

การจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์
จำนวนมากโดยใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก
Mixed-Model Parallel U-Shaped Assembly Line Balancing under
Many-Objectives Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on
Decomposition

เพ็ญนภัส จิรัชัย¹ ปารเมศ ชุตินา^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pennapat Jirachai¹ Parames Chutima^{2*}

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Payathai, Bangkok 10330

*Corresponding author: Email: parames.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากเป็นปัญหาแบบเอ็นพียาก (NP-hard) ดังนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด บทความนี้นำเสนอวิธีการถอดรหัสสตริงคำตอบและการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) เพื่อใช้สำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์จำนวน 4 วัตถุประสงค์ที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความไม่สมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด และความไม่สัมพันธ์ของชิ้นงานน้อยที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ในด้านการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอย่างชัดเจน แม้ว่าการกระจายตัวของคำตอบจะไม่มาก และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบนานกว่า BBO

คำสำคัญ: สายการประกอบยูนาน การจัดสมดุลสายการประกอบ การหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

ABSTRACT

Mixed-Model Parallel U-shaped assembly line balancing problem under many-Objectives is known as NP-hard problems. Hence, to optimize this problem, heuristic approaches need to be developed. This research proposes a decode method and a Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition (MOEA/D) for solving the problem by optimizing four objectives simultaneously, i.e. minimize the number of workstations, minimize the number of stations, minimize different workload

between workstations, and minimize work unrelatedness. The experiment results show that MOEA/D has better performance than BBO in terms of convergence. However, its spread and CPU time indicators are not better than BBO.

Keyword: Parallel U-shaped assembly line, line balancing, many objective optimization problem, multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition.

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการแข่งขันสูง ภาคอุตสาหกรรมจึงต้องจัดการการผลิตสินค้าให้ทันตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นการจัดสายการประกอบแบบทันเวลาพอที่จะทำให้ผลิตสินค้าได้หลากหลาย และมีต้นทุนการผลิตต่ำ [1] เนื่องจากระบบมีความยืดหยุ่นสูง (Flexibility) พร้อมทั้งปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของลูกค้าที่หลากหลายมากขึ้น จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนสายการผลิต จากการผลิตสินค้าประเภทเดียว (Single Production) มาเป็นการผลิตแบบผสม (Mixed-Model Production) และอีกสิ่งหนึ่งที่เป็นการปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ในปัจจุบันของอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับการจัดการต้นทุนและการผลิตให้ตอบสนองทันความต้องการของลูกค้า คือการออกแบบสายการประกอบ และการวางแผนเครื่องจักร ให้เหมาะสม [2] โดยสายการประกอบ (Assembly Line) นั้นจะหมายถึงระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนที่ประกอบด้วย กลุ่มของสถานีงานที่จัดวางต่อเนื่องกัน และมีการเชื่อมโยงกันด้วยสายพานลำเลียงหรือระบบขนย้ายวัสดุอื่นๆ ที่คอยทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานระหว่างสถานีงาน โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะเริ่มประกอบขึ้น ที่สถานีงานแรกและถูกส่งไปประกอบต่อในสถานีงานถัดๆ ไปในทุกรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) พร้อมกับเริ่มประกอบชิ้นงานใหม่อย่างต่อเนื่องในทุกๆ รอบเวลาการผลิตนี้เช่นกัน การวางแผนเครื่องจักรให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่างๆ จะต้องมีการจัดสรรชิ้นงาน ให้กับสถานีงานต่างๆ ในปริมาณที่เท่าๆ กันเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดโดยที่ไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดต่างๆ เช่น รอบเวลาการผลิต ลำดับก่อนหลังของ

ชิ้นงาน เป็นต้น เรียกว่า การจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing) [3]

รูปแบบสายการประกอบได้ถูกพัฒนามาเรื่อยๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นในการผลิต [4] จนมาเป็นสายการประกอบลักษณะตัวยูขนาน (Balancing of Parallel U-Shaped Assembly Lines) คิดค้นโดย Kucukkoc และ Zhang [2] โดยนำแนวคิดสายการประกอบแบบขนานมาประยุกต์ใช้กับสายการประกอบรูปตัวยูจึงเกิดสายการประกอบรูปตัวยู 2 สายวางขนานกัน ซึ่งการจัดวางสายการประกอบเช่นนี้ ทำให้เกิดประโยชน์ในการมอบหมายงานไปยังสถานีงานระหว่างสายการประกอบด้านนอกและด้านใน หรือระหว่างคู่สายที่อยู่ติดกัน เรียกว่า สถานีงานร่วม (Multi-Line Workstation) ทำให้ลดความจำเป็นในการใช้แรงงาน ลดการจัดตั้งสถานีงาน และ ใช้สอยพื้นที่การผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสายการประกอบรูปตัวยูขนานมีประสิทธิภาพดีกว่าในด้านการจัดสรรพนักงาน การเพิ่มทักษะการทำงานของพนักงาน และจำนวนสถานีงานน้อยกว่าสายการประกอบรูปตัวยูเพียงสายเดียว แต่การแก้ปัญหาของสายการประกอบรูปตัวยูขนานของ Kucukkoc และ Zhang [2] นั้น มีวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียง 2 วัตถุประสงค์ มีผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบเพียงรูปแบบเดียว (Single Model) วิธีการถอดรหัสตรงคำตอบหรือวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบนั้นเป็นแบบแผนที่ตายตัว ในการจัดชิ้นงานลงสถานีงานยังไม่อิสระ และใช้วิธี Parallel U-Line Heuristic: PUH ในการแก้ปัญหา ซึ่งวิธีที่ใช้ในการหาคำตอบอาจไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นงานวิจัย

แรกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูขนาน

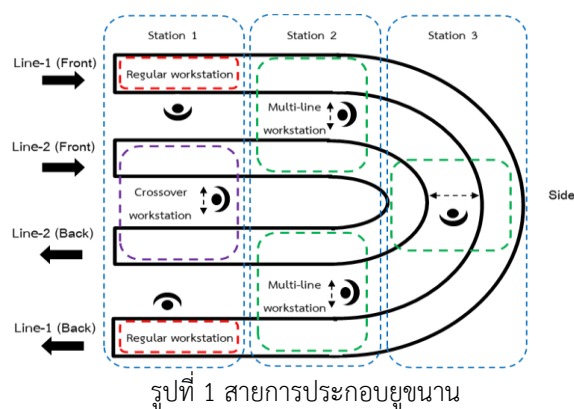
บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก รวมถึงวิธีการถอดรหัสสตริงคำตอบที่เพิ่มความอิสระในการจัดชั้นงานลงสายการประกอบ โดยกำหนดวัตถุประสงค์ทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาแบบเอ็นพีฮาร์ด (NP-Hard) จึงต้องนำอัลกอริทึมมาช่วยในการแก้ปัญหา โดยงานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) ที่พัฒนาโดย Zhang and Li [5] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ขึ้นไปได้พร้อมๆ กัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้นี้จะเรียกว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) [6] และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) [7] ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

2. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนาน

สายการประกอบรูปตัวยูขนานที่นำเสนอนี้ แต่ละสายการประกอบจะมีผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบแบบผสม เพื่อผลิตสินค้าประเภทเดียวกันได้จำนวนหลายรุ่น โดยสามารถผลิตสินค้าสลับรุ่นไปมาได้อย่างอิสระไม่ต้องปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ และด้วยความยืดหยุ่นของสายการประกอบลักษณะยูขนานนี้ ทำให้ผลิตสินค้าได้ทันตาม

ความต้องการอย่างรวดเร็ว ลดการใช้แรงงาน และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลมากขึ้น

โดยแบ่งสถานีงานในสายการประกอบลักษณะตัวยูขนานได้เป็น 3 ประเภท คือ 1. สถานีงานปกติ (Regular Workstation) คือ สถานีงานที่ขึ้นงานภายในสถานีงานมีทิศทางการทำงานไปในทิศทางเดียวกันตามลำดับความสัมพันธ์ของชั้นงานบนสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่ง 2. สถานีงานร่วม (Multi-line Workstations) คือ สถานีงานที่มีชั้นงานภายในสถานีงานอยู่บนสายการประกอบทั้งด้านในและด้านนอก (พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของตนเอง) 3. สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstations) คือ สถานีงานที่มีชั้นงานที่ต้องทำอยู่บนด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบด้านในของรูปตัวยูขนาน โดยพนักงานสามารถปฏิบัติงานที่ด้านหน้าและหมุนตัวกลับมาทำงานที่ด้านหลังได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สายการประกอบยูขนาน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนานจะมีการดำเนินงานภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกันหรือที่เรียกว่ารอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time) แผนภาพลำดับก่อนหลังของแต่ละสายการประกอบที่ใช้ในการจัดสมดุลจะอยู่ในรูปของแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram: CPD) [8] ไว้แสดงข้อมูลว่าชั้นงาน (Task) ต่างๆ ในการประกอบสินค้าทุกรุ่นต้องทำก่อนหรือหลังชั้นงานใดบ้าง (ลูกศรในแผนภาพจะโยงจากโหนด

x ไปไหน y หมายถึงชิ้นงาน x ต้องทำก่อนหน้าชิ้นงาน y โดยตรง)

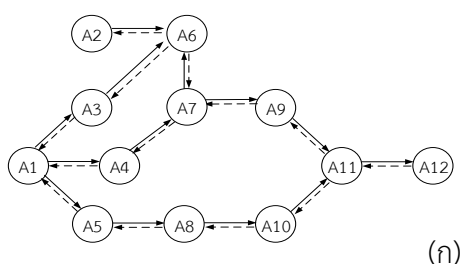
แต่สำหรับสายการประกอบลักษณะยูชานานี้ การพิจารณาแผนภาพลำดับความสำคัญก่อนหลัง เพื่อจัดชิ้นงานลงสถานีงาน จะมองย้อนกลับได้ (ลูกศรเส้นปะในแผนภาพจะโยงจากโหนด y ไปไหน x) และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละชิ้นงาน (Task Time) อาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า ในการจัดสมดุลจึงอาศัยเวลาชิ้นงานรวม (Combined Task Time) ที่เฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจากเวลาชิ้นงานของสินค้าทุกรุ่นประกอบการพิจารณา ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้ [9]

กำหนดให้ M เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม, D_m เป็นปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m โดย $m = \{1, \dots, M\}$, t_{im} คือเวลาชิ้นงาน i

ของ สินค้ารุ่น m เมื่อ $i = \{1, \dots, N\}$ และ $q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$ คือ สัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เทียบกับปริมาณการผลิตรวมทุกรุ่น เวลาชิ้นงานรวม i คำนวณได้จากสมการ

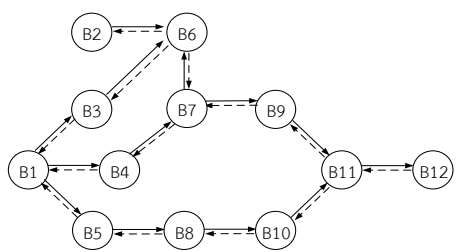
$$t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im} \quad (1)$$

โดย สายการประกอบที่ 1 ผลิตสินค้า A จำนวน 2 รุ่น ได้แก่ รุ่น A_I และ A_{II} สัดส่วนการผลิต $q_{A_I} = q_{A_{II}} = \frac{1}{2}$ ขณะที่สายการประกอบที่ 2 ผลิตสินค้า B จำนวน 2 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ รุ่น B_I และ B_{II} สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น $q_{B_I} = \frac{2}{3}$ และ $q_{B_{II}} = \frac{1}{3}$ พร้อมทั้งปรับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังรวม ของผลิตภัณฑ์ A และ B ได้ดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



เวลา ชิ้นงาน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
รุ่น A _I	7	2	2	4	2	3	3	7	4	2	2	4
รุ่น A _{II}	3	2	2	6	2	3	5	7	4	6	2	2
รวม	5	2	2	5	2	3	4	7	4	4	2	3

(ก)



เวลา ชิ้นงาน	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
รุ่น B _I	5	2.5	1	6	1	3	7	4.5	2	4	2.5	3.5
รุ่น B _{II}	5	1	1	3	4	3	7	3	2	4	4	2
รวม	5	2	1	5	2	3	7	4	2	4	3	3

(ข)

รูปที่ 2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังรวมและเวลาชิ้นงานสำหรับการปฏิบัติงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 [2]

2.1 สตรีงคำตอบ

สตรีงคำตอบ คือ สตรีงที่ระบุค่าลำดับความสำคัญของชิ้นงานต่างๆ บนสายการประกอบรูปตัวยูชานาน (Priority String) โดยค่าลำดับความสำคัญเป็นตัวบ่งชี้ว่า ถ้าขณะกำลังจัดสมดุลนั้นมีชิ้นงานหลายชิ้นงานที่พร้อมถูกนำไปจัดสรรลงสถานีงานได้ ชิ้นงานใดจะถูกนำไปจัดลง

