

การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุล คู่สายการประกอบรูปตัวยู

Application of Many-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Double U-Shaped Assembly Line Balancing

สุชานันท์ ดันชนะประดิษฐ์¹ ปารเมศ ชุตินา^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Suchanun Tanchanapradit¹ Parames Chutima^{2*}

¹Graduate Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University.

² Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
254 Phayathai Road, Wang mai, Khet Pathum Wan, Bangkok, 10330

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอคู่สายการประกอบรูปตัวยู (Double U-shaped assembly line) แบบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งสายการประกอบรูปตัวยู 2 สายถูกจัดวางในลักษณะขนานแบบประชิดกัน ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ที่ต้องทำการหาค่าที่ดีที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความไม่สัมพันธ์ของชิ้นงานน้อยที่สุด ความไม่สมดุลของภาระงานระหว่างสถานีน้อยที่สุด และความไม่สมดุลของภาระงานภายในสถานีน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกค้นพบว่าสามารถแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ได้ดี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฟูลอนภาคหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization: MOPSO) ในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ MOEA/D จึงเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: การจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยู การหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฟูลอนภาคหลายวัตถุประสงค์

ABSTRACT

This article proposes a mixed-model double U-shaped assembly line. Two individual U-shaped lines are placed adjacently in parallel. The double U-shaped line balancing problem in this

research optimizes many objectives simultaneously, i.e. minimum number of workstations, minimum number of stations, minimum work unrelatedness, minimum different workload between and within workstation. This research applies a Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition (MOEA/D) to find the optimum solution since this approach is found to be effective for many-objective optimization problems. The experiment results show that MOEA/D performs better than MOPSO in terms of convergence and ratio of non-dominated solution. Thus MOEA/D is suitable for solving Double U-shaped line balancing problem with many objectives.

Keyword: U-shaped Line balancing, Many- objective optimization problem, Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition, Multi-Objective Particle Swarm Optimization

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการผลิตเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีความหลากหลายมากขึ้น สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (mixed-model assembly line) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น และในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนของสายการประกอบมีการนำระบบผลิตแบบทันเวลาพอดีมาใช้ โดยมุ่งประเด็นไปที่การลดระดับพัสดุคงคลัง และการจัดการกับความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในระบบ [1] สายการประกอบรูปตัวยู (U-shaped assembly line) [2] จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ซึ่งข้อดีของสายการประกอบรูปตัวยู คือ สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตได้ง่าย สายการประกอบมีระยะทางสั้น และ ใช้จำนวนสถานีงานน้อย [3]

รูปแบบสายการประกอบรูปตัวยูได้ถูกพัฒนาขึ้นในลักษณะของสถานีงานขนาน (U-shaped assembly line with parallel workstation) [4],[5] ต่อมาพัฒนาเป็นสายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Parallel U-shaped assembly line) โดย Kucukkoc and Zhang [6] เป็นการนำสายการประกอบรูปตัวยู 2 สายวางขนานกันส่งผลให้สามารถนำประสิทธิภาพของสายการประกอบขนาน [7]และรูปตัวยู [8] มาใช้ร่วมกัน ระบบผลิตแบบยูขนานนี้จึงช่วยลดการจัดตั้งสถานี และประหยัดพื้นที่การทำงาน ซึ่งงานวิจัยแบบยูขนาน[6]ที่ผ่านมาได้ทำการศึกษารูปแบบของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว

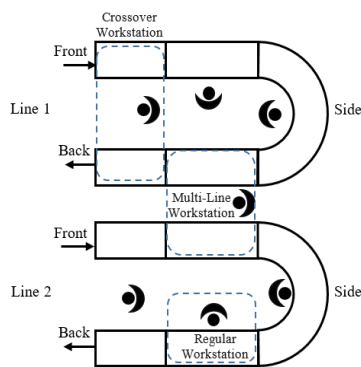
(Single Model) มีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล 2 วัตถุประสงค์ และได้พัฒนาวิธีการจัดสมดุลแบบ Parallel U-Line Heuristic แต่คำตอบที่ได้จากการจัดสมดุลอาจมีรูปแบบไม่หลากหลาย ต่อมาจึงมีงานวิจัยที่ศึกษารูปแบบยูขนานแบบผลิตภัณฑ์ผสมแบบมากวัดวัตถุประสงค์ [9] ประกอบด้วยวัตถุประสงค์จำนวน 4 วัตถุประสงค์ และได้พัฒนารูปแบบวิธีการถอดรหัสสตริงคำตอบในการจัดสมดุลทำให้เกิดคำตอบที่มีความหลากหลายมากขึ้น

จากงานวิจัยสายการประกอบยูขนานที่ผ่านมาเป็นรูปแบบยูขนานที่ซ้อนกัน ซึ่งมีข้อจำกัดคือสายการประกอบด้านนอกของยูขนานจำเป็นต้องมีความยาวมากกว่าสายการประกอบด้านใน ในขณะที่การใช้สายการประกอบรูปตัวยูหลายสายช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านการจัดตั้งสถานีงานได้มากกว่าสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยว [10] เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้สายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย คู่สายการประกอบที่มีด้านข้างที่ขนานกันและอยู่ในระยะที่สามารถมอบหมายภาระงานระหว่างสายการประกอบได้จะสามารถจัดสรรภาระงานได้เช่นเดียวกับยูขนาน บทความนี้จึงนำเสนอคู่สายการประกอบรูปตัวยู (Double U-shaped assembly line) ซึ่งเป็นสายการประกอบรูปตัวยูขนาน ในลักษณะที่ด้านข้างของสายการประกอบขนานกัน โดยมี 5 วัตถุประสงค์ซึ่งต้องทำการหาค่าที่ดีที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงาน ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน ความสมดุลภายในสถานี ความสัมพันธ์ของชั้นงาน และ ความยาวของสาย

การประกอบ ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นปัญหา NP-Hard ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) พัฒนาโดย Zhang และคณะ [11] มาใช้ในการแก้ปัญหาโดยเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Multi-Objective Particle Swarm Optimization: MOPSO) [12] ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

2. ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม

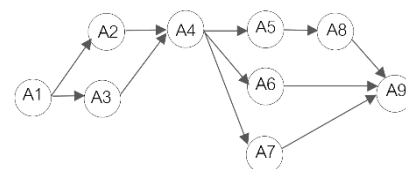
คู่สายการประกอบรูปตัวยูเป็นสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่นำมาประยุกต์ให้มีการจัดวางในรูปแบบขนานกันตามรูปที่ 1



