที่ได้จากการพิจารณาเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสองลำดับแรก และการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน โดยในกระบวนการปรับปรุงนั้นคู่เครื่องจักรที่ตรงตามเงื่อนไขดังกล่าว

จะมีตำแหน่งอยู่ติดกันเสมอ โดยจะเริ่มจากการจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุสูงที่สุด ลำดับที่ 2 เมื่อแล้วเสร็จจึงดำเนินการจัดเรียงให้คู่เครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุสูงที่สุดลำดับแรก ให้มีตำแหน่งที่ติดกัน

ภาพ 66 แสดงถึงการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ที่ได้จากวิธี SSO และวิธี mSSO9 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ค่าคำตอบเฉลี่ยที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ พบว่าคำตอบที่ได้จากวิธี SSO และ mSSO9 มีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีขึ้นอยู่ตลอดเวลาเมื่อรอบการค้นหาลำดับที่เพิ่มขึ้น แต่วิธี mSSO9 สามารถเกิดการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าเนื่องจากวิธี mSSO9 ได้พิจารณาเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุด 2 ลำดับแรกให้ถูกจัดเรียงไว้ติดกัน เป็นผลให้เกิดการจำกัดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีกว่าอยู่เสมอ ประกอบกับวิธี mSSO9 นั้นได้เปิดโอกาสให้หาลาสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Shark rotation movement) ได้ไกลขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ค้นหาในกระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (Local search) ทำให้วิธีการนี้มีโอกาสค้นหาคำตอบเพิ่มเติมได้มากขึ้น ด้วยเหตุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้ค่าคำตอบที่ได้แตกต่างจากวิธี SSO แบบดั้งเดิมตั้งแต่รอบการค้นหาครั้งที่ 1 และส่งผลให้ค่าคำตอบที่ได้ในรอบการค้นหาถัดไปเกิดการกระจายตัวจากค่าเฉลี่ยกลางไม่มากนัก



ภาพ 65 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9



ภาพ 66 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO9

4. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P10

จากตาราง 25 พบว่า เมื่อเทียบกับวิธีการดกกลืนของฉลามในรูปแบบอื่น ๆ วิธี mSSO9Max&SdFQ-EtR ให้ผลเฉลี่ย และผลเฉลี่ยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,958.18 และ 4,030.97 เมตรตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดกกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า ผลลัพธ์ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าวิธี SSO แบบดั้งเดิม ทั้งนี้เมื่อทำการทดสอบทดสอบความแตกต่างประชากรสองกลุ่มแล้วพบว่าค่า P - value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างประชากรทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในชุดปัญหา M30P10 วิธี mSSO9 สามารถค้นหาผลเฉลี่ยเฉลี่ยได้ดีกว่าวิธี SSO อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็นผลให้คำตอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.85 โดยใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นอย่างมาก กว่าร้อยละ 723.11

ตาราง 25 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P10

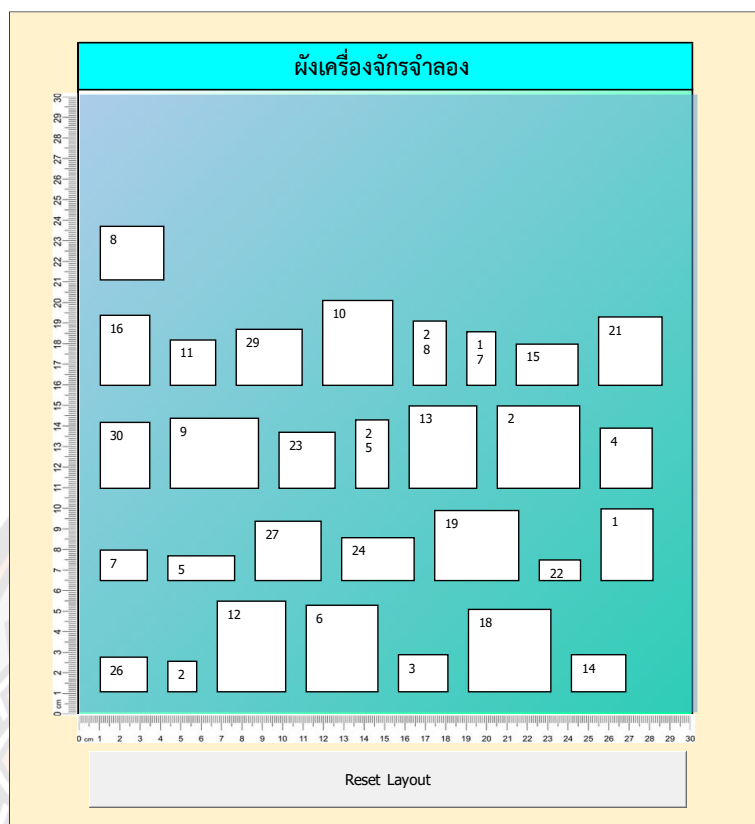
Methods	ค่าคำตอบที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม						
	Min	Mean	SD	Time (Sec.)	P-value	% Improve	%Time increase
mSSO9	3,958.18	4,030.97	33.85	<u>720.66</u>	0.000	5.85	723.11
mSSO4	4,005.32	4,090.05	36.26	96.28			

Methods	ค่าคำตอบที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม						
	Min	Mean	SD	Time (Sec.)	P-value	% Improve	%Time increase
mSSO3	4,004.53	4,094.39	33.33	87.47			
mSSO7	4,051.93	4,097.75	22.70	119.27			
mSSO8	4,022.93	4,105.11	32.46	641.13			
mSSO2	4,123.37	4,177.03	29.39	87.75			
SSO	4,203.88	4,281.22	37.91	<u>87.55</u>			
mSSO5	4,152.38	4,284.40	47.38	85.18			
mSSO1	4,230.72	4,294.22	35.06	105.65			
mSSO6	-	-	-	-			

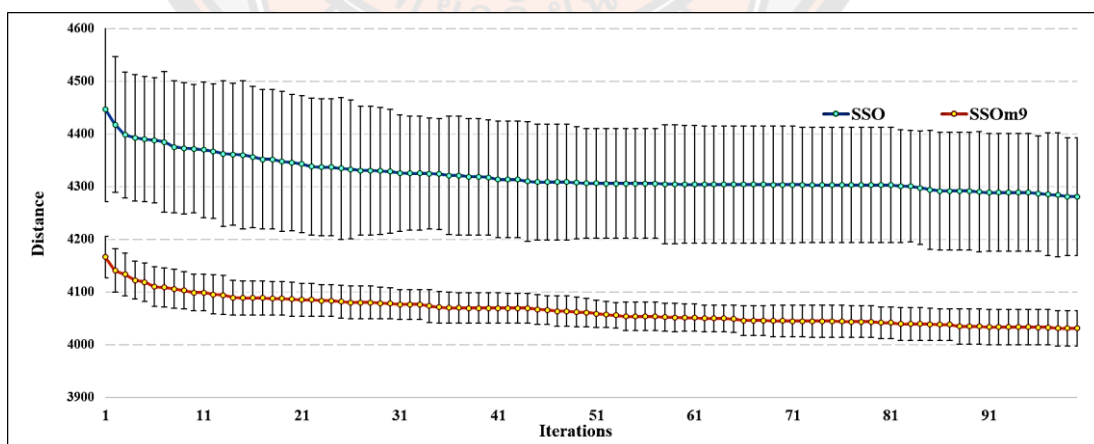
* หมายเหตุ วิธีการ mSSO6 ไม่ถูกเปิดใช้งานเนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าวมีลำดับความถี่ของเครื่องจักรไม่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยชุดข้อมูล M20P5 มีความถี่ระหว่างคู่เครื่องจักรสูงสุด 3 ลำดับ

ภาพ 67 แสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9 ที่ได้จากการพิจารณาเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดสองลำดับแรก และการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน โดยในกระบวนการปรับปรุงนั้นคู่เครื่องจักรที่ตรงตามเงื่อนไขดังกล่าวจะมีตำแหน่งอยู่ติดกันเสมอ โดยจะเริ่มจากการจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุสูงที่สุดลำดับที่ 2 เมื่อแล้วเสร็จจึงดำเนินการจัดเรียงให้คู่เครื่องจักรที่มีการขนถ่ายวัสดุสูงที่สุดลำดับแรก ให้มีตำแหน่งที่ติดกัน

ภาพ 68 แสดงถึงการลู่อเข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ที่ได้จากวิธี SSO และวิธี mSSO9 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้คำตอบเฉลี่ยที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ โดยพบว่าคำตอบที่ได้จากวิธี SSO และ mSSO9 มีการลู่อเข้าหาคำตอบที่ดีขึ้นอยู่ตลอดเวลาเมื่อรอบการค้นหาเพิ่มขึ้น แต่วิธี mSSO9 สามารถเกิดการลู่อเข้าหาคำตอบได้ดีกว่าเนื่องจากวิธี mSSO9 ได้พิจารณาให้เครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุด 2 ลำดับแรกจัดเรียงไว้ติดกัน เป็นผลให้เกิดการจำกัดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการลู่อเข้าหาคำตอบที่ดีกว่าอยู่เสมอ ประกอบกับวิธี mSSO9 นั้นได้เปิดโอกาสให้ฉลามสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Shark rotation movement) ได้ไกลขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ค้นหาในกระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (Local search) ทำให้วิธีการนี้มีโอกาสค้นหาคำตอบเพิ่มเติมได้มากขึ้น ด้วยเหตุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้อาณาเขตคำตอบที่ได้แตกต่างจากวิธี SSO แบบดั้งเดิมตั้งแต่รอบการค้นหาซ้ำที่ 1 และส่งผลให้คำตอบที่ได้ในรอบการค้นหาถัดไปเกิดการกระจายตัวจากค่าเฉลี่ยกลางไม่มากนัก



ภาพ 67 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO9



ภาพ 68 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO9

5. การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P27

จากตาราง 26 พบว่า เมื่อเทียบกับวิธีการดมกลิ่นของฉลามในรูปแบบอื่น ๆ วิธี mSSO6Max-4thFQ ให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8,128.93 เมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดมกลิ่นของฉลามแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า ผลลัพธ์ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าวิธี SSO โดยเมื่อทำการทดสอบทดสอบความแตกต่างประชากรสองกลุ่มแล้วพบว่าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างประชากรทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในชุดปัญหา M30P27 วิธี mSSO6Max-4thFQ สามารถค้นหาผลเฉลยเฉลี่ยได้ดีกว่าวิธี SSO อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็นผลให้คำตอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.02 โดยใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.83

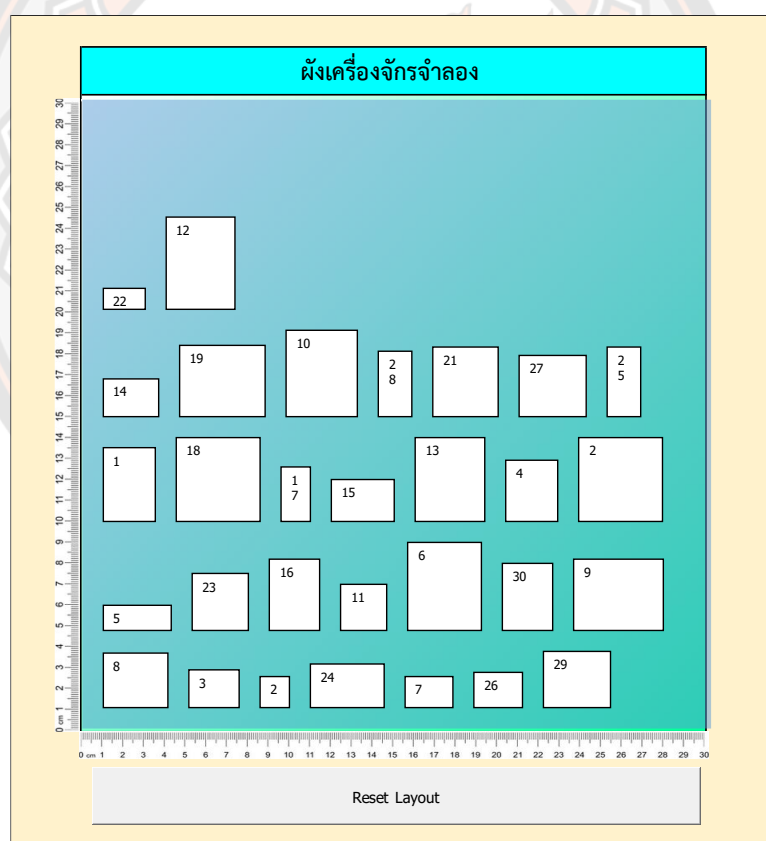
ตาราง 26 ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ สำหรับชุดข้อมูล M30P27

Methods	ค่าคำตอบที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสม						
	Min	Mean	SD	Time (Sec.)	P-value	% Improve	%Time increase
mSSO6	8,007.40	8,128.93	61.99	168.99	0.000	3.02	3.82
mSSO9	7,965.30	8,132.33	58.46	771.44			
mSSO7	7,896.80	8,141.12	77.04	110.49			
mSSO8	8,111.45	8,206.03	53.94	760.89			
mSSO4	8,117.20	8,216.91	57.79	107.09			
mSSO3	8,074.95	8,247.41	73.86	106.46			
mSSO2	8,138.00	8,295.77	71.12	103.43			
SSO	8,228.95	8,382.45	66.08	162.76			
mSSO5	8,151.05	8,410.97	69.65	105.44			
mSSO1	8,258.85	8,414.63	68.87	127.52			

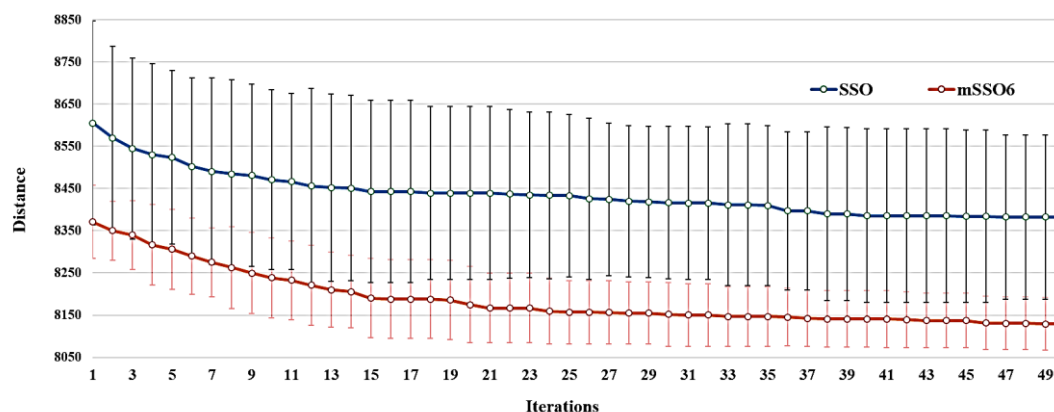
ภาพ 69 แสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO6 ที่ได้จากการพิจารณาเครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดลำดับที่หนึ่งถึงสี่ โดยคู่เครื่องจักรที่ตรงตามเงื่อนไข

จะถูกจัดเรียงให้อยู่ติดกันเสมอ เริ่มจากการจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่ีการทำงานร่วมกันสูงสุดลำดับที่ 4 เมื่อแล้วเสร็จจะทำการจัดเรียงคู่เครื่องจักรที่ีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดลำดับที่ 3 ลำดับที่ 2 และลำดับที่ 1 ให้มีตำแหน่งติดกันตามลำดับ

ภาพ 70 แสดงถึงการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุด ที่ได้จากวิธี SSO และวิธี mSSO6 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้คำตอบเฉลี่ยที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ พบว่าคำตอบที่ได้จากวิธี SSO และ mSSO6 มีการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีขึ้นอยู่ตลอดเวลาเมื่อรอบการค้นหาลำดับที่เพิ่มขึ้น แต่วิธี mSSO6 สามารถเกิดการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าเนื่องจากวิธี mSSO6 ได้พิจารณาเครื่องจักรที่ีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุด 4 ลำดับแรกให้ถูกจัดเรียงไว้ติดกัน เป็นผลให้เกิดการจำกัดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้เกิดการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีกว่าอยู่เสมอ และทำให้คำตอบที่ได้ในแต่ละรอบการค้นหาไม่การกระจายตัวจากค่าเฉลี่ยกลางมาก



ภาพ 69 รูปแบบการจัดเรียงเครื่องจักรที่ได้จากวิธี mSSO6



ภาพ 70 การลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบด้วยวิธี SSO และ mSSO6

จากการทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นการสอบประสิทธิภาพของวิธีการดมกลืนของฉลามรูปแบบต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร โดยพบว่าวิธีการ mSSO8 สามารถให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ดีที่สุดในชุดข้อมูล M10P3 ทั้งนี้สำหรับในชุดข้อมูล M20P5 M15P9 M30P10 พบว่าวิธี mSSO9 สามารถให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ดีที่สุด และสุดท้ายในชุดข้อมูล M30P27 พบว่าวิธี mSSO6 เป็นวิธีที่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ดีที่สุด โดยรายละเอียดของการสรุปผลแสดงได้ดังตาราง 27

ตาราง 27 วิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในแต่ละชุดข้อมูล และรายละเอียดวิธีการ mSSO ที่สามารถใช้งานร่วมกับชุดข้อมูลได้

Data set	Maximum frequency number	Frequency number per level	Available modifications	Best modified Version
M10P3	3	2, 1, 0	m1, m2, m3, m5, m8, m9	mSSO8
M20P5	4	3, 2, 1, 0	m1, m2, m3, m4, m5, m7, m8, m9	mSSO9
M15P9	5	4, 3, 2, 1, 0	m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7, m8, m9	mSSO9
M30P10	4	3, 2, 1, 0	m1, m2, m3, m4, m5, m7, m8, m9	mSSO9
M30P27	6	5, 4, 3, 2, 1, 0	m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7, m8, m9	mSSO6

* หมายเหตุ m ในที่นี้ถูกแทนด้วย mSSO เช่น m1 หมายถึง mSSO1 ซึ่งมีความหมายว่าวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงรูปแบบที่ 1

ทั้งนี้หลังทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุง ผลเฉลี่ยที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการเมตาฮิวริสติกส์แบบอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) วิธีการค้นหาตอ้งห้าม (Tabu Search) การผสมผสานระหว่างวิธีการอบอ่อนจำลองเข้ากับวิธีการค้นหาตอ้งห้าม (Hybrid Simulated Annealing and Tabu Search: SATS) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO) วิธีการแบบมด (Ant Colony Optimisation: ACO) วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimisation: BBO) วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์แบบปรับปรุง (Modified Biogeography-Based Optimisation: MBBO) วิธีการหาคำตอบแบบผึ้งผึ้ง (Artificial Bee Colony: ABC) วิธีการหาคำตอบแบบผึ้งผึ้งแบบปรับปรุง (Modified Artificial Bee Colony) วิธีการหาคำตอบแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA) วิธีสับเปลี่ยนการกระโดดของกบ (Shuffled Frog Leaping Algorithm: SFLA) โดยอ้างอิงผลเฉลี่ยจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ พัชรภรณ์ อริยวงษ์ (2550) และ ณัฐพงศ์ คำขาด (2551), ธนภัทร เขี่ยมตาล (2553), พงศ์อมร วังตา (2554), พรพิมล สร้อยมาต (2554), กิตติพงษ์ ดาพา (2555) และงานวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ทั้งนี้ผลเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์แบบปรับปรุง (Modified BBO) ที่ดีที่สุดในแต่ละชุดข้อมูลเท่านั้น ที่ผู้วิจัยได้นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยครั้งนี้

ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของผลเฉลี่ยที่จะถูกใช้เปรียบเทียบจะถูกคิดจากการเฉลี่ยของผลเฉลี่ย 30 ครั้ง ทำซ้ำผ่านชุดเลขสุ่ม (Random seed value) จำนวน 30 หมายเลข ประกอบด้วยหมายเลข 111, 222, 333, 444, 555, 666, 777, 888, 911, 999, 599, 699, 811, 199, 299, 55, 99, 125, 155, 255, 355, 399, 411, 499, 511, 611, 711, 799, 855 และ 955

เพื่อการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลเฉลี่ย ค่าพารามิเตอร์ จำนวนประชากรฉลาม (NP) และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (K_{max}) จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีผลคูณ $NP * K_{max}$ เท่ากับ 2500 ในทุกชุดข้อมูล โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงทั้ง 9 รูปแบบ เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ แสดงได้ดังตาราง 28 ถึง ตาราง 32

ตาราง 28 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M10P3	SATS	186.98	187.24	0.30
	Modified ABC	186.98	187.26	0.30
	GA	186.98	187.36	0.29
	ABC	186.98	187.73	1.37
	ACO	186.98	187.75	1.92
	SFLA	186.97	187.92	1.81
	mSSO8	186.98	188.30	1.39
	Modified BBO	186.98	189.01	2.16
	SA	186.98	189.46	5.45
	TS	186.98	190.16	2.41
	mSSO2	186.98	191.14	2.90
	BA	186.97	193.84	5.91
	mSSO5	189.48	196.06	3.31
	SSO	187.68	198.08	4.11
	mSSO1	188.88	198.79	4.53
	mSSO9	201.23	201.36	0.32
	mSSO3	201.23	201.90	1.14
	tabu-SA	193.88	202.04	4.62
	PSO	187.58	202.18	8.42
	BBO	188.88	206.35	8.85

* ผลเฉลยของวิธี Modified BBO นำมาจากการวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ซึ่งมีรูปแบบการปรับปรุงแบบ modBBO4 การกำหนดให้เครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดอยู่ติดกัน และห้ามมิให้เครื่องจักรที่ไม่มีการทำงานต่อเนื่องกันอยู่ติดกัน

ตาราง 29 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M20P5

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M20P5	mSSO9	1,220.15	1,262.40	15.65
	SA	1,230.05	1,273.60	35.44
	TS	1,198.15	1,275.37	36.42
	SATS	1,195.85	1,278.76	33.38
	mSSO4	1,244.90	1,279.28	17.80
	Modified BBO	1,215.25	1,279.79	28.42
	mSSO7	1,258.95	1,285.21	13.93
	mSSO3	1,242.55	1,286.68	19.10
	mSSO8	1,239.00	1,292.67	14.03
	ACO	1,258.05	1,296.26	24.30
	mSSO5	1,282.05	1,337.56	24.17
	mSSO2	1,237.20	1,342.36	28.41
	SSO	1,301.20	1,344.51	18.86
	mSSO1	1,321.25	1,358.66	17.55
	Modified ABC	1,287.70	1,358.99	27.83
	GA	1,231.65	1,361.16	49.23
	ABC	1,311.70	1,366.80	23.80
	SFLA	1,312.50	1,375.37	38.43
	BA	1,250.10	1,387.96	57.57
	BBO	1,344.25	1,397.14	24.67
	PSO	1,292.30	1,429.72	60.07
	tabu-SA	1,428.30	1,492.99	28.72

* ผลเฉลยของวิธี Modified BBO นำมาจากการวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ซึ่งมีรูปแบบการปรับปรุงแบบ modBBO2 กำหนดให้เครื่องจักรที่มีการทำงานต่อเนื่องกันสูงสุดสองอันดับแรกอยู่ติดกัน

ตาราง 30 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M15P9

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M15P9	SATS	1,336.25	1,363.35	17.56
	SA	1,336.25	1,364.51	20.30
	TS	1,336.25	1,368.23	18.50
	mSSO9	1,350.75	1,377.62	12.68
	Modified BBO	1,338.25	1,379.62	29.06
	GA	1,347.75	1,382.01	22.12
	mSSO8	1,348.15	1,389.41	12.88
	ACO	1,362.65	1,392.50	15.32
	Modified ABC	1,362.85	1,398.65	26.26
	ABC	1,345.25	1,398.70	26.30
	mSSO3	1,375.15	1,402.34	14.99
	SFLA	1,355.25	1,412.38	21.87
	mSSO2	1,375.45	1,413.18	16.67
	mSSO4	1,378.55	1,416.75	15.24
	mSSO6	1,379.35	1,417.26	13.64
	mSSO7	1,379.35	1,417.92	14.65
	BA	1,345.05	1,427.78	32.58
	SSO	1,396.75	1,431.05	13.02
	mSSO5	1,394.95	1,432.23	18.49
	mSSO1	1,394.45	1,439.37	16.21
	PSO	1,359.05	1,464.29	42.35
	BBO	1,422.25	1,474.94	21.42
	tabu-SA	1,429.95	1,489.68	21.24

* ผลเฉลยของวิธี Modified BBO นำมาจากการวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ซึ่งมีรูปแบบการปรับปรุงแบบ modBBO10 การกำหนดให้เครื่องจักรที่มึการทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดอยู่ติดกัน และห้ามมิให้เครื่องจักรที่ไม่มีการทำงานต่อเนื่องกันอยู่ติดกัน ร่วมกับการพิจารณาการปรับปรุงเพิ่มเติมด้วยรอบคำตอบ หากค่าคำตอบไม่ดีขึ้นเกินกว่า 15 รอบการค้นหาคำตอบซ้ำ

ตาราง 31 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P10

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M30P10	Modified BBO	3,848.78	3,987.87	80.97
	mSSO9	3,958.18	4,030.97	33.85
	mSSO4	4,005.32	4,090.05	36.26
	mSSO3	4,004.53	4,094.39	33.33
	mSSO7	4,051.93	4,097.75	22.70
	mSSO8	4,022.93	4,105.11	32.46
	mSSO2	4,123.37	4,177.03	29.39
	SSO	4,203.88	4,281.22	37.91
	mSSO5	4,152.38	4,284.40	47.38
	mSSO1	4,230.72	4,294.22	35.06
	BBO	4,321.33	4,408.25	42.28
	SA	4,261.53	4,414.08	90.17
	SATS	4,237.68	4,435.88	101.30
	TS	4,269.18	4,463.70	89.20
	ACO	4,504.03	4,624.53	77.92
	Modified ABC	4,485.28	4,697.89	69.27
	GA	4,524.43	4,770.54	141.75
	SFLA	4,680.48	4,884.42	96.28
	ABC	4,658.53	4,919.80	88.10
	PSO	4,728.38	4,978.78	139.84
	BA	4,602.37	5,013.51	154.78
	tabu-SA	5,019.38	5,224.92	69.00

* ผลเฉลยของวิธี Modified BBO นำมาจากการวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชุนเจริญ (2558) ซึ่งมีรูปแบบการปรับปรุงแบบ modBBO1 การกำหนดให้เครื่องจักรที่ม้การทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดอยู่ติดกัน

ตาราง 32 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P27

ชุดข้อมูล	วิธีแก้ปัญหา	ค่าคำตอบ (หน่วย: เมตร)		
		Min	Mean	SD
M30P27	Modified BBO	7,743.10	8,022.12	155.48
	mSSO6	8,007.40	8,128.93	61.99
	mSSO9	7,965.30	8,132.33	58.46
	mSSO7	7,896.80	8,141.12	77.04
	mSSO8	8,111.45	8,206.03	53.94
	mSSO4	8,117.20	8,216.91	57.79
	mSSO3	8,074.95	8,247.41	73.86
	mSSO2	8,138.00	8,295.77	71.12
	SSO	8,228.95	8,382.45	66.08
	mSSO5	8,151.05	8,410.97	69.65
	mSSO1	8,258.85	8,414.63	68.87
	BBO	8,471.40	8,603.38	75.20
	SATS	8,239.00	8,624.66	213.51
	SA	8,209.55	8,625.25	180.63
	TS	8,324.75	8,693.18	189.59
	ACO	8,745.50	9,121.14	174.14
	Modified ABC	8,938.20	9,391.78	186.96
	ABC	9,031.45	9,553.00	204.00
	SFLA	8,820.65	9,591.10	249.97
	BA	8,856.80	9,782.60	371.04
	PSO	8,947.70	9,826.13	345.82
	GA	10,000.05	10,040.73	87.64
	tabu-SA	9,685.25	10,115.19	158.64

* ผลเฉลยของวิธี Modified BBO นำมาจากการวิจัยของ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ (2558) ซึ่งมีรูปแบบการปรับปรุงแบบ modBBO4 การกำหนดให้เครื่องจักรที่ม้การทำงานต่อเนื่องกันมากที่สุดอยู่ติดกัน และห้ามมิให้เครื่องจักรที่ไม่มีการทำงานต่อเนื่องกันอยู่ติดกัน

จากผลการทดลองที่ 3 พบว่าจากการปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีดมกลื่นของฉลามส่งผลทำให้ผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้มีค่าต่ำกว่าวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดข้อมูล โดยจากการเปรียบเทียบผลทางสถิติพบว่าวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุงทั้งสิ้น 9 แบบ ให้ค่าผลเฉลยเฉลี่ยที่แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูล โดยในชุดข้อมูล M10P3 วิธีแบบ mSSO8 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำกว่าวิธีการ SSO แบบปรับปรุงรูปแบบอื่น ๆ ในทำนองเดียวกันกับชุดข้อมูล M20P5 M15P9 M30P10 และ M30P27 วิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุงที่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ mSSO9 และ mSSO6 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าผลเฉลยที่ได้จากวิธี mSSO8 และ mSSO9 มีค่าการกระจายตัวของข้อมูลต่ำเป็นอย่างมาก ซึ่งหมายถึงวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ดีอย่างสม่ำเสมอในการค้นหาคำตอบ

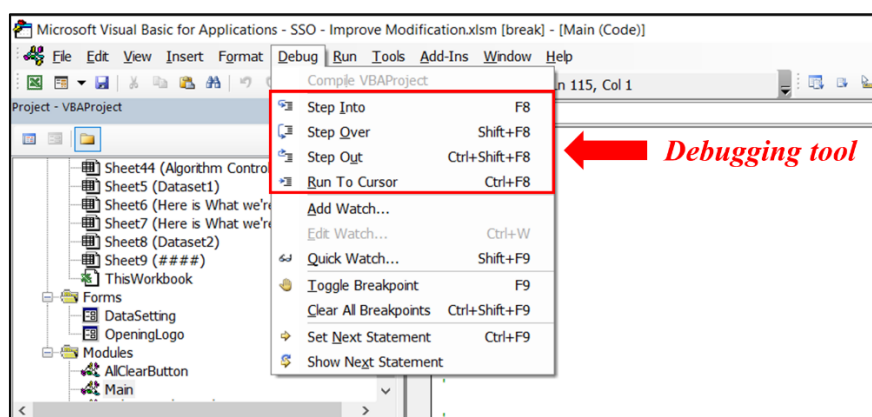
ทั้งนี้เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุง มาเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุงสามารถให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุดในชุดข้อมูล M20P5 และให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจในชุดข้อมูล M30P10 และชุดข้อมูล M30P27 โดยสามารถให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุดเป็นลำดับสอง รองจากวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์แบบปรับปรุง ทั้งนี้เนื้อหาของกราฟเปรียบเทียบผลเฉลยที่ต่ำที่สุด และผลเฉลยเฉลี่ยสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ค ถึง จ.

การทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือการวางแผนเครื่องจักร

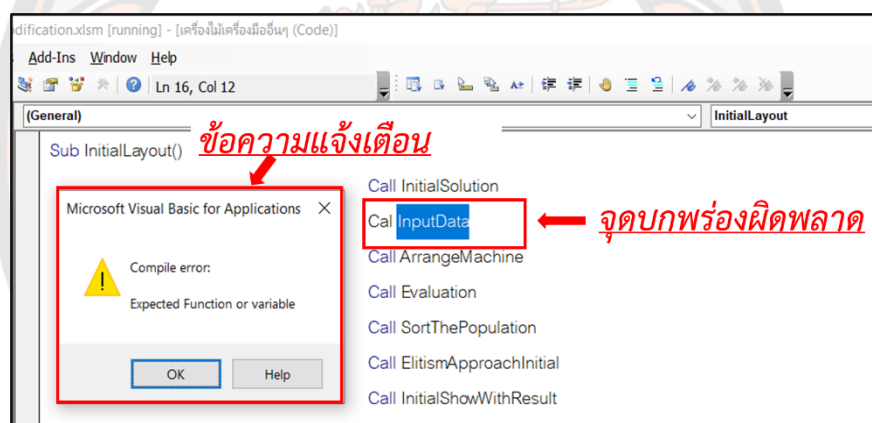
เพื่อให้การประยุกต์ใช้วิธีการดมกลื่นของฉลามแบบปรับปรุงในการแก้ไขปัญหการวางแผนเครื่องจักร เป็นไปอย่างถูกต้อง และสามารถใช้ได้จริง ตามเงื่อนไขข้อจำกัดที่กำหนดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้มีการทดสอบความถูกต้อง (Verification) และการตรวจสอบการใช้งานได้จริงของแบบจำลอง (Validation) ผ่านกระบวนการทดสอบได้แก่ การแก้ไขจุดบกพร่อง (Debugging) การตรวจสอบการรับเข้าของข้อมูลสู่กระบวนการคำนวณ การตรวจสอบการสร้างคำตอบเริ่มต้น การตรวจสอบลำดับขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรม การตรวจสอบสูตรการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม รายละเอียดแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

1. การแก้ไขจุดบกพร่อง (Debugging)

เนื่องจากโปรแกรมการวางแผนเครื่องจักรเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลาม ถูกเขียนขึ้นโดยภาษา Visual Basic for Application ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบและแก้ไขจุดบกพร่องของชุดคำสั่งผ่านฟังก์ชันตรวจสอบการทำงานตามลำดับ ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบ และแจ้งเตือนถึงจุดบกพร่องของชุดคำสั่ง โดยหน้าต่างแสดงฟังก์ชันตรวจสอบตามลำดับ และตัวอย่างการทำงานของฟังก์ชันตรวจสอบแสดงได้ดัง ภาพ 71 และภาพ 72



ภาพ 71 หน้าต่างแสดงฟังก์ชันตรวจสอบตามลำดับของ Microsoft Visual Basic for Application ในโปรแกรม Microsoft Excel



ภาพ 72 ตัวอย่างการทำงานของฟังก์ชันตรวจสอบของ Microsoft Visual Basic for Application ในโปรแกรม Microsoft Excel

2. การตรวจสอบการรับเข้าของข้อมูลสู่กระบวนการคำนวณ

ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบการรับเข้าของข้อมูลที่เป็นต่อการทำงานของโปรแกรมการวางแผนเครื่องจักรเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลาม ซึ่งได้แก่ ข้อมูลเครื่องจักร จำนวนเครื่องจักร ค่าพารามิเตอร์ ลำดับการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ เพื่อให้แน่ใจว่าที่สำคัญมีความถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้สร้างชุดคำสั่งขึ้น เพื่อกำหนดให้โปรแกรมแสดงรายละเอียดข้อมูลดังกล่าวลงในแผ่นงาน (Work sheet) ใน Microsoft excel ก่อน และหลังเริ่มการทำงานเสมอ โดยตัวอย่างสามารถแสดงได้ดัง ภาพ 73 และภาพ 74

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			
Part no. 1		2-1-6-5-8-9-3-4																	
Part no. 2		10-8-7-5-9-6-1																	
Part no. 3		9-2-7-4																	
(2) 20 Machine, 5 Parts																			
Part no. 1		4-2-3-12-1-9-16-18-5-8								15-14-6-11									
Part no. 2		10-9-1-3-18-17-6-6-2-1																	
Part no. 3		17-11-6-8-7-15-16-9-1-2																	

Dataset										Required Machine Sequence									
(1) 10 Machine, 3 Parts																			

ภาพ 73 การแสดงรายละเอียดของข้อมูลเครื่องจักร และลำดับการผลิต
ลงในแผนงาน (Work sheet)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1573									
1574		Bk =1	nk =0.1	a =0.5	PopSize =25	Iter =100			
1575	รอบการค้นหาค่า DOE ที่227	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Replicate 4	Replicate 5			
1576		8892.549805	8585.201172	8757.051758	9088.754883	8959.855469			
1577		1.728515625	1.69283855	1.705078125	1.688476563	1.707942724			
1578		Minute	Minute	Minute	Minute	Minute			
1579		Bk =1	nk =0.1	a =0.5	PopSize =50	Iter =50			
1580	รอบการค้นหาค่า DOE ที่228	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Replicate 4	Replicate 5			
1581		8892.549805	8585.201172	8757.051758	9088.754883	8959.855469			
1582		1.6938802	1.715234399	1.7095052	1.708723903	1.702473998			
1583		Minute	Minute	Minute	Minute	Minute			
1584		Bk =1	nk =0.9	a =0.9	PopSize =100	Iter =25			
1585	รอบการค้นหาค่า DOE ที่229	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Replicate 4	Replicate 5			
1586		8892.549805	8585.201172	8757.051758	9088.754883	8959.855469			
1587		1.681705713	1.707421899	1.734960914	1.702734351	1.718880177			
1588		Minute	Minute	Minute	Minute	Minute			
1589									
1590									
1591									
1592									
1593									

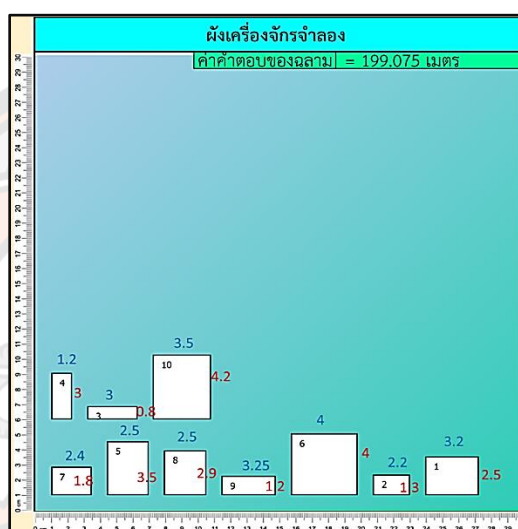
ภาพ 74 การแสดงรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดขึ้นในแผนงาน (Work sheet)
หลังจบกระบวนการค้นหาคำตอบของโปรแกรม

3. การตรวจสอบการสร้างคำตอบเริ่มต้น

ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมการวางแผนเครื่องจักรเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลืนของฉลาม ในขั้นตอนการสร้างคำตอบเริ่มต้น เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนคำตอบเริ่มต้น และจำนวนเครื่องจักรที่ต้องการจัดเรียงในคำตอบ ถูกต้องครบถ้วน เพื่อความสะดวกในการ

5. การตรวจสอบสูตรการคำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม

ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบการคำนวณระยะทางการขนถ่ายวัสดุของรถขนถ่ายตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อให้มั่นใจว่าของโปรแกรมการวางผังเครื่องจักรเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบโดยการนำผลเฉลยที่ได้จากการโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ ภาพตัวอย่างแสดงได้ดัง ภาพ 77 และภาพ 78



ภาพ 77 ผังเครื่องจักรจำลอง และผลเฉลยที่ได้จากการโปรแกรมการวางผังเครื่องจักรเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลิ่นของฉลาม

Prod.	Path	Path distance																	Total	
Part no1.	2 to 1	0.65	0.50	1.10	1.00	1.60	0.50	1.25											6.60	
	1 to 6	1.25	0.50	1.60	1.00	2.20	1.00	2.00	0.50	2.00									12.05	
	6 to 5	2.50	2.00	1.00	3.25	1.00	2.50	1.00	1.25	0.50	1.75								16.75	
	5 to 8	1.75	0.50	1.25	1.00	1.25	0.50	1.45											7.70	
	8 to 9	1.45	0.50	1.25	1.00	1.63	0.50	0.60											6.92	
	9 to 3	0.60	0.50	1.63	1.00	2.50	1.00	2.50	1.00	2.40	1.00	4.00	1.00	1.20	1.00	1.50	0.50	0.40	23.72	
	3 to 4	0.40	0.50	1.50	1.00	0.60	0.50	1.50											6.00	
Part no2.	10 to 8	2.10	0.50	1.75	1.00	3.00	1.00	1.20	0.50	0.50	4.00	1.00	2.40	1.00	2.50	1.00	1.25	0.50	1.45	26.65
	8 to 7	1.45	0.50	1.25	1.00	2.50	1.00	1.20	0.50	0.90										10.30
	7 to 5	0.90	0.50	1.20	1.00	1.25	0.50	1.75												7.10
	5 to 9	1.75	0.50	1.25	1.00	2.50	1.00	1.63	0.50	0.60										10.72
	9 to 6	0.60	0.50	1.63	1.00	2.00	0.50	2.00												8.22
	6 to 1	2.00	0.50	2.00	1.00	2.20	1.00	1.60	0.50	1.25										12.05
Part no3.	9 to 2	0.60	0.50	1.63	1.00	4.00	1.00	1.10	0.50	0.65										10.97
	2 to 7	0.65	0.50	1.10	1.00	4.00	1.00	3.25	1.00	2.50	1.00	2.50	1.00	1.20	0.50	0.90				22.10
	7 to 4	0.90	0.50	1.20	1.00	4.00	1.00	0.50	0.60	1.50										11.20
Total																		199.07		

ภาพ 78 ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผล และการอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการประยุกต์ใช้วิธีการดมกลื่นของฉลามเพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรแบบหลายแถว โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดระยะทางการขนถ่ายวัสดุของรถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติให้มีค่าน้อยที่สุดผ่านชุดข้อมูล 5 ชุด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Visual Basic for Application (VBA) ที่มีส่วนต่อกรฟิกับผู้ใช้ หรือที่เรียกว่า Graphic User Interface (GUI) ที่สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์งานวิจัยที่ตั้งไว้ โดยเนื้อหาส่วนสรุปผลการวิจัย และการอภิปรายผลสามารถแสดงได้ดังนี้

1. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรด้วยวิธีการดมกลื่นของฉลามแบบดั้งเดิม และแบบปรับปรุง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการดมกลื่นของฉลามแบบดั้งเดิม เพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร และยังสามารถปรับปรุงกระบวนการปรับปรุงคำตอบขึ้นอีก 3 รูปแบบ คือ การปรับปรุงการหาคำตอบด้วยวิธีการผสมผสานวิธีการดมกลื่นของฉลามเข้ากับวิธีการเชิงพันธุกรรม การปรับปรุงโดยการพิจารณาถึงความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร และการปรับปรุงกระบวนการทำงานของ SSO ในขั้นตอนฉลามหมุนวนรวมกับการพิจารณาถึงความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร ดังนั้นภายในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงวิธี SSO ทั้งหมด 10 วิธี โดยแบ่งเป็นวิธีการ SSO แบบปกติ 1 วิธี และ SSO แบบปรับปรุงอีก 9 วิธี โดยจากการทวนสอบความถูกต้อง (Verification) ด้วยการแก้ไขจุดบกพร่อง (Debugging) ตลอดจนการตรวจสอบการใช้งานได้จริงของการจำลอง (Validation) โดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ทำด้วยมือพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น มีความถูกต้อง

2. การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการดมกลื่นของฉลามในการประยุกต์แก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักร

งานวิจัยได้ศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี SSO โดยจากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ของวิธีการดมกลื่นของฉลามที่แตกต่างกันนั้นทั้ง 4 ค่า ได้แก่ การคูณกันระหว่างจำนวนประชากรฉลาม และจำนวนรอบการค้นหาคำตอบซ้ำสูงสุด ($NP \times K_{max}$) อัตราส่วนความเร็วจำกัดของฉลาม (β_k) ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม (η_k) และค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยหรือ

อัตราไม่แม่นยำ (α_k) มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลเฉลยที่ได้ในการแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในชุดปัญหา M10P3 M15P9 M20P5 M30P10 M30P27 ซึ่งหมายความว่าหากค่าพารามิเตอร์ค่าใดค่าหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลทำให้ค่าคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทั้งนี้จากการทดลองที่ 1 ผู้วิจัยยังได้พบ และได้ทดสอบรูปแบบการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้การแก้ปัญหาการวางแผนเครื่องจักร พบว่ารูปแบบการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น

3. การเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงกับผลเฉลยที่ได้จากการใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์อื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากที่ได้ทำการสืบค้นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชุดข้อมูลแล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นมาทดสอบประสิทธิภาพในการหาคำตอบด้วยวิธี SSO แบบต่าง ๆ ทั้ง 9 วิธี ทั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้จากวิธี SSO แบบดั้งเดิม กับผลเฉลยเฉลี่ยของวิธีการค้นหาคำตอบแบบดั้งเดิมอื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า วิธีการ SSO แบบดั้งเดิมนั้นให้ผลเฉลยเฉลี่ยที่ดีกว่าวิธีการค้นหาคำตอบแบบดั้งเดิมอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่

สำหรับวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงใน 9 รูปแบบนั้นผู้วิจัยพบว่าวิธีการปรับปรุงส่วนใหญ่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยได้ดีกว่าวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญยกเว้นวิธีแบบ mSSO1 mSSO3 mSSO5 mSSO7 mSSO6 ที่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยแย่กว่าวิธี SSO แบบดั้งเดิมในบางชุดข้อมูล

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงทั้ง 9 วิธี กับผลที่ได้จากวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าวิธี mSSO8 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยดีที่สุดในลำดับแรกในชุดข้อมูล M10P3 วิธีปรับปรุงแบบ mSSO9 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยดีที่สุดในชุดข้อมูล M20P5 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลขนาดกลาง สำหรับในชุดข้อมูล M15P9 วิธีการ mSSO9 แม้จะเป็นวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงที่ดีที่สุดของการปรับปรุง 9 รูปแบบของผู้วิจัย หากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ แล้วพบว่ากลับให้ผลเฉลยเฉลี่ยเป็นลำดับที่ 4 โดยในชุดข้อมูลนี้ วิธีค้นหาคำตอบที่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยดีที่สุดคือ การผสมผสานระหว่างวิธีการบ่อนจำลองเข้ากับวิธีการค้นหาคำตอบแบบต้องห้าม (Hybridise SA-TS) สำหรับในชุดข้อมูล M30P10 พบว่า วิธี mSSO9 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยเป็นลำดับสองโดยวิธีค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในชุดข้อมูลนี้คือ วิธีการหาคำตอบเชิงภูมิศาสตร์แบบปรับปรุง (Modified BBO) เช่นเดียวกันกับในชุด

ข้อมูล M30P27 วิธี mSSO6 ของผู้วิจัยให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยเป็นลำดับสอง โดยวิธีค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดในชุดข้อมูลนี้คือ วิธีการหาคำตอบเชิงภูมิศาสตร์แบบปรับปรุง (Modified BBO)

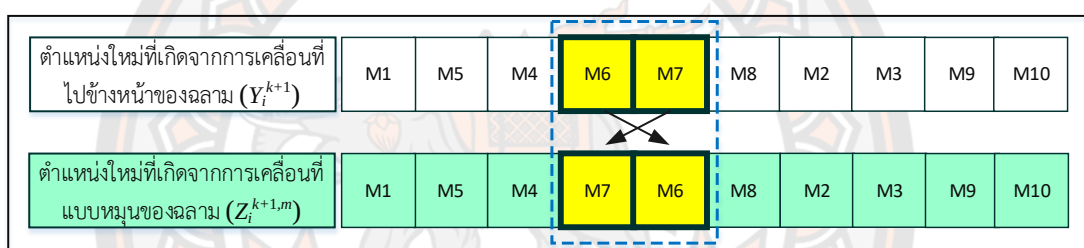
4. การอภิปรายผลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3

ในหัวข้อนี้เป็นการอภิปรายผลการทดลองซึ่งประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วน โดยเนื้อหาส่วนแรกเกี่ยวข้องกับความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิม และเนื้อหาในส่วนที่ 2 และ 3 จะเกี่ยวข้องความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบปรับปรุงแบบต่าง ๆ โดยรายละเอียดแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่น ๆ (ทั้งสิ้น 10 วิธีหาคำตอบ) ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หากพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองที่ 2 จะพบว่าวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมนั้นให้ค่าผลเฉลี่ยเฉลี่ยเป็นลำดับที่ 5 ในชุดข้อมูล M10P3 ลำดับที่ 4 ในชุดข้อมูล M20P5 และลำดับที่ 8 ในชุดข้อมูล M15P9 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลขนาดเล็ก และขนาดกลาง ของงานวิจัยนี้ เนื่องด้วยกลไกของวิธีการดมกลืนของฉลามในขั้นตอนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ (Shark forward movement) และวิธีการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark rotation movement) ซึ่งผู้วิจัยได้นำจำนวนเครื่องจักรสูงสุดเข้ามาใช้เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญเพื่อกำหนดรอบจำนวนรอบในการปรับปรุงคำตอบในขั้นตอนฉลามเคลื่อนที่ และใช้เป็นตัวกำหนดจำนวนคำตอบที่ต้องสร้างเพิ่มทั้งหมด (M_i^k) ในขั้นตอนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวนซึ่งเป็นการทำ (Local Search) จำนวนเครื่องจักรสูงสุดจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อการบวนการปรับปรุงคำตอบ กล่าวคือ หากจำนวนเครื่องจักรสูงสุดของชุดข้อมูลมีค่ามากขึ้น โอกาสที่คำตอบจะถูกปรับปรุงในขั้นตอนฉลามเคลื่อนที่ และจำนวนคำตอบที่ต้องสร้างขึ้นในกระบวนการฉลามหมุนวนจะมากขึ้นตามไปด้วย โดยจะสังเกตได้ว่าในชุดข้อมูลขนาดใหญ่ คือ ชุดข้อมูล M30P10 และ M30P27 ซึ่งมีจำนวนเครื่องจักรสูงสุดมากกว่าชุดข้อมูล M10P3 M20P5 และ M15P9 พบว่า SSO มีแนวโน้มของผลเฉลี่ยเฉลี่ยดีขึ้น ด้วยจำนวนเครื่องจักรสูงสุดที่มากขึ้นทำให้มีโอกาสได้ทำการปรับปรุงคำตอบมากกว่า และมีโอกาสที่เกิดการสร้างคำตอบใหม่จำนวนที่มากกว่าในขั้นตอนฉลามหมุนวน

การเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการดมกลืนของฉลามแบบดั้งเดิมอาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของคำตอบที่ต้องการค้นหา (M_i^k) ในกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวน เพื่อสร้างโอกาสในการค้นหาคำตอบเพิ่มเติมที่มากขึ้น ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวอาจส่งผลให้ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากขึ้น

4.2 ความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีการผสมผสานวิธีการดกกลื่นของฉลาม เข้ากับวิธีการเชิงพันธุกรรม (mSSO1) หากพิจารณาการผลการทดลองที่ 3 จะพบว่าวิธีการดังกล่าวนี้ให้ผลเฉลยเฉลี่ยที่ต่ำกว่าวิธีการดกกลื่นของฉลามแบบดั้งเดิมในชุดข้อมูล M10P3 M15P9 M30P10 M30P27 เนื่องจากวิธี mSSO1 ได้นำกลไกของการปรับปรุงคำตอบแบบ 2OAS (Two Operations Adjacent Swap) มาปรับใช้ในระบบการค้นหาคำตอบแบบฉลามหมุนวน (Shark rotation movement) เนื่องจากกลไกการปรับปรุงคำตอบแบบ 2OAS นั้นเป็นการปรับปรุงคำตอบที่จะเลือกปรับปรุงตำแหน่งของเครื่องจักร 2 ตำแหน่งที่ติดกันเสมอ จึงไม่ส่งผลให้คำตอบที่ถูกปรับปรุงนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับหลักการทำงานของกระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามหมุนวนที่เป็นกลไกการสำรวจคำตอบ (Exploration mechanics) ดังนั้นแล้ววิธีการแบบ mSSO1 จึงอาจค้นหาคำตอบได้ต่ำกว่าวิธีการ SSO แบบดั้งเดิม



ภาพ 79 รูปแบบการปรับปรุงคำตอบแบบ Two Operations Adjacent Swap

การเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ mSSO1 อาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนกลไกในระบบการค้นหาคำตอบแบบ 2OAS เป็นกลไกการปรับปรุงคำตอบแบบอื่น ๆ ที่เอื้อต่อการเปลี่ยนแปลงไปของคำตอบ เพื่อให้กลไกการสำรวจคำตอบ (Exploration mechanics) มีประสิทธิภาพที่มากขึ้น

4.3 ความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีการดกกลื่นของฉลามแบบปรับปรุง โดยการพิจารณาถึงความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร (mSSO2 – mSSO7) หากพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองที่ 3 จะพบว่าวิธี mSSO2 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำขึ้นเป็นอย่างมากในชุดข้อมูล M10P3 เมื่อเทียบกับการวิธี SSO แบบดั้งเดิม เนื่องจากชุดข้อมูลดังกล่าว มีความถี่ในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักรมีเพียง 3 ระดับ ซึ่งวิธี mSSO2 เป็นวิธีปรับปรุงคำตอบที่กำหนดให้เครื่องจักรที่มีคู่ขนานยาวที่สุดสูงที่สุดลำดับแรก มีตำแหน่งอยู่ติดกันเสมอ ประกอบการเป็นชุดข้อมูลขนาดเล็กซึ่งมีจำนวนเครื่องจักรสูงสุดเพียง 10 เครื่อง การปรับปรุงรูปแบบนี้จึงมีผล

ทำให้ค่าคำตอบที่ได้ดีขึ้น และมีความแตกต่างจากค่าคำตอบที่ได้จากวิธี SSO แบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่รอบการค้นหาซ้ำเริ่มต้น ซึ่งเหตุการณ์ลักษณะเกิดขึ้นเดียวกันกับ วิธี mSSO3 ในชุดข้อมูล M20P5 วิธี mSSO4 ในชุดข้อมูล M15P9 และ M30P10 และวิธี mSSO6 ในชุดข้อมูล M30P27

สำหรับวิธี mSSO5 และ mSSO7 ที่กำหนดห้ามมิให้คู่เครื่องจักรที่ไม่มีการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันมีตำแหน่งติดกัน โดยหากพิจารณาผลการทดลองที่ 3 จะพบว่าผลเฉลี่ยเฉลี่ยที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่าวิธีการเดิมของฉลามแบบดั้งเดิม ในชุดข้อมูล M15P9 M30P10 และ M30P27 เนื่องจากกลไกการกำหนดตำแหน่งของคู่เครื่องจักรเช่นนี้ ได้รับวงกลไกการสำรวจคำตอบ (Exploration mechanics) ของวิธีการเดิมของฉลามอย่างรุนแรง อีกทั้งยังเป็นสร้างการจำกัดพื้นที่การค้นหาคำตอบจึงทำให้ค่าคำตอบที่ได้มีโอกาสติดอยู่ในพื้นที่คำตอบเฉพาะแห่ง (Local optima) ได้โดยง่าย

4.4 ความสามารถในการค้นหาคำตอบของการปรับปรุงกระบวนการทำงานของ SSO ในขั้นตอนฉลามหมุนวนร่วมกับการพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักร (mSSO8 – mSSO9) หากพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองที่ 3 จะพบว่าวิธี mSSO8 และ mSSO9 ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยดีขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการวิธี SSO แบบดั้งเดิม เนื่องจากได้พิจารณาถึงประสิทธิภาพในการทำงานต่อเนื่องกันระหว่างเครื่องจักรเช่นเดียวกับวิธี mSSO2 และ mSSO3 อีกทั้งได้รับการปรับแต่งในกระบวนการฉลามหมุนวนให้มีความสามารถในการค้นหาคำตอบได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบเฉพาะพื้นที่ (Local search) อีกทั้งยังเพิ่มโอกาสในการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในพื้นที่คำตอบเฉพาะแห่ง (Local optima) ให้กับฉลาม จึงทำให้วิธีการปรับปรุงเช่นนี้ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยดีขึ้นเป็นอย่างมาก โดยหากพิจารณาตาราง 29 จะพบว่าสำหรับชุดข้อมูล M20P5 วิธี mSSO9 เป็นวิธีการเดิมของฉลามแบบปรับปรุงที่สามารถค้นหาผลเฉลี่ยเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ทั้งในงานวิจัยนี้ และงานวิจัยที่ผ่านมา

5. จุดเด่นและจุดด้อยของวิธีการเดิมของฉลาม

หากเทียบกับวิธีอื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบว่าวิธี SSO เป็นวิธีที่สามารถค้นหาผลเฉลยได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะในโจทย์ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลเฉลยนั้นมีค่าต่ำเป็นอย่างมากซึ่งแสดงได้ถึงความสำเร็จของประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local search) ในขั้นตอนการปรับปรุงแบบฉลามเคลื่อนที่หมุนวน (Shark movement by rotation) ซึ่งช่วยทำให้เกิดการประเมินคำตอบในบริเวณพื้นที่ค้นหา อีกทั้งกลไกการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ไป

ด้านหน้ายังถือต่อการค้นหาคำตอบในบริเวณที่พบว่าคุณภาพของผลเฉลยดีขึ้น จึงทำให้การค้นหาคำตอบเฉพาะที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเส้นทางที่ฉลามเคลื่อนที่ผ่านไป การค้นหาคำตอบเช่นนี้แลกมาด้วยการใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากต้องทำการประเมินทุกคำตอบที่ได้จากการปรับปรุง

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการจัดเรียงเครื่องจักรเฉพาะที่เป็นแบบหลายแถว หรือ Multiple rows layout ในระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นเท่านั้น โดยในปัจจุบันนั้นยังรูปแบบการจัดเรียงผังแบบอื่นๆ อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น การจัดเรียงแบบเซลล์ลูลาร์ (Cellular layout configuration) การจัดเรียงเครื่องจักรแบบแถวเดี่ยว เป็นต้น

2. เพื่อให้การประยุกต์ใช้วิธีการत्मกลืนของฉลามในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพสูงสุดควรกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามที่ผู้วิจัยได้แนะนำไว้ สำหรับปัญหาอื่น ๆ ควรมีการสืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ต้องการศึกษาก่อนเสมอ

3. แนวทางสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ SSO อาจทำได้โดยการเพิ่มกลไกการหลีกเลี่ยงจากการติดอยู่ในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะ (Local optima) ทั้งนี้อาจทำได้โดยการกำหนดให้กระบวนการปรับปรุงคำตอบแบบฉลามเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Shark forward movement) เปลี่ยนแปลงคำตอบอย่างมากเปรียบดังฉลามเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพื่อไปยังบริเวณพื้นที่อื่น ๆ เพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบใหม่ และหลีกเลี่ยงจากการติดอยู่ในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะ เนื่องจากวิธี SSO มีกลไกในการค้นหาคำตอบในบริเวณพื้นที่เฉพาะ (Local search) ซึ่งช่วยค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงเพิ่มเติมได้ ซึ่งเป็นทั้งข้อดีและข้อเสียในเวลาเดียวกัน กล่าวคือ กลไกการค้นหาคำตอบเช่นนี้อาจทำให้ฉลามติดอยู่ในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะได้โดยง่าย หากคำตอบที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงแบบฉลามเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดเปลี่ยนแปลงน้อย เปรียบได้ว่าเมื่อฉลามเคลื่อนที่ไปด้านหน้าด้วยความเร็วที่ต่ำอย่างมาก การหมุนวนของฉลามจะทำให้เกิดการวนเวียนไปยังเส้นทางที่เคยผ่านมาซ้ำแล้ว ซ้ำเล่า ซึ่งจะลดทอนประสิทธิภาพในการค้นหาสำรวจคำตอบ

4. งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุง SSO โดยการกำหนดให้เครื่องจักรที่มีความถี่ในการขนถ่ายวัสดุซึ่งกันและกันอยู่ติดกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการแก้ปัญหาฮิวริสติกส์เข้ามาช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ SSO การปรับปรุงเช่นนี้ทำให้เกิดการพัฒนาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากกราฟการลู่เข้าของค่าคำตอบ (Convergence plot) เทียบกับรอบการค้นหาคำตอบซ้ำ (k)

ดังนั้นแล้วสำหรับงานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยสามารถนำหลักการเดียวกันนี้ ปรับปรุงวิธีการฮิวริสติกส์ชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรได้ โดยถอดบทเรียนในงานวิจัยชิ้นนี้ หากแต่ต้องเลือกวิธีฮิวริสติกส์ที่เหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ

5. งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมช่วยเหลือในการวางผังเครื่องจักร ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการวางผังเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมจริงได้ เนื่องจากผู้วิจัยได้ออกแบบโปรแกรมให้มีความยืดหยุ่นและสามารถเพิ่มลดปรับเปลี่ยน ขนาดเครื่องจักร จำนวนเครื่องจักร ขนาดของพื้นที่ผังโรงงาน ลำดับการผลิต ระยะห่างระหว่างเครื่องจักรได้โดยง่าย หากแต่ต้องเพิ่มเติมเงื่อนไขข้อจำกัด และปรับปรุงฟังก์ชันประเมินคำตอบให้สอดคล้องเหมาะสม





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย General Linear Model ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับชุดข้อมูล M10P3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
NP/k_{max}	2	13.461	6.7307	29.19	0.000
β_k	2	17.279	8.6397	37.47	0.000
η_k	2	59.786	29.8929	129.63	0.000
α_k	2	2.757	1.3787	5.98	0.003
$NP/k_{max} * \beta_k$	4	54.706	13.6766	59.31	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k$	4	20.722	5.1806	22.47	0.000
$NP/ k_{max} * \alpha_k$	4	38.342	9.5855	41.57	0.000
$\beta_k * \eta_k$	4	31.186	7.7964	33.81	0.000
$\beta_k * \alpha_k$	4	2.279	0.5696	2.47	0.044
$\eta_k * \alpha_k$	4	54.355	13.5886	58.93	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \eta_k$	8	102.103	12.7629	55.35	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \alpha_k$	8	37.617	4.7021	20.39	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k * \alpha_k$	8	37.704	4.7130	20.44	0.000
$\beta_k * \eta_k * \alpha_k$	8	35.288	4.4110	19.13	0.000
Error	421	97.080	0.2306		
Lack-of-Fit	16	97.080	6.0675	4.50671E+28	0.000
Model Summary	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.480201	83.94%	81.50%	78.60%	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับชุดข้อมูล M20P5

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
NP/k_{max}	2	1377.7	688.852	46.96	0.000
β_k	2	420.3	210.163	14.33	0.000
η_k	2	827.5	413.757	28.21	0.000
α_k	2	111.4	55.692	3.80	0.023
$NP/k_{max} * \beta_k$	4	2269.8	567.454	38.69	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k$	4	687.0	171.749	11.71	0.000
$NP/ k_{max} * \alpha_k$	4	1685.5	421.365	28.73	0.000
$\beta_k * \eta_k$	4	515.5	128.880	8.79	0.000
$\beta_k * \alpha_k$	4	1165.8	291.455	19.87	0.000
$\eta_k * \alpha_k$	4	1271.6	317.890	21.67	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \eta_k$	8	1483.5	185.434	12.64	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \alpha_k$	8	2625.6	328.198	22.37	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k * \alpha_k$	8	2683.8	335.478	22.87	0.000
$\beta_k * \eta_k * \alpha_k$	8	6487.6	810.950	55.29	0.000
Error	421	6175.3	14.668		
Lack-of-Fit	16	6175.3	385.957	*	*
Model Summary	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	3.82991	79.27%	76.12%	72.37%	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับชุดข้อมูล M15P9

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
NP/k_{max}	2	516.5	258.26	23.10	0.000
β_k	2	1648.1	824.06	73.72	0.000
η_k	2	1180.0	590.02	52.78	0.000
α_k	2	686.4	343.22	30.70	0.000
$NP/k_{max} * \beta_k$	4	7023.2	1755.79	157.07	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k$	4	1022.7	255.68	22.87	0.000
$NP/ k_{max} * \alpha_k$	4	225.4	56.35	5.04	0.001
$\beta_k * \eta_k$	4	520.4	130.09	11.64	0.000
$\beta_k * \alpha_k$	4	2111.8	527.94	47.23	0.000
$\eta_k * \alpha_k$	4	796.6	199.16	17.82	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \eta_k$	8	2050.8	256.36	22.93	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \alpha_k$	8	791.3	98.92	8.85	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k * \alpha_k$	8	2648.2	331.03	29.61	0.000
$\beta_k * \eta_k * \alpha_k$	8	2805.0	350.63	31.37	0.000
Error	421	4706.0	11.18		
Lack-of-Fit	16	4706.0	294.13	*	*
Total	485	28732.6			
Model Summary	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	3.34338	83.62%	81.13%	78.17%	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับชุดข้อมูล M30P10

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
NP/k_{max}	2	12492	6246.2	190.69	0.000
β_k	2	50294	25147.2	767.71	0.000
η_k	2	1968	984.1	30.04	0.000
α_k	2	1198	598.8	18.28	0.000
$NP/k_{max} * \beta_k$	4	62568	15642.1	477.53	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k$	4	9745	2436.3	74.38	0.000
$NP/ k_{max} * \alpha_k$	4	3234	808.6	24.68	0.000
$\beta_k * \eta_k$	4	1344	336.1	10.26	0.000
$\beta_k * \alpha_k$	4	12704	3175.9	96.96	0.000
$\eta_k * \alpha_k$	4	4565	1141.2	34.84	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \eta_k$	8	12844	1605.5	49.01	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \alpha_k$	8	2096	262.0	8.00	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k * \alpha_k$	8	9780	1222.6	37.32	0.000
$\beta_k * \eta_k * \alpha_k$	8	10451	1306.3	39.88	0.000
Error	421	13790	32.8		
Lack-of-Fit	16	13790	861.9	*	*
Total	485	209075			
Model Summary	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	5.72329	93.40%	92.40%	91.21%	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับชุดข้อมูล M30P27

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
NP/k_{max}	2	23292	11646.1	53.88	0.000
β_k	2	115351	57675.4	266.85	0.000
η_k	2	2802	1401.2	6.48	0.002
α_k	2	8170	4085.1	18.90	0.000
$NP/k_{max} * \beta_k$	4	27429	6857.3	31.73	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k$	4	18052	4513.0	20.88	0.000
$NP/ k_{max} * \alpha_k$	4	15271	3817.7	17.66	0.000
$\beta_k * \eta_k$	4	3738	934.5	4.32	0.002
$\beta_k * \alpha_k$	4	18791	4697.8	21.74	0.000
$\eta_k * \alpha_k$	4	19128	4782.0	22.12	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \eta_k$	8	13007	1625.9	7.52	0.000
$NP/ k_{max} * \beta_k * \alpha_k$	8	23632	2954.0	13.67	0.000
$NP/ k_{max} * \eta_k * \alpha_k$	8	43800	5475.1	25.33	0.000
$\beta_k * \eta_k * \alpha_k$	8	27228	3403.5	15.75	0.000
Error	421	90994	216.1		
Total	485	450687			
Model Summary	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	14.7016	79.81%	76.74%	73.09%	

ภาคผนวก ข. ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่มือเครื่องจักรของ 5 ชุดข้อมูล

ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่มือเครื่องจักรของชุดข้อมูล M10P3

ความถี่การขนถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่มือเครื่องจักร
(0)	3-1, 3-2, 4-1, 4-2, 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 6-2, 6-3, 6-4, 7-1, 7-3 7-6, 8-1, 8-2, 8-3, 8-4, 8-6, 9-4, 9-7, 10-1, 10-2, 10-3, 10-5 10-6, 10-7, 10-9
(1)	2-1, 4-3, 6-5, 7-2, 7-4, 7-5, 8-5, 8-7, 9-1, 9-2, 9-3, 9-5, 9-6, 9-8, 10-4, 10-8
(2)	6-1

ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่มือเครื่องจักรของชุดข้อมูล M20P5

ความถี่การขนถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่มือเครื่องจักร
(0)	2-1, 4-1, 4-3, 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 6-1, 6-3, 6-4, 7-1, 7-3, 7-4 7-6, 8-1, 8-2, 8-3, 9-2, 9-3, 9-4, 9-6, 9-7, 9-8, 10-1, 10-2, 2-1 4-1, 4-3, 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 6-1, 6-3, 6-4, 7-1, 7-3, 7-4, 7-6 8-1, 8-2, 8-3, 9-2, 9-3, 9-4, 9-6, 9-7, 9-8, 10-1, 10-2, 10-3 10-4, 10-5, 10-7, 10-8, 11-1, 11-5, 11-7, 11-8, 11-9, 12-2, 12-4 12-5, 12-6, 12-7, 12-8, 12-9, 12-11, 13-1, 13-2, 13-3, 13-4, 13-6 13-7, 13-8, 13-9, 13-10, 13-11, 14-1, 14-2, 14-3, 14-4, 14-5, 14-7 14-8, 14-10, 14-11, 14-12, 14-13, 15-1, 15-2, 15-3, 15-4, 15-5 15-9, 15-10, 15-12, 16-1, 16-2, 16-4, 16-6, 16-7, 16-8, 16-12 16-13, 16-14, 17-1, 17-2, 17-3, 17-6, 17-7, 17-8, 17-9, 17-10 17-12, 17-13, 17-15, 17-16, 18-1, 18-2, 18-4, 18-7, 18-9, 18-10 18-11, 18-12, 18-14, 18-15, 19-2, 19-3, 19-4, 19-5, 19-6, 19-7 19-8, 19-9, 19-10, 19-11, 19-13, 19-15, 19-16, 19-17, 19-18, 20-2 20-3, 20-4, 20-5, 20-6, 20-7, 20-9, 20-11, 20-12, 20-13, 20-16 20-17
(1)	3-1, 3-2, 6-2, 6-5, 7-2, 7-5, 8-4, 8-5, 8-7, 9-5, 10-6, 10-9, 11-2

ความถี่การขนถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่มือเครื่องจักร
	11 - 3, 11 - 4, 11 - 10, 12 - 1, 12 - 3, 12 - 10, 13 - 5, 13 - 12, 14 - 6, 14 - 9 15 - 6, 15 - 7, 15 - 8, 15 - 11, 15 - 13, 15 - 14, 16 - 3, 16 - 5, 16 - 10, 16 - 11 16 - 15, 17 - 4, 17 - 5, 17 - 14, 18 - 3, 18 - 5, 18 - 6, 18 - 8, 18 - 13, 18 - 16 18 - 17, 19 - 1, 19 - 12, 19 - 14, 20 - 8, 20 - 10, 20 - 14, 20 - 15, 20 - 18, 20 - 19
(2)	4 - 2, 8 - 6, 11 - 6, 16 - 9, 17 - 11, 20 - 1
(3)	9 - 1

ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่มือเครื่องจักรของชุดข้อมูล M15P9

ความถี่การขนถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่มือเครื่องจักร
(0)	2 - 1, 4 - 1, 6 - 2, 6 - 3, 6 - 4, 7 - 2, 7 - 4, 7 - 5, 7 - 6, 8 - 1, 8 - 3, 8 - 5, 9 - 3, 9 - 7, 10 - 1, 10 - 2, 10 - 5, 11 - 4, 11 - 7, 12 - 4, 12 - 5, 12 - 6, 12 - 7, 12 - 8, 12 - 9, 13 - 2, 13 - 4, 13 - 10, 13 - 12, 14 - 3, 14 - 6, 14 - 7, 14 - 10, 14 - 13, 15 - 1, 15 - 4, 15 - 5, 15 - 7, 15 - 9, 15 - 10
(1)	3 - 1, 4 - 3, 5 - 1, 5 - 2, 6 - 1, 6 - 5, 7 - 1, 8 - 2, 8 - 6, 8 - 7, 9 - 1, 9 - 2, 9 - 4, 9 - 5, 9 - 6, 9 - 8, 10 - 3, 10 - 6, 10 - 7, 10 - 8, 10 - 9, 11 - 2, 11 - 3, 11 - 5, 11 - 6, 11 - 8, 11 - 9, 11 - 10, 12 - 1, 12 - 2, 12 - 10, 12 - 11, 13 - 1, 13 - 3, 13 - 5, 13 - 6, 13 - 7, 13 - 8, 13 - 9, 13 - 11, 14 - 1, 14 - 2, 14 - 5, 14 - 8, 14 - 9, 14 - 11, 14 - 12, 15 - 6, 15 - 12, 15 - 14
(2)	4 - 2, 5 - 4, 7 - 3, 8 - 4, 11 - 1, 12 - 3, 15 - 2, 15 - 8, 15 - 11, 15 - 13
(3)	3 - 2, 5 - 3, 10 - 4, 15 - 3,
(4)	14 - 4

ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่มือเครื่องจักรของชุดข้อมูล M30P10

ความถี่การขนถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่มือเครื่องจักร
(0)	3 - 2, 5 - 2, 5 - 3, 6 - 4, 7 - 1, 7 - 4, 7 - 5, 7 - 6, 8 - 2, 8 - 3, 8 - 4, 8 - 7, 9 - 1, 9 - 3, 9 - 6, 9 - 8, 10 - 1, 10 - 2, 10 - 3, 10 - 4, 10 - 5, 10 - 6, 10 - 9, 11 - 1, 11 - 3, 11 - 4, 11 - 5, 12 - 1, 12 - 2, 12 - 4, 12 - 5, 12 - 8, 12 - 9, 12 - 10, 12 - 11, 13 - 1, 13 - 3, 13 - 5, 13 - 6, 13 - 7, 13 - 8, 13 - 9, 13 - 10, 13 - 12, 14 - 2, 14 - 4, 14 - 5, 14 - 6, 14 - 10, 14 - 1, 2 14 - 13, 15 - 1, 15 - 3, 15 - 4, 15 - 5, 15 - 6, 15 - 7, 15 - 10, 15 - 14, 16 - 1, 16 - 2, 16 - 5, 16 - 6, 16 - 10, 16 - 12, 16 - 13, 16 - 14, 16 - 15, 17 - 4, 17 - 5, 17 - 7, 17 - 11, 17 - 12 17 - 13, 17 - 14, 18 - 1, 18 - 2, 18 - 3, 18 - 6, 18 - 8, 18 - 9, 18 - 10, 18 - 11, 18 - 12, 18 - 13, 18 - 16, 18 - 17, 19 - 1, 19 - 2, 19 - 3, 19 - 4, 19 - 6, 19 - 8, 19 - 9, 19 - 10, 19 - 11, 19 - 13, 19 - 15, 19 - 16, 19 - 17, 19 - 18, 20 - 1, 20 - 3, 20 - 5, 20 - 6, 20 - 7, 20 - 8, 20 - 9, 20 - 10, 20 - 11, 20 - 12, 20 - 13, 20 - 14, 20 - 15, 20 - 16, 20 - 17, 21 - 1, 21 - 5, 21 - 6, 21 - 7, 21 - 9, 21 - 1, 2 21 - 14, 21 - 15, 21 - 17, 21 - 18, 21 - 19, 21 - 20, 22 - 2, 22 - 3, 22 - 4, 22 - 5, 22 - 6, 22 - 7, 22 - 9, 22 - 13, 22 - 14, 22 - 15, 22 - 16, 22 - 18, 22 - 19, 23 - 3, 23 - 4, 23 - 5, 23 - 6, 23 - 7, 23 - 8, 23 - 9, 23 - 10, 23 - 12, 23 - 13, 23 - 14, 23 - 15, 23 - 16, 23 - 17, 23 - 19, 23 - 20, 23 - 22, 24 - 1, 24 - 2, 24 - 3, 24 - 4, 24 - 5, 24 - 6, 24 - 7, 24 - 8, 24 - 9, 24 - 10, 24 - 11, 24 - 15, 24 - 16, 24 - 17, 24 - 18, 24 - 19, 24 - 20, 24 - 21, 24 - 23, 25 - 1, 25 - 3, 25 - 5, 25 - 6, 25 - 7, 25 - 9, 25 - 11, 25 - 12 25 - 14, 25 - 15, 25 - 17, 25 - 18, 25 - 19, 25 - 20, 25 - 22, 25 - 23, 26 - 1, 26 - 2, 26 - 3, 26 - 5, 26 - 8, 26 - 9, 26 - 10, 26 - 11, 26 - 12, 26 - 13, 26 - 14, 26 - 15, 26 - 17, 26 - 21, 26 - 25, 27 - 1, 27 - 3, 27 - 5, 27 - 7, 27 - 8, 27 - 10, 27 - 11, 27 - 14, 27 - 15, 27 - 16, 27 - 17, 27 - 18, 27 - 19, 27 - 20, 27 - 21, 27 - 22, 27 - 23, 27 - 25, 27 - 26, 28 - 1, 28 - 2, 28 - 3, 28 - 4, 28 - 5, 28 - 6, 28 - 8, 28 - 9, 28 - 11, 28 - 1, 2 28 - 15, 28 - 16, 28 - 17, 28 - 18, 28 - 19, 28 - 20, 28 - 21, 28 - 24, 28 - 25, 28 - 26, 28 - 27, 29 - 3, 29 - 4, 29 - 5, 29 - 7, 29 - 8, 29 - 9, 29 - 10, 29 - 11, 29 - 12, 29 - 13, 29 - 14, 29 - 15, 29 - 16, 29 - 17, 29 - 18, 29 - 19, 29 - 20, 29 - 22, 29 - 25, 29 - 26, 29 - 27, 29 - 28, 30 - 2, 30 - 3 30 - 4, 30 - 6, 30 - 8, 30 - 10, 30 - 12 30 - 14, 30 - 15, 30 - 17, 30 - 18, 30 - 22, 30 - 24, 30 - 25, 30 - 27, 30 - 28
(1)	2 - 1, 3 - 1, 4 - 1, 4 - 2, 4 - 3, 5 - 1, 5 - 4, 6 - 1, 6 - 5, 7 - 2, 7 - 3, 8 - 1, 8 - 5, 8 - 6,

ความถี่การชน ถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่เครื่องจักร
	9 - 2, 9 - 4, 9 - 5, 9 - 7, 10 - 7, 10 - 8, 11 - 2, 11 - 8, 11 - 9, 11 - 10, 12 - 3, 12 - 6, 12 - 7, 13 - 4, 13 - 11, 14 - 1, 14 - 7, 14 - 8, 14 - 9, 14 - 11, 15 - 2, 15 - 8, 15 - 9, 15 - 11, 15 - 13, 16 - 3, 16 - 4, 16 - 7, 16 - 8, 16 - 11, 17 - 1, 17 - 2, 17 - 3, 17 - 6, 17 - 8, 17 - 9, 17 - 10, 17 - 16, 18 - 5, 18 - 7, 18 - 14, 18 - 15, 19 - 5, 19 - 12, 19 - 14, 20 - 2, 20 - 4, 20 - 18, 20 - 19, 21 - 2, 21 - 3, 21 - 4, 21 - 8, 21 - 11, 21 - 13, 21 - 16, 22 - 1, 22 - 8, 22 - 10, 22 - 11, 22 - 12, 22 - 17, 22 - 21, 23 - 1, 23 - 2, 23 - 11, 23 - 18, 24 - 12, 24 - 13, 24 - 22, 25 - 2, 25 - 4, 25 - 8, 25 - 10, 25 - 13, 25 - 16, 26 - 4, 26 - 6, 26 - 7, 26 - 16, 26 - 19, 26 - 20, 26 - 22, 26 - 23, 26 - 24, 27 - 2, 27 - 4, 27 - 6, 27 - 9, 27 - 12, 27 - 13, 28 - 14, 28 - 22, 29 - 1, 29 - 2, 29 - 6, 29 - 21, 29 - 24, 30 - 1, 30 - 5, 30 - 7, 30 - 11, 30 - 16, 30 - 19, 30 - 20, 30 - 21, 30 - 23, 30 - 26, 30 - 29
(2)	6 - 2, 11 - 6, 11 - 7, 14 - 3, 16 - 9, 18 - 4, 19 - 7, 21 - 10, 22 - 20, 23 - 21, 24 - 14, 25 - 21, 25 - 24, 26 - 18, 27 - 24, 28 - 7, 28 - 10, 28 - 13, 28 - 23, 29 - 23, 30 - 13
(3)	6 - 3, 13 - 2, 15 - 12, 17 - 15, 30 - 9

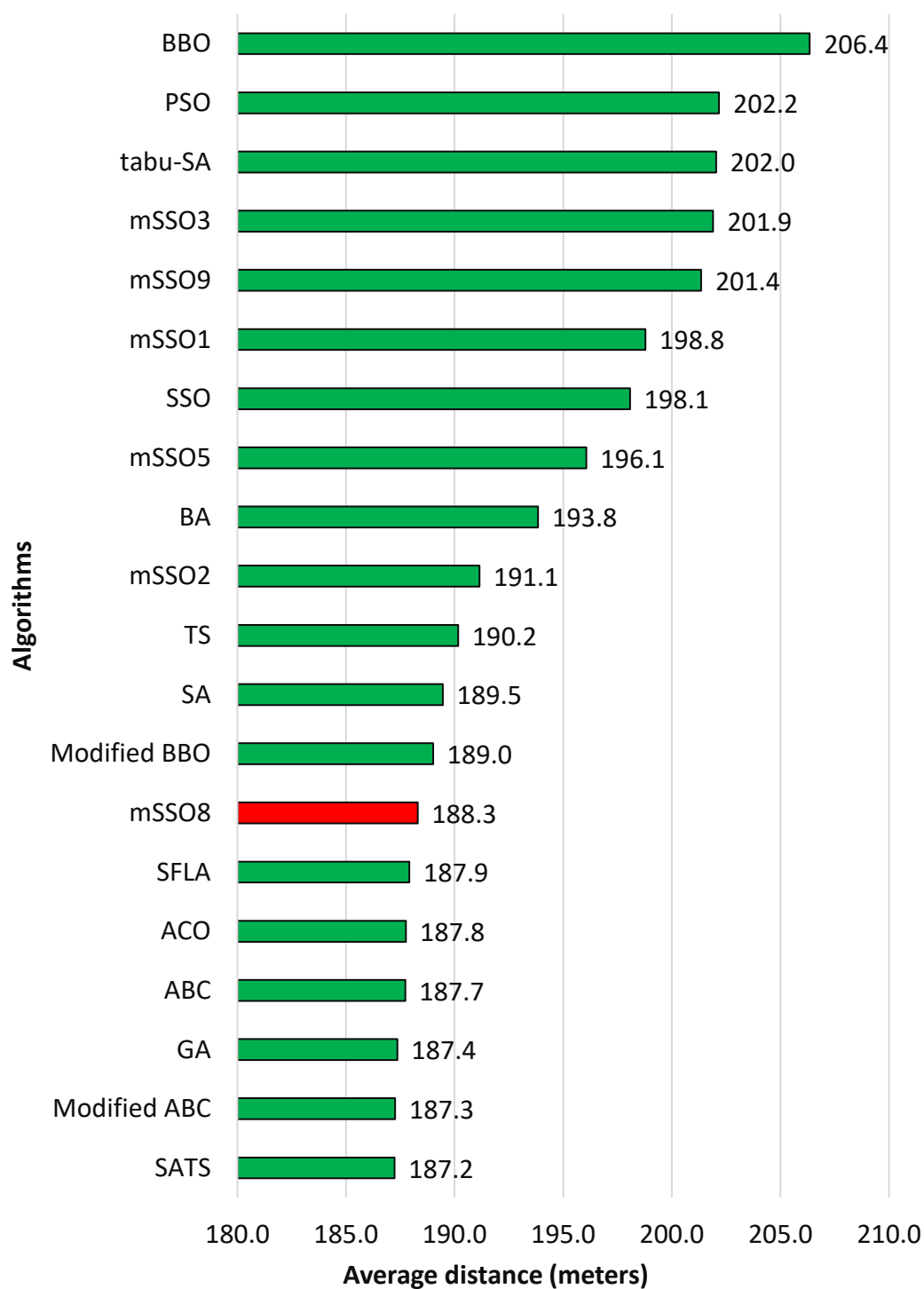
ความถี่การส่งถ่ายวัสดุระหว่างคู่อุปกรณ์ของชุดข้อมูล M30P27

ความถี่การชน ถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่เครื่องจักร
(0)	19 - 6, 19 - 8, 19 - 9, 19 - 10, 19 - 11, 19 - 13, 19 - 15, 19 - 16, 19 - 17, 19 - 18, 20 - 3, 20 - 5, 20 - 6, 20 - 7, 20 - 9, 20 - 11, 20 - 12, 20 - 13, 20 - 16, 20 - 17, 21 - 1, 21 - 5, 21 - 6, 21 - 7, 21 - 9, 21 - 12, 21 - 14, 21 - 15, 21 - 17, 21 - 18, 21 - 19, 21 - 20, 22 - 2, 22 - 3, 22 - 4, 22 - 5, 22 - 6, 22 - 7, 22 - 9, 22 - 13, 22 - 14, 22 - 15, 22 - 16, 22 - 18, 22 - 19, 23 - 3, 23 - 4, 23 - 5, 23 - 6, 23 - 7, 23 - 8, 23 - 9, 23 - 10, 23 - 12, 23 - 13, 23 - 14, 23 - 15, 23 - 16, 23 - 17, 23 - 19, 23 - 20, 23 - 22, 24 - 1, 24 - 2, 24 - 3, 24 - 4, 24 - 5, 24 - 6, 24 - 7, 24 - 8, 24 - 9, 24 - 10, 24 - 11, 24 - 15, 24 - 16, 24 - 17, 24 - 18, 24 - 19, 24 - 20, 24 - 21, 24 - 23, 25 - 1, 25 - 3, 25 - 5, 25 - 6, 25 - 7, 25 - 9, 25 - 11, 25 - 12, 25 - 14, 25 - 15, 25 - 17, 25 - 18, 25 - 19, 25 - 20, 25 - 22, 25 - 23, 26 - 1, 26 - 2, 26 - 3, 26 - 5, 26 - 8, 26 - 9, 26 - 10, 26 - 11, 26 - 12, 26 - 13, 26 - 14, 26 - 15, 26 - 17, 26 - 21, 26 - 25, 27 - 1, 27 - 3, 27 - 5, 27 - 7, 27 - 8, 27 - 10, 27 - 11, 27 - 14, 27 - 15, 27 - 16, 27 - 17, 27 -