สถานีงานก่อน จะพิจารณาจากค่าลำดับความสำคัญแต่ละชิ้นงาน โดยค่าลำดับความสำคัญเป็นเลขจำนวนเต็มบวกที่ไม่ซ้ำกันตั้งแต่ 1, 2, ..., จนถึง N เมื่อ N คือ จำนวนชิ้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบตัวยูชานาน ตัวอย่างสตรีงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูชานาน แสดงดังตารางที่ 1

สตริงคำตอบของปัญหานี้มีจำนวนบิตทั้งสิ้น 24 บิตตามจำนวนชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานจะมีค่าลำดับความสำคัญแตกต่างกันไปตั้งแต่ 1 ถึง 24

เงื่อนไขในการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงานของสายการประกอบแบบลักษณะยูขนาน จะต้องพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีงานในการเลือกชิ้นงานลงสถานีงานซึ่งอธิบายหลักการ ไว้ดังนี้

1. ถ้าชิ้นงานก่อนหน้า ที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า ชิ้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 ด้านหน้า

2. ถ้าชิ้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือ ชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า ชิ้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 ด้านหน้า และสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง

3. ถ้าชิ้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง ชิ้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า และด้านหลัง และสายการประกอบที่ 1 ด้านหลัง

4. ถ้าชิ้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหลัง ชิ้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 และ 1 ด้านหลัง

5. การเกิดสถานีงานจุดข้ามหรือสถานีงานร่วม จะมีการเอียงสถานีได้ไม่เกิน 1 สถานี ถ้าชิ้นงานที่เลือก ณ ขณะนั้นทำให้เกิดการเอียงสถานีเกิน 1 สถานี จะทำการตัดชิ้นงานนั้นออกแล้วทำการเลือกชิ้นงานใหม่ตามค่าลำดับความสำคัญ

2.2 การถอดรหัสสตริงคำตอบ

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบมีวิธีการคือ นำสตริงที่ได้พิจารณาพร้อมกับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน ซึ่งจะต้องพิจารณาสองด้านพร้อมๆ

กันคือ พิจารณาจากด้านหน้าไปด้านหลัง และด้านหลังมาด้านหน้า (รูปที่ 2) จากนั้นทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดทำรายการชิ้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ก่อน แล้วเลือกชิ้นงานแรกจัดลงสถานีงานจากค่าลำดับความสำคัญ (Priority) โดยชิ้นงานที่มีค่าลำดับความสำคัญน้อยถูกเลือกก่อน

2. ปรับปรุงชิ้นงานที่ยังไม่ถูกเลือก แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ของชิ้นงาน เวลาที่เหลือให้ปฏิบัติงานในรอบเวลาการผลิต ความเป็นไปได้ของสถานีงาน

3. จัดชิ้นงานถัดไปลงสถานีงาน โดยพิจารณาค่าลำดับความสำคัญน้อยจัดลงก่อน และเงื่อนไขความเป็นไปได้ของสถานีงาน

4. จัดชิ้นงานลงสถานีงานจนเต็มรอบเวลาการผลิต หรือไม่มีชิ้นงานที่สามารถจัดลงได้แล้ว จึงปิดสถานีงาน

5. จัดชิ้นงานลงสายการประกอบจนครบทุกชิ้นงาน

6. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ทั้งหมด จะถูกหาคำตอบไปพร้อมๆ กัน ดังนี้

3.1 จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

เพื่อลดจำนวนพนักงาน ที่ใช้ในระบบการผลิตให้น้อยที่สุด หรือคือการทำให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