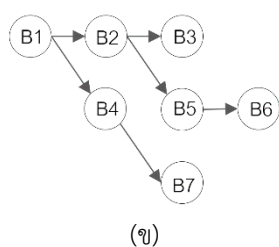
รูปที่ 1 คู่สายการประกอบรูปตัวยู

สามารถแบ่งรูปแบบสถานีงานหลัก ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้ 1) สถานีงานร่วม (Multi-line Workstation) คือ สถานีงานที่อยู่บนสองสายการประกอบ 2) สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) เป็นสถานีที่อยู่ภายในรูปตัวยูซึ่งอยู่ระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ และ 3) สถานีงานปกติ (Regular Workstation) จะอยู่บนสายการประกอบเดียว สายการประกอบรูปตัวยู

สองสายสามารถมีรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกันได้ และจะใช้วิธีการหารอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time) [1] เพื่อปรับให้มีรอบเวลาการผลิตที่เท่ากัน และเนื่องจากสายการประกอบเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมสินค้าแต่ละรุ่นมีชิ้นงานที่ต้องทำและเวลาดำเนินการที่แตกต่างกันจึงอาศัยวิธีการสร้างแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) [7] และการคำนวณเวลาชิ้นงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (Combined Task Time) [13], [14] ตัวอย่างการสร้างแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมเป็นไปตามตามรูปที่ 2 สำหรับการคำนวณเวลาชิ้นงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก มีวิธีการคำนวณดังนี้ กำหนดให้ MA เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ A , MB เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ B , D_m เป็นปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ และ q_m เป็นสัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เมื่อเทียบกับปริมาณสินค้าทุกรุ่นบนสายการประกอบ, t_i คือเวลาชิ้นงานรวมที่ i และ $q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$, $t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im}$ โดยที่ $M = MA$ หรือ MB เมื่อคำนวณจากสายการประกอบ A หรือ B ตามลำดับ ดังตัวอย่างในตารางที่ 1 และ 2 แสดงเวลาชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้สายการประกอบ A ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ A_I และ A_{II} และโดยมีสัดส่วนการผลิต $q_{A_I} = \frac{1}{3}$ $q_{A_{II}} = \frac{2}{3}$ และกำหนดให้บนสายการประกอบ B ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ B_I และ B_{II} โดยมี $q_{B_I} = q_{B_{II}} = \frac{1}{2}$



(ก)



รูปที่ 2 แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 (Jaeschke 9-tasks) และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 (Mertens 7-tasks)

ตารางที่ 1 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1 ซึ่งผลิตสินค้ารุ่น AI และ All

Task	Task Time		Combined Task Time
	AI	All	
A1	15	15	15
A2	9	9	9
A3	12	9	10
A4	15	12	13
A5	12	9	10
A6	15	15	15
A7	3	3	3
A8	12	12	12
A9	18	15	16

ตารางที่ 2 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 ซึ่งผลิตสินค้ารุ่น BI และ BII

Task	Task Time		Combined Task Time
	BI	BII	
B1	2	0	1
B2	10	10	10
B3	8	6	7
B4	6	6	6
B5	10	10	10
B6	12	12	12
B7	10	10	10

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-objective Optimization Problem) ซึ่งมีความสำคัญต่อปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ เพื่อช่วยให้การจัดสมดุลสายการประกอบมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปปรับใช้ในทางปฏิบัติได้ดีขึ้น โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกันทุกวัตถุประสงค์ ประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงาน ความยาวของสายการประกอบ ความสัมพันธ์ของงานในสถานี ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน ความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงาน มีรายละเอียด ดังนี้

3.1 จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์แรกคือ การลดจำนวนสถานีงาน ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 1 ซึ่งมีการกำหนดรอบเวลาการผลิตมาให้และทำการหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างสถานีงานและค่าแรงของพนักงาน รวมถึงประหยัดพื้นที่ใช้สอย เมื่อ N_w เป็นจำนวนสถานีงาน (Workstation)

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

3.2 จำนวนสถานีน้อยที่สุด

คือการทำให้ความยาวสายการประกอบสั้นที่สุดเพื่อให้ใช้พื้นที่การทำงานน้อยที่สุด โดยกำหนดให้ N_s เป็นจำนวนสถานี (station)

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

ในการจัดสมดุลทำให้เกิดคำตอบของการจัดสมดุลได้หลายรูปแบบ ซึ่งการนับจำนวนสถานีงานแสดงในรูปที่ 3 (ก)-(ค) ตามลำดับ การแบ่งประเภทการนับจำนวนสถานีงานเพื่อมุ่งเน้นให้เกิดคำตอบจากการจัดสมดุลในรูปแบบคู่สายการประกอบรูปตัวยู ดังรูปที่ 3(ค) มากที่สุด

3.3 ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายใน สถานีนงานน้อยที่สุด

เป็นการลดความไม่สัมพันธ์กันของงานในสถานีนงานให้น้อยที่สุด มีจุดประสงค์เพื่อจัดสรรให้งานที่มีความเกี่ยวข้องกันอยู่ในสถานีนงานเดียวกันให้มากที่สุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการมอบหมายงานเนื่องจากสามารถเลือกจัดสรรพนักงานเข้าทำงานได้ตรงตามความถนัด สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3)

$$\text{Minimize } MIWR = \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (3)$$

เมื่อ SN_k คือจำนวนเครือข่ายของชั้นงานที่มีความสัมพันธ์กันโดยตรงในสถานีนงานที่ k

3.4 ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีนงานมี ค่าน้อยที่สุด

ในวัตถุประสงค์นี้เป็นการทำให้ผลรวมของเวลาการทำงานในแต่ละสถานีนงานมีความใกล้เคียงกันมากที่สุดโดยการไม่ทำให้การจัดสมดุลเกิดการแบ่งภาระงานที่มากเกินไปในบางสถานีนงาน มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

กำหนดให้ m_h คือรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ h , M_h คือ จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h , CCT คือรอบเวลาการผลิตรวม, TT_{k,b,m_h} คือเวลาชั้นงานทั้งหมด ในสถานีนงานที่ k ซึ่งเป็นประเภท b ที่ประกอบสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ h , ค่า S_{kb,m_h} คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของรอบเวลาการผลิตรวมและเวลาชั้นงานรวม ซึ่งแบ่งตามสถานีนงานประเภทสถานีน ตามสมการ 4,5 และ 6 ตามลำดับ

