Engng.J.CMU.(2018) 25 (2), 34-43

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน

Multi-Objective Sequencing Problem on Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines

การันต์ กันภัย* และ ปารเมศ ชุติมา

Karan Kanpai* and Parames Chutima

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

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

*E-mail: karan.kanpai@gmail.com, Tel: 669 5906 6222

บทคัดย่อ

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานจัดเป็นปัญหาแบบเอ็นพียาก (non-deterministic polynomial time hard; NP-Hard) ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) บทความนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Extended: COIN-E) เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมี 3 วัตถุประสงค์ที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด ผลจากการทดลองแก้ปัญหาที่มีลักษณะต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า COIN-E มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเจนเนติกอัลกอริทึม (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms: NSGA-II) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่เป็นที่นิยม ทั้งในดัชนีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต ดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง และดัชนีเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ

ABSTRACT

Multi-objective sequencing problem on mixed-model multi-manned assembly lines is known to be NP-hard resulting in being nearly impossible to obtain an optimal solution for practical problems. This paper presents a method called Combinatorial Optimization with Coincidence Expand Algorithm (COIN-E) for the sequencing problem. Three objectives are simultaneously considered; minimum production rates variance, minimum utility work, and minimum setup times. The results from the experiments clearly show that COIN-E has better performances than Non-dominated Sorting Genetic Algorithms (NSGA-II), which is another well-known algorithm, in terms of convergence to the Pareto-optimal set, spread of solutions, ratio of non-dominated solution, and computation time to solution.

Received 3 May 2016
Accepted 25 July 2016

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการแข่งขันด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ที่สูง เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคที่มีความหลากหลาย และมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วต่อตัวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยว (Single-Model Assembly Lines) ไม่สามารถตอบสนองได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้มีการพัฒนาจนเกิดสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Lines) ขึ้นมา ซึ่งสายการประกอบลักษณะนี้เป็นสายการประกอบที่มีการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ในแต่ละรุ่น (Model) ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้นับว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง หากจะทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมมีข้อดีมากขึ้นไปอีก ด้วยการนำเอาแนวคิดของสายการประกอบแบบหลายคนงานมาใช้ร่วมกัน หรือเรียกว่าเป็น “สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน” (Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines)

จากการนำสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานมาประยุกต์ใช้ จะพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นคือ การจัดลำดับการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพตามที่โรงงานต้องการ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ใช้กันทั่วไปนั้นมีหลายอย่าง เช่น ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด อัตราการผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ต้นทุน/เวลาที่ใช้ในการปรับเครื่องจักรน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของปริมาณงาน และความเสี่ยงในการหยุดสายการประกอบน้อยที่สุด ฯลฯ [1] การที่จะพิจารณาวัตถุประสงค์หลาย ๆ วัตถุประสงค์พร้อมกันนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานเป็นปัญหาการหาคำตอบจากการวัดแบบเอ็นพียาก โดยการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาประเภทนี้เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น และให้คำตอบที่ค่อนข้างดีเป็นที่ยอมรับได้และบ่อยครั้งที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนั้นยังใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานมากอีกด้วย [2] เช่น การประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึม (GA) [3] ซึ่งมีแนวคิดมาจากการถ่ายทอดพันธุกรรมของมนุษย์ แต่มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่ระดับความสำคัญเท่ากันได้ การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (DPSO) [4] ซึ่งมีแนวคิดมาจากการศึกษาการลอกเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของฝูงนก แต่มีข้อจำกัดด้านเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมาก และการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) [5] ซึ่งมีแนวคิดมาจากพฤติกรรมการอพยพย้ายที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตระหว่างเกาะต่าง ๆ ซึ่งอัลกอริทึมนี้จะมีความเหมาะสมกับปัญหาที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น

2. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานเป็นสายการประกอบที่มีผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิด (Model) ขึ้นไปบนสายการประกอบเดียวกัน ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีพื้นฐานการประกอบ วัตถุดิบ และชิ้นส่วนที่เหมือนกัน (Common Base Product) แต่จะแตกต่างกันที่รายละเอียดปลีกย่อยในแต่ละชนิดตามความต้องการของผู้บริโภค (Customizing by the (de-)selection of optional feature) [6] ทำการผลิตโดยที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเข้าสู่สายการประกอบได้อย่างอิสระ โดยที่ไม่มีการกำหนดว่าจะต้องผลิตผลิตภัณฑ์ใดก่อน ซึ่งจะแตกต่างจากสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ที่จะต้องผลิตผลิตภัณฑ์ทีละชนิด มีลักษณะการทำงานในรูปแบบที่แต่ละสถานีงานจะประกอบไปด้วยพนักงานมากกว่า 1 คน ปฏิบัติงานในช่วงเวลาเดียวกันบนผลิตภัณฑ์เดียวกัน พนักงานแต่ละคนปฏิบัติขั้นงานที่แตกต่างกันออกไป และพนักงานแต่ละคนจะไม่มีการก้าวก่ายการทำงานของกันและกันบนสายการประกอบนั้น ๆ ซึ่งการออกแบบสถานีงานในสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานสามารถจัดได้อย่างหลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ เช่น

ความยาวของสายการประกอบ ประสิทธิภาพของสายการประกอบ และความไหลลื่นของงานในสายการประกอบ [7] การกำหนดจำนวนพนักงานในแต่ละสถานีงานถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าโดยผู้ออกแบบระบบซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของพนักงานแต่ละตำแหน่ง ขนาดของผลิตภัณฑ์ เครื่องมือที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ การออกแบบสถานีงาน และอื่น ๆ สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานมีข้อแตกต่างจากสายการประกอบแบบขนาน คือพนักงานปฏิบัติงานงานเดียวกัน แต่คนละผลิตภัณฑ์ ซึ่งสายการประกอบประเภทนี้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ และต้องการผลิตในปริมาณสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น [8]

3. การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยค่าที่สำคัญที่จะต้องมีการกำหนด คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับกลุ่มคำตอบที่ได้โดยใช้การจัดลำดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) คำตอบที่อยู่ใน Pareto Optimal Set จะเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่กลุ่มคำตอบที่อยู่ในนี้จะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มคำตอบใดเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีกว่ากันหรือที่เรียกว่า Non-dominated Solution จากกลุ่มของคำตอบอื่น [9] ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาไปพร้อมกันทั้งหมด ดังสมการต่อไปนี้

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

โดย $\bar{x}$ คือเวกเตอร์ของตัวแปรในการตัดสินใจ $f_i(\bar{x})$ คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละเรื่อง ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ y แล้ว จะได้ว่า $f_i(x) \le f_i(y)$ สำหรับทุกค่าของ $i \in \{1,2,..., k\}$ และ $f_i(x) < f_i(y)$ อย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1,2,..., k\}$ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ [10] ดังต่อไปนี้

3.1 ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Production Rates Variance) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ซึ่งเป็นผลรวมของการคำนวณความผันแปรของการผลิตในทุกขั้นงานในสายการประกอบ ซึ่งมีลำดับผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นงาน ยิ่งความผันแปรของการผลิตมีค่าน้อย จะส่งผลให้สายการประกอบนั้นยิ่งมีประสิทธิภาพที่มากขึ้น เนื่องจากสามารถลดอัตราการเปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ ลดความสับสนในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของคนงานซึ่งเกิดจากผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) โดยมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} \left[x_{i,m} - i\frac{d_m}{I} \right]^2 \qquad (2)$$

เมื่อ $x_{i,m}$ คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่ถูกผลิตในลำดับการผลิต i เมื่อ $i = 1,2,..., I$

I คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของทุกผลิตภัณฑ์หรือความต้องการในการผลิตทั้งหมดในทุกผลิตภัณฑ์

d_m คือ ความต้องการของผลิตภัณฑ์ m เมื่อ $m = 1,2,..., M$

3.2 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณงานของทุกผลิตภัณฑ์ที่ทำไม่เสร็จในรอบเวลาการทำงานในแต่ละขั้นงานบนสายการประกอบ ดังสมการที่ (2) ยิ่งปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตมีค่าน้อย จะทำให้ประหยัดเวลาที่ใช้ ลดต้นทุนในด้าน Utility Worker สายการประกอบจะมีความไหลลื่นและมีประสิทธิภาพที่มากขึ้น โดยมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M}\left(\sum_{i=1}^{I} U_{i,n_m} + Z_{i,n_m} / v_c\right) \quad (3)$$

$$U_{i,n_m} = \begin{cases} \max\left[0, \dfrac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} x_{i,m}\left(t_{4n_m-3,m} + Y_{4n_m-3,m}\right) - L_{n_m}}{v_c}\right], \max\left[0, \dfrac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} x_{i,m}\left(t_{4n_m-2,m} + Y_{4n_m-2,m}\right) - L_{n_m}}{v_c}\right], \\ \max\left[0, \dfrac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} x_{i,m}\left(t_{4n_m-1,m} + Y_{4n_m-1,m}\right) - L_{n_m}}{v_c}\right], \max\left[0, \dfrac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} x_{i,m}\left(t_{4n_m,m} + Y_{4n_m,m}\right) - L_{n_m}}{v_c}\right] \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_{(i+1),n_m} = \max\begin{cases} \max\left[0, \min\left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{i,m}\left(t_{4n_m-3,m} + Y_{4n_m-3,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{i,m}\left(t_{4n_m-2,m} + Y_{4n_m-2,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{i,m}\left(t_{4n_m-1,m} + Y_{4n_m-1,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{i,m}\left(t_{4n_m,m} + Y_{4n_m,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right] \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในลำดับการผลิตที่ i ในคู่สถานีงาน n_m

$Z_{(i+1),n_m}$ คือ เวลาเริ่มงานในลำดับการผลิตที่ i ในคู่สถานีงาน n_m

v_c คือ ความเร็วของสายการผลิต

$t_{4n_m-3,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านหลังในคู่สถานีงาน n_m

$t_{4n_m-2,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านหน้าในคู่สถานีงาน n_m

$t_{4n_m-1,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านซ้ายในคู่สถานีงาน n_m

$t_{4n_m,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านขวาในคู่สถานีงาน n_m

$Y_{4n_m-3,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านหลังในคู่สถานีงาน n_m

$Y_{4n_m-2,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านหน้าในคู่สถานีงาน n_m

$Y_{4n_m-1,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านซ้ายในคู่สถานีงาน n_m

$Y_{4n_m,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านขวาในคู่สถานีงาน n_m

γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการผลิต (Launch Interval)

L_{n_m} คือ ความยาวของคู่สถานีงาน n_m

3.3 เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด (Minimizing Setup Time) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 ซึ่งเป็นผลรวมของเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตของทุกขั้นงานในสายการประกอบ โดยเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของแต่ละรุ่นผลิตภัณฑ์จะคำนวณมาจากวิธีการสุ่ม โดยการกำหนดช่วงของเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.05–0.1 ของเวลาเฉลี่ยของรุ่นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดในขั้นงานนั้น ๆ โดยมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} s_i t_{k,m} \qquad (6)$$

เมื่อ s_i คือ สถานะการปรับตั้งเครื่องจักร เมื่อ $s_i = 1$ หมายถึงมีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น และ $s_i = 0$ หมายถึงไม่มีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น

$t_{k,m}$ คือ เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ m ที่ขั้นงาน k

