Engng.J.CMU.(2018) 25 (2), 67−78

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

Multi-objective Sequencing on Mixed-Model Parallel Assembly Lines with Biogeography-based Optimization

ทัศนีย์ ทองจันทร์[1] และ ปารเมศ ชุติมา[1,*]

Thassanee Thongjun[1] and Parames Chutima[1,*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

*E-mail: cparames@chula.ac.th Tel: 02-2186847

บทคัดย่อ

การจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เป็นการแก้ปัญหาที่พิจารณาวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันจัดเป็นปัญหาแบบ NP-Hard (Non-deterministic Polynomial-Hard) ในการค้นหาคำตอบจำเป็นต้องนำวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอลิทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน คือ ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด และ เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับในการจัดลำดับการผลิต คือ วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) ผลการทดลองพบว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่า NSGA-II ทั้งในดัชนีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต ดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ ในด้านของดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ NSGA-II มีค่าที่ดีกว่า BBO

ABSTRACT

Multi-objective sequencing on mixed-model parallel assembly lines is known as an NP-hard problem. Hence, to optimize this problem, heuristic approaches need to be developed. In this research, a Biogeography-Based Optimization (BBO) algorithm is adapted to optimize three objectives simultaneously, which are minimum variance of production rates, minimum utility work, and minimum setup times. The performance of BBO is compared with the well-known algorithm, Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II (NSGA-II). The experimental results show that BBO

Received 9 June 2016
Accepted 29 July 2016

outperforms NSGA-II in terms of convergence, ratios of non-dominated solutions and CPU time. In contrast, it is found that the spread metric of NSGA-II is a marginally better than that to BBO.

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีค่าสูงสุด และรองรับการผลิตที่มีความต้องการผลิตภัณฑ์จำนวนมากและมีคุณภาพดี โดยมีการออกแบบสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Assembly Line) ที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันในตระกูลเดียวกันจะเข้าสู่สายการประกอบพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่องบนสายการประกอบเส้นตรง (Straight Line) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการ [1] ปัจจุบันได้มีการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้นจัดวางแบบขนานกันเป็นสายการประกอบแบบขนาน โดยแต่ละสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมเรียกว่า สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน (Mixed-Model Parallel Assembly Lines)

ปัญหาในการนำสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมาใช้ต้องทำการแก้ปัญหาด้วยการจัดสมดุลสายการประกอบ และการจัดลำดับการผลิตไปด้วยกัน เพื่อให้สายการประกอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ตามลักษณะที่เหมาะสมกับงานนั้น โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมได้ทำการจัดสมดุลมาแล้ว และศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพียงอย่างเดียว ซึ่งการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมต้องพิจารณาวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อนอย่างมาก ปัญหาลักษณะนี้จัดเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) โดยการแก้ปัญหาจะใช้เวลายาวนานในการค้นหา ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะนำเอาวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาประเภทนี้เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นและให้คำตอบที่ค่อนข้างดีเป็นที่ยอมรับได้และบ่อยครั้งที่วิธีฮิวริสติกได้ให้คำตอบที่ดีที่สุด

วิธีฮิวริสติกจะใช้เวลาการหาคำตอบที่ไม่มากและคำตอบที่ได้ก็เป็นคำตอบที่มีเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในปัญหาที่เกิดขึ้นจริง โดยฮิวริสติกที่นิยมใช้และเป็นวิธีที่มีการยอมรับว่าสามารถแก้ปัญหาได้ เช่น วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาในการจัดลำดับการผลิตที่มีความซับซ้อน โดย GA จะเป็นอัลกอริทึม ที่มีแนวคิดมาจากการตัดต่อทางพันธุกรรมของมนุษย์สามารถลดเวลาและให้คำตอบที่ดี ต่อมา Simon ในปี 2008 [2] ได้นำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้แนวคิดการย้ายถิ่นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีความต้องการที่จะอยู่อาศัยในที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่ถ้าพื้นที่ที่อยู่นั้นมีความหนาแน่นสิ่งมีชีวิตจะเริ่มทำการย้ายที่อยู่อาศัยไปสู่ที่อื่นที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อยกว่า และพัฒนาที่อยู่ใหม่ให้มีความอุดมสมบูรณ์ ซึ่งนำแนวคิดนี้มาเปรียบเสมือนการค้นหาคำตอบโดยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ได้มีการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากปัญหาในภาคปฏิบัติ ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมหลายตัว และในปี 2014 ณัฐชัย [3] ได้มีการนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม และพบว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับที่นำมาเปรียบเทียบ

2. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายขนาน

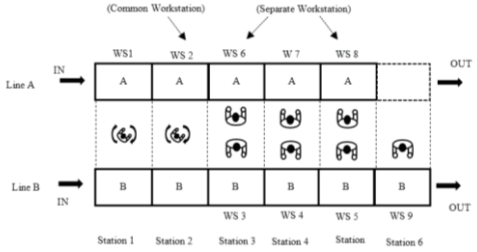
สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เป็นสายการประกอบที่มีระบบการผลิตผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบแบบเส้นตรง 2 เส้น ที่มีจัดวางแบบขนานและเริ่มต้นทำการผลิตไปพร้อมกัน ในแต่ละสายการประกอบได้ทำการผลิตผลิตภัณฑ์หลายรุ่นด้วยกันโดยทำการผลิตสลับกันไปมาได้ทันที ซึ่งสามารถใช้ตอบสนอง

ความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว และรองรับการผลิตตามแนวคิดการผลิตแบบทันเวลาพอดีที่นิยมในปัจจุบัน [3]

รูปแบบสายการประกอบขนานที่มีการจัดสมดุลแล้ว ดังรูปที่ 1 จะมีสถานี (Station) เรียงกันอย่างต่อเนื่อง แต่ละสถานีจะมีสถานีงาน (Workstation) ที่ทำการประกอบผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือสถานีงานร่วม (Common Workstation: CW) ที่มีสถานีงาน 2 สถานีงาน มีพนักงานรับผิดชอบหน้าที่ทำการผลิตบนสายการประกอบทั้งสองสายการประกอบในรอบการผลิตเดียวกัน โดยพนักงานจะทำการประกอบบนสายการประกอบที่หนึ่งก่อนจนครบทุกขั้นงานแล้วหันมาประกอบบนสายการประกอบที่สอง หลังจากนั้นจะหันกลับไปยังสายการประกอบแรกอีกครั้ง สายการประกอบแบบขนานประเภทนี้จะมีพนักงานอยู่ประจำสถานีงานเพียงหนึ่งคน ทำให้พนักงานต้องมีทักษะที่หลากหลายในการประกอบผลิตภัณฑ์ชนิดที่ต่างกัน ในขณะเดียวกันสถานีงานที่เหลือจะถูกเรียกว่า สถานีงานแยก (Separate Workstation: SW) ที่มีเพียง 1 สถานีงานบนสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่ง มีพนักงานประจำสถานีงานหนึ่งคน [4]

ในงานงิจัยนี้ได้ทำการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบแบบขนาน มีการพิจารณาสายการประกอบพร้อมกันทั้ง 2 สายการประกอบ โดยผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบที่หนึ่งและสองจะถูกส่งเข้าไปยังสายการประกอบพร้อมกัน ด้วยวิธีการลำเลียงไปตามสายพานผ่านสถานีต่าง ๆ ขั้นตอนในการพิจารณามีดังนี้ (1) กำหนดให้ l เป็นจำนวนสายการประกอบ $\{l=1, l=2\}$ (2) กำหนดให้รอบเวลาการผลิต (Cycle Time: CT) (3) กำหนดสัดส่วนในหนึ่งรอบการผลิต (Minimum Part set: MPS_l) โดย M เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ในตัวอย่างได้กำหนดให้สายการการประกอบ A ทำการผลิต 3 รุ่นคือ A1, A2 และ A3 ซึ่งมี MPS_1 (1:1:1) และสายการประกอบ B ผลิตสินค้า 3 รุ่น คือ B1, B2 และ B3 ซึ่งมี MPS_2 (1:1:3) (4) กำหนดลักษณะสายการประกอบแบบขนานที่ผ่านการจัดสมดุลสายการประกอบมาแล้ว (5) กำหนดลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานของขั้นงาน เวลาการปรับตั้งของผลิตภัณฑ์ที่การผลิตบนขั้นงาน

จากรูปที่ 1 แสดงลักษณะของสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลมาแล้ว มีจำนวนสถานีงานทั้งหมด 9 สถานีงาน และมีสถานีทั้งหมด 6 สถานี มีสถานีงานร่วมทั้งหมด 2 สถานีงาน และ สถานีงานแยก จำนวนทั้งหมด 7 สถานีงานข้อมูลสถานีงานตามประเภทและขั้นงานบนสายการประกอบ ดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างลักษณะสายการประกอบแบบขนาน

ตารางที่ 1 จำนวนสถานีงานตามประเภทและขั้นงานที่ทำการผลิตในแต่ละสถานีงาน

สถานีงานที่	**ประเภท**	**ขั้นงาน** (เรียงตามลำดับในการทำงาน)
1	ร่วม	12, 13, 4
2	ร่วม	7, 10, 15
3	แยก (Line B)	18
4	แยก (Line B)	14
5	แยก (Line B)	16, 17
6	แยก (Line A)	1, 3, 2
7	แยก (Line A)	5, 8
8	แยก (Line A)	6, 9, 11
9	แยก (Line B)	19, 20