สถานีนงานปกติ

$$S_{kbm_h} = |CCT - TT_{kbm_h}| \quad (4)$$

สถานีนงานร่วม

$$S_{kbm_{(h,h+1)}} = |CCT - TT_{kbm_h} - TT_{kbm_{h+1}}| \quad (5)$$

สถานีนงานจุดข้าม

$$S_{k,CW,m_{(h(front),h(back))}} = |CCT - TT_{kbm_h(front)} - TT_{kbm_h(back)}| \quad (6)$$

จากนั้นนำค่า S_{kb,m_h} ที่หาได้จากสมการ 4, 5 และ 6 มาใช้ในการหาค่า S_{kb} ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยของสถานีนงานที่ k ตามประเภทสถานีนงาน ดังสมการ 7,8 และ 9 ตามลำดับ

สถานีนงานปกติ

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} q_{m_h} \times S_{k,RW,m_h} \quad (7)$$

สถานีนงานร่วม

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{k,MW,m_{(h,h+1)}} \quad (8)$$

สถานีนงานจุดข้าม

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_s=1}^{M_s} q_{m_h} \times q_{m_s} \times S_{k,CW,m_{(h(front),s(back))}} \quad (9)$$

ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) สามารถหาได้จากสมการ (10) เมื่อ N_w คือจำนวนสถานีนทั้งหมด

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} \quad (10)$$

ค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนงาน B_b สามารถหาได้จากสมการ (11) ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Vilarinho และ Simaria [15] โดย B_b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า B_b ที่ได้มีค่าต่ำจะหมายถึงภาระงานมีความสมดุล

Minimize

$$B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{CW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (11)$$

3.5 ความสมดุลเฉลี่ยของภาระงานภายในสถานีมาก ที่สุด

ในวัตถุประสงค์นี้จึงเป็นการแบ่งภาระงานการผลิตให้
ใกล้เคียงกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การจัดสมดุลไม่
ทำให้บางผลิตภัณฑ์เกิดการผลิตที่มากหรือน้อยจนเกินไป

กรณีนี้ สถานีงานอยู่บนสายการประกอบเดียว ได้แก่
สถานีงานปกติ และสถานีงานจุดข้ามจะมีวิธีการคำนวณ
ค่าความสมดุลภายในสถานีงาน ($B_{w,h}$) ดังนี้

กำหนดให้ N_h คือจำนวนสถานีงานที่อยู่บนสายการ
ประกอบ h เท่านั้น, s_{km} คือ เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์
 m ในสถานีงาน k และ, S_{km} คือ สัดส่วนเวลาว่างงาน
ของแต่ละผลิตภัณฑ์ สำหรับสถานีงานที่อยู่บนสายการ
ประกอบ h สามารถหาค่า s_{km} และ S_{km} ได้จากสมการ
(12) และ (13) ตามลำดับ

$$s_{km} = \max(0, CCT - TT_{kbm}) \quad (12)$$

$$S_{km} = \frac{q_m \times s_{km}}{\sum_{m=1}^{M_h} q_m \times s_{km}} \quad (13)$$

จากนั้นหาค่า $B_{w,h}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระ
งานภายในสถานีงานบนสายการประกอบ h ได้จาก
สมการ (14)

$$B_{w,h} = \frac{M_h}{N_h(M_h-1)} \sum_{k=1}^{N_h} \sum_{m=1}^{M_h} \left(S_{km} - \frac{1}{M_h} \right)^2 \quad (14)$$

ในกรณีที่สถานีงานเป็น สถานีงานร่วมจะมีผลิตภัณฑ์
ที่มาจากสองสายการประกอบ จะใช้การหาความสมดุล
ภายในสถานีงานร่วม ($B_{w,(h,h+1)}$) ดังนี้

เริ่มจาก คำนวณค่า $s_{km(h,h+1)}$ ซึ่งเป็นเวลาว่างงาน
ที่เกิดจากรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m ที่
อยู่บนสายการประกอบ h และ $h+1$ ได้จากสมการ
(15) จนครบทุกรูปแบบ จากนั้นหาค่า $S_{km(h,h+1)}$ ซึ่งเป็น
สัดส่วนเวลาว่างงาน ในสถานีงาน k ที่เกิดจากรูปแบบการ
ทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m บนสายการประกอบ h
และ $h+1$ โดยคำนวณได้ตามสมการที่ (16)

$$s_{km(h,h+1)} = \max(0, CCT - TT_{kbm_h} - TT_{kbm_{h+1}}) \quad (15)$$

$$S_{km(h,h+1)} = \frac{q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times s_{km(h,h+1)}}{\sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times s_{km(h,h+1)}} \quad (16)$$

หาค่า $B_{w,(h,h+1)}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระ
งานภายในสถานีงานร่วม (Multi-workstation) บนสาย
การประกอบ h และ $h+1$ ได้จากสมการ (17) เมื่อ
กำหนดให้ W คือจำนวนสถานีงานร่วม และ MC คือ จำนวน
รูปแบบการทำงานร่วมกันทั้งหมดของผลิตภัณฑ์บนสาย
การประกอบ h และ $h+1$,

$$B_{w,(h,h+1)} = \frac{MC}{W(MC-1)} \sum_{k=1}^W \sum_{c=1}^{MC} \left(S_{kc} - \frac{1}{MC} \right)^2 \quad (17)$$

ดังนั้นวัตถุประสงค์ที่ห้าคือ การทำให้ความสมดุล
ภายในสถานีงานเฉลี่ย ($B_{w(avg)}$) มากที่สุด

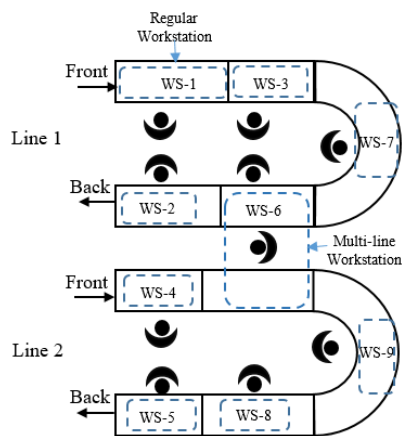
$$\text{Minimize } B_{w(avg)}$$

$$B_{w(avg)} = \frac{1}{2+T} (B_{w,h} + B_{w,h+1} + B_{w,(h,h+1)}) \quad (18)$$

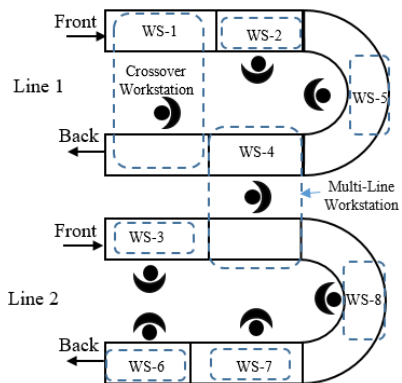
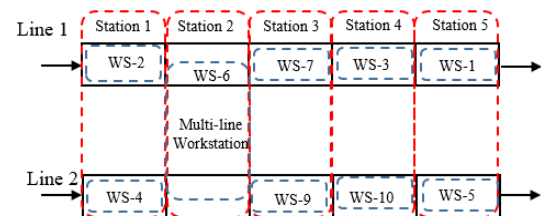
$$\text{โดยที่ } T = \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีงานร่วม} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีงานร่วม} \end{cases}$$

คำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์จะอยู่ในรูปของ
กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมเชิงพาเรโต ดังนั้นจึงใช้วิธี
เปรียบเทียบคำตอบตามหลักการครอบงำแบบพาเรโตมี
นิยามดังนี้ ในกรณีปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ
ทำให้มีค่าน้อยที่สุด k วัตถุประสงค์ คำตอบ x จะถือว่า
ครอบงำหรือดีกว่าคำตอบ y ($x < y$) ก็ต่อเมื่อเป็นไปตาม
เงื่อนไขดังนี้

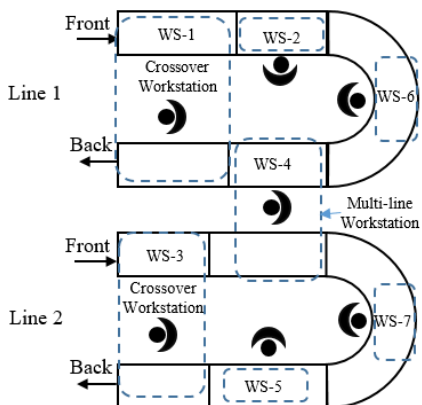
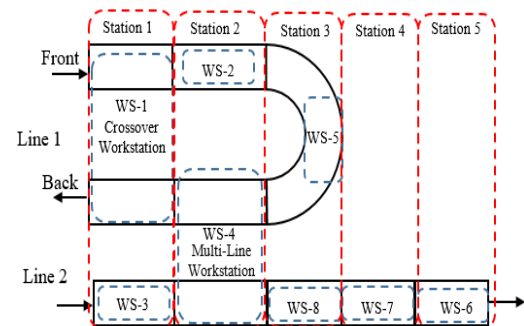
- 1) $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่า และ
 - 2) $f_i(x) < f_i(y)$ ในอย่างน้อยหนึ่งค่า
- เมื่อ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$



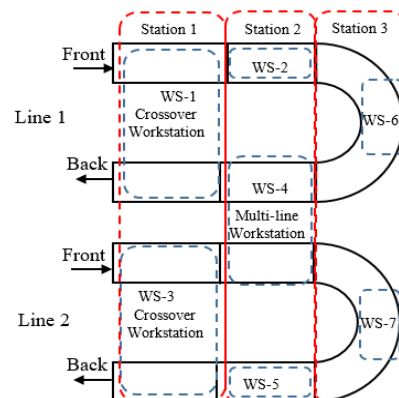
(ก)



(ค)



(จ)



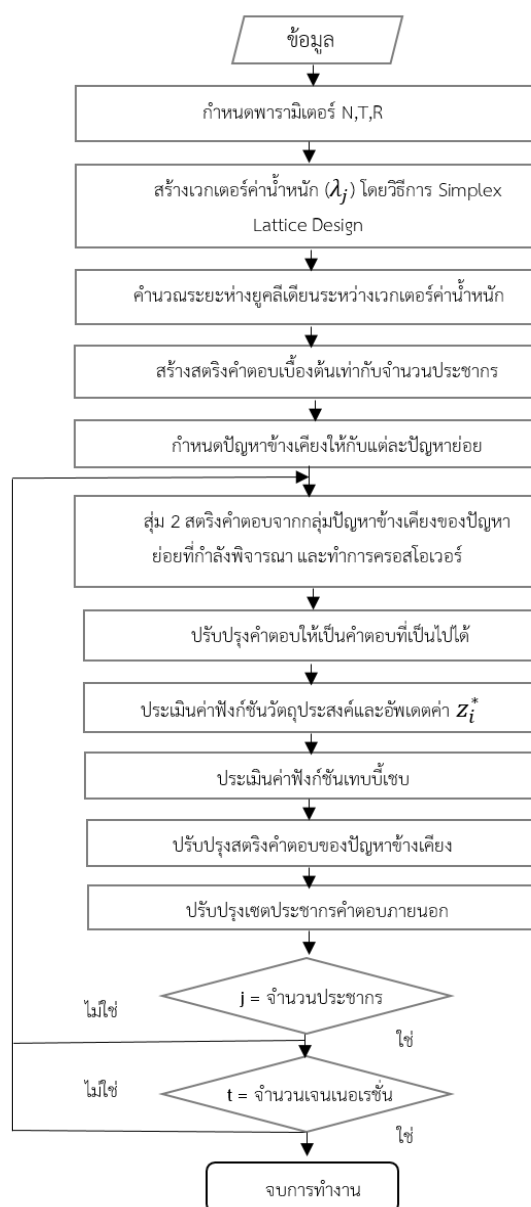
รูปที่ 3 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยู (ก) สถานีงานปกติทั้งหมดและมีสถานีงานร่วม (ข) สถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบเดียวและมีสถานีงานร่วม (ค) สถานีงานจุดข้ามทั้งสองสายการประกอบและมีสถานีงานร่วม

4. วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการแบ่งให้เป็นปัญหาย่อยจำนวนหลายปัญหาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน และพัฒนาคำตอบโดยนำสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้ไปแทนที่สตริงคำตอบในปัญหาย่อยที่อยู่ข้างเคียงเพื่อให้ได้คำตอบที่จะพัฒนาไปสู่รุ่นถัดไป