$$\text{Minimize : } N_w \quad (2)$$

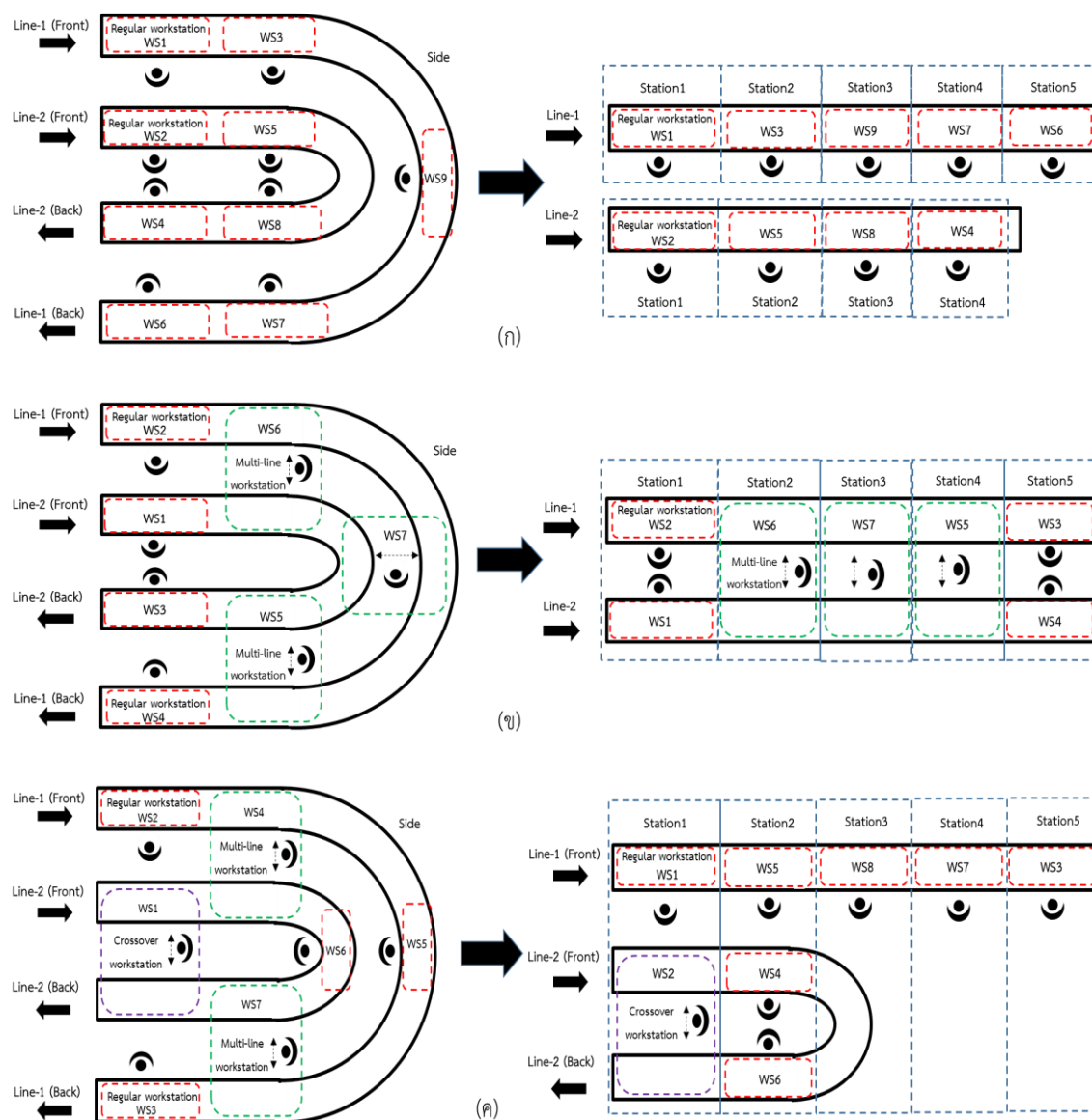
3.2 จำนวนสถานีน้อยที่สุด

เพื่อให้การจัดสมดุลสายการประกอบนั้นมีขนาดสั้นที่สุด หรือทำให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุด

$$\text{Minimize : } N_s \quad (3)$$

ตารางที่ 1 สตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนาบ

Task	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
String	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19



รูปที่ 3 การนับจำนวนสถานีตามประเภทสถานีงานบนสายการประกอบ (ก) สถานีงานปกติทั้งหมด (ข) สถานีงานปกติและสถานีงานร่วม (ค) สถานีงานปกติและสถานีจุดข้าม

เนื่องจากการถอดรหัสสตริงคำตอบของบทความนี้ คำตอบที่ได้มีหลากหลายซึ่งสายการประกอบนั้นอาจจะไม่ใช่สายการประกอบลักษณะยูขนาบอย่างแท้จริง ดังต่อไปนี้ 1. สถานีงานบนสายการประกอบเป็นสถานีงานปกติทั้งหมด 2. สถานีงานบนสายการประกอบเป็นสถานี

งานปกติและสถานีงานร่วม 3. สถานีงานบนสายการประกอบมีเฉพาะสถานีงานปกติและสถานีจุดข้าม

ดังนั้นการหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดจะมีการนับแตกต่างกันตามลักษณะประเภทสถานีงานบนสายการประกอบ ดังรูปที่ 3 เพื่อมุ่งเน้นให้คำตอบของการจัด

สมดุลสายการประกอบลักษณะยูนิตานนี้ เป็นจริงมากที่สุด โดยสายการประกอบยูนิตานที่แท้จริง และการนับจำนวนสถานี แสดงดังรูปที่ 1

3.3 ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

คือการทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมของสถานีงานต่างๆ มีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการผลิต ลดความแออัดบนสายการประกอบ และทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างสถานีงาน [10] หรือคือการทำให้เกิดความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานมากที่สุด โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

กำหนดให้ m_l และ m_{l+1} เป็นรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะยูนิตาน l และ $l+1$ ตามลำดับ เมื่อ $m_l = \{1, \dots, m_l\}$ และ $m_{l+1} = \{1, \dots, m_{l+1}\}$

$S_{k,b}$ คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตรวม (CCT) เวลาชิ้นงานรวมที่สถานีงานที่ k ประเภทสถานีงาน b ซึ่งแบ่งเป็นสถานีงานแยก (RW) สถานีงานจุดข้าม (CW) และสถานีงานร่วม (MW) โดยสถานีงานแต่ละประเภทมีสมการการคำนวณดังนี้

สถานีงานปกติ

$$S_{k,RW} = \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{ml} |CC_T - TT_{k,1,m_l,l}| \quad \forall l \in \{1,2\} \quad (4)$$

สถานีงานจุดข้าม

$$S_{k,CW} = \sum_{m_{F2}=1}^{M_2} \sum_{m_{B2}=1}^{M_2} q_{m_{F2}} q_{m_{B2}} |CC_T - TT_{k,CW,m_{F2},F2} - TT_{k,CW,m_{B2},B2}| \quad (5)$$

สถานีงานร่วม

$$S_{k,MW} = \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} q_{m_2} |CC_T - TT_{k,MW,m_1,1} - TT_{k,MW,m_2,2}| \quad (6)$$

เมื่อ $TT_{k,b,m,L}$ คือ เวลาในการปฏิบัติงานทั้งหมดของแต่ละสถานีงาน

และหาค่าเบี่ยงเบนสมบูรณ์รวม (TAD) ของทุกสถานีงานจากสมการ

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} \quad (7)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b) ตามสมการที่ 8 ซึ่งดัดแปลงมาจาก สมการของ Vilarinho และ Simaria [11] ทั้งนี้ B_b จะมีค่าอยู่ ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า B_b ที่ต่ำจะแสดงถึงความสมดุลที่สูง

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (8)$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

3.4 ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานน้อยที่สุด

เป็นการทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากขึ้น เพื่อให้การปฏิบัติงานมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นโดยชิ้นงานสองชิ้นงานใดๆ จะถือว่ามีความสัมพันธ์กันก็ต่อเมื่อในแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังนั้นชิ้นงานมีการเชื่อมโยงกันโดยตรง [12] เพื่อให้การพิจารณาวัตถุประสงค์นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวัตถุประสงค์อื่นๆ ดังนั้นวัตถุประสงค์นี้จึงเป็นการทำให้ MITR (Modified Index of Task Relatedness) มีค่าต่ำที่สุด เพื่อให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 9

$$\text{Minimize } MITR = 1 - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (9)$$

เมื่อ SN_k คือ จำนวนเครือข่ายของชิ้นงานที่มี ความสัมพันธ์ก่อนหลังโดยตรงในสถานีงานที่ k

4. วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) เป็นวิธีการที่ใช้ในการพิจารณาวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ไปพร้อมๆกัน โดยจะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักบนเซต p ของแต่ละวัตถุประสงค์ i (λ_{pi}) ซึ่งจำนวนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ จะส่งผลต่อจำนวนเซตของค่าถ่วงน้ำหนัก (Lambda Set) หรือจำนวนของสตริงคำตอบ (Population Size) จากนั้นทำการหาสตริงข้างเคียง (Neighborhood) จากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidian Distance) ของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_{pi}) และทำการพัฒนาคำตอบของประชากร โดยใช้การสลับสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งเป็นวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อให้ได้คำตอบรุ่นใหม่ที่มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิมที่เป็นค่าที่ดี ซึ่งหลักการในการหาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยใช้หลักการจำแนกของอัลกอริทึมนี้คือวิธีเทบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) [5] มีดังนี้

