

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ การกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ สำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสาย การประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

กรรณ จิตเมตตา และ ปารเมศ ชูติมา*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Email: guide_as21@hotmail.com, cparames@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านถูกออกแบบมาเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น รถโดยสารประจำทาง รถบรรทุก รถยนต์ และเครื่องใช้ ซึ่งการจัดลำดับการผลิตมีความจำเป็นที่จะต้องถูกพิจารณาอย่างเหมาะสม เพื่อให้สายการประกอบสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ทว่าปัญหาการจัดลำดับสำหรับสายการประกอบดังกล่าวนี้ถูกจัดอยู่ในประเภทเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหานั้นเป็นไปได้อย่างยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยจะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชัน ไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด โดยจะเทียบประสิทธิภาพของ BBO กับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับทั่วไปว่ามีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ NSGA-II และ DPSO ภายใต้ 4 ตัวชี้วัด ผลการเปรียบเทียบพบว่า BBO สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ดีกว่า NSGA-II และ DPSO

คำสืบค้น

การหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์, การจัดลำดับการผลิต, สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน, ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

An Application of Biogeography-Based Optimization for Sequencing Problems on Mixed-Model Two-sided Assembly Lines

Karn Jitmetta and Parames Chutima*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand
Email: guide_as21@hotmail.com, cparames@chula.ac.th*

ABSTRACT

Mixed-model two-side assembly lines are designed for high volume manufacturing of similar and large-sized product models, e.g. buses, trucks, automobiles and appliances. To achieve the highest effectiveness of the assembly lines, the sequencing problem needs to be optimized. Since this type of problem is NP-hard, a new metaheuristic namely biogeography-based optimization (BBO) is adapted for multi-objective sequencing problems on mixed-model two-sided assembly lines. Two objectives are simultaneously considered, i.e. minimize total setup cost and minimize total utility work. The performance of BBO is tested against two well-known algorithms, namely NSGA-II and DPSO, based on four metrics. The computational results show that BBO outperforms DPSO and NSGA-II on all aspects.

KEYWORDS

Biogeography-based optimization, sequencing, mixed-model two-sided assembly line, multi-objective function.

I. บทนำ

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีปริมาณการผลิตสูง เช่น รถบัส รถบรรทุก รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ตู้เย็น ตู้อบ และเครื่องซักผ้า [1] การเลือกใช้สายการประกอบดังกล่าวควรมีการพิจารณาปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing) และปัญหาการจัดลำดับการผลิต (Sequencing) เพื่อให้การทำงานของสายการประกอบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้ขอให้นักให้สายการประกอบดังกล่าวได้ถูกจัดสมดุลมาแล้ว และจะศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตเท่านั้น

ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านเป็นปัญหาประเภท NP-hard [2] หมายความว่า ถ้าปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้คำตอบที่เป็นไปได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นไปได้ยากโดยเฉพาะปัญหาขนาดใหญ่ วิธีเมทาฮิวริสติก (Metaheuristic) จึงถูกนำมาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งเป็นวิธีที่นักวิชาการให้การยอมรับและนิยมเลือกใช้ เพราะสามารถค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดและใช้เวลาค้นหาคำตอบไม่นานจนเกินไป เช่น งานวิจัยของ Hyun และคณะ [3] ได้พัฒนาเจเนติกอัลกอริทึมขึ้นมาใหม่ที่มีชื่อว่า Pareto Stratum-Niche Cubic Genetic Algorithm (PS-NC GA) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณามี 3 ฟังก์ชัน ได้แก่ ความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด Mansouri [4] ได้เสนอวิธีเจเนติกอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการจัดลำดับที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm: MOGA) โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสรุปผลได้ว่า MOGA เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่ดีเหมาะกับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต Liao และคณะ [5] ได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิต ที่เรียกว่า Discrete Version of Particle Swarm Optimization (DPSO) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง DPSO กับเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) และสรุปผลว่า DPSO มีประสิทธิภาพสูงกว่า GA ต่อมา Rahimi-Vahed และคณะ [2] ได้พัฒนาเจเนติกอัลกอริทึมขึ้นมาใหม่ที่มีชื่อว่า Multi-Objective Scatter Search (MOSS) โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เหมือนกับงานวิจัยของ Hyun และคณะ [3] ซึ่งสรุปผลงานวิจัยไว้ว่า MOSS มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดีกว่า NSGA-II และ NSGA-II มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดีกว่า PS-NC GA แต่สิ่งที่ MOSS ด้อยกว่าอัลกอริทึมทั้งสองอย่างชัดเจน คือ MOSS ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่ามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้แก้ปัญหาในอุตสาหกรรมจริง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การพัฒนาอัลกอริทึมควรพิจารณาประสิทธิภาพทั้งด้านคุณภาพคำตอบที่ดี และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีเมทาฮิวริสติกที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) ซึ่งพัฒนามาจากวิธี BBO ของ Simon [6] โดยจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของ BBO กับวิธีเมทาฮิวริสติกที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพที่ดี ได้แก่ NSGA-II [7] และ DPSO [5]

II. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Line) ถูกออกแบบมาเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีปริมาณการผลิตสูง สายการประกอบดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบด้านเดียว และแบบสองด้าน โดยสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบด้านเดียว

เหมาะกับผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก ส่วนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านเหมาะกับผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เช่น รถบัสนั่งรถบรรทุก รถยนต์นั่งส่วนบุคคล เป็นต้น โดยสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีลักษณะดังรูปที่ 1 ซึ่งมีสายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์อยู่ตรงกลางระหว่างสถานีงาน (Work Station: n_w) ด้านซ้ายและด้านขวา โดยสถานีงานที่อยู่ตรงข้ามกันแบบสถานีงานที่ 1 และ 2 เรียกว่า คู่สถานีงาน (Mated Station: n_m) ที่ 1 ส่วนสถานีงานที่ 3 และ 4 เรียกว่า คู่สถานีงานที่ 2 โดยลักษณะดังกล่าวทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีข้อดีกว่าแบบด้านเดียว คือ ใช้พื้นที่การผลิตน้อยกว่า ช่วยลดระยะทางการเคลื่อนที่ของพนักงาน ช่วยลดเวลาการปรับตั้งเครื่อง และช่วยลดต้นทุนด้านเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ในคู่สถานีงานเดียวกัน [1]

สายการประกอบแบบสองด้านได้แบ่งชิ้นงานที่จัดสรรลงในสายการประกอบออกเป็น 3 ประเภท คือ ชิ้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านซ้ายเท่านั้น (Left-Type: L) ชิ้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านขวาเท่านั้น (Right-Type: R) และชิ้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบได้ทั้งสองด้าน (Either-Type: E) เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์กำหนดให้ชิ้นงานการประกอบพวงมาลัยรถยนต์ที่ขายในประเทศไทยเป็นแบบ R ส่วนชิ้นงานการประกอบหม้อกรองอากาศให้เป็นแบบ L และชิ้นงานการประกอบกันชนเป็นแบบ E เป็นต้น