4.1 สตริงคำตอบ

ในแต่ละขั้นงานนั้นจะมีการระบุลำดับความสำคัญของขั้นงานหรือเรียกว่าค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง n เมื่อ n เป็นจำนวนขั้นงานทั้งหมด โดยงานที่มีความสำคัญมากที่สุดจะมีค่าสิทธิที่น้อยที่สุด เช่น ขณะที่กำลังพิจารณา มีงานที่สามารถจัดลงสถานีงานได้หลายงาน งานที่มีค่าสิทธิน้อยกว่าจะถูกเลือกก่อน ตัวอย่างสตริงคำตอบเป็นดังตารางที่ 3 ซึ่งมีจำนวนขั้นงานทั้งหมด 16 ขั้นงานจึงแบ่งออกเป็น 16 บิต สตริงคำตอบเริ่มต้นจะสร้างโดยการสุ่มค่าสิทธิตั้งแต่ 1 ถึง 16 ให้กับแต่ละขั้นงาน ซึ่งแต่ละขั้นงานจะมีค่าสิทธิไม่ซ้ำกัน การจัดสรรขั้นงานลงสถานีงานจะมีข้อจำกัดด้านตำแหน่งของขั้นงานที่จัดลงได้เพื่อให้พนักงานในสถานีงานร่วมและสถานีจุดข้ามสามารถทำงานได้บนสายการประกอบด้านที่อยู่ติดกันและสถานีงานทั้งสองรูปแบบนี้จะอยู่ในตำแหน่งที่เยื้องกันได้ไม่เกิน 1 สถานี



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสตริงคำตอบของการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปด้วยแบบผลิตภัณท์ผสม

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12

4.2 การถอดรหัสสตริงคำตอบ

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบจะจัดชั้นงานให้เป็นไปตามข้อจำกัดด้านตำแหน่งของชั้นงานโดยมีชั้นงานดังต่อไปนี้

1. หาเซตของชั้นงานที่สามารถเริ่มได้
2. เลือกชั้นงานจากเซตงานในข้อที่ 1 โดยชั้นงานที่มีค่าสิทธิน้อยจะถูกจัดลงสถานีนานก่อน
3. พิจารณาเงื่อนไขด้านตำแหน่งของชั้นงาน และเวลาดำเนินงานในสถานีนานจะต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิต ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะกลับไปเลือกงานใหม่ที่มีค่าสิทธิน้อยรองลงมาในข้อ 2
5. หลังจากเลือกชั้นงานใดลงสู่สถานีนานแล้วจะตัดชั้นงานนั้นออกจากแผนภาพชั้นงานรวม
6. หากไม่มีชั้นงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดแล้วจะทำการขึ้นสถานีนานใหม่ โดยทำการจัดสรรชั้นงานลงสู่สถานีนานจนครบทุกชั้นงาน

7. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.3 ฟังก์ชันเทบปีเซฟ

วิธีการในการแปลงปัญหาหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นปัญหาย่อยในเชิงสเกลาร์มีหลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมคือการใช้ฟังก์ชันเทบปีเซฟ ตามสมการ (19)

$$\text{Minimize } g_j(x) = \min_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} |f_i(x) - z_i^*|\} \quad (19)$$

เมื่อ $g_j(x)$ คือ ผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าเป้าหมายที่คูณกับค่าน้ำหนักของสตริง j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, N$ โดยที่ N เป็นจำนวนประชากร และ $i = 1, 2, \dots, m$ โดยที่ m คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด, λ_{ij} คือ ค่าน้ำหนักของ วัตถุประสงค์ i ของปัญหาย่อย j , z_i^* คือ ค่าเป้าหมาย ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ i ในกรณีปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดค่า $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ ในแต่ละจุด x^* จะเป็นคำตอบที่เหมาะสม

4.4 ขั้นตอนของอัลกอริทึม MOEA/D

ขั้นตอนของ MOEA/D ในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุด มีดังนี้

กำหนดพารามิเตอร์ของ MOEA/D

- จำนวนประชากร (N) = 11
- จำนวนปัญหาข้างเคียง (T) = 5
- จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด (R) = 2 ครั้ง/หนึ่งกลุ่มปัญหาข้างเคียง

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนปัญหาย่อย (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักให้กับแต่ละปัญหาย่อยโดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด เท่ากับ จำนวนประชากร (N) $\times$ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (m) ดังนั้นจำนวนมิติของค่าน้ำหนักจะเท่ากับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})^T$ คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อย j และ λ_{ij} คือค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ i ของปัญหาย่อยที่ j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\lambda_{ij} \geq 0$ และ $\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ($m = 5$) $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{51})^T = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)^T$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า d_{jk} ซึ่งเป็นค่าระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ j กับ k

ขั้นที่ 3 สร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นจำนวน N สำหรับปัญหาย่อยจำนวน N โดยให้ความยาวของสตริงเท่ากับจำนวนชั้นงานทั้งหมด ดังตารางที่ 4

ขั้นที่ 4 กำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียง (T) ให้กับแต่ละปัญหาย่อย (N) โดยพิจารณาจากระยะห่างยูคลิดีเนียนของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักระหว่างปัญหาย่อย

ขั้นที่ 5 พิจารณาปัญหาย่อยตัวแรก และปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยแรกนี้ ทำการสุ่มสตริงคำตอบมาจำนวน 2 ตัว จากปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยแรกที่กำลังพิจารณา เพื่อครอสโอเวอร์โดยวิธีการ Partial-Mapped Crossover (PMX) [16] คำตอบที่ได้จะเป็น

คำตอบรุ่นลูกจำนวน 2 คำตอบ จากตัวอย่างในที่นี้สุ่มได้ String 2 และ 3 และได้สตริงคำตอบรุ่นลูกตามตารางที่ 6

ขั้นที่ 6 ปรับปรุงคำตอบให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้

ขั้นที่ 7 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมดรวมทั้งสตริงคำตอบรุ่นลูก ดังตารางที่ 7

ขั้นที่ 8 ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (z_i^*) จากประชากรทั้งหมด โดยกำหนดให้ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ โดย $i = 1, 2, \dots, m$ ในตัวอย่างนี้จากประชากรทั้งหมดจะได้ $z_1^* = 6$, $z_2^* = 3$, $z_3^* = 5.4546$, $z_4^* = 0.0492$ และ $z_5^* = 0.2918$

ขั้นที่ 9 ประเมินค่าฟังก์ชันเทบปีเซบ $g_j(x)$ ของปัญหาข้างเคียง ดังตัวอย่างตารางที่ 8 โดยใช้การนอมอลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยจะใช้สมการที่ (21) ซึ่งเป็นสมการที่ปรับมาจากสมการ (19)

$$\text{Minimize } g_j(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \lambda_{ij} \left| \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} \right| \right\} \quad (21)$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, N$, f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i , z_i^* คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดตั้งแต่การดำเนินงานในรอบแรกถึงรอบปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i , $f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดในรอบปัจจุบันในวัตถุประสงค์ที่ i ซึ่งในรอบนี้ได้ค่า

$$f_{1(\max)} = 7, \quad f_{2(\max)} = 6, \quad f_{3(\max)} = 6.4615 \\ f_{4(\max)} = 6.4515 \text{ และ } f_{5(\max)} = 0.5447 \text{ ดังตารางที่ 7}$$