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

การค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ไปพร้อม ๆ กัน จึงเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปไม่ได้เลยที่จะมีคำตอบที่ดีที่สุดเพียงคำตอบเดียว โดยคำตอบที่ได้จะเป็นในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์คณิตศาสตร์ [5] ได้ดังนี้

$$Minimize\{f_1(x), f_2(x),..., f_k(x)\} \qquad (1)$$

โดยที่ $x = \{x_1, x_2,..., x_n\}$ คือ คำตอบซึ่งเป็นเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจขนาด n ใน สเปซคำตอบ X ของปัญหาที่กำลังพิจารณา k คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด $f_a(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ a เมื่อ $a = \{1,2,...,k\}$

ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ y แล้ว จะได้ว่า $f_a(x) < f_a(y)$ สำหรับทุกค่าของ $a \in \{1,2,...,k\}$ และ $f_a(x) < f_a(y)$ อย่างน้อย 1 ค่าของ $a \in \{1,2,...,k\}$

การจัดลำดับการผลิตบนสายประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ได้ทำการพิจารณา 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมกัน [6]

3.1 ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด

การป้อนงานเข้าสายการผลิตแบบผลิตภัณฑ์ผสมเป็นการป้อนงานอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องกัน ถ้ามีการป้อนผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันมากจะทำให้เกิดความแปรผันในการผลิตมากในการจัดลำดับการผลิตจึงมีความต้องการให้ความแปรผันในการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{D_{T(l)}} \sum_{m_l=1}^{M} \left[x_{im} - i\frac{d_{m(l)}}{D_{T(l)}} \right]^2 \qquad (2)$$

กำหนดให้

$D_{T(l)}$ คือ ความต้องการในการผลิตทุกผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ l โดยที่ $l = 1$, $l = 2$ และ ใช้แทนในลำดับการผลิต โดยที่ $D_{T(l)} = \sum_{m_l=1}^{M} d_{m(l)}$

$d_{m(l)}$ คือ ความต้องการผลิตภัณฑ์ m โดยที่ $m = \{1,2,...M\}$ บนสายการประกอบ l

x_{im} คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดผลิตภัณฑ์ที่ m ที่ถูกดำเนินการผลิตในลำดับที่ i เมื่อ $i = 1,2,...D_{T(l)}$

3.2 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด

การจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบแบบขนานเป็นการป้อนผลิตภัณฑ์ลงแต่ละสถานีงานด้วยการลำเลียงแบบสายพานลงบนสายการประกอบทั้ง 2 สายการประกอบพร้อมกัน ดังรูปที่ 1 ทำให้การคำนวณหาค่าปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่เกิดจากปริมาณงานที่พนักงานไม่สามารถทำเสร็จภายในรอบเวลาการผลิต (Utility Work) การคำนวณได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ในกรณีสถานีงานเป็นแบบสถานีงานร่วม และในกรณีที่เป็นสถานีงานแยก โดยการคำนวณหาค่า Utility Work ของ CW สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3, 4 และ 5

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^{J} \left[\sum_{i=1}^{D_{T(l)}} U_{ij} + Z_{(i+1)j} / v_c \right] \qquad (3)$$

โดยที่

$$U_{ij} = \max, \left[0, \left(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{im} - L \right) / v_c \right]$$

$$Z_{(i+1)j} = \max \left[0, \min \left(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{im} - L \right), L \right]$$

ในกรณี SW สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 โดยในเทอมของ $Z_{(i+1)j} = 0$ เนื่อง เวลาเริ่มต้นของสายการประกอบบนและล่างป้อนเข้าพร้อมกัน เวลาเริ่มงาน เท่ากับ 0 ทำให้ค่า Utility Work ของ SW สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$f_2(x)=\sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{i=1}^{D_T}U_{ij}\right]$$

กำหนดให้

U_{ij} คือ เวลางานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ที่ i ที่ทำบน j โดยที่ $j=\{1,2,...,J\}$

Z_{ij} คือ เวลาเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ i บนสายการการประกอบ j

X_{im} คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในลำดับที่ i โดยที่ $X_{im}=1$ เมื่อผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ที่ m และ $X_{im}=0$ เมื่อผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ไม่ตรงกับผลิตภัณฑ์ที่ m

$\sum_{m=1}^{M}X_{im}=1$; $\forall i$ คือ ที่ลำดับที่ i ของลำดับผลิตภัณฑ์ ที่กำหนดให้ ซึ่งมีเพียงผลิตภัณฑ์เดียวเท่านั้นที่จะดำเนินการผลิต

$\sum_{i=1}^{D_T}X_{im}=d_m;\forall i$ คือ ความต้องการผลิตภัณฑ์ชนิด m ในหนึ่งรอบการผลิต

t_{jm} คือ เวลาดำเนินงานในสถานี j ของผลิตภัณฑ์ m

J คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

v_c คือ อัตราการการปล่อยผลิตภัณฑ์ที่ลำเลียงโดยสายพานที่มีความเร็วคงที่ในที่นี้กำหนดให้ $v_c=1$