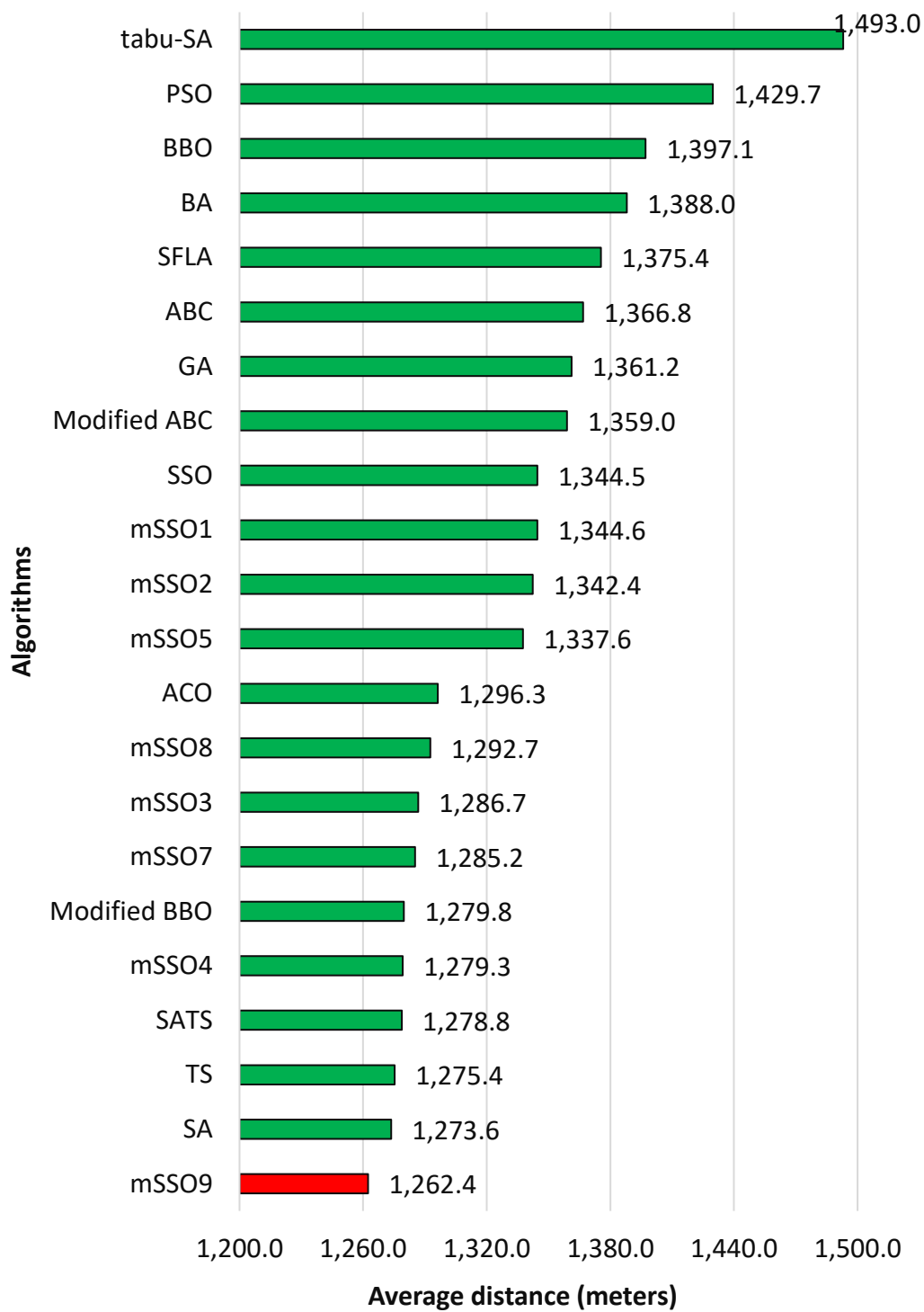
ความถี่การขนถ่ายวัสดุ	หมายเลขคู่มือเครื่องจักร
	18, 27 - 19, 27 - 20, 27 - 21, 27 - 22, 27 - 23, 27 - 25, 27 - 26, 28 - 1, 28 - 2, 28 - 3, 28 - 4, 28 - 5, 28 - 6, 28 - 8, 28 - 9, 28 - 11, 28 - 12, 28 - 15, 28 - 16, 28 - 17, 28 - 18, 28 - 19, 28 - 20, 28 - 21, 28 - 24, 28 - 25, 28 - 26, 28 - 27, 29 - 3, 29 - 4, 29 - 5, 29 - 7, 29 - 8, 29 - 9, 29 - 10, 29 - 11, 29 - 12, 29 - 13, 29 - 14, 29 - 15, 29 - 16, 29 - 17, 29 - 18, 29 - 19, 29 - 20, 29 - 22, 29 - 25, 29 - 26, 29 - 27, 29 - 28, 30 - 2, 30 - 3, 30 - 4, 30 - 6, 30 - 8, 30 - 10, 30 - 12, 30 - 14, 30 - 15, 30 - 17, 30 - 18, 30 - 22, 30 - 24, 30 - 25, 30 - 27, 30 - 28
(2)	2 - 1, 5 - 1, 7 - 5, 9 - 4, 9 - 6, 9 - 8, 10 - 6, 10 - 7, 10 - 9, 11 - 1, 11 - 3, 11 - 7, 11 - 8, 11 - 9, 12 - 1, 12 - 10, 13 - 5, 13 - 11, 14 - 1, 14 - 3, 14 - 8, 14 - 11, 15 - 6, 15 - 14, 16 - 3, 16 - 11, 17 - 11, 18 - 4, 18 - 5, 19 - 7, 19 - 12, 19 - 14, 20 - 1, 20 - 18, 20 - 19, 21 - 10, 22 - 20, 23 - 21, 24 - 14, 25 - 21, 25 - 24, 26 - 18, 27 - 24, 28 - 7, 28 - 10, 28 - 13, 28 - 23, 29 - 23, 30 - 13
(3)	3 - 1, 4 - 3, 5 - 3, 5 - 4, 6 - 3, 7 - 2, 7 - 3, 8 - 4, 8 - 5, 8 - 7, 9 - 2, 10 - 8, 11 - 2, 11 - 10, 13 - 2, 14 - 9, 15 - 2, 15 - 3, 17 - 15, 30 - 9, 3 - 2, 6 - 1, 6 - 2, 6 - 5, 8 - 6, 9 - 5, 10 - 4, 12 - 3, 14 - 4, 15 - 8, 15 - 11, 15 - 12, 15 - 13, 16 - 9
(4)	3 - 2, 6 - 1, 6 - 2, 6 - 5, 8 - 6, 9 - 5, 10 - 4, 12 - 3, 14 - 4, 15 - 8, 15 - 11, 15 - 12, 15 - 13, 16 - 9
(5)	4 - 2, 9 - 1, 11 - 6

ภาคผนวก ค. กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3 M20P5 M15P9 M30P10 M30P27

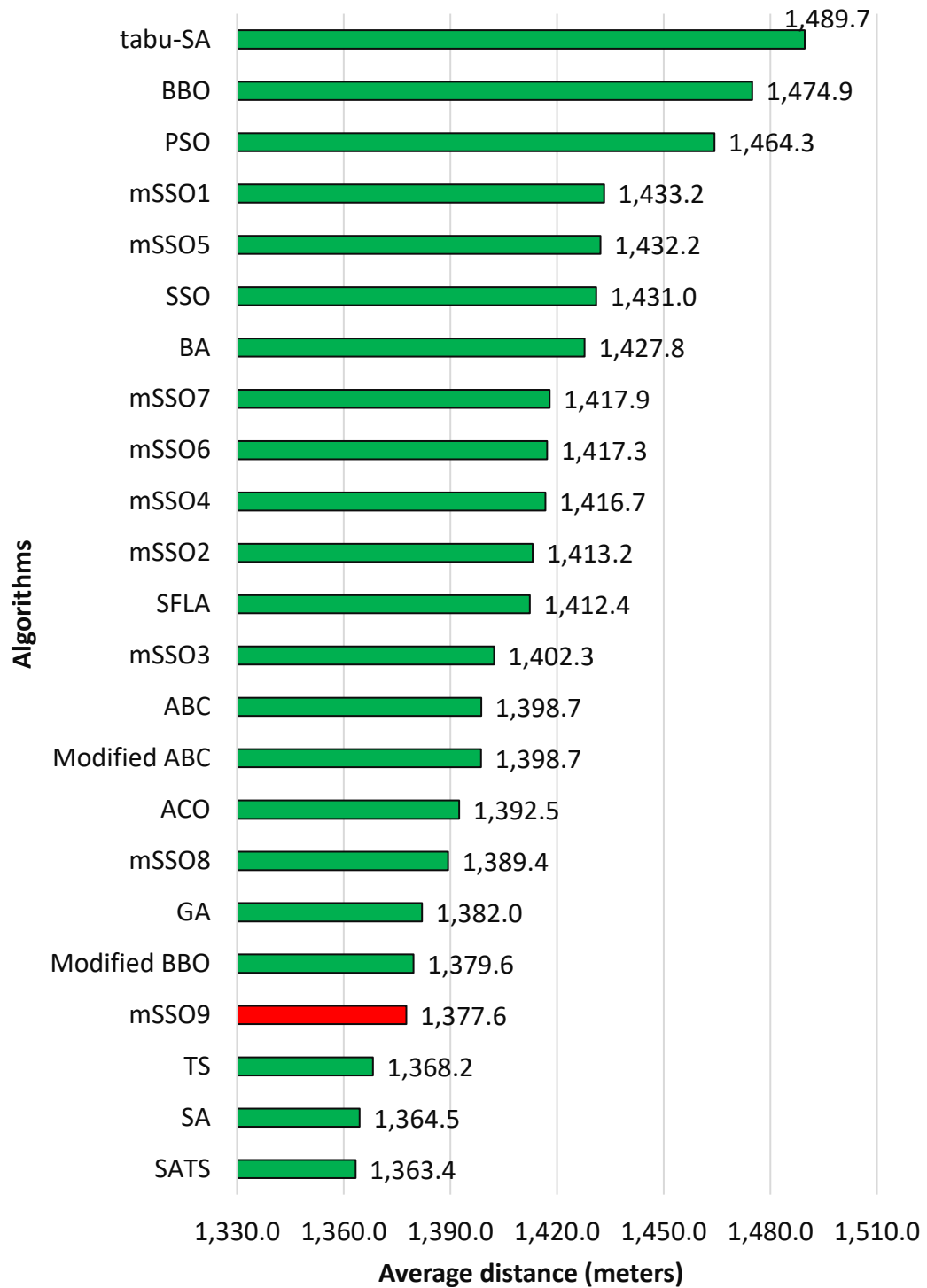
กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3



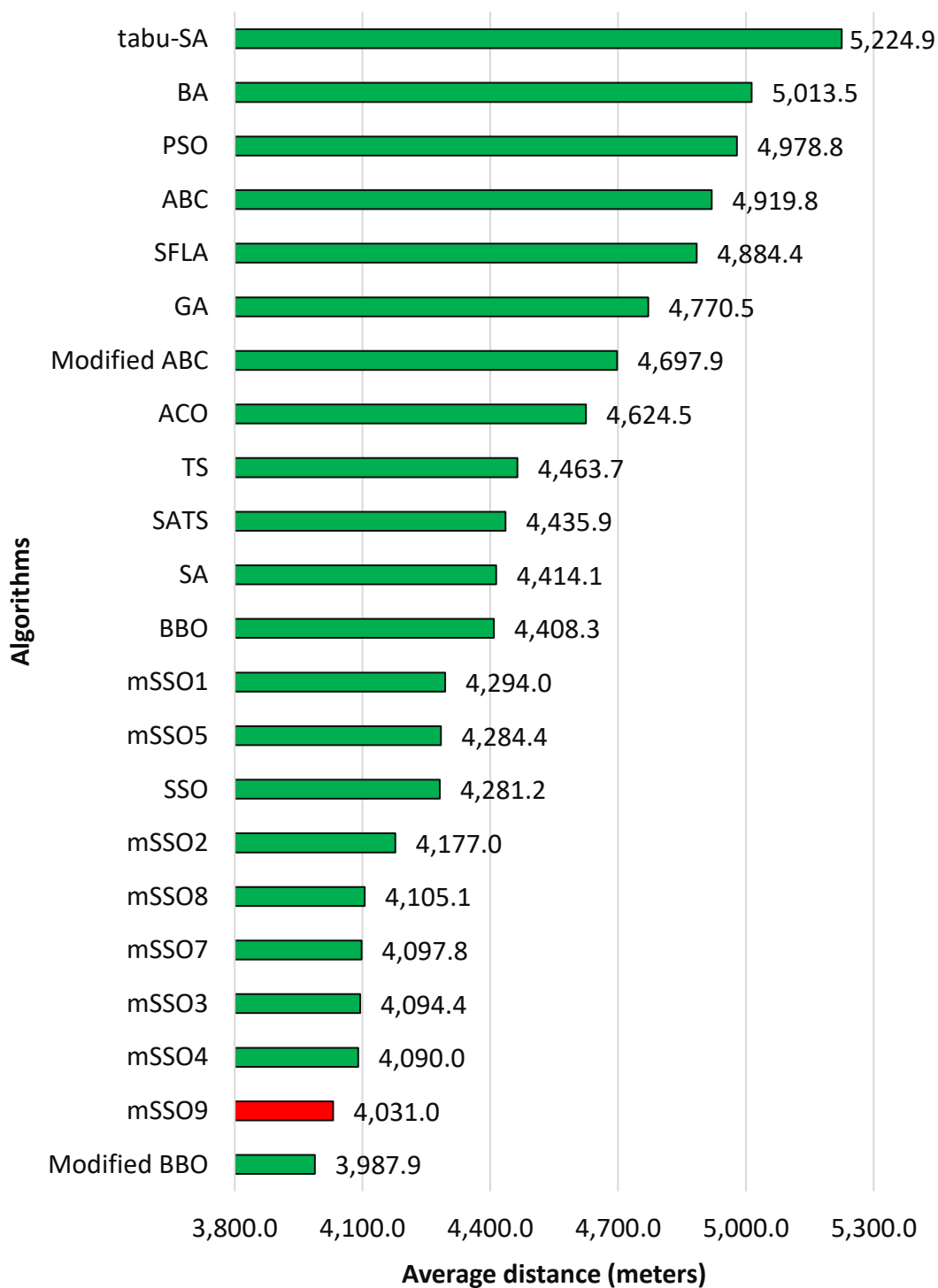
กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่นๆ ของชุดข้อมูล M20P5



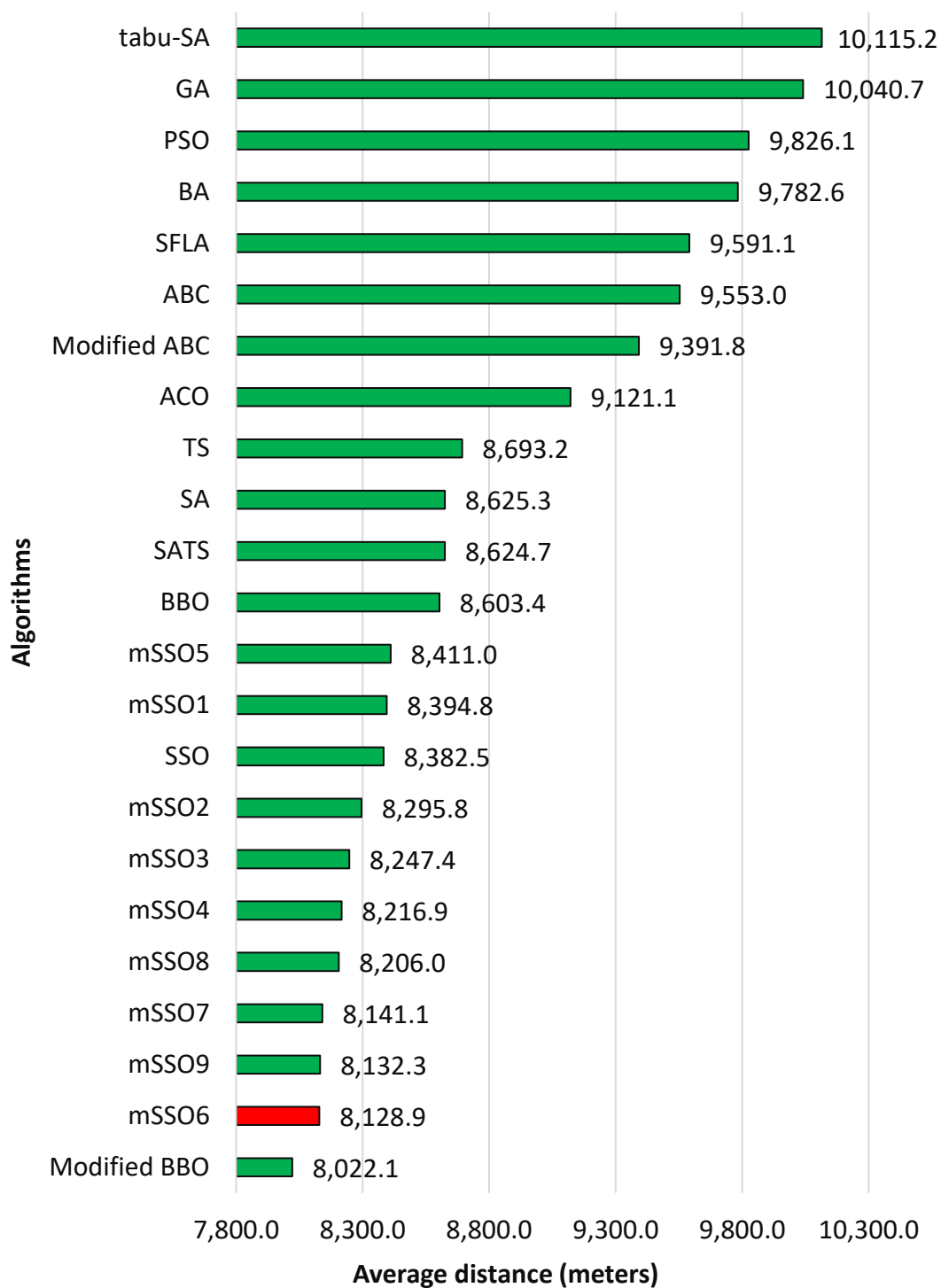
กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่นๆ ของชุดข้อมูล M15P9



กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P10

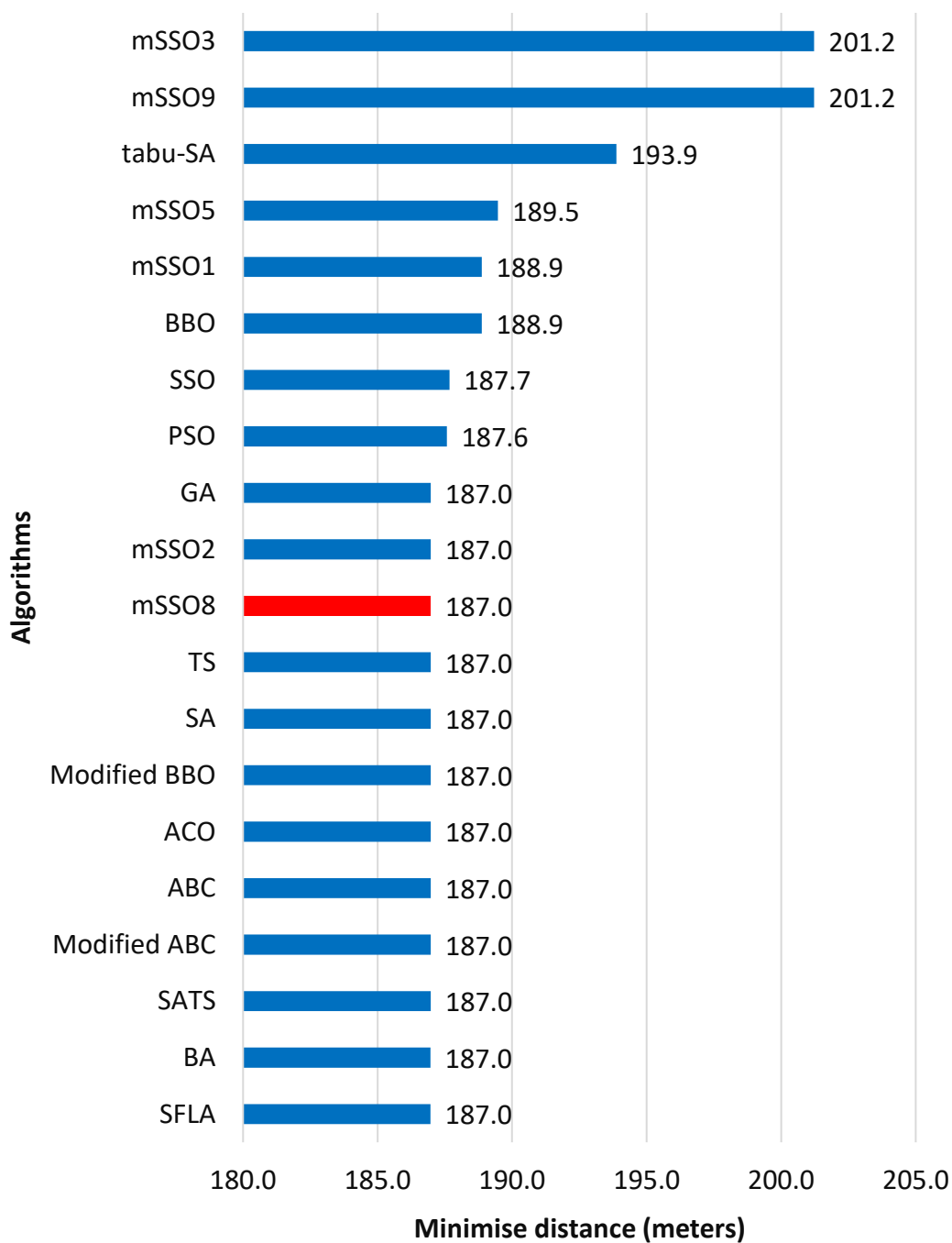


กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่นๆ ของชุดข้อมูล M30P27

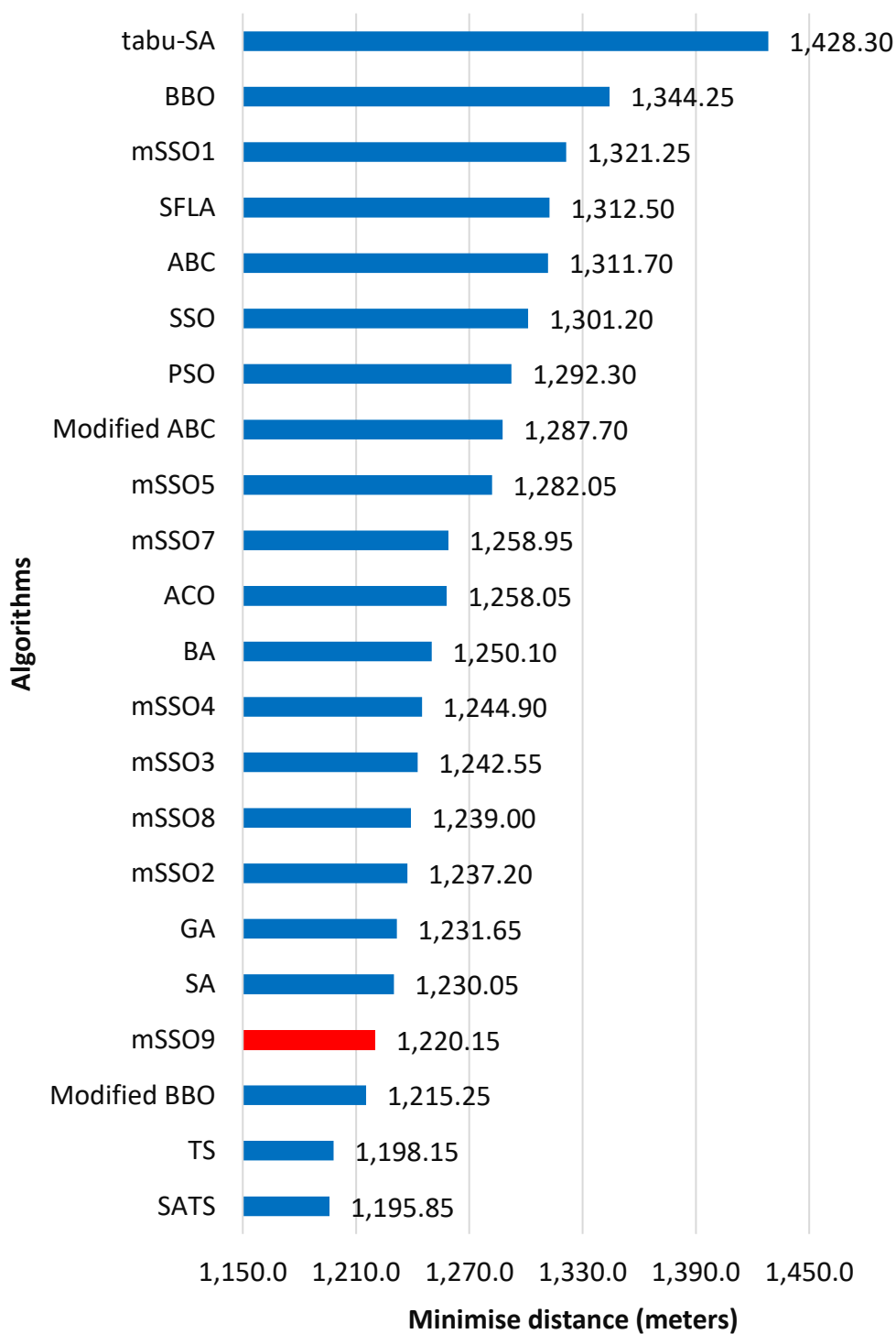


ภาคผนวก ง. กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO รูปแบบต่างๆ กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3 M20P5 M15P9 M30P10 M30P27

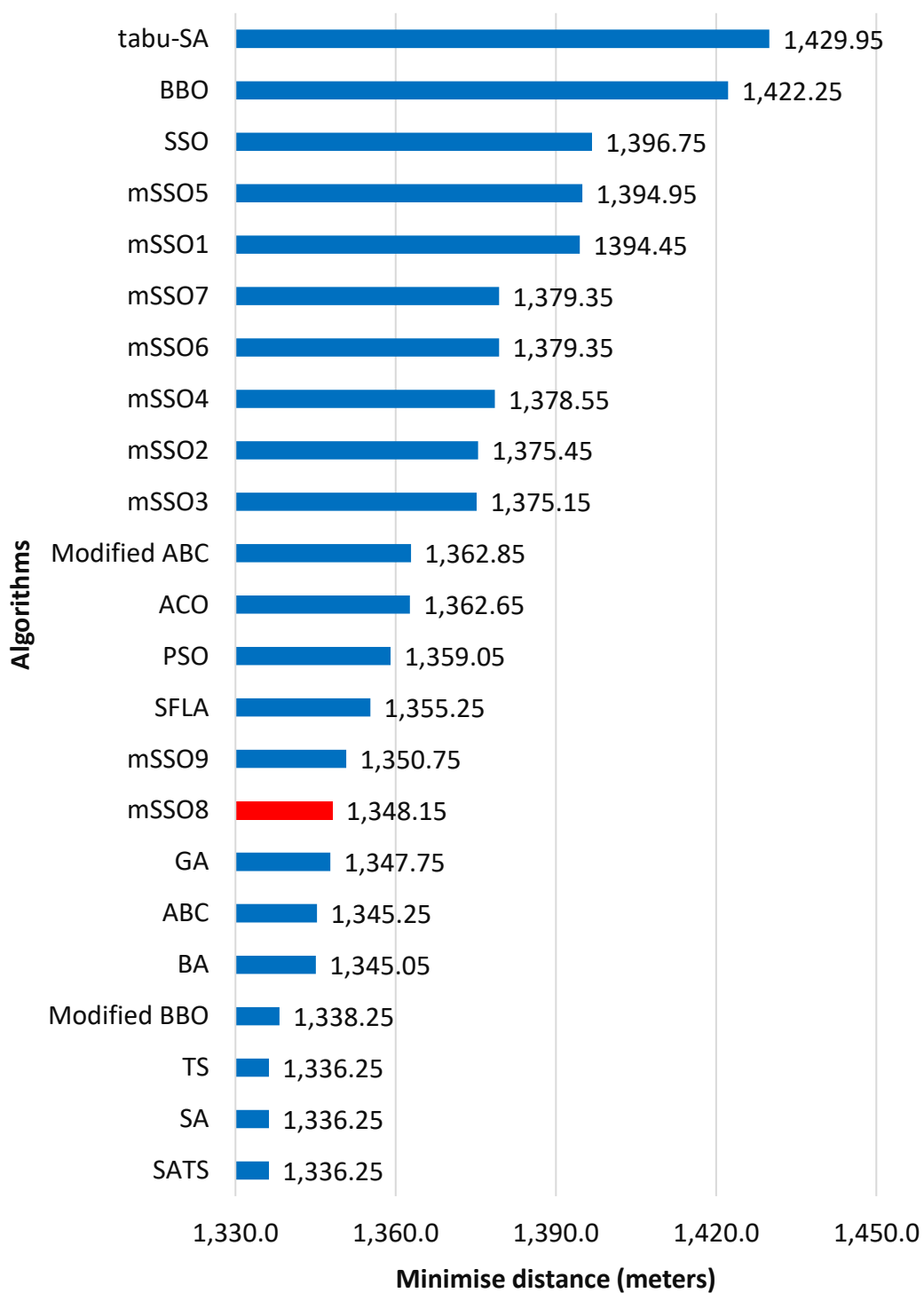
กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO, mSSOs กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M10P3



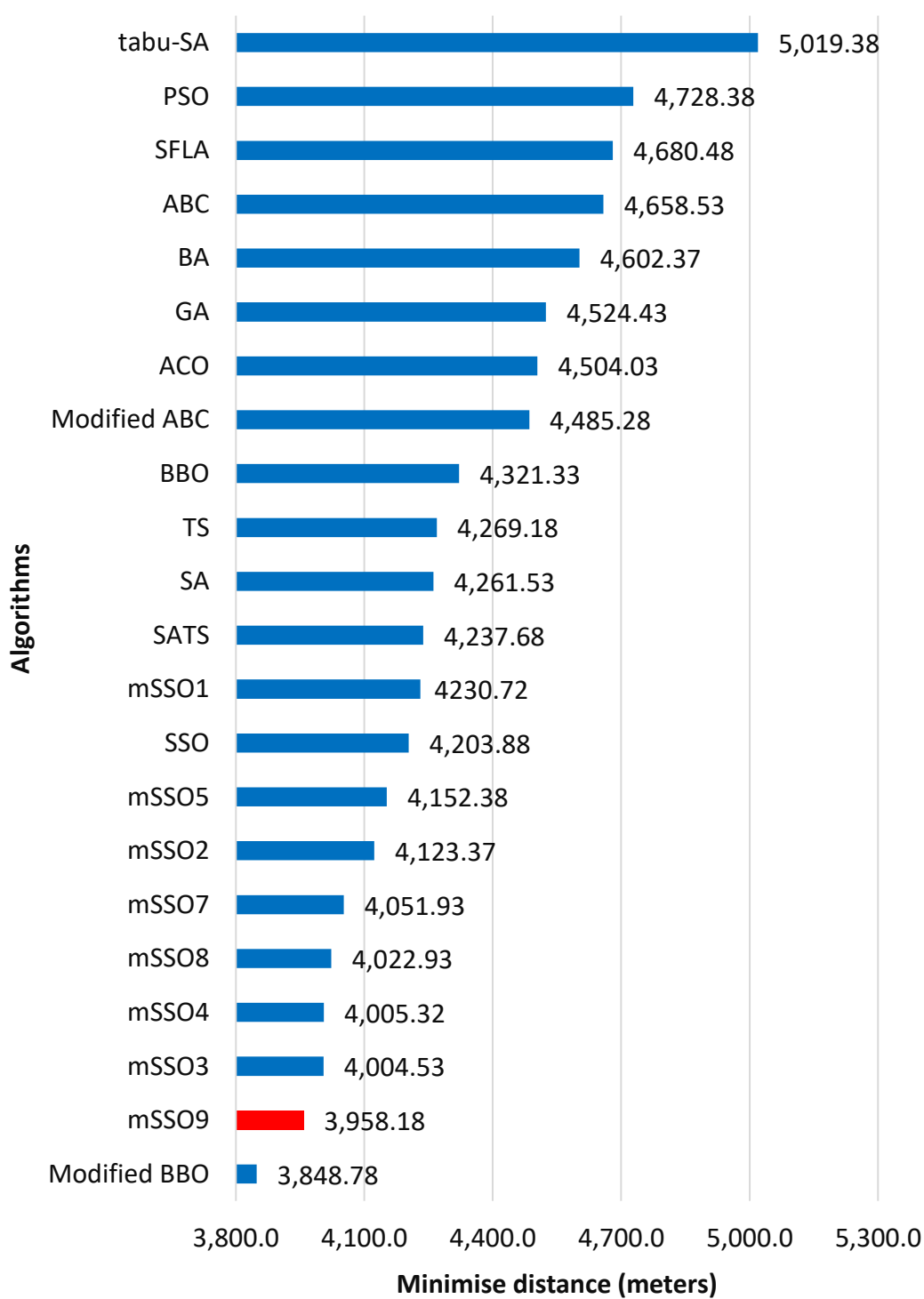
กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO, mSSOs กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M20P5