4.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากมีขั้นตอนดังนี้ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ)

ตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากนั้น จะนำข้อมูลต่างๆของชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่เข้าสู่สองสายการประกอบดังรูปที่ 2 มาใช้ในการแก้ปัญหาและรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 10 หน่วยเวลา

พารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดค่าของ MOEA/D คือ

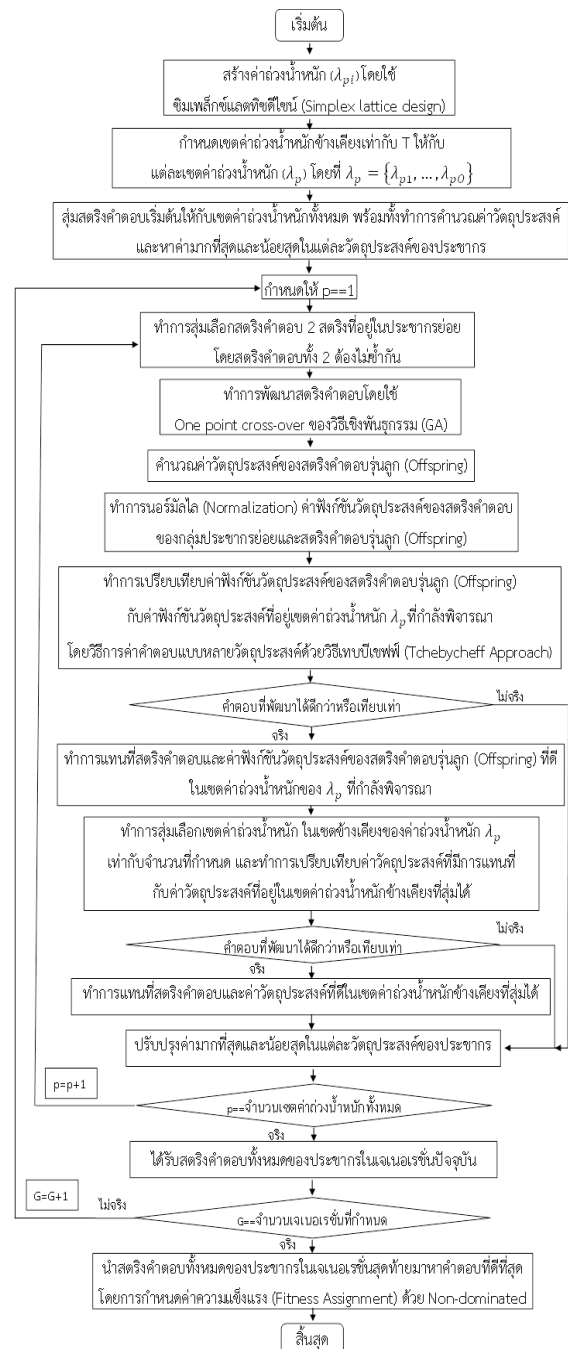
- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (H) คือ 2
- จำนวนของเซตข้างเคียง (T) คือ 4

- ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มเซตข้างเคียง คือ ร้อยละ 30

- จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) เท่ากับ 4

ดังนั้นจำนวนเซตของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากร (P) เท่ากับ 10 คำนวณได้ดังนี้

$$\text{lambda set} = C_{O-1}^{H+O-1} = C_{4-1}^{2+4-1} = C_3^5 = 10$$



รูปที่ 4 แผนภาพการทำงานของ MOEA/D

ขั้นที่ 1 สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} โดยใช้ฟังก์ชัน ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งจะเป็นตารางเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนของเซตค่าถ่วงน้ำหนัก $(P) \times$ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) ดังตารางที่ 2 โดย $\sum_{i=1}^O \lambda_{pi} = 1 \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$ หรือคิดจาก $\{0/H, \dots, H/H/H\}$ จะได้ $\{0/2, 1/2, 2/2\}$ ดังนั้น ค่าถ่วงน้ำหนักที่จะเป็นได้ คือ 0, 0.5 และ 1

ตารางที่ 2 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละเซตค่าถ่วงน้ำหนัก

λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	0	1	0	0
2	1	0	0	0
3	0	0.5	0.5	0
4	0.5	0	0.5	0
5	0	0	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0	0
7	0	0.5	0	0.5
8	0.5	0	0	0.5
9	0	0	0	1
10	0	0	1	0

ขั้นที่ 2 กำหนดเซตข้างเคียง (T) ให้กับแต่ละเซตค่าถ่วงน้ำหนัก โดยเลือกจากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean Distances) ของเซตค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λ_p) กับเซตค่าถ่วงน้ำหนักเซตอื่น (λ_j) โดยคำนวณจากสมการที่ 10

$$d_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^O (\lambda_{pi} - \lambda_{ji})^2} \quad \forall p \in P, \forall j \in P, p \neq j \quad (10)$$

เมื่อ d_{pj} คือ ระยะห่างระหว่างจุดของเซตถ่วงน้ำหนัก p กับ j

O คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด แล้วเลือกค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T ซึ่ง $T=4$

ขั้นที่ 3 สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับเซตค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด โดยการสุ่ม พร้อมทั้งหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 3 และหาค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดของแต่ละค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นที่ 4 กำหนดเซตค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา (Initial Point) ด้วยการกำหนดค่า P โดยค่า $p = \{1, 2, \dots, P\}$ เพื่อกำหนดกลุ่มประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ดังตารางที่ 4

ขั้นที่ 5 สุ่มเลือก 2 สตริงคำตอบจากกลุ่มประชากรย่อยในตารางที่ 4 โดย 2 สตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน

ขั้นที่ 6 ทำการพัฒนาสตริงคำตอบที่สุ่มได้โดยการสลับสายพันธุ์แบบ One Point Cross-over โดยสลับสายพันธุ์ระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง และทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยใช้ Mapping Relationship ของ Goldberg และ Lingle [13]

ขั้นที่ 7 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่มีการซ่อมแซมแล้ว

ขั้นที่ 8 ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก คำนวณได้จากสมการที่ 11