4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยายถูกคิดค้นโดย Olanviwatchai และ Chutima [11] ซึ่งอาศัยแนวคิดวิธีการบรรจวบแบบเดิม คือ การให้รางวัลแก่สตริงคำตอบที่ให้ผลลัพธ์ที่ดี และทำการลงโทษแก่สตริงคำตอบที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดี เพื่อเป็นตัวกำหนดทิศทางของคำตอบสุดท้าย โดยมีการสร้างตารางความน่าจะเป็นขึ้นมาแล้วสุ่มเลือกมาสร้างประชากรเริ่มต้น โดยมีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นตลอดเวลาในแต่ละรอบ โดยปรับปรุงตามคำตอบที่ดีและคำตอบที่ไม่ดี ถ้าเกิดเป็นคำตอบที่ดีค่าความน่าจะเป็นก็จะมากขึ้นเพื่อใช้ในการสุ่มรอบถัดไป แต่ถ้าคำตอบไม่ดี ค่าความน่าจะเป็นก็จะถูกลดลงเพื่อจะได้สุ่มเจอน้อยลงในรอบถัดไป แต่ใน COIN-E จะมีตารางความน่าจะเป็นร่วมเพิ่มมาอีก 3 ตารางที่ได้มาจากการหาคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์มาสร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม โดยนำคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์ที่ดีและไม่ดีมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เพื่อจะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมและคำตอบที่ได้ก็จะมีการกระจายตัวของคำตอบมากกว่าวิธีการ COIN แบบเดิม

4.1 ขั้นตอนของอัลกอริทึม COIN-E

ขั้นที่ 1 สร้างประชากรเบื้องต้นโดยใช้ตัวดำเนินการคือตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม ด้วยวิธีการสุ่มสร้างค่าความน่าจะเป็นลงในตารางความน่าจะเป็นร่วม ดังตารางที่ 1 โดยที่ค่าความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{n-1}$ เมื่อ n คือ จำนวนความยาวทั้งหมดของสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ (MPS) ดังนั้นความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นของตัวอย่างนี้คือ $\frac{1}{7-1} = 0.1667$

ขั้นที่ 2 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ของแต่ละสตริง ดังตารางที่ 2

ขั้นที่ 3 ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมทั้งหมด 4 ตาราง ได้แก่ ตารางความน่าจะเป็นร่วมของ COIN ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เพื่อนำมาสร้างผลสตริงในรอบการทำงานต่อไป โดยกำหนดให้ k คือค่าพารามิเตอร์ในการให้รางวัล/ลงโทษ ดังสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ (กำหนดให้ $k = 0.1$)

$$x = \frac{k}{n-1} \qquad (7)$$

$$x = \frac{k}{(n-1)^2} \qquad (8)$$

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าของ Fitness, $f_1(x)$, $f_2(x)$ และ $f_3(x)$ มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือสตริงที่ 2 จะให้ผลลัพธ์ของทั้ง 4 ค่าข้างต้นดีที่สุด จึงทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัล

โดยเริ่มที่คู่อันดับ (6, 1) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (6, 1)) ภายในแถวเดียวกันคือ (6, 2), (6, 3), …, (6, 7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (1, 7) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบสตริงคำตอบที่ดีจนได้ตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ได้การปรับปรุงเสร็จสิ้น

ในส่วนของสตริงที่ 3 จะให้ผลลัพธ์ของทั้ง 4 ค่าข้างต้นแย่ที่สุด จึงทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษ โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังที่กล่าวไปข้างต้น ทำให้การปรับปรุงความน่าจะเป็นร่วมของทั้ง 4 ตารางที่กล่าวมานั้นมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันดังตารางที่ 3

ขั้นที่ 4 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด โดยการนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับรอบปัจจุบัน แล้วมาเรียงลำดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บค่าสตริงที่ให้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบนั้น ๆ ดังตารางที่ 4

ขั้นที่ 5 กลับไปทำที่ขั้นที่ 2 เพิ่มเริ่มกระบวนการในรอบถัดไป และวนซ้ำจนครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้

ตารางที่ 1 ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
4	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000