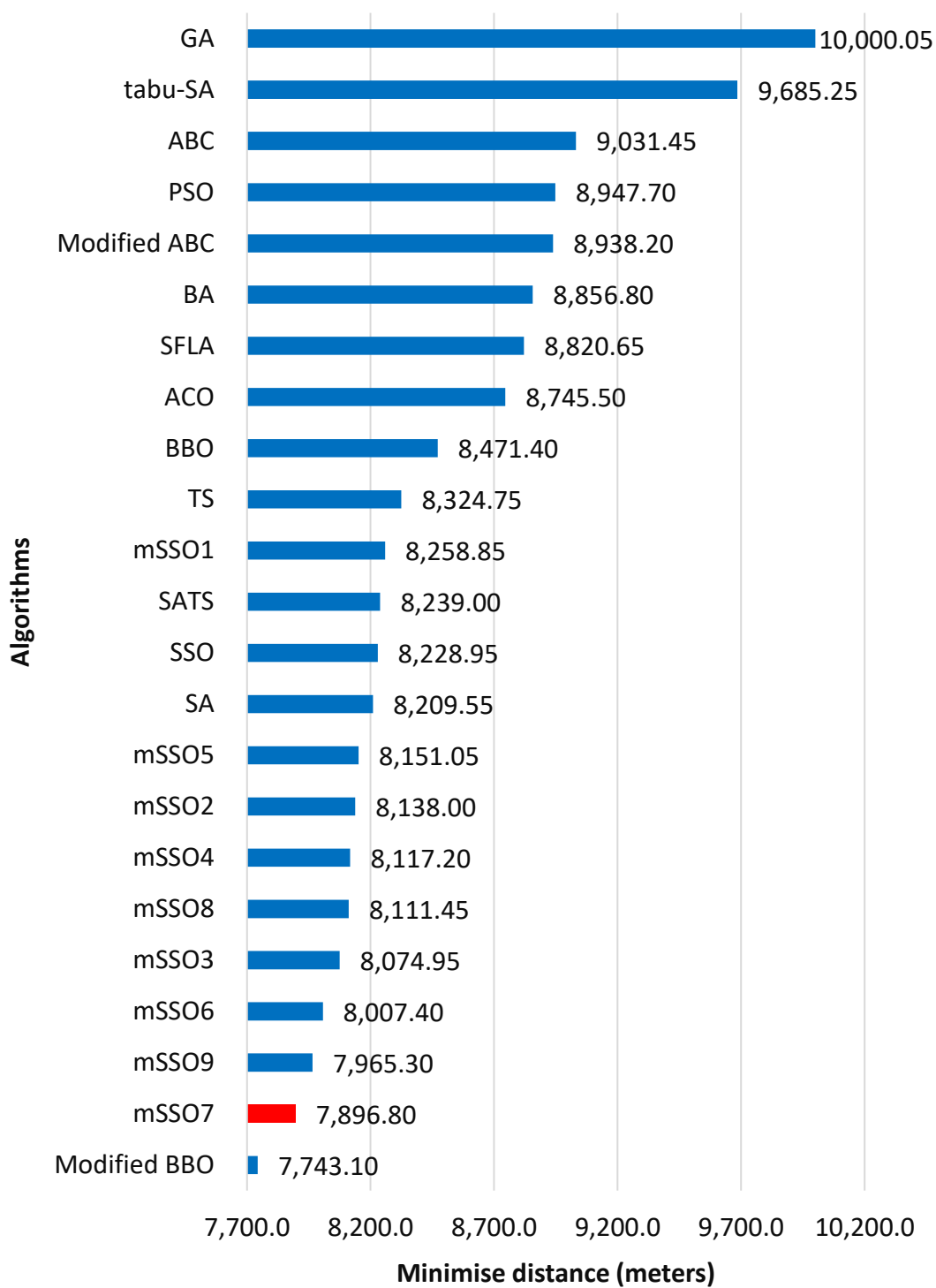
กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO, mSSOs กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M15P9



กราฟเปรียบเทียบผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO, mSSOs กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P10



กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยที่ต่ำที่สุดของวิธี SSO, mSSOs กับวิธีการอื่น ๆ ของชุดข้อมูล M30P27



ภาคผนวก จ. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ SSO และวิธีการอื่น ๆ ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่	ผู้แต่ง	วิธีการแก้ปัญหา	พารามิเตอร์
1.	พัชราภรณ์ อริยวงษ์ (2550)	วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)	- ขนาดของประชากร (Population size) - รอบการค้นหาค่า (Generation) - โอกาสกลายพันธุ์ (Mutation probability) - โอกาสผ่าเหล่า (Crossover probability)
2.	ณัฐพงศ์ คำ ขาด (2551)	การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO)	- ขนาดของประชากร (Number of particles) - รอบการค้นหาค่า (Iterations) - น้ำหนักแรงเฉื่อย (Inertia weight) - ค่าคงที่ของอัตราเร่ง C1, C2
3.	ธนภัทร เอี่ยม ตาล (2553)	วิธีสับเปลี่ยนการกระโดดของ กบ (Shuffled Frog Leaping Algorithm: SFLA)	- ขนาดของประชากร (Number of frogs) - รอบการค้นหาค่า (Number of iteration) - จำนวนประชากรย่อย (Number of sub population) - จำนวนรอบสูงสุดในการค้นหาเฉพาะพื้นที่ (Maximum iteration of local search for each sub population)
		วิธีการแบบมด (Ant Colony Optimisation: ACO)	- ขนาดของประชากร (Number of ants) - รอบการค้นหาค่า (Number of generations) - อัตราการระเหยของฟีโรโมน (Pheromone evaporation rate) - ค่าฟีโรโมน (Pheromone factor) - ค่าถ่วงน้ำหนักของข้อมูลที่มีเหตุผล (Heuristic data on decision)

ที่	ผู้แต่ง	วิธีการแก้ปัญหา	พารามิเตอร์
4.	พงศ์อมร วังตา (2554)	วิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu Search: TS)	- ขนาดของประชากร (Size of tabu lists) - รอบการค้นหาลำดับ (Number of iterations) - จำนวนคำตอบใกล้เคียง (Number of neighborhoods) - เกณฑ์ความปรารถนา (Aspiration Criteria)
		วิธีการอบอบจำลอง (Simulated Annealing: SA)	- วิธีการลดอุณหภูมิ (Cooling Schemes) - รอบการค้นหาลำดับ (Number of iterations) - อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature)
5.	พรพิมล สร้อย มาต (2554)	วิธีการหาคำตอบแบบฝูงผึ้งแบบปรับปรุง (Artificial Bee Colony: ABC)	- จำนวนประชากรผึ้ง (Number of bees) - จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ (Number of cycles) - ขีดจำกัดการตัดทิ้งกรณีผึ้งไม่พัฒนา (Number of limits)
6.	กิตติพงษ์ ดาพา (2555)	วิธีการหาคำตอบแบบค้างคาว (Bat Algorithm: BA)	- จำนวนประชากรค้างคาว (Number of bats) - จำนวนรุ่น (Number of generation) - ความดังของเสียง (Loudness) - คลื่นเสียง (Rate of pulse emission)
7.	สายสัมพันธ์ ชื่น เจริญ (2558)	วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimisation: BBO)	- ขนาดของระบบนิเวศ (Eco size) - รอบการวนซ้ำ (Iterations) - ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลง (Probability of modification) - อัตราการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติสูงสุด (Maximum mutation rate)
8.	งานวิจัยนี้	วิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Shark Smell Optimisation (SSO) algorithm)	- จำนวนประชากรฉลาม (Population Size) - รอบของการค้นหาลำดับ (Maximum Number of Stages) - อัตราส่วนจำกัดความเร็วของฉลาม (Velocity limiter ratio for stage) - ค่าบ่งชี้ความสามารถในการทำความเร็วของฉลาม (Velocity coefficient) - สัมประสิทธิ์ความเฉื่อย (Inertia coefficient)

บรรณานุกรม

- Abdel-Baset, M., Wu, H., Zhou, Y., & Abdel-Fatah, L. (2017). Elite opposition-flower pollination algorithm for quadratic assignment problem. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 33(2), 901-911. doi:10.3233/JIFS-162141
- Abedinia, O., & Amjady, N. (2015). Short-term wind power prediction based on Hybrid Neural Network and chaotic shark smell optimization. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 2(3), 245-254. doi:10.1007/s40684-015-0029-4
- Abedinia, O., Amjady, N., & Ghasemi, A. (2014). A new metaheuristic algorithm based on shark smell optimization. *Complexity*, 21(5), 97-116. doi:10.1002/cplx.21634
- Adeyeri, M. K., Ayodeji, S. P., & Adeleye, A. (2021). Modelling of Facility Layout Improvement and Breakeven Point Forecast for Plantain Flour Production. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(1), 1-6. doi:10.30880/ijie.2021.13.01.001
- Adinarayanan, A., Uthayakumar, M., & Prabhakaran, G. (2018). Machine cell formation using simulated annealing algorithm in cellular manufacturing system. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 10(1-2), 111-125. doi:10.1504/IJCAET.2018.088833
- Adinarayanan, A., Uthayakumar, M., Prabhakaran, G., & Anbumalar, V. (2017). Assignment of machines in cell layout using modified artificial bee colony algorithm. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 9(2), 166-178. doi:10.1504/IJCAET.2017.083390
- Agarwal, D., & Singholi, A. K. S. (2018). Performance analysis of a FLP problem using AHP-TOPSIS and FAHP-FTOPSIS. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 30(4), 401-424. doi:10.1504/IJISE.2018.096159
- Agarwal, S. K., & Yadav, S. (2020). Modified artificial bee colony algorithm for facility layout design problem. *World Review of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development*, 16(6), 624-647. doi:10.1504/WREMSD.2020.111398

- Ahamad, D., Alam Hameed, S., & Akhtar, M. (2020). A multi-objective privacy preservation model for cloud security using hybrid Jaya-based shark smell optimization. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. doi:10.1016/j.jksuci.2020.10.015
- Ahamdi-Javid, A., & Ramshe, N. (2019). Designing flexible loop-based material handling AGV paths with cell-adjacency priorities: an efficient cutting-plane algorithm. *4OR*, 17(4), 373-400. doi:10.1007/s10288-018-0383-5
- Ahmad, A. N. A., Fatin, N. A., Ahmad, M. F., Buyong, R., Mohamad, F. B., Bakri, A., & Rahim, M. (2018). *The effectiveness of conveyor layout affected production output using arena simulation software*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.
- Ahmadi-Javid, A., & Ardestani-Jaafari, A. (2021). The unequal area facility layout problem with shortest single-loop AGV path: how material handling method matters. *International Journal of Production Research*, 59(8), 2352-2374. doi:10.1080/00207543.2020.1733124
- Ahmadi, A., & Akbari Jokar, M. R. (2016). An efficient multiple-stage mathematical programming method for advanced single and multi-floor facility layout problems. *Applied Mathematical Modelling*, 40(9-10), 5605-5620. doi:10.1016/j.apm.2016.01.014
- Ahmadigorji, M., & Amjady, N. (2016). A multiyear DG-incorporated framework for expansion planning of distribution networks using binary chaotic shark smell optimization algorithm. *Energy*, 102, 199-215. doi:10.1016/j.energy.2016.02.088
- Ahmadigorji, M., Amjady, N., & Dehghan, S. (2017). A novel two-stage evolutionary optimization method for multiyear expansion planning of distribution systems in presence of distributed generation. *Applied Soft Computing Journal*, 52, 1098-1115. doi:10.1016/j.asoc.2016.09.020
- Ahmed, B. T., & Abdulhameed, O. Y. (2020). Fingerprint recognition based on shark smell optimization and genetic algorithm. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 6(2), 123-134. doi:10.26555/ijain.v6i2.502

- Akbilek, N. (2021). Safety-integrated single-row machine layout problem optimization using GA and TS with a novel heuristic rule support. *Soft Computing*, 25(21), 13533-13547. doi:10.1007/s00500-021-06031-6
- Akca, M., & Sahin, R. (2018). Multi objective mixed integer facility layout problem and application at military facility. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences-Pamukkale Universitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 117-123. doi:10.5505/pajes.2017.26928
- Al-Saleh, M. A., Mir, M., & Hassanin, A. (2015). *Comparison of enhanced constructive layout optimization technique with Tabu-search and Particle Swarm Optimization methodologies*. Paper presented at the IEOM 2015 - 5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Proceeding.
- Alduaij, A., & Hassan, N. M. (2020). Adopting a circular open-field layout in designing flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(6), 572-589. doi:10.1080/0951192X.2020.1775300
- Allahyari, M. Z., & Azab, A. (2015a). *Improved bi-level mathematical programming and heuristics for the cellular manufacturing facility layout problem*. Paper presented at the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2015.
- Allahyari, M. Z., & Azab, A. (2015b). *A novel bi-level continuous formulation for the cellular manufacturing system facility layout problem*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Allahyari, M. Z., & Azab, A. (2018). Mathematical modeling and multi-start search simulated annealing for unequal-area facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 91, 46-62. doi:10.1016/j.eswa.2017.07.049
- Altuntas, S., & Dereli, T. (2017). Application of an aggregation technique to facility layout design selection. *Journal of Thermal Engineering*, 3(1), 1078-1088. doi:10.18186/thermal.290266
- Amar, S. H., & Abouabdellah, A. (2017). *Facility layout planning problem: Effectiveness and reliability evaluation system layout designs*.

- Amar, S. H., Abouabdellah, A., & El Ouazzani, Y. (2018). Interactive facility layout problem: a bi-objective design. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing - Ijidem*, 12(1), 151-159. doi:10.1007/s12008-017-0387-y
- Amaral, A. R. S. (2019). A mixed-integer programming formulation for the double row layout of machines in manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 57(1), 34-47. doi:10.1080/00207543.2018.1457811
- Amaral, A. R. S. (2020). A heuristic approach for the double row layout problem. *Annals of Operations Research*. doi:10.1007/s10479-020-03617-5
- Amaral, A. R. S. (2021). A mixed-integer programming formulation of the double row layout problem based on a linear extension of a partial order. *Optimization Letters*, 15(4), 1407-1423. doi:10.1007/s11590-020-01651-7
- Amri, S. K., Darmoul, S., & Hajri-Gabouj, S. (2018). *An immune designed ontology to specify requirements and recommend layout solutions*.
- Andrada, M. F., & Biscocho, M. R. (2019). *A study on the facility layout and design of sugar plants in the Philippines*.
- Anjos, M. F., Fischer, A., & Hungerländer, P. (2018). Improved exact approaches for row layout problems with departments of equal length. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 514-529. doi:10.1016/j.ejor.2018.04.008
- Anjos, M. F., Hungerländer, P., & Maier, K. (2019). *An Integer Linear Programming Approach for the Combined Cell Layout Problem*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Anjos, M. F., & Vieira, M. V. C. (2016). An improved two-stage optimization-based framework for unequal-areas facility layout. *Optimization Letters*, 10(7), 1379-1392. doi:10.1007/s11590-016-1008-6
- Anjos, M. F., & Vieira, M. V. C. (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 261(1), 1-16. doi:10.1016/j.ejor.2017.01.049
- Anjos, M. F., & Vieira, M. V. C. (2021). Mathematical optimization approach for facility layout on several rows. *Optimization Letters*, 15(1), 9-23. doi:10.1007/s11590-020-

01621-z

- Anteneh, D., Khan, B., Mahela, O. P., Alhelou, H. H., & Guerrero, J. M. (2021). Distribution network reliability enhancement and power loss reduction by optimal network reconfiguration. *Computers and Electrical Engineering*, 96. doi:10.1016/j.compeleceng.2021.107518
- Anwit, R., Tomar, A., & Jana, P. K. (2020). Tour planning for multiple mobile sinks in wireless sensor networks: A shark smell optimization approach. *Applied Soft Computing Journal*, 97. doi:10.1016/j.asoc.2020.106802
- Arifiyanto, A., Cakravastia, A. R. A., & Priyatna Iskandar, B. (2020). *Multi-criteria spine layout design of a mixed production line considering additional processes required for a new product*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Arunyanart, S., & Pruekthaisong, S. (2018). *Selection of multi-criteria plant layout design by combining AHP and DEA methodologies*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Asef-Vaziri, A., Jahandideh, H., & Modarres, M. (2017). Loop-based facility layout design under flexible bay structures. *International Journal of Production Economics*, 193, 713-725. doi:10.1016/j.ijpe.2017.08.004
- Asl, A. D., & Wong, K. Y. (2015). *Solving unequal area static facility layout problems by using a modified genetic algorithm*. Paper presented at the Proceedings of the 2015 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2015.
- Atencio, F. N., & Rodado, D. N. (2016). A Sule's Method initiated genetic algorithm for solving QAP formulation in facility layout design: A real world application. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 84(2), 157-196.
- Attari, M. Y. N., Ala, A., Kolahi-Randji, S., & Jami, E. N. (2021). An integrated multi-objective mathematical programming and simulation model for a multi-layer facility location problem. *International Journal of Value Chain Management*, 12(3), 285-308. doi:10.1504/IJVC.2021.118292
- Ayough, A., & Khorshidvand, B. (2019). Designing a manufacturing cell system by

- assigning workforce. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(1), 13-26. doi:10.3926/jiem.2547
- Ayutthaya, J. P. N., Kriengkarakot, N. K. P., & Sriboonchandr, P. (2020). The Improved Differential Evolution Algorithm for Multi-Floor Facility Layout Problems. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(2), 626-635. doi:10.36478/JEASCI.2020.626.635
- Azadeh, A., Heydari, R., Yazdanparast, R., & Keramati, A. (2016). An integrated fuzzy simulation-mathematical programming approach for layout optimization by considering resilience engineering factors: a gas transmission unit. *World Journal of Engineering*, 13(6), 547-559. doi:10.1108/wje-09-2016-0089
- Azadeh, A., Jebreili, S., Chang, E., Saberi, M., & Hussain, O. K. (2017). An integrated fuzzy algorithm approach to factory floor design incorporating environmental quality and health impact. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 8, 2071-2082. doi:10.1007/s13198-014-0314-6
- Azadeh, A., Moghaddam, M., Nazari-Doust, B., & Jalalvand, F. (2015). Fuzzy and stochastic mathematical programming for optimisation of cell formation problems in random and uncertain states. *International Journal of Operational Research*, 22(2), 129-147. doi:10.1504/IJOR.2015.067341
- Azadeh, A., Moghaddam, M., Nazari, T., & Sheikhalishahi, M. (2016). Optimization of facility layout design with ambiguity by an efficient fuzzy multivariate approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1-4), 565-579. doi:10.1007/s00170-015-7714-x
- Azevedo, M. M., Crispim, J. A., & Pinho de Sousa, J. (2017). A dynamic multi-objective approach for the reconfigurable multi-facility layout problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 140-152. doi:10.1016/j.jmsy.2016.12.008
- Azevedo, M. M., Crispim, J. A., & Pinho de Sousa, J. (2019). *A dynamic multiobjective model for designing machine layouts*. Paper presented at the IFAC-PapersOnLine.
- Azimi, P., & Soofi, P. (2017). An ANN-based optimization model for facility layout problem using simulation technique. *Scientia Iranica*, 24(1), 364-377.

doi:10.24200/sci.2017.4040

- Bagheri, M., Sultanbek, A., Abedinia, O., Naderi, M. S., Naderi, M. S., & Ghadimi, N. (2018). *Multi-objective Shark Smell Optimization for Solving the Reactive Power Dispatch Problem*. Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018.
- Banduka, N., Mladineo, M., & Eric, M. (2017). Designing a layout using Schmigalla method combined with software tool vistable. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(3), 375-385. doi:10.2507/IJSIMM16(3)1.379
- Banduka, N., Peko, I., Crnjac, M., Bošnjak, I., & Duric, S. (2017). *Linear layout design using the software tool vistable*. Paper presented at the 15th International Industrial Simulation Conference 2017, ISC 2017.
- Banjarat, Y., Anucha, W., & Wiyaratn, W. (2019). *Plant layout design for improvement and eggs grading process*. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series.
- Bayram, H., & Şahin, R. (2016). A comprehensive mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design and Linear Programming embedded hybrid solution techniques. *Computers and Industrial Engineering*, 91, 10-29. doi:10.1016/j.cie.2015.10.014
- Behnia, B., Mahdavia, I., Shirazi, B., & Paydar, M. M. (2019). A bi-objective bi-level mathematical model for cellular manufacturing system applying evolutionary algorithms. *Scientia Iranica*, 26(4E), 2541-2560. doi:10.24200/sci.2018.5717.1440
- Belic, D., Kunica, Z., Opetuk, T., & Dukic, G. (2018). Optimization of the plant layout in the production of the special transformers - case study. *FME Transactions*, 46(2), 285-290. doi:10.5937/fmet1802285B
- Benderbal, H. H., & Benyoucef, L. (2019a). Machine layout design problem under product family evolution in reconfigurable manufacturing environment: a two-phase-based AMOSA approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1-4), 375-389. doi:10.1007/s00170-019-03865-1

- Benderbal, H. H., & Benyoucef, L. (2019b). A new hybrid approach for machine layout design under family product evolution for reconfigurable manufacturing systems. 52(13), 1379-1384. doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.391
- Benderbal, H. H., Dahane, M., & Benyoucef, L. (2018). *Exhaustive Search Based Heuristic for Solving Machine Layout Problem in Reconfigurable Manufacturing System Design*.
- Bensalem, S., Havelund, K., & Orlandini, A. (2014). Verification and validation meet planning and scheduling. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 16. doi:10.1007/s10009-013-0294-x
- Besbes, M., Affonso, R. C., Zolghadri, M., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2017). *Multi-criteria decision making for the selection of a performant manual workshop layout: a case study*.
- Besbes, M., Mahjoub, Y. I., Bonte, T., Berger, T., Sallez, Y., & Zolghadri, M. (2021). *Solving Facility Layout Problem with safety consideration of Reconfigurable Manufacturing and Assembly Systems*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Besbes, M., Zolghadri, M., & Affonso, R. C. (2021). *A method to solve 2D Facility Layout Problem with equipment inputs/outputs constraints using meta-heuristics algorithms*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Besbes, M., Zolghadri, M., Affonso, R. C., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2020). 3D facility layout problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-020-01603-z
- Besbes, M., Zolghadri, M., Costa Affonso, R., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2020). A methodology for solving facility layout problem considering barriers: genetic algorithm coupled with A* search. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(3), 615-640. doi:10.1007/s10845-019-01468-x
- Besbes, M., Zolghadri, M., Costa Affonso, R., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2021). 3D facility layout problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(4), 1065-1090. doi:10.1007/s10845-020-01603-z
- Blum, C., Puchinger, J., Raidl, G. R., & Roli, A. (2011). Hybrid metaheuristics in

- combinatorial optimization: A survey. *Applied Soft Computing*, 11(6), 4135-4151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.02.032>
- Boongsood, W., & Jadram, C. (2019). Effects of using fuzzy material handling inputs in the genetic algorithm for machine layout. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 4(4), 133-140. doi:10.25046/aj040416
- Bootaki, B., Mahdavi, I., & Paydar, M. M. (2015). New bi-objective robust design-based utilisation towards dynamic cell formation problem with fuzzy random demands. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(6), 577-592. doi:10.1080/0951192X.2014.880949
- Bortolini, M., Ferrari, E., Galizia, F. G., Mora, C., & Pilati, F. (2019). *Optimal redesign of cellular flexible and reconfigurable manufacturing systems*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Bozorg-Haddad, O. (2018). Advanced optimization by Nature-Inspired algorithms. *Studies in Computational Intelligence, Volume 720*.
- Bozorgi, N., Abedzadeh, M., & Zeinali, M. (2015). Tabu search heuristic for efficiency of dynamic facility layout problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1-4), 689-703. doi:10.1007/s00170-014-6460-9
- Budianto, F., Halim, J., & Christine Sembiring, A. (2020). *Redesigning Furniture Production Floors Using Systematic Layout Planning and ALDEP Method to Minimize Material Handling Costs*. Paper presented at the MECnIT 2020 - International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology.
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., Palumbo, M., & Salini, P. (2015). Safety-based process plant layout using genetic algorithm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 139-150. doi:10.1016/j.jlp.2015.01.021
- Chae, J., & Regan, A. C. (2020). A mixed integer programming model for a double row layout problem. *Computers and Industrial Engineering*, 140. doi:10.1016/j.cie.2019.106244
- Chaudhuri, B., Jana, R. K., Sharma, D. K., & Dan, P. K. (2019). A goal programming embedded genetic algorithm for multi-objective manufacturing cell design.

- International Journal of Applied Decision Sciences*, 12(1), 98-114.
doi:10.1504/IJADS.2019.096562
- Che, A., Zhang, Y., & Feng, J. (2017). Bi-objective optimization for multi-floor facility layout problem with fixed inner configuration and room adjacency constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 105, 265-276. doi:10.1016/j.cie.2016.12.018
- Chen, S., Gholami Farkoush, S., & Leto, S. (2020). Photovoltaic cells parameters extraction using variables reduction and improved shark optimization technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(16), 10059-10069. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.01.236
- Chen, T. J., Lee, Y. C., & Chiang, C. H. (2020). *Optimizing production layout and capacity via FlexSim-A case study of y factory*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Chen, T. L., Chen, J. C., Huang, C. F., & Chang, P. C. (2021). Solving the layout design problem by simulation-optimization approach—A case study on a sortation conveyor system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 106. doi:10.1016/j.simpat.2020.102192
- Chen, W. (2019). Optimization of production equipment layout based on fuzzy decision and evolutionary algorithm. *International Journal of Decision Support System Technology*, 11(3), 13-29. doi:10.4018/IJDSST.2019070102
- Chen, Y., Jiang, Y., Wahab, M. I. M., & Long, X. (2015). The facility layout problem in non-rectangular logistics parks with split lines. *Expert Systems with Applications*, 42(21), 7768-7780. doi:10.1016/j.eswa.2015.06.009
- Cheng Ying, Y., Ab-Samat, H., & Kamaruddin, S. (2016). Practical production layout design for multi-product and small-lot-size production: A case study. *Jurnal Teknologi*, 78(7), 161-175. doi:10.11113/jt.v78.2893
- Cheung, D. P., Nair, S. R., Salter, J., Robinson, C., & Wattis, Z. (2018). *Risk-based decision-making in offshore production facilities design using enhanced application of QRA*. Paper presented at the Global Congress on Process Safety 2018, GCPS 2018 - Topical Conference at the 2018 AIChE Spring Meeting and

14th Global Congress on Process Safety.