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{z_i^{nad} - z_i^*} \quad (11)$$

เมื่อ z_i^* คือ $\min\{f_i(x) | x \in P\}$

z_i^{nad} คือ $\max\{f_i(x) | x \in P\}$

โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_O^*)$, $z_i^{nad} = (z_1^{nad}, \dots, z_O^{nad})$

โดยก่อนการนอร์มัลไลซ์ ต้องทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากรเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิม

ขั้นที่ 9 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 12

$$g(x | \lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq O} \{\lambda_{pi} | f_i(X) - z_i^* | \} \quad (12)$$

เมื่อ z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i โดย
 $i = 1, \dots, O$ กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อย
 ที่สุด $z_i^* = \min\{f_i(X)\}$
 $(x|\lambda_p, z^*)$ คือ ผลต่างที่มีค่ามากที่สุดของค่า
 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ i กับค่า เป้าหมาย
 ของวัตถุประสงค์ i ที่ทำการคูณค่าถ่วง
 น้ำหนักบนเซต p ของวัตถุประสงค์
 โดยมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงตอบ
 ดังต่อไปนี้

1. นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้ว
 ของทั้งสตริงคำตอบรุ่นลูก และสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต
 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก
 ของแต่ละวัตถุประสงค์ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลัง
 พิจารณา

2. หาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ ของสตริง
 คำตอบรุ่นลูก ทั้ง 2 สตริง และสตริงคำตอบที่อยู่ในเซตค่า
 ถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา

ตารางที่ 3 สตริงคำตอบเริ่มต้นของเซตค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

λ_p	String	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
λ_1	1	[15 8 9 5 24 18 14 20 7 6 4 11 1 13 16 17 23 21 10 12 2 3 22 19]	9	6	0.042	0.357
λ_2	2	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
λ_3	3	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.5
λ_4	4	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412
λ_5	5	[18 10 1 6 20 11 2 7 22 17 12 4 13 5 21 23 3 8 24 14 19 9 15 16]	10	4	0.056	0.474
λ_6	6	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.545
λ_7	7	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
λ_8	8	[22 10 9 3 19 15 8 21 14 2 20 7 4 12 13 17 18 6 23 1 11 16 5 24]	10	6	0.079	0.375
λ_9	9	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
λ_{10}	10	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400

ตารางที่ 4 สตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาสำหรับการพัฒนาคำตอบ

λ_p	string	Task priority																							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19
3	3	19	14	4	22	21	20	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16
4	4	19	18	22	12	24	15	1	14	7	11	2	21	16	9	13	8	17	10	6	3	20	5	4	23
6	6	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
7	7	9	1	18	24	7	21	15	4	3	5	8	22	2	20	23	11	16	14	12	19	6	10	17	13

3. พิจารณาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ในข้อที่ 2 ของ
 สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริง กับสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต
 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาว่าดีกว่าหรือไม่ ใน
 บทความนี้ทำการหาวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ดังนั้นคำว่า

ดีกว่าคือคำตอบนั้นต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเทียบเท่า ตาม
 ตารางที่ 5

4. ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกดีกว่า แล้วดีกว่าทุกสตริง
 คำตอบให้เลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้ามีค่าเท่ากันให้

สุ่มเลือกแบบอิสระ แล้วนำสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แทนที่สตริงคำตอบที่อยู่ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา ตามตารางที่ 6 และทำขั้นที่ 10 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบให้ข้ามไปขั้นที่ 11

ตารางที่ 5 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุด

P	String	$g(x \lambda_p, z^*)$	Selection
1	1	0.667	
1	Offspring 1	0 (น้อยกว่า)	Good
1	Offspring 2	1 (มากกว่า)	Bad

ตารางที่ 6 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูก ลงในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p)

λ_p	String	λ_{pi}	Task priority 24 Tasks	$\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$
λ_1	Offsp. 1	[0 1 0 0]	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	{9, 4, 0.06, 0.55}
λ_3	3	[0 0.5 0.5 0]	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	{9, 7, 0.016, 0.5}
λ_4	4	[0.5 0 0.5 0]	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	{10, 6, 0.094, 0.412}
λ_6	6	[0.5 0.5 0 0]	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	{10, 5, 0.061, 0.545}
λ_7	7	[0 0.5 0 0.5]	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	{10, 7, 0.082, 0.375}

ขั้นที่ 10 ทำการสุ่มเลือกเซตข้างเคียงของเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบรุ่นลูกที่ดีกับเซตข้างเคียงที่สุ่มมาโดยการหาค่าฟังก์ชันเทบิเชฟฟ์ เหมือนกับขั้นตอนที่ 9 แต่จะทำการเปรียบเทียบค่าโดยใช้เซตค่าถ่วงน้ำหนักของเซตข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าดีกว่าเซตข้างเคียงนั้น ให้ทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์ในเซตข้างเคียงที่สุ่มได้

ขั้นที่ 11 ทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ถ้า $p < P$ ให้กำหนด $p = p + 1$ แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $p = P$ ให้ ไปทำในขั้นตอนที่ 12 ต่อ

ขั้นที่ 12 นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป ถ้า $G < Genaretion$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $G = Genaretion$ ให้ ไปทำในขั้นที่ 13 ต่อ

ขั้นที่ 13 นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันสุดท้ายมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่า

ความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting ตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

String	Objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
Offsp. 1.1	9	4	0.060	0.550	3
Offsp. 2.2	9	5	0.040	0.250	1
Offsp. 3.1	9	4	0.015	0.438	1
Offsp. 4.1	9	4	0.056	0.400	2
Offsp. 5.1	9	4	0.061	0.400	3
Offsp. 6.1	9	4	0.035	0.400	1
Offsp. 3.1	9	4	0.015	0.438	1
Offsp. 2.2	9	5	0.040	0.250	1
Offsp. 9.1	10	4	0.072	0.286	1
Offsp. 10.2	10	4	0.062	0.333	1

ตารางที่ 8 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

No.	Line1			Line2			รอบเวลาการผลิต (วินาที)	Generation
	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต		
P1	Michell_21	3	2:1:2	Jackson_11	2	3:1	30, 36, 42	500
P2	Warnecke_58	2	2:1	Wee-mag_75	3	1:1:1	100, 120, 144	1,500
P3	Scholl_297	3	3:1:2	Arcus2_111	2	1:1	5400, 6480, 7776	2,000
P4	Arcus1_83	3	2:2:1	Arcus2_111	2	1:1	9200, 11040, 13248	2,000