การจัดสรรชิ้นงานลงสู่สถานีต่างๆ ของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีขั้นตอนดังนี้ (1) กำหนดรอบเวลาการผลิต (Cycle Time: CT) โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 10 หน่วย (2) กำหนดสัดส่วนผลิตภัณฑ์ในหนึ่งรอบการผลิต (Minimum Part Set: MPS) โดยเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ผลิตภัณฑ์ผสม (d_1, \dots, d_M) เมื่อ $d_m = D_m/h$ โดยที่ d_m คือ จำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ m ($m = 1, 2, \dots, M$), M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และ h คือ ตัวหารร่วมมากของ (D_1, D_2, \dots, D_M) โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้ MPS = (1,1,1) ดังตารางที่ 1 และ (3) คำนวณเวลาการดำเนินงานเฉลี่ยของชิ้นงาน k (\bar{p}_k) ตามสัดส่วนผลิตภัณฑ์ โดยมีสมการดังนี้

$$\bar{p}_k = \sum_{m=1}^M p_{k,m} d_m / \sum_{m=1}^M d_m ; k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

เมื่อ p_{km} คือ เวลาการดำเนินงานในชิ้นงาน k ของผลิตภัณฑ์ m โดยในตัวอย่างนี้แสดงผลการคำนวณค่า \bar{p}_k ไว้ในตารางที่ 1 และพิจารณาเงื่อนไขการจัดสรรชิ้นงานลงสู่สายการประกอบ ได้แก่ เงื่อนไขการจัดสรรชิ้นงานลงในแต่ละด้านของสายการประกอบและเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อนหลัง (Precedence Constraint) โดยในตัวอย่างนี้จะพิจารณาจากรูปที่ 2 ทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรชิ้นงานลงในสายการประกอบแต่ละด้าน ที่กำหนดให้ชิ้นงาน w กับชิ้นงาน y สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านซ้ายเท่านั้น, ชิ้นงาน z สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านขวาเท่านั้น และชิ้นงาน x สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบได้ทั้งสองด้าน และทราบเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อนหลัง ที่กำหนดให้ชิ้นงาน w และ x สามารถเริ่มงานได้ทันที ชิ้นงาน w และ x ต้องทำเสร็จก่อนจึงจะเริ่มชิ้นงาน y และชิ้นงาน y ต้องทำเสร็จก่อนจึงจะเริ่มชิ้นงาน z ได้

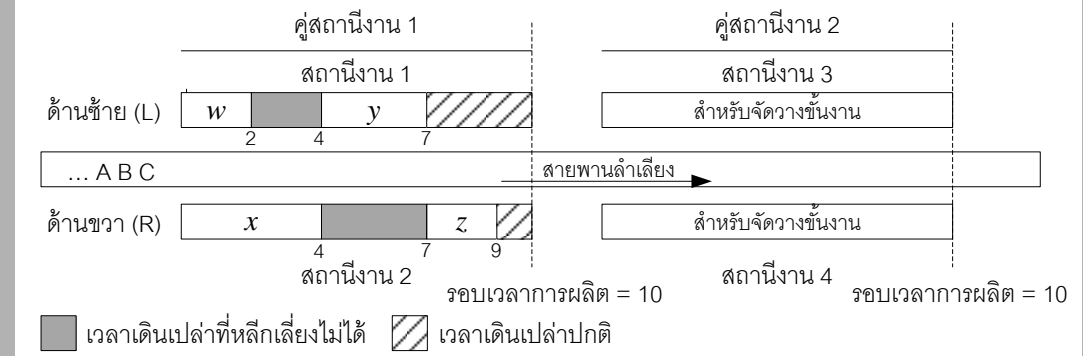
ชิ้นงาน	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (A,B,C) = (1,1,1)			เวลาเฉลี่ย (\bar{p}_k)
	A	B	C	
w	3	2	1	2
x	5	3	4	4
y	4	1	4	3
z	2	1	3	2

ตารางที่ 1

เวลาการดำเนินงานในแต่ละชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C

รูปที่ 1

สายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบสอง
ด้าน



จากการจัดสรรชิ้นงานลงในสายการประกอบตามเงื่อนไขที่กล่าวมาจะได้ผลดังรูปที่ 1 ทำให้ทราบข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบด้านเดียวและแบบสองด้าน คือ สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบด้านเดียวจะมีเวลาเดินเปล่าเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานในสถานีงานเดียวกันเพียงแบบเดียว คือ เวลาเดินเปล่าปกติ (Regular Idle Time: R) แต่สำหรับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านจะมีเวลาเดินเปล่าเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานในสถานีงานเดียวกัน 2 แบบ คือ เวลาเดินเปล่าปกติ และเวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ (Unavoidable Idle Time: Y) โดยสังเกตได้จากบริเวณที่แรเงาด้วยเส้นทแยงมุม และสีเทาตามลำดับ ดังนั้นเวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m ที่แท้จริง ($t'_{n_w,m}$) จึงเท่ากับเวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m ($t_{n_w,m}$) บวกกับเวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w (Y_{n_w}) โดยมีสมการดังนี้

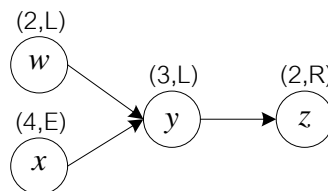
$$t_{n_w,m} = \sum_{k \in K_{n_w}} p_{k,m} \quad (2)$$

$$t'_{n_w,m} = t_{n_w,m} + Y_{n_w} \quad (3)$$

เมื่อ $p_{k,m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในชิ้นงาน k ของผลิตภัณฑ์ m และ K_{n_w} คือ เซตของชิ้นงานที่อยู่ในสถานีงาน n_w โดยเงื่อนไขที่กล่าวมาในข้างต้นและเวลาดำเนินงานในตารางที่ 1 สามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณเวลาการดำเนินงานในสถานีงานที่ 1 และ 2 ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2 และตัวอย่างสายการประกอบขณะผลิตผลิตภัณฑ์ A ได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสายการประกอบในรูปที่ 1 ขณะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ A โดยการเพิ่มขึ้นของเวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จะส่งผลต่อการลดลงของเวลาเดินเปล่าปกติ และการเพิ่มขึ้นของปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ (Utility Work)

รูปที่ 2

เงื่อนไขการจัดสรรชิ้นงาน
หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บ คือ
เวลาดำเนินงานเฉลี่ยและ
ด้านของสายการประกอบ

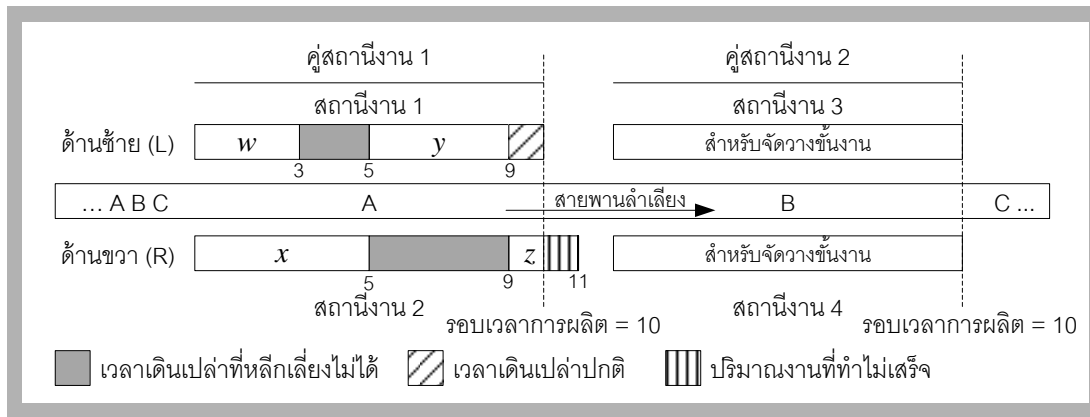


ตารางที่ 2

เวลาการดำเนินงานในสถานีงานที่ 1 และ 2

หมายเหตุ: () คือ ค่า $t_{n_w,m}$ และ [] คือ ค่า Y_{n_w}

สถานีงาน	ผลิตภัณฑ์		
	A	B	C
1	$(3+4)+[2]=9$	$(2+1)+[1]=4$	$(1+4)+[3]=8$
2	$(5+2)+[4]=11$	$(3+1)+[1]=5$	$(4+3)+[4]=11$