L คือ ความยาวของสถานีงาน

3.3 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด

ในการจัดลำดับการผลิตเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า การทำให้เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุดจะทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตลง ผลผลิตที่ได้จะเพิ่มขึ้น ได้จากสมการที่ 4

$$f_3(x)=\sum_{i=1}^{D_{T(l)}}\sum_{m=1}^{M}s_i t_m \qquad (4)$$

กำหนดให้

s_i คือ การปรับตั้งเครื่องจักร โดยที่ $s_i=1$ เมื่อมีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น และ $s_i=0$ เมื่อไม่มีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น

t_m คือ เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ที่ m บนขั้นงานนั้น

4. การหาค่าที่เหมาะสมวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ ถูกพัฒนาขึ้นโดย Simon ซึ่งมีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการอพยพย้ายถิ่นฐานของสายพันธุ์สัตว์หรือสปีชีส์ (Species) ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของเกาะที่อยู่อาศัย กล่าวคือ เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์มากจะมีประชากรสัตว์อาศัยอยู่อย่างแออัด (ค่าสปีชีส์เคาท์สูง) ส่งผลให้มีอัตราการอพยพออกของประชากรสูงและมีอัตราการอพยพเข้าต่ำ ในขณะที่เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์ไม่มากนักจะมีประชากรอาศัยอยู่น้อย (ค่าสปีชีส์เคาท์ต่ำ) อัตราการอพยพออกจะต่ำและมีอัตราการอพยพเข้าสูง โดยแนวคิดนี้จะสอดคล้องกับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแยกเป็นประเด็นดังนี้

สตริงคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเปรียบเสมือน “เกาะ” และคุณภาพของคำตอบเปรียบเสมือนความอุดมสมบูรณ์ของเกาะซึ่งจะวัดด้วยค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัย (Habitat Suitability Index: HSI) หรือจำนวนสปีชีส์เคาท์ ซึ่งเปรียบได้กับค่า Fitness ที่ใช้จัดอันดับคำตอบ โดยคำตอบที่ดีจะมีค่า HSI สูง

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เช่น ขนาดพื้นที่ อุณหภูมิ และปริมาณน้ำฝน จะเรียกว่าตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable: SIV) เปรียบเสมือนยีน (Gene) หรือบิต (Bit) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว (Feature) ของสตริงคำตอบ

Migration Rate หรืออัตราการอพยพของสิ่งมีชีวิตมายังเกาะ แบ่งออกเป็นอัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate) และอัตราการอพยพออก

(Emigration Rate) โดยอัตราการอพยพเข้าเปรียบเสมือนอัตราหรือความน่าจะเป็นที่สตริงคำตอบจะรับคุณลักษณะจากสตริงคำตอบอื่นเข้ามาเพื่อปรับปรุงสตริงคำตอบของตนเอง ขณะที่อัตราการอพยพออกเปรียบเสมือนอัตราหรือความน่าจะเป็นที่สตริงคำตอบจะถ่ายทอดคุณลักษณะของตนให้กับสตริงคำตอบอื่น ทั้งนี้สตริงคำตอบที่ดีมีโอกาสน้อยที่จะรับคุณลักษณะจากสตริงคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง แต่มีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น ในทางตรงกันข้ามสตริงคำตอบที่แย่มีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น แต่มีโอกาสสูงที่จะรับคุณลักษณะจากสตริงคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง

หลังจากทำการอพยพคุณลักษณะเข้าออกจากสตริงคำตอบแล้วจะมีการมิวเตชันตามมาอีกขั้นตอนหนึ่ง กล่าวคือ เป็นการเลือกคุณลักษณะของสตริงคำตอบมาส่วนหนึ่งเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยหวังว่าความหลากหลายที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้คำตอบที่แย่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น และทำให้สตริงคำตอบที่มีคุณภาพดีอยู่แล้วนั้นดียิ่งขึ้นไปอีก

4.1 ขั้นตอนของอัลกอริทึม BBO

ขั้นที่ 1 สร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น Y ในการจัดลำดับผลิตภัณฑ์สายการประกอบด้วยวิธีการสุ่มสตริงคำตอบให้ความน่าจะเป็นในการสุ่มที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างกำหนดสัดส่วนความต้องการผลิตของผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS_1) MPS_1 = 1:1:1 และ MPS_2 = 1:1:3 แสดงว่าในการจัดลำดับผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบทั้ง 2 สาย โดยแต่ละสายการประกอบทำการผลิตผลิตภัณฑ์สายละผสม 3 รุ่น คือ รุ่น A1, A2, A3 และ รุ่น B1, B2, B3 ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการกำหนดรหัสสตริงคำตอบ

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
String	1	2	3	4	5	6	7	8

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มลำดับการผลิตมาจำนวนประชากรมา 5 สตริงคำตอบ ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Model Sequence							
1	1	4	2	7	8	6	5	3
2	2	1	4	7	6	8	5	3
3	5	1	4	6	8	7	3	2
4	4	2	1	8	7	6	5	3
5	1	4	3	7	8	6	2	5

