



**การจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ
 ผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
 วิธีการบรรจบแบบขยายที่ใช้การค้นหาแบบเฉพาะที่**
**Multi-Objective Mixed-Model Multi-Manned
 Assembly Line Balancing Problem Using Extended
 Combinatorial Optimization with Local Search**

กฤษณ์ ประเสริฐ^{1,*} และ ปารเมศ ชุตินา²

Krit Prasert^{1,*} and Parames Chutima²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand.

*E-mail: asonsawanon@gmail.com Tel: 66822-611262

บทคัดย่อ

การจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานนั้นถูกจัดเป็นปัญหาแบบเอ็นพีแบบยาก ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) บทความนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายที่ใช้การค้นหาแบบเฉพาะที่ (Extended Combinatorial Optimization with Local Search: COIN-E) เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมี 4 วัตถุประสงค์ที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุด ได้แก่ จำนวนพนักงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด และความสัมพันธ์ของงานน้อยที่สุด ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า COIN-E มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่เป็นที่นิยม ทั้งในด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาราโต การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ

ABSTRACT

A multi-objective mixed-model multi-man assembly line balancing problem is classified as an NP-hard problems; hence, using heuristics might be a suitable approach to effectively solve the problem. The Extended Combinatorial Optimization with Local Search (COIN-E) algorithm is developed for tackling this problem to optimize four objectives simultaneously, i.e. number of worker, number of workstations, balance workload between workstations, and work relatedness. The experimental results show that COIN-E outperforms the well-known algorithm, biogeography-based optimization (BBO), in terms of convergence, spread, number of non-dominated solutions, and CPU time.

1. บทนำ

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมเป็นการระบบผลิตแบบไหลเลื่อนที่ประกอบไปด้วยสถานีงานที่จัดเรียงต่อเนื่องกัน และเชื่อมโยงกันด้วยสายพานหรือระบบขนย้ายวัสดุที่คอยทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานระหว่างสถานีงาน ซึ่งในรอบการผลิตหนึ่ง สถานีงานจะรับชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าเข้ามาประกอบตามชิ้นงานที่กำหนดจนเสร็จภายในรอบเวลาการผลิต เมื่อชิ้นงานนั้นได้ผ่านการประกอบตั้งแต่สถานีงานแรกจนถึงสถานีงานสุดท้ายเสร็จสิ้นก็จะได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่สถานีงานสุดท้าย

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก ซึ่งนั่นหมายความว่าแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะได้คำตอบที่ดีที่สุดในระยะเวลาอันสั้น ในทางปฏิบัตินั้นจึงนิยมนำกระบวนการเชิงฮิวริสติกมาใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยใช้เวลาไม่นานนัก ปัญหาประเภทนี้ได้นำเสนอต่อต่อไปนี้ ฮิวริสติกในการจัดสมดุลแบบสองด้านด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคมมด (ACO) [1] เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานและเวลาสูญเสียในแต่ละสถานีงานน้อยที่สุด, อัลกอริทึมสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายค่าวัตถุประสงค์ (MOGAs) [2] เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหา, กระบวนการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and Bound Algorithm) [3] สำหรับการจัดสมดุลการผลิตแบบขนานหลายคนเพื่อหาจำนวนสถานีงานที่เหมาะสม และยังมีการนำเสนอวิธีการอีกมากมาย เช่น อัลกอริทึมการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search Algorithm) [4] และวิธีการเจเนติกอัลกอริทึม (GA) [5] เป็นต้น

2. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานสามารถรองรับการผลิตจำนวนหลายรุ่นได้ในระลอกเดียวกัน โดยที่ลำดับการผลิตสามารถสลับรุ่นไปมาได้ อย่างอิสระ โดยไม่ต้องปรับตั้งเครื่องจักร ส่งผลให้สามารถ

ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว ตามหลักแนวความคิดการผลิตแบบทันเวลาพอดี การจัดวางสายการประกอบประเภทนี้มีลักษณะเดียวกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบหลายคนงาน [6] ซึ่งสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมนั้นจำเป็นต้องดำเนินงานภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกัน (Common Cycle Time), แผนภาพลำดับก่อน หลัง ร่วม (Combined Precedence Diagram) เพื่อแสดงข้อมูลชิ้นงานต่าง ๆ ในการประกอบผลิตภัณฑ์ทุกรุ่นว่าต้องทำก่อนหรือหลังชิ้นงานใดบ้าง และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละชิ้นงานอาจแตกต่างกันไปตามรุ่นผลิตภัณฑ์ ในการจัดสมดุลจึงอาศัยเวลาชิ้นงานร่วม (Combined Task Time) ที่เฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจากสัดส่วนการผลิตของผลิตภัณฑ์ทุกรุ่น ดังนั้นผลการจัดสมดุลที่เป็นไปได้ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้ (1) ชิ้นงานทั้งหมดถูกจัดสรรจนครบถ้วน โดยแต่ละชิ้นงานสามารถอยู่ในสถานีงานใดก็ได้เพียงสถานีงานเดียวเท่านั้น (2) แต่ละชิ้นงานต้องไม่อยู่ในสถานีงานที่ตั้งอยู่ก่อนหน้าสถานีงานอื่น ๆ ที่มีชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าบรรจุอยู่แล้ว และ (3) ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมในแต่ละสถานีงานต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิตร่วม

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

3.1 วัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่ง

วัตถุประสงค์หลักของการจัดสมดุลคือ การทำให้จำนวนพนักงาน (N_w) หรือแรงงานบนสายการประกอบน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนในการจ้างงานมีค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่ 1

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

3.2 วัตถุประสงค์ระดับที่สอง

วัตถุประสงค์รองของการจัดสมดุลคือ จำนวนสถานีงานมีปริมาณน้อยที่สุด (N_s) หมายถึงการทำให้สายการประกอบที่ได้มีขนาดสั้นที่สุด ซึ่งจะช่วยให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุดนั่นเอง ดังสมการที่ 2

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

3.3 วัตถุประสงค์ระดับที่สาม

วัตถุประสงค์ใน ระดับนี้ ประกอบไปด้วย 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน

วัตถุประสงค์ย่อยที่ 1 คือ การทำให้ภาระงานระหว่างสถานีมีความสมดุลกันมากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ลดการผลัดและลดความแออัดบนสายการประกอบ รวมทั้งทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างพนักงาน ดังสมการที่ 3 กำหนดให้ N_w คือ จำนวนสถานีงาน, S_{kb} คือ เวลาว่างงานบนสถานีงานที่ k ด้าน b , WIT คือ ผลรวมเวลาว่างของสายการผลิต ค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b)

$$\text{Min } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=L}^F \left(\frac{S_{kb}}{WIT} - \frac{1}{n} \right)^2 \quad (3)$$

วัตถุประสงค์ย่อยที่ 2 คือ การทำให้ชิ้นงานในแต่ละสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด ซึ่งทำให้สามารถจัดสรรคนงานลงสู่สถานีงานได้อย่างเหมาะสมตรงตามความถนัด ซึ่งเป็นการสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน และดำเนินงานให้สายการประกอบมีประสิทธิภาพ ดังสมการที่ 4 กำหนดให้ SN_k คือจำนวนการเชื่อมโยงกันโดยตรงของสถานีงานที่ k ค่า MIWR ค่าแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง โดยวัตถุประสงค์ย่อยนี้จะมุ่งเน้นให้ค่ามีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Min } MIWR = N_w - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (4)$$

เมื่อทำการเก็บเซตคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์หลักและรองน้อยที่สุดแล้วนั้น จึงกำหนดให้ $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ ขนาด n ของสเปซคำตอบ X การทำให้วัตถุประสงค์ระดับที่ 3 มีค่าที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกัน โดยหาได้จากเวกเตอร์ X^* ที่ทำให้เซตของ

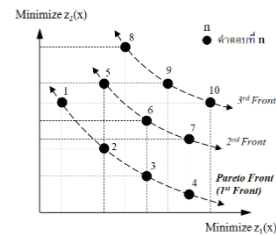
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อยที่ 1 และ 2 มีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ 5

$$\text{Min } z(x^*) = \{z_1(x^*), z_2(x^*)\} \quad (5)$$

จะเห็นได้ว่าแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะมีคำตอบที่สมบูรณ์เพียงคำตอบเดียว ที่ทำให้วัตถุประสงค์มีค่าที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกัน ดังนั้นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในรูปของเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated) จากคำตอบใดเลย โดยคำตอบ x จะถือว่าครอบงำคำตอบ y ($x \prec y$) ก็ต่อเมื่อเป็นไปตามสมการที่ 6 และ 7

$$z_1(x) \leq z_1(y) \text{ และ } z_2(x) \leq z_2(y) \quad (6)$$

$$z_1(x) < z_1(y) \text{ และ/หรือ } z_2(x) < z_2(y) \quad (7)$$



รูปที่ 1 ตัวอย่างกราฟฟังก์ชันสองวัตถุประสงค์

รูปที่ 1 แสดงกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่สองของตัวอย่างคำตอบ 10 คำตอบ ที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่งเท่ากัน คำตอบที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 1-4 เนื่องจากไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลย

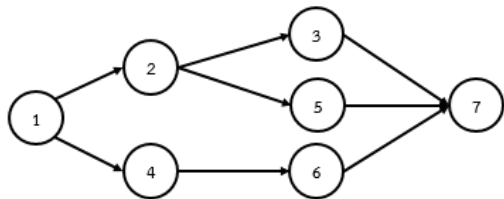
4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายที่ใช้การค้นหาแบบเฉพาะที่

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายที่ใช้การค้นหาแบบเฉพาะที่ซึ่งอัลกอริทึม COIN-E [7] นั้นอาศัยแนวคิดจากอัลกอริทึม COIN เดิม เพียงแต่จะเพิ่มตารางความน่าจะเป็นร่วมขึ้นอีกสองตาราง ซึ่งจะได้จากการหาคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์ย่อย จากนั้นจึงนำคำตอบของแต่ละ

วัตถุประสงค์ย่อยที่ดีและไม่ดีมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างสตริงคำตอบที่ดีมากยิ่งขึ้นในรอบเวลาการทำงานครั้งถัดไป

4.1 ขั้นตอนของอัลกอริทึม

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมข้อมูล จะประกอบด้วย แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ร่วม และเวลาขึ้นงานร่วม



รูปที่ 2 แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ร่วมของปัญหาตัวอย่างขนาด 7 ขึ้นงาน

เมื่อกำหนดให้จำนวนชนิดรถบรรทุก 3 รุ่น ได้แก่ A, B และ C มีจำนวน MPS คือ 2:3:3 แสดงว่าในการจัดสมดุลการผลิตจะต้องมีรถบรรทุก A จำนวน 2 คัน รถบรรทุก B จำนวน 3 คันและรถบรรทุก C จำนวน 3 คัน เข้าไปในสายการประกอบจะได้เวลาขึ้นร่วมในแต่ละขึ้นงานดังตารางที่ 1

$$CTT = (M_1 \times T_1) + \dots + (M_n \times T_n) \quad (8)$$

เมื่อ CTT = เวลาขึ้นงานร่วม

M_n = สัดส่วนการผลิตที่ n

T_n = เวลาของขึ้นงานที่ n

ตารางที่ 1 เวลาที่ใช้ในการผลิตลักษณะ A B และ C ในแต่ละขึ้นงาน

Task	Side	Model						CCT
		A		B		C		
		M_1	T_1	M_2	T_2	M_3	T_3	
1	B	2	1	3	1	3	1	1
2	L	2	5	3	6	3	4	5
3	R	2	2	3	0	3	2	2
4	F	2	8	3	8	3	8	8
5	E	2	3	3	3	3	3	3
6	E	2	0	3	6	3	6	6
7	E	2	5	3	5	3	5	5

ขั้นตอนที่ 2 สร้างสตริงคำตอบเท่ากับจำนวนประชากรเบื้องต้น (Popsize = 7) แล้วทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดค่าความแข็งแรงของแต่ละสตริงคำตอบ โดยเริ่มจากการสร้างสตริงคำตอบของค่าสิทธิในการเลือกขึ้นงาน (String Priority) ดังนี้

ขั้นตอนการสร้างสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือก

- ใส่ค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority Number) โดยเริ่มแรกให้มีค่าเท่ากับขึ้นงาน

Task	1	2	3	4	5	6	7
------	---	---	---	---	---	---	---

Priority	1	2	3	4	5	6	7
----------	---	---	---	---	---	---	---

รูปที่ 3 กำหนดค่าสิทธิลงขึ้นงาน

- สลับตำแหน่ง 2 จุด โดยจำนวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับจำนวนครั้งหนึ่งของงาน หรือ $m/2 = 7/2 = 3.5 = 4$ กำหนดให้ m คือจำนวนขึ้นงานทั้งหมด ดังรูปที่ 4 และได้ดังตารางที่ 2

