

NGHIÊN CỨU LẬP LỊCH SẢN XUẤT LINH HOẠT CHO NGÀNH SƠN: ỨNG DỤNG MÔ HÌNH MILP VÀ THUẬT TOÁN HEURISTICS

A STUDY ON FLEXIBLE FLOW SHOP SCHEDULING IN THE PAINT INDUSTRY:
APPLICATION OF MILP MODEL AND HEURISTICS ALGORITHM

Lê Thị Yến Vy

Khoa Quản lý Công nghiệp, Trường Đại học Quốc tế, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
Email: levy.vt294@gmail.com

TÓM TẮT

Trong sản xuất công nghiệp hiện đại, lập lịch sản xuất là công cụ trung tâm để đảm bảo đơn hàng giao đúng hạn, giảm chi phí và nâng cao hiệu quả sử dụng nguồn lực. Ngành sơn bột tĩnh điện, với đặc thù quy trình nhiều công đoạn, nhiều máy song song và thời gian setup phụ thuộc trình tự, là một ví dụ điển hình của môi trường Flexible Flow Shop (FFS). Nếu lập lịch thủ công, doanh nghiệp thường phải đối diện với tỷ lệ giao trễ cao, máy móc hoạt động không đồng đều và chi phí setup lớn.

Bài báo này đề xuất khung giải pháp hai tầng. Trước hết, mô hình toán Mixed Integer Linear Programming (MILP) được xây dựng để tìm nghiệm tối ưu cho bộ dữ liệu nhỏ và kiểm chứng mô hình. Tiếp đó, một thuật toán heuristics được thiết kế để xử lý dữ liệu lớn hơn, với mục tiêu rút ngắn thời gian tính toán và tạo lịch khả thi. Kết quả thực nghiệm tại Công ty AkzoNobel cho thấy MILP đạt makespan tối ưu với bộ dữ liệu nhỏ (5 công việc, 8 máy, 3 công đoạn), trong khi heuristics giải quyết thành công bộ dữ liệu lớn (41 công việc, 19 máy, 7 công đoạn) chỉ trong 14,6 giây.

Kết quả nghiên cứu khẳng định sự bổ sung giữa hai phương pháp: MILP mang tính chuẩn mực, trong khi heuristics phù hợp ứng dụng thực tiễn. Hướng nghiên cứu tiếp theo gồm metaheuristics, tối ưu đa mục tiêu và lập lịch động theo dữ liệu thời gian thực.

Từ khóa: Flexible Flow Shop; Setup phụ thuộc trình tự; MILP; Heuristics; AkzoNobel.

ABSTRACT

In modern manufacturing, scheduling is central to ensuring on-time delivery, reducing costs, and improving resource utilization. Powder coating production, characterized by multiple stages, parallel machines, and sequence-dependent setup times, represents a typical Flexible Flow Shop (FFS) environment. Manual scheduling often results in high tardiness rates, unbalanced machine loads, and excessive setup costs.

This paper proposes a two-layer solution framework. First, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is developed to provide optimal solutions for small datasets and

validate the model's correctness. Then, a heuristics algorithm is designed to handle large-scale datasets, aiming to reduce computation time while generating feasible schedules. Experimental results from AkzoNobel show that MILP achieves optimal makespan on a small dataset (5 jobs, 8 machines, 3 stages), while the heuristics algorithm successfully schedules a large dataset (41 jobs, 19 machines, 7 stages) in only 14.6 seconds.

The findings highlight the complementary roles of MILP and heuristics: MILP provides optimal benchmarks, while heuristics ensures practical feasibility. Future research directions include hybrid metaheuristics, multi-objective optimization, and dynamic scheduling with real-time data.

Keywords: Flexible Flow Shop; Sequence-dependent Setup; MILP; Heuristics; AkzoNobel.

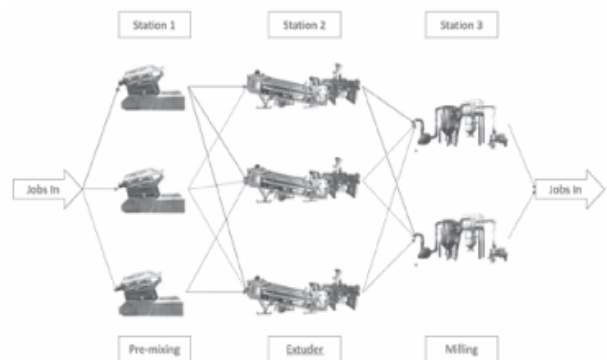
1. TỔNG QUAN

Lập lịch sản xuất là vấn đề quan trọng trong quản lý sản xuất, đóng vai trò cầu nối giữa kế hoạch chiến lược và hoạt động vận hành hàng ngày. Đối với ngành sơn bột, quy trình sản xuất gồm nhiều công đoạn như trộn, đun, nghiền, sàng lọc, đóng gói. Ở mỗi công đoạn tồn tại nhiều máy song song, không đồng nhất, dẫn đến việc phân công và sắp xếp công việc trở nên phức tạp. Đặc biệt, yếu tố làm tăng độ khó của bài toán là thời gian setup phụ thuộc trình tự: khi đổi từ màu đậm sang màu nhạt cần nhiều thời gian vệ sinh hơn so với đổi ngược lại.

Thực tế tại Công ty AkzoNobel cho thấy hệ thống lập lịch thủ công bằng Excel gây ra nhiều hạn chế. Năm 2024, có hơn 75% đơn hàng bị giao trễ so với cam kết. Nguyên nhân chính là việc phân công không khoa học khiến máy móc mất cân đối, thời gian setup tăng cao, ảnh hưởng đến năng suất chung.

Trong nghiên cứu trước, Cortés (2011) đề xuất mô hình đa mục tiêu cho flow shop với máy song song. Sun và Klein (2007) nghiên cứu lập lịch một máy với setup phụ thuộc. Wang và cộng sự (2019) phát triển giải pháp cho flow shop nhiều giai đoạn có setup. Tuy

nhien, ít công trình nào áp dụng trực tiếp cho ngành sơn bột, nơi dữ liệu lớn và setup chiếm vai trò then chốt.



Hình 1. Quy trình tổng quát sản xuất sơn bột với nhiều công đoạn và máy song song.

2. ĐỀ XUẤT NGUYÊN LÝ LẬP LỊCH TRONG FFS

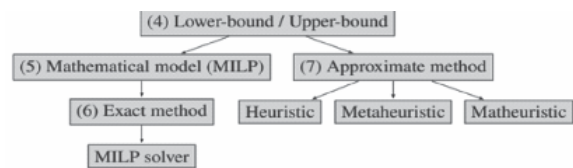
2.1. Nguyên lý làm việc

Bài toán lập lịch trong môi trường Flexible Flow Shop (FFS) có bản chất là tổ chức dòng công việc qua nhiều công đoạn, mỗi công đoạn có nhiều máy song song không đồng nhất. Nguyên lý vận hành của hệ thống lập lịch được đề xuất trong nghiên cứu này là kết hợp giữa tối ưu hóa chính xác bằng mô hình MILP và xấp xỉ bằng thuật toán heuristics.



Mô hình MILP được thiết kế để mô tả đầy đủ các yếu tố cốt lõi của hệ thống, bao gồm phân công công việc vào máy, trình tự thực hiện, thời gian bắt đầu – kết thúc, và các ràng buộc liên quan đến setup phụ thuộc trình tự. Khi chạy mô hình trên dữ liệu nhỏ, MILP cho phép tìm nghiệm tối ưu, từ đó cung cấp chuẩn tham chiếu để đánh giá chất lượng các thuật toán xấp xỉ.

Trong khi đó, thuật toán heuristics hoạt động theo nguyên tắc ưu tiên động. Mỗi công việc khi đến công đoạn sẽ được gán cho máy rảnh sớm nhất, xét đến thời gian setup nếu đổi loại sản phẩm. Quy tắc lựa chọn công việc dựa trên hạn giao hoặc thời gian xử lý ngắn nhất, nhằm vừa giảm makespan vừa hạn chế đơn hàng trễ hạn. Nhờ cơ chế này, hệ thống có khả năng sinh lịch khả thi nhanh chóng, phù hợp để triển khai hằng ngày trong môi trường sản xuất thực tế.



Hình 2. Sơ đồ thể hiện giữa hai phương pháp MILP và heuristics

2.2. Các thông số cơ bản của hệ thống lập lịch

Để làm rõ đặc điểm của hai cách tiếp cận, nghiên cứu phân tích các thông số cơ bản khi áp dụng MILP và heuristics.

Với mô hình MILP, hệ thống được đặc trưng bởi tập hợp biến nhị phân và biến liên tục bao gồm: biến gán công việc – máy, biến xác

định trình tự giữa các công việc, biến thời gian bắt đầu và kết thúc, và biến trễ hạn. Hàm mục tiêu duy nhất là tối thiểu hóa makespan. Các ràng buộc chính bao gồm: mỗi công việc chỉ được gán cho một máy tại mỗi trạm, tuân thủ trình tự qua các trạm, không có hai công việc trùng lặp trên cùng máy, và thời gian setup phụ thuộc trình tự được cộng vào giữa hai công việc liên tiếp. Với cấu trúc này, MILP cho nghiệm tối ưu nhưng thời gian tính toán tăng nhanh khi số jobs và số máy lớn.

Bảng 1. Các thông số cơ bản của bài toán MILP

X_{im}	Biến nhị phân, $X_{im} = 1$ nếu job i gán cho máy m
B_{ia}	Thời gian bắt đầu của job i trên công đoạn a
F_{ia}	Thời gian kết thúc của job i trên công đoạn a
Y_{ijm}	Biến nhị phân, nếu i được gán trước j trên cùng một máy m ; otherwise $Y_{ijm} = 0$
L_i	Biến nhị phân, $L_i = 1$ nếu job i trễ, $L_i = 0$ ngược lại

Trong khi đó, thuật toán heuristics được mô tả bằng các thông số điều khiển đơn giản hơn. Input của heuristics là tập jobs, danh sách stations và nhóm máy song song ở mỗi trạm, bảng thời gian xử lý và ma trận setup phụ thuộc loại sản phẩm. Nguyên tắc vận hành gồm: chọn công việc theo quy tắc ưu tiên (EDD, SPT hoặc ATC), gán cho máy rảnh sớm nhất, cộng thêm thời gian setup nếu có sự thay đổi loại sản phẩm, và cập nhật lại lịch cho vòng lặp tiếp theo. Các thông số đầu vào không thay đổi, nhưng cơ chế xử lý giảm đáng kể độ phức tạp toán học, cho phép heuristics giải quyết dữ liệu lớn trong vài giây thay vì không khả thi như MILP.



Hình 3. Sơ đồ khối của Heuristics

Bảng 2. Mô hình MILP được lập trình khi giải bằng phần mềm CPLEX

No	Equation	Constraint
1	$Z = \sum_{i=1}^i Li$	Calculates the total late orders
2	$Cmax \geq Fia$ $\forall i, a \in FinSet$	Defines the make span which is the time to complete a job
3	$\sum_{<m,a> \in CellSet} Xim = 1,$ $\forall i, a \in NodeSet$	Ensures that every job at one station is only assigned once
4	$Fia \geq Bia + \sum_{<s,m> \in CellSet} Xim \times pim$ $\forall i, a \in NodeSet$	Guarantees that finishing time of job i must be greater than sum of the beginning time and processing time
5	$Fia \leq Bik, \forall i, a, k \in ArcSet$	Clarifies that for each job, the job must satisfy the workstation sequence constraint. Particularly, the beginning of job k would be after the job is done before
6	$Yijm + Yjim \leq Xim, \forall i, j, m \in SeSet$	
7	$Yijm + Yjim \leq Xjm, \forall i, j, m \in SeSet$	
8	$Yijm + Yjim \geq Xim + Xjm - 1$ $\forall i, j, m \in SeSet$	Describe that only one of two job i and j is assigned on machine m and processed before the other
9	$Fia + sijm - BigM \times (1 - Yij,m) \leq Bja$ $\forall m, a \in CellSet \forall i, j, m \in SeSet i \neq j$	Ensures that the beginning of job j would be after that of job i including the processing time and setup time for job i.
10	$dia - BigM \times (1 - Li) \leq Fia$ $\forall i, a \in FinSet$	Identify the lateness of order. One order is late if finishing time of job i at station a is larger than its due date
11	$dia + BigM \times Li \geq Fia$ $\forall i, a \in FinSet$	



Mô hình MILP được lập trình và giải bằng phần mềm CPLEX. Với cấu trúc này, mô hình cho phép tìm nghiệm tối ưu ở bộ dữ liệu nhỏ, đồng thời đóng vai trò làm chuẩn tham chiếu để đánh giá chất lượng của các phương pháp xấp xỉ. Tuy nhiên, với bộ dữ liệu lớn (L) gồm 41 công việc, 7 trạm và 19 máy, số biến và ràng buộc bùng nổ khiến MILP không thể tìm được nghiệm trong thời gian hợp lý.

Thuật toán heuristics được xây dựng để khắc phục hạn chế về quy mô của MILP. Input của heuristics là tập công việc, danh sách các trạm với máy song song, thời gian xử lý và ma trận setup phụ thuộc loại sản phẩm/màu.

Nguyên tắc vận hành gồm: chọn công việc theo quy tắc ưu tiên (EDD trong nghiên cứu này), gán vào máy rảnh sớm nhất, cộng thêm thời gian setup nếu có thay đổi loại sản phẩm, và cập nhật lại lịch để lặp cho đến khi toàn bộ công việc hoàn tất.

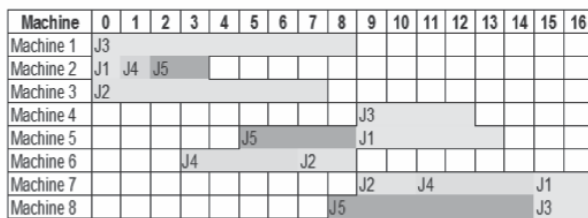
Heuristics được lập trình trên MATLAB và áp dụng cho cả hai bộ dữ liệu S và L. Ở bộ dữ liệu nhỏ, heuristics cho nghiệm gần tối ưu, làm cơ sở so sánh với MILP. Ở bộ dữ liệu lớn, heuristics chứng minh khả năng mở rộng với thời gian tính toán chỉ vài giây, trong khi MILP không khả thi.

Bảng 3. Mô hình thuật toán heuristics khi được giải bằng phương pháp MATLAB

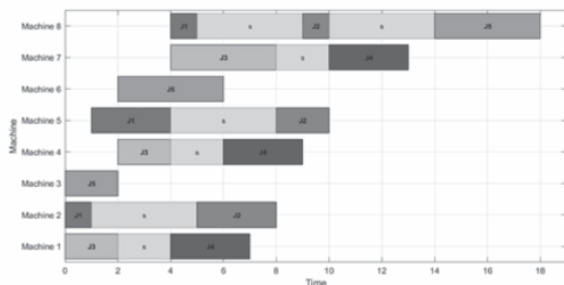
Lines	Dataset Generation
1	Input data information
2	Assign jobs to a machine
3	If a job is not completed & machine is available
4	Enter time = max (job_release time, machine_release time)
5	Beginning time = Enter time
6	If job is not completed & machine has previous jobs processing
7	Last job ID = last position of job sequence in machine
8	Enter time = machine_release time
9	Beginning time = Enter time + Setup time
10	Finishing time = Beginning time + Processing time
11	Departure time = Release time
12	Assign jobs to a station
13	Evaluate job and machine with setup time
14	If evaluated job_release time (end) < max (station_release time)
15	max (station_release time) = evaluated job_release time (end)
16	Update machine_candidate = evaluated machine
17	Update job_candidate = evaluated job
18	Assign a job to station and machine
19	If machine_candidate_release time < assigned job_finish
20	time Finish job = job_candidate
21	Finish machine = machine_candidate
22	Assigned job_finish time = finish machine_release time

3.2. Phân tích kết quả mô phỏng

Mô phỏng với lượng công việc nhỏ bao gồm 3 công đoạn, 8 máy và 5 công việc. Hình 4a, mô phỏng MILP, kết quả thực hiện không có kết quả trễ lịch và đều đúng thời gian EDD. Hình 4b, mô tả thuật toán heuristics lại trễ hơn so với MILP là 2 ngày so với EDD (chỉ kéo dài đến 16 ngày).