รูปที่ 3

สายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบสอง
ด้านขณะผลิตผลิตภัณฑ์
A

III. การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์เดียวเป็นการค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียว จึงทำให้คำตอบที่ดีที่สุดมีเพียงคำตอบเดียวเท่านั้น แต่สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ เป็นการค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กัน จึงเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปไม่ได้เลยที่จะมีคำตอบที่ดีที่สุดเพียงคำตอบเดียว โดยคำตอบที่ได้จะเป็นในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์คณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize}_{x \in \Omega} \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (4)$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ, Ω คือ บริเวณคำตอบที่เป็นไปได้ และ $f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ; $i = 1, 2, \dots, k$

จากปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์สมมติว่ามีคำตอบที่ค้นพบจากบริเวณคำตอบที่เป็นไปได้ 2 คำตอบ คือ คำตอบ a และ b โดยจะเรียกคำตอบ a ว่าเป็นคำตอบที่เด่นกว่าหรือครอบงำ (Dominate) คำตอบ b ($a > b$) ก็ต่อเมื่อทั้งสองเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$f_i(a) \leq f_i(b) ; \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (5)$$

$$\text{และ } f_i(a) < f_i(b) ; \exists i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (6)$$

โดยคำตอบที่ครอบงำคำตอบอื่นแต่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลยเราเรียกคำตอบนั้นว่า คำตอบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated Solution) หรือคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Solution) และเมื่อนำคำตอบที่ดีที่สุดมารวมกัน เราเรียกว่า กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) โดยกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับขั้นที่ดีที่สุดของบริเวณคำตอบที่เป็นไปได้หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) [8]

IV. ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังนี้ (1) เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ด้วยระบบสายพานลำเลียงที่มีความเร็วคงที่ (v_c) และมีอัตราการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบคงที่, (2) สายการประกอบถูกแบ่งออกเป็น n_w สถานีนงาน และเป็นสถานีนงานแบบปิด พนักงานจึงต้องทำงานอยู่ภายในขอบเขตของสถานีนงานที่กำหนดเท่านั้น, (3) สายการประกอบมีการจัดความสมดุลเรียบร้อยแล้ว, (4) ไม่คำนึงถึงเวลาการเดินของพนักงานในระหว่างการประกอบผลิตภัณฑ์, (5) การเริ่มทำงานของพนักงานที่อยู่ในคู่สถานีนงานเดียวกันจะเริ่มทำงานพร้อมกันและเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อพนักงานที่มีภาระงานมากกว่าทำงานเสร็จ, (6) ในหนึ่งรอบการผลิตจะมีผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ตามสัดส่วน MPS, และ (7) การคำนวณหาช่วงเวลาการ

ปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ (γ) และระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงาน (w) โดยผู้วิจัยได้ทำการดัดแปลงสมการที่ 8 มาจากงานวิจัยของ Hyun และคณะ [2] เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\gamma = T/(I \times N_m) \quad (7)$$

$$T = \sum_{n_m=1}^{N_M} \max[\sum_{m=1}^M (t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m})d_m, \sum_{m=1}^M (t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m})d_m] \quad (8)$$

$$I = \sum_{m=1}^M d_m \quad (9)$$

$$w = \gamma v_c \quad (10)$$

เมื่อ T คือ เวลาการผลิตทั้งหมดในหนึ่งรอบการผลิต, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด และ M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.1.1 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด

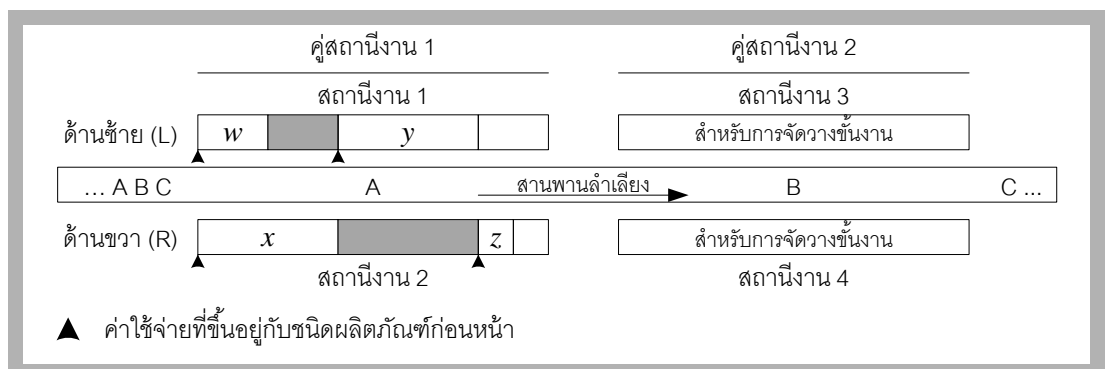
การพิจารณาค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรที่ขึ้นอยู่กับชนิดผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า (Sequence Dependent Setup Cost) เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต [2] โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Minimize } f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^I s_{i-1,i}^{n_w} \quad (11)$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$ และ K คือ ชิ้นงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ โดยการเกิดค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4

การเกิดค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักร



4.1.2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จที่น้อยที่สุด

การหาปริมาณงานที่ไม่เสร็จที่น้อยที่สุด (Utility Work) เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยสร้างความสมดุลระหว่างปริมาณงานกับพนักงานและช่วยให้สามารถจัดการจำนวนพนักงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้ทำการดัดแปลงสมการที่ 13 และ 14 มาจากงานวิจัยของ Hyun และคณะ [2] เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Minimize } f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} (\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m} / v_c) \quad (12)$$

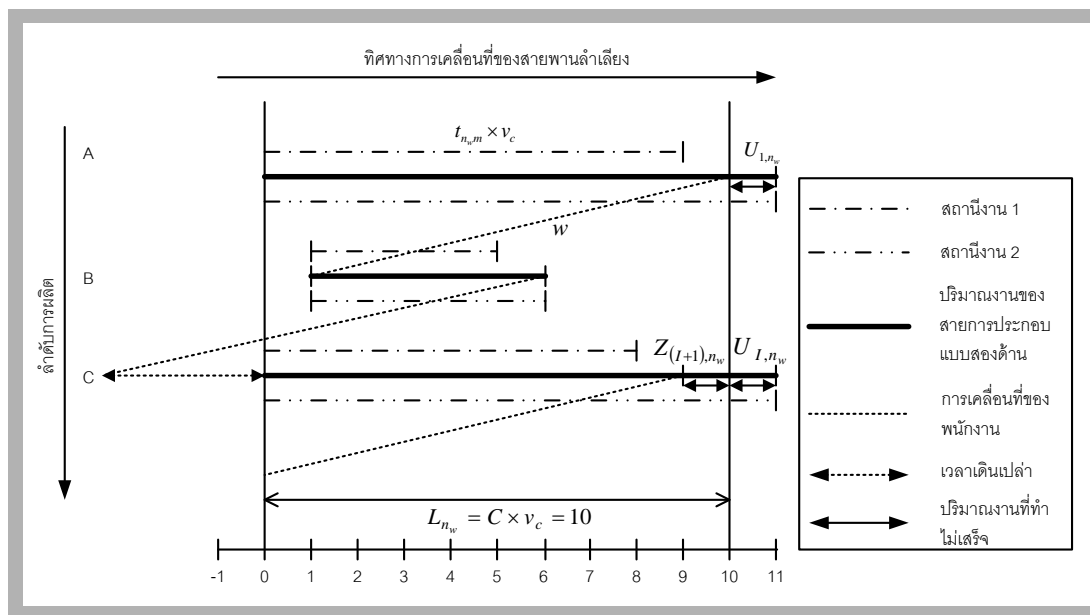
โดยที่

$$U_{i,n_m} = \begin{cases} \max[0, (Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} (t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}) - L_{n_m}) / v_c] \\ + \max[0, (Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} (t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}) - L_{n_m}) / v_c] \end{cases} \quad (13)$$

$$Z_{(i+1),n_m} = \max \begin{cases} \max[0, \min(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} (t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c)] \\ \max[0, \min(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} (t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c)] \end{cases} \quad (14)$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีนงาน n_m , Z_{i,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีนงาน n_m , I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีนงานทั้งหมด, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, $X_{i,m}$ คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w,m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีนงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m , L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีนงาน n_w ($L_{n_w} = v_c \times CT$), w คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงาน และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1 หน่วย

จากรูปที่ 5 ทำให้ทราบว่าปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของสถานีนงานหนึ่งเกิดขึ้นจากงานที่เกินขอบเขตสถานีนงานที่กำหนดบวกกับเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ $I + 1$ โดยสาเหตุที่ต้องนำเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ $I + 1$ มารวมด้วย เนื่องจากการเริ่มทำงานแรกในรอบการผลิตถัดไปจะเริ่มทำงานที่ต้นสถานีนงานเสมอ



รูปที่ 5

การเกิดปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ

4.2 จำนวนลำดับการผลิตที่เป็นไปได้

ในปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมสามารถคำนวณหาจำนวนลำดับการผลิตที่เป็นไปได้ (Feasible Sequences) [9] จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Feasible Sequences} = \frac{(\sum_{m=1}^M d_m)!}{\prod_{m=1}^M (d_m!)} \quad (15)$$

4.3 ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

ปัญหาการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปัญหามาตรฐานของ McMullen [10] โดยแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ประเภท คือ ปัญหาขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ โดยปัญหาขนาดเล็กประกอบด้วย Set 1.1-2.2 และปัญหาขนาดใหญ่ประกอบด้วย Set 3.1-5.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

รายละเอียดปัญหาการ
ทดลอง

ปัญหาการ ทดลอง	จำนวนชนิด ผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS)	ความยาว สตริง	จำนวนคำตอบ ที่เป็นไปได้	ช่วงเวลาการปล่อย ผลิตภัณฑ์ (γ)
Set 1.1	5	4:3:2:2:1	12	831600	467.51
Set 1.2	5	3:3:2:2:2	12	1663200	470.51
Set 2.1	5	4:3:3:3:2	15	1.26E+08	467.93
Set 2.2	5	3:3:3:3:3	15	1.68E+08	470.33
Set 3.1	5	5:4:4:4:3	20	2.44E+11	468.53
Set 3.2	5	4:4:4:4:4	20	3.06E+11	470.33
Set 4.1	10	4:4:4:2:1:1:1:1:1:1	20	8.80E+13	480.20
Set 4.2	10	2:2:2:2:2:2:2:2:2:2	20	2.38E+15	480.20
Set 5.1	15	15:15:10:10:10:10:10:10:4:1:1:1:1:1:1	100	9.96E+92	480.20
Set 5.2	15	7:7:7:7:7:7:7:7:7:6:6:6:6:6:6	100	4.56E+106	480.20

V. วิธี BBO ที่นำเสนอ

แนวคิดและวิธีการทำงานของ Biogeography-Based Optimization (BBO) ที่นำมาประยุกต์กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดถูกเผยแพร่ครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 2008 โดย Simon [6] ซึ่งหลังจากนั้นจึงมีงานวิจัยได้นำ BBO มาศึกษาแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่พอสมควร เช่น ปัญหาการหาเส้นทางการเดินที่ที่ดีที่สุด [11, 12] ปัญหาการจ่ายโหลดไฟฟ้าที่ดีที่สุด [13] และ ปัญหาการหาจุดจ่ายน้ำประปาที่ดีที่สุด [14] โดย BBO ได้พัฒนาจากหลักการการกระจายของสปีชีส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่อธิบายถึงวิธีการอพยพของสปีชีส์จากเกาะหนึ่งไปยังเกาะอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดสปีชีส์ใหม่และการสูญพันธุ์ของสปีชีส์ [15] โดยเกาะ (Island) หมายถึงถิ่นที่อยู่อาศัยของสปีชีส์ที่ถูกแยกออกจากถิ่นที่อยู่อาศัยอื่นด้วยน้ำ โดยเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์เหมาะกับการอยู่อาศัยจะมีจำนวนสปีชีส์อาศัยอยู่มาก (สปีชีส์เคาท์สูง) จึงกำหนดให้มีดัชนีความสามารถอยู่อาศัยที่เหมาะสม (Habitat Suitability Index: HSI) สูง และในทางตรงกันข้าม ถ้าเกาะใดมี HSI ต่ำแสดงว่ามีจำนวนสปีชีส์อาศัยอยู่น้อย (สปีชีส์เคาท์ต่ำ) โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า HSI เช่น ปริมาณน้ำฝน ขนาดพื้นที่ และอุณหภูมิ เราเรียกว่า ตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable: SIV) ดังนั้นเกาะที่มี HSI สูงจะมีอัตราการอพยพเข้าต่ำและอัตราการอพยพออกสูง เนื่องจากมีสปีชีส์อาศัยอยู่ในเกาะค่อนข้างแออัดจึงเหลือพื้นที่สำหรับสปีชีส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามาน้อยและสปีชีส์ที่อาศัยอยู่ก็พยายามอพยพออกจากเกาะเพราะความแออัด และในทางตรงกันข้าม เกาะที่มี HSI ต่ำจะมีอัตราการอพยพเข้าสูงและอัตราการอพยพออกต่ำ เนื่องจากมีสปีชีส์อาศัยอยู่ในเกาะน้อยจึงมีพื้นที่สำหรับสปีชีส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามาได้มากและสปีชีส์ที่อาศัยอยู่ก็ไม่พยายามอพยพออกจากเกาะเพราะชอบที่อยู่อาศัยแบบไม่แออัด