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1 การออกแบบการทดลอง

การแก้ปัญหาการจัดสมดุที่นำเสนอนี้ ผู้วิจัยใช้ตัวอย่างปัญหาในการทดลองจำนวน 4 ปัญหา โดยมีจำนวนชิ้นงานอยู่ในช่วง 11 ถึง 297 ชิ้นงาน และแต่ละปัญหาแบ่งปัญหาย่อยๆ ออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิต ดังตารางที่ 8 (รวมทั้งสิ้น 12 ปัญหาย่อย) โดยนำอัลกอริทึม MOEA/D มาใช้ในการแก้ปัญหา และเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาลักษณะนี้ เพื่อเป็นการประเมินสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุของ MOEA/D

โดยพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาแสดงดังตารางที่ 9 ซึ่งในงานวิจัยทั่วไปจะกำหนดจำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 100 ประชากร [14] แต่อัลกอริทึม MOEA/D จำนวนของประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนของวัตถุประสงค์และสัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนั้นจำนวนของประชากรที่คำนวณได้และใกล้เคียงกับ 100 คือ 120 ดังนั้นจำนวนของประชากรในงานวิจัยนี้จะใช้ 120 ทั้ง 2 อัลกอริทึม โดยในส่วนของ BBO จะอาศัยการอพยพ และมิวเตชันแบบ Sinusoidal [15] และ Reciprocal Exchange [16] ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยของ Ma [15] และ Jitmetta [17] แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แก้ปัญหามีลักษณะใกล้เคียงกันนี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้พารามิเตอร์อื่นๆ ของ MOEA/D เช่น จำนวนของเซตข้างเคียงและร้อยละในการกำหนด

จำนวนครั้งในการสุ่มเซตข้างเคียง รวมถึงค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันของ BBO นั้นได้มาจากการทดลองแบบ Full Factorial Design จำนวน 2 Replicate เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นค่าที่ทำให้อัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบในแต่ละปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

MOEA/D	
Population size	120
Neighborhood	P1-P4: 9
%Replace neighbor	P1-P4: 0.3
BBO	
Population size	120
Migration method:	Sinusoidal
Mutation method:	Reciprocal exchange
Mutation probability:	P1-P4: 0.1

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

ตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านต่างๆของอัลกอริทึม จะบอกว่าอัลกอริทึมใดๆที่หากกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดมาได้ นั้น มีประสิทธิภาพดีกว่ากัน โดยตัวชี้วัดตามรูปแบบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 5 ตัวชี้วัด ซึ่ง Kumar and Singh [18] ได้นำเสนอไว้ 3 ตัวชี้วัด คือ 1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence) ใช้ประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่

แท้จริงมากน้อยเท่าใด (ค่าเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) 2) การกระจายตัว (Spread) เป็นการบ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด ถ้าค่าที่ได้ยิ่งเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และ 3) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution 1: R_{NDS1}) เป็นตัวบอกว่าในคำตอบที่หาได้ทั้งหมดเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับคำตอบที่หามาได้ และในงานวิจัยนี้ ได้เพิ่มอีก 2 ตัวชี้วัด คือ 1) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ที่สุด (Ratio of Non-Dominated Solution 2: R_{NDS2}) ซึ่งใช้แสดงว่าในคำตอบที่หาได้ทั้งหมดเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าของ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี) และ 2) เวลาในการค้นหาคำตอบ [19]

5.3 ผลการทดลอง

บทความวิจัยนี้เป็นการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยโปรแกรม C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-6500U CPU@2.50GHz RAM 8.00 GB โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 10

จำนวนสถานงาน (N_w) ที่ MOEA/D หาคำตอบมาได้นั้น มีจำนวนเทียบเท่าและดีกว่า BBO ทุกปัญหา เห็นได้จากปัญหาขนาดเล็ก P1 รอบเวลาการผลิต 30 และปัญหาขนาดใหญ่ P4 รอบเวลาการผลิต 11040 ที่ค่า N_w ของ MOEA/D น้อยกว่า BBO และเท่ากับค่า Optimal

จำนวนสถานี (N_s) MOEA/D สามารถค้นหาคำตอบได้ดีเทียบเท่า BBO เช่นเดียวกันและดีกว่าในปัญหาขนาดกลาง P2 รอบเวลาการผลิต 144 และปัญหาขนาดใหญ่ P4 รอบเวลาการผลิต 9200 คือมีจำนวนสถานีน้อยกว่า BBO ซึ่งแสดงให้เห็นเบื้องต้นว่า MOEA/D มีสมรรถนะที่ค่อนข้างดีกว่า BBO ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ ทั้งนี้เป็นที่ชัดเจนว่าไม่มีปัญหาใดเลยที่ BBO สามารถค้นพบคำตอบที่มี N_w และ N_s ดีกว่า MOEA/D

ในด้านตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมเพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบระหว่าง MOEA/D กับ BBO ให้แน่ชัดยิ่งขึ้นนั้น ค่า Convergence ของ MOEA/D มีค่าน้อยกว่า และเข้าใกล้ 0 หมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก MOEA/D ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากกว่า BBO

ค่า Spread ของทั้ง MOEA/D และ BBO ไม่มีความแตกต่างกันมาก และค่ายังไม่เข้าใกล้ 0 ซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบยังมีการกระจายตัวไม่กว้างและไม่สม่ำเสมอมากพอ

ส่วน R_{NDS1} นั้น MOEA/D มีค่ามากกว่า BBO ซึ่งในปัญหาขนาดใหญ่ P3 และ P4 มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าในคำตอบที่หาได้ทั้งหมดของ MOEA/D เป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

แต่ค่า R_{NDS2} ของ MOEA/D ส่วนใหญ่นั้น มีค่าน้อยกว่า BBO และไม่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าคำตอบที่หาได้ทั้งหมดของ MOEA/D เป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด น้อยกว่าอัตราส่วนของ BBO

สำหรับด้านระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ (CPU Times) พบว่าแต่ละอัลกอริทึมใช้เวลาแปรผันไปตามขนาดของปัญหา แต่ MOEA/D ใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่า ประมาณสองเท่าของ BBO ในทุกขนาดปัญหา