Task	1	2	3	4	5	6	7
------	---	---	---	---	---	---	---

Priority m=1	1	2	3	4	5	6	7
--------------	---	---	---	---	---	---	---

Priority m=2	1	2	7	4	5	6	3
--------------	---	---	---	---	---	---	---

Priority m=3	1	3	7	4	5	6	2
--------------	---	---	---	---	---	---	---

Priority m=4	1	3	7	6	5	4	2
--------------	---	---	---	---	---	---	---

String Priority 1	2	3	7	6	5	4	1
-------------------	---	---	---	---	---	---	---

รูปที่ 4 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกขึ้นงานที่ 1

จากนั้นจึงทำการถอดรหัสสตริงคำตอบดังนี้ (1) พิจารณาว่าขึ้นงานใดสามารถเลือกลงตำแหน่งแรกได้ก่อน

โดยดูจากแผนภาพความสัมพันธ์ของชิ้นงาน (2) เมื่อมีมากกว่า 2 งานที่สามารถเลือกลงตำแหน่งของชิ้นงานได้ ให้พิจารณาค่าสิทธิในการเลือกงานมากที่สุดก่อน (3) ทำซ้ำขั้นตอนแรกจนกระทั่งงานทุกงานถูกกำหนดลงสตริงคำตอบของลำดับชิ้นงานจนหมด ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าสิทธิในการเลือกชิ้นงานทั้ง 7 สตริงคำตอบ

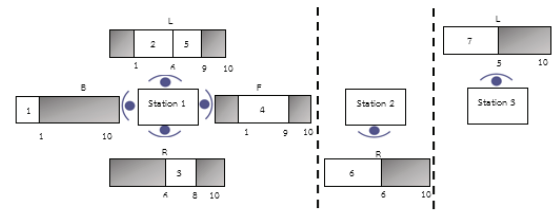
No.	String Priority						
1	2	3	7	6	5	4	1
2	5	7	6	1	4	3	2
3	3	6	7	5	4	2	1
4	2	1	3	5	7	4	6
5	7	5	2	6	3	4	1
6	7	5	4	3	2	1	6
7	4	7	1	3	5	2	6

จากลำดับชิ้นงานที่ 1 จะทำการจัดลงสถานีงาน เพื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีรอบเวลาในการทำงาน (Cycle Time) เท่ากับ 10 ซึ่งการจัดสรรงานลงในสถานีงานนั้นจะต้องพิจารณาด้านที่งานสามารถทำได้ โดยถ้าด้านของงานนั้นเป็น L จะจัดงานลงสถานีงานทางด้านซ้าย ถ้าด้านของงานนั้นเป็น R จะจัดลงสถานีงานทางด้านขวา ถ้าด้านของงานนั้นเป็น B จะจัดงานลงสถานีงานทางด้านหลัง ถ้าด้านของงานนั้นเป็น F จะจัดลงสถานีงานทางด้านหน้า และถ้าเป็น E นั้นคืองานนั้นสามารถทำได้ทั้งสองด้านได้ ดังรูปที่ 5 ทำจนครบตามจำนวน Popsizes ที่กำหนดไว้เพื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด ดังตารางที่ 4

ขั้นตอนที่ 3 การค้นหาเฉพาะที่ก่อนทำการคัดเลือกเป็นกระบวนการปรับปรุงประชากรคำตอบเบื้องต้นให้ดียิ่งขึ้นก่อนเข้าสู่กระบวนการต่าง ๆ โดยให้อำนาจสตริงคำตอบที่จะถูกนำมาคัดเลือก ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่ (กำหนดเท่ากับ 0.8) ดังนั้นสตริงคำตอบที่ถูกทำการค้นหาเฉพาะที่ทั้งหมด $0.8 \times 7 = 5$ ตัวจากการสุ่มเลือก ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 3 สตริงคำตอบของการเลือกลำดับชิ้นงานที่ 1

No.	Task (String Priority)	Selected	Side
1	1(2)	1	B
2	2(3), 4(6)	4	F
3	2(3), 6(4)	6	R
4	2(3)	2	L
5	3(7), 5(5)	3	R
6	5(5)	5	L
7	7(1)	7	L



รูปที่ 5 การจัดสายการประกอบลำดับชิ้นงานที่ 1

ตารางที่ 4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรง

No.	N_w	N_s	MIWR	B_p	Fitness
1	6	3	5.0000	0.0587	3
2	5	3	4.1667	0.1188	1
3	7	4	6.0000	0.0258	4
4	6	3	5.1429	0.0267	3
5	7	4	6.0000	0.0258	4
6	6	3	5.1429	0.0347	3
7	5	4	4.2857	0.0438	2