ขั้นที่ 10 ประเมินค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ โดยการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกและพิจารณาแทนที่สตริงคำตอบ (ตัวอย่างการหาค่าดังตารางที่ 9) ดังนี้

1. สุ่มสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อเลือกใช้เพียง 1 คำตอบโดยใช้ความน่าจะเป็นเท่ากัน ในที่นี้สุ่มได้ Offspring 2-1

2. กำหนดให้มีการนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้จากการสุ่มในข้อที่ 1 แทนลงใน

ฟังก์ชันเทบปีเซบของปัญหาข้างเคียงซึ่งเป็นตัวเดียวกับปัญหาย่อยที่พิจารณา ดังนั้นปัญหาย่อยนี้จะได้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่

3. สุ่มปัญหาข้างเคียงมา 1 ปัญหาโดยไม่ซ้ำปัญหาที่ถูกสุ่มแล้ว โดยให้ปัญหาข้างเคียงมีความน่าจะเป็นในการถูกสุ่มเลือกเท่ากัน แล้วแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกลงในฟังก์ชันเทบปีเซบของปัญหาข้างเคียงดังนั้นปัญหาข้างเคียงนี้จะได้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่

4. ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันเทบปีเซบเดิม (ที่ได้ในขั้นที่ 9) สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี 1) ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ได้ค่าที่มากกว่าค่าเดิมในกรณีนี้แสดงว่าคำตอบใหม่ที่ได้จากสตริงคำตอบรุ่นลูกเป็นคำตอบที่ไม่เหมาะสมสำหรับปัญหาข้างเคียงนั้นจึงไม่ทำการแทนที่สตริงคำตอบเดิม 2) ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ได้ค่าที่น้อยกว่าค่าเดิมหรือเท่ากับที่ได้จากขั้นที่ 9 จะทำการแทนที่สตริงคำตอบเดิมของปัญหาข้างเคียงด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก

5. ทำขั้นตอน 3,4 ซ้ำ โดยสุ่มปัญหาข้างเคียงตัวอื่น ที่ไม่ซ้ำเดิมเพื่อให้เกิดการเพื่อแทนค่าฟังก์ชันเทบปีเซบโดยสตริงคำตอบรุ่นลูก และหยุดกระบวนการสุ่มในข้อที่ 3 เมื่อเกิดการแทนที่สตริงคำตอบครบตามจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุดที่กำหนด (R) หรือเมื่อสุ่มสตริงข้างเคียงจนครบ จะได้ค่าดังตารางที่ 9 และทำต่อในขั้นที่ 11

ขั้นที่ 11 เก็บค่าสตริงคำตอบของประชากรที่ดีที่สุด ในเซตของประชากรคำตอบภายนอก (External population :EP) เมื่อเซต EP ไม่มีสตริงคำตอบโดยอยู่จะทำการเพิ่มคำตอบเข้าไปในเซตนี้ แต่กรณีที่คำตอบเดิมอยู่จะเก็บค่าเฉพาะสตริงคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบที่อยู่ในเซตนี้เท่านั้น

ขั้นที่ 12 ย้อนกลับไปทำขั้นที่ 5 โดยพิจารณาปัญหาหลักตัวถัดไป และปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนครบตามจำนวนประชากร เมื่อครบแล้ววนซ้ำตามเงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 4 สตริงคำตอบเริ่มต้นของการจัดสมมูลคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบผลิตภัณฑ์ผสม

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
2	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
3	8	11	10	15	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
4	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
5	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12
6	9	12	6	3	11	1	16	8	15	5	13	2	10	7	14	4
7	12	16	14	11	5	13	6	9	7	8	10	15	1	3	2	4
8	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
9	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
10	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
11	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

ตารางที่ 5 เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร (Weight vector)

String (j)	λ_j
1	(0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)
2	(0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6)
3	(0.1, 0.6, 0.1, 0.1, 0.1)
4	(1, 0, 0, 0, 0)
5	(0.6, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1)
6	(0, 0, 0, 1, 0)
7	(0, 0, 0, 0, 1)
8	(0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)
9	(0, 1, 0, 0, 0)
10	(0, 0, 1, 0, 0)
11	(0.1, 0.1, 0.1, 0.6, 0.1)

ตารางที่ 6 สตริงคำตอบรุ่นลูก (feasible solution) ที่ได้จากการครอสโอเวอร์ของ String 2 และ String 3

Offspring	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1-1	8	11	15	10	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
1-2	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3

ตารางที่ 7 ตัวอย่างการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรข้างเคียงและสตริงคำตอบรุ่นลูก

Neighborhood String (j)	Objective				
	N_w	N_s	$MIWR$	B_b	$B_{w(avg)}$
1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874
8	7	5	6.3000	0.1029	0.4548
10	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
Offspring 1-1	7	4	6.4167	0.1298	0.4388
Offspring 1-2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435

ตารางที่ 8 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของปัญหาข้างเคียง

Neighborhood String (j)	$\lambda_{ij} \left \frac{f_j - z_j^*}{f_{j(max)} - z_j^*} \right $					$g(x)$
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
1	0.1000	0.0333	<u>0.5733</u>	0.1000	0.0378	0.5733
8	<u>0.2000</u>	0.1333	0.1679	0.1191	0.1289	0.2000
10	0.0000	0.0000	<u>0.9555</u>	0.0000	0.0000	0.9555
2	0.1000	0.0333	0.0956	0.0715	<u>0.3599</u>	0.3599
3	0.1000	<u>0.2000</u>	0.1000	0.0973	0.0560	0.2000

ตารางที่ 9 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ของปัญหาข้างเคียงที่เกิดจากการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring1-2 โดยใช้ค่าน้ำหนักของ String 1 และ 8

String (j)	$\lambda_{ij} \left \frac{f_j - z_j^*}{f_{j(max)} - z_j^*} \right $					New $g(x)$
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
1	0.1000	0.0333	0.5733	0.0715	0.0600	0.5733
8	0.2000	0.1333	0.1679	0.1191	0.1289	0.2000

ตารางที่ 10 ปัญหาชิ้นงานที่ใช้ในการจัดสมมูลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

No.	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต	ชิ้น งาน รวม	รอบเวลา การผลิต (นาทีก)	Generation
P1	Jackson_11	3	1:2:1	Rosieg_25	2	3:1	36	18,22,26	500
P2	Rosieg_25	3	1:2:1	Rosieg_25	3	2:1:2	50	42,50,32	500
P3	Kilbridge_45	2	1:1	Heskiaoff_28	2	2:3	73	10902,4510, 11880	800
P4	Tonge_70	2	3:1	Wee-mag_75	3	1:1:1	145	210,252,303	1000