ตารางที่ 2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของแต่ละสตริง

String	Model Sequence	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness
1	3 2 5 7 4 6 1	92.4040	28.1830	10.8726	2
2	6 1 7 4 5 3 2	83.8135	27.8278	10.8726	1
3	3 7 2 4 1 6 5	97.0421	28.5336	12.9044	3

ตารางที่ 3 ความน่าจะเป็นร่วมหลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1500	0.1834
2	0.1695	0.0000	0.1695	0.1528	0.1695	0.1695	0.1695
3	0.1667	0.1834	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1500
4	0.1500	0.1667	0.1667	0.0000	0.1834	0.1667	0.1667
5	0.1639	0.1639	0.1806	0.1639	0.0000	0.1639	0.1639
6	0.1834	0.1667	0.1667	0.1667	0.1500	0.0000	0.1667
7	0.1667	0.1500	0.1667	0.1834	0.1667	0.1667	0.0000

ตารางที่ 4 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

String	Model Sequence	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness
รอบก่อนหน้า	6 1 7 4 5 3 2	83.8135	27.8278	10.8726	2
รอบปัจจุบัน	4 1 7 3 2 5 6	60.1944	27.8278	10.8726	1
	4 2 7 3 1 6 5	54.2897	27.4571	12.9044	1
	4 5 6 7 1 3 2	132.6897	27.1921	8.5514	1

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองแก้ตัวอย่างปัญหาผ่านโปรแกรม Visual Studio 2013 ภาษา C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel® Core™ i7-3612QM CPU @ 2.10GHz RAM 8.00GB 64 bit-Operation system โดยใช้อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) ในการแก้ปัญหา

5.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการแก้ปัญหาตัวอย่างทั้งสิ้น 4 ปัญหา ได้แก่ปัญหาขนาด 25, 35, 75 และ 128 ขั้นงาน [12] โดยที่แต่ละปัญหาประกอบไปด้วยสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ 2 ขนาด ซึ่งเป็นตัวแทนของความต้องการผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กและใหญ่ ได้แก่ 10 (1:2:3:4) และ 115 (25:35:40:15) ตามลำดับ ซึ่งทำการทดลองบนสายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลแล้วที่แตกต่างกัน 2 สายการประกอบ โดยแต่ละปัญหาจะทำการทดลองซ้ำปัญหาละ 2 รอบการทดลอง ทำให้การทดลองย่อยในงานวิจัยนี้มีขนาด 32 การทดลองต่อ 1 อัลกอริทึม

ตารางที่ 5 การออกแบบการทดลอง

No. of Task	MPS	Configuration	Replicate	Problem (P.)
25	10 (1:2:3:4)	1	1	1
			2	2
		2	1	3
			2	4
	115 (25:35:40:15)	1	1	5
			2	6
		2	1	7
			2	8
35	10 (1:2:3:4)	1	1	9
			2	10
		2	1	11
			2	12
35	115 (25:35:40:15)	1	1	13
			2	14
		2	1	15
			2	16

ตารางที่ 5 (ต่อ) การออกแบบการทดลอง

No. of Task	MPS	Configuration	Replicate	Problem (P.)
75	10 (1:2:3:4)	1	1	17
			2	18
		2	1	19
			2	20
	115 (25:35:40:15)	1	1	21
			2	22
		2	1	23
			2	24
128	10 (1:2:3:4)	1	1	25
			2	26
		2	1	27
			2	28
	115 (25:35:40:15)	1	1	29
			2	30
		2	1	31
			2	32