ขั้นที่ 3 ทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยการหาค่า 3 ฟังก์ชัน คือ ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด (Minimizing Variance of Production Rates) ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด (Minimizing Utility Work) และ เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด (Minimizing Setup Time) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างค่าประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1	55.7161	32.5402	522.7143
2	65.3899	35.7644	358.1429
3	75.0638	39.2754	310.7143
4	75.0638	35.7644	358.1429
5	55.7161	32.5402	596.4286

ขั้นที่ 4 กำหนดค่าความแข็งแรงของแต่ละสตริงคำตอบด้วย วิธี Non-Dominated Sorting โดยเลขลำดับที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดของสตริงคำตอบในที่นี้เรียกว่า ค่าความแข็งแรง (Fitness: F) สตริงคำตอบที่ดีที่สุด เป็นค่า Fitness = 1 ตามด้วยค่าของสตริงต่อไปเป็น Fitness = 2,3,…จนถึง F ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางผลการกำหนดค่าความแข็งของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness
1	55.7161	32.5402	522.7143	1
2	65.3899	35.7644	358.1429	1
3	75.0638	39.2754	310.7143	1
4	75.0638	35.7644	358.1429	2
5	55.7161	32.5402	596.4286	3

ขั้นที่ 5 การกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ (Species Count: SC) จะให้ค่ากับสตริงคำตอบในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง คือ การพิจารณาจากค่าความแข็งแรง โดยค่าความแข็งแรงน้อย ค่าสปีชีส์เคาท์จะมีค่ามาก และค่าความแข็งแรงมาก ค่าสปีชีส์เคาท์จะมีค่าน้อย ค่าสปีชีส์เคาท์จะมีค่ามากน้อยแสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์ของที่อยู่อาศัยเนื่องจากค่าความแข็งแรงจะบ่งบอกถึงค่าสตริงคำตอบเป็นค่าที่ดี ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	F	SC
1	55.7161	32.5402	522.7143	1	3
2	65.3899	35.7644	358.1429	1	3
3	75.0638	39.2754	310.7143	1	3
4	75.0638	35.7644	358.1429	2	2
5	55.7161	32.5402	596.4286	3	1

ขั้นที่ 6 หาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ รูปแบบการอพยพเข้า (λ_k) และการอพยพออก (μ_k) จะมีหลายรูปแบบเพื่อให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพ Ma.ในปี 2010 [7] ได้ใช้รูปแบบ Linear และ Sinusoidal ในตัวอย่าง ได้เลือกรูปแบบการอพยพเป็นแบบ Sinusoidal รวมความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และ ความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ผลที่ได้ดังตารางที่ 7 ด้วยสมการดังต่อไปนี้

การอพยพเข้า (Immigration Rate : λ_k)

$$\lambda_k = \frac{1}{2}\left(\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right) \tag{5}$$

ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^{K}\lambda_k} \tag{6}$$

การอพยพออก (Emigration Rate: μ_k)

$$\mu_k = \frac{1}{2}\left(-\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right) \tag{7}$$

ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก

$$P_{\lambda,k} = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^{K}\mu_k} \tag{8}$$

เมื่อ k เท่ากับ SC ที่มีค่าสูงสุด และ $n = k+1$ ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ k ($P_{K,k}$)

$$P_{K,k} = \frac{\prod_{j=1}^{k}\left(\frac{I}{E}\right)^{k}\left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{i}\left(\frac{I}{E}\right)^{i}\left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \tag{9}$$

เมื่อ I คือ อัตราการอพยพเข้าสูงสุด, E คือ อัตราการอพยพออกสูงสุด โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ $I, E = 1$

ตารางที่ 7 ผลการหาค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและอพยพออก

Fitness	Species Count	No.	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cumulative $P_{\mu,k}$
1	3	1,2,3	0.1464	0.8536	0.1634	0.4058	0.4058
2	2	4	0.2500	0.7500	0.2789	0.3565	0.7623
3	1	5	0.5000	0.5000	0.5578	0.2377	1.0000

การอพยพโดยคัดลอก Y ที่เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นลงในสตริงคำตอบชั่วคราว Z, y_k คือ ประชากรเริ่มต้นในสปีชี่เคาท์ k, y_{k,n_k} สตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชี่เคาท์ k ตัวที่ n_k และ Z_k คือ ประชากรเริ่มต้นในสปีชี่เคาท์ k, Z_{k,n_k} สตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชี่เคาท์ k ตัวที่ n_k

$$Y_{3,1} = [5 \quad 1 \quad 4 \quad 6 \quad 8 \quad 7 \quad 3 \quad 2]$$

$$Z_{3,1} = [5 \quad 1 \quad 4 \quad 6 \quad 8 \quad 7 \quad 3 \quad 2]$$

ขั้นที่ 7 กำหนดค่าบิต (เลขดัชนี : b) โดยการกำหนดไล่จากทางด้านซ้ายไปขวา ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด ซึ่งทางซ้ายสุดมีค่าเท่ากับ 1 ($b = 1$) และมากขึ้นตามลำดับจนถึงบิตสุดท้าย