ตารางที่ 5 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที่ก่อนทำการคัดเลือก

No.	String Priority						
1	2	3	7	6	5	4	1
2	5	7	6	1	4	3	2
3	3	6	7	5	4	2	1
4	2	1	3	5	7	4	6
7	4	7	1	3	5	2	6

นำสตริงคำตอบที่ 1 ที่ถูกคัดเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที่ด้วยวิธี Pairwise Interchange (PI) [10] โดยทำการสุ่มตำแหน่งสองตำแหน่งเพื่อทำการสลับเปลี่ยนตำแหน่ง ดังรูปที่ 6 ทำซ้ำจนครบตามจำนวนสตริงคำตอบ

ที่เลือกมา จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อทำการคัดเลือก ดังตารางที่ 6

ก่อนทำ	2	3	7	6	5	4	1
หลังทำ	2	5	7	6	3	4	1

รูปที่ 6 การค้นหาเฉพาะที่ก่อนทำการคัดเลือกด้วยวิธี PI ของสตริงคำตอบที่ 1

ตารางที่ 6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที่

No.	B vs A	N _w	N _s	MIWR	B _b
1	Before	6	3	5.0000	0.0587
	After	6	3	5.0000	0.0587
2	Before	5	3	4.1667	0.1188
	After	7	4	6.0000	0.0258
3	Before	7	4	6.0000	0.0258
	After	7	4	6.0000	0.0258
4	Before	6	3	5.1429	0.0267
	After	6	3	5.1429	0.0267
7	Before	5	4	4.2857	0.0438
	After	5	3	4.2857	0.0438

จากตารางที่ 6 พบว่าหลังทำการค้นหาเฉพาะที่ อาจทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนแปลงไป โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการยอมรับโดยใช้กฎ 4 กฎ ดังตารางที่ 7 ในการยอมรับคำตอบที่ได้หลังทำการค้นหาเฉพาะที่ เมื่อคำตอบนั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบที่ 2 หลังทำการค้นหาเฉพาะที่ พบว่า ปฏิเสธกฎการยอมรับทั้ง 4 ข้อ เนื่องจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ค่า หลังจากทำการค้นหาเฉพาะที่ไม่ได้ดีขึ้นจากเดิม และเมื่อพิจารณาสตริงคำตอบที่ 1, 3, 4 และ 7 พบว่า ยอมรับกฎข้อที่ 4 ข้อ เนื่องจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ค่า หลังจากทำการค้นหาเฉพาะที่ให้ค่าคงเดิม จากนั้นคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการเก็บค่าที่ดีให้ครบตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 8

ขั้นตอนที่ 4 สร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม โดยให้ค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นเท่ากันดังสมการที่ 9 จากนั้น

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมแบบ COIN และ ตารางวัตถุประสงค์ย่อย เพื่อนำมาสร้างเป็นสตริงคำตอบในรอบถัดไป กำหนดให้ k คือค่าพารามิเตอร์ในการให้รางวัล/ลงโทษ ดังสมการที่ 10 และ 11 ตามลำดับ และ n คือจำนวนชั้นงานทั้งหมด

ตารางที่ 7 หลักการยอมรับ

กฎ	เงื่อนไข
กฎที่ 1	$(accept(S, S')) = f_1(S') - f_1(S) < 0$
กฎที่ 2	$(accept(S, S')) = f_2(S') - f_2(S) < 0$
กฎที่ 3	$(accept(S, S')) = f_1(S') - f_1(S) \leq 0$ และ $f_2(S') - f_2(S) < 0$ หรือ $(accept(S, S')) = f_1(S') - f_1(S) < 0$ และ $f_2(S') - f_2(S) \leq 0$
กฎที่ 4	$(accept(S, S')) = w_1(f_1(S') - f_1(S)) + (1 - w_1)(f_2(S') - f_2(S)) \leq 0$

ตารางที่ 8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลังผ่านกระบวนการค้นหาเฉพาะที่

No.	N _w	N _s	MIWR	B _b	Fitness
1	5	3	4.1667	0.1188	1
2	5	4	4.2857	0.0438	2
3	6	3	5.1429	0.0267	3
4	5	3	4.2857	0.0438	1
5	6	3	5.0000	0.0587	3
6	6	3	5.1429	0.0267	3
7	6	3	5.1429	0.0347	4

$$\frac{1}{n-1} \tag{9}$$

$$x = \frac{k}{n-1} \tag{10}$$

$$x = \frac{k}{(n-1)^2} \tag{11}$$

ตารางที่ 9 ค่าสิทธิในการเลือกชิ้นงานของสตริงคำตอบ หลังผ่านกระบวนการค้นหาเฉพาะที่

No.	String Priority						
1	5	7	6	1	4	3	2
2	4	7	1	3	5	2	6
3	6	1	3	5	7	4	2
4	4	7	5	3	1	2	6
5	1	3	7	6	5	4	2
6	2	1	3	5	7	4	6
7	7	5	4	3	2	1	6