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวคูณขนาดที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากดีกว่า BBO ในทุกขนาดปัญหา แม้ว่าจะใช้เวลาแก้ปัญหา นานกว่าและการกระจายตัวยังไม่กว้างมากพอ แต่คำตอบที่หาได้นั้นเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวคูณขนาดที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากซึ่งเป็นระบบการผลิต ที่สามารถ

ตอบสนองลูกค้าได้อย่างรวดเร็วตามแนวทางการผลิตแบบ
ทันเวลาพอดี โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลทั้งหมด 4
วัตถุประสงค์ ได้แก่ ทำให้มีจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด
จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงาน
ระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และทำให้ความสัมพันธ์
ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด
พร้อมทั้งนำเสนออัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
แบบวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึด
หลักการจำแนก (MOEA/D) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา
ดังกล่าว ซึ่งกระบวนการค้นหาคำตอบนั้นจะพิจารณา
วัตถุประสงค์ทั้ง 4 ไปพร้อมๆ กันและทำการเปรียบเทียบกับ
อัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

(Biogeography-based Optimization: BBO) ซึ่งเป็น
อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล
สายการประกอบ พบว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการ
แก้ปัญหามากกว่า BBO ในทุกขนาดปัญหา ทั้งในด้านจำนวน
สถานีงาน จำนวนสถานี การเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่
เหมาะสมที่สุดแบบพาราเรโต และคำตอบที่หาได้เป็นคำตอบ
ที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด
แม้ว่าจะใช้เวลาแก้ปัญหามากกว่า จึงสรุปได้ว่า MOEA/D
เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุล
สายการประกอบประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 10 ผลการทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	P1			P2			P3			P4		
No. of Tasks (Line1-Line2)	32 (21-11)			133 (58-75)			408 (297-111)			194 (83-111)		
Cycle Time	30	36	42	100	120	144	5400	6480	7776	9200	11040	13248
Number of workstation (N_w)												
Optimal	11	9	8	26	21	18	48	40	33	30	25	21
MOEA/D	11	10	8	26	22	18	49	40	34	31	25	21
BBO	12	10	8	26	22	18	49	40	34	31	26	21
Number of station (N_s)												
MOEA/D	4	4	3	9	8	6	14	12	10	9	8	7
BBO	4	4	3	9	8	7	14	12	10	10	8	7
Convergence												
MOEA/D	0.081	0.145	0.205	0.026	0.019	0.014	0.000	0.024	0.073	0.000	0.028	0.000
BBO	0.131	0.969	0.265	0.116	0.045	0.050	0.844	0.105	0.101	0.065	0.217	0.024
Spread												
MOEA/D	0.534	0.879	0.802	0.869	0.802	0.924	0.990	0.973	0.936	1.018	0.797	0.893
BBO	0.582	0.778	0.832	0.754	0.643	0.792	1.065	0.755	0.981	1.155	0.946	0.894
R_{NDS1}												
MOEA/D	0.639	0.333	0.583	0.483	0.376	0.531	1.000	0.637	0.100	1.000	0.773	1.000
BBO	0.250	0.208	0.100	0.345	0.440	0.464	0.382	0.376	0.619	0.438	0.063	0.882
R_{NDS2}												
MOEA/D	0.923	0.400	0.857	0.286	0.211	0.299	0.160	0.221	0.061	0.533	0.944	0.211
BBO	0.077	0.600	0.143	0.714	0.789	0.701	0.840	0.779	0.939	0.467	0.056	0.789
CPU time (s)												
MOEA/D	37.90	36.25	31.73	524.47	533.78	485.12	1340.59	1354.20	1293.84	628.23	619.02	593.93
BBO	16.87	16.96	17.26	242.02	232.81	233.46	743.24	721.63	677.63	287.58	268.61	263.93

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Monden, Toyota production system: An integrated approach to just-in-time, 4th ed. Norcross, GA: Industrial Engg. and Mgmt. CRC Press, 2011.
- [2] I. Kucukkoc and D. Z. Zhang, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines," Computers & OR, vol. 64, pp. 233-244, 2015.
- [3] ณัฐชัย โยธาภิบาล, "การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [4] C. Becker and A. Scholl, "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing," Eur. J. Oper. Res., vol. 168, no. 3, pp. 694-715, 2006.
- [5] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [6] R. Cheng et al., "A benchmark test suite for evolutionary many-objective optimization," Complex Intell. Syst., vol. 3, no. 1, pp. 67-81, March 01 2017.
- [7] D. Simon, "Biogeography-based optimization," IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 12, no. 6, pp. 702-713, 2008.
- [8] J. L. C. Macaskill, "Production-Line balances for mixed-Model Lines," Manage. Sci., vol. 19, no. 4-part-1, pp. 423-434, 1972.
- [9] D. Sparling and J. Miltenburg, "The mixed-model u-line balancing problem," Int. J. Prod. Res., vol. 36, no. 2, pp. 485-501, 1998.
- [10] Y. K. Kim, Y. Kim, and Y. J. Kim, "Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach," Prod. Plann. Contr., vol. 11, no. 1, pp. 44-53, 2000.
- [11] P. M. Vilarinho and A. S. Simaria, "A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations," Int. J. Prod. Res., vol. 40, no. 6, pp. 1405-1420, 2002.
- [12] T. O. Lee, Y. Kim, and Y. K. Kim, "Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness," Comput. Ind. Eng., vol. 40, no. 3, pp. 273-292, 2001.
- [13] D. E. Goldberg and R. Lingle, "Alleles, loci, and the traveling salesman problem," An international conference on genetic algorithms and their applications, 1985, vol. 154, pp. 154-159: Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- [14] R. K. Hwang, H. Katayama, and M. Gen, "U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm," Int. J. of Prod. Res., vol. 46, no. 16, pp. 4637-4649, 2008.
- [15] H. Ma, "An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization," Inform. Sci., vol. 180, no. 18, pp. 3444-3464, 2010.
- [16] Y. K. Kim, C. J. Hyun, and Y. Kim, "Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach," Computers & OR, vol. 23, no. 12, pp. 1131-1145, 1996.
- [17] K. Jitmettal, "Application of particle swarm optimization for multi-objective sequencing problems on mixed-model two-sided

assembly lines," M.S. thesis, Dept. Ind. Eng.,
Chulalongkorn University, 2011.

- [18] R. Kumar and P. K. Singh, "Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP," in Hybrid Evolutionary Algorithms, A. Abraham, C. Grosan, and H. Ishibuchi, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 361-398.
- [19] วิชระวิทย์ ถนอมทอง, "การจัดลำดับผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับฟิชชี," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.