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบว่าผลลัพธ์ของอัลกอริทึมใดดีกว่ากันต้องอาศัยตัวชี้วัดตามรูปแบบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ทั้งสิ้น 5 ตัวชี้วัด ได้แก่ ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (Convergence to the Pareto-optimal Set) ใช้ประเมินว่า กลุ่มผลเฉลยที่อัลกอริทึมหามาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด ยิ่งตัวชี้วัดนี้มีค่าน้อย หมายถึงกลุ่มผลเฉลยที่อัลกอริทึมหามาได้ยิ่งมีความใกล้เคียงกับกลุ่มผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ตัวชี้วัดด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread of Solution) ใช้บ่งชี้ว่ากลุ่มผลเฉลยมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด ยิ่งตัวชี้วัดนี้มีค่าน้อย หมายถึง กลุ่มผลเฉลยที่หามาได้มีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอ ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) ใช้แสดงว่าผลเฉลยที่หามาได้ทั้งหมดเป็นผลเฉลยที่ตรงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้ตรงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่หาได้ทั้งหมด (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) และตัวชี้วัดด้านระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ (Computer Time)

5.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง ผลการทดลองที่ได้อยู่ในรูปตัวชี้วัดต่าง ๆ ดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าในภาพรวมนั้น ปัญหาที่มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก COIN-E จะมีผลลัพธ์ที่ดีกว่า NSGA-II อย่างชัดเจนในด้านของ Convergence ที่ได้ผลลัพธ์เท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาในทุกตัวชี้วัดในทุกปัญหาตัวอย่างจะสามารถเปรียบเทียบผลได้ดังต่อไปนี้

ตัวชี้วัดด้าน Convergence ผลลัพธ์ของ COIN-E ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าคิดเป็นร้อยละ 56.259

ตัวชี้วัดด้าน Spread ผลลัพธ์ของ NSGA-II ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าคิดเป็นร้อยละ 62.50

ตัวชี้วัดด้าน RNDS-I ผลลัพธ์ของ COIN-E ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าคิดเป็นร้อยละ 96.87

ตัวชี้วัดด้าน RNDS-II ผลลัพธ์ของ COIN-E ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าคิดเป็นร้อยละ 84.37

ตัวชี้วัดด้าน CPU Time ผลลัพธ์ของ COIN-E ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าคิดเป็นร้อยละ 81.25

