วิธีฮิวริสติกสำหรับลดค่าความแปรปรวนของภาระงาน ในการจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู

อมรพงศ์ สงวนสินธุ์[*1] จักรวาล คุณะดิลก[2]
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA) ร่วมกับระบบมดแม็ก-มิน (Max-Min Ant System; MMAS) วิธีการที่นำเสนอนี้ GA ทำหน้าที่กำหนดจำนวนขั้นงานที่เหมาะสมให้กับแต่ละสถานีงาน ในขณะที่ MMAS ทำหน้าที่ปรับละเอียดลำดับขั้นงานที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของภาระงานของสายงานการประกอบมีค่าน้อยที่สุด โดยสอดคล้องกับเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อน-หลังของขั้นงาน ค่าความแปรปรวนของภาระงานถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันเป้าหมายของกระบวนการค้นหาด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม วิธีการที่นำเสนอนี้ถูกทดสอบกับปัญหา UALB จำนวน 24 ปัญหาที่ได้จากการรวบรวมของ Scholl จากผลการทดสอบพบว่า วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถลดค่าความแปรปรวนของภาระงานในทุกปัญหา เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี COMSOAL และวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่ม มีค่าค่าความแปรปรวนของภาระงานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 81.95% และ 73.16% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู, เจเนติกอัลกอริทึม, วิธีระบบมดแม็ก-มิน

* Corresponding author. Email: amonpong2010@hotmail.co.th
[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[2] อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Heuristic Method for Workload Variance Reduction In U-Shaped Assembly Line Balancing

Amonpong Sa-nguansin[*1] Jakrawarn Kunadilok[2]
Faculty of Engineering, Burapha University, Muang, Chonburi 20131

Abstract

This paper presents the U-Shaped assembly line balancing (UALB) by using the Genetic Algorithm (GA) and Max-Min Ant System (MMAS). The GA was used for assigning the number of tasks to each workstation. The MMAS method was used for fine-tuning the task sequences at each workstation according to precedence constraints in order to minimize the workload variance of the assembly line. The workload variance was set as the objective function. The proposed method was tested against 24 UALB problems collected by Scholl. The results showed that the proposed method was capable of producing better solutions for all problems compared to the COMSOAL method and the Max-Min Ant System with Random Permutation optimization (MMAS with RP). The workload variance produced from the proposed method was reduced about 81.95% and 73.16% from the solutions computed by COMSOAL method and MMAS with RP, respectively.

Keywords: U-Shaped Assembly Line Balancing, Genetic algorithm, Max-Min Ant System

* Corresponding author. Email: amonpong2010@hotmail.co.th
[1] Master of Degree in Faculty of Engineering, Burapha University
[2] Doctoral in Faculty of Engineering, Burapha University

1.บทนำ

ในปัจจุบันสายการประกอบได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ อุตสาหกรรมการผลิต เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตเสื้อผ้า และอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น ปัญหาเฉพาะของการออกแบบสายการประกอบที่มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง คือ การจัดสมดุลสายงานการประกอบ (Assembly Line Balancing Problem; ALB) ที่สนใจศึกษาการจัดกลุ่มของขั้นงาน (Task) ที่ต้องปฏิบัติในการประกอบผลิตภัณฑ์ เพื่อมอบหมายให้แต่ละสถานีงาน (Workstation) โดยพยายามให้เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานของแต่ละสถานีงานเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด [1] ปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบ (ALB) เป็นปัญหาที่ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1955 [2] ปัญหา ALB นับเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเชิงการจัด (Combinational optimization) แบบปัญหาที่ไม่สามารถรับประกันการหาค่าที่ดีที่สุดได้ (Non-Deterministic Polynomial-Time Hard: NP-Hard) ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้ปัญหา ซึ่งถ้าใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์แบบวิธีแบบแม่นตรง (Exact methods) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย โดยเฉพาะปัญหาขนาดใหญ่ที่มีตัวแปรและข้อจำกัดมากขึ้น ดังนั้นวิธีการฮิวริสติกหลาย ๆ วิธีที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่ดีจึงถูกพัฒนาขึ้น ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาวิธีการฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นนี้เรียกว่า เมตาฮิวริสติก (Metaheuristic methods) [3],[4]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ระบบมดแบบแม็ก-มินในการจัดสมดุลสายงานการประกอบ เพื่อหารอบเวลาการผลิต และค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาและทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ จำนวนรอบการทำงาน ค่าน้ำหนักของฟีโรโมน และอัตราการระเหยของฟีโรโมน จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นในการนำระบบมดแบบแม็ก-มิน ไปใช้จริงต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เป็นผลทำให้วิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการจัดสมดุลสายงานการประกอบ และสามารถให้คำตอบที่ดีภายในระยะเวลาที่กำหนดได้ [5] การนำวิธี GA มาประยุกต์ใช้กับปัญหา ALB แบบผลิตภัณฑ์เดียว โดยการกำหนดฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ แบบหลายวัตถุประสงค์ และเปรียบเทียบผลการแก้ปัญหากับวิธี COMSOAL พบว่า วิธี GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า [6] จากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการเทคนิคมด (Ant techniques) มาแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่มีการจัดลำดับการผลิตสินค้าแบบผสม มีเวลางานเป็นแบบ สโตแคสติก (Stochastic) และมีการจัดสถานีงานแบบขนานกัน โดยใช้จำลองระบบของสายการประกอบ และวัดค่าความสามารถของผลผลิต เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีฮิวริสติกอื่น ๆ ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า วิธี Ant techniques สามารถแข่งขันกับวิธีฮิวริสติกอื่น ๆ ได้ [7] ซึ่งในงานวิจัยที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการค้นหาแบบตาบู (Tabu search; TS) และเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm; GA) ผลของการแก้ไขปัญหา ALB ด้วยวิธีการดังกล่าวเป็นที่น่าพอใจ แต่จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบค่อนข้างยาวนานเมื่อดำเนินการกับปัญหา ALB ที่มีขั้นงานจำนวนมาก [8] ต่อมาได้มีการแนะนำวิธีระบบมดแบบ แม็ก-มิน (MAX-MIN Ant System; MMAS) ที่ได้พัฒนาปรับปรุงจากวิธีระบบมดพื้นฐานในการค้นหาคำตอบร่วมกับวิธีการค้นแบบโลคัล (Local Search) เพื่อปรับปรุงคำตอบ ในปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travel Salesman Problem; TSP) และทำการเปรียบเทียบกับวิธีระบบอาณานิคมมด (Ant Colony System; ACO) พบว่า วิธี MMAS มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการหาผลลัพธ์ที่ดีได้ และให้ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ดีกว่าวิธี ACO [9] และการใช้วิธีระบบมดแม็ก-มินร่วมกับเทคนิคแบบสุ่ม สามารถแก้ไขปัญหาขนาดเล็กได้เป็นอย่างดี แต่ในปัญหาขนาดใหญ่ไม่สามารถตอบสนองได้ [10] ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึมร่วมกับระบบมดแม็ก-มิน เพื่อแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู (U-Shape assembly line balancing; UALB) วิธีการที่นำเสนอนี้ GA ทำหน้าที่กำหนดจำนวนขั้นงานที่เหมาะสมให้กับแต่ละสถานีงาน ในขณะที่ (MAX-MIN Ant System; MMAS) ทำหน้าที่ปรับละเอียดลำดับขั้นงานที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของภาระงานของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด โดยสอดคล้องกับเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อน-หลังของขั้นงาน วิธีการที่นำเสนอจะถูกทดสอบกับปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียวมาตรฐาน โดยจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธี COMSOAL และวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่ม (MMAS+RP)[10] จำนวน 24 ปัญหาซึ่งได้รับการรวบรวมไว้โดย Scholl [11]

2.การจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู

รูปแบบของปัญหารูปทรงตัวยู (UALB) แตกต่างจากปัญหาแบบเส้นตรง (Simple assembly line balancing; SALB) เฉพาะเงื่อนไขของลำดับขั้นงานก่อนหน้า (Precedence constraint) ปัญหาแบบเส้นตรง ทุกงานที่อยู่ก่อนหน้า (Precedence) งาน j จะถูกจัดลงสถานีงานที่

$1,\ldots k$ ก่อนและแต่ละงานจะถูกจัดลงได้เพียง 1 สถานี แต่ปัญหารูปทรงตัวยู ทุกงานที่อยู่ก่อนหน้าหรือทุกงานที่อยู่ตามหลัง (Successors) งาน j จะสามารถถูกจัดลงสถานีงานที่ $1,\ldots k$ ได้เพียง 1 สถานีเท่านั้น โดยที่เวลารวมของสถานีงานนั้น ๆ จะต้องมีค่าไม่เกินรอบเวลาการผลิต นั่นคือในการจัดสมดุลงานในปัญหารูปทรงตัวยู สามารถพิจารณางานที่จะจัดลงสถานีงานได้ทั้ง 2 ทิศทางคือ เลือกงานจากข้างหน้าไปข้างหลัง หรือจากซ้ายไปขวา (Forward) ของแผนผังลำดับงาน (Precedence diagram) และจากหลังไปข้างหน้า หรือจากขวาไปซ้าย (Backward) ได้พร้อม ๆ กัน ในขณะที่ปัญหาแบบเส้นตรงจะพิจารณาเลือกงานทิศทางเดียว เช่น เลือกงานจากข้างหน้าไปข้างหลังหรือจากซ้ายไปขวา เป็นต้น ปัญหารูปทรงตัวยูจะให้ประสิทธิภาพของสายการผลิต (Line Efficiency) ที่ดีกว่า เนื่องจาก แต่ละสถานีงานมีภาระงานที่เท่า ๆ กัน หรือใกล้เคียงกันมากกว่า [12] สิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาคือการกำหนดจำนวนสถานีงาน การคำนวณเวลาว่างงาน การคำนวณค่าความแปรปรวนของภาระงาน และการคำนวณประสิทธิภาพของสายงานการประกอบดังแสดงในสมการที่ (1) – (4) ตามลำดับ

$$m = w/c_t \quad (1)$$

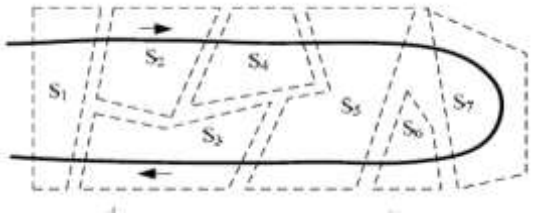
$$T_{id} = \sum_{i=1}^{m}(c_t - t_{si}) \quad (2)$$

$$w_v = \frac{\sum_{i=1}^{m}(t_{si}-\frac{w}{m})^2}{m} \quad (3)$$

$$E = \frac{w}{m \times c_r} \quad (4)$$

เมื่อ n คือ จำนวนขั้นงาน, m คือจำนวนสถานีงาน, w_v คือ ความแปรปรวนของสายงานการประกอบ, c_t คือ รอบเวลาที่กำหนดให้, c_r คือ รอบเวลาการทำงานจริง, w คือ เวลาการทำงานของทุกขั้นงาน, t_{si} คือ เวลารวมการทำงานของสถานีงานที่ i และ T_{id} คือ เวลาว่างงาน

การจัดสมดุลสายงานการประกอบได้รับการนำเสนอให้จัดตามรูปทรงตัวยู [13],[14] ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้เพราะมีข้อดีกว่า SALB ในด้านต่าง ๆ เช่น สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมการทำงาน การจัดงานที่จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของแผนผังลำดับขั้นงาน ให้อยู่ในสถานีงานเดียวกันได้ ทำให้มีจำนวนสถานีงานที่ไม่เกินการจัดแบบเส้นตรงและ สามารถจัดให้เส้นทางการปฏิบัติงานสั้นที่สุด โดยกำหนดให้เซตของงานใด ๆ คือ F ซึ่ง $F = \{i|i = 1,2,\ldots,n\}$, และ P เป็นเซตของเงื่อนไขของลำดับงานก่อนหน้า ซึ่ง $P = \{(x,y)|$ โดยที่งาน x ต้องทำเสร็จก่อนงาน $y\}$, และ T เป็นเซตของเวลางานใด ๆ ที่ $T = \{i|i = 1,2,\ldots,n\}$, กำหนดให้รอบเวลาการผลิตเป็น c และ m เป็นจำนวนสถานีงาน ทั้งนี้เพื่อหาเซตย่อย ๆ ของ F, $(S_1,S_2,\ldots,S_m)$ ที่ $S_k = \{i|$โดยที่งาน i ถูกจัดลงสถานีงาน $k\}$ และให้เป็นไปตามเงื่อนไขต่าง ๆ ซึ่งแสดงในเงื่อนไขที่ (5)-(8)



รูปที่ 1 สายงานการประกอบรูปทรงตัวยู [8]

$$\cup_{k=1}^{m} s_k = F \quad (5)$$

$$s_k \cap_{k \neq j} s_j = \emptyset \quad (6)$$

$$\sum_{i \in s_k} t_i \leq c, k = 1,2,\ldots,m \quad (7)$$

สำหรับแต่ละขั้นงาน y ใดๆ,

$$\text{if } (x,y) \in P, x \in s_k, y \in s_j, \text{then } k \leq j, \text{for all x; or} \quad (8)$$
$$\text{if } (y,z) \in P, y \in s_j, z \in s_i, \text{then } i \leq j, \text{for all z.}$$

เมื่อ S_k คือเซตของงานที่ถูกจัดลงในสถานีงาน k, S_j คือเซตของงานที่ถูกจัดลงในสถานีงาน j, t_i คือเวลาการทำงาน i, k คือสถานีงานที่ $1,\ldots m$ และ i คือ ขั้นงานที่ $1,\ldots n$ เพราะฉะนั้นเงื่อนไข (5) เป็นการแสดงให้เห็นว่างานทุกงานจะถูกจัดลงในสถานีงาน เงื่อนไข (6) คืองานทุกงานจะถูกกำหนดลงสถานีงานเพียงครั้งเดียว เงื่อนไข (7) เพื่อให้มั่นใจว่าเวลารวมของงานในแต่ละสถานีงาน จะต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิต เงื่อนไขที่ (8) เป็นเงื่อนไขของลำดับงานก่อน-หลัง ซึ่งจะต้องไม่ผิดกฎของการจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู [15]

3.วิธีการแก้ปัญหาด้วย UALB ที่นำเสนอ

วิธีการแก้ปัญหา UALB ที่นำเสนอเป็นการประยุกต์ใช้ GA ร่วมกับ MMAS โดย มีรายละเอียดดังนี้

3.1 วิธีเจเนติกอัลกอริทึม

เจเนติกอัลกอริทึม [16] หรือ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและปฏิบัติการทางสายพันธุ์ อัลกอริทึมของ GA ประกอบด้วย

(1) สร้างประชากรเริ่มต้นโดยการสุ่ม

(2) ประเมินโครโมโซมของประชากรทั้งหมดโดยอาศัยฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์

(3) คำนวณค่าความเหมาะสมของประชากร และคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์

(4) สร้างสายพันธุ์ใหม่ด้วยการดำเนินการทางสายพันธุ์ ซึ่งประกอบด้วยการรวมตัว (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation)

(5) คำนวณค่าความเหมาะสมของประชากรสายพันธุ์ใหม่

(6) ตรวจสอบเกณฑ์การยุติการค้นหาถ้าพบว่าสอดคล้อง ให้ยุติการค้นหา ประชากรที่ให้ค่าความเหมาะสมดีที่สุดคือคำตอบที่เหมาะที่สุด ไม่เช่นนั้นให้แทนที่ประชากรเดิมด้วยสายพันธุ์ใหม่แล้ววนกลับไปยัง (2) เพื่อดำเนินการค้นหาในรุ่นต่อไป

3.2 การค้นหาคำตอบด้วยวิธี MAX-MIN Ant System (MMAS)

การค้นหาคำตอบด้วยวิธี MMAS เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีระบบมด โดย Stüzle [9] ที่มีหลักการดังต่อไปนี้

ในการสร้างคำตอบเริ่มต้น จะใช้วิธีการจัดลำดับ *(Priority rule)* ที่พิจารณาทั้งในเรื่องของเวลาการทำงานของขั้นงานและความสัมพันธ์ของลำดับงานก่อนหน้า *(Precedence)* เป็นเกณฑ์ โดยให้ความสำคัญที่สถานีงานเป็นหลัก *(Station oriented precedence)* ซึ่งจะมีการเปิดสถานีงานแรก ($k=1$) การจัดงานรูปทรงตัวยู จะมีจำนวนงานที่เป็นสมาชิกที่จะถูกจัดลงสถานีงานในแต่ละรอบมากกว่าเนื่องจากพิจารณางานทั้งขาไป และขากลับของแผนผังลำดับขั้นงานก่อนหน้า โดยที่สมการที่ใช้ในการจัดขั้นงานลงสถานีงานจะใช้สมการที่ (*9*)-(*11*) โดยที่โอกาสของเงื่อนไขที่งานนั้น ๆ จะถูกเลือกเพื่อจัดลงสถานีงานจะขึ้นอยู่กับค่า η_j ของงานนั้น ๆ และค่าฟีโรโมน, τ_{kj} ของงาน j ที่สถานีงาน k ซึ่ง S_k เป็นเซตของงานที่ถูกจัดลงสถานีงานที่ k

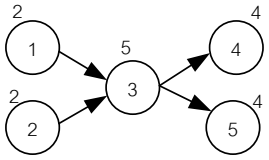
$$\eta_j = t_j \tag{9}$$

$$p_{kj} = \frac{[\tau_{kj}]^{\alpha}[\eta_j]^{\beta}}{\sum_{i \in S_k}[\tau_{ki}]^{\alpha}[\eta_j]^{\beta}} \tag{10}$$

$$\tau_{kj}(k+1) = (1-\rho)\,\tau_{kj}(t) + \Delta\tau_{kj}^{best} \tag{11}$$

เมื่อ p_{kj} คือ โอกาสที่จะเลือกขั้นงานเข้าสู่สถานีงาน

โดยที่ค่า ρ เป็นอัตราการระเหยไปของค่าฟีโรโมน ระหว่าง $0 \le \rho < 1$ ซึ่งจากการทดลองของ Stüzle [9] ในปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) การกำหนดค่า ρ ต่ำ ๆ คือ ค่าอัตราการระเหยของ ฟีโรโมนมีการระเหยไปอย่างช้า ๆ จะทำให้การค้นหาคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดสามารถหาได้เร็วกว่าในรอบต้น ๆ ของการทดลอง และค่า $\Delta\tau_{kj}^{best} = 1/f(s^{best})$ และค่า $f(s^{best})$ คือจำนวนสถานีงานที่ได้จากคำตอบเริ่มต้น



รูปที่ 2 ตัวอย่างปัญหาขนาดเล็ก

3.3 อัลกอริทึม

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขนาดของประชากร (Population Size)

ขั้นตอนที่ 2 การทำ Chromosome Encoding คือ การออกแบบสำหรับการเข้ารหัสของแต่ละยีนในการดำเนินการของปัญหา โดยในแต่ละยีนจะทำการจำลอง (Generate) ตัวเลขแบบสุ่มให้กับขั้นงาน โดยใช้การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม [0,1] ในงานวิจัยนี้ใช้ Random Key Encoding ของโครโมโซมที่ประกอบด้วยยีนต่าง ๆ โดยมีจำนวนยีนเท่ากับจำนวนขั้นงาน ค่าของยีนต่าง ๆ ถูกกำหนดด้วยตัวเลขสุ่ม แล้วสร้างโครโมโซมตัวเลขแบบสุ่ม (Random Key Chromosome) ให้กับแต่ละขั้นงานโดยชุดของโครโมโซมตัวเลขแบบสุ่มนี้มีค่าเท่ากับจำนวนประชากร จากรูปที่ 2 สามารถสร้างเป็นโครงสร้างของโครโมโซมตัวเลขแบบสุ่มให้กับแต่ละขั้นงานได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 โครโมโซมตัวเลขแบบสุ่มของ 1 โครโมโซม

ขั้นงาน	1	2	3	4	5
Random Key Chromosome	0.566	0.193	0.602	0.765	0.399

ขั้นตอนที่ 3 การหาค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (w_v) ของวิธี GA และปรับละเอียดด้วยวิธี MMAS จากโครโมโซมหนึ่ง ๆ (Decoding) วิธี GA ของโครโมโซมหนึ่ง ๆ สามารถทำได้ดังนี้

1. นำค่า Random Key Chromosome ที่ได้จากการทำ Chromosome Encoding ที่น้อยที่สุดของยีนนั้น ๆ จัดให้เป็นเซตเริ่มต้นของงานที่ถูกเลือก และต้องไม่ผิดเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อน-หลังของขั้นงานด้วย เพราะฉะนั้นจากตารางที่ 1 เซตเริ่มต้นเท่ากับ {1,2,4,5}

2. กำหนดให้ $C_{in/out}$ คือ เซตของขั้นงานที่ยังไม่ได้ถูกจัดในสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู

2.1 กำหนดให้ $C_{in/out}$ เป็นเซตปัจจุบัน

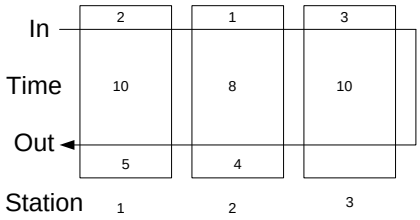
2.2 เลือกขั้นงานที่ได้จาก $C_{in/out}$ ที่มีค่า Random Key Chromosome ที่น้อยที่สุด

2.3 กำหนดขั้นงานที่เลือกในข้อที่ 2.2 เป็นขั้นงานปัจจุบัน และอัพเดทเซต $C_{in/out}$ แล้วทำซ้ำข้อที่ 2.2 จนครบทุกขั้นงาน

จากขั้นตอนที่ 3 สามารถสร้างเป็นตารางที่ในการจัดสมดุลสายงานการประกอบได้ดังตารางที่ 2 และสร้างเป็นรูปทรงตัวยูได้ดังรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1 และกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 6 นาที

ตารางที่ 2 การจัดสมดุลสายงานการประกอบ

Station	Candidate list	Assigned	Task time	Idle Time
1	1,2,4,5 1,4,5	2 5	2 4	4 0
2	1,4 4	1 4	2 4	4 0
3	3	3	5	1



รูปที่ 2 การจัดขั้นงานลงแต่ละสถานีงานด้วยวิธี GA

ขั้นตอนที่ 4 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (w_v) ที่ได้จากการค้นหาคำตอบด้วยวิธี GA และการปรับละเอียดด้วยวิธี MMAS ของแต่ละสมาชิกและทำการเรียงค่าที่ดีที่สุดไปหาค่าที่แย่ที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการสร้างประชากรชุดใหม่หรือประชากรรุ่นลูก โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างประชากรรุ่นลูกนี้ อ้างอิงจากงานวิจัย [17] เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสมโดยวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของ GA ในด้านความสามารถในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจากปัญหาตัวอย่างกำหนดได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองของ [17]

ปัญหา / พารามิเตอร์	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่
Crossover	0.7	0.7	0.7
Mutation	0.1	0.1	0.1
Reproduction	0.2	0.2	0.2
Generation Max	300	1200	800
Population Size	20	20	30

วิธีการ Reproduction ในการวิจัยนี้เลือกโครโมโซม 20% ที่ดีที่สุดให้เป็นประชากรในชุดถัดไป

วิธีการ Crossover ใช้วิธีพาราเมตริกซ์ยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ส สร้างโครโมโซมลูกจำนวน 2 โครโมโซมและเลือกโครโมโซมลูกที่ดีที่สุดให้เป็นประชากรชุดใหม่ การสร้างโครโมโซมลูก จะพิจารณาจากค่าตัวเลขแบบสุ่ม เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการสร้างลูกดังนี้[18]

1. การสร้างลูก 1 พิจารณาว่าถ้าเลขที่ได้จากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มมีค่าน้อยกว่า 0.700 ใช้ยีนที่มาจากโครโมโซมพ่อในการสร้างลูก แต่ถ้าตัวเลขมีค่ามากกว่า 0.700 ใช้ยีนที่มาจากโครโมโซมแม่ในการสร้างลูก

2. การสร้างลูก 2 พิจารณาว่าถ้าเลขที่ได้จากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มมีค่าน้อยกว่า 0.700 ใช้ยีนที่มาจากโครโมโซมแม่ในการสร้างลูก แต่ถ้าตัวเลขมีค่ามากกว่า 0.700 ใช้ยีนที่มาจากโครโมโซมพ่อในการสร้างลูก

จากวิธีการ Crossover ที่อธิบาย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การสร้างโครโมโซมลูก 1 และลูก 2

ขั้นงาน	1	2	3	4	5
Random Key	0.980	0.371	0.283	0.715	0.662
พ่อ	0.805	<u>0.496</u>	<u>0.011</u>	0.756	<u>0.457</u>
แม่	<u>0.844</u>	0.823	0.474	<u>0.073</u>	0.970
ลูก 1	0.844	0.496	0.011	0.073	0.457
ลูก 2	0.805	0.823	0.474	0.756	0.970

หมายเหตุ: เลขที่ขีดเส้นใต้คือค่าที่ถูกเลือกให้เป็นโครโมโซมลูก1

วิธีการ Mutation ใช้วิธีการเปลี่ยนตัวเลขสุ่มของยีนต่าง ๆ ในโครโมโซมที่ถูกเลือก

ขั้นตอนที่ 6 การหาค่าผลลัพธ์ของสมาชิกแต่ละตัว (Decoding) มีขั้นตอนที่คล้ายกับขั้นตอนที่ 3 ของวิธี GA และปรับละเอียดด้วย MMAS โดยที่ขั้นตอนของ GA ยังคงวิธีเหมือนเดิมในขณะที่ขั้นตอนที่ 3 จะเพิ่มในส่วนของการอัพเดทค่าฟีโรโมนเข้าไปด้วย

การปรับค่าฟีโรโมน จะมีมดเพียงตัวเดียวเท่านั้นที่ถูกปรับค่าฟีโรโมน ภายหลังของแต่ละรอบการทำงาน โดยในยีนที่เป็นคำตอบของแต่ละสถานีงาน จะถูกเพิ่มค่าฟีโรโมน ส่วนยีนอื่น ๆ จะถูกลดค่าฟีโรโมนตามอัตราการระเหย (ρ = 0.02) ที่กำหนด โดยค่าฟีโรโมนที่ถูกปรับในแต่ละรอบจะต้องควบคุมให้อยู่ในช่วงระหว่าง [τ_{min}, τ_{max}] ตามค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นมดก็จะทำการหาคำตอบไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเจอคำตอบที่เหมาะสมที่สุด หรือคำตอบที่ใกล้เคียง ดังนั้นการปรับค่าฟีโรโมนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 11 โดยที่ค่า ρ เป็นอัตราการระเหยไปของค่าฟีโรโมน, $0 \le \rho < 1$ ซึ่งในที่นี้กำหนดค่า ρ= 0.02 และค่า $\Delta\tau_{kj}^{best} = 1/f(s^{best})$ และค่า $f(s^{best})$ เป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 7 อัพเดทค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ

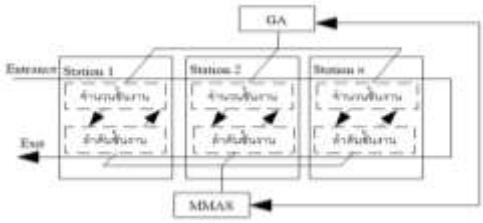
1. ผลลัพธ์ตั้งต้นของวิธี GA และวิธี MMAS
2. ผลลัพธ์ในรอบถัดไปที่ได้จากการสร้างประชากรรุ่นลูก
3. จำนวนรอบหยุดการค้นหา

ขั้นตอนที่ 8 ทดสอบค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 9 หากไม่มีการหาคำตอบที่ดีกว่าให้เก็บค่าที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 10 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 จนกระทั่งครบจำนวนรอบของการหยุดการค้นหา

วิธีการแก้ปัญหา UALB ที่นำเสนอนี้ GA ทำหน้าที่กำหนดจำนวนขั้นงานที่เหมาะสมให้กับแต่ละสถานีงาน ในขณะที่ MMAS ทำหน้าที่ปรับละเอียดลำดับขั้นงานที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของภาระงานของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด โดยสอดคล้องกับเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อน-หลังของขั้นงานตามรูปที่ 3 ค่าความแปรปรวนที่ได้จะเป็นตัวกำหนดให้เป็นฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด



รูปที่ 3 แผนผังการแก้ปัญหา UALB ด้วยวิธี GA และ MMAS

4.ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การทดสอบสมรรถนะการจัดสมดุลสายการผลิตของวิธีการที่นำเสนอถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ของการแก้ไขปัญหาขนาดเล็กเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จาก Exact method และส่วนที่สองเป็นการทดสอบกับชุดปัญหามาตรฐาน

4.1 วิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Exact Method)

การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการผลิตนี้ใช้วิธีการเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้จากการแจงนับแบบสมบูรณ์ (Complete Enumeration) ปัญหาขนาดเล็กที่ใช้ทดสอบถูกกำหนดจำนวนขั้นงานเท่ากับ 5 ขั้นงาน สำหรับเวลาที่ใช้สำหรับแต่ละขั้นงานและรอบเวลาการผลิตถูกกำหนดขึ้นแบบสุ่มโดยมีเงื่อนไขให้มีจำนวนสถานีงาน 3 สถานีงาน ตัวอย่างปัญหาขนาดเล็กแสดงได้ดังรูปที่ 1 ที่มีรอบเวลาการผลิต (C_t = 6 นาที)

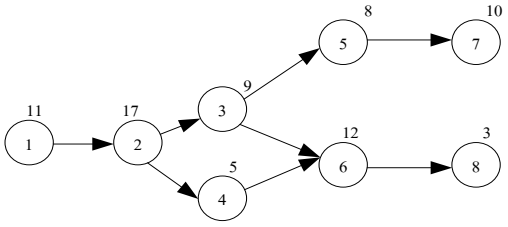
การใช้วิธี Exact Method ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาในรูปที่ 1 พบว่าความแปรปรวนของภาระงานที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.22 นาที^{2} เมื่อใช้วิธีการCOMSOAL, วิธีระบบมดแม็ก-มินร่วมกับเทคนิคแบบสุ่ม และวิธีการที่นำเสนอแก้ไขปัญหานี้ พบว่าทั้งสามวิธีดังกล่าวสามารถหาผลลัพธ์ที่สุดได้เช่นเดียวกัน การทดสอบสมรรถนะของวิธีการทั้งสามวิธีเปรียบเทียบวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ทำการแก้ไขปัญหาขนาดเล็กจำนวน 5 ปัญหาพบว่าทั้งสามวิธีสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

4.2 การทดสอบปัญหามาตรฐาน

การทดสอบวิธีการที่นำเสนอได้ดำเนินการกับปัญหา UALB ที่ได้จากการรวบรวมของ Scholl [11] จำนวน 24 ปัญหา แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5 และรูปที่ 4 แสดงแผนภูมิลำดับขั้นงานก่อนหน้าของปัญหา Bowman เพื่อเป็นตัวอย่างในส่วนของการใช้วิธี GA กับ MMAS ที่ได้รับการพัฒนาโดยอาศัยโปรแกรม Microsoft Visual C++ ที่ดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Core i5, 1.70 GHz กำหนดให้ค่าฟีโรโมน (ρ) = 0.02 และทำการทดสอบปัญหาละ 10 ครั้ง

ตารางที่ 5 รายละเอียดปัญหา UALB ที่ใช้ทดสอบ

ปัญหา	ชื่อปัญหา	n	w	c_t
1.	Mertens	7	29 นาที	10 นาที
2.	Bowman	8	75 นาที	20 นาที
3.	Jaeschke	9	37 นาที	6 นาที
4.	Jackson	11	46 นาที	9 นาที
5.	Mansoor	11	185 นาที	62 นาที
6.	Michell	21	105 นาที	14 นาที
7	Roszier	25	125 นาที	14 นาที
8	Heskia	28	1,024 นาที	342 นาที
9	Buxey	29	318 นาที	47 นาที
10	Sawyer	30	324 นาที	41 นาที
11	Lutz1	32	14,140 นาที	1,572 นาที
12	Gunther	35	483 นาที	81 นาที
13	Kilbridge	45	552 นาที	111 นาที
14	Hahn	53	14,026 นาที	2,806 นาที
15	Warnecke	58	1,548 นาที	97 นาที
16	Tonge	70	3,510 นาที	251 นาที
17	Wee-mag	75	1,499 นาที	49 นาที
18	Arc	83	75,707 นาที	3,786 นาที
19	Lutz2	89	485 นาที	19 นาที
20	Lutz3	89	1,644 นาที	103 นาที
21	Mukherje	94	4,208 นาที	192 นาที
22	Arc	111	150,399 นาที	17,067 นาที
23	Barthold2	148	4,234 นาที	125 นาที
24	Scholl	297	69,655 นาที	1883 นาที



รูปที่ 4 แผนภูมิลำดับงานก่อนหน้าของปัญหา Bowman

ผลการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบที่ยอมรับได้ในทุกกรณีปัญหา UALB ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น จำนวนมด, ค่า β, จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด และจำนวนประชากรอ้างอิงจาก [17]

การปรับค่าพารามิเตอร์ที่อ้างอิงจาก [17] นั้นสามารถแบ่งจำนวนปัญหาออกเป็น 3 ขนาดปัญหาคือ

1.ปัญหาขนาดเล็ก มีขั้นงานตั้งแต่ 7-20 ขั้นงาน

2.ปัญหาขนาดกลาง มีขั้นงานตั้งแต่ 21-44 ขั้นงาน

3.ปัญหาขนาดใหญ่ มีขั้นงานตั้งแต่ 45-297 ขั้นงาน

เมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบทำให้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบของแต่ละปัญหาเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าสามารถให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีการ COMSOAL และวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่มในทุกกรณีปัญหา

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลที่ได้จากการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการที่นำเสนอยังมีผลต่อเวลาว่างงานรวม และประสิทธิภาพของสายงานการประกอบ ของแต่ละปัญหามีผลที่ได้ขึ้นด้วยตามตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่าความแปรปรวนของสายงานการประกอบ

ปัญหา	ค่าความแปรปรวนของสายงานการประกอบ (w_v: นาที^{2})			Avg. CPU Time(sec.)
	COMSOAL	MMAS+RP	วิธีที่นำเสนอ	
1	3.2	0.2	0.2	2.3
2	11.2	4.8	1.6	3.5
3	0.98	0.98	0.73	6.7
4	3.5	2.5	1.2	6.5
5	76.19	158.12	0.22	6.4
6	8.9	10.8	0.3	50.3
7	4.8	4.1	0.6	52.2
8	0.89	4,346.54	0.22	57.7
9	137.0	24.5	1.3	75.6
10	33.5	22.6	0.7	82.3
11	34,746.9	40,440.1	6,651.2	87.5
12	186.86	217.75	23.14	137.8
13	1,585.3	295.5	0.2	124.9
14	452,116.2	812,572.1	251,397.2	149.2
15	150.6	18.1	12.3	270.1
16	870.6	320.7	197.4	298.8
17	23.82	47.7	20.06	513.2
18	180,839.2	292,137.4	49,656.5	443.4
19	7.1	4.1	1.3	379.7
20	223.3	543.5	20.1	450.8
21	752.1	196.6	60.6	666.7
22	680,196.0	2,1671,015.9	111,440.2	723.8
23	171.2	17.7	15.4	2,198.1
24	3,794.5	163,241.3	1,777.13	2,523.2

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบเวลาว่างงานรวม

ปัญหา	เวลาว่างงานรวม (T_{id}: นาที)		
	COMSOAL(1)	MMAS+RP(2)	วิธีที่นำเสนอ(3)
1	11	1	1
2	25	25	5
3	11	11	11
4	8	8	8
5	63	63	1
6	21	21	7
7	15	15	15
8	2	344	2
9	52	52	5
10	45	45	2
11	3,152	3,152	1,580
12	84	84	3
13	114	225	3
14	2,810	14,034	2,810
15	198	101	101
16	255	255	55
17	118	167	69
18	7,585	7,585	7,585
19	47	66	28
20	107	931	107
21	400	208	208
22	3,204	71,472	3,204
23	391	141	141
24	1,899	7,548	1,899

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายงานการประกอบ

ปัญหา	ประสิทธิภาพของสายงานการประกอบ (E:%)		
	COMSOAL	MMAS+RP	วิธีที่นำเสนอ
1	80.56	96.67	96.76
2	75	83.33	93.75
3	77.08	77.08	77.08
4	85.19	85.19	85.19
5	84.09	78.39	99.46
6	83.33	83.33	93.75
7	89.29	89.29	89.29
8	99.81	79.26	99.81
9	86.17	88.04	98.48
10	87.8	87.8	98.78
11	86.97	86.88	90.41
12	86.25	85.19	99.38
13	82.88	75.1	99.46
14	83.43	53.15	83.43
15	88.66	93.88	93.88
16	93.23	93.23	93.23
17	92.7	89.98	95.6
18	91.09	90.92	92.46
19	91.17	88.02	94.54
20	93.89	63.84	93.89
21	91.32	95.29	95.29
22	97.91	69	98.01
23	91.55	96.78	96.78
24	97.35	90.22	97.76

ตารางที่ 9 ผลการแก้ปัญหาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของทุกปัญหา

ค่าความแปรปรวน (w_v)		เวลาว่างงานรวม (T_{id})		ประสิทธิภาพ (E)	
(1)vs(3)	(2)vs(3)	(1)vs(3)	(2)vs(3)	(1)vs(3)	(2)vs(3)
81.95	73.16	45.29	54.54	6.93	13.55

จากตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถแก้ไขปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู ได้ดีกว่าวิธี COMSOALและวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่มในทุกกรณีปัญหา มีค่าเฉลี่ยในการแก้ปัญหาสูงสุดถึง 81.95% และ 73.16% แต่อย่างไรก็ตาม ผลการจากการทดสอบด้วยวิธีการดังนี้กล่าวนี้มีผลทำให้เวลาว่างงานรวม และประสิทธิภาพของสายงานการประกอบมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของเวลาในการค้นหาคำตอบของวิธีการ COMSOAL ใช้เวลาประมาณ 1-2 วินาที ส่วนวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่ม และวิธีการที่นำเสนอจะใช้เวลาที่แตกต่างกันออกไป โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหา แต่โดยเฉลี่ยแล้วพบว่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของทั้ง 24 ปัญหา ใช้เวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 387.9 วินาที

5. สรุป

การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยู (UALB) โดยการประยุกต์ใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึมร่วมกับระบบมดแม็ก-มิน ได้รับการนำเสนอในงานวิจัยนี้โดยอาศัยค่าความแปรปรวนของภาระงานเป็นฟังก์ชั่นในการกำหนดตัวเปรียบเทียบหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดนี้ วิธี GA ทำหน้าที่กำหนดจำนวนขั้นงานที่เหมาะสมให้กับแต่ละสถานีงาน ในขณะที่ MMAS ทำหน้าที่ปรับละเอียดลำดับขั้นงานที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของภาระงานของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด สอดคล้องกับเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อน-หลังของขั้นงาน จากผลการทดสอบกับปัญหา UALB จำนวน 24 ปัญหา พบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้คำตอบที่ยอมรับได้ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่าวิธี COMSOALและวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่มในทุกกรณีปัญหา ค่าความค่าความแปรปรวนเฉลี่ยเท่ากับ 81.95% และ 73.16% สรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหา UALB ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.เอกสารอ้างอิง

[1] J. Rubinovitz and G. Levitin, “Genetic algorithm for assembly line balancing,” *International Journal of Production Economics*., Vol.41, pp. 343-354, 1995.

[2] M.E. Salveson, “The assembly line balancing problem,” *The Journal of Industrial Engineering*., Vol. *40* (3), pp. 18-25, 1995.

[3] P.R. McMullen and G.V. Frazier, “Using Simulated Annealing to Solve a Multiobjective Assembly Line Balancing Problem with parallel workstations,” *International Journal of Production Research*., Vol. 36, pp. 2717-2741, 1998.

[4] A. Scholl and C. Becker. “State-of-the-art Exact and Heuristic Solution Procedure for Simple Assembly Line Balancing,” *European Journal of Operational Research.*, 1Vol. 68, pp. 666-693, 2006.

[5] ธีราพรรณ แซ่แห่ว, นิวิท เจริญใจ และวิชัย ฉัตรทินวัฒน์. “การประยุกต์ใช้ระบบมดแบบ แม็ก-มิน ในการจัดสมดุลสายงายการประกอบ,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*., ปีที่ 2, หน้า 48-54, 2553.

[6] กรรณิการ์ ศิลานนท์. *การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม ในการจัดสมดุลสายงานการประกอบแบบหลาย วัตถุประสงค์.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2542.

[7] P.R. McMullen and P. Tarasewich. “Using Ant Techniques to Solve the Assembly Line Balancing Problem”. *IIE Transactions*. Vol.35, pp. 605-616, 2003.

[8] S. Suwannarongsri, S. Limnararat and D. Puang--downreong. “A new hybrid intelligent method for assembly line balancing”. *The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. pp. 1115-1119, 2007.

[9] T. Stutzle and H.H. Hoos. “MAX-MIN Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem”. *IEEE International Conference*. On 13-16 April 1997: pp. 309-314, 1997.

[10] อมรพงศ์ สงวนสินธุ์ และจักรวาล คุณะดิลก. “การจัดสมดุลสายงานการประกอบรูปทรงตัวยูด้วยวิธีระบบมดแม็ก-มิน ร่วมกับเทคนิคแบบสุ่ม.” *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ*. 16-18 ตุลาคม 2556, 2556.

[11] A. Scholl and R. Klein (25 April 2013). *Homepage for Assembly Line Balancing Research*. [Online] Available : http://www.assembly-line –balancing.de/

[12] A. Scholl, “Assembly Line Balancing ULINO-Optimally balancing U-Shape JIT assembly line,” *International Journal of Production Research*., Vol. 37, pp. 721-736, 2006.

[13] A. Scholl and R. Klein, “ULINO-optimally balancing U-shaped JIT assembly line,” *International Journal of Production Research*., Vol. 37(4), pp. 721-736, 1999.

[14] Hadi Gökçen and et al, “A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem,” *Applied Mathematical Modeling*., Vol. 29, pp. 373-380, 2005.

[15] J. Miltenberg and J. Wijingaard, “The U-line Balancing problem”. *Management Sciences*., Vol.40(10), pp. 1378-1388, 1994.

[16] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning.* Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.

[17] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ. *การจำลองแบบปัญหา* กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

[18] B. Norman and J. Bean, “Operation Sequencing and tool assignment for multiple spindle CNC machines,” *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*., pp. 425-429, 1997.