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1 การออกแบบทางการทดลอง

ในการทดลองได้ใช้ปัญหาตัวอย่างทั้งสิ้น 4 ปัญหา ซึ่งเป็นปัญหาที่อยู่ในช่วง 36 ถึง 145 ชิ้นงานโดยแต่ละปัญหาจะแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกันออกไป (รวมทั้งสิ้น 12 ปัญหาย่อย) ดังตารางที่ 10 ซึ่งจากปัญหาที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นเซตของปัญหามาตรฐานสำหรับสายการประกอบรูปตัวยูเดี่ยว ซึ่งถูกนำมาจับคู่ ดังนั้นในแต่ละปัญหาลดลง (P1-P4) จึงประกอบด้วยปัญหามาตรฐาน 2 ปัญหา ที่แบ่งขนาดของปัญหาตามจำนวนชิ้นงานรวมได้ 4 ระดับตั้งแต่ปัญหา P1 ซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็กมีจำนวนชิ้นงานรวมน้อยที่สุด ไปจนถึงปัญหา P4 ซึ่งเป็นปัญหาขนาดใหญ่ที่มีจำนวนชิ้นงานรวมมากที่สุด เพื่อทำการทดสอบให้ครอบคลุมต่อช่วงขนาดชิ้นงานรวมของปัญหาดังกล่าว และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ

ฝูงอนุภาค พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาแสดงดังตารางที่ 11 โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีชิมเพลกแลกทิตในการสร้างเวกเตอร์น้ำหนักซึ่งส่งผลต่อการกำหนดจำนวนประชากรซึ่งในที่นี้ ใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 131 ทั้ง อัลกอริทึม MOEA/D และ MOPSO สำหรับการแบ่งค่าน้ำหนักโดยวิธีชิมเพลกซ์แลตทิสเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการหาคำตอบจะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับจำนวนวัตถุประสงค์และการกำหนดการแบ่งช่วงของค่าน้ำหนัก ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย[11] กำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียงของ MOEA/D เท่ากับ 10 [11] จำนวนครั้งในการแทนที่สูงสุดต่อรอบดำเนินงานของ 1 ปัญหาย่อย (Maximum number of replacement: R) ของ MOEA/D ถูกกำหนดให้เท่ากับ 5 (หรือคิดเป็น 50% ของจำนวนประชากรข้างเคียง) ในส่วนของ MOPSO ค่าน้ำหนักการหน่วง (inertia weight) กำหนดให้เท่ากับ 1 ([17], [18]) สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ค่าสัมประ

สิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor: c_1, c_2) ของ MOPSO ได้มาจากการทดลองแบบ Full Factorial Design จำนวน 3 Replicate

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมสำหรับปัญหา P1-P4

MOEA/D	
Population size	131
Neighborhood	10
Maximum number of replacement	5
MOPSO	
Population size	131
Inertia weight	1
Learning factor	$c_1 = 1.5, c_2 = 1$

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

งานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวชี้วัด ได้แก่ 1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto optimal Set) 2) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) ซึ่งหากกลุ่มคำตอบมีระยะห่างระหว่างคำตอบที่สม่ำเสมอจะมีการกระจายตัวที่ดี 3) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของอัลกอริทึมที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solutions: self-comparison: RNDs1) 4) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำซึ่งเป็นคำตอบที่แท้จริงที่อัลกอริทึมหาได้ เมื่อเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงทั้งหมด (Ratio of Non-dominate solution: Pareto-optimum comparison: RNDs2) ซึ่ง RNDs1 เป็นตัวบ่งชี้ว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นได้มาจะมีคำตอบที่แท้จริงอยู่เป็นอัตราส่วนเท่าไร ซึ่งเป็นการประเมินประสิทธิภาพการหาคำตอบ

ของอัลกอริทึมเดียวเท่านั้น จึงจำเป็นต้องนำ RNDs2 มาพิจารณาร่วมด้วยซึ่ง RNDs2 จะเป็นตัวเปรียบเทียบว่าคำตอบที่แท้จริงที่ได้จากอัลกอริทึมที่สนใจมีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงทั้งหมดที่รวบรวมคำตอบจากอัลกอริทึมอื่นด้วย และ 5) เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

5.3 ผลการทดลอง

ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการจัดสมดุลในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-7700HQ CPU@2.8GHz RAM 8.00 GB ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 12

จากการทดลองเมื่อพิจารณาจำนวนสถานีงาน (N_w) และ จำนวนสถานี (N_s) น้อยที่สุดที่ได้ พบว่าอัลกอริทึม MOEA/D สามารถค้นหาคำตอบได้ดีเทียบเท่ากับ MOPSO โดยให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดเท่ากัน ซึ่งมีจำนวนสถานีงานเท่ากับค่า lower bound ในปัญหา P1 ที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 36 และ P2 ที่รอบเวลาการผลิต 50 และ 52 และในปัญหาที่เหลือสามารถหาค่าจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดได้เท่ากับค่า Optimal ยกเว้นปัญหา P4 ที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 252 มีจำนวนสถานีงานที่ได้มากกว่าค่า Optimal

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบโดยดูจากค่าตัวชี้วัด แสดงให้เห็นว่า MOEA/D มีสมรรถนะที่เหนือกว่า MOPSO ในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า MOEA/D มีค่า convergence ที่มีค่าน้อยกว่าค่าของ MOPSO และมีตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำค่า RNDs1 และ RNDs2 ที่มากกว่า MOPSO แสดงให้เห็นถึงคุณภาพคำตอบที่ MOEA/D หาได้นั้นมีอัตราส่วนของคำตอบที่แท้จริงมีมากกว่าและมีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากกว่า MOPSO

ในด้านการกระจายตัวของคำตอบ MOEA/D และ MOPSO มีความใกล้เคียงกันและมีค่าการกระจายตัว เข้า

ใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบไม่สม่ำเสมอ

ด้านเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ พบว่าทั้งสองอัลกอริทึมใช้เวลาในการหาคำตอบใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการหาคำตอบที่ดีกว่า MOPSO ในด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) และ