ตารางที่ 6 ผลการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง

P.	Convergence		Spread		RNDS-I		RNDS-II		CPU Time	
	COIN-E	NSGA-II	COIN-E	NSGA-II	COIN-E	NSGA-II	COIN-E	NSGA-II	COIN-E	NSGA-II
1	0.0000	0.0152	0.9291	0.7519	1.0000	0.5208	0.6957	0.6410	22.6870	34.4440
2	0.0000	0.0230	0.9291	0.8080	1.0000	0.3333	0.6957	0.3810	42.1820	36.5690
3	0.0000	0.0390	0.7904	0.6337	1.0000	0.3488	0.6418	0.3659	23.2120	31.8240
4	0.0000	0.0369	0.7640	0.6498	1.0000	0.4419	0.6418	0.4750	25.4280	29.7010
5	0.0889	0.0548	0.6733	0.6806	0.6516	0.3529	0.9730	0.7800	193.835	197.624
6	0.0666	0.0415	0.5679	0.6329	0.6278	0.3722	0.7107	0.8830	230.147	210.285
7	0.0178	0.1350	0.6622	0.6610	0.7486	0.2514	0.9424	0.8462	117.140	238.641
8	0.1497	0.0742	0.6104	0.7622	0.6103	0.3897	1.0000	0.7361	169.225	240.115
9	0.0000	0.0406	1.0133	0.8745	1.0000	0.3176	0.8095	0.4655	54.5550	58.4220
10	0.0000	0.0333	1.0133	0.7335	1.0000	0.3294	0.8095	0.5000	53.3420	49.6230
11	0.0000	0.0305	0.8497	0.7775	1.0000	0.5238	0.7241	0.7174	57.1420	62.5040
12	0.0000	0.0372	0.8497	0.7065	1.0000	0.3594	0.7356	0.5000	29.4840	45.1300
13	0.0527	0.0568	0.6993	0.8620	0.7105	0.2982	0.9759	0.4928	172.349	306.930
14	0.0789	0.0729	0.6762	0.6896	0.6535	0.3465	0.9429	0.6863	269.307	298.225
15	0.0943	0.0431	0.6370	0.6785	0.5389	0.4611	0.6139	0.8830	222.795	265.601
16	0.0964	0.0460	0.6224	0.6629	0.7287	0.2713	0.9495	0.7368	302.905	154.159
17	0.0000	0.0529	0.9192	0.7653	1.0000	0.3519	0.6667	0.4750	62.1000	126.490
18	0.0000	0.0474	0.9192	0.7217	1.0000	0.3962	0.6543	0.5676	66.7680	74.3700
19	0.0000	0.0366	0.8813	0.6220	1.0000	0.4030	0.7701	0.6585	62.6340	139.363
20	0.0000	0.0590	0.8813	0.8293	1.0000	0.3881	0.7701	0.6190	68.5770	94.4890
21	0.1818	0.1253	1.0120	0.8830	0.6327	0.3673	0.9118	0.9000	766.759	776.751
22	0.1990	0.2707	0.8400	1.0814	0.5455	0.4545	0.8108	0.9615	783.474	798.732
23	0.1700	0.0188	0.7392	0.9725	0.4483	0.5690	0.8387	0.6735	801.434	731.321
24	0.0736	0.0536	0.8666	1.0855	0.5536	0.4464	0.6200	0.7143	772.423	664.252
25	0.0000	0.0324	0.9937	0.7454	1.0000	0.2544	0.7308	0.4394	85.4380	110.449
26	0.0000	0.0367	0.9423	0.7440	1.0000	0.2807	0.7308	0.4776	108.278	112.268
27	0.0000	0.0357	0.8424	0.6177	1.0000	0.3077	0.6933	0.4848	51.5250	108.853
28	0.0000	0.0375	0.8424	0.6511	1.0000	0.2596	0.6933	0.3971	79.6010	102.618
29	0.0426	0.0415	0.6952	0.6063	0.7189	0.2811	0.7956	0.7527	460.544	527.193
30	0.0564	0.0516	0.6015	0.5970	0.6861	0.3139	0.8034	0.8866	473.577	446.200
31	0.0595	0.0476	0.5617	0.6536	0.7137	0.2862	0.8688	0.8191	505.924	559.537
32	0.0576	0.0501	0.6393	0.6458	0.7388	0.2611	0.8848	0.8085	447.209	529.854

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีความหลากหลายและมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วต่อตัวผลิตภัณฑ์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิตที่ให้ลำดับความสำคัญเท่ากันทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ ได้แก่ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด พร้อมทั้งได้ทำการนำเสนออัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ผลจากการทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่าง เมื่อนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยม พบว่าอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E) มีสมรรถนะที่เหนือกว่าเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) อย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งในด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้ตรงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่หาได้ทั้งหมด และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบที่น้อยกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยายเป็นอัลกอริทึมแบบหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาการจัดสมดุลประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

[1] Akgunduz, O. S. and Tunali, S. A review of the current applications of genetic algorithms in mixed-model assembly line sequencing. *International Journal of Production Research,* 2011; 49: 4483-4803.

[2] ปารเมศ ชุติมา. การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2008.

[3] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation,* 2002; 6: 182-197.

[4] Kennedy, J. and Eberhart, R. Particle swarm optimization in Neural Networks. *IEEE International Conference*, 27 November-1 December 1995, Australia, 1995; 4: 1942-1948.

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

[6] Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research,* 2007; 183: 674-693.

[7] Roshani, A., Roshani, A., Roshani, A., Salehi, M., and Esfandyari, A. A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Systems,* 2013; 32: 238-247.

[8] Dimitriadis, S. G. Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. *Computers & Operations Research,* 2006; 33: 2757-2774.

[9] นพพล คำภิรมย์. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[10] วันวิสา นฤมิตวงค์. การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

[11] Chutima, P. and Olanviwatchai, P. Mixed-Model U-Shaped Assembly Line Balancing Problems with Coincidence Memetic Algorithm. *Journal of Software Engineering and Applications,* 2010; 3: 347-363.

[12] 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.