ขั้นที่ 8 ทำการอพยพทุกสตริงคำตอบชั่วคราว โดยการอพยพเป็นกระบวนการตัดสินใจเลือกว่าเป็นการอพยพเข้าหรืออพยพออก ตัวอย่างในงานวิจัยนี้เริ่มทำการอพยพ $Z_{3,1}$ เป็นสตริงคำตอบแรก โดยให้สุ่มค่า r_1 ในช่วง [0, 1] ขึ้นมา ให้กับทุกบิท และในการสุ่มเลือกตำแหน่งบิตเพื่อที่จะทำการอพยพเข้าในตำแหน่งบิตนั้นเมื่อค่า $r < P_{\lambda,3}$

ขั้นที่ 9 ทำการสุ่มสตริงจากเซตคำตอบ Y ในการกำหนดสตริงที่จะอพยพออก ผลการอพยพในการสุ่มเลือกตำแหน่งบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 ดังตารางที่ 8 แสดงการสุ่มเลือกบิตในสตริงคำตอบ $Z_{3,1}$ บิตที่ได้รับการเลือกให้ทำการอพยพ $\mathrm{r} < \mathrm{P}_{\lambda,3} = 0.1634$ คือ บิตที่ 4 และ บิตที่ 1 ดังตารางที่ 8 ผลการการปรับปรุงสตริงคำตอบ ดังตารางที่ 9

จากนั้นทำจนได้สตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพทั้ง Z_k และคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ แล้วจึงทำการกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท์ ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน และวงล้อรูเล็ตของค่าความน่าจะเป็นในการเลือกไปทำการมิวเตชันของคำตอบในสปีชีส์เคาท์ ดังตารางที่ 10

ขั้นที่ 10 ทำการสุ่มค่า r_3 ในช่วง [0, 1] เพื่อทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบชั่วคราวมาทำการมิวเตชัน โดยการดูค่า r_3 หากตกอยู่ในช่วงของ m_k ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$m_k = \frac{1 - P_k}{\sum_{k=1}^{K} (1 - P_k)} \qquad (10)$$

จากค่า r_3 ที่สุ่มค่าได้นั้นตกอยู่ในวงล้อรูเล็ตของสปีชีส์เคาท์ จึงทำการคัดลอกสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ทั้งหมดมาทำการมิวเตชัน ซึ่งการมิวเตชันในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange โดยมีขั้นตอนการพิจารณาคือสุ่มค่า r_4 ระหว่างค่า 0 ถึง 1 ซึ่งถ้าหาก $r_4 > P_m$ (P_m คือค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันกำหนดให้เท่ากับ 0.1) จะข้ามการพิจารณาต่อบิตใด ๆ แต่ถ้า $r_4 \le P_m$ ให้ทำการสุ่มเลือกบิตใด ๆ หนึ่งบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวเพื่อทำการสลับค่าบิตกัน จากนั้นทำการพิจารณาค่าสุ่ม r_4 ในบิตถัด ๆ ไปจนครบทั้งสตริงคำตอบชั่วคราว ดังตารางที่ 11

ขั้นที่ 11 ทำการพิจารณาสตริงคำตอบทั้งหมดจากเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y เซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z และเซตสตริงคำตอบชั่วคราวที่ผ่านการมิวเตชันแล้วมารวมกันแล้วจัดอันดับ นำไปประเมินค่าความเหมาะสมที่สุด จากนั้นเริ่มดำเนินกระบวนการรอบที่ 2 ด้วยการเริ่มต้นการวนซ้ำกระบวนการเดิม และดำเนินกระบวนการต่อไปเรื่อย ๆ จนครบตามจำนวนรอบการดำเนินงานที่กำหนด เมื่อสิ้นสุดในแต่ละรอบการดำเนินงานให้ทำการจัดเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาที่ผ่านมา (Elitist)

ตารางที่ 8 ตัวอย่างผลการสุ่มอพยพบิตในสตริง $Z_{3,1}$

บิตอพยพเข้า		บิตจากสตริง Y ที่อพยพออก				
Bit	r_1	r_2	SC	Strings	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
4	0.1162	0.5856	2	{4}	4	8
1	0.1412	0.9231	1	[8]	5	1

ตารางที่ 9 ตารางการปรับปรุงสตริงคำตอบของสตริงตำตอบที่ค่าสปีชีส์เคาท์เท่ากับ 3 ($Z_{3,1}$)

ลำดับ	บิต	อพยพเข้า	อพยพออก	การปรับปรุง	บิตสตริงคำตอบ							
					1	2	3	4	5	6	7	8
1	4	6	8	เริ่มต้น	5	1	4	6	8	7	3	2
				อพยพ	5	1	4	8	8	7	3	2
				ซ่อมแซม	5	1	4	8	6	7	3	2
2	1	5	1	เริ่มต้น	5	1	4	8	6	7	3	2
				อพยพ	1	1	4	8	6	7	3	2
				ซ่อมแซม	1	5	4	8	6	7	3	2

ตารางที่ 10 ตัวอย่างผลการคัดเลือกคำตอบเข้าสู่วงล้อรูเล็ต

Fitness	Species Count	No.	String	P_k	$1 - P_k$	m_k	Cumulative m_k
1	3	2	1,2,3	0.135	0.865	0.287	0.287
2	2	2	4	0.357	0.643	0.213	0.500
3	1	2	5	0.357	0.643	0.213	0.713

ตารางที่ 11 ตัวอย่างการมิวเตชันในสตริงคำตอบชั่วคราว

ค่าบิต	1	2	3	4	5	6	7	8
ก่อนมิวเตชัน	4	5	2	7	8	6	1	3
ค่าบิตที่ 2 กับค่าบิตที่ 1	5	4	2	7	8	6	1	3
ค่าบิตที่ 5 กับค่าบิตที่ 7	5	4	2	7	1	6	8	3
หลังมิวเตชัน	5	4	2	7	1	6	8	3

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยโปรแกรม Visual Studio 2013 ภาษา C++ ประมวลผลด้วย คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel Core i5-2410M CPU 2.3 GHz RAM 4.0 GB โดยใช้ การหาค่าที่เหมาะสมวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-II) ในการแก้ปัญหา

5.1 การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทดลองใช้ BBO ในการแก้ปัญหาทั้งสิ้น 8 ปัญหาย่อย ดังตารางที่ 13 ด้วยการเปรียบเทียบกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่นิยมในการแก้ปัญหา โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

BBO	
Population size	100
Mutation method	Recipe exchange
Mutation probability	0.1
NSGA - II	
Population size	100
Crossover method	WMC
Mutation method	Recipe exchange
% Crossover	0.7
% Mutation	0.3

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการวัดสมรรถนะตามรูปแบบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ [9] ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (Convergence to the Pareto-optimal Set) ใช้ประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้นั้นมีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด หรือมีค่าเข้าใกล้ 0 เป็นคำตอบที่ดี การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread of Solutions) ใช้บ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-dominated Solution) ในที่นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ค่าคือ self-comparison (RNDS1) แสดงสัดส่วนจำนวนคำตอบที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดเทียบกับจำนวนคำตอบที่ได้ และ Pareto-optimum comparison (RNDS2) ใช้แสดงสัดส่วนจำนวนคำตอบที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ (CPU Time)

5.3 สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 14 และ 15 เมื่อทำการพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านดัชนีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต พบว่า ปัญหาในการทดลองโดยใช้ BBO มีค่าลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ 0 มากกว่า NSGA-II ในทุกปัญหาที่นำมาทำการทดลอง เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ พบว่า ในปัญหาการทดลอง ที่ P1.1 และ ปัญหาการทดลองที่ P1.2 ของ BBO มีค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (ค่าเข้าใกล้ 0) มากกว่า NSGA-II และปัญหาการทดลองที่เหลือมีค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ของ NSGA-II ดีกว่า BBO สำหรับดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่า BBO มีสมรรถนะเหนือกว่า NSGA-II (ค่าเข้าใกล้ 1) และเวลาในการหาคำตอบของ BBO เร็วกว่า NSGA-II

ผลการทดลองพบว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่า NSGA-II ในทุกตัวชี้วัด และ BBO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เร็วกว่าทำให้ BBO มีความเหมาะสมในการแก้ไขปัญหาตัวอย่างที่นำมาทดลอง

ตารางที่ 13 ปัญหาการทดลอง

ปัญหาการทดลอง	สายการประกอบ	จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS)	ความยาวสตริง
Set 1.1[10]	1	2	1:1	7
	2	2	2:3	
Set 1.2	1	3	1:1:1	8
	2	3	1:1:3	
Set 2.1 [11]	1	2	1:2	6
	2	2	1:2	
Set 2.2	1	4	1:1:1:1	12
	2	4	1:2:2:3	
Set 3.1[12]	1	4	1:2:2:3	16
	2	4	1:1:2:4	
Set 3.2	1	4	1:1:2:4	20
	2	4	1:3:3:5	
Set 4.1[8]	1	3	1:1:1	8
	2	3	1:1:3	
Set 4.2	1	5	1:1:1:3:3	24
	2	5	1:2:3:3:6	

ตารางที่ 14 ผลการทดลองการแก้ปัญหา

Problem		P 1.1	P 1.2	P 2.1	P 2.2	P 3.1	P 3.2	P 4.1	P 4.2
Convergence	BBO	0.0000	0.0395	0.0000	0.0240	0.0069	0.0000	0.0304	0.0049
	NSGA-II	0.1112	0.0756	0.0825	0.1030	0.1515	0.1479	0.0669	0.2460
Spread	BBO	0.4619	0.5460	0.7048	0.6088	0.5752	0.7650	0.7549	0.8355
	NSGA-II	0.8094	0.5510	0.4510	0.4091	0.5166	0.4886	0.6120	0.4375
RNDS1	BBO	0.6923	0.5714	0.8889	0.7143	0.9583	0.8261	0.7500	0.9412
	NSGA-II	0.3000	0.5000	0.7143	0.2222	0.1111	0.0000	0.5556	0.0833
RNDS2	BBO	1.0000	0.5714	1.0000	0.7143	0.9200	1.0000	0.750	0.9412
	NSGA-II	0.3333	0.5714	0.6250	0.2857	0.0800	0.0000	0.6250	0.0588
CPU Time	BBO	15.641	18.554	26.960	37.640	163.14	97.501	87.423	170.52
	NSGA-II	22.659	35.430	37.203	59.298	233.82	130.697	127.39	215.61

ตารางที่ 15 ผลเปอร์เซ็นต์ของผลการทดลองของปัญหา

Problem		P 1.1	P 1.2	P 2.1	P 2.2	P 3.1	P 3.2	P 4.1	P 4.2	%
Convergence	BBO	100	96.05	100	97.6	99.31	100	96.96	99.51	98.68
	NSGA-II	88.88	92.44	91.75	89.7	84.85	85.21	93.31	75.4	87.69
Spread	BBO	53.81	45.4	29.52	39.12	42.48	23.5	24.51	16.45	34.35
	NSGA-II	19.06	44.9	54.9	59.09	48.34	51.14	38.8	56.25	46.56
RNDS1	BBO	69.23	57.14	88.89	71.43	95.83	82.61	75	94.12	79.28
	NSGA-II	30	50	71.43	22.22	11.11	0	55.56	8.33	31.08
RNDS2	BBO	100	57.14	100	71.43	92	100	75	94.12	86.21
	NSGA-II	33.33	57.14	62.5	28.57	8	0	62.5	5.88	32.24

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ซึ่งสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เป็นสายการประกอบที่มีสายการประกอบแบบเส้นตรง 2 เส้น ขนานกันที่ผลิตผลิตภัณฑ์หลายรุ่นการจัดลำดับการผลิตของสายการประกอบจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิการผลิตให้สูงขึ้น โดยมีการพิจารณาวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 3 วัตถุประสงค์พร้อมกัน คือ ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด และเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด และในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้นำเสนออัลกอริทึม BBO ที่มีกระบวนการที่สำคัญในการค้นหาคำตอบคือ กระบวนการอพยพของคำตอบที่มีการการปรับปรุงให้ดีมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองพบว่า BBO มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่เหนือกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบอย่าง อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) ทั้งในด้านด้านดัชนีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต พบว่า BBO มีค่าลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงคิดเป็นร้อยละ 98.64 มากกว่า NSGA-II ที่คิดเป็นร้อยละ 87.69 ของปัญหาทั้งหมด ด้านดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ พบว่า ในปัญหาการทดลองของ BBO มีค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ คิดเป็นร้อยละ 34.35 NSGA-II มีค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ คิดเป็นร้อยละ 46.56 ด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่า BBO ค่าเข้าใกล้ 1 คิดเป็นร้อยละ 79.28 มีสมรรถนะเหนือกว่า NSGA-II ที่คิดเป็นร้อยละ 31.08 ในส่วนเวลา BBO มีการใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เร็วกว่า จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึม BBO เป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตตัวอย่างนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Hyun, C. J, Kim, Y, and Kim, Y. K. A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research*, 1998; 25: 675-690.

[2] Simon, D. Biogeography-Based Optimization. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 2008; 12: 702-713.

[3] ณัฐชัย โยธาบริบาล. การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2014.

[4] Scholl, A. and Boysen, N. Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure. *International Journal of Production Economics*, 2009; 119: 90-100.

[5] นพพล คำภิรมย์. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[6] ปารเมศ ชุติมา. การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2008.

[7] Ma, H. An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization. *Information Sciences*, 2010; 180: 3444-3464.

[8] Arcus, A. L. A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research*, 1995; 259-277.

[9] Kumar, R. and Singh, P. K. Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP. *Hybrid Evolutionary Algorithms*, 2007; 75: 361-398.

[10] Rosenberg, O, and Ziegler, H. A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. *Zeitschrift für Operations Research*, 1992; 36(6): 477-495.

[11] Hahn, R. Produktionsplanung bei Linienfertigung. de Gruyter; 1972.

[12] Wee, T. S. and Magazine, M. J. An efficient branch and bound algorithm for an assembly line balancing problem. Part II: maximize the production rate, University of Waterloo, Waterloo, 1981.