- Chip, W. T., Low, S. N., & Kamaruddin, S. (2016). Application of re-layout approach for cellular layout in manual assembly process. *International Journal of Services and Operations Management*, 24(2), 167-185. doi:10.1504/IJSOM.2016.076502
- Choi, M., Kim, S. H., & Chung, H. (2017). Optimal shipyard facility layout planning based on a genetic algorithm and stochastic growth algorithm. *Ships and Offshore Structures*, 12(4), 486-494. doi:10.1080/17445302.2016.1176294
- Cravo, G. L., & Amaral, A. R. S. (2019). A GRASP algorithm for solving large-scale single row facility layout problems. *Computers and Operations Research*, 106, 49-61. doi:10.1016/j.cor.2019.02.009
- Cuevas, F., Castillo, O., & Cortes-Antonio, P. (2021) Optimal design of interval type-2 fuzzy tracking controllers of mobile robots using a metaheuristic algorithm. *Vol. 915. Studies in Computational Intelligence* (pp. 315-341).
- Cuevas, F., Castillo, O., & Cortes-Antonio, P. (2022) Dynamic Optimal Parameter Setting with Fuzzy Argument to Metaheuristic Algorithm Variant for Fuzzy Tracking Controllers. *Vol. 307. International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems, INFUS 2021* (pp. 528-536).
- Cuevas, F., Castillo, O., & Cortes, P. (2021). Optimal Setting of Membership Functions for Interval Type-2 Fuzzy Tracking Controllers Using a Shark Smell Metaheuristic Algorithm. *International Journal of Fuzzy Systems*. doi:10.1007/s40815-021-01136-4
- Dahlbeck, M. (2021). A mixed-integer linear programming approach for the T-row and the multi-bay facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 295(2), 443-462. doi:10.1016/j.ejor.2021.02.044
- Dahlbeck, M., Fischer, A., & Fischer, F. (2020). Decorous combinatorial lower bounds for row layout problems. *European Journal of Operational Research*, 286(3), 929-944. doi:10.1016/j.ejor.2020.04.010
- Deep, K., & Singh, P. K. (2015). Design of robust cellular manufacturing system for dynamic part population considering multiple processing routes using genetic

- algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 155-163. doi:10.1016/j.jmsy.2014.09.008
- Defersha, F. M., & Hodiya, A. (2017). A mathematical model and a parallel multiple search path simulated annealing for an integrated distributed layout design and machine cell formation. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 195-212. doi:10.1016/j.jmsy.2017.04.001
- Deng, W., Zhang, M., He, K., Wang, L., Lin, J., & Zhong, Y. (2021). *A Mixed-coding Harmony Search Algorithm for the Closed Loop Layout Problem*. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series.
- Derakhshan Asl, A., Wong, K. Y., & Tiwari, M. K. (2016). Unequal-area stochastic facility layout problems: Solutions using improved covariance matrix adaptation evolution strategy, particle swarm optimisation, and genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 54(3), 799-823. doi:10.1080/00207543.2015.1070217
- Derakhshan Asl, A., & Wong, K. Y. (2017). Solving unequal-area static and dynamic facility layout problems using modified particle swarm optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1317-1336. doi:10.1007/s10845-015-1053-5
- Di Bari, G., Baiocchi, M., & Santucci, V. (2020). *An experimental evaluation of the algebraic differential evolution algorithm on the single row facility layout problem*. Paper presented at the GECCO 2020 Companion - Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion.
- Dira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255-267. doi:10.1016/j.arcontrol.2007.04.001
- Dudi, B., & Rajesh, V. (2021). Optimized threshold-based convolutional neural network for plant leaf classification: a challenge towards untrained data. *Journal of Combinatorial Optimization*. doi:10.1007/s10878-021-00770-w
- Durmuglu, Z. D. U. (2018). A TOPSIS-based approach for sustainable layout design: activity relation chart evaluation. *Kybernetes*, 47(10), 2012-2024. doi:10.1108/K-02-2018-0056
- Egilmez, G., Erenay, B., & Süer, G. A. (2019). Hybrid cellular manufacturing system design

- with cellularisation ratio: An integrated mixed integer nonlinear programming and discrete event simulation approach. *International Journal of Services and Operations Management*, 32(1), 1-24. doi:10.1504/IJSOM.2019.097036
- Egilmez, G., Singh, S., & Ozguner, O. (2017). Cell formation in a cellular manufacturing system under uncertain demand and processing times: A stochastic genetic algorithm approach. *International Journal of Services and Operations Management*, 26(2), 162-185. doi:10.1504/IJSOM.2017.081489
- Ejeh, J. O., Liu, S., Chalchooghi, M. M., & Papageorgiou, L. G. (2018). Optimization-Based Approach for Process Plant Layout. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 57(31), 10482-10490. doi:10.1021/acs.iecr.8b00260
- Elkassas, A. M., & Elwakil, M. (2019). *Facility layout problem using salp swarm algorithm*. Paper presented at the 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019.
- Erik, A., & Kuvvetli, Y. (2021). Integration of material handling devices assignment and facility layout problems. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 59-74. doi:10.1016/j.jmsy.2020.11.015
- Eronen, V. P., Kronqvist, J., Westerlund, T., Mäkelä, M. M., & Karmita, N. (2017). Method for solving generalized convex nonsmooth mixed-integer nonlinear programming problems. *Journal of Global Optimization*, 69(2), 443-459. doi:10.1007/s10898-017-0528-7
- Erozan, i., Torkul, O., & Ustun, O. (2015). Proposal of a nonlinear multi-objective genetic algorithm using conic scalarization to the design of cellular manufacturing systems. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(1), 30-57. doi:10.1007/s10696-014-9194-y
- Eschemann, P., Krauskopf, J. E., Sauer, J., & Zernickel, J. S. (2021). *Optimizing factory layouts with supervised genetic algorithm*. Paper presented at the 35th Annual European Simulation and Modelling Conference 2021, ESM 2021.
- Esmailnezhad, B., Fattahi, P., & Kheirkhah, A. S. (2015). A stochastic model for the cell formation problem considering machine reliability. *Journal of Industrial*

- Engineering International*, 11(3), 375-389. doi:10.1007/s40092-015-0108-8
- Fahad, M., Naqvi, S. A. A., Atir, M., Zubair, M., & Shehzad, M. M. (2017). Energy Management in a Manufacturing Industry through Layout Design. *Procedia Manufacturing*, 8, 168-174. doi:10.1016/j.promfg.2017.02.020
- Fawzi, M., El-Fergany, A. A., & Hasanien, H. M. (2019). Effective methodology based on neural network optimizer for extracting model parameters of PEM fuel cells. *International Journal of Energy Research*, 43(14), 8136-8147. doi:10.1002/er.4809
- Febriandini, I. F., & Yuniaristanto. (2019). *Re-design Facility Layout using Systematic Layout Planning Method: A Case Study : ro Cosmeceutical Sdn. Bhd.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Felecia, Halim, S., & Wulandari, D. (2018). *Library facility layout design for digital native generation.* Paper presented at the 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM).
- Femila, L. (2021). HSORS: A Highly Secure and Optimal Route Selection Protocol to Mitigate Against Packet Drop Attack in Wireless Ad-Hoc Sensor Network. *Wireless Personal Communications*, 121(4), 3403-3424. doi:10.1007/s11277-021-08884-4
- Feng, H., Xi, L., Xia, T., & Pan, E. (2018). Concurrent cell formation and layout design based on hybrid approaches. *Applied Soft Computing Journal*, 66, 346-359. doi:10.1016/j.asoc.2018.02.021
- Feng, J., & Che, A. (2018). Novel integer linear programming models for the facility layout problem with fixed-size rectangular departments. *Computers and Operations Research*, 95, 163-171. doi:10.1016/j.cor.2018.03.013
- Fischer, A., Fischer, F., & Hungerländer, P. (2019). New exact approaches to row layout problems. *Mathematical Programming Computation*, 11(4), 703-754. doi:10.1007/s12532-019-00162-6
- Forghani, K., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2019). A queuing theory-based approach to designing cellular manufacturing systems. *Scientia Iranica*, 26(3E), 1865-1880. doi:10.24200/sci.2018.5020.1047
- Forghani, K., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Kia, R. (2020). Solving an integrated cell formation

- and group layout problem using a simulated annealing enhanced by linear programming. *Soft Computing*, 24(15), 11621-11639. doi:10.1007/s00500-019-04626-8
- Forghani, K., Mohammadi, M., & Ghezavati, V. (2015). Integrated cell formation and layout problem considering multi-row machine arrangement and continuous cell layout with aisle distance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 687-705. doi:10.1007/s00170-014-6652-3
- Fouladi, E., & Mojallali, H. (2018). Design of optimised backstepping controller for the synchronisation of chaotic Colpitts oscillator using shark smell algorithm. *Pramana - Journal of Physics*, 90(1). doi:10.1007/s12043-017-1504-y
- Friedrich, C., Klausnitzer, A., & Lasch, R. (2018). Integrated slicing tree approach for solving the facility layout problem with input and output locations based on contour distance. *European Journal of Operational Research*, 270(3), 837-851. doi:10.1016/j.ejor.2018.01.001
- García-Hernández, L., Arauzo-Azofra, A., Salas-Morera, L., Pierreval, H., & Corchado, E. (2015). Facility layout design using a multi-objective interactive genetic algorithm to support the DM. *Expert Systems*, 32(1), 94-107. doi:10.1111/exsy.12064
- Garcia-Hernandez, L., Garcia-Hernandez, J. A., Salas-Morera, L., Carmona-Muñoz, C., Alghamdi, N. S., de Oliveira, J. V., & Salcedo-Sanz, S. (2020). Addressing Unequal Area Facility Layout Problems with the Coral Reef Optimization algorithm with Substrate Layers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 93. doi:10.1016/j.engappai.2020.103697
- García-Hernández, L., Palomo-Romero, J. M., Salas-Morera, L., Arauzo-Azofra, A., & Pierreval, H. (2015). A novel hybrid evolutionary approach for capturing decision maker knowledge into the unequal area facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 42(10), 4697-4708. doi:10.1016/j.eswa.2015.01.037
- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Carmona-Munoz, C., Abraham, A., & Salcedo-Sanz, S. (2020). A Hybrid Coral Reefs Optimization-Variable Neighborhood Search Approach for the Unequal Area Facility Layout Problem. *IEEE Access*, 8, 134042-

134050. doi:10.1109/ACCESS.2020.3010577

- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Carmona-Muñoz, C., Abraham, A., & Salcedo-Sanz, S. (2020). A novel multi-objective Interactive Coral Reefs Optimization algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 55. doi:10.1016/j.swevo.2020.100688
- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Carmona-Muñoz, C., Garcia-Hernandez, J. A., & Salcedo-Sanz, S. (2020). A novel Island Model based on Coral Reefs Optimization algorithm for solving the unequal area facility layout problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89. doi:10.1016/j.engappai.2019.103445
- Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Garcia-Hernandez, J. A., Salcedo-Sanz, S., & Valente de Oliveira, J. (2019). Applying the coral reefs optimization algorithm for solving unequal area facility layout problems. *Expert Systems with Applications*, 138. doi:10.1016/j.eswa.2019.07.036
- Garcia, E. F., Zúñiga, E. R., Bruch, J., Moris, M. U., & Syberfeldt, A. (2018). *Simulation-based Optimization for Facility Layout Design in Conditions of High Uncertainty*. Paper presented at the 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Ghani, M. A., Jali, M. B., & Zulkifli, N. A. (2019). Confusion in Design and Facilities of Layout Plan: GMP Requirements. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(10), 3277-3282. doi:10.36478/JEASCI.2019.3277.3282
- Ghassemi Tari, F., & Ahadi, K. (2019). Cellular layout design using Tabu search, a case study. *RAIRO - Operations Research*, 53(5), 1475-1488. doi:10.1051/ro/2018077
- Ghassemi Tari, F., & Neghabi, H. (2015). A new linear adjacency approach for facility layout problem with unequal area departments. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 93-103. doi:10.1016/j.jmsy.2015.09.003
- Ghezavati, V. R. (2015). Designing integrated cellular manufacturing systems with tactical decisions. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, 38(3), 332-341. doi:10.1080/02533839.2014.970350
- Ghosh, T., Doloi, B., & Dan, P. K. (2016a). Applying soft-computing techniques in solving

- dynamic multi-objective layout problems in cellular manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(1-4), 237-257. doi:10.1007/s00170-015-8070-6
- Ghosh, T., Doloi, B., & Dan, P. K. (2016b). An Immune Genetic algorithm for inter-cell layout problem in cellular manufacturing system. *Production Engineering*, 10(2), 157-174. doi:10.1007/s11740-015-0645-4
- Gnanasekaran, N., Chandramohan, S., Kumar, P. S., & Mohamed Imran, A. (2016). Optimal placement of capacitors in radial distribution system using shark smell optimization algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 7(2), 907-916. doi:10.1016/j.asej.2016.01.006
- Golmohammadi, A. M., Asadi, A., Amiri, Z. A., & Behzad, M. (2018). Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands. *Management Science Letters*, 8(11), 1133-1148. doi:10.5267/j.msl.2018.8.010
- Golmohammadi, A. M., Bani-Asadi, H., Esmaeeli, H., Hadian, H., & Bagheri, F. (2016). Facility layout for cellular manufacturing system under dynamic conditions. *Decision Science Letters*, 5(3), 407-416. doi:10.5267/j.dsl.2016.2.001
- Golmohammadi, A. M., Honarvar, M., Hosseini-Nasab, H., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). A bi-objective Optimization Model for a Dynamic Cell Formation Integrated with Machine and Cell Layouts in a Fuzzy Environment. *Fuzzy Information and Engineering*, 12(2), 204-222. doi:10.1080/16168658.2020.1747162
- Golmohammadi, A. M., Honarvar, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Hosseini-Nasab, H. (2021). A novel cell layout problem with reliability and stochastic failures. *International Journal of Supply and Operations Management*, 8(2), 165-175. doi:10.22034/IJSOM.2021.2.4
- Gonçalves, J. F., & Resende, M. G. C. (2015). A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 246(1), 86-107. doi:10.1016/j.ejor.2015.04.029
- Gothwal, S., & Raj, T. (2018). Optimisation of AGVs path layout in flexible manufacturing system using 0-1 linear integer programming. *International Journal of Process*

- Management and Benchmarking*, 8(2), 182-205. doi:10.1504/ijpmb.2018.090796
- Goyal, G., & Verma, D. S. (2019). Optimization of plant layout in manufacturing industry. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 3115-3118. doi:10.35940/ijrte.B2679.078219
- Grobelny, J., & Michalski, R. (2017). A novel version of simulated annealing based on linguistic patterns for solving facility layout problems. *Knowledge-Based Systems*, 124, 55-69. doi:10.1016/j.knosys.2017.03.001
- Guan, C., Zhang, Z., & Liu, S. (2019). *An Exact Formulation for Multi-Workshop Facility Layout Problem with Clearance Bounds*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Guan, C., Zhang, Z., Liu, S., & Gong, J. (2019). Multi-objective particle swarm optimization for multi-workshop facility layout problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 32-48. doi:10.1016/j.jmsy.2019.09.004
- Guan, J., & Lin, G. (2016). A multi-start local search algorithm for the single row facility layout problem. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 12(3), 859-874.
- Gülşen, M., Murray, C. C., & Smith, A. E. (2019). Double-row facility layout with replicate machines and split flows. *Computers and Operations Research*, 108, 20-32. doi:10.1016/j.cor.2019.03.009
- Guo, H., Zhu, Y., Zhang, Y., Ren, Y., Chen, M., & Zhang, R. (2021). A digital twin-based layout optimization method for discrete manufacturing workshop. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-020-06568-0
- Haddou-Benderbal, H., Dahane, M., & Benyoucef, L. (2017). *Layout evolution effort for product family in Reconfigurable Manufacturing System design*. Paper presented at the IFAC-PapersOnLine.
- Haddou Amar, S., Abouabdellah, A., & El Ouazzani, Y. (2018). Interactive facility layout problem: a bi-objective design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 12(1), 151-159. doi:10.1007/s12008-017-0387-y
- Haddou Benderbal, H., & Benyoucef, L. (2019). Machine layout design problem under

- product family evolution in reconfigurable manufacturing environment: a two-phase-based AMOSA approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1-4), 375-389. doi:10.1007/s00170-019-03865-1
- Hajipour, V., Fattahi, P., Tavana, M., & Di Caprio, D. (2016). Multi-objective multi-layer congested facility location-allocation problem optimization with Pareto-based meta-heuristics. *Applied Mathematical Modelling*, 40(7-8), 4948-4969. doi:10.1016/j.apm.2015.12.013
- Han, W., Li, D., Yu, D., & Ebrahimian, H. (2019). Optimal parameters of PEM fuel cells using chaotic binary shark smell optimizer. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. doi:10.1080/15567036.2019.1676845
- Hao, X., & Qi, M. (2018). *Solving Unequal-Area Facility Layout Problems with Orbits in Fully Automatic System*. Paper presented at the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering.
- Hasani, A., Soltani, R., & Eskandarpour, M. (2015). A hybrid meta-heuristic for the dynamic layout problem with transportation system design. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 28(8), 1215-1222.
- Hasda, R. K., Bhattacharjya, R. K., & Bennis, F. (2017). Modified genetic algorithms for solving facility layout problems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(3), 713-725. doi:10.1007/s12008-016-0362-z
- Hassan, F. H., Ibrahim, N., Kit, H. W., & Abdullah, R. (2017). *Incorporating genetic algorithm operators in optimization spatial layout design*. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series.
- Herrán, A., Manuel Colmenar, J., & Duarte, A. (2021). An efficient variable neighborhood search for the Space-Free Multi-Row Facility Layout problem. *European Journal of Operational Research*, 295(3), 893-907. doi:10.1016/j.ejor.2021.03.027
- Hosseini, S. S., Azimi, P., Sharifi, M., & Zandieh, M. (2021). A new soft computing algorithm based on cloud theory for dynamic facility layout problem. *RAIRO - Operations Research*, 55, S2433-S2453. doi:10.1051/ro/2020127
- Hosseini, S. S., & Seifbarghy, M. (2016). A novel meta-heuristic algorithm for multi-

- objective dynamic facility layout problem. *RAIRO - Operations Research*, 50(4-5), 869-890. doi:10.1051/ro/2016057
- Hosseinzadeh, H. (2020). Automated skin lesion division utilizing Gabor filters based on shark smell optimizing method. *Evolving Systems*. doi:10.1007/s12530-018-9258-4
- Hottenrott, A., & Grunow, M. (2019). Flexible layouts for the mixed-model assembly of heterogeneous vehicles. *OR Spectrum*, 41(4), 943-979. doi:10.1007/s00291-019-00556-x
- Hou, S., Wen, H., Feng, S., Wang, H., & Li, Z. (2019). Application of layered coding genetic algorithm in optimization of unequal area production facilities layout. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019. doi:10.1155/2019/3650923
- Hou, S. W., Li, Z., & Wang, H. (2016). A Fast Algorithm to Generate Feasible Solution of Production Facilities Layout Based on Plane Segmentation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. doi:10.1155/2016/1712376
- Houshyar, A. N., Leman, Z. B., Ariffin, M. K. A. M., Ismail, N., Moghadam, H. P., & Iranmanesh, H. (2016). Proposed linear-mathematical model for configuring cell and designing unequal-area facility layout in dynamic cellular manufacturing system. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 22(3), 332-357. doi:10.1504/IJISE.2016.074710
- Hu, B., & Yang, B. (2019). A particle swarm optimization algorithm for multi-row facility layout problem in semiconductor fabrication. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(8), 3201-3210. doi:10.1007/s12652-018-1037-3
- Hu, C. K., Liu, F. B., & Hu, C. F. (2017). A hybrid fuzzy DEA/AHP methodology for ranking units in a fuzzy environment. *Symmetry*, 9(11). doi:10.3390/sym9110273
- Hu, M. (2017). A high-fidelity three-dimensional simulation method for evaluating passenger flow organization and facility layout at metro stations. *Simulation*, 93(10), 841-851. doi:10.1177/0037549717715107
- Hu, X., Xu, H., Xu, J., Tong, S., Yu, Y., & Wei, H. (2018, 25-27 May 2018). A Novel Workshop Layout Optimization Algorithm Based on SA-PSO. Paper presented at the 2018 2nd IEEE Advanced Information Management,Communicates,Electronic

and Automation Control Conference (IMCEC).

- Huang, C., & Wong, C. K. (2017). Discretized Cell Modeling for Optimal Facility Layout Plans of Unequal and Irregular Facilities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(1). doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001206
- Huang, J., Huang, H., Guang, X., Li, R., & Zhu, J. (2018). Bi-level programming model to solve facility configuration and layout problems in railway stations. *Engineering Letters*, 26(3), 364-371.
- Huang, L. P. (2022). Combination of model-predictive control with an Elman neural for optimization of energy in office buildings. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. doi:10.1007/s41939-021-00111-8
- Huang, Z., Liu, Y., Du, L., & Yang, H. (2020). Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(10), 4295-4305. doi:10.1007/s12206-020-0920-y
- Huang, Z., Liu, Y. C., Liao, R. J., & Cao, X. J. (2021). Thermal Error Modeling of Numerical Control Machine Tools Based on Neural Network Neural Network by Optimized SSO Algorithm. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, 42(11), 1569-1578. doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2021.11.008
- Huawei, C., Guoping, L., Haining, T., Aimin, W., & Ruxin, N. (2016). Layout adjustment of cellular production line based on material logistic analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8), 1409-1420. doi:10.1007/s00170-013-4784-5
- Huchette, J., Dey, S. S., & Vielma, J. P. (2018). Strong mixed-integer formulations for the floor layout problem. *INFOR*, 56(4), 364-405. doi:10.1080/03155986.2017.1346916
- Hunagund, I. B., Pillai, V. M., & Kempaiah, U. N. (2018). A simulated annealing algorithm for unequal area dynamic facility layout problems with flexible bay structure. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(3), 307-330. doi:10.5267/j.ijiec.2017.8.004
- Hunagund, I. B., Pillai, V. M., & Kempaiah, U. N. (2020). Design of robust layout for unequal area dynamic facility layout problems with flexible bays structure. *Journal*

- of Facilities Management*, 18(4), 361-392. doi:10.1108/JFM-04-2020-0028
- Hungerländer, P., & Anjos, M. F. (2015). A semidefinite optimization-based approach for global optimization of multi-row facility layout. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 46-61. doi:10.1016/j.ejor.2015.02.049
- Hungerländer, P., Maier, K., Pachatz, V., & Truden, C. (2020). Exact and heuristic approaches for a new circular layout problem. *SN Applied Sciences*, 2(6). doi:10.1007/s42452-020-2734-z
- Ighravwe, D. E., & Oke, S. A. (2015). A combined fuzzy goal programming and Big-Bang Big-Crunch algorithm for workforce optimisation with facility layout consideration. *Engineering Journal*, 19(2), 71-98. doi:10.4186/ej.2015.19.2.71
- Imran, M., Kang, C., Lee, Y. H., Jahanzaib, M., & Aziz, H. (2017). Cell formation in a cellular manufacturing system using simulation integrated hybrid genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 105, 123-135. doi:10.1016/j.cie.2016.12.028
- Ingole, S., & Singh, D. (2017). Unequal-area, fixed-shape facility layout problems using the firefly algorithm. *Engineering Optimization*, 49(7), 1097-1115. doi:10.1080/0305215X.2016.1235327
- Ingole, S., & Singh, D. (2021). Fixed and flexible shape facility layout problems using biogeography-based optimisation algorithm. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 37(1), 84-118. doi:10.1504/IJISE.2021.112470
- Izui, K., Bai, X., Yamada, T., Nishiwaki, S., Noda, A., & Nagatani, T. (2015). *A BI-level multiobjective optimization approach for layout design of robotic cellular manufacturing systems*. Paper presented at the Proceedings - CIE 45: 2015 International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- Jadram, C., & Boongsood, W. (2018). *Application of fuzzy materials-handling inputs with the genetic algorithm for machine layout*. Paper presented at the 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management, ICITM 2018.
- James A. Tompkins, J. A. W., Yavuz A. Bozer, J. M. A. Tanchoco. (2010). *Facilities Planning* (J. Welter Ed.). United States Of Ameica: John wiley & Sons,Inc.

- Jaramillo, J. R., & McKendall, A. (2018). A memetic algorithm for the generalised machine layout problem. *International Journal of Operational Research*, 33(4), 497-511. doi:10.1504/IJOR.2018.096489
- Jeong, D., & Seo, Y. (2018). Golden section search and hybrid tabu search-simulated annealing for layout design of unequal-sized facilities with fixed input and output points. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, 25(3), 297-315.
- Jerin Leno, I., Saravana Sankar, S., & Ponnambalam, S. G. (2016). An elitist strategy genetic algorithm using simulated annealing algorithm as local search for facility layout design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5-8), 787-799. doi:10.1007/s00170-013-5519-3
- Jerin Leno, I., Saravana Sankar, S., & Ponnambalam, S. G. (2018). MIP model and elitist strategy hybrid GA-SA algorithm for layout design. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(2), 369-387. doi:10.1007/s10845-015-1113-x
- Juma, S. A., Muriithi, C. M., & Ngoo, L. M. (2018). Optimal switching sequence using a metaheuristic algorithm for feeder reconfiguration. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 11(8), 1329-1346.
- Kalita, Z., & Datta, D. (2018). A constrained single-row facility layout problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5-8), 2173-2184. doi:10.1007/s00170-018-2370-6
- Kanduc, T., & Rodic, B. (2016). Optimisation of machine layout using a force generated graph algorithm and simulated annealing. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(2), 275-287. doi:10.2507/IJSIMM15(2)7.335
- Kang, S., & Chae, J. (2017). Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Systems with Applications*, 79, 269-281. doi:10.1016/j.eswa.2017.02.047
- Kang, S., Kim, M., & Chae, J. (2018). A closed loop based facility layout design using a cuckoo search algorithm. *Expert Systems with Applications*, 93, 322-335. doi:10.1016/j.eswa.2017.10.038

- Karthikeyan, S., & Saravanann, M. (2015). Minimizing the number of voids and exceptional elements in multi-dimensional cellular manufacturing system using meta-heuristics. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(2), 2495-2504.
- Kazemi, M., Gol, S. S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kia, R., & Khorrami, J. (2017). A mathematical model for assessing the effects of a lot splitting feature on a dynamic cellular manufacturing system. *Production Engineering*, 11(4-5), 557-573. doi:10.1007/s11740-017-0754-3
- Ketabi, S., Ghandehari, M., & Khoshkrodi, M. P. (2021). Facility layout problem by integration of AHP and computer simulation with DEA. *International Journal of Services and Operations Management*, 39(2), 262-282. doi:10.1504/IJSOM.2021.115449
- Khajemahalle, L., Emami, S., & Keshteli, R. N. (2021). A hybrid nested partitions and simulated annealing algorithm for dynamic facility layout problem: A robust optimization approach. *INFOR*, 59(1), 74-101. doi:10.1080/03155986.2020.1788328
- Kheirkhah, A., Navidi, H., & Messi Bidgoli, M. (2015). Dynamic Facility Layout Problem: A New Bilevel Formulation and Some Metaheuristic Solution Methods. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 62(3), 396-410. doi:10.1109/TEM.2015.2437195
- Kheirkhah, A. S., & Bidgoli, M. M. (2016). Dynamic facility layout problem under competitive environment: a new formulation and some meta-heuristic solution methods. *Production Engineering*, 10(6), 615-632. doi:10.1007/s11740-016-0703-6
- Kheirkhah, A. S., & Bidgoli, M. M. (2018). A graph-theoretic-based meta-heuristic algorithm for solving cooperative dynamic facility layout problems. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 8(3), 340-366. doi:10.1504/IJPMB.2018.092892
- Kia, R., Lashgari, M., & Jolai, F. (2015). *Robust optimization to design a dynamic cellular manufacturing system integrating group layout and worker assignment*. Paper presented at the Proceedings - CIE 45: 2015 International Conference on

Computers and Industrial Engineering.

- Kia, R., Shirazi, H., Javadian, N., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2015). Designing group layout of unequal-area facilities in a dynamic cellular manufacturing system with variability in number and shape of cells. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3390-3418. doi:10.1080/00207543.2014.986295
- Kim, M., & Chae, J. (2019). Monarch butterfly optimization for facility layout design based on a single loop material handling path. *Mathematics*, 7(2). doi:10.3390/math7020154
- Kim, M., & Chae, J. (2021). A monarch butterfly optimization for an unequal area facility layout problem. *Soft Computing*, 25(23), 14933-14953. doi:10.1007/s00500-021-06076-7
- Klausnitzer, A., & Lasch, R. (2019). Optimal facility layout and material handling network design. *Computers and Operations Research*, 103, 237-251. doi:10.1016/j.cor.2018.11.002
- Kong, Y., Vine, S. L., & Liu, X. (2019). Optimal storage and loading zones within surface parking facilities for privately owned automated vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 13(12), 1754-1760. doi:10.1049/iet-its.2019.0099
- Kovács, G. (2017). Layout redesign for cost reduction and efficiency improvement. *Journal of Applied Economic Sciences*, 12(3), 663-670.
- Kovács, G. (2019). Layout design for efficiency improvement and cost reduction. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 67(3), 547-555. doi:10.24425/bpasts.2019.129653
- Kovács, G. (2020). Combination of Lean value-oriented conception and facility layout design for even more significant efficiency improvement and cost reduction. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2020.1712490
- Krajcovic, M., & Hancinsky, V. (2015). Production layout planning using genetic algorithms. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 17(3), 72-77.

- Krajčovič, M., Hančínský, V., Dulina, L., & Grznár, P. (2019). Use of genetic algorithm in layout design. *Acta Logistica*, 6(2), 43-48. doi:10.22306/al.v6i2.120
- Kromer, P., Platos, J., & Snasel, V. (2020a). *Self-organizing Migrating Algorithm for the Single Row Facility Layout Problem*. Paper presented at the 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2020 - Conference Proceedings.
- Kromer, P., Platos, J., & Snasel, V. (2020b). *Solving the single row facility layout problem by differential evolution*. Paper presented at the GECCO 2020 - Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference.
- Kulturel-Konak, S. (2017). *A Matheuristic Approach for Solving the Dynamic Facility Layout Problem*. Paper presented at the Procedia Computer Science.
- Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2015). A large-scale hybrid simulated annealing algorithm for cyclic facility layout problems. *Engineering Optimization*, 47(7), 963-978. doi:10.1080/0305215X.2014.933825
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2017a). Optimal selection of multi-criteria unequal area facility layout problem: An integer linear program and Borda-Kendall-based method. *International Journal of Business and Systems Research*, 11(1-2), 62-81. doi:10.1504/IJBSR.2017.080835
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2017b). A similarity score-based two-phase heuristic approach to solve the dynamic cellular facility layout for manufacturing systems. *Engineering Optimization*, 49(11), 1848-1867. doi:10.1080/0305215X.2016.1274205
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2019a). Cellular facility layout problem: a case of tower manufacturing industry. *Management of Environmental Quality*, 30(6), 1345-1360. doi:10.1108/meq-04-2018-0076
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2019b). Cellular facility layout problem: a case of tower manufacturing industry. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 30(6), 1345-1360. doi:10.1108/MEQ-04-2018-0076
- Kumar, R., & Singh, S. P. (2019c) Modified SA algorithm for bi-objective robust stochastic cellular facility layout in cellular manufacturing systems. *Vol. 702* (pp. 19-33): Springer Verlag.