สำหรับ BBO ที่นำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะใช้สตริงคำตอบแทนเกาะ โดยสตริงคำตอบของ BBO ประกอบไปด้วยคุณลักษณะเฉพาะตัว (Feature) หรือ SIV ซึ่งเปรียบได้กับยีน (Gene) หรือ บิต (Bit) ในเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GAs) โดยสตริงคำตอบจะมีค่า HSI หรือค่าสปีชีส์เคาท์ (Species Count) ที่ได้จากการประเมินค่าความเหมาะสม ซึ่งมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง (Fitness) ใน GAs โดยสตริงคำตอบที่ดีจะมีค่าสปีชีส์เคาท์มากแต่ค่าความแข็งแรงน้อย และสตริงคำตอบที่แยจะมีค่าสปีชีส์เคาท์น้อยแต่ค่าความแข็งแรงมาก ดังรูปที่ 6 จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่ประเมินค่า

ความเหมาะสมแล้วเข้าสู่ขั้นตอนการอพยพและการมิวเตชัน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะมีผลต่อประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของ BBO ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1-5.7

5.1 การสร้างคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีสุ่มจะทำเฉพาะรอบการทำงานที่ 1 เท่านั้น โดยเริ่มจากการกำหนดสัดส่วนผลิตภัณฑ์ในสตริงคำตอบ ซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ในสตริงคำตอบประกอบด้วย AABCC จากนั้นจึงทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4 และพิจารณาเลือกงานให้กับแต่ละบิตโดยใช้วิธีการสุ่มแบบไม่ซ้ำด้วยโอกาสในการถูกเลือกที่เท่ากันทั้งหมด โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้สร้างสตริงคำตอบจำนวน 5 สตริง ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 5 ส่วนสตริงคำตอบเริ่มต้นของรอบการทำงานที่ 2 เป็นต้นไป จะได้มาจากการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของรอบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.6

ประเภทสตริงคำตอบ	รหัส					
สตริงผลิตภัณฑ์	A	A	B	B	C	C
สตริงงาน	1	2	3	4	5	6

ตารางที่ 4

การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์

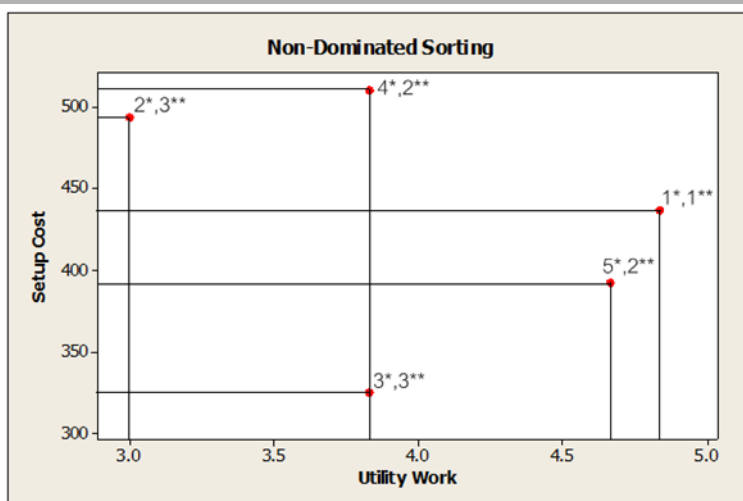
สตริงคำตอบ (S)	ผลิตภัณฑ์					
1	3	4	2	6	1	5
2	5	3	6	2	4	1
3	5	6	3	2	1	4
4	1	6	3	2	4	5
5	4	1	3	5	6	2

ตารางที่ 5

สตริงคำตอบเริ่มต้น

5.2 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเริ่มต้นมาประเมินค่าโดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชัน คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดแบบ Non-Dominated Sorting [16] ดังรูปที่ 6 และทำการเรียงลำดับสตริงคำตอบจากค่าสปีชีส์เคาท์มาก



รูปที่ 6

กำหนดค่าสปีชีส์เคาท์

หมายเหตุ เครื่องหมาย *

คือเลขที่สตริงคำตอบและ

** คือค่าสปีชีส์เคาท์

ไปน้อย ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 มากไปน้อยและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 มากไปน้อย ตามลำดับ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6

ค่าความน่าจะเป็นของการอพยพเข้าและออก และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์

สปีชีส์เคาท์	ลำดับ	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	$P_{K,k}$
3	1	3	0.1464	0.8536	0.0967	0.5690	0.2500
	2	2					
2	1	5	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.4268
	2	4					
1	1	1	0.8536	0.1464	0.5690	0.0967	0.2500

5.3 การหาอัตราการอพยพและค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์

การเลือกใช้รูปแบบการอพยพอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ [17] ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบการอพยพแบบ Linear และ Sinusoidal ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การอพยพแบบ Sinusoidal สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าการอพยพแบบ Linear ทั้งด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าการอพยพแบบ Sinusoidal เหมาะสมกับปัญหาในงานวิจัยนี้มากกว่าการอพยพแบบ Linear ดังนั้นการหาอัตราการอพยพเข้า (λ) อัตราการอพยพออก (μ) ความน่าจะเป็นการอพยพเข้า (P_λ) ความน่าจะเป็นการอพยพออก (P_μ) และค่าความน่าจะเป็นการเกิดสปีชีส์เคาท์ (P_K) ของสปีชีส์เคาท์ k ; $k = 1, 2, \dots, K$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16-20 โดยในตัวอย่างนี้ได้แสดงผลการคำนวณค่าดังกล่าวไว้ในตารางที่ 6

$$\lambda_k = \frac{I}{2} \left(\cos \left(\frac{k\pi}{n} \right) + 1 \right) \quad (16)$$

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum \lambda_k} \quad (17)$$

$$\mu_k = \frac{E}{2} \left(-\cos \left(\frac{k\pi}{n} \right) + 1 \right) \quad (18)$$

$$P_{\mu,k} = \frac{\mu_k}{\sum \mu_k} \quad (19)$$

$$P_{K,k} = \frac{\prod_{j=1}^k \left(\frac{I}{E} \right)^k \left(\frac{\sin^2 \left(\frac{n+j-1}{2n} \pi \right)}{\sin^2 \left(\frac{j}{2n} \pi \right)} \right)}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \left(\frac{I}{E} \right)^i \left(\frac{\sin^2 \left(\frac{n+j-1}{2n} \pi \right)}{\sin^2 \left(\frac{j}{2n} \pi \right)} \right)} \quad (20)$$

เมื่อ I คือ อัตราการอพยพเข้าสูงสุด, E คือ อัตราการอพยพออกสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $I, E = 1$ และ $n = K + 1$

5.4 การอพยพ

1) คัดลอก Y ลงใน Z เมื่อ Y คือ ประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น, y_k คือ ประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชีส์เคาท์ k , y_{k,n_k} คือ สตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชีส์เคาท์ k ตัวที่ n_k , Z คือ ประชากรสตริงคำตอบชั่วคราว, z_k คือ ประชากรสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ k และ z_{k,n_k} คือ สตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ k ตัวที่ n_k เมื่อ $k = 1, 2, \dots, K$ และ $n_k = 1, 2, \dots, N_k$

2) กำหนดเลขดัชนี (b) เมื่อ $b = 1, 2, \dots, B$ ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด โดยกำหนดให้บิตซ้ายมือสุดของสตริงคำตอบมีเลขดัชนีเท่ากับ 1 ($b = 1$) และมีค่ามากขึ้นไปตามลำดับจนกระทั่งถึงบิตขวามือสุดซึ่งมีเลขดัชนีสูงสุด (B) เช่น $z_{3,1} = [563214]$ การกำหนดเลขดัชนีจึงได้ผลดังนี้ $z_{3,1}(1) = 5, z_{3,1}(2) = 6, \dots, z_{3,1}(6) = 4$

3) การอพยพจะทำกับทุกสตริงคำตอบโดยเริ่มจากสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์สูงสุด ตัวที่ 1 ($z_{k,1}$) ไปจนถึงสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ต่ำสุด ตัวสุดท้าย (z_{1,N_1}) โดยในตัวอย่างนี้เริ่มทำการอพยพของ $z_{3,1}$ เป็นสตริงคำตอบแรก โดยสร้างเลขสุ่ม r ให้กับทุกๆ บิต และถ้าบิตใดมีค่า $r < P_{\lambda,3}$ จึงทำการอพยพเข้าสู่ $z_{3,1}(b)$ โดยในตัวอย่างนี้มีบิตที่จะถูกอพยพเข้าสู่บิต ได้แก่ บิตที่ 2 และ 6 ดังที่ได้แสดงในคอลัมน์ที่ 1 ของตารางที่ 7 จากนั้นจึงไปทำในขั้นตอนถัดไป

4) กำหนดให้ $X = Y - y_{k,n_k}$ เมื่อ X คือ ประชากรสตริงคำตอบอพยพออก, x_k คือ ประชากรสตริงคำตอบอพยพออกในสปีชีส์เคาท์ k และ x_{k,m_k} คือ สตริงคำตอบอพยพออกในสปีชีส์เคาท์ k ตัวที่ m_k เมื่อ $m_k = 1, 2, \dots, M_k$ โดยในตัวอย่างนี้กำลังพิจารณาการอพยพของ $z_{3,1}$ เพราะฉะนั้น $X = Y - y_{3,1}$ จากนั้นพิจารณาการอพยพออกโดยเริ่มจากการสุ่มค่าสปีชีส์เคาท์มาหนึ่งค่าด้วย P_μ และถ้าในสปีชีส์เคาท์ที่สุ่มได้มีจำนวนสมาชิกสตริงคำตอบเพียงหนึ่งตัว ($M_k = 1$) ให้นำค่า $x_{k,m_k}(b)$ อพยพเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$ แต่ถ้าในสปีชีส์เคาท์ที่สุ่มได้มีจำนวนสมาชิกสตริงคำตอบมากกว่า 1 ตัว ($M_k > 1$) ให้ทำการสุ่มสตริงคำตอบใน x_k มาหนึ่งสตริง ดังที่ได้แสดงในคอลัมน์ที่ 4 และ 5 ของตารางที่ 7 จากนั้นนำค่า $x_{k,m_k}(b)$ จากคอลัมน์ที่ 6 ของตารางที่ 7 อพยพเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$ ซึ่งได้ค่าที่จะทำการอพยพเข้าและออกดังคอลัมน์ที่ 2 และ 3 ของตารางที่ 8

5) ทำการซ่อมแซมคำตอบ โดยนำค่า $y_{k,n_k}(b)$ ไปแทนในบิตของสตริงคำตอบ z_{k,n_k} ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงที่มีค่าเท่ากับ $x_{k,m_k}(b)$ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 8

การอพยพเข้า	การอพยพออก				
บิตที่มี $r < P_\lambda$	ค่าสปีชีส์ เคาท์ (k)	สุ่มค่า k ด้วย P_μ	x_k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้ (x_{k,m_k})	$x_{k,m_k}(b)$
2	{1,2,3}	3	{2}	2	3
6	{1,2,3}	2	{5,4}	4	5

ตารางที่ 7

การอพยพของ $z_{3,1}$

บิต (b)	การอพยพเข้า $z_{k,n_k}(b)$	การอพยพออก $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	บิตของสตริงคำตอบ $z_{3,1}$					
				1	2	3	4	5	6
2	6	3	เริ่มต้น	5	6	3	2	1	4
			ปรับปรุง	5	<u>3</u>	3	2	1	4
			ซ่อมแซม	5	3	<u>6</u>	2	1	4
6	4	5	เริ่มต้น	5	3	6	2	1	4
			ปรับปรุง	5	3	6	2	1	<u>5</u>
			ซ่อมแซม	<u>4</u>	3	6	2	1	5

ตารางที่ 8

การปรับปรุงและ
ซ่อมแซมสตริงคำตอบ
 $z_{3,1}$

5.5 การมิวเตชัน

นำสตริงคำตอบ Z ที่ได้จากกระบวนการอพยพเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เพื่อให้สตริงคำตอบมีความหลากหลายมากขึ้นและหวังว่าการมิวเตชันจะช่วยทำให้สตริงคำตอบเดิมที่มีอยู่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น [17] ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการมิวเตชันมีดังนี้

1) การคัดเลือกค่าสปีชีส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวิธีวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel) โดยนำค่าความน่าจะเป็นการเลือกสปีชีส์เคาท์ k ($m(k)$) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 21 มาสร้างค่าวงล้อรูเล็ต (q_k) ให้กับทุกสปีชีส์เคาท์ จากนั้นจึงสร้างเลขสุ่ม (r) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 มาหนึ่งค่าและพิจารณาเลือก สปีชีส์เคาท์ที่มีค่า $q_{k-1} \leq r < q_k$; $q_0 = 0$ เข้าสู่ขั้นตอนถัดไป ดังตัวอย่างในตารางที่ 9

$$m(k) = \frac{1-P_{K,k}}{\sum(1-P_{K,k})} \quad (21)$$

2) สร้างเลขสุ่มให้กับทุกบิตที่อยู่ในสปีชีส์เคาท์ที่สุ่มได้ โดยในตัวอย่างนี้สปีชีส์เคาท์ที่สุ่มได้คือ สปีชีส์เคาท์ 3 ซึ่งมีสตริงคำตอบ 3 และ 2 เป็นสมาชิกตามลำดับ หากเลขสุ่มของบิตใดมีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ให้ทำการมิวเตชันบิตนั้นกับบิตอื่นที่อยู่ในสตริงคำตอบเดียวกันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation [18] เช่น สมมติให้มีการมิวเตชันในสตริงคำตอบ 3 (S3) หรือ $z_{3,1}$ ระหว่างบิตที่ 1 และ 4 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 7 โดยการมิวเตชันนี้อาจเกิดขึ้นกับทุกสตริงคำตอบหรือแค่เพียงบางสตริงคำตอบเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าเลขสุ่มของแต่ละบิตที่อยู่ในสปีชีส์เคาท์ที่สุ่มได้ มีค่าน้อยกว่าค่า P_m หรือไม่ ถ้าเลขสุ่มของบิตใดมีค่าน้อยกว่า P_m จึงทำการมิวเตชันสตริงคำตอบที่มีบิตดังกล่าวอยู่ ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation

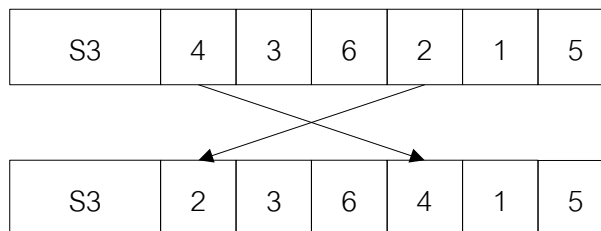
ตารางที่ 9

การคัดเลือกสปีชีส์เคาท์
เข้าสู่กระบวนการมิวเต-
ชันด้วยวงล้อรูเล็ต

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	$m(k)$	q_k	$r=0.148$
3	1	3	0.362	0.362	Selected
	2	2			
2	1	5	0.276	0.638	-
	2	4			
1	1	1	0.362	1.000	-

รูปที่ 7

การมิวเตชันของสตริง
คำตอบ 3



5.6 การเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้และป้องกันไม่ให้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการอพยพและการมิวเตชันสูญหายไป โดยนำ Y และ Z ที่ผ่านกระบวนการอพยพและการมิวเตชันเรียบร้อยแล้วมารวมกันและนำไปประเมินค่าความเหมาะสม จากนั้นทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าฟิตเนสดีที่สุดค่าหนึ่งเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันและทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนสตริงคำตอบเริ่มต้นเพื่อใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป

5.7 การวนซ้ำ

ทำการวนซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 5.2 จนกระทั่งครบตามจำนวนรอบการทำงานที่กำหนด

VI. ผลการทดลอง

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ BBO กับ DPSO และ NSGA-II โดยการรันโปรแกรม Matlab 2009a บนคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i5 CPU 760 2.80GHz Ram 4 GB Windows 7

6.1 อัลกอริทึมเปรียบเทียบ

6.1.1 NSGA-II

อัลกอริทึม NSGA-II [7] มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) สร้างประชากรสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่จำนวน N ตัว ด้วยวิธีการสุ่ม
- 2) ประเมินค่าประชากรสตริงคำตอบและจัดอันดับสตริงคำตอบแบบ Non-Dominated Sorting
- 3) คำนวณค่า Crowding Distance ของแต่ละสตริงคำตอบ
- 4) คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีด้วยวิธี Tournament Selection
- 5) นำสตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์และการมิวเตชันเพื่อสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูกจำนวน N ตัว

6) นำประชากรสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกมารวมกัน และใช้เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันและคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีจำนวน N ไปเป็นประชากรสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรอบการทำงานถัดไป

- 7) ทำการวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งครบตามจำนวนรอบการทำงานที่กำหนด

6.1.2 DPSO

อัลกอริทึม DPSO [5] ที่ใช้ในงานวิจัยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) สร้างประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มให้ได้ตามจำนวนฝูงและอนุภาคที่กำหนดไว้
- 2) ประเมินค่าประชากรสตริงคำตอบและจัดอันดับสตริงคำตอบแบบ Non-Dominated Sorting
- 3) หาสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) โดยคัดเลือกจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุดของแต่ละฝูงมาหนึ่งตัว จากนั้นทำการหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) โดยคัดเลือกจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุดของประชากรมาหนึ่งตัว

4) ใช้เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อคัดเลือกกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันและนำไปรวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่รวมกันไปจัดอันดับด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดเข้าสู่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า

5) ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) โดยใช้สตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงและสตริงคำตอบที่ดีของประชากร

6) สร้างตารางความน่าจะเป็น Sigmoid โดยแปลงค่าในตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคให้เป็นค่าความน่าจะเป็นด้วยฟังก์ชัน Sigmoid

7) สร้างสตริงคำตอบในรอบถัดไปโดยวิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็น Sigmoid ให้ได้ตามจำนวนฝูงและอนุภาคที่กำหนดไว้

8) ทำการวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งครบตามจำนวนรอบการทำงานที่กำหนด

6.2 ตัววัดสมรรถนะ

การค้นหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์มีเป้าหมายเพื่อให้ได้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและมีคำตอบที่หลากหลาย ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึม BBO DPSO และ NSGA-II จึงใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์เหมือนกับที่ใช้ในงานวิจัยของ Chutima และ Olanviwatchai [8] ดังนี้

1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงและถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

2) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) เป็นการวัดการกระจายของสมาชิกคำตอบที่อยู่ภายในกลุ่มเดียวกัน ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีการกระจายสม่ำเสมอ

3) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบนั้นมีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

4) เวลาการค้นหาคำตอบ (CPU Time) เป็นการวัดเวลาการทำงานของอัลกอริทึมตั้งแต่การทำงานรอบแรกจนถึงรอบสุดท้าย ถ้าอัลกอริทึมใดใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยแสดงว่าอัลกอริทึมนั้นเป็นทางเลือกที่ดี

6.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

การนำอัลกอริทึมต่างๆ เข้ามาช่วยแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่า ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการอ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมาและจากการทดลอง ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้ (ตารางที่ 10)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งที่มา
จำนวนประชากร	100	Chutima และ Kampirom [19]
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ set 1.1-1.2 60 รอบ สำหรับ set 2.1-2.2 80 รอบ สำหรับ set 3.1-3.2 100 รอบ สำหรับ set 4.1-4.2 300 รอบ สำหรับ set 5.1-5.2	การทดลอง
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Non-dominated Sorting	Goldberg [16]
จำนวนฝูงและอนุภาคในฝูง	4-25 *	การทดลอง
น้ำหนักความหน่วง	0.1 *	Salman และคณะ [20]
ค่าประสมการแบบเฉพาะที่	0.1 *	Wattanapornprom และคณะ [21]
ค่าประสมการแบบวงกว้าง	0.1 *	Wattanapornprom และคณะ [21]
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น	Crowding Distance **	Dep และคณะ [7]
วิธีการครอสโอเวอร์	modOX **	Kim และคณะ [18]
ความน่าจะเป็นครอสโอเวอร์	$P_c = 1.0$ **	Chutima และ Pinkoompee [9]
วิธีการมิวเทชัน	Reciprocal Exchange Mutation ** ***	Kim และคณะ [18]
ความน่าจะเป็นมิวเทชัน	$P_m = 0.1$ **, $P_m = 0.01$ ***	Chutima และ Olanviwatchai [8] และการทดลอง
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal Migration Model ***	การทดลอง

ตารางที่ 10

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

หมายเหตุ : เครื่องหมาย

* ใช้เฉพาะ DPSO, ** ใช้

เฉพาะ NSGA-II และ ***

ใช้เฉพาะ BBO

6.4 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 11 เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่าทุกปัญหาการทดลอง BBO มีค่าการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

