

## ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN LAI BFD-ACO-LS TRONG CÂN BẰNG DÂY CHUYỀN MAY CÔNG NGHIỆP

Hoàng Trọng Lợi<sup>\*</sup>, Nguyễn Thị Hà Phương<sup>1</sup>,

Nguyễn Thị Hải Lê<sup>1</sup>, Nguyễn Tấn Tân<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Đại học Huế

\* Email: hoangtrongloi@hueuni.edu.vn

### TÓM TẮT

Bài toán cân bằng dây chuyền may công nghiệp là một bài toán phức tạp, chịu ảnh hưởng bởi nhiều ràng buộc như chu kỳ sản xuất, số trạm làm việc, thứ tự công đoạn và máy móc. Đây là bài toán lớn, thuộc lớp NP-hard, khiến việc tìm nghiệm chính xác trong thời gian hợp lý là không khả thi. Nghiên cứu này đề xuất thuật toán lai BFD-ACO-LS, kết hợp giữa Best-Fit Decreasing (BFD) để khởi tạo nghiệm khả thi, Ant Colony Optimization (ACO) để tìm kiếm toàn cục và Local Search (LS) trong giai đoạn tối ưu cục bộ. Thử nghiệm trên dây chuyền may với 90 công đoạn cho thấy số trạm giảm từ 26 trạm xuống còn 22 trạm, hiệu suất cân bằng tăng từ 55,55% lên trên 90%. Kết quả này khẳng định tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của thuật toán lai BFD-ACO-LS trong tối ưu hóa dây chuyền may công nghiệp.

**Từ khóa:** cân bằng dây chuyền, thuật toán đàn kiến, thuật toán lai, tối ưu hóa.

### I. MỞ ĐẦU

Theo tổng cục Hải quan Việt Nam, năm 2024 kim ngạch xuất khẩu dệt may đạt 44,44 tỷ USD, tăng 10,3% so với cùng kỳ năm 2023. Hiện nay Việt Nam có hơn 7.000 công ty thuộc ngành dệt may sử dụng khoảng 3 triệu lao động. Điều này cho thấy ngành may mặc giữ vai trò quan trọng trong cơ cấu kinh tế Việt Nam không chỉ về mặt xuất khẩu mà còn ở khía cạnh tạo việc làm cho người lao động. Trong bối cảnh đất nước hội nhập ngày càng sâu rộng với thế giới, thị trường ngày càng khắt khe, cạnh tranh gay gắt giữa các nước xuất khẩu, các doanh nghiệp dệt may cần phải không ngừng nâng cao năng suất và hiệu quả sản xuất. Một trong những yếu tố then chốt quyết định đến năng suất là mức độ cân bằng giữa các trạm của dây chuyền trong quá trình sản xuất.

Trong sản xuất may công nghiệp, quá trình hoàn thiện một sản phẩm được chia thành nhiều công đoạn nối tiếp nhau [1]. Mỗi công đoạn được bố trí tại một trạm, với số lượng công nhân và máy móc phù hợp. Việc phân chia công đoạn không hợp lý sẽ dẫn đến một số trạm có thể bị quá tải trong khi các trạm khác nhàn rỗi, gây lãng phí thời gian và nguồn lực, làm giảm hiệu suất chung của dây chuyền. Ở nhiều nước phát triển, việc cân bằng dây chuyền đã được hỗ trợ bởi phần mềm và các thuật toán tối ưu. Tuy nhiên tại Việt Nam, việc này vẫn chủ yếu dựa vào kinh nghiệm của người quản lý, cách làm

này chỉ phù hợp với dây chuyền nhỏ nhưng kém hiệu quả khi số công đoạn lớn và ràng buộc phức tạp.

Bài toán cân bằng dây chuyền sản xuất (Assembly Line Balancing – ALB) là một vấn đề quan trọng trong tối ưu hóa quá trình sản xuất, hướng tới việc phân bổ hợp lý các công đoạn vào các trạm để đạt được năng suất cao nhất, giảm số lượng trạm hoặc rút ngắn thời gian chu kỳ, đồng thời vẫn tuân thủ các ràng buộc về thứ tự thao tác, máy móc và nhân công. Theo Mastor [2], ALB gồm hai dạng cơ bản: SALBP-1, với chu kỳ sản xuất được xác định trước và mục tiêu là tối thiểu số trạm và SALBP-2, với số trạm cố định và mục tiêu là rút ngắn chu kỳ sản xuất. Bài toán ALB thuộc nhóm NP-hard [3], việc tìm nghiệm tối ưu bằng phương pháp chính xác thường không khả thi, nên hầu hết các nghiên cứu tập trung vào các thuật toán gần đúng.

Các nghiên cứu ban đầu chủ yếu dựa trên heuristic truyền thống, tiêu biểu là phương pháp Ranked Positional Weight (RPW) của Helgeson và Birnie (1961) [4] phương pháp này sắp xếp công đoạn theo trọng số vị trí để phân công vào các trạm và được áp dụng thành công trong nhiều môi trường sản xuất, trong đó có ngành may mặc [1]. Tuy nhiên, các phương pháp heuristic truyền thống chỉ phù hợp với những dây chuyền đơn giản và ít ràng buộc. Khi dây chuyền có nhiều loại máy, thời gian thao tác thay đổi hoặc yêu cầu đa dạng về công nhân, phương pháp heuristic thường cho nghiệm cục bộ và thiếu tính linh hoạt.

Để khắc phục các hạn chế này, các nghiên cứu gần đây tập trung vào nhóm metaheuristic như Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS), Particle Swarm Optimization (PSO) và Ant Colony Optimization (ACO). Những thuật toán này được ứng dụng rộng rãi cho các biến thể của ALB. GA thể hiện khả năng xử lý bài toán đa mục tiêu và cho kết quả hội tụ tốt [5], trong khi SA và TS giúp cải thiện độ ổn định và tránh rơi vào nghiệm cục bộ [6], [7]. Các nghiên cứu ứng dụng PSO [8] và ACO [9] cũng chứng minh hiệu quả cao trong việc giảm độ lệch tải và thời gian nhàn rỗi giữa các trạm. Tuy vậy, metaheuristic thuần túy thường mất thời gian hội tụ lớn và phụ thuộc nhiều vào cách khởi tạo nghiệm ban đầu.

Từ thực tế đó, xu hướng hiện nay là sử dụng các thuật toán lai kết hợp ưu điểm của nhiều chiến lược tối ưu trong cùng một mô hình để nâng cao chất lượng nghiệm. Gonçalves & Almeida (2002) [10] là những người tiên phong khi phát triển thuật toán di truyền lai kết hợp quy tắc ưu tiên heuristic, biểu diễn “random keys” và tìm kiếm cục bộ (Local Search – LS) để cải thiện tốc độ hội tụ cho bài toán SALBP-1. Álvarez-Miranda et al. (2021) [11] cũng phát triển một mô hình GA lai với Bounded Dynamic Programming (GA-BDP) cho SALBP-2, trong đó mỗi cá thể được đánh giá bằng một quy hoạch động có ràng buộc, giúp tăng độ chính xác trong việc chọn lọc và đạt được nhiều nghiệm tối ưu mới trên bộ dữ liệu chuẩn. Ở Việt Nam, Đinh Mai Hương (2022) [12] đã kết hợp thuật toán tham lam với thuật toán luyện kim (SA-Gr) để tối ưu cân bằng dây

chuyên may sản phẩm dệt kim. Phương pháp này dùng Gr để khởi tạo nghiệm chất lượng cao và SA để tìm kiếm toàn cục, cho hiệu suất cân bằng cao hơn 3 - 5% so với SA thuần túy và giảm đáng kể thời gian tính toán.

Kế thừa và phát triển theo hướng này, nghiên cứu này đề xuất thuật toán lai BFD-ACO-LS, tích hợp ba thành phần chính:

- Best-Fit Decreasing (BFD) dùng để khởi tạo nghiệm khả thi ban đầu, đảm bảo phân bổ hợp lý các công đoạn theo chu kỳ sản xuất;
- Ant Colony Optimization (ACO) đóng vai trò tìm kiếm toàn cục dựa trên cơ chế pheromone và heuristic nhằm xác định phương án phân bổ tối ưu;
- Local Search (LS) được sử dụng để tinh chỉnh nghiệm cục bộ, giảm độ lệch tải giữa các trạm và nâng cao hiệu suất dây chuyền.

Thuật toán được ứng dụng cho bài toán cân bằng dây chuyền may công nghiệp tại Công ty may và thương mại Gio Linh – Quảng Trị với mục tiêu phân bổ hợp lý các công đoạn sản xuất và máy móc, thu hẹp chênh lệch thời gian giữa các trạm và tăng hiệu suất cân bằng dây chuyền. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình đề xuất có khả năng rút ngắn thời gian thiết lập cân bằng và cải thiện hiệu suất vận hành trong môi trường sản xuất thực tế.

## II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Mô hình hóa bài toán cân bằng dây chuyền may

Để sản xuất ra một sản phẩm hoàn chỉnh, một dây chuyền may công nghiệp sẽ phải thực hiện  $n$  công đoạn được các công nhân thực hiện bằng các loại máy móc tương ứng hoặc thủ công và được bố trí vào  $m$  trạm làm việc, trong đó sản phẩm đi qua tất cả các trạm trên, mỗi trạm (thường là một công nhân) đảm nhận một hoặc nhiều công đoạn cụ thể. Giữa các công đoạn tồn tại mối quan hệ thứ tự, nghĩa là một số công đoạn chỉ có thể bắt đầu khi các công đoạn trước đó đã hoàn tất. Cùng với đó tổng thời gian làm các công đoạn tại một trạm bất kỳ gọi là thời gian trạm không được vượt quá thời gian hoàn thành sản phẩm được gọi là chu kỳ (CT).

Bài toán cân bằng dây chuyền may được mô hình hoá như sau:

**Tập công đoạn:**  $T = \{1, 2, \dots, n\}$

**Tập máy móc:**  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_k\}$

**Thời gian công đoạn:**  $p_{t,m}$  là thời gian thực hiện công đoạn  $t$  với loại máy  $m$ .

**Chu kỳ sản xuất (Cycle Time- CT):** Là thời gian cần để hoàn thành một sản phẩm, thường là thời gian trạm lớn nhất.

**Ràng buộc thứ tự:** Là một đồ thị có hướng (DAG), trong đó mỗi nút tương ứng với một công đoạn và cạnh  $u \rightarrow v$  nghĩa là công đoạn  $u$  phải hoàn thành trước công đoạn  $v$ .

Ràng buộc máy móc: Mỗi công đoạn chỉ được làm thủ công hoặc một loại máy và mỗi trạm không được bố trí quá hai loại máy.

### Hàm mục tiêu

Mục tiêu của nghiên cứu này là giảm số trạm, tăng hiệu suất cân bằng với thời gian chu kỳ cho trước thông qua các thang đo [13] sau:

1. Hiệu suất cân bằng chuyền - Line Efficiency (LE):

$$LE = \frac{\sum_{k=1}^m t_{s_k}}{c.m} \quad (1)$$

Trong đó:  $m$  là số trạm làm việc của dây chuyền sản xuất;  $c$  là thời gian chu kỳ;  $t_{s_k}$  là tổng thời gian các công đoạn tại trạm  $s_k$ .

2. Độ thông suốt:

$$SI = \sqrt{\sum_{k=1}^m (t_{s_{max}} - t_{s_k})^2} \quad (2)$$

Trong đó:  $m$  là số trạm làm việc của dây chuyền sản xuất;  $t_{s_k}$  là tổng thời gian các công đoạn tại trạm  $s_k$ ;  $t_{s_{max}}$  là thời gian trạm lớn nhất trong tất cả các trạm  $s_k$ .

3. Độ trễ cân bằng:

$$BD = \frac{c.m - \sum_{k=1}^m t_{s_k}}{c.m} \quad (3)$$

Trong đó:  $m$  là số trạm làm việc của dây chuyền sản xuất;  $c$  là thời gian chu kỳ;  $t_{s_k}$  là tổng thời gian các công đoạn tại trạm  $s_k$ .

## 2.2. Thuật toán lai BFD-ACO-LS

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một thuật toán lai kết hợp ba thành phần chính: Best-Fit Decreasing (BFD) để khởi tạo nghiệm khả thi, Ant Colony Optimization (ACO) để tìm kiếm toàn cục và Local Search (LS) để cải thiện nghiệm cục bộ. Mô hình tổng thể được mô tả qua ba bước sau:

### Bước 1: Khởi tạo nghiệm (BFD)

Dựa trên nguyên tắc Best-Fit Decreasing, các công đoạn được sắp xếp theo thứ tự thời gian giảm dần và lần lượt phân bổ vào các trạm sao cho:

- Mức lấp đầy thời gian chu kỳ (Cycle Time – CT) là cao nhất.
- Đồng thời vẫn đảm bảo ràng buộc thứ tự công đoạn cũng như máy móc.

Kết quả bước này là một nghiệm khả thi ban đầu để ACO tiếp tục cải thiện.

**Bước 2: Tối ưu bằng thuật toán đàn kiến (ACO)**

Trong giai đoạn tối ưu toàn cục, mỗi cá thể kiến (ant) sẽ xây dựng một nghiệm mới dựa trên:

- Vết mùi (heromone): ký hiệu  $\tau_{t,m}$  biểu thị mức hấp dẫn của việc gán công đoạn  $t$  cho máy  $m$ .
- Thông tin heuristic: ký hiệu  $\eta_{t,m} = \frac{1}{p_{t,m}}$ , trong đó  $p_{t,m}$  là thời gian xử lý công đoạn  $t$  trên máy  $m$ .

Xác suất để một kiến chọn cặp  $(t, m)$  được xác định theo công thức:

$$P(t, m) = \frac{[\tau_{t,m}]^\alpha [\eta_{t,m}]^\beta}{\sum_{(t,m) \in C} [\tau_{t,m}]^\alpha [\eta_{t,m}]^\beta} \quad (4)$$

trong đó  $C$  là tập các lựa chọn khả thi tại thời điểm đó;  $\alpha$  và  $\beta$  lần lượt điều chỉnh mức ảnh hưởng của pheromone và heuristic.

Sau mỗi vòng lặp, lượng pheromone được cập nhật theo quy tắc bay hơi:

$$\tau_{t,m} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{t,m} + \Delta\tau_{t,m} \quad (5)$$

với  $\rho \in (0,1)$  là tỷ lệ bay hơi, và  $\Delta\tau_{t,m}$  là lượng pheromone được bổ sung tương ứng với nghiệm tốt nhất trong vòng lặp.

**Bước 3: Cải thiện nghiệm với LS (Local Search – LS)**

Nghiệm tốt nhất từ ACO tiếp tục được tinh chỉnh bằng các thao tác cục bộ nhằm tăng hiệu suất cân bằng (Line Efficiency – LE) và giảm độ lệch tải giữa các trạm (Smoothness Index – SI).

Các thao tác chính gồm:

- Forward fill: lấp đầy khoảng trống thời gian còn lại trong trạm bằng công đoạn khả thi tiếp theo.
- Single move: di chuyển một công đoạn giữa các trạm để cải thiện độ cân bằng.
- Swap: hoán đổi công đoạn giữa hai trạm có tải chênh lệch lớn.
- Merge/Split: Gộp hoặc tách các trạm nếu điều kiện chu kỳ cho phép.

**2.3. Thiết lập tham số và cấu hình thuật toán**

Để đảm bảo hiệu quả tìm kiếm và khả năng hội tụ của mô hình lai BFD-ACO-LS trong bài toán cân bằng dây chuyền may công nghiệp, các tham số thuật toán được thiết lập như trình bày trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Tham số thiết lập của thuật toán BFD-ACO-LS

Tham số	Giá trị
Số lượng kiến (N-ANTS)	120
Số vòng lặp ACO (N_ITEERS)	450
Ngưỡng dừng sớm ACO	40
Hệ số pheromone ( $\alpha$ )	0,9
Hệ số heuristic ( $\beta$ )	2,6
Hệ số bay hơi pheromone ( $\rho$ )	0,12
Số vòng lặp tìm kiếm cục bộ (LS)	50

### III. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

#### 3.1. Dữ liệu thực nghiệm

Dữ liệu thực nghiệm được thu thập trên một dây chuyền sản xuất áo khoác - mã hàng AT88G của Công ty may và thương mại Gio Linh – Quảng Trị gồm 90 công đoạn, 07 loại máy được sử dụng, 26 trạm (mỗi trạm do một công nhân phụ trách), thời gian chu kỳ là 286,5 giây được mô tả bên dưới (Bảng 2):

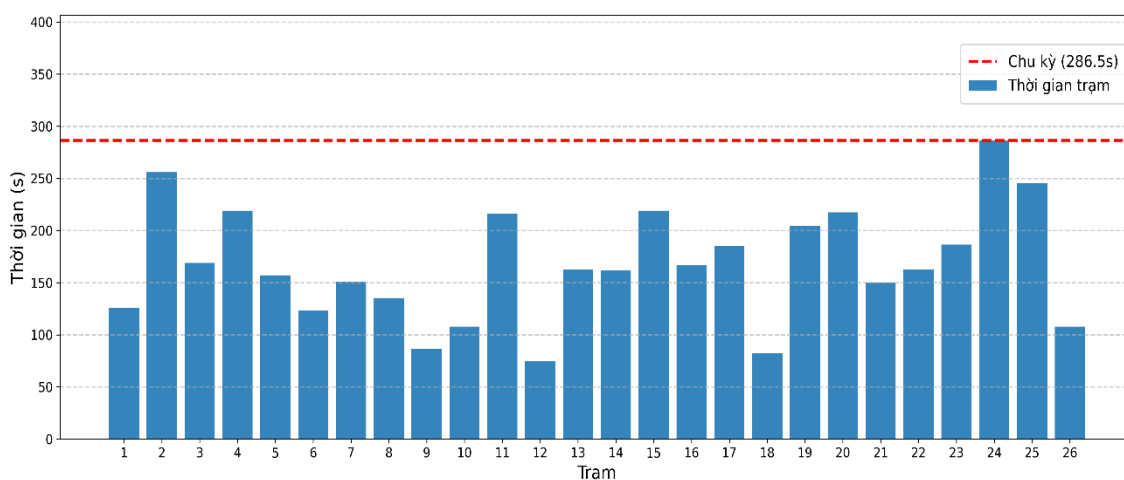
**Bảng 2.** Danh sách các công đoạn và thời gian thực hiện mỗi công đoạn

Mã công đoạn	Thời gian thực hiện	Loại máy	Quan hệ ưu tiên	Mã công đoạn	Thời gian thực hiện	Loại máy	Quan hệ ưu tiên	Mã công đoạn	Thời gian thực hiện	Loại máy	Quan hệ ưu tiên
1	11,8	-	-	31	23,55	M2	30	61	161,9	M2	60
2	5,9	-	-	32	22,2	M2	31	62	49,5	M3	58
3	14,7	-	-	33	31,9	M2	27	63	8,1	M2	57
4	14,7	-	1;2	34	44,2	M5	32	64	39,2	M2	80
5	56,9	M1	12	35	9,8	-	26	65	89,3	M2	68
6	19,1	-	4	36	27,5	M2	34	66	18,7	M3	62
7	46,1	M2	11	37	11,6	M5	36	67	18,6	M2	63
8	12,1	M2	6	38	17,9	-	35	68	78,5	M2	81
9	9,6	-	8	39	41,4	M2	33	69	18,7	M3	66
10	38,3	M2	9	40	29,9	M7	42	70	22,6	M2	67
11	41,5	M2	14	41	74,6	M7	40	71	67,7	M2	81
12	19,6	M3	15	42	26,5	M2	47	72	14,7	-	69
13	16	M4	16	43	12,8	M2	-	73	17,7	-	72
14	14,4	M4	13	44	74,6	M7	41	74	14,7	-	73
15	13,7	-	10	45	19,6	M3	43	75	99,1	M2	57
16	5,7	M5	5	46	14,7	M3	45	76	19,6	-	59
17	33,4	M6	18	47	14,7	-	46	77	70,6	M3	76
18	186,4	M1	-	48	63,8	M6	50	78	56,9	M2	71
19	204,55	M1	39	49	162,9	M1	48	79	109,9	M2	64
20	33,4	M3		50	162,9	M1	51	80	216	M2	74;87

21	40,7	M2	37	51	31,4	M2	52	81	47,1	M2	79
22	41,2	M3	25	52	32,4	M3	53	82	107,9	M2	78
23	41,2	M3	19	53	17,9	M2	3	83	39,2	M5	77
24	30,4	M3	38;20	54	75,5	M2	49	84	49,1	-	89
25	27,95	-	24	55	112,8	M1	56	85	49,1	-	88
26	8,95	M2	-	56	14,7	M6	-	86	119,7	-	84
27	33,75	M2	21	57	33,7	M2	7;23;44; 54;55;17	87	23,5	-	86
28	13,25	M2	22	58	13,9	M3	70	88	107,9	-	75
29	30,65	M2	28	59	161,9	M2	61;82	89	27,5	-	85
30	26,7	M2	29	60	48,1	M3	65	90	76,6	-	83

Nguồn: Số liệu từ công ty cổ phần may và thương mại Gio Linh

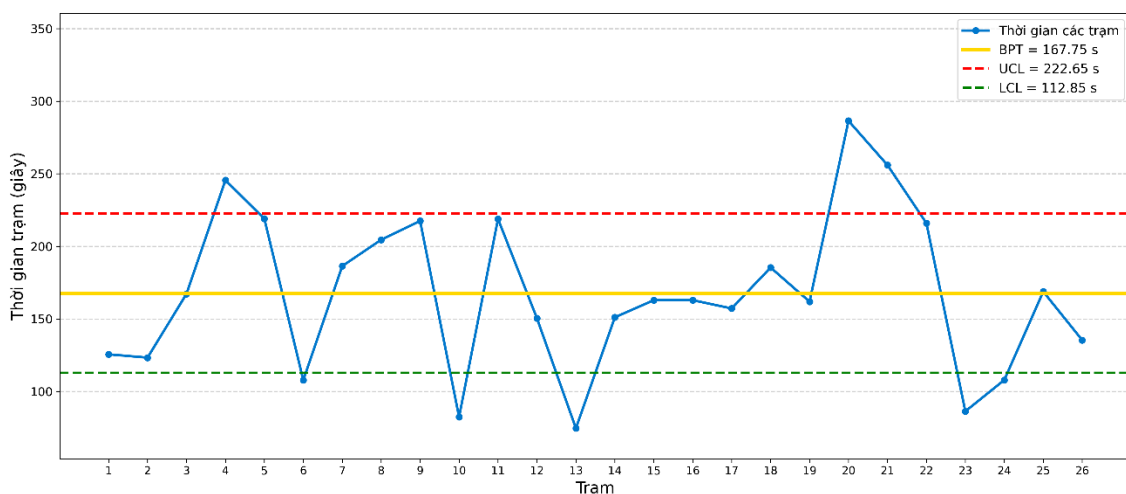
Phân bố thời gian của 26 trạm trên dây chuyền hiện tại được biểu diễn trong Hình 1. Các trạm có thời gian xử lý phân bố không đồng đều, với một số trạm có giá trị cao vượt trội (như trạm 2, 24 và 25). Đường màu đỏ biểu diễn chu kỳ dây chuyền thực tế (286,5 s), cho thấy nhiều trạm có thời gian thấp hơn đáng kể trong khi một số trạm tiệm cận mức chu kỳ. Điều này phản ánh sự mất cân đối rõ rệt trong phân bố tải giữa các trạm của dây chuyền, dẫn đến thời gian chờ giữa các trạm cao làm giảm hiệu quả vận hành tổng thể của dây chuyền.



**Hình 1.** Phân bố thời gian giữa các trạm và thời gian chu kỳ trước khi áp dụng thuật toán

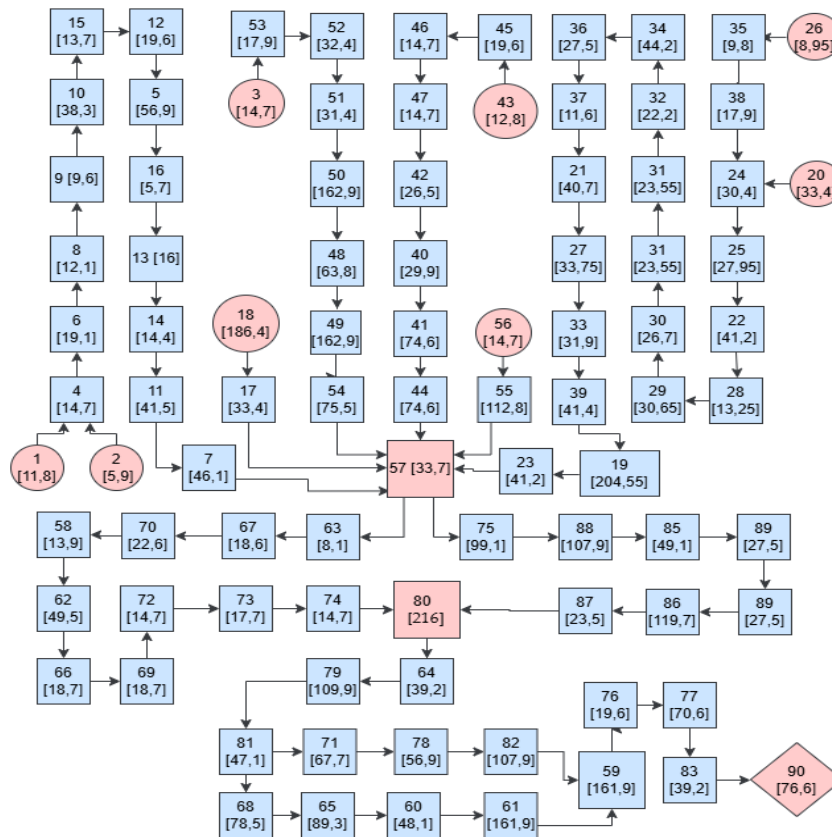
Mức độ cân bằng của dây chuyền được biểu diễn trong Hình 2 tiếp tục thể hiện sự mất cân bằng khi thời gian thao tác giữa các trạm có sự chênh lệch lớn, thể hiện qua mức biến thiên lớn giữa các giá trị cực đại và cực tiểu. Đường BPT (167,75 s) mô tả mức tải trung bình của dây chuyền, trong khi hai đường UCL (222,65 s) và LCL (112,85 s) xác định vùng giới hạn kiểm soát cho phép. Việc nhiều trạm vượt quá UCL hoặc thấp hơn LCL cho thấy dây chuyền đang ở trạng thái mất cân bằng nghiêm trọng, với mức cân

bằng chỉ đạt 55,55%, giải thích nguyên nhân khiến chu kỳ dây chuyền duy trì ở mức cao và hiệu suất vận hành thấp trước khi áp dụng các thuật toán tối ưu hóa.



Hình 2. Cân bằng dây chuyền trước khi áp dụng thuật toán (55,55%)

Để kiểm thử thuật toán BFD-ACO-LS với dữ liệu trên, bước đầu tiên chúng tôi xây dựng sơ đồ ưu tiên cho quan hệ trước-sau của các công đoạn (Hình 3). Trong sơ đồ này mỗi nút là một công đoạn kèm theo thời gian thực hiện công đoạn đó, mỗi liên kết có hướng thể hiện công đoạn nào thực hiện trước công đoạn nào thực hiện sau. Ví dụ công đoạn 4 [14,7] là công đoạn có mã số 4 có thời gian thực hiện 14,7 s và để thực hiện công đoạn 4 này cần thực hiện trước các công đoạn 1 và 2.



Hình 3. Sơ đồ ưu tiên giữa các công đoạn

3.3. Tham số

3.2. Kết quả thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, mục tiêu chính là giảm số trạm với chu kỳ CT = 216 s, tương ứng với công đoạn có thời gian thao tác lớn nhất. Đồng thời, để đánh giá chất lượng cân bằng của nghiệm, nghiên cứu sử dụng thêm ba chỉ số đánh giá gồm: LE, SI và BD (Mục 2). Dựa trên các tiêu chí này, bố trí hiện tại của dây chuyền được so sánh với phương án tối ưu hóa bằng thuật toán lai BFD-ACO-LS. Kết quả chi tiết các trạm được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả bố trí các công đoạn sau khi sử dụng thuật toán lai BFD-ACO-LS.

Trạm	Loại máy	Các công đoạn trên trạm	Thời gian làm việc của trạm (s)	Thời gian chờ của trạm (s)
1	M2/M3	2; 3; 1; 4; 35; 6; 8; 43; 9; 38; 15; 10; 53; 26	207,25	8,75
2	M3/M6	24; 25; 47; 46; 45; 56; 52; 20; 12	207,45	8,55
3	M1/M3	5; 55; 22	210,9	5,1
4	M2/M5	37; 16; 29; 31; 28; 36; 34; 30; 32	205,35	10,65
5	M2	27; 42; 51; 21; 33; 39	205,65	10,35
6	M4/M7	13; 14; 40; 44; 41	209,5	6,5

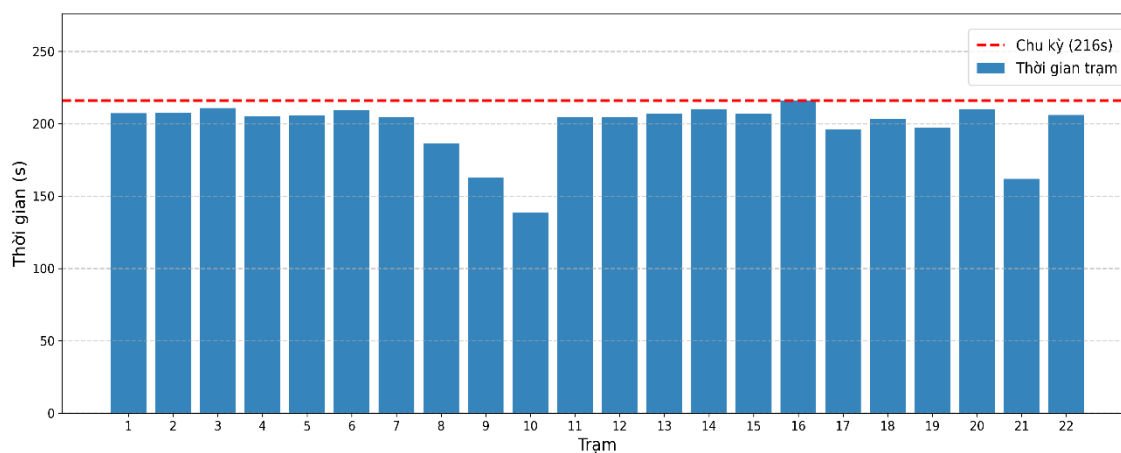
7	M1/M6	19	204,55	11,45
8	M1/M7	18	186,4	29,6
9	M1	50	162,9	53,1
10	M3/M6	48; 23; 17	138,4	77,6
11	M1/M2	11; 49	204,4	11,6
12	M2/M4	7; 54; 57; 70; 63; 67	204,6	11,4
13	M1/M2	75; 88	207	9
14	M3/M6	66; 73; 58; 89; 69; 72; 62; 85	209,8	6,2
15	M6/M7	74; 87; 84; 86	207	9
16	M2	80	216	0,0
17	M2	64; 81; 79	196,2	19,8
18	M2/M6	71; 78; 68	203,1	12,9
19	M2/M5	65; 82	197,2	18,8
20	M2/M3	61; 60	210	6
21	M2	59	161,9	54,1
22	M3/M5	83; 90; 76; 77	206	10

Sau khi áp dụng thuật toán, số trạm giảm từ 26 xuống còn 22 trạm, trong khi thời gian chu kỳ giảm từ 286,5 s xuống 216 s. Đáng chú ý, mức độ cân bằng chuyền tăng từ 55,55% lên 91,78% và độ thông suốt giảm từ 664,82 s xuống 121,35 s (Bảng 4).

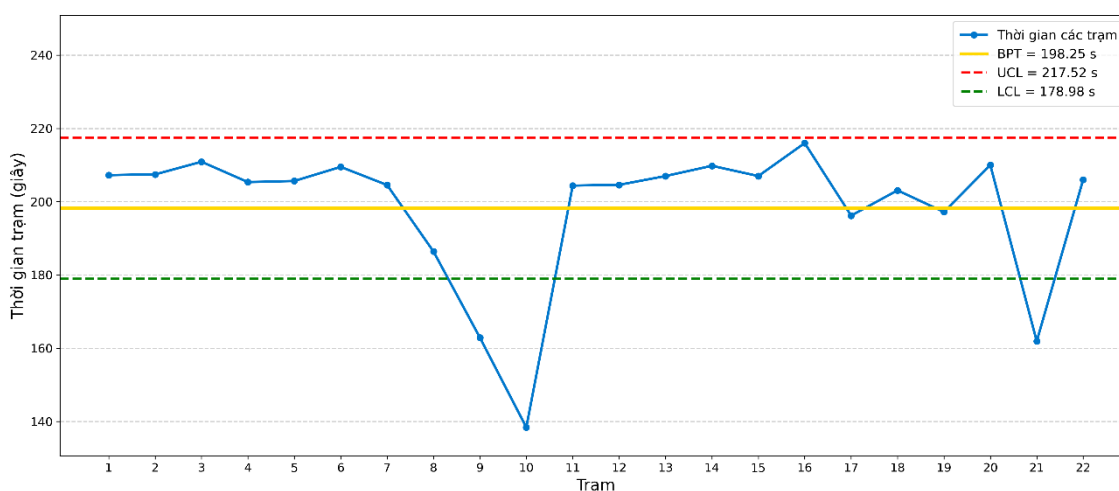
**Bảng 4.** So sánh các chỉ số LE, SI, BD giữa cách bố trí các công đoạn tối ưu bằng BFD-ACO-LS và cách bố trí thực tế tại nhà máy

Phương pháp	Thời gian chu kỳ (s)	Số trạm	Cân bằng chuyền (%)	Độ thông suốt (s)	Độ trễ (%)
Thủ công hiện tại	286,5	26	55,55%	664,82	41,45%
Tối ưu bằng BFD-ACO-LS	216	22	91,78%	121,35	82,2%

Kết quả phân bố thời gian các trạm sau tối ưu (Hình 4) cho thấy mức độ đồng đều đã được cải thiện rõ rệt, hầu hết đều tiệm cận chu kỳ 216 s. Chênh lệch thời gian giữa các trạm được thu hẹp đáng kể, không còn xuất hiện các trạm quá tải cục bộ.



**Hình 4.** Phân bố thời gian giữa các trạm và thời gian chu kỳ sau khi áp dụng thuật toán



Hình 5. Cân bằng dây chuyền sau tối ưu (91,78%)

Mức độ cân bằng chuyền (Hình 5) đã tăng từ 55,55% lên 91,78%, với phần lớn thời gian các trạm đều nằm trong vùng kiểm soát giữa UCL (218,8 s) và LCL (178,9 s), không còn trạm nào vượt quá UCL. Những kết quả này khẳng định hiệu quả của thuật toán lai BFD–ACO–LS trong việc nâng cao mức độ ổn định và hiệu suất vận hành của dây chuyền.

#### IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu này đã đề xuất và áp dụng thuật toán lai BFD–ACO–LS để giải quyết bài toán cân bằng dây chuyền may công nghiệp, trong đó xem xét đồng thời ràng buộc về quan hệ thứ tự công đoạn, thời gian thao tác và máy móc. Kết quả thực nghiệm cho thấy thuật toán giúp giảm thời gian chu kỳ từ 286,5 s xuống 216 s, số trạm từ 26 trạm xuống còn 22 trạm và hiệu suất dây chuyền tăng từ 55,55% lên đến 91,78% cao hơn đáng kể so với bố trí thủ công hiện tại. Nhờ đó, quy trình phân công công đoạn được tự động hóa hiệu quả hơn, đặc biệt phù hợp với các dây chuyền lớn.

Mặc dù đạt được nhiều kết quả tích cực, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Mô hình chưa xem xét đầy đủ các yếu tố biến động thời gian thao tác thực tế, kỹ năng cá nhân của công nhân. Đây sẽ là hướng đi tiếp theo của nghiên cứu này.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hoàn thành dưới sự hỗ trợ từ đề tài mã số K.KTCN2025-GV-01 của Khoa Kỹ thuật và Công nghệ - Đại học Huế.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Q. Dung, "The Heuristic Methods for Assembly Line Balancing Problem: A Case of Vietnam Garment Industry," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 2248–2257,

- 2019, doi: 10.22214/ijraset.2019.4407
- [2] A. A. Mastor, "An Experimental Investigation and Comparative Evaluation of Production Line Balancing Techniques," *Manage. Sci.*, vol. 16, no. 11, pp. 728–746, Jul. 1970, doi: 10.1287/mnsc.16.11.728.
- [3] A. L. Gutjahr and G. L. Nemhauser, "An Algorithm for the Line Balancing Problem," *Manage. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 308–315, 1964, doi: 10.1287/mnsc.11.2.308.
- [4] D. P. Helgeson, W. P., Birnie, "Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique," *J. Ind. Eng.*, vol. 12, no. 6, pp. 384–398, 1961.
- [5] N. Barathwaj, P. Raja, and S. Gokulraj, "Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm," *J. Cent. South Univ. 2015 2210*, vol. 22, no. 10, pp. 3957–3969, Oct. 2015, doi: 10.1007/S11771-015-2940-9.
- [6] H. Güden and S. Meral, "An adaptive simulated annealing algorithm-based approach for assembly line balancing and a real-life case study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2015 845*, vol. 84, no. 5, pp. 1539–1559, Sep. 2015, doi: 10.1007/S00170-015-7802-Y.
- [7] S. D. Lapierre, A. Ruiz, and P. Soriano, "Balancing assembly lines with tabu search," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 168, no. 3, pp. 826–837, 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.031
- [8] N. Hamta, S. M. T. Fatemi Ghomi, F. Jolai, and M. Akbarpour Shirazi, "A hybrid PSO algorithm for a multi-objective assembly line balancing problem with flexible operation times, sequence-dependent setup times and learning effect," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 141, no. 1, pp. 99–111, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.IJPE.2012.03.013.
- [9] J. Bautista and J. Pereira, "Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 177, no. 3, pp. 2016–2032, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2005.12.017.
- [10] J. F. Gonçalves and J. R. De Almeida, "A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing," *J. Heuristics*, vol. 8, no. 6, pp. 629–642, 2002, doi: 10.1023/A:1020377910258.
- [11] E. Álvarez-Miranda, J. Pereira, H. Torrez-Meruvia, and M. Vilà, "A hybrid genetic algorithm for the simple assembly line balancing problem with a fixed number of workstations," *Mathematics*, vol. 9, no. 17, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/math9172157
- [12] Đinh Mai Hương, "Nghiên cứu tối ưu cân bằng dây chuyền công nghiệp may sản phẩm dệt kim," *Luận án tiến sĩ công nghệ dệt may*, 2022.
- [13] A. Scholl and C. Becker, "State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 168, no. 3, pp. 666–693, Feb. 2006, doi: 10.1016/J.EJOR.2004.07.022.

---

**APPLICATION OF A HYBRID BFD–ACO–LS ALGORITHM TO THE ASSEMBLY  
LINE BALANCING PROBLEM IN THE GARMENT INDUSTRY**

**Loi Hoang Trong<sup>1\*</sup>, Nguyen Thi Ha Phuong<sup>1</sup>,**

**Nguyen Thi Hai Le<sup>1</sup>, Nguyen Tan Tan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> School of Engineering and Technology, Hue University

\* Email: hoangtrongloi@hueuni.edu.vn

**Abstract:** The assembly line balancing problem in the garment industry is a complex task influenced by various constraints such as production cycle time, task precedence, and machine or equipment limitations. This is a large-scale problem belonging to the NP-hard class, making it impossible to obtain an exact solution within a reasonable time. This study proposes a hybrid BFD–ACO–LS algorithm, which integrates Best-Fit Decreasing (BFD) to generate an initial feasible solution, Ant Colony Optimization (ACO) for global search, and Local Search (LS) for local refinement. Experiments conducted on a garment production line with 90 operations show that the number of workstations was reduced from 26 to 22, while line balancing efficiency increased from 55.55% to over 90%. These results confirm the effectiveness and applicability of the hybrid BFD–ACO–LS algorithm in optimizing garment assembly lines.

**Keywords:** line balancing, hybrid algorithm, ant colony optimization (ACO), optimization.