- Kumar, V., Verma, P., Onkar, Singh, S. P., & Katiyar, J. (2016). *Facility and process layout analysis of an SME using simulation: A case study of a manufacturing company*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.
- La Scalia, G., Micale, R., Giallanza, A., & Marannano, G. (2019). Firefly algorithm based upon slicing structure encoding for unequal facility layout problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(3), 349-360. doi:10.5267/j.ijiec.2019.2.003
- Lakehal, S., & Aitzai, A. (2017). *Branch and Bound for facility layout problem using minimum weighted clique problem in complete k-partite graph*. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series.
- Lamba, K., Kumar, R., Mishra, S., & Rajput, S. (2019). Sustainable dynamic cellular facility layout: a solution approach using simulated annealing-based meta-heuristic. *Annals of Operations Research*. doi:10.1007/s10479-019-03340-w
- Lamba, K., Kumar, R., Mishra, S., & Rajput, S. (2020). Sustainable dynamic cellular facility layout: a solution approach using simulated annealing-based meta-heuristic. *Annals of Operations Research*, 290(1-2), 5-26. doi:10.1007/s10479-019-03340-w
- Lashgari, M., Kia, R., & Jolai, F. (2021). Robust optimisation to design a dynamic cellular manufacturing system integrating group layout and workers' assignment. *European Journal of Industrial Engineering*, 15(3), 319-351. doi:10.1504/EJIE.2021.115172
- Lavic, Z., Pasic, M., Vucijak, B., & Dukic, N. (2016). *Fuzzy logistics multicriteria decision making model for facilities layout*. Paper presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium.
- Lenin, N., & Siva Kumar, M. (2021). Harmony search algorithm for simultaneous minimization of bi-objectives in multi-row parallel machine layout problem. *Evolutionary Intelligence*, 14(4), 1495-1522. doi:10.1007/s12065-020-00419-3
- Li, H., Liu, R., & Shi, L. (2019). *The Layout Optimization Problem of Automobile Engine Production Line*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.

- Li, J., Tan, X., & Li, J. (2018). Research on Dynamic Facility Layout Problem of Manufacturing Unit Considering Human Factors. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. doi:10.1155/2018/6040561
- Li, L., Li, C., Ma, H., & Tang, Y. (2015). An optimization method for the remanufacturing dynamic facility layout problem with uncertainties. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015. doi:10.1155/2015/685408
- Li, L., Yin, X. L., Jia, X. C., & Sobhani, B. (2020). Day ahead powerful probabilistic wind power forecast using combined intelligent structure and fuzzy clustering algorithm. *Energy*, 192. doi:10.1016/j.energy.2019.116498
- Li, M. L. (2020). Arrangement of Machines under Spatial Constraint by Using a Novel Algorithm. *IEEE Access*, 8, 144565-144574. doi:10.1109/ACCESS.2020.3013907
- Liang, Z., Qin, Y., Wu, F., Ren, Z., Liu, Y., Li, K., & Berti, S. (2018). Standalone condition diagnosing of fuel cell in microgrid composed of wind turbine/fuel cell/combined heat & power using Variational Mode Decomposition analysis model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(39), 18452-18462. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.08.023
- Lim, Z. Y., Ponnambalam, S. G., & Izui, K. (2017). Multi-objective hybrid algorithms for layout optimization in multi-robot cellular manufacturing systems. *Knowledge-Based Systems*, 120, 87-98. doi:10.1016/j.knosys.2016.12.026
- Lin, Q., & Wang, D. (2019). Facility Layout Planning with SHELL and Fuzzy AHP Method Based on Human Reliability for Operating Theatre. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019. doi:10.1155/2019/8563528
- Lin, Q. L., Liu, H. C., Wang, D. J., & Liu, L. (2015). Integrating systematic layout planning with fuzzy constraint theory to design and optimize the facility layout for operating theatre in hospitals. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(1), 87-95. doi:10.1007/s10845-013-0764-8
- Lin, Z., & Yingjie, Z. (2019). *Solving the Facility Layout Problem with Genetic Algorithm*. Paper presented at the 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2019.

- Lista, A. P., Tortorella, G. L., Bouzona, M., Mostafad, S., & Romeroe, D. (2021). Lean layout design: a case study applied to the textile industry. *Production*, 31. doi:10.1590/0103-6513.20210090
- Liu, J., & Liu, J. (2019). Applying multi-objective ant colony optimization algorithm for solving the unequal area facility layout problems. *Applied Soft Computing Journal*, 74, 167-189. doi:10.1016/j.asoc.2018.10.012
- Liu, J., Liu, J., Yan, X., & Peng, B. (2020). A heuristic algorithm combining Pareto optimization and niche technology for multi-objective unequal area facility layout problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89. doi:10.1016/j.engappai.2019.103453
- Liu, J., Liu, S., Liu, Z., & Li, B. (2020). Configuration space evolutionary algorithm for multi-objective unequal-area facility layout problems with flexible bays. *Applied Soft Computing Journal*, 89. doi:10.1016/j.asoc.2019.106052
- Liu, J., Wang, D., He, K., & Xue, Y. (2017). Combining Wang–Landau sampling algorithm and heuristics for solving the unequal-area dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 262(3), 1052-1063. doi:10.1016/j.ejor.2017.04.002
- Liu, J., Zhang, H., He, K., & Jiang, S. (2018). Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on objective space division for the unequal-area facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 102, 179-192. doi:10.1016/j.eswa.2018.02.035
- Liu, S., He, X., Guan, C., Gong, J., & Zhang, Z. (2021). *Mixed-integer Programming Formulation for Constrained Double-row Layout Problem*. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series.
- Liu, S., Zhang, Z., Guan, C., Zhu, L., Zhang, M., & Guo, P. (2021). An improved fireworks algorithm for the constrained single-row facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 59(8), 2309-2327. doi:10.1080/00207543.2020.1730465
- Liu, S. L., Zhang, Z. Q., Guan, C., Zhu, L. X., Zhang, M., & Guo, P. (2020). An improved

- fireworks algorithm for the constrained single-row facility layout problem. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2020.1730465
- Liu, Y. S., Tang, L. N., Ma, Y. Z., & Yang, T. (2018). TFT-LCD module cell layout design using simulation and fuzzy multiple attribute group decision-making approach. *Applied Soft Computing Journal*, 68, 873-888. doi:10.1016/j.asoc.2017.10.026
- Lukose, A. P., Scaria, A., & George, B. (2018). *A Firefly Algorithm Approach for Multirow Facility Layout Problem*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Ma, H., Tang, Y., Li, L., & Li, C. (2015). *An optimal solution to the remanufacturing facility layout problem*. Paper presented at the Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA).
- Ma, L., Ma, M., Ma, C., Deng, J., Liu, X., & Zhao, L. (2016). Simulation and optimization study on layout planning of plant factory based on WITNESS. *International Journal of Security and its Applications*, 10(5), 275-282. doi:10.14257/ijisia.2016.10.5.26
- Madhusudhan, M. V., Udaya Rani, V., & Hegde, C. (2022). Finger Vein Recognition Model for Biometric Authentication Using Intelligent Deep Learning. *International Journal of Image and Graphics*. doi:10.1142/S0219467822400046
- Mahalingam, S. K., & Nagarajan, L. (2021). Strategy to reduce floor area and flow distance of products in multi-row parallel machine layout design using cuckoo search algorithm. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 20(2), 273-315. doi:10.1142/S0219686721500141
- Mahmoodian, V., Jabbarzadeh, A., Rezazadeh, H., & Barzinpour, F. (2019). A novel intelligent particle swarm optimization algorithm for solving cell formation problem. *Neural Computing and Applications*, 31, 801-815. doi:10.1007/s00521-017-3020-x
- Maleki, R., Ketabi, S., & Mokhatab Rafiei, F. (2018). Grouping both machines and parts in cellular technology by Genetic Algorithm. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 35(2), 91-101. doi:10.1080/21681015.2017.1411402
- Mallikarjuna, K., Veeranna, V., & Reddy, K. H. (2016). A new meta-heuristics for optimum

- design of loop layout in flexible manufacturing system with integrated scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9-12), 1841-1860. doi:10.1007/s00170-015-7715-9
- Manita, G., Chaieb, I., & Korbaa, O. (2016). A new approach for loop machine layout problem integrating proximity constraints. *International Journal of Production Research*, 54(3), 778-798. doi:10.1080/00207543.2015.1064178
- Manjunath, K., Kodanda Ramaiah, G. N., & GiriPrasad, M. N. (2022). Backward movement oriented shark smell optimization-based audio steganography using encryption and compression strategies. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 122. doi:10.1016/j.dsp.2021.103335
- Mansour, H., Afefy, I. H., & Taha, S. M. (2021). Heuristic-based approach to solve layout design and workers' assignment problem in the cellular manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*. doi:10.1080/17509653.2021.1986682
- Masoud, S., Chowdhury, B. D. B., Son, Y. J., Kubota, C., & Tronstad, R. (2019). Simulation based optimization of resource allocation and facility layout for vegetable grafting operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163. doi:10.1016/j.compag.2019.05.054
- Masrom, S., Abidin, S. Z. Z., Omar, N., Rahman, A. S. A., & Rizman, Z. I. (2017). Dynamic parameterizations of particle swarm optimization and genetic algorithm for facility layout problem. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(10), 3195-3201.
- Matai, R. (2015). Solving multi objective facility layout problem by modified simulated annealing. *Applied Mathematics and Computation*, 261, 302-311. doi:10.1016/j.amc.2015.03.107
- Maurício, T. B., Montevechi, J. A. B., Leal, F., Miranda, R. C., & Lombardi, F. (2015). Using discrete event simulation to change from a functional layout to a cellular layout in an auto parts industry. *Acta Scientiarum - Technology*, 37(3), 371-378. doi:10.4025/actascitechnol.v37i3.27869

- McKendall, A., & Hakobyan, A. (2021). An application of an unequal-area facilities layout problem with fixed-shape facilities. *Algorithms*, 14(11). doi:10.3390/a14110306
- Mehdizadeh, E., & Rahimi, V. (2016). An integrated mathematical model for solving dynamic cell formation problem considering operator assignment and inter/intra cell layouts. *Applied Soft Computing Journal*, 42, 325-341. doi:10.1016/j.asoc.2016.01.012
- Menon, D., Zwimpfer, C., Hanne, T., & Dornberger, R. (2016). *Facility Layout Planning Using Fuzzy Closeness Computation and a Genetic Algorithm*. Paper presented at the Proceedings - 2015 3rd International Symposium on Computational and Business Intelligence, ISCBI 2015.
- Moatari-Kazerouni, A., Chinniah, Y., & Agard, B. (2015a). Integrating occupational health and safety in facility layout planning, part I: Methodology. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3243-3259. doi:10.1080/00207543.2014.970712
- Moatari-Kazerouni, A., Chinniah, Y., & Agard, B. (2015b). Integration of occupational health and safety in the facility layout planning, part II: Design of the kitchen of a hospital. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3228-3242. doi:10.1080/00207543.2014.970711
- Modrak, V., Pandian, R. S., & Semanco, P. (2021). Calibration of GA parameters for layout design optimization problems using design of experiments. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(15). doi:10.3390/app11156940
- Mohamadi, A., Ebrahimnejad, S., Soltani, R., & Khalilzadeh, M. (2019a). An integrated approach based on a bi-level genetic algorithm and a combined zone-LP for the facility layout problem. *South African Journal of Industrial Engineering*, 30(4), 87-101. doi:10.7166/30-4-2192
- Mohamadi, A., Ebrahimnejad, S., Soltani, R., & Khalilzadeh, M. (2019b). A New Two-Stage Approach for a Bi-Objective Facility Layout Problem Considering Input/ Output Points under Fuzzy Environment. *IEEE Access*, 7, 134083-134103. doi:10.1109/ACCESS.2019.2941442
- Mohamadi, A., Ebrahimnejad, S., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). A novel two-stage

- approach for solving a bi-objective facility layout problem. *International Journal of Operational Research*, 31(1), 49-87. doi:10.1504/IJOR.2018.088557
- Mohammad-Azari, S., Bozorg-Haddad, O., & Chu, X. (2018) Shark smell optimization (SSO) algorithm. Vol. 720. *Studies in Computational Intelligence* (pp. 93-103): Springer Verlag.
- Mohammadi, M., & Forghani, K. (2016a). Designing cellular manufacturing systems considering S-shaped layout. *Computers and Industrial Engineering*, 98, 221-236. doi:10.1016/j.cie.2016.05.041
- Mohammadi, M., & Forghani, K. (2016b). A hybrid methodology based on dynamic programming and simulated annealing for solving an integrated cell formation and layout problem. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 50(2), 263-280.
- Mohammadi, M., Talebpour, F., Safaee, E., Ghadimi, N., & Abedinia, O. (2018). Small-Scale Building Load Forecast based on Hybrid Forecast Engine. *Neural Processing Letters*, 48(1), 329-351. doi:10.1007/s11063-017-9723-2
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and annalysis of experiments*. New York: Wiley.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*: John wiley & sons.
- Morales-Calvache, B. Y., Vásquez-Méndez, S., Prada-Ariza, F. C., & Mejía-Moncayo, C. (2019). *A novel approach to address process plant layout based on a bacterial genetic optimization algorithm*. Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings.
- Morinaga, E., Wakamatsu, H., Iwasaki, K., & Arai, E. (2016). *A facility layout planning method considering routing and temporal efficiency*. Paper presented at the International Symposium on Flexible Automation, ISFA 2016.
- Moslemipour, G. (2018). A hybrid CS-SA intelligent approach to solve uncertain dynamic facility layout problems considering dependency of demands. *Journal of Industrial Engineering International*, 14(2), 429-442. doi:10.1007/s40092-017-0222-x
- Moslemipour, G., Lee, T. S., & Loong, Y. T. (2017). Performance Analysis of Intelligent Robust Facility Layout Design. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*

- (English Edition), 30(2), 407-418. doi:10.1007/s10033-017-0073-9
- Moslemipour, G., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017). Performance analysis of dynamic and static facility layouts in a stochastic environment. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 30(5), 710-719. doi:10.5829/idosi.ije.2017.30.05b.11
- Murata, T., & Ishibuchi, H. (1994, 27-29 June 1994). *Performance evaluation of genetic algorithms for flowshop scheduling problems*. Paper presented at the Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence.
- Nagarajan, L., Mahalingam, S. K., Gurusamy, S., & Dharmaraj, V. K. (2018). Solution for bi-objective single row facility layout problem using artificial bee colony algorithm. *European Journal of Industrial Engineering*, 12(2), 252-275. doi:10.1504/EJIE.2018.090619
- Nagarajan, L., Mahalingam, S. K., Kandasamy, J., & Gurusamy, S. (2020). Application of artificial immune system algorithm for simultaneous minimisation of multiple objectives in single row facility layout problems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 36(1), 49-72. doi:10.1504/IJISE.2020.109119
- Nastase, S., Andrei, C. G., Tica, E. I., Georgescu, S. C., Neagoe, A., & Grecu, I. S. (2019). *Hydropower optimization test-case solved with nature-inspired algorithms*. Paper presented at the 2019 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT, CIEM 2019.
- Nazif, H. (2021). A fuzzy logic-based method for designing an urban transport network using a shark smell optimisation algorithm. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*. doi:10.1080/0952813X.2021.1924867
- Nearchou, A. C. (2006). Meta-heuristics from nature for the loop layout design problem. *International Journal of Production Economics*, 101(2), 312-328. doi:10.1016/j.ijpe.2005.02.001
- Negahban, A. (2018). Optimizing consistency improvement of positive reciprocal matrices with implications for Monte Carlo Analytic Hierarchy Process. *Computers and*

Industrial Engineering, 124, 113-124. doi:10.1016/j.cie.2018.07.018

- Neghabi, H., & Ghassemi Tari, F. (2015). An optimal approach for maximizing the number of adjacencies in multi floor layout problem. *International Journal of Production Research*, 53(11), 3462-3474. doi:10.1080/00207543.2014.999957
- Neghabi, H., & Ghassemi Tari, F. (2016). A new concept of adjacency for concurrent consideration of economic and safety aspects in design of facility layout problems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 603-614. doi:10.1016/j.jlp.2016.02.010
- Nejatbakhsh, Y., Shirzadi, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ebrahimi, A., & Kia, R. (2015). A BI-objective model for a cellular manufacturing system integrating intra-cell layout and processing route reliability. Paper presented at the Proceedings - CIE 45: 2015 International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- Ng, K. M., & Tran, T. H. (2017). A parallel water flow algorithm with local search for solving the quadratic assignment problem. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 13(5), 235-259. doi:10.3934/JIMO.2018041
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016a). A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 38, 46-62. doi:10.1016/j.jmsy.2015.11.001
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T., & Botta-Genoulaz, V. (2016b). A new multi-objective mathematical model for dynamic cell formation under demand and cost uncertainty considering social criteria. *Applied Mathematical Modelling*, 40(4), 2674-2691. doi:10.1016/j.apm.2015.09.047
- Ning, X., & Li, P. (2018). A cross-entropy approach to the single row facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 56(11), 3781-3794. doi:10.1080/00207543.2017.1399221
- Niranjan Singh, M., & Khaiyum, S. (2022). Reducing catastrophic forgetting problem in streaming data by hybrid shark smell with jaya optimization-based deep neural networks. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. doi:10.1142/S1793962322500301

- Niroomand, S., Hadi-Vencheh, A., Şahin, R., & Vizvári, B. (2015). Modified migrating birds optimization algorithm for closed loop layout with exact distances in flexible manufacturing systems. *Expert Systems with Applications*, 42(19), 6586-6597. doi:10.1016/j.eswa.2015.04.040
- Niroomand, S., Mirzaei, N., Sahin, R., & Vizvári, B. (2015). A new exact formulation and simulated annealing algorithm for one-sided closed loop layout. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 12(10), 3817-3826. doi:10.1166/jctn.2015.4287
- Ohmori, S., & Yoshimoto, K. (2021). A primal-dual interior-point method for facility layout problem with relative-positioning constraints. *Algorithms*, 14(2). doi:10.3390/a14020060
- Ou-Yang, C., & Ansari, R. (2017). Applying a hybrid particle swarm optimization_Tabu search algorithm to a facility location case in Jakarta. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(3), 199-212. doi:10.1080/21681015.2016.1243167
- Paes, F. G., Pessoa, A. A., & Vidal, T. (2017). A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the Unequal Area Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 742-756. doi:10.1016/j.ejor.2016.07.022
- Palominos, P., Valdivia, L., & Quezada, L. (2015). *A methodology for designing multiple cell manufacturing systems with simultaneous balancing*. Paper presented at the 23rd International Conference for Production Research, ICPR 2015.
- Palomo-Romero, J. M., Salas-Morera, L., & García-Hernández, L. (2017). An island model genetic algorithm for unequal area facility layout problems. *Expert Systems with Applications*, 68, 151-162. doi:10.1016/j.eswa.2016.10.004
- Palubeckis, G. (2015). Fast simulated annealing for single-row equidistant facility layout. *Applied Mathematics and Computation*, 263, 287-301. doi:10.1016/j.amc.2015.04.073
- Palubeckis, G. (2021). An approach integrating simulated annealing and variable neighborhood search for the bidirectional loop layout problem. *Mathematics*, 9(1), 1-30. doi:10.3390/math9010005

- Papakostas, N., O'Connor Moneley, J., & Hargaden, V. (2018). Integrated simulation-based facility layout and complex production line design under uncertainty. *CIRP Annals*, 67(1), 451-454. doi:10.1016/j.cirp.2018.04.111
- Park, H., & Seo, Y. (2019). An efficient algorithm for unequal area facilities layout planning with input and output points. *INFOR*, 57(1), 56-74. doi:10.1080/03155986.2017.1396709
- Peng, Y., & Fan, L. (2017). *Dynamic layout optimization based on improved genetic algorithm*. Paper presented at the 2017 7th International Workshop on Computer Science and Engineering, WCSE 2017.
- Peng, Y., Zeng, T., Fan, L., Han, Y., Xia, B., & Wang, X. (2018). An Improved Genetic Algorithm Based Robust Approach for Stochastic Dynamic Facility Layout Problem. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018. doi:10.1155/2018/1529058
- Petrillo, A., De Felice, F., Silvestri, A., & Falcone, D. (2016). Lay-out optimisation through an integrated approach based on material flow and operations mapping using a commercial software. *International Journal of Services and Operations Management*, 23(1), 113-134. doi:10.1504/IJSOM.2016.073294
- Phanden, R. K., Demir, H. I., & Gupta, R. D. (2018). *Application of genetic algorithm and variable neighborhood search to solve the facility layout planning problem in job shop production system*. Paper presented at the 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management, ICITM 2018.
- Phoon, S. Y., Yap, H. J., Taha, Z., & Pai, Y. S. (2017). Interactive solution approach for loop layout problem using virtual reality technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5-8), 2375-2385. doi:10.1007/s00170-016-9219-7
- Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2004). The development of genetic algorithms for the finite capacity scheduling of complex products, with multiple levels of product structure. *European Journal of Operational Research*, 152, 215-225. doi:10.1016/S0377-2217(02)00645-8
- Pongcharoen, P., Stewardson, D. J., & Hicks, C. (2001). *A Genetic Algorithm for Production Scheduling in the Capital Goods Industry*. (PhD), University of

Newcastle upon Tyne.

- Pourhassan, M. R., & Raissi, S. (2017). An integrated simulation-based optimization technique for multi-objective dynamic facility layout problem. *Journal of Industrial Information Integration*, 8, 49-58. doi:10.1016/j.jii.2017.06.001
- Pourhassan, M. R., & Raissi, S. (2019). *A Hybrid Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms for Dynamic Facility Layout Problem with Multiple Transporters*. Paper presented at the Proceedings of 2019 15th Iran International Industrial Engineering Conference, IIIEC 2019.
- Pournaderi, N., Ghezavati, V. R., & Mozafari, M. (2019). Developing a mathematical model for the dynamic facility layout problem considering material handling system and optimizing it using cloud theory-based simulated annealing algorithm. *SN Applied Sciences*, 1(8). doi:10.1007/s42452-019-0865-x
- Pourvaziri, H., & Pierreval, H. (2017). Dynamic facility layout problem based on open queueing network theory. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 538-553. doi:10.1016/j.ejor.2016.11.011
- Pourvaziri, H., Pierreval, H., & Marian, H. (2021). Integrating facility layout design and aisle structure in manufacturing systems: Formulation and exact solution. *European Journal of Operational Research*, 290(2), 499-513. doi:10.1016/j.ejor.2020.08.012
- Pourvaziri, H., Salimpour, S., Akhavan Niaki, S. T., & Azab, A. (2021). Robust facility layout design for flexible manufacturing: a doe-based heuristic. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2021.1967500
- Pradeepmon, T. G., Panicker, V. V., & Sridharan, R. (2018). A heuristic algorithm enhanced with probability-based incremental learning and local search for dynamic facility layout problems. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 11(4), 352-389. doi:10.1504/IJADS.2018.095279
- Pujo, P., El Khabous, I., & Ounnar, F. (2015). Experimental assessment of the productivity improvement when using U-shaped production cells with variable takt time. *International Journal of Lean Six Sigma*, 6(1), 17-38. doi:10.1108/IJLSS-07-2013-0038

- Purnomo, M. R. A., & Wiwoho, Y. S. (2016). *Multi-objective Mixed Integer Programming approach for facility layout design by considering closeness ratings, material handling, and re-layout cost*. Paper presented at the IOP Conference Series Materials Science and Engineering.
- Puspita, I. A., Iqbal, M., Pratami, D., & Pratomo, A. (2017). Production facility layout design using blocplan algorithm. *Advanced Science Letters*, 23(5), 3917-3920. doi:10.1166/asl.2017.8260
- Putri, N. T., Fithri, P., & Taufik, M. (2015). *Facility layout design on the agricultural machinery industry*. Paper presented at the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists.
- Qamar, A. M., Meanazel, O. T., Alalawin, A. H., & Almomani, H. A. (2020). Optimization of Plant Layout in Jordan Light Vehicle Manufacturing Company. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 101(4), 721-728. doi:10.1007/s40032-020-00576-5
- Qudeiri, J. A., Umer, U., Khadra, F. A., Hussein, H. M. A., Al-Ahmari, A., Darwish, S., & Abidi, M. H. (2015). Layout design optimization of dynamic environment flexible manufacturing systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(6), 1-9. doi:10.1177/1687814015584252
- Rabbani, M., Elahi, S., & Javadi, B. (2017). A comprehensive quadratic assignment problem for an integrated layout design of final assembly line and manufacturing feeder cells. *Decision Science Letters*, 6(2), 165-192. doi:10.5267/j.dsl.2016.10.001
- Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H., Rafiei, H., & Khaleghi, R. (2017). Using metaheuristic algorithms to solve a dynamic cell formation problem with consideration of intra-cell layout design. *Intelligent Decision Technologies*, 11(1), 109-126. doi:10.3233/IDT-160281
- Raja, S., & Anbumalar, V. (2016). An effective methodology for cell formation and intra-cell machine layout design in cellular manufacturing system using parts visit data and operation sequence data. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*

- and Engineering*, 38(3), 869-882. doi:10.1007/s40430-014-0280-6
- Ramesh, S., Arunkumar, N., & Vijayaraj, R. (2021a). Cellular manufacturing layout design using heuristic clustering algorithm and lpp model. *South African Journal of Industrial Engineering*, 32(2). doi:10.7166/32-2-2340
- Ramesh, S., Arunkumar, N., & Vijayaraj, R. (2021b). Economic Tradeoff Optimization Model for Machine Cell Layout Design. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series C/Chung-Kuo Chi Hsueh Kung Ch'eng Hsuebo Pao*, 42(3), 331-340.
- Rao, Y., Shao, Z., Ahangarnejad, A. H., Gholamalizadeh, E., & Sobhani, B. (2019). Shark Smell Optimizer applied to identify the optimal parameters of the proton exchange membrane fuel cell model. *Energy Conversion and Management*, 182, 1-8. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.057
- Ratnasari, I., & Rochman, D. R. (2019). Designing the layout of production facilities by using group technology (Simulation on plant jetrike and otoped). *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 11(2 Special Issue), 905-913.
- Ren, W., Wen, J., Guan, Y., & Hu, Y. (2019). *A novel optimization method for modular facilities layout problem considering flexible processes*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Rezaei, M., Mousavi, S. F., Moridi, A., Eshaghi Gordji, M., & Karami, H. (2021). A new hybrid framework based on integration of optimization algorithms and numerical method for estimating monthly groundwater level. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11). doi:10.1007/s12517-021-07349-z
- Rezazadeh, H., & Khiali-Miab, A. (2017). A two-layer genetic algorithm for the design of reliable cellular manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(3), 315-332. doi:10.5267/j.ijiec.2017.1.001
- Rifai, A. P., Windras Mara, S. T., Ridho, H., & Norcahyo, R. (2021). The double row layout problem with safety consideration: a two-stage variable neighborhood search approach. *Journal of Industrial and Production Engineering*.

doi:10.1080/21681015.2021.1968964

- Rubio-Sánchez, M., Gallego, M., Gortázar, F., & Duarte, A. (2016). GRASP with path relinking for the single row facility layout problem. *Knowledge-Based Systems*, 106, 1-13. doi:10.1016/j.knosys.2016.05.030
- Rui, X., Wu, J., Zhao, J., & Khamesinia, M. S. (2021). Load balancing in the internet of things using fuzzy logic and shark smell optimization algorithm. *Circuit World*, 47(4), 335-344. doi:10.1108/CW-09-2019-0117
- Ruiz Zúñiga, E., Flores García, E., Urenda Moris, M., Fathi, M., & Syberfeldt, A. (2021). Holistic simulation-based optimisation methodology for facility layout design with consideration to production and logistics constraints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(14), 2350-2361. doi:10.1177/09544054211017310
- Sadeghi, S., Forghani, M. A., & Seidi, M. (2017). Integrated dynamic cell formation with operator assignment and inter-cell layout problems: A mathematical model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1658-1669. doi:10.1177/0954405415604314
- Safarzadeh, S., & Koosha, H. (2017). Solving an extended multi-row facility layout problem with fuzzy clearances using GA. *Applied Soft Computing*, 61, 819-831. doi:10.1016/j.asoc.2017.09.003
- Şahinkoç, M., & Bilge, U. (2018). Facility layout problem with QAP formulation under scenario-based uncertainty. *INFOR*, 56(4), 406-427. doi:10.1080/03155986.2018.1424445
- Sahragard, M., & Bashiri, M. (2016a, 4-7 Dec. 2016). *Layout design for large scale problems with a hybridized clustering based heuristic method*. Paper presented at the 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM).
- Sahragard, M., & Bashiri, M. (2016b). *Layout design for large scale problems with a hybridized clustering based heuristic method*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.