ตัววัดสมรรถนะ	อัลกอริทึม	ปัญหาการทดลอง									
		Set 1.1	Set 1.2	Set 2.1	Set 2.2	Set 3.1	Set 3.2	Set 4.1	Set 4.2	Set 5.1	Set 5.2
Convergence	DPSO	0.072	0.080	0.180	0.116	0.187	0.181	0.161	0.250	0.568	0.609
	NSGA-II	0.044	0.040	0.056	0.030	0.044	0.046	0.051	0.083	0.243	0.282
	BBO	0.014	0.015	0.022	0.011	0.001	0.004	0.007	0.000	0.005	0.028
Spread	DPSO	0.744	0.710	0.631	0.525	0.505	0.425	0.658	0.575	0.531	0.666
	NSGA-II	0.625	0.646	0.495	0.473	0.582	0.481	0.669	0.745	0.558	0.610
	BBO	0.520	0.500	0.585	0.567	0.404	0.536	0.412	0.598	0.514	0.581
Ratio	DPSO	0.071	0.182	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	NSGA-II	0.381	0.250	0.643	0.400	0.033	0.200	0.556	0.000	0.030	0.080
	BBO	0.700	0.684	0.500	0.857	1.000	0.923	0.829	1.000	1.000	1.000
CPU Time(s)	DPSO	165	150	229	233	468	469	880	880	4,540	5,717
	NSGA-II	270	297	440	438	866	887	1,120	1,262	5,090	5,542
	BBO	131	129	181	190	381	375	461	489	4,046	4,090

ตารางที่ 11

ผลการทดลองตัวชี้วัด

สมรรถนะของ

อัลกอริทึม DPSO

NSGA-II และ BBO

เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ พบว่า ในปัญหาการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 NSGA-II มีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด ส่วนปัญหาการทดลองที่ 3.2 และ 4.2 DPSO มีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด และในปัญหาการทดลองที่เหลือ BBO มีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด

เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่า ในปัญหาการทดลองที่ 2.1 NSGA-II มีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดเพียงปัญหาเดียว และในปัญหาการทดลองที่เหลือ BBO มีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาการค้นหาคำตอบ พบว่าทุกปัญหาการทดลอง BBO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ และปัญหาที่ BBO ใช้เวลาน้อยกว่าอัลกอริทึมทั้งสองอย่างชัดเจน คือ ปัญหาการทดลองที่ 4.1, 4.2, 5.1 และ 5.2 ซึ่งอยู่ในกลุ่มของปัญหาขนาดใหญ่

จากการพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ด้าน สรุปได้ว่าโดยรวมแล้ว BBO สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว และคำตอบที่ค้นพบยังใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากที่สุดและมีความหลากหลายมากที่สุดเมื่อเทียบกับ NSGA-II และ DPSO ดังนั้น BBO จึงมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มากกว่า NSGA-II และ DPSO

VII. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอริทึม BBO สำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยกระบวนการที่สำคัญของ BBO คือ กระบวนการอพยพ ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นกว่าเดิม โดยแต่ละคำตอบจะได้รับคุณลักษณะที่ดีหรือได้รับการปรับปรุงจากหลายๆ คำตอบ ซึ่งคาดว่าคำตอบใหม่ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้นจนนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด จากผลการทดลองสรุปได้ว่า BBO สามารถค้นหากลุ่มคำตอบได้ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด อัตราส่วนของคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และกลุ่มคำตอบที่ค้นพบยังมีความหลากหลายมากกว่า NSGA-II และ DPSO โดยกล่าวได้ว่าคุณภาพคำตอบของ BBO ดีกว่า NSGA-II และ DPSO นอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ พบว่า BBO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด แต่มีบางกรณีที่อัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบได้ดีและต้องใช้เวลาอย่างมาก เช่น ในกรณี NSGA-II กับ DPSO ที่ NSGA-II สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่า DPSO แต่กลับใช้เวลานานกว่า โดยการพัฒนาอัลกอริทึมบางครั้งอาจค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดแต่กลับใช้เวลานานมากจนไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้ ดังนั้นการพัฒนาอัลกอริทึมควรให้ความสำคัญทั้งด้านความสามารถและเวลาในการค้นหาคำตอบไปพร้อมๆ กัน

บรรณานุกรม

- [1] U. Özcan and B. Toklu, "Balancing two-sided assembly lines with sequence-dependent setup times," *International Journal of Production Research*, vol. 48, pp. 5363-5383, 2010.
- [2] A. R. Rahimi-Vahed, M. Rabbani, R. Tavakkoli-Moghaddam, S. A. Torabi, and F. Jolai, "A multi-objective scatter search for a mixed-model assembly line sequencing problem," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 21, pp. 85-99, 2007.
- [3] C. J. Hyun, Y. Kim, and Y. K. Kim, "A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines," *Computers & Operations Research*, vol. 25, pp. 675-690, 1998.
- [4] S. Mansouri, "A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines," *European Journal of Operational Research*, vol. 167, pp. 696-716, 2005.
- [5] C. Liao, C. Tseng, and P. Luarn, "A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems," *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 3099-3111, 2007.
- [6] D. Simon, "Biogeography-based optimization," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, vol. 12, pp. 702-713.
- [7] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, pp. 182-197.
- [8] P. Chutima and P. Olanviwatchai, "Mixed-model U-shaped assembly line balancing problems with coincidence memetic algorithm," *Journal of Software Engineering and Applications*, vol. 3, pp. 347-363, 2010.
- [9] P. Chutima and P. Pinkoompee, "Multi-objective sequencing problems of mixed-model assembly systems using memetic algorithms," *ScienceAsia*, vol. 35, pp. 295-305, 2009.
- [10] P. R. McMullen, "An efficient frontier approach to addressing JIT sequencing problems with setups via search heuristics," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 41, pp. 335-353, 2001.
- [11] H. Mo and L. Xu, "Biogeography based optimization for traveling salesman problem," in *IEEE International Conference on Natural Computation*, 2010, pp. 3143-3147.
- [12] H. Kundra and M. Sood, "Cross-country path finding using hybrid approach of PSO and BBO," *International Journal of Computer Applications*, vol. 7, pp. 15-19, 2010.
- [13] A. Bhattacharya and P. K. Chattopadhyay, "Solving complex economic load dispatch problems using biogeography-based optimization," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 3605-3615, 2010.
- [14] H. Kundra, A. Kaur, and V.K. Panchal, "An integrated approach to biogeography based optimization with case based reasoning for retrieving groundwater possibility," presented at Map Asia, Seminar Theme: Technology Integration, Singapore, Aug. 18-20, 2009.
- [15] R. MacArthur and E. Wilson, *The Theory of Biogeography*. New Jersey: Princeton University Press, 1967.
- [16] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Boston: Addison-Wesley, 1989.
- [17] H. Ma, "An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization," *Information Sciences*, vol. 180, pp. 3444-3464, 2010.
- [18] Y. K. Kim, C. J. Hyun, and Y. Kim, "Sequencing in mixed model assembly lines: A genetic algorithm approach," *Computers & Operations Research*, vol. 23, pp. 1131-1145, 1996.
- [19] P. Chutima and N. Kampirom, "A multi-objective coincidence memetic algorithm for a mixed-model U-line sequencing problem," *International Journal of Advanced Operations Management*, vol. 2, pp. 201-248, 2010.
- [20] A. Salman, I. Ahmad, and S. Al-Madani, "Particle swarm optimization for task assignment problem," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 26, pp. 363-371, 2002.
- [21] W. Wattanapornprom, P. Olanviwatchai, P. Chutima, and P. Chongstitvatana, "Multi-objective combinatorial optimisation with coincidence algorithm," in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2009, pp. 1675-1682.