(1) การปรับปรุงจากตารางแรกคือ ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วม COIN โดยทำการพิจารณาค่า Fitness จากตารางที่ 8 จะพบว่าสตริงคำตอบที่ดีหรือมีค่า Fitness น้อยที่สุดอยู่ 2 สตริงคำตอบ จึงทำการให้รางวัลหรือทำการเพิ่มโอกาสค่าความน่าจะเป็น ในทางตรงกันข้ามพบว่าไม่มีสตริงคำตอบที่ไม่ดีหรือค่า Fitness มากที่สุดอยู่ 1 สตริงคำตอบ จึงทำการลงโทษหรือทำการลดโอกาสในการสุ่มรอบถัดไป ทำการปรับปรุงไปที่ละสตริงคำตอบ โดยจะทำการเริ่มที่กรณีสตริงคำตอบที่ดี ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม ซึ่งการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่ง คือคู่ลำดับ (5, 7) ในตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = (0.1)/(7-1) = 0.01667$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (5, 7)) ภายในแถวเดียวกันคือ (5, 1), (5, 2)... (5, 7) โดยลดค่าความน่าจะเป็น $x = (0.1)/(7-1)^2 = 0.00278$ จนครบและกรณีสตริงคำตอบที่ไม่ดีจะทำการปรับปรุงไปที่ละสตริงคำตอบเช่นกัน โดยเริ่มที่สตริงคำตอบที่ 7 โดยลดค่าความน่าจะเป็น เท่ากับ $x = (0.1)/(7-1) = 0.01667$ และ

เพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (7, 5)) ในแถวเดียวกันคือ (7, 1), (7, 2)... (7, 7) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็น $x = (0.1)/(7-1)^2 = 0.00278$ โดยค่าความน่าจะเป็นในการปรับปรุงนั้นต่อจากการปรับปรุงสตริงคำตอบที่ดีที่ผ่านมาก่อนหน้า ซึ่งทำการพิจารณาแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบสตริงคำตอบที่ไม่ดี ดังตารางที่ 10 (2) การปรับปรุงตารางที่สอง คือ ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมวัตถุประสงค์ความไม่เกี่ยวเนื่องกันของงานในสถานีน้อยที่สุด กรณีของสตริงคำตอบที่ดีคือค่าวัตถุประสงค์น้อยที่สุดคือ สตริงคำตอบที่ 1 และกรณีของสตริงคำตอบที่ไม่ดีคือค่าวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดคือสตริงคำตอบที่ 3, 6 และ 7 ดังตารางที่ 11 และสุดท้าย (3) การปรับปรุงตารางที่สาม คือ ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมวัตถุประสงค์ความแตกต่างของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีน้อยที่สุด พิจารณาเหมือนดังการปรับปรุงตารางที่สอง ดังตารางที่ 12

ขั้นตอนที่ 5 การค้นหาเฉพาะที่หลังผ่านกระบวนการทาง COIN-E เป็นกระบวนการปรับปรุงประชากรคำตอบเหมือนดังขั้นตอนที่ 3 อันเนื่องมาจากการปรับปรุงคำตอบภายหลังผ่านกระบวนการทาง COIN-E อาจทำให้มีการสูญเสียคำตอบที่ดี หรือยังไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีได้

ขั้นตอนที่ 6 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการทำงาน โดยจะนำสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้ามารวมกับรอบปัจจุบัน แล้วทำการเรียงลำดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness เท่ากับ 1 แล้วทำการพิจารณาเช่นนี้จนครบตามจำนวนการทดลองที่กำหนดไว้

ตารางที่ 10 เมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมแบบ COIN หลังจากการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1806	0.1639	0.1806	0.1639	0.1473	0.1639
2	0.1500	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1834	0.1667
3	0.1806	0.1639	0	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639
4	0.1639	0.1639	0.1639	0	0.1639	0.1639	0.1806
5	0.1639	0.1639	0.1806	0.1473	0	0.1639	0.1806
6	0.1806	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0	0.1639
7	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0.1806	0

ตารางที่ 11 เมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมที่ 2 หลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1723	0.1389	0.1889	0.1723	0.1556	0.1723
2	0.1389	0	0.1723	0.1723	0.1723	0.1723	0.1723
3	0.1723	0.1723	0	0.1723	0.1389	0.1723	0.1723
4	0.1723	0.1556	0.1723	0	0.1723	0.1556	0.1723
5	0.1723	0.1723	0.1723	0.1556	0	0.1723	0.1556
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667
7	0.1723	0.1723	0.1723	0.1389	0.1556	0.1889	0

ตารางที่ 12 เมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมที่ 3 หลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1639	0.1973	0.1473	0.1639	0.1639	0.1639
2	0.1806	0	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639
3	0.1639	0.1473	0	0.1639	0.1973	0.1639	0.1639
4	0.1639	0.1806	0.1473	0	0.1639	0.1806	0.1639
5	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0	0.1639	0.1806
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667
7	0.1639	0.1639	0.1639	0.1973	0.1639	0.1473	0

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1 การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทดลองใช้ COIN-E ในการแก้ปัญหาทั้งสิ้น 12 ปัญหาย่อย [8] ดังตารางที่ 14 ด้วยการเปรียบเทียบกับ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการ จัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ [9] ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่ง ที่นิยมในการแก้ปัญหา โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังตาราง 13

ตารางที่ 13 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

COIN-E	
Population size	100
Reward/Punish	0.1
Local Search method	PI
% การค้นหาเฉพาะที่ :	0.8
ความถี่ในการค้นหา :	10
NSGA-II	
Population size	100
Crossover method	WMC
Mutation method	Recipe exchange
% Crossover	0.7
% Mutation	0.3

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมใด ดีกว่ากันจึงต้องอาศัยตัวชี้วัดตามรูปแบบของปัญหาหลาย วัตถุประสงค์ทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด ได้แก่ (1) การลู่เข้าสู่กลุ่ม คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (Convergence to the Pareto-optimal Set) ใช้ประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่ อัลกอริทึมหามาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด (2) การกระจาย ตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread of Solution) ใช้บ่งชี้ว่า กลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด (3) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-dominated Solution) แบ่งออกเป็น สองค่าคือ (3.1) self-comparison (RNDS1) และ (3.2) Pareto- optimum comparison (RNDS2) ใช้แสดงสัดส่วน จำนวนคำตอบที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดเทียบกับจำนวน คำตอบที่แท้จริง และจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (4) จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (The number of non-dominated solution) แสดงถึงจำนวนคำตอบที่ อัลกอริทึมสามารถหาได้ และ (5) เวลาที่ใช้ในการ ค้นหาคำตอบ (Computer Time)

5.3 ผลการทดลอง

การทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างเป็นการทดลองผ่านโปรแกรม Visual Studio 2013 ภาษา C# ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel® Core™ i7-3612QM CPU @ 2.10 GHz RAM 8.00 GB โดยผลจากการทดลองที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปค่าชี้วัดต่าง ๆ ดังตารางที่ 14 ผลประเมินค่าชี้วัดในปัญหาขนาดเล็ก P1 และ P2 พบว่า COIN-E เหนือกว่า NSGA-II แต่ค่าการกระจายตัวมีค่าเท่ากันในปัญหา P2 เมื่อรอบเวลาการผลิตที่ 60 อันเนื่องมาจากจำนวนคำตอบที่หามาได้มีจำนวนเท่ากัน ต่อมา

ปัญหาขนาดกลาง P3 พบว่า COIN-E เหนือกว่า NSGA-II เกือบทุกรอบเวลาการผลิตย่อย แต่ค่าการกระจายตัวในรอบเวลาการผลิตที่ 30 และ 36 และจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมสามารถหาได้ในรอบเวลาการผลิตที่ 42 ยังดี้อยกว่า NSGA-II และสุดท้ายปัญหาขนาดใหญ่ P4 การกระจายตัวในรอบเวลาการผลิตที่ 600 และ 700 ยังดี้อยกว่า NSGA-II สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ COIN-E ใช้เวลามากกว่า NSGA-II เพราะ COIN-E มีกระบวนการทางด้านการค้นหาเฉพาะที่ขึ้นมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่มากยิ่งขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 14 ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem		P1			P2			P3			P4		
Tasks		25			35			75			148		
CCT		15	18	22	50	60	70	30	36	42	500	600	700
Nw	COIN-E	11	10	8	14	12	11	63	60	54	15	13	11
	NSGA-II	11	10	8	14	12	11	63	60	54	15	13	11
Ns	COIN-E	6	5	4	6	4	4	17	16	15	4	4	3
	NSGA-II	6	5	4	6	4	4	17	16	15	4	4	3
Convergence	COIN-E	0	0	0	0.1403	0.2761	0.0715	0	0	0.1233	0.0234	0.1039	0.2084
	NSGA-II	0	0.0712	0.1842	0.3739	0.3155	0.5489	0.4233	0.2660	0.2124	0.1738	0.3187	0.2430
Spread	COIN-E	n/a**	0.4513	0.5515	0.5555	0.6667	0.5548	0.6667	0.5043	0.5639	0.5488	0.6848	0.6363
	NSGA-II	n/a**	0.5688	0.6236	0.6667	0.6667	0.6667	0.5749	0.5035	0.7298	0.7846	0.6315	0.5005
RNDS1	COIN-E	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6667	1	0.6667	1
	NSGA-II	1	0.4	1	0.5	0.5	0.5	0.3333	0.3333	0.25	1	1	0.5
RNDS2	COIN-E	1	1	1	0.75	0.6667	0.75	1	1	0.6667	0.8	0.5714	0.6667
	NSGA-II	1	0.4	0.6	0.25	0.3333	0.25	0.5	0.3333	0.3333	0.3	0.4286	0.3333
NNDS	COIN-E	1	5	5	3	2	3	2	3	3	8	6	4
	NSGA-II	1	5	3	2	2	2	3	3	4	3	3	4
CPU Time	COIN-E	60.824	60.60	56.260	73.661	70.465	66.736	200.444	198.291	200.397	348.549	337.849	331.344
	NSGA-II	53.420	53.383	48.594	65.551	56.160	53.508	182.551	155.173	155.766	189.103	181.631	174.127

n/a**: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาค่ากระจายตัวได้

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลบนสายการประกอบแบบหลายคนงานที่สายการประกอบแต่ละเส้นเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งเป็นระบบการผลิตที่ตอบสนองลูกค้าได้อย่างรวดเร็วตามแนวคิดการผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ที่จะทำให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อม ๆ กัน ได้แก่ จำนวนพนักงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความสมดุลของ

ภาระงานระหว่างสถานีงานสูงสุด และความสัมพันธ์ของงานสูงสุด พร้อมทั้งได้ทำการนำเสนออัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ผลจากการทดลองในการแก้ปัญหาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรองง่า ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยม พบว่า COIN-E มีสมรรถนะที่เหนือกว่า NSGA-II อย่างเห็นได้ชัดทั้งในด้านการคู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

เชิงพาเรโต การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ และอัตราส่วน เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาการจัดสมดุล
ของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ จึงสามารถสรุปได้ว่า COIN-E ประเภทนี้ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Baykasoglu, A. and Dereli, T. Two-sided assembly line balancing using an ant-colony-based heuristic. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008; 36: 582-588.
- [2] Fonseca, C. and Fleming, P. Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization Formulation, Discussion and Generalization in Genetic Algorithms. *The Fifth International Conference*, 1993; 416-423.
- [3] Kelleg, T. and Toklu, B. An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations. *Computers & Operations Research*, 2012; 39: 3344-3360.
- [4] Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H. and Tokly, B. A Tabu search algorithm for the parallel assembly line balancing problem. *G.U. Journal of Science*, 2009; 22(4): 313-323.
- [5] Kim, Y. K., Kim, Y. and Kim, Y. J. Two-sided assembly line balancing using a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control*, 2000; 11(1): 44-53.
- [6] Fattahi, P., Roshani, A. and A. Roshani A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011; 53: 363-378.
- [7] Olanviwatchai, S. and Chutima, P. Multi-objective Car Sequencing Problem on Mixed-model Two-sided Assembly Lines. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2014; 24: 87-102.
- [8] Tiacci, L. Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. *International Journal of Production Economics*, 2015; 159: 319-333.
- [9] Ak, R., Fu Li, Y., Vi, V. And Zi, E. Genetic algorithm and neural network tech for predicting wind power. *The International Journal of Chemical Engineering Transaction*. 2013; 33: 925-930.
- [10] Chutima, P. and Chimklai, P. Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimization with negative knowledge. *Journal of Computers and Industrial Engineering*, 2012, 62: 39-55.