ด้านอัตราส่วนที่ไม่ถูกครอบงำ (RND S1, RND S2) ในปัญหาทุกขนาด ซึ่งจะเห็นได้จากการที่คำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงที่ประมาณได้มาจาก MOEA/D เป็นส่วนใหญ่ โดยที่การกระจายตัวของคำตอบของทั้งสองอัลกอริทึมไม่สม่ำเสมอซึ่งมีค่าการกระจายตัวใกล้เคียงกัน และทั้งสองอัลกอริทึมสามารถหาค่าจำนวนสถานีงาน (N_w) และจำนวนสถานี (N_s) ที่น้อยที่สุดได้ดีและไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 12 ผลการทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	P1			P2			P3			P4		
No. of Task (Line1-Line2)	32 (21-11)			50 (25-25)			73 (45-28)			145 (70-75)		
Cycle Time	30	36	42	42	50	52	10902	4510	648	210	252	303
Number of workstation (Nw)												
Optimal	11	10	8	9	8	12	15	10	10	39	32	27
Lower bound (Balance together)	11	9	8	9	7	11	15	10	10	38	32	27
MOEA/D	11	9	8	9	7	11	15	10	10	39	33	27
MOPSO	11	9	8	9	7	11	15	10	10	39	33	27
Number of Station (Ns)												
MOEA/D	4	4	3	3	3	4	5	4	4	12	11	9
MOPSO	4	4	3	3	3	4	5	4	4	12	11	9
Convergence												
MOEA/D	0.065	0.029	0.017	0.110	0.085	0.039	0.086	0.073	0.057	0.005	0.000	0.000
MOPSO	0.094	0.129	0.120	0.136	0.184	0.276	0.487	0.108	0.218	0.385	0.223	0.181
Spread												
MOEA/D	0.880	0.864	0.924	1.020	0.869	0.780	0.962	0.974	1.049	0.996	0.842	0.872
MOPSO	0.713	0.885	0.816	0.824	0.861	0.969	0.862	0.863	0.838	0.685	0.721	0.786
RND S1												
MOEA/D	0.534	0.682	0.736	0.333	0.513	0.723	0.545	0.587	0.702	0.980	1.000	0.990
MOPSO	0.236	0.196	0.081	0.420	0.217	0.076	0.043	0.094	0.077	0.017	0.064	0.100
RND S2												
MOEA/D	0.673	0.753	0.893	0.424	0.712	0.915	0.925	0.880	0.909	0.962	0.943	0.933
MOPSO	0.327	0.247	0.131	0.576	0.288	0.085	0.075	0.120	0.091	0.038	0.057	0.067
CPU time(s)												
MOEA/D	2286	2161	1873	2798	4995	4204	10589	11541	8462	52158	56729	47794
MOPSO	2216	1940	2057	2764	4636	3684	11335	9951	8522	49273	56714	44023

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ประโยชน์ของสายการประกอบขนาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยว และเพื่อลดข้อจำกัดด้านพื้นที่ของสายการประกอบขนานในงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยนี้นำเสนอปัญหาการจัดสมดุลในรูปแบบมากวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) ในการแก้ปัญหาและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงนก (MOPSO) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ พบว่าอัลกอริทึม MOEA/D นั้นสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหามากวัตถุประสงค์ได้ดีกว่า MOPSO เนื่องจาก MOEA/D มีผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (RND1, RND2) ที่ดีกว่าอัลกอริทึม MOPSO ในปัญหาทุกขนาด ซึ่งจะเห็นว่าคำตอบที่ MOEA/D หาได้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D เป็นอัลกอริทึมที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมและมีวัตถุประสงค์จำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับแนวทางการศึกษาต่อยอดการแก้ปัญหาการจัดสมดุลในอนาคต สามารถพัฒนาวิธีการจัดสมดุลในรูปแบบของสายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย (Multiple U-shaped line) หรือนำปัญหาการจัดลำดับการผลิตมาพิจารณาเป็นวัตถุประสงค์เพิ่มเติมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์ในด้านอื่นที่สามารถนำมาพิจารณาเพิ่มเติมในทางปฏิบัติเช่น การลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือ การลดรอบเวลาการผลิต การจัดตารางการผลิต และ การพัฒนาผลิตภาพแรงงาน (labor productivity) เป็นต้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปารเมศ ชูติมา, รณชัย ศิริโรვნกุล.เทคนิคการจัดสมดุลสายการประกอบ.2560. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] G. J. Miltenburg, and J. Wijnngaard, "The U-line line balancing problem," Management science, vol. 40, pp. 1378-1388, 1994.
- [3] C. H. Cheng, J. Miltenburg, and J. Motwani, "The effect of straight-and U-shaped lines on quality," IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 47, no. 3, pp. 321-334, 2000.
- [4] R. Askin and M. Zhou, "A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem," International Journal of Production Research, vol. 35, no. 11, pp. 3095-3106, 1997.
- [5] สุชาติดา คิดอ่าน, "การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนาน ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2553.
- [6] I. Kucukkoc and D.Z. Zhang, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines," Computers & Operations Research, vol. 64, pp. 233-244, 2015.
- [7] H. Gökçen, K. Ağpak, and R. Benzer, "Balancing of parallel assembly lines," International Journal of Production Economics, vol. 103, no. 2, pp. 600-609, 2006.

- [8] H. Gökçen, et al., "A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. Applied Mathematical Modelling," vol. 29, no. 4, pp. 373-380, 2005.
- [9] เพ็ญนภัส จิรัชัย, "การแก้ปัญหาการจัดสมดุล สายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการ ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนาน,"วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [10] W. C. Chiang , P. Kouvelis, and T.L. Urban, "Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines," IIE Transactions, vol. 39, no. 4, pp. 347-359, 2007.
- [11] Q.Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Transactions on evolutionary computation, vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [12] D.I. Petropoulos and A.C. Nearchou, "A particle swarm optimization algorithm for balancing assembly lines", Assembly Automation, vol. 31, no. 2, pp. 118-129, 2011.
- [13] 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.
- [14] ณัฐชัย โยธาบริบาร และ ปารเมศ ชูติมา, "การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการ ประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์," Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok (วารสาร วิชาการ พระจอมเกล้า พระนครเหนือ), vol. 25, no. 1, pp. 73-90, 2015.
- [15] A.S.Simaria and P.M. Vilarinho, "A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II", Computers & Industrial Engineering, vol. 47, no. 4, pp. 391-407, 2004.
- [16] V. Singh, and S. Choudhary, "Genetic algorithm for traveling salesman problem: Using modified partially-mapped crossover operator," 2009 International Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies., India., Aligarh, 2009, pp. 23-26.
- [17] P.Fattahi and P. Samouei, "A Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Mixed-Model Assembly Line Balancing with Different Skilled Workers," Journal of Optimization in Industrial Engineering, vol. 9, no. 20, pp. 9-18, 2016.
- [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, no. 1, pp. 39-55, 2012.