- Sakharwade, R., Sahu, U. N., & Rajput, M. S. (2019). *An approach of designing robust plant layout using genetic algorithm*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.
- Salami, O. W., Umoh, I. J., Adedokun, E. A., Mu'Azu, M. B., & Ajao, L. A. (2019). *Efficient Method for Discriminating Flash Event from DoS Attack during Internet Protocol Traceback using Shark Smell Optimization Algorithm*. Paper presented at the 2nd International Conference of the IEEE Nigeria Computer Chapter, NigeriaComputConf 2019.
- Salas-Morera, L., García-Hernández, L., & Carmona-Muñoz, C. (2021). A multi-user interactive coral reef optimization algorithm for considering expert knowledge in the unequal area facility layout problem. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(15). doi:10.3390/app11156676
- Salimpour, S., Pourvaziri, H., & Azab, A. (2021). Semi-robust layout design for cellular manufacturing in a dynamic environment. *Computers and Operations Research*, 133. doi:10.1016/j.cor.2021.105367
- Salmani, M. H., Eshghi, K., & Neghabi, H. (2015). A bi-objective MIP model for facility layout problem in uncertain environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 1563-1575. doi:10.1007/s00170-015-7290-0
- Samanta, S., Philip, D., Mall, R. D., & Singh, A. (2015). *Two step facility layout optimization of an Indian bus body manufacturing plant using artificial bee colony algorithm and its variants*. Paper presented at the IEOM 2015 - 5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Proceeding.
- Saraswat, A., Venkatadri, U., & Castillo, I. (2015). A framework for multi-objective facility layout design. *Computers and Industrial Engineering*, 90, 167-176. doi:10.1016/j.cie.2015.09.006
- Saravanan, M., & Arulkumar, P. V. (2015). An artificial bee colony algorithm for design and optimize the fixed area layout problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12), 2079-2095. doi:10.1007/s00170-014-6774-7
- Saravanan, M., & Kumar, S. G. (2015). Design and optimisation of loop layout problems

- flexible manufacturing system using sheep flock heredity algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 1851-1866. doi:10.1007/s00170-014-6565-1
- Saravanan, M., Kumar, S. G., & Rajkumar, M. (2016). Design and optimisation of single row layout problem in flexible manufacturing systems using metaheuristic algorithms. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 30(3-4), 196-215. doi:10.1504/IJMTM.2016.077805
- Saravanan, M., Kumar, S. G., & Srinivasan, R. (2016). Sheep flock heredity algorithm to solve the loop layout problem in flexible manufacturing system. *International Journal of Enterprise Network Management*, 7(3), 260-271. doi:10.1504/IJENM.2016.078974
- Sarwar, F., Chowdhury, N. H., & Uddin, S. H. (2020). Modelling and optimisation of facility layout problem using firefly algorithm. *International Journal of Services and Operations Management*, 36(2), 204-227. doi:10.1504/IJSOM.2020.107209
- Savsar, M., & Aldehaim, A. (2020). *Analysis and improvement of facility layout in a furniture factory: A case application*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.
- Sedaghat, M., & Hosseinzadeh, H. (2019). Brain image clustering by wavelet energy and CBSSO optimization algorithm. *Journal of Mind and Medical Sciences*, 6(1), 110-120. doi:10.22543/7674.61.p110120
- Seifi, A., Ehteram, M., & Soroush, F. (2020). Uncertainties of instantaneous influent flow predictions by intelligence models hybridized with multi-objective shark smell optimization algorithm. *Journal of Hydrology*, 587. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124977
- Seifi, A., Moradi, M. H., Abedini, M., & Jahangiri, A. (2020). An optimal programming among renewable energy resources and storage devices for responsive load integration in residential applications using hybrid of grey wolf and shark smell algorithms. *Journal of Energy Storage*, 27. doi:10.1016/j.est.2019.101126
- Sembiring, A. C., Sitanggang, D., Budiman, I., & Aloina, G. (2019). *Redesign layout of*

- production floor facilities using Algorithm CRAFT*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Sengazhani Murugesan, V., Sequeira, A. H., Shetty, D. S., & Jauhar, S. K. (2020). Enhancement of mail operational performance of India post facility layout using AHP. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 11(2), 261-273. doi:10.1007/s13198-019-00854-1
- Setayeshi, S., Rad, V. B., Noruzi, A., & Yousefi, N. (2017). Optimal Design of Wide Area Based on Fuzzy Controller and Intelligent Method. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 27(3), 449-473. doi:10.1142/S0218194017500164
- Seyed, M. G., Rahmani, D., & Moslemipour, G. (2020). Routing flexibility for unequal-area stochastic dynamic facility layout problem in flexible manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, 31(2), 269-285. doi:10.22068/ijiepr.31.2.269
- Shafigh, F., Defersha, F. M., & Moussa, S. E. (2017). A linear programming embedded simulated annealing in the design of distributed layout with production planning and systems reconfiguration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1-4), 1119-1140. doi:10.1007/s00170-016-8813-z
- Shaker Abualsaud, A., Ahmed Alhosani, A., Youssef Mohamad, A., Nasser Al Eid, F., & Alsayouf, I. (2019). *Using six sigma DMAIC methodology to develop a facility layout for a new production line*. Paper presented at the 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization, ICMSAO 2019.
- Shao, Z., Wakil, K., Usak, M., Amin Heidari, M., Wang, B., & Simoes, R. (2018). Kriging Empirical Mode Decomposition via support vector machine learning technique for autonomous operation diagnosing of CHP in microgrid. *Applied Thermal Engineering*, 145, 58-70. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.09.028
- Sharma, P., & Singhal, S. (2016). Comparative analysis of procedural approaches for facility layout design using AHP approach. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 30(5), 279-288. doi:10.1504/IJMTM.2016.078910

- Sharma, P., & Singhal, S. (2017). Analysis of facility layout alternatives using proposed integrated approach. *OPSEARCH*, 54(1), 1-20. doi:10.1007/s12597-016-0266-5
- Shekhar Singh, C. (2021). SSO Based Energy Efficient Power Allocation with Optimal Power Constraints for Underlay Cognitive Radio Networks. *International Journal of Electronics*. doi:10.1080/00207217.2021.2001855
- Shirzadi, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kia, R., & Mohammadi, M. (2017). A multi-objective imperialist competitive algorithm for integrating intra-cell layout and processing route reliability in a cellular manufacturing system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(8), 839-855. doi:10.1080/0951192X.2016.1224388
- Shojaie, A. A., & Bariran, S. E. S. (2020). Comparison of two modified meta-heuristic soft algorithms for solving a bi-objective facility layout problem. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 16(3), 435-454. doi:10.1504/IJMOR.2020.106928
- Sikaroudi, A. M. E., & Shahanaghi, K. (2016). Facility layout by collision detection and force exertion heuristics. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 21-30. doi:10.1016/j.jmsy.2016.07.001
- Singh, D., & Ingole, S. (2019). Multi-objective facility layout problems using BBO, NSBBO and NSGA-II metaheuristic algorithms. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(2), 239-262. doi:10.5267/j.ijiec.2018.6.006
- Sitepu, M. H., Alda, T., Sembiring, M. T., Nasution, A., Sani Lubis, M., & Jonathan, A. (2020). *Production floor layout design for vise manufacturing using CRAFT algorithm*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Soewardi, H., & Paramitha, D. P. (2018). Design of the effective facility layout in the production department of healthy drink. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(Specialissue10), 8131-8135. doi:10.3923/jeasci.2018.8131.8135
- Sreedharan, P. S., & Pete, D. J. (2020). A fuzzy multicriteria decision-making-based CH selection and hybrid routing protocol for WSN. *International Journal of*

- Communication Systems*, 33(15). doi:10.1002/dac.4536
- Su, T. S., & Hwang, M. H. (2017). Efficient Machine Layout Design Method with a Fuzzy Set Theory within a Bay in a TFT-LCD Plant. *Procedia Manufacturing*, 11, 1863-1870. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.325
- Sudtachat, K. (2020). *Dynamic Programming Model for Cellular Manufacturing Layout under Demand Uncertainty*. Paper presented at the ICITM 2020 - 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management.
- Suemitsu, I., Izui, K., Yamada, T., Nishiwaki, S., Noda, A., & Nagatani, T. (2016). Simultaneous optimization of layout and task schedule for robotic cellular manufacturing systems. *Computers and Industrial Engineering*, 102, 396-407. doi:10.1016/j.cie.2016.05.036
- Suh, Y. J., & Choi, J. Y. (2021). Efficient Fab facility layout with spine structure using genetic algorithm under various material-handling considerations. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2021.1904159
- Suhardi, B., Juwita, E., & Astuti, R. D. (2019). Facility layout improvement in sewing department with Systematic Layout planning and ergonomics approach. *Cogent Engineering*, 6(1). doi:10.1080/23311916.2019.1597412
- Suhardini, D., & Rahmawati, S. D. (2019). *Design and improvement layout of a production floor using automated layout design program (ALDEP) and CRAFT algorithm at CV. Aji Jaya Mandiri*. Paper presented at the 11th International Seminar on Industrial Engineering and Management: Technology and Innovation Challenges Towards Industry 4.0 Era.
- Sui, Z., Hou, T., Duan, L., & Wu, T. (2019). *Research on optimization of production workshop layout based on extension particle swarm optimization*. Paper presented at the Chinese Control Conference, CCC.
- Suliman, Y. M., Yousif, A., & Bashir, M. B. (2019) Shark smell optimization (SSO) algorithm for cloud jobs scheduling. Vol. 1098 *CCIS. Communications in Computer and Information Science* (pp. 71-80): Springer.
- Sun, X., Chou, P., Koong, C. S., Wu, C. C., & Chen, L. R. (2022). Optimizing 2-opt-based

- heuristics on GPU for solving the single-row facility layout problem. *Future Generation Computer Systems*, 126, 91-109. doi:10.1016/j.future.2021.07.022
- Sun, Z. H., Liang, D., Zhuang, Z., Chen, L., & Ming, X. (2021). Multi-task processing oriented production layout based on evolutionary programming mechanism. *Applied Soft Computing*, 98. doi:10.1016/j.asoc.2020.106896
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*: John Wiley and Sons.
- Tambunan, M., Ginting, E., & Sari, R. M. (2018). *Production facility layout by comparing moment displacement using BLOCPLAN and ALDEP Algorithms*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Targhi, N. S., Sabzehparvar, M., & Ebrahimnezhad, S. (2019). *A Mathematical Model for Robust Facility Layout Problem in 3D Space with Possibility of Floors*. Paper presented at the Proceedings of 2019 15th Iran International Industrial Engineering Conference, IIIEC 2019.
- Tarigan, U., Cahyo, F. D., Tarigan, U. P. P., & Ginting, E. (2019). *Facility Layout Design Through Integration of Lean Manufacturing Method and CORELAP Algorithm in Concrete Factory*. Paper presented at the 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Engineering.
- Tarigan, U., Ishak, A., Simanjuntak, L. S., Rizkya, I., Putri, K. S., & Tarigan, U. P. P. (2020). *Facility Layout Redesign with Static Facility Layout Planning (SFLP) and Dynamic Facility Layout Planning (DFLP) at Convection and Computer Embroidery Industry*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Tarigan, U., Tarigan, U. P. P., Rahman, I. H., & Rizkya, I. (2018). *Design of facility layout with lean service and market basket analysis method to simplification of service process in the supermarket*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Tasadduq, I. A., Imam, M. H., & Ahmad, A. (2015). A hybrid algorithm for optimising facility layout. *South African Journal of Industrial Engineering*, 26(1), 120-134. doi:10.7166/26-1-1013
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., Shafiee-Gol, S., & Mostafayi, S. (2015). *A new*

- mathematical model for dynamic cellular manufacturing system with considering several raw material with different lead times*. Paper presented at the Proceedings - CIE 45: 2015 International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Torabi, N., & Ghaseminejad, A. (2015). A quaternion firefly algorithm to solve a multi-row facility layout problem. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 28(11), 1605-1613. doi:10.5829/idosi.ije.2015.28.11b.08
- Tayal, A., Gunasekaran, A., Singh, S. P., Dubey, R., & Papadopoulos, T. (2017). Formulating and solving sustainable stochastic dynamic facility layout problem: a key to sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 253(1), 621-655. doi:10.1007/s10479-016-2351-9
- Tayal, A., & Singh, S. P. (2017). Integrated SA-DEA-TOPSIS-based solution approach for multi objective stochastic dynamic facility layout problem. *International Journal of Business and Systems Research*, 11(1-2), 82-100. doi:10.1504/IJBSR.2017.080839
- Tayal, A., & Singh, S. P. (2018). Integrating big data analytic and hybrid firefly-chaotic simulated annealing approach for facility layout problem. *Annals of Operations Research*, 270(1-2), 489-514. doi:10.1007/s10479-016-2237-x
- Tayal, A., & Singh, S. P. (2019a). Analysis of simulated annealing cooling schemas for design of optimal flexible layout under uncertain dynamic product demand. *International Journal of Operational Research*, 34(1), 85-103. doi:10.1504/IJOR.2019.096941
- Tayal, A., & Singh, S. P. (2019b). Formulating multi-objective stochastic dynamic facility layout problem for disaster relief. *Annals of Operations Research*, 283(1-2), 837-863. doi:10.1007/s10479-017-2592-2
- Tian, Y. F., Liao, R. J., & Farkoush, S. G. (2021). Placement and sizing of EESS bundled with uncertainty modeling by two-stage stochastic search based on improved shark smell optimization algorithm in micro-grids. *Energy Reports*, 7, 4792-4808. doi:10.1016/j.egyr.2021.07.019

- Tinello, D., Jodin, D., & Winkler, H. (2016). Biomimetics applied to factory layout planning: Fibonacci based patterns, spider webs and nautilus shell as bio-inspiration to reduce internal transport costs in factories. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 13, 51-71. doi:10.1016/j.cirpj.2016.02.003
- Tu, J. C., & Chiu, P. L. (2015). Fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS integrated multicriteria decision-making scheme employing Chinese environmental esthetics for facility layout design evaluation. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32(8), 473-485. doi:10.1080/21681015.2015.1072852
- Tubaileh, A., & Siam, J. (2017). Single and multi-row layout design for flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(12), 1316-1330. doi:10.1080/0951192X.2017.1314013
- Turanoğlu, B., & Akkaya, G. (2018). A new hybrid heuristic algorithm based on bacterial foraging optimization for the dynamic facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 98, 93-104. doi:10.1016/j.eswa.2018.01.011
- Turgay, S. (2018). Multi objective simulated annealing approach for facility layout design. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 3(4), 365-380.
- Ulutas, B., & Islier, A. A. (2015). Dynamic facility layout problem in footwear industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 55-61. doi:10.1016/j.jmsy.2015.03.004
- Uribe, N. R., Herrán, A., Colmenar, J. M., & Duarte, A. (2021). An improved GRASP method for the multiple row equal facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 182. doi:10.1016/j.eswa.2021.115184
- Uthayakumar, M., Adinarayanan, A., Prabhakaran, G., Slota, A., & Zajac, J. (2018). Arrangement of machine cell in cellular manufacturing system: A PSO approach. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 10(5), 247-257.
- Vadivel, S. M., & Sequeira, A. H. (2020) A novel approach for operational performance based mail sorting facility layout selection using grey relational analysis: A case on India speed post service industry. *Vol. 940* (pp. 1123-1132): Springer Verlag.

- Vadivel, S. M., Sequeira, A. H., & Jauhar, S. K. (2020) Metaheuristic for Optimize the India Speed Post Facility Layout Design and Operational Performance Based Sorting Layout Selection Using DEA Method. *Vol. 941* (pp. 1035-1044): Springer Verlag.
- Verma, P., & Om, H. (2019). MCRMR: Maximum coverage and relevancy with minimal redundancy based multi-document summarization. *Expert Systems with Applications*, 120, 43-56. doi:10.1016/j.eswa.2018.11.022
- Vin, E., & Boujraf, A. (2015). *SIMOGGA, the user-friendly solution to optimize and analyze the factories layout using genetic algorithms*. Paper presented at the Proceedings - CIE 45: 2015 International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- Vitayasak, S., & Pongcharoen, P. (2015) Genetic algorithm based robust layout design by considering various demand variations. *Vol. 9140* (pp. 257-265): Springer Verlag.
- Vitayasak, S., & Pongcharoen, P. (2015). Re-Layout and Robust Machine Layout Design under Stochastic Demand. *Applied Mechanics and Materials*, 789-790, 1252-1257. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.1252
- Vitayasak, S., & Pongcharoen, P. (2016) Application of genetic algorithm for quantifying the affect of breakdown maintenance on machine layout. *Vol. 10053 LNAI* (pp. 208-218): Springer Verlag.
- Vitayasak, S., & Pongcharoen, P. (2018). Performance improvement of Teaching-Learning-Based Optimisation for robust machine layout design. *Expert Systems with Applications*, 98, 129-152. doi:10.1016/j.eswa.2018.01.005
- Vitayasak, S., & Pongcharoen, P. (2020) Cooperative Designing of Machine Layout Using Teaching Learning Based Optimisation and Its Modifications. *Vol. 12341 LNCS. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (pp. 137-147).
- Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2015). *A Modified Backtracking Search Algorithm for redesigning machine layout with stochastic demand environment*. Paper presented at the 23rd International Conference for Production Research, ICPR 2015.
- Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2017). A tool for solving stochastic dynamic

- facility layout problems with stochastic demand using either a Genetic Algorithm or modified Backtracking Search Algorithm. *International Journal of Production Economics*, 190, 146-157. doi:10.1016/j.ijpe.2016.03.019
- Vitayasuk, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2019). Robust machine layout design under dynamic environment: Dynamic customer demand and machine maintenance. *Expert Systems with Applications: X*, 3. doi:10.1016/j.eswax.2019.100015
- Wan, X., Zuo, X., Li, X., & Zhao, X. (2020). A hybrid multiobjective GRASP for a multi-row facility layout problem with extra clearances. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2020.1847342
- Wan, X., Zuo, X. Q., & Zhao, X. C. (2021). A surrogate model-based hybrid approach for stochastic robust double row layout problem. *Mathematics*, 9(15). doi:10.3390/math9151711
- Wang, H., Xiao, W., Wu, L., Wei, K., Xu, C., Hou, C., . . . Li, J. (2019). Research on facility layout optimization algorithm of deep-water semi-submersible drilling platform. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(2), 669-675. doi:10.1007/s12206-019-0122-7
- Wang, H. F., & Chang, C. M. (2015). *Facility layout for an automated guided vehicle system*. Paper presented at the Procedia Computer Science.
- Wang, L., Wang, X., Liu, G., & Sheng, Z. (2020). Multi-objective shark smell optimization algorithm for train operation process based on preference. *Yi Qi Yi Biao Xue Bao/Chinese Journal of Scientific Instrument*, 41(10), 245-256. doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J2006473
- Wang, L., Wang, X., Sheng, Z., & Lu, S. (2020). Multi-objective shark smell optimization algorithm using incorporated composite angle cosine for automatic train operation. *Energies*, 13(3). doi:10.3390/en13030714
- Wang, L., & Xue, A. (2021). Equivalent modeling of microgrids based on optimized broad learning system. *Energies*, 14(23). doi:10.3390/en14237911
- Wang, R., Zhao, H., Wu, Y., Wang, Y., Feng, X., & Liu, M. (2018). An industrial facility layout design method considering energy saving based on surplus rectangle fill

- algorithm. *Energy*, 158, 1038-1051. doi:10.1016/j.energy.2018.06.105
- Wang, S., Zuo, X., Liu, X., Zhao, X., & Li, J. (2015). Solving dynamic double row layout problem via combining simulated annealing and mathematical programming. *Applied Soft Computing Journal*, 37, 303-310. doi:10.1016/j.asoc.2015.08.023
- Wang, W., Hu, Y., Xiao, X., & Guan, Y. (2019). *Joint optimization of dynamic facility layout and production planning based on Petri Net*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Wei, L. X., Zhao, M. L., Fan, R., & Zhou, H. X. (2019). Parameter tuning of active disturbance rejection control based on ameliorated shark smell optimization algorithm. *Kongzhi yu Juece/Control and Decision*, 34(4), 816-820. doi:10.13195/j.kzyjc.2017.1302
- Wei, X., Yuan, S., & Ye, Y. (2019). Optimizing facility layout planning for reconfigurable manufacturing system based on chaos genetic algorithm. *Production and Manufacturing Research*, 7(1), 109-124. doi:10.1080/21693277.2019.1602486
- Wei, Y., & Stanford, R. J. (2019). Parameter identification of solid oxide fuel cell by Chaotic Binary Shark Smell Optimization method. *Energy*, 188. doi:10.1016/j.energy.2019.07.100
- Wen, M., Qin, Z., Kang, R., & Yang, Y. (2015). The capacitated facility location-allocation problem under uncertain environment. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 29(5), 2217-2226. doi:10.3233/IFS-151697
- Wen, Y., & Ting, C. (2018, 26-28 Sept. 2018). *Designing Facility Layouts with Hard and Soft Constraints by Evolutionary Algorithm*. Paper presented at the 2018 First International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I).
- Weng, S. J., Tsai, M. C., Tsai, Y. T., Gotcher, D. F., Chen, C. H., Liu, S. C., . . . Kim, S. H. (2019). Improving the Efficiency of an Emergency Department Based on Activity-Relationship Diagram and Radio Frequency Identification Technology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22). doi:10.3390/ijerph16224478
- Wu, Q., & Shafiee, M. (2020). Modeling and optimization of SOFC based on

- Metaheuristics. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(11), 11008-11023. doi:10.20964/2020.11.01
- Wu, Z., Qi, S., Shang, M., & Shen, D. (2020). Grid-connected equivalent modeling of DC microgrid based on optimized extreme learning machine. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*, 40(6), 43-48. doi:10.16081/j.epae.202005030
- Xiao, X., Hu, Y., Wang, W., & Ren, W. (2019). *A robust optimization approach for unequal-area dynamic facility layout with demand uncertainty*. Paper presented at the Procedia CIRP.
- Xiao, Y., Xie, Y., Kulturel-Konak, S., & Konak, A. (2017). A problem evolution algorithm with linear programming for the dynamic facility layout problem—A general layout formulation. *Computers and Operations Research*, 88, 187-207. doi:10.1016/j.cor.2017.06.025
- Xiao, Y. J., Zheng, Y., Zhang, L. M., & Kuo, Y. H. (2016). A combined zone-LP and simulated annealing algorithm for unequal-area facility layout problem. *Advances in Production Engineering And Management*, 11(4), 259-270. doi:10.14743/apem2016.4.225
- Xie, Y., Zhou, S., Xiao, Y., & Chang, W. (2016). *A new area linearization method for Unequal area facility layout problem*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Xu, J., & Song, X. (2015). Multi-objective dynamic layout problem for temporary construction facilities with unequal-area departments under fuzzy random environment. *Knowledge-Based Systems*, 81, 30-45. doi:10.1016/j.knosys.2015.02.001
- Xu, L., Si, Y., Jiang, S., Sun, Y., & Ebrahimian, H. (2020). Medical image fusion using a modified shark smell optimization algorithm and hybrid wavelet-homomorphic filter. *Biomedical Signal Processing and Control*, 59. doi:10.1016/j.bspc.2020.101885
- Xu, S., Wang, Y., & Feng, X. (2020). Plant layout optimization for chemical industry considering inner frame structure design. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6).

doi:10.3390/su12062476

- Xu, X. (2020). *SLP-based technical plant layout planning and simulation analysis*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Zarea Fazlelahi, F., Pournader, M., Gharakhani, M., & Sadjadi, S. J. (2016). A robust approach to design a single facility layout plan in dynamic manufacturing environments using a permutation-based genetic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(12), 2264-2274. doi:10.1177/0954405415615728
- Zha, S., Guo, Y., Huang, S., Wang, F., & Huang, X. (2017). *Robust Facility Layout Design under Uncertain Product Demands*. Paper presented at the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Zha, S., Guo, Y., Huang, S., Wu, Q., & Tang, P. (2020). A hybrid optimization approach for unequal-sized dynamic facility layout problems under fuzzy random demands. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(3), 382-399. doi:10.1177/0954405419883046
- Zhang, C. X., Dong, S. L., Chu, H. Y., Ding, G. Z., Liu, Z. F., Guo, S. Y., & Yang, C. B. (2021). Layout design of a mixed-flow production line based on processing energy consumption and buffer configuration. *Advances in Manufacturing*, 9(3), 369-387. doi:10.1007/s40436-021-00354-1
- Zhang, X., Wang, L., & Chen, Y. (2019). Multi-Objective Optimization for Multi-Line and U-Shape Layout of Sewing Assembly Line in Apparel Industry. *IEEE Access*, 7, 107188-107200. doi:10.1109/ACCESS.2019.2932720
- Zhao, D., Aranha, C., & Kanoh, H. (2017). *Solving real-world facility layout problems using GA with Levy Flights and multi-decoding*. Paper presented at the Proceedings - 18th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD 2017.
- Zhao, F., Li, G., Hu, H., Du, J., Guo, C., & Li, T. (2015). *A novel improved hybrid particle swarm optimisation based genetic algorithm for the solution to layout problems*. Paper presented at the Proceedings of the World Congress on Intelligent Control

and Automation (WCICA).

- Zhao, L. (2021). *Layout design of new production shop based on SLP*. Paper presented at the E3S Web of Conferences.
- Zhao, Y., Lu, J., Yan, Q., Lai, L., & Xu, L. (2020). Research on cell manufacturing facility layout problem based on improved NSGA-II. *Computers, Materials and Continua*, 62(1), 355-364. doi:10.32604/cmc.2020.06396
- Zhao, Y., Lu, J., & Yi, W. (2020). A new cellular manufacturing layout: Multi-floor linear cellular manufacturing layout. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3). doi:10.1177/1729881420925300
- Zhao, Y., & Wallace, S. W. (2015). A heuristic for the single-product capacitated facility layout problem with random demand. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(3), 379-398. doi:10.1007/s13676-014-0052-6
- Zhao, Y., & Wallace, S. W. (2016). Appraising redundancy in facility layout. *International Journal of Production Research*, 54(3), 665-679. doi:10.1080/00207543.2015.1030041
- Zhou, B., & Lu, Y. (2017). Improved PSO for integrating dynamic cell formation and layout problems. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 33(4), 409-415. doi:10.3969/j.issn.1003-7985.2017.04.004
- Zhou, J., Love, P. E. D., Teo, K. L., & Luo, H. (2017). An exact penalty function method for optimising QAP formulation in facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 55(10), 2913-2929. doi:10.1080/00207543.2016.1229068
- Zhou, J. L., Wang, J. S., Zhang, Y. X., Guo, Q. S., Li, H., & Lu, Y. X. (2020). *Particle Swarm Optimization Algorithm with Variety Inertia Weights to Solve Unequal Area Facility Layout Problem*. Paper presented at the Proceedings of the 32nd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2020.
- Zhou, Y., Ye, J., Du, Y., & Sheykahmad, F. R. (2020). New Improved Optimized Method for Medical Image Enhancement Based on Modified Shark Smell Optimization Algorithm. *Sensing and Imaging*, 21(1). doi:10.1007/s11220-020-00283-6
- Zhun, X., Liyun, X., & Xufeng, L. (2021). *An Improved Pigeon-inspired Optimization*

Algorithm for Solving Dynamic Facility Layout Problem with Uncertain Demand.

Paper presented at the Procedia CIRP.

- Zúñiga, E. R., Moris, M. U., Syberfeldt, A., Fathi, M., & Rubio-Romero, J. C. (2020). A simulation-based optimization methodology for facility layout design in manufacturing. *IEEE Access*, 8, 163818-163828. doi:10.1109/ACCESS.2020.3021753
- Zuo, X., Gao, S., Zhou, M., Yang, X., & Zhao, X. (2019). A Three-Stage Approach to a Multirow Parallel Machine Layout Problem. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(1), 433-447. doi:10.1109/TASE.2018.2866377
- Zuo, X., Liu, X., Zhang, Q., Li, W., Wan, X., & Zhao, X. (2021). MOEA/D with Linear Programming for Double Row Layout Problem with Center-Islands. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(7), 3549-3561. doi:10.1109/TCYB.2019.2937115
- Zuo, X. Q., Murray, C. C., & Smith, A. E. (2016). Sharing clearances to improve machine layout. *International Journal of Production Research*, 54(14), 4272-4285. doi:10.1080/00207543.2016.1142134
- Zupan, H., Herakovic, N., Zerovnik, J., & Berlec, T. (2017). Layout optimization of a production cell. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(4), 603-616. doi:10.2507/IJSIMM16(4)4.396
- กิตติพงษ์ ดาพา, (2555). การจัดเรียงเครื่องจักรในระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นด้วยวิธีการแบทอัลกอริทึม. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ณัฐพงษ์ คำขาด. (2551). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการพาร์ทิเคิลสวอมมอปติไมเซชันและเจเนติกอัลกอริทึมเพื่อการจัดเรียงเครื่องจักรในระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น. (วท.ม.), มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- ธนภัทร เข้มมตาล, น. ห. (2553). การประยุกต์ใช้ซัพเฟลเฟอร์กลิปบั้งอัลกอริทึมเพื่อการจัดเรียงเครื่องจักรในระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น. (การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วท.ม.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ธิปไตย โสติถิวรรณ, ช. ม. (2560). Management Planning for Food Packaging, Case of Varies Production Capacity. *ACADEMIC JOURNAL BANGKOKTHONBURI UNIVERSITY*, Vol.6 (No.1), 17.

- ปกรณ ศรีอัมพรศานต์, ว. ร. (2557). วิธีการใหม่สำหรับสร้างแผนภูมิจากไปเพื่อแก้ไขปัญหาความไม่แน่นอนของข้อมูลในปัญหาการวางแผนโรงงานแบบพลวัต. *Jurnal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University*, 4(1), 69.
- พงศ์อมร วังตา. (2554). การประยุกต์ใช้วิธีทฤษฎีกราฟเพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการค้นหาแบบทวิภาคเพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักรที่ใช้รถขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ. (การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วท.ม.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- พรพิมล สร้อยมาต. (2554). การประยุกต์ใช้วิธีการอาร์ทีพีซีแอลบีโคโลนีสำหรับการออกแบบการจัดเรียงเครื่องจักร. (วิทยานิพนธ์ วท.ม.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- พัชรภรณ์ อริยะวงษ์. (2550). การจัดเรียงเครื่องจักรในระบบยืดหยุ่นด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม. (การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วท.ม.), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ศรีสัจจา วิทยศักดิ์. (2559). การออกแบบการจัดเรียงเครื่องจักร ที่คำนึงถึงการบำรุงรักษาเครื่องจักรและความยืดหยุ่นของเส้นทางการผลิต ภายใต้ข้อจำกัดที่ไม่แน่นอน. (ปร.ด. สาขาวิศวกรรมการจัดการ), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ. (2561). การจัดตารางการผลิตและการบำรุงรักษาสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกส์. (ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการจัดการ), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ. (2558). การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมเชิงชีวภูมิศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงเครื่องจักร. (ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ. (2563). การบูรณาการการจัดตารางการผลิตแบบหลายคำสั่งซื้อและการขนส่งหลายรูปแบบสำหรับอุตสาหกรรมสินค้าประเภททุนโดยใช้เมตาฮิวริสติกส์ (ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการจัดการ), มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- อารีรัตน์ เนือสีจัน. (2556). การประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบนกกาเหว่าเพื่อจัดเรียงเครื่องจักรในอุตสาหกรรม. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยนเรศวร, มหาวิทยาลัยนเรศวร. หอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยนเรศวร.