



การจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

ณัฐชัย โยธาบริบาล

นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปารเมศ ชูติมา*

ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2218-6847 อีเมล: parames.c@chula.ac.th

รับเมื่อ 18 เมษายน 2557 ตอรับเมื่อ 25 กรกฎาคม 2557

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.07.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) เป็นเมตาฮิวริสติกเชิงวิวัฒนาการที่ได้รับแนวคิดมาจากพฤติกรรมการอพยพของสิ่งมีชีวิตบนเกาะต่างๆ บทความนี้นำเสนออัลกอริทึม BBO เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม โดยมีวัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ จำนวนสถานีน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนางสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของงานสูงที่สุด ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่เป็นที่นิยม ทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตอบ

คำสำคัญ: สายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม การจัดสมมูลหลายวัตถุประสงค์ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

การอ้างอิงบทความ: ณัฐชัย โยธาบริบาล และ ปารเมศ ชูติมา, “การจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 73-90, ม.ค. - เม.ย. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.07.002>



Multi-objective Balancing on Mixed-model Parallel Assembly Lines with Biogeography-based Optimization

Nutthachai Yothaboribal

Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Parames Chutima*

Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2218-6847, E-mail: parames.c@chula.ac.th

Received 18 April 2014; Accepted 25 July 2014

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.07.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Biogeography-based Optimization (BBO) is an evolutionary metaheuristic inspired by migratory behavior of species among islands. This article presents a BBO algorithm for solving multi-objective mixed-model parallel assembly line balancing problem where four objectives are optimized simultaneously; i.e. to minimize the number of workstations, to minimize the number of stations, a maximization of workload balancing between workstations, and placing an emphasis on maximizing work relatedness. The results from experiments clearly show that BBO promises better performance than does Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), which indicates another well-known algorithm, in terms of convergence to the Pareto-optimal set, spread of solutions, ratio of non-dominated solutions, and computation time to solution.

Keywords: Mixed-model Parallel Assembly Lines, Multi-objective Line Balancing, Biogeography-based Optimization

1. บทนำ

สายการประกอบ (Assembly Line) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนที่ประกอบไปด้วยกลุ่มของสถานีงานที่จัดเรียงต่อเนื่องกัน และมีการเชื่อมโยงกันด้วยสายพานหรือระบบขนย้ายวัสดุที่มีความคล้ายคลึงอื่นๆ ที่คอยทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานระหว่างสถานีงาน การดำเนินงานของสายการประกอบนั้นอยู่ในลักษณะของรอบการผลิตที่มีการวนซ้ำ โดยในรอบการผลิตหนึ่ง แต่ละสถานีงานจะรับชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าเข้ามาประกอบตามชิ้นงานที่กำหนดจนแล้วเสร็จภายในรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) และเมื่อสิ้นสุดรอบเวลาการผลิตแล้วก็จะส่งชิ้นงานดังกล่าวไปประกอบต่อในสถานีงานถัดไปพร้อมกับเริ่มต้นรอบการผลิตใหม่ เมื่อชิ้นงานได้ผ่านการประกอบตั้งแต่สถานีงานแรกจนถึงสถานีงานสุดท้ายแล้ว ก็จะได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จุดสิ้นสุดของสายการประกอบ ทั้งนี้ เดิมทีนั้นสายการประกอบมีไว้ใช้สำหรับผลิตสินค้ารูปแบบมาตรฐานในปริมาณมาก แต่เทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในระยะหลังก็ได้ทำให้สายการประกอบสามารถรองรับการผลิตสินค้าประเภทที่ถูกกำหนดรูปแบบเองในปริมาณน้อยได้ด้วยเช่นกัน [1]

ปัญหาการจัดสรรชิ้นงานในการประกอบสินค้าให้กับสถานีงานต่างๆ ในปริมาณที่เท่าๆ กัน พร้อมทั้งตอบสนองวัตถุประสงค์ที่กำหนดและไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดที่มีอยู่ เช่น ลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต เป็นต้น เรียกว่า ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ทั้งนี้ สายการประกอบเส้นตรง 2 เส้นที่ตั้งอยู่ใกล้กันในแนวขนานหากได้รับการจัดสมดุลร่วมกันโดยให้แต่ละสถานีงานสามารถบรรจุชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบผสมกันได้ จะทำให้มีโอกาสร่วมสถานีงานบางส่วนจากทั้งสองสายการประกอบให้เป็นสถานีงานเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้จำนวนสถานีงานรวมมีน้อยกว่ากรณีของแต่ละสายการประกอบได้รับการจัดสมดุลแยกออกจากกัน โดยสายการประกอบทั้งสองเส้นนี้จะเรียกรวมกันเป็นระบบการผลิตที่มีชื่อว่า สายการประกอบแบบขนาน (Parallel Assembly Lines)

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยากซึ่งแทบเป็นไปไม่ได้ที่จะค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดในระยะเวลานั้น ในทางปฏิบัติจึงนิยมนำเอากระบวนการเชิงฮิวริสติกมาใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีในระดับที่ยอมรับได้โดยที่ใช้เวลาไม่นานนัก ปัญหาประเภทนี้ได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย Gökçen และคณะ [2] พร้อมฮิวริสติกในการจัดสมดุลให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด และหลังจากนั้นได้มีวิธีการแก้ปัญหาอีกหลายวิธีที่ได้รับการเผยแพร่ในงานวิจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโมเดลเครือข่าย (Network Model) [3] กระบวนการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and Bound Procedure) [4] การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) [5] ฮิวริสติกแบบการค้นหากระจัดกระจาย (Scatter Search Based Heuristic) [6] อัลกอริทึมการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search Algorithm) [7],[8] รวมไปถึงวิธีการโปรแกรมเป้าหมาย (Goal Programming Approach) [9]

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบสิ่งที่น่าสนใจดังนี้ 1) สายการประกอบแบบขนานที่ได้รับการนำเสนอล้วนมีสายการประกอบภายในแต่ละเส้นไว้สำหรับผลิตสินค้าเพียงรุ่นเดียวเท่านั้น ยังไม่เคยมีกรณีที่ใช้สำหรับผลิตสินค้าหลายรุ่น ทั้งนี้ ถึงแม้ว่าในงานวิจัยบางชิ้นจะระบุว่าสายการประกอบแบบขนานที่นำเสนอมีไว้สำหรับผลิตสินค้าหลายรุ่นก็ตาม ([4], [5], [8]) แต่นั่นก็หมายถึงการที่บรรดาสายการประกอบภายในผลิตสินค้าต่างรุ่นกัน โดยที่สายการประกอบแต่ละเส้นยังคงผลิตสินค้าเพียงรุ่นเดียว 2) การจัดสมดุลที่พบมักเป็นการจัดสมดุลภายใต้วัตถุประสงค์เดียว คือทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด แต่ก็มีงานวิจัยบางชิ้นที่พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 2 ควบคู่ไปด้วย ได้แก่ งานวิจัยของ Baykasoglu และคณะ [5] รวมถึงงานวิจัยของ Özcan และคณะ [7] ที่กำหนดวัตถุประสงค์ในการทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลที่สุดเพิ่มเติมเข้าไป และงานวิจัยของ Scholl และ Boysen [4] ที่เพิ่มวัตถุประสงค์ในการทำให้สายการประกอบมีขนาดสั้นที่สุด (จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด) ทั้งนี้ หากสามารถนำเอาวัตถุประสงค์ที่กล่าวมาทั้งหมดมา

ใช้ในการจัดสมดุลร่วมกัน ย่อมทำให้ผู้แก้ปัญหาที่มีความพึงพอใจมากยิ่งขึ้น และ 3) ยังไม่มีงานวิจัยใดที่พิจารณาวัตถุประสงค์ในด้านความสัมพันธ์ของงาน ซึ่งอาจทำให้เกิดความยากลำบากในการทำงานของพนักงานได้

จากที่มาข้างต้น บทความนี้จึงนำเสนอปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่สายการประกอบภายในแต่ละเส้นมีไว้สำหรับผลิตสินค้าหลายรุ่น หรือที่เรียกว่าสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-model Parallel Assembly Lines) ภายใต้วัตถุประสงค์ได้แก่ ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของงานสูงที่สุด พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการที่ค่อนข้างใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Simon [10] ในปี 2008 โดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสามารถใช้แก้ปัญหาต่างๆ รวมถึงปัญหาเชิงการจัด เช่น ปัญหา Traveling Salesman [11] Job Shop Scheduling [12] Two-sided Assembly Line Balancing [13] ฯลฯ ได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอีกหลายๆ อัลกอริทึมที่เป็นที่นิยม

2. สายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม

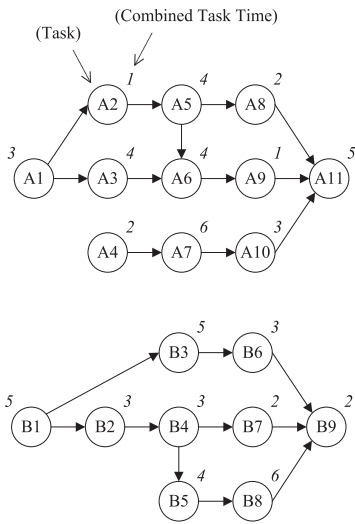
สายการประกอบแบบขนานที่นำเสนอมีสายการประกอบภายในแต่ละเส้นเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ที่รองรับการผลิตสินค้าจำนวนหลายรุ่นในตระกูลเดียวกัน ด้วยลำดับการผลิตที่สามารถสลับรุ่นไปมาได้ อย่างอิสระโดยไม่ต้องปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งส่งผลให้สายการประกอบประเภทนี้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว ตามแนวคิดการผลิตแบบทันเวลาพอดีอันเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

ฝั่งการจัดวางของสายการประกอบประเภทนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์เดี่ยวที่ Scholl และ Boysen [4] ได้นำเสนอไว้ นั่นคืออยู่ในรูป

ของสถานี (Station) ที่จัดเรียงกันอย่างต่อเนื่อง โดยในแต่ละสถานีอาจประกอบไปด้วยสถานีงานแยก (Separate Workstation) ที่บรรจุชิ้นงานจากสายการประกอบเดี่ยวจำนวนมาก 2 สถานีงาน หรือสถานีงานร่วม (Common Workstation) ที่บรรจุชิ้นงานจากทั้งสองสายการประกอบจำนวน 1 สถานีงาน ทั้งนี้ในแต่ละสถานีงานจะมีพนักงานประจำอยู่ 1 คน โดยพนักงานในสถานีงานแยกจะทำหน้าที่บนสายการประกอบที่สถานีงานนั้นตั้งอยู่ตลอดเวลา ขณะที่พนักงานในสถานีงานร่วมจะเริ่มต้นรอบการผลิตด้วยการประกอบชิ้นงานบนสายการประกอบแรกจนเสร็จแล้วหันไปประกอบชิ้นงานบนอีกสายการประกอบ เมื่อเสร็จสิ้นแล้วก็จะหันกลับมาที่สายการประกอบแรกอีกครั้งเพื่อเริ่มต้นรอบการผลิตใหม่

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมทั้งสองเส้นที่ขนานกันอยู่นี้มีการดำเนินงานภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกัน หรือที่เรียกว่ารอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time: CCT) แผนภาพลำดับก่อนหลังของแต่ละสายการประกอบที่ใช้ในการจัดสมดุลจะอยู่ในรูปของแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram: CPD) [14] ที่มีไว้แสดงข้อมูลว่าชิ้นงาน (Task) ต่างๆ ในการประกอบสินค้าทุกรุ่นต้องทำก่อนหรือหลังชิ้นงานใดบ้าง (ลูกศรในแผนภาพจะโยงจากโหนด x ไปโหนด y ถ้าชิ้นงาน x ต้องทำก่อนหน้าชิ้นงาน y โดยตรง) และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละชิ้นงาน (Task Time) อาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า ในการจัดสมดุลจึงอาศัยเวลาชิ้นงานร่วม (Combined Task Time) ที่เฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักมาจากเวลาชิ้นงานของสินค้าทุกรุ่นประกอบการพิจารณา ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้ [15]

กำหนดให้ M เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม, D_m เป็นปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m โดย $m = \{1, \dots, M\}$, t_{im} คือเวลาชิ้นงาน i ของสินค้ารุ่น m เมื่อ $i = \{1, \dots, N\}$ และ $q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$ เป็นสัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เทียบกับปริมาณการผลิตรวมทุกรุ่น เวลาชิ้นงานร่วม $i(t_i)$ สามารถคำนวณได้จากสมการ $t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im}$ รูปที่ 1(ก) และ 1(ข) แสดงตัวอย่าง



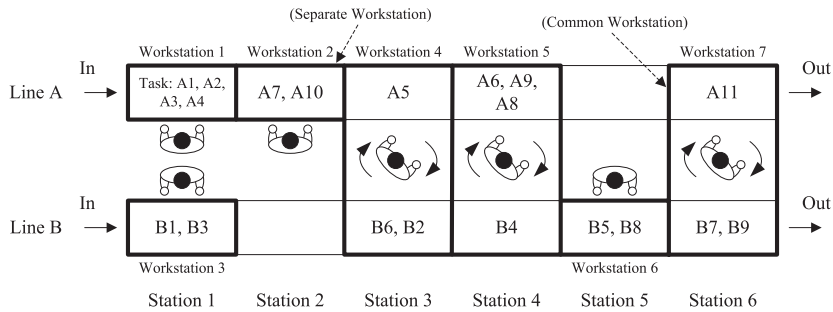
Task	Task Time		Combined Task Time ($q_{AI} = q_{AII} = \frac{1}{2}$)
	A_I	A_{II}	
A1	4	2	3
A2	1	1	1
A3	5	3	4
A4	1	3	2
A5	4	4	4
A6	0	8	4
A7	7	5	6
A8	2	2	2
A9	2	0	1
A10	4	2	3
A11	4	6	5

(ก)

Task	Task Time		Combined Task Time ($q_{BI} = \frac{1}{3}, q_{BII} = \frac{2}{3}$)
	B_I	B_{II}	
B1	7	4	5
B2	9	0	3
B3	3	6	5
B4	3	3	3
B5	0	6	4
B6	5	2	3
B7	2	2	2
B8	4	7	6
B9	2	2	2

(ข)

รูปที่ 1 แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมและเวลาชิ้นงานในการประกอบสินค้าบน (ก) สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม A และ (ข) สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม B



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ภายใต้รอบเวลาการผลิตร่วม 10 หน่วยเวลา

CPD พร้อมเวลาชิ้นงานในการประกอบสินค้าบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ตามลำดับ โดยสายการประกอบ A ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ รุ่น A_I และ A_{II} ด้วยสัดส่วน $q_{AI} = q_{AII} = \frac{1}{2}$ ขณะที่สายการประกอบ B ผลิตสินค้า 2 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ รุ่น B_I และ B_{II} ด้วย สัดส่วน $q_{BI} = \frac{1}{3}$ และ $q_{BII} = \frac{2}{3}$

ในการจัดสมดุล ชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบ จะถูกพิจารณาจัดสรรลงสู่สถานีงานต่างๆ ร่วมกัน โดยในแต่ละสถานีงานอาจบรรจุชิ้นงานของสายการประกอบเดี่ยว

(สถานีงานแยก) หรือของทั้งสองสายการประกอบผสมกัน (สถานีงานร่วม) ก็ได้ ผลการจัดสมดุลที่เป็นไปได้จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้ 1) ชิ้นงานทั้งหมดถูกจัดสรรจนครบ โดยแต่ละชิ้นงานสามารถอยู่ในสถานีงานใดก็ได้ เพียงสถานีงานเดียวเท่านั้น 2) แต่ละชิ้นงานต้องไม่อยู่ในสถานีงานที่ตั้งอยู่ก่อนหน้าสถานีงานอื่นๆ ที่มีชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าบรรจุอยู่ และ 3) ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมในแต่ละสถานีงานต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิตร่วม

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างผลการจัดสมดุลสายการ

ประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ภายใต้รอบเวลาการผลิตรวม 10 หน่วยเวลา สายการประกอบนี้มี 6 สถานี 7 สถานีงาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 สถานีงานแยก และ 3 สถานีงานร่วม

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลมีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งกำหนดให้มีระดับความสำคัญแตกต่างกันออกไปใน 3 ระดับ โดยจะมุ่งเน้นให้วัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่ง ซึ่งมีจำนวน 1 วัตถุประสงค์มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นหลัก ตามด้วยวัตถุประสงค์ระดับที่สองจำนวน 1 วัตถุประสงค์ และ วัตถุประสงค์ระดับที่สามซึ่งประกอบไปด้วย 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน

3.1 วัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่ง

วัตถุประสงค์หลักของการจัดสมดุลคือการทำให้อาจมีจำนวนสถานีงาน (N_w) หรือจำนวนแรงงานบนสายการประกอบน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนแรงงานและต้นทุนในการสร้างสถานีงานมีค่าต่ำที่สุดนั่นเอง

$$\text{Minimize } N_w \quad (1)$$

3.2 วัตถุประสงค์ระดับที่สอง

สายการประกอบที่มีสถานีงานเท่ากันอาจมีความยาวไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งจะแปรผันตามจำนวนสถานีที่มีอยู่ [4] วัตถุประสงค์ระดับนี้มีไว้เพื่อให้สายการประกอบมีจำนวนสถานี (N_s) น้อยที่สุดหรือมีขนาดสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งส่งผลให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } N_s \quad (2)$$

3.3 วัตถุประสงค์ระดับที่สาม

วัตถุประสงค์ระดับนี้ประกอบไปด้วย 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน โดยมียุทธศาสตร์ดังนี้

วัตถุประสงค์ย่อยที่ 1 เป็นการทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด หรือทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมของสถานีงานมีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์มให้มากที่สุด ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตและลดความแออัดบนสายการประกอบ รวมทั้งทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างพนักงาน [16]

กำหนดให้ m_l และ m_{l+1} เป็นรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม l และ $l+1$ ที่ขนานกันอยู่ตามลำดับ เมื่อ $m_l = \{1, \dots, m_l\}$ และ $m_{l+1} = \{1, \dots, m_{l+1}\}$, S_{kblL} คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตรวม (CCT) กับผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมที่สถานีงานที่ k ประเภท b ซึ่งอาจเป็นสถานีงานแยก (SW) หรือสถานีงานร่วม (CW) อย่างเป็นอย่างหนึ่ง ใช้ในการประกอบสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ L (TT_{kblL}) ค่า S_{kblL} ของสถานีงานแยก ($b=SW$) บนสายการประกอบ l และ $l+1$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$S_{kblL} = |CCT - T_{kblL}| \quad (3)$$

$$S_{kbl+1}^{(l+1)} = |CCT - TT_{kbl+1}^{(l+1)}| \quad (4)$$

ขณะที่ค่า S_{kblL} ของสถานีงานร่วม ($b=CW$) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{kblL+1}^{(l,l+1)} = |CCT - TT_{kblL} - TT_{kbl+1}^{(l+1)}| \quad (5)$$

ลำดับต่อไป กำหนดให้ S_{kb} เป็นค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยของสถานีงานที่ k ประเภท b ค่า S_{kb} ในกรณี $b=SW$ บนสายการประกอบ l และ $l+1$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$S_{kb} = \sum_{m_l=1}^{m_l} q_{m_l} S_{kblL} \quad (6)$$

$$S_{kb} = \sum_{m_{l+1}=1}^{m_{l+1}} q_{m_{l+1}} S_{kbl+1}^{(l+1)} \quad (7)$$

ส่วนค่า S_{kb} ในกรณี $b=CW$ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{kb} = \sum_{m=1}^{ml} \sum_{l=1}^{m+1} q_{ml} q_{m+1} S_{kbml,l+1} \quad (8)$$

จากนั้นสามารถคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) ของทุกสถานีงานได้จากสมการ

$$TAD = \sum_{k=1}^{NW} \sum_{b=SW}^{CW} S_{kb} \quad (9)$$

ค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b) สามารถคำนวณได้จากสมการ (10) ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Vilarinho และ Simaria [17] ทั้งนี้ B_b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า B_b ที่ต่ำจะแสดงถึงความสมดุลที่สูง วัตถุประสงค์ย่อยที่ 1 จึงเป็นการทำให้ B_b มีค่าต่ำที่สุดนั่นเอง

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{NW} \sum_{b=SW}^{CW} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (10)$$

วัตถุประสงค์ย่อยที่ 2 เป็นการพยายามทำให้ชั้นงานในแต่ละสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด ซึ่งจะทำให้อาศัยทักษะการทำงานหลักเพียงทักษะเดียวหรืออาจรวมถึงทักษะรองอื่นๆ เพียงไม่กี่ทักษะ สอดคล้องกับในด้านของพนักงานที่ย่อมมีทักษะที่ถนัดที่สุดและถนัดรองๆ ลงไป วัตถุประสงค์นี้จะทำให้ผู้จัดการสายการประกอบสามารถจัดสรรพนักงานเข้าสู่สถานีงานได้อย่างเหมาะสมตรงตามความถนัด ซึ่งถือเป็นการสร้างความพึงพอใจให้แก่พนักงาน และทำให้การดำเนินงานของสายการประกอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ความสัมพันธ์ของงานบนสายการประกอบสามารถชี้วัดได้ด้วยค่า $MIWR = N_w - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{NW} SN_k}$ เมื่อ SN_k คือจำนวนเครือข่ายของชั้นงานที่มีการเชื่อมโยงกันโดยตรงในสถานีงาน k [16], [18] ค่า $MIWR$ ที่ต่ำแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง วัตถุประสงค์ย่อยที่ 2 จะมุ่งเน้นให้ค่านี้มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } MIWR = N_w - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{NW} SN_k} \quad (11)$$

กำหนดให้ $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ คือเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (คำตอบ) ขนาด n ในสเปซคำตอบ X การทำให้วัตถุประสงค์ระดับที่สามทั้ง 2 วัตถุประสงค์ย่อยมีค่าที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกัน ทำได้ด้วยการหาเวกเตอร์ x^* ที่ทำให้เซตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อยที่ 1 ($z_1(x)$) และ 2 ($z_2(x)$) มีค่าที่น้อยที่สุด

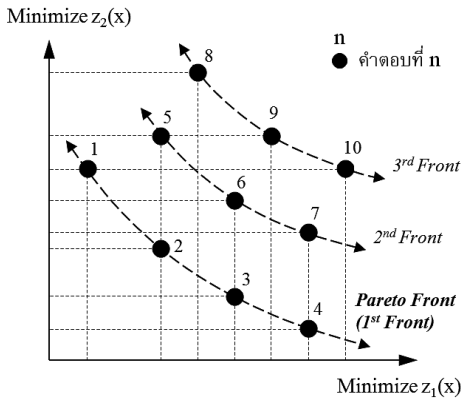
$$\text{Minimize } z(x^*) = \{z_1(x^*), z_2(x^*)\} \quad (12)$$

อย่างไรก็ตาม แทนเป็นไปได้ที่จะมีคำตอบที่สมบูรณ์แบบเพียงคำตอบเดียว ที่ทำให้วัตถุประสงค์ทั้งสองมีค่าที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกัน เนื่องจากเมื่อทำให้อาณาเขตของฟังก์ชันหนึ่งมีค่าที่เหมาะสมที่สุด มักส่งผลให้อาณาเขตของฟังก์ชันอีกชุดหนึ่งมีค่าที่เหมาะสมที่สุดจึงอยู่ในรูปของเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลย โดยคำตอบ x จะถือว่าครอบงำคำตอบ y ($x < y$) ก็ต่อเมื่อเป็นไปตาม 2 เงื่อนไขนี้ [19]

1. $z_1(x) \leq z_1(y)$ และ $z_2(x) \leq z_2(y)$
2. $z_1(x) < z_1(y)$ และ/หรือ $z_2(x) < z_2(y)$

รูปที่ 3 แสดงกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่สามของตัวอย่างคำตอบ 10 คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่งและสองเท่ากัน คำตอบที่ดีที่สุดในที่นี้ได้แก่ คำตอบที่ 1-4 เนื่องจากไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลยและเมื่อตัดคำตอบ 1-4 ออกจากการพิจารณา จะพบว่าคำตอบที่ 5-7 เป็นคำตอบที่ดีเป็นอันดับถัดไป และด้วยหลักการเดียวกันนี้จะพบว่าคำตอบที่ 8-10 เป็นคำตอบที่ดีเป็นอันดับสุดท้าย

ทั้งนี้ ในการจัดอันดับคำตอบระหว่างกระบวนการค้นหาคำตอบจะพิจารณาที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่งเป็นหลัก เนื่องจากถูกกำหนดให้มีความสำคัญมากที่สุด โดยหากมีหลายคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวเท่ากัน ให้จัดอันดับคำตอบเหล่านั้นจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 ซึ่งหากยังมีค่าเท่ากันอีก ก็ให้จัดอันดับจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟค่าฟังก์ชันสองวัตถุประสงค์

4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

งานวิจัยชิ้นนี้นำเอาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการที่คิดค้นโดย Simon [10] มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม โดย BBO นั้นได้รับแนวคิดมาจากพฤติกรรมการอพยพของสิ่งมีชีวิตที่มักแพร่พันธุ์ออกจากเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงซึ่งมีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ไปอาศัยยังเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและทำให้เกาะที่เข้าไปอาศัยอยู่นั้นมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้นจากการมีสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายกว่าเดิม เกาะในที่นี่จะเปรียบเสมือนคำตอบในการจัดสมดุล โดยคำตอบที่แย่นั้นมีโอกาสสูงที่จะได้รับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นๆ โดยเฉพาะจากคำตอบที่ดี และพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้น ส่วนคำตอบที่ดีอยู่แล้ว แม้มีโอกาสรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นไม่มากนัก แต่ก็คาดหวังว่าจะพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้นไปอีก

4.1 สตริงคำตอบ

คำตอบของการจัดสมดุลด้วยอัลกอริทึม BBO อยู่ในรูปของสตริงคำตอบที่ระบุค่าสิทธิ์ในการถูกเลือกไปจัดสรรลงสถานีงานของชิ้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบ

แบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม โดยแต่ละสตริงสามารถถูกถอดรหัสออกมาเพื่อแสดงถึงสายการประกอบที่มีการจัดสมดุลที่เฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่กำหนดได้

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบจะอาศัยเมตริกซ์ลำดับก่อนหลังประกอบการพิจารณา โดยเมตริกซ์ดังกล่าวเป็นเมตริกซ์ที่นำเอาข้อมูลจาก CPD ของทั้งสองสายการประกอบที่ขนานกันอยู่มาแสดงรวมกันได้ เมตริกซ์นี้มีขนาด $N \times N$ เมื่อ N คือจำนวนชิ้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบแบบขนาน แต่ละแถวและหลักมีชื่อตามชิ้นงานต่างๆ ช่องบนเมตริกซ์ที่มีชิ้นงานประจำแถวเป็นชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าชิ้นงานประจำหลักโดยตรงจะมีค่าเท่ากับ 1 ขณะที่ช่องอื่นๆ ที่เหลือมีค่าเท่ากับ 0 เมตริกซ์นี้มีการใช้งานร่วมกับสตริงคำตอบในการเลือกชิ้นงานไปจัดสรรลงสถานีงานอย่างเป็นลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ 1) พิจารณาชิ้นงานที่มีผลรวมตลอดทั้งหลักเท่ากับ 0 ซึ่งหมายถึงชิ้นงานที่พร้อมถูกนำไปจัดสรรลงสถานีงานเนื่องจากไม่มีชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าเหลืออยู่ โดยหากมีชิ้นงานเดียว ให้เลือกชิ้นงานนั้นไปจัดสรรลงสถานีงาน แต่หากมีมากกว่า 1 ชิ้นงาน ให้เลือกชิ้นงานที่มีค่าสิทธิ์มากที่สุดตามที่ระบุในสตริงคำตอบ 2) ปรับค่าทุกช่องในแถวของชิ้นงานที่เพิ่งถูกเลือกไปให้เท่ากับ 0 แล้วปรับค่าทุกช่องในหลักของชิ้นงานดังกล่าวให้เท่ากับ 1 และ 3) วนซ้ำขั้นตอนที่ 1-2 เพื่อเลือกชิ้นงานลำดับถัดๆ ไปจนครบ

การจัดสรรชิ้นงานนั้นเริ่มต้นด้วยการเปิดสถานีงานแรกแล้วทยอยใส่ชิ้นงานลงไปตามลำดับที่ได้ เมื่อใดก็ตามที่มาถึงชิ้นงานที่เริ่มทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมในสถานีงานมีค่าเกินรอบเวลาการผลิตร่วมให้ทำการเปิดสถานีงานใหม่แล้วนำชิ้นงานนั้นจัดสรรลงไปเป็นชิ้นงานแรก และทยอยจัดสรรชิ้นงานลำดับถัดๆ ไปด้วยหลักการเดียวกันนี้จนครบสุดท้ายจะทำให้ทราบผังการจัดวางของสายการประกอบที่ถอดรหัสมาจากสตริงคำตอบที่พิจารณา และสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ออกมาได้

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างเมตริกซ์ลำดับก่อนหลังของสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม A และ B

ซึ่งมี CPD ดังรูปที่ 1 ขณะที่ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างสตริงค่าสิทธิ์พร้อมลำดับของชิ้นงานในการจัดสรรลงสู่สถานีนงาน และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่ถอดรหัสออกมาได้ โดยผังการจัดวางสายการประกอบที่สอดคล้องกับสตริงนี้เป็นดังรูปที่ 2

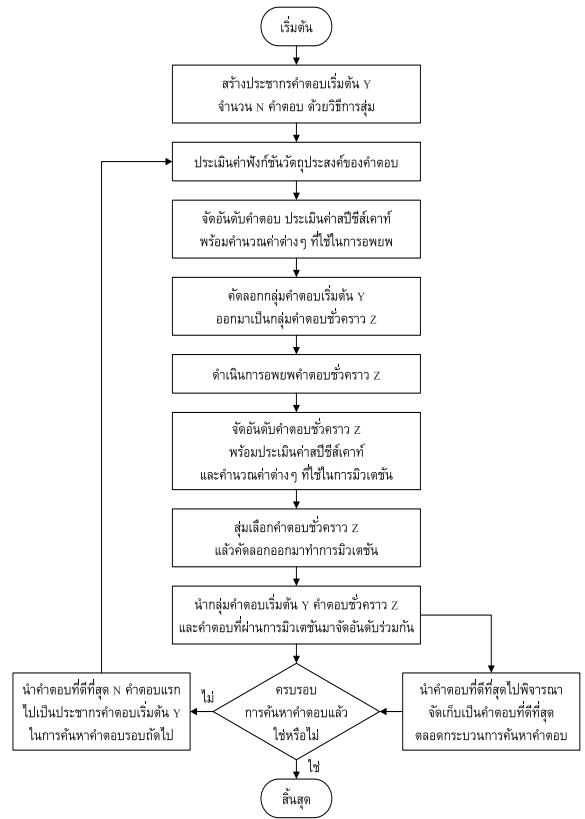
4.2 ขั้นตอนของอัลกอริทึม BBO

การแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมด้วยอัลกอริทึม BBO มีขั้นตอนดังนี้ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ)

ขั้นที่ 1 สร้างประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น Y จำนวน N สตริง ด้วยวิธีการสุ่ม

ขั้นที่ 2 กำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงคำตอบ

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ที่มีข้อมูลพื้นฐานดังรูปที่ 1 ภายใต้รอบเวลาการผลิตรวม 10 หน่วยเวลาควบคู่ไปด้วย โดยกำหนดให้ประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้นมีจำนวน 5 สตริง ผลการสร้างสตริงพร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของ BBO

ตารางที่ 1 เมตริกซ์ลำดับก่อนหลังของสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม A และ B

From-To	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
A1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
B4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
B5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
B6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสตริงคำตอบของการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม A และ B

String	Task																			Objective function in level				
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	N_w	N_c	B_n	$MIWR$
Priority	10	11	8	7	4	19	15	9	16	12	1	6	5	13	3	18	14	17	20	2	7	6	0.093	6.500
Sequence	1	2	3	4	11	12	5	14	13	6	20	7	10	8	15	16	9	18	17	19				

ตารางที่ 3 สตริงคำตอบเริ่มต้นของปัญหาตัวอย่างพร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

String Y	Priority of Task																			Objective function in level				
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	1	2	3	
1	2	6	4	18	8	10	14	3	20	15	19	9	5	1	16	11	7	12	17	13	N_{μ}	N_s	B_s	$MIWR$
2	16	3	14	8	17	5	18	12	4	15	10	13	1	20	6	19	9	11	7	2	8	7	0.040	7.385
3	10	11	8	7	4	19	15	9	16	12	1	6	5	13	3	18	14	17	20	2	7	6	0.093	6.500
4	9	6	13	16	14	20	19	8	7	1	10	17	3	4	15	12	2	11	5	18	8	5	0.046	7.529
5	8	3	19	15	12	18	9	14	20	2	17	4	11	5	1	13	16	10	7	6	8	5	0.066	7.273

ขั้นที่ 3 จัดอันดับสตริงคำตอบ โดยเลขอันดับของสตริงในที่นี้เรียกว่าค่าความแข็งแรง (Fitness) โดยสตริงที่ดีที่สุดจะมี Fitness = 1 ตามด้วยสตริงที่มี Fitness = 2, 3, ..., F

ขั้นที่ 4 กำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ (Species Count: SC) ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งจะมีค่าในทางตรงกันข้ามกับค่า Fitness โดยสตริงที่ดีที่สุดจะมีค่า $SC = F$ ขณะที่สตริงที่แย่ที่สุดมีค่า $SC = 1$ พร้อมคำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) และอพยพออก (μ_k) ในรูปแบบ Sinusoidal [20] ของแต่ละสตริงคำตอบที่มี $SC = k$ รวมทั้งความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ด้วยสมการ (13)-(16)

$$\lambda_k = \frac{1}{2} \left(\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1 \right) \quad (13)$$

$$\mu_k = \frac{1}{2} \left(-\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1 \right) \quad (14)$$

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \quad (15)$$

$$P_{\mu,k} = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^K \mu_k} \quad (16)$$

เมื่อ K คือค่า SC ที่สูงที่สุด และ $n = K + 1$

ตารางที่ 4 แสดงผลการจัดอันดับสตริงคำตอบเริ่มต้นในปัญหาตัวอย่างพร้อมค่าต่างๆที่ใช้ในการอพยพ จะเห็นว่าคำตอบที่ดีที่สุดมีอัตราการอพยพเข้าต่ำ อพยพออกสูง นั่นคือมีโอกาสน้อยที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะ แต่มีถ่ายทอดคุณลักษณะออกไปให้คำตอบอื่น และในทางตรงกันข้าม คำตอบที่แย่งจะมีอัตราการอพยพเข้าสูง อพยพออกต่ำ นั่นคือ เป็นไปได้สูงที่จะรับการถ่ายทอด

คุณลักษณะจากคำตอบอื่น แต่มีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะออกไป

ตารางที่ 4 ผลการจัดอันดับสตริงคำตอบเริ่มต้นและค่าต่างๆที่ใช้ประกอบการอพยพ

Fitness	SC	No.	String	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cum $P_{\mu,k}$
1	4	1	3	0.095	0.905	0.048	0.452	0.452
2	3	1	1	0.345	0.655	0.173	0.327	0.780
3	2	1	4	0.655	0.345	0.327	0.173	0.952
		2	5					
4	1	1	2	0.905	0.095	0.452	0.048	1.000

ขั้นที่ 5 คัดลอกเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y พร้อมผลการจัดอันดับและค่าที่ใช้ในการอพยพ ออกมาเป็นเซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z

ขั้นที่ 6 กำหนดให้ $Y_{k,mk}$ คือสตริงคำตอบเริ่มต้นที่มี $SC = k$ ตัวที่ m_k และ $Z_{k,mk}$ คือสตริงคำตอบชั่วคราวที่มี $SC = k$ ตัวที่ m_k ($m_k = 1, \dots, m_k$)

ทำการอพยพสตริงคำตอบชั่วคราว $Z_{k,mk}$ ทีละสตริง โดยการอพยพเป็นกระบวนการตัดสินใจว่าแต่ละบิตในสตริงจะได้รับการถ่ายทอดค่าสิทธิ์ (อพยพเข้า) จากสตริงอื่นหรือไม่ ถ้าได้รับ จะเป็นสตริงใดที่ถ่ายทอดค่าสิทธิ์มาให้ (อพยพออก) กระบวนการอพยพในแต่ละสตริง $Z_{k,mk}$ ทำได้ด้วยการพิจารณาบิตที่ละบิต เรียงจากบิตแรกถึงบิตสุดท้าย (บิตแรกของสตริงในปัญหาตัวอย่างคือบิตขั้นงาน A1 ไล้ไปเรื่อยๆจนถึงบิตขั้นงาน B9) โดยให้สุ่มค่า r_1 ในช่วง $[0, 1]$ ขึ้นมา ถ้า $r_1 > P_{\lambda,k}$ จะไม่มีการอพยพเข้าสู่บิตนั้น และให้ไปพิจารณาต่อที่บิตถัดไป แต่ถ้า $r_1 \leq P_{\lambda,k}$ แสดงว่าบิตดังกล่าวจะได้รับการอพยพเข้า ให้ทำการสุ่มเลือกสตริงจากเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y เพื่อกำหนดให้เป็นสตริงที่จะอพยพออก โดยให้สุ่มค่า r_2 ในช่วง $[0, 1]$ ขึ้นมา แล้วดูว่า

ค่านี้ตกอยู่ในช่วง $P_{\mu,k}$ สะสมของสตริงที่มีค่า SC เท่าใด ถ้าสตริงที่มีค่า SC ดังกล่าวมีเพียง 1 สตริง ให้เลือกสตริงนั้น เป็นสตริงอพยพออก แต่ถ้ามีมากกว่า 1 สตริง ให้สุ่มเลือก มาสตริงเดียว (ทั้งนี้ สตริงอพยพออก $Y_{k,mk}$ จะต้องไม่ใช่ สตริงเริ่มต้นที่สตริง $Z_{k,mk}$ คัดลอกออกมา เพราะถ้าเป็น สตริงที่เหมือนกัน จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ระหว่าง การอพยพ) จากนั้นให้เปลี่ยนค่าสิทธิ์ของบิตในสตริง $Z_{k,mk}$ ที่กำลังพิจารณา ให้เท่ากับค่าสิทธิ์ของบิตในตำแหน่ง เดียวกันนี้ของสตริงอพยพออก $Y_{k,mk}$ อย่่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าสิทธิ์ใหม่ของบิตที่พิจารณา (บิต i) อาจไป ช้ำกับค่าสิทธิ์ของบิตในตำแหน่งอื่น (บิต j) จึงให้ทำการ ซ่อมแซมสตริงด้วยการเปลี่ยนค่าสิทธิ์ของบิต j ให้เท่ากับ ค่าสิทธิ์เดิมของบิต i เสร็จแล้วให้พิจารณาการอพยพในบิต ถัดๆ ไปจนครบทุกบิต และทุกสตริงคำตอบ Z

ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างผลการสุ่มเลือกบิตในสตริง คำตอบ $Z_{3,1}$ บิตที่จะได้รับการอพยพเข้า $r_1 \leq P_{\lambda,3} = 0.173$ ได้แก่ บิตตำแหน่งที่ 4 (ชั้นงาน A4), 12 (B1) และ 18 (B7) ซึ่งจากการสุ่มค่า r_2 พบว่าจะได้รับการอพยพมาจากสตริง $Y_{4,1}$, $Y_{4,1}$ และ $Y_{2,2}$ ตามลำดับ ผลการอพยพสตริงดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 6 ขณะที่ตารางที่ 7 แสดงสตริงคำตอบ Z ที่ผ่านการอพยพทั้ง 5 สตริง พร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ **ขั้นที่ 7** จัดอันดับสตริงคำตอบชั่วคราว Z ที่ผ่านการอพยพ ได้ค่าความแข็งแรงและสปีชีส์เคาท์ **ขั้นที่ 8** คำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ k (P_k) และความน่าจะเป็นในการมีเวกเตอร์ของสตริง สปีชีส์เคาท์ k (m_k) ในเซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z ที่ผ่านการอพยพด้วยสมการ (17) และ (18) ตามลำดับ [20] ผลการ คำนวณค่า P_k และ m_k ของปัญหาตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 5 ผลการสุ่มอพยพบิตในสตริง $Z_{3,1}$

บิตอพยพเข้า		บิตจากสตริง Y ที่อพยพออก				
Bit (Task)	r_1	r_2	SC	สตริงใน SC	สตริงที่เลือก	ค่าสิทธิ์ที่อพยพออก
4 (A4)	0.064	0.446	4	{3}	3	7
12 (B1)	0.141	0.009	4	{3}	3	6
18 (B7)	0.027	0.898	2	{4, 5}	5	10

ตารางที่ 6 การปรับเปลี่ยนค่าบิตจากการอพยพและซ่อมแซมสตริงคำตอบ $Z_{3,1}$

ลำดับ	Bit (Task)	ค่าสิทธิ์ เดิม	ค่าสิทธิ์ ใหม่	ขั้นตอน	Priority of Task																			
					A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
1	4 (A4)	18	7	เริ่มต้น	2	6	4	18	8	10	14	3	20	15	19	9	5	1	16	11	7	12	17	13
				อพยพ	2	6	4	7	8	10	14	3	20	15	19	9	5	1	16	11	7	12	17	13
				ซ่อมแซม	2	6	4	7	8	10	14	3	20	15	19	9	5	1	16	11	18	12	17	13
2	12 (B1)	9	6	เริ่มต้น	2	6	4	7	8	10	14	3	20	15	19	9	5	1	16	11	18	12	17	13
				อพยพ	2	6	4	7	8	10	14	3	20	15	19	6	5	1	16	11	18	12	17	13
				ซ่อมแซม	2	9	4	7	8	10	14	3	20	15	19	6	5	1	16	11	18	12	17	13
3	18 (B7)	12	10	เริ่มต้น	2	9	4	7	8	10	14	3	20	15	19	6	5	1	16	11	18	12	17	13
				อพยพ	2	9	4	7	8	10	14	3	20	15	19	6	5	1	16	11	18	10	17	13
				ซ่อมแซม	2	9	4	7	8	12	14	3	20	15	19	6	5	1	16	11	18	10	17	13

ตารางที่ 7 สตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังการอพยพ

String Z	Priority of Task																			Objective function in level				
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B7	B8	B9	1	2	3		
	N_μ	N_σ	N_τ	N_δ	N_ϵ	N_ζ	N_η	N_θ	N_ι	N_κ	N_λ	N_ν	N_ξ	N_\omicron	N_π	N_ρ	N_σ	N_τ	N_υ	N_ϕ	N_χ	N_ψ	N_ω	
1	2	9	4	7	8	12	14	3	20	15	19	6	5	1	16	11	18	10	17	13	8	5	0.028	7.200
2	16	13	4	7	17	10	18	9	14	15	5	2	20	1	3	19	12	11	8	6	8	4	0.058	7.200
3	10	11	8	7	4	19	15	3	16	12	1	6	5	13	9	18	14	17	20	2	7	5	0.124	6.500
4	2	6	13	7	19	4	9	8	16	10	1	17	3	5	15	12	14	11	20	18	8	5	0.024	7.333
5	8	1	19	7	12	15	9	14	20	2	10	4	11	13	3	5	16	18	17	6	9	5	0.044	8.357

$$P_k = \frac{\prod_{j=1}^k \left(\frac{I}{E} \right)^k \left(\frac{\sin^2 \left(\frac{n+j-1}{2n} \pi \right)}{\sin^2 \left(\frac{j}{2n} \pi \right)} \right)}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \left(\frac{I}{E} \right)^i \left(\frac{\sin^2 \left(\frac{n+j-1}{2n} \pi \right)}{\sin^2 \left(\frac{j}{2n} \pi \right)} \right)} \quad (17)$$

$$m_k = \frac{1 - P_k}{\sum_{k=1}^K (1 - P_k)} \quad (18)$$

ตารางที่ 8 ผลการจัดอันดับสตริงคำตอบชั่วคราว Z ที่ผ่านการอพยพ และค่าต่างๆ ที่ใช้ประกอบการมิวเตชัน

Fitness	SC	No.	String	P_k	m_k	Cum m_k
1	4	1	3	0.135	0.286	0.286
2	3	1	2	0.352	0.214	0.500
3	2	1	4	0.352	0.214	0.714
		2	1			
4	1	1	5	0.135	0.286	1.000

ขั้นที่ 9 สุ่มค่า r_3 ในช่วง $[0,1]$ ขึ้นมา หากค่านี้ตกอยู่ในช่วง m_k สะสมของสตริงใดในกลุ่มสตริง Z หลังอพยพ ให้คัดลอกสตริงนั้นออกมาทำการมิวเตชัน โดยในที่นี้จะอาศัยการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange [21] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ (1) พิจารณabit ที่ละbit เริ่มจากตำแหน่งแรก สุ่มค่า r_4 ในช่วง $[0,1]$ ขึ้นมา หาก $r_4 > P_m$ (เมื่อ P_m คือความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน) จะไม่ทำการใดๆ กับbit นี้ และให้พิจารณาต่อที่bit ถัดไป แต่ถ้า $r_4 \leq P_m$ ให้สุ่มเลือกbit ใดก็ได้ในสตริงเดียวกันนี้ขึ้นมาอีกหนึ่งbit แล้วสลับค่าสิทริกกัน จากนั้นให้พิจารณาการมิวเตชันในbit ถัดๆ ไปจนครบ

จากปัญหาตัวอย่าง สมมติว่าสตริงที่ถูกสุ่มทำมิวเตชัน

ตารางที่ 9 การมิวเตชันสตริงคำตอบหลังอพยพ $Z_{1,1}$

ลำดับ	คูบิตมิวเตชัน	Priority of Task																			
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
		8	1	19	7	12	15	9	14	20	2	10	4	11	13	3	5	16	18	17	6
1	4 (A4) and 12 (B1)	8	1	19	4	12	15	9	14	20	2	10	7	11	13	3	5	16	18	17	6
2	15 (B4) and 8 (A8)	8	1	19	4	12	15	9	3	20	2	10	7	11	13	14	5	16	18	17	6

คือสตริงหลังอพยพ $Z_{1,1}$ โดยมีbit ที่ 4(A4) และ 15(B4) ถูกสุ่มให้สลับค่าสิทริกกับbit ที่ 12(B1) และ 8(A8) ตามลำดับ ผลการมิวเตชันแสดงดังตารางที่ 9

ขั้นที่ 10 นำสตริงคำตอบเริ่มต้น Y สตริงคำตอบ Z หลังอพยพ และสตริงที่ผ่านการมิวเตชันมารวมกันแล้ว จัดอันดับ นำสตริงที่ดีที่สุด N อันดับแรกไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ในกระบวนการค้นหาคำตอบรอบถัดไป หากสตริงอันดับที่ N มีหลายสตริง ให้เลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance [22] มากที่สุด พร้อมกันนี้ให้นำสตริงอันดับที่ 1 ไปจัดเก็บเป็นสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบด้วย

ขั้นที่ 11 กลับไปที่ขั้นที่ 2 เพื่อเริ่มกระบวนการค้นหาคำตอบรอบถัดไป และวนซ้ำจนครบตามจำนวนรอบที่กำหนด

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1 การออกแบบการทดลอง

เพื่อเป็นการประเมินสมรรถนะของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทดลองใช้ BBO ในการแก้ปัญหาตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 4 ปัญหา ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดอยู่ในช่วง 49 ถึง 218 ชิ้นงาน โดยแต่ละปัญหาแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกันออกไปดังตารางที่ 10 (รวมทั้งสิ้นมี 12 ปัญหาย่อย) และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II: NSGA-II) [22] ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาลักษณะนี้

ตารางที่ 10 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหา	ที่มาของ CPD	จำนวนชั้นงาน*			จำนวนรุ่นสินค้า (อัตราส่วนการผลิต)		รอบเวลาการผลิต	Maximum Generation
		Line 1	Line 2	รวม	Line 1	Line 2		
P1	[23]	25	24	49	2 (1:1)	2 (2:3)	16, 22, 30	500
P2	[24]	53	51	104	2 (1:2)	2 (1:2)	2338, 3507, 4676	1000
P3	[25]	75	71	146	4 (1:2:2:3)	4 (1:1:2:4)	29, 34, 43	1500
P4	[26]	111	107	218	3 (1:1:1)	3 (1:1:3)	5785, 6540, 7162	2500

* CPD ของ Line 2 เหมือนกับ Line 1 แต่ตัดชั้นงานส่วนท้ายออก

พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา แสดงดังตารางที่ 11 โดยในส่วนของ BBO จะอาศัยการอพยพ และมิวเตชันแบบ Sinusoidal [20] และ Reciprocal Exchange [21] ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยของ Ma [20] และ Jitmetta [27] แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แก้ไขปัญหามีลักษณะใกล้เคียงกันนี้ได้โดยมีประสิทธิภาพ ขณะที่ ในส่วนของ NSGA-II จะอาศัยการครอสโอเวอร์และมิวเตชันแบบ Weight Mapping Crossover [28] และ Reciprocal Exchange ตามลำดับ ซึ่งจากทดลองในงานวิจัยของ Jansaem และ Chutima [13] พบว่าสามารถใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน ทั้งนี้ ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันของ BBO และค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์และมิวเตชันของ NSGA-II นั้นได้มาจากการทดลองแบบ Full Factorial Design จำนวน 2 Replicate เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นค่าที่ทำให้ อัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบในแต่ละปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

BBO	
Population size:	100
Migration method:	Sinusoidal
Mutation method:	Reciprocal exchange
Mutation probability:	P1-P4: 0.01
NSGA-II	
Population size:	100
Crossover method:	Weight mapping crossover
Mutation method:	Reciprocal exchange
Crossover probability:	P1: 0.7 P2: 0.7 P3: 0.5 P4: 0.6
Mutation probability:	P1: 0.3 P2: 0.2 P3: 0.2 P4: 0.2

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาค่าตอบระหว่าง BBO กับ NSGA-II นั้น จะพิจารณาจากค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 (จำนวนสถานีงาน หรือ N_w) ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้เป็นหลัก หากพบว่ามีค่าเท่ากัน จะพิจารณาที่ค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 (จำนวนสถานี หรือ N_s) เป็นลำดับถัดไป ซึ่งหากยังพบว่า มีค่าเท่ากันอีก ก็จะพิจารณาที่ค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ประกอบไปด้วย 2 ค่าที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุดพร้อมกันได้แก่ค่าความสมดุลของภาระงาน (B_b) และค่าความสัมพัทธ์ของงาน ($MIWR$) ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมอาจค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดหลายคำตอบ การจะเปรียบเทียบว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมใดดีกว่ากันจึงต้องอาศัยตัวชี้วัดตามรูปแบบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งกำหนดให้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวชี้วัด [18] ได้แก่ 1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพारेโต (Convergence to the Pareto-optimal Set) ซึ่งใช้ประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด 2) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread of Solutions) ซึ่งใช้บ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด และ 3) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-dominated Solution: R_{NDS}) ซึ่งใช้แสดงว่าในบรรดาคำตอบที่หามาได้ทั้งหมดเป็นคำตอบที่ตรงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของแต่ละปัญหานั้นไม่สามารถหามาได้ ในที่นี้จึงอาศัยกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณมาใช้ในการคำนวณค่าตัวชี้วัดต่างๆ แทน ซึ่งเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจากการนำเอาคำตอบทั้งหมดของ BBO และ NSGA-II มาจัดอันดับร่วมกัน (จากปัญหาทั้งหมด ทราบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเฉพาะของปัญหา P1-P3 ในส่วนของค่าตัวชี้วัดประจักษ์ระดับที่ 1 หรือ N_W เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 12)

นอกจากค่าตัวชี้วัดประจักษ์และค่าตัวชี้วัดต่างๆข้างต้น ผู้วิจัยยังกำหนดให้มีการเปรียบเทียบอัลกอริทึมในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นอีกตัวชี้วัดที่สำคัญ โดยผู้แก้ปัญหาย่อมพึงพอใจกับอัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีได้ภายในระยะเวลาที่ไม่นานจนเกินไปนัก

5.3 ผลการทดลอง

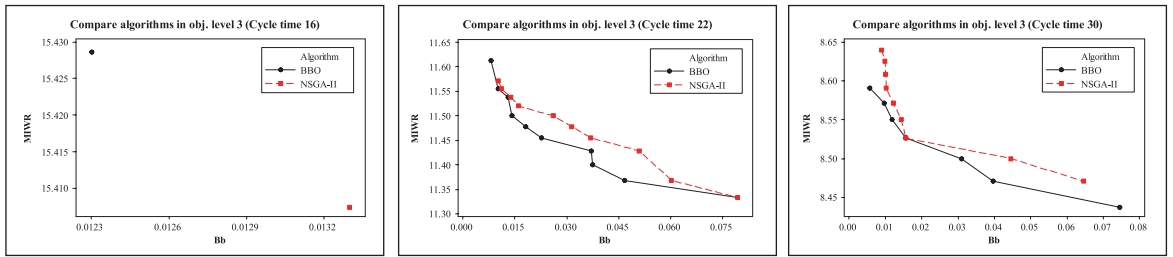
การทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างเป็นการทดลองผ่านโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel Core i5-3210M CPU 2.5 GHz RAM 8.0 GB โดยจากผลการทดลองที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปของค่าตัวชี้วัดประจักษ์และค่าตัวชี้วัดต่างๆดังตารางที่ 12 พบว่า BBO สามารถค้นพบคำตอบที่มีค่าตัวชี้วัดประจักษ์ระดับที่ 1 (N_W) และ 2 (N_S) เท่ากับ NSGA-II ในทุกปัญหา ยกเว้นปัญหาขนาดกลาง P2 กรณีรอบเวลาการผลิต 2338 ที่คำตอบของ BBO มีค่า N_S ต่ำกว่า (ดีกว่า) NSGA-II รวมถึงปัญหาขนาดใหญ่ P4 กรณีรอบเวลาการผลิต 5785 และ 7162 ที่คำตอบของ BBO ดีกว่า NSGA-II ในด้านของค่า N_S และ N_W ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นเบื้องต้นว่า BBO มีสมรรถนะที่ค่อนข้างเหนือกว่า NSGA-II ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ ทั้งนี้ เป็นที่ชัดเจนว่าไม่มีปัญหาใดเลยที่ NSGA-II สามารถค้นพบคำตอบที่มีค่าตัวชี้วัดประจักษ์สองระดับแรกดีกว่า BBO

ตารางที่ 12 ผลการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง

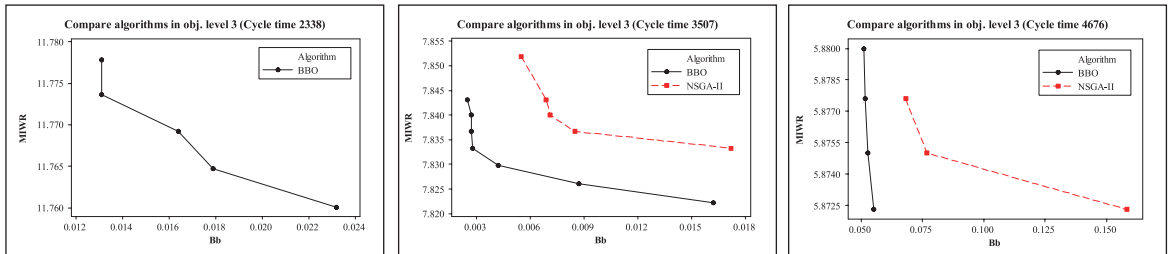
Problem	P1			P2			P3			P4		
No. of Tasks (Line 1 - Line 2)	49 (25 - 24)			104 (53 - 51)			146 (75 - 71)			218 (111 - 107)		
Cycle Time	16	22	30	2338	3507	4676	29	34	43	5785	6540	7162
N_W												
Optimal	16	12	9	12	8	6	123	119	98	-	-	-
BBO	16	12	9	12	8	6	123	119	98	57	51	46
NSGA-II	16	12	9	12	8	6	123	119	98	57	51	47
N_S												
BBO	8	6	5	8	5	4	63	61	50	29	26	24
NSGA-II	8	6	5	9	5	4	63	61	50	30	26	24
Convergence												
BBO	0.7071	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000	0.1361	0.0000
NSGA-II	0.7071	0.1014	0.1126	n/a**	0.1511	0.1270	0.3267	0.2174	0.5199	n/a**	0.3163	n/a**
Spread												
BBO	n/a*	0.2968	0.2510	0.1698	0.3567	0.1554	0.0264	0.0390	0.0489	0.0449	0.2310	0.1893
NSGA-II	n/a*	0.4600	0.5107	n/a**	0.7050	0.9138	0.7058	0.2253	0.6105	n/a**	0.7071	n/a**
R_{NS}												
BBO	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00	0.83	1.00
NSGA-II	0.50	0.10	0.17	n/a**	0.00	0.00	0.25	0.00	0.46	n/a**	0.17	n/a**
CPU time (s)												
BBO	11	15	12	119	117	108	147	508	487	2198	1991	2146
NSGA-II	16	17	12	144	142	144	283	519	632	2367	2353	2581

* ไม่มีค่าการกระจายตัว (Spread) เนื่องจากมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้เพียงคำตอบเดียว

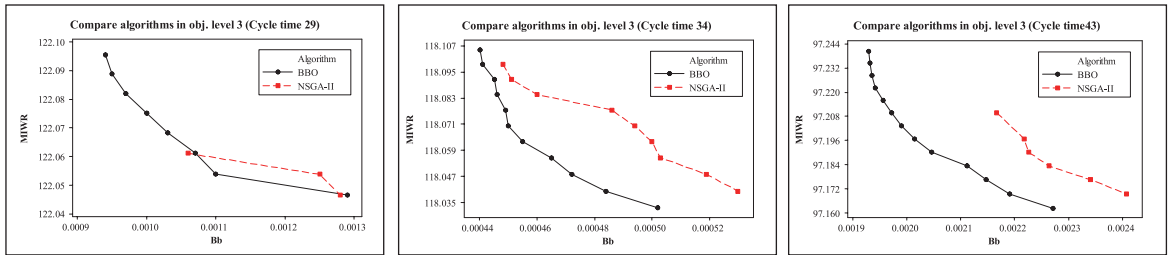
** ค่าตัวชี้วัดถูกตัดออกจากการพิจารณา เนื่องจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่งและ/หรือสองต้อยกว่า BBO



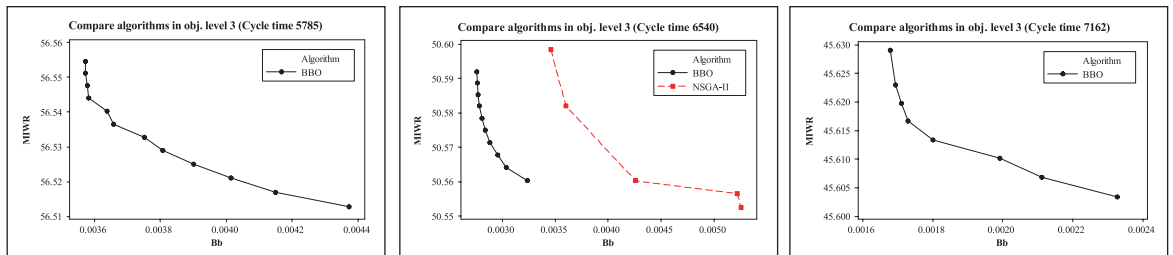
(ก) ปัญหา P1 ขนาด 49 ชั้นงาน



(ข) ปัญหา P2 ขนาด 104 ชั้นงาน



(ค) ปัญหา P3 ขนาด 146 ชั้นงาน



(ง) ปัญหา P4 ขนาด 218 ชั้นงาน

รูปที่ 5 ค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ของกลุ่มคำตอบที่ BBO และ NSGA-II หามาได้ในปัญหาต่างๆ

อย่างไรก็ตาม จากปัญหา P1-P3 พบว่าทั้ง BBO และ NSGA-II ต่างก็ค้นพบคำตอบที่มีค่า $N_{//}$ ตรงกับค่า Optimal ทั้งสิ้น ซึ่งถือเป็นการยืนยันได้ระดับหนึ่งว่า ทั้งสองอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ

สำหรับในปัญหาอื่นๆ ที่ BBO และ NSGA-II ค้นพบคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ 2 ระดับแรก ($N_{//}$ และ N_2) เท่ากัน การเปรียบเทียบสมรรถนะจะพิจารณาจากค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ของกลุ่มคำตอบที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้ดังที่แสดงในรูปที่ 5 โดยอาศัยตัวชี้วัดต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ได้แก่ ค่า Convergence (ยิ่งเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) ค่า Spread (ยิ่งเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) และค่า RNSD (ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี) โดยจากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดในตารางที่ 12 พบว่ามีเพียงปัญหาขนาดเล็ก P1 กรณีรอบเวลาการผลิต 16 เท่านั้น ที่ทั้งสองอัลกอริทึมมีสมรรถนะทั้งสามด้านเท่ากัน ขณะที่ในปัญหาที่เหลือทั้งหมดพบว่า BBO มีสมรรถนะที่สูงกว่า NSGA-II อย่างชัดเจนในทุกด้าน กล่าวคือ กลุ่มคำตอบที่ BBO หามาได้นั้นมีค่าวัตถุประสงค์เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณมากกว่า มีการกระจายตัวที่กว้างและสม่ำเสมอกว่า ตลอดจนเมื่อพิจารณาจากคำตอบที่หามาได้ทั้งหมด พบว่ามีคำตอบที่ตรงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณคิดเป็นอัตราส่วนสูงกว่า NSGA-II

สำหรับในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ พบว่าแต่ละอัลกอริทึมจะใช้เวลาแปรผันไปตามขนาดของปัญหา ทั้งนี้ในปัญหาขนาดเล็กพบว่า BBO และ NSGA-II ต่างก็ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น NSGA-II จะยิ่งใช้เวลานานกว่า BBO อย่างเห็นได้ชัด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า BBO นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมเหนือกว่า NSGA-II ในทุกขนาดปัญหา และถือเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถใช้แก้ปัญหาประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. สรุป

สายการประกอบแบบขนานเป็นระบบการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบเส้นตรงอย่างน้อยสองเส้นที่ขนานกันและได้รับการจัดสมมูลร่วมกัน สถานะบางส่วนจากสายการประกอบที่อยู่ติดกันจะถูกยุบรวมให้เป็นสถานะเดียว ส่งผลให้ระบบการผลิตนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีแต่ละสายการประกอบดำเนินงานอย่างเป็นอิสระ เนื่องจากมีจำนวนสถานะที่น้อยกว่า

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมมูลบนสายการประกอบแบบขนานที่สายการประกอบแต่ละเส้น

เป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองลูกค้าได้อย่างรวดเร็วตามแนวคิดการผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดสมมูลจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ที่จะทำให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ จำนวนสถานะที่น้อยที่สุด จำนวนสถานะที่น้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานะที่สูงที่สุด และความสัมพันธ์ของงานที่สูงที่สุด พร้อมทั้งนำเสนออัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว

ผลจากการทดลองใช้ BBO ในการแก้ปัญหาตัวอย่างเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II: NSGA-II) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยม พบว่า BBO มีสมรรถนะที่เหนือกว่า NSGA-II อย่างเห็นได้ชัด ทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ ตลอดจนใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบน้อยกว่า จึงสรุปได้ว่า BBO เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถใช้แก้ปัญหาการจัดสมมูลประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับแนวทางการศึกษาในอนาคตอาจนำเอาปัจจัยในทางปฏิบัติ เช่น เวลาเดินทางของพนักงานในสถานะร่วมผลกระทบจากการเรียนรู้ของพนักงาน ฯลฯ มาร่วมพิจารณาในการจัดสมมูลด้วย เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริงมากยิ่งขึ้น รวมทั้งศึกษาการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตซึ่งเป็นปัญหาต่อเนื่องที่จะต้องพิจารณาหลังจากได้สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมมูลเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้การดำเนินงานของสายการประกอบมีประสิทธิภาพสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Boysen, M. Fliedner, and A. Scholl, "A classification of assembly line balancing problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 183, pp. 674-693, 2007.
- [2] H. Gökçen, K. Ağpak, and R. Benzer, "Balancing of parallel assembly lines," *International Journal of Production Economics*, vol. 103, pp. 600-609, 2006.
- [3] R. Benzer, H. Gökçen, T. Çetinyokuş, and H. Çerçioğlu, "A network model for parallel line balancing problem," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2007, Article ID 10106, 12 pages, doi:10.1155/2007/10106.
- [4] A. Scholl and N. Boysen, "Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure," *International Journal of Production Economics*, vol. 119, pp. 90-100, 2009.
- [5] A. Baykasoğlu, L. Özbakır, L. Görkemli, and B. Görkemli, "Balancing parallel assembly lines via Ant Colony Optimization," in *Computers & Industrial Engineering*, 2009, pp. 506-511.
- [6] Q. Guo and L. Tang, "A scatter search based heuristic for the balancing of parallel assembly lines," in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control held jointly with the 28th Chinese Control Conference*, 2009, pp. 6256-6261.
- [7] U. Özcan, H. Çerçioğlu, H Gökçen, and B. Toklu, "A Tabu Search Algorithm for the parallel assembly line balancing problem," *Gazi University Journal of Science*, vol. 22, no. 4, pp. 313-323, 2009.
- [8] N. Ismail, G. R. Esmailian, M. Hamedi, and S. Sulaiman, "Balancing of parallel assembly lines with mixed-model product," *International Proceedings of Economics Development & Research*, vol. 6, pp. 120-124, 2011.
- [9] Y. Kara, H. Gökçen, and Y. Atasagun, "Balancing parallel assembly lines with precise and fuzzy goals," *International Journal of Production Research*, vol. 48, no. 6, pp. 1685-1703, 2010.
- [10] D. Simon, "Biogeography-based optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol.12, no. 6, pp. 702-713, 2008.
- [11] H. Mo and L. Xu, "Biogeography Migration Algorithm for Traveling Salesman Problem," in *Advances in Swarm Intelligence*, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 405-414.
- [12] S. H. A. Rahmati and M. Zandieh, "A new biogeography-based optimization (BBO) algorithm for the flexible job shop scheduling problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 1115-1129, 2012.
- [13] U. Jansaem and P. Chutima, "Multi-objective balancing on mixed-model two-sided assembly lines under a learning effect," *KKU Engineering Journal*, vol. 39, no. 3, pp. 267-280, 2012.
- [14] J. L. C. Macaskill, "Production-line balances for mixed-model lines," *Management Science*, vol. 19, issue 4-part-1, pp. 423-434, 1972.
- [15] D. Sparling and J. Miltenburg, "The mixed-model U-line balancing problem," *International Journal of Production Research*, vol. 36, no. 2, pp. 485-501, 1998.
- [16] Y. K. Kim and Y. J. Kim, "Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 30, no.3, pp. 397-409, 1996.

- [17] P. M. Vilarinho and A. S. Simaria, "A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations," *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 6, pp. 1405-1420, 2002.
- [18] P. Chutima and P. Chimklai, "Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62, pp. 39-55, 2012.
- [19] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, pp. 992-1007, 2006.
- [20] H. Ma, "An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization," *Information Sciences*, vol. 180, pp. 3444-3464, 2010.
- [21] Y. K. Kim, C. J. Hyun, and Y. Kim, "Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach," *Computers & Operations Research*, vol. 23, no. 12, pp. 1131-1145, 1996.
- [22] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [23] O. Rosenberg and H. Ziegler, "A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing," *Zeitschrift für Operations Research*, vol. 36, pp. 477-495, 1992.
- [24] R. Hahn, *Produktionsplanung bei Linienfertigung*, Walter de Gruyter, 1972.
- [25] T. S. Wee and M. J. Magazine, "An efficient branch and bound algorithm for an assembly line balancing problem. Part II: maximize the production rate," *Working Paper No. 151*, University of Waterloo, Waterloo, 1981.
- [26] A. L. ARCUS, "A computer method of sequencing operations for assembly lines," *International Journal of Production Research*, vol. 4, no. 4, pp. 259-277, 1965.
- [27] K. Jitmetta, "Application of particle swarm optimization for multi-objective sequencing problems on mixed-model two-sided assembly lines," M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [28] M. Gen, F. Altıparmak, and L. Lin, "A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding," *or Spectrum*, vol. 28, pp. 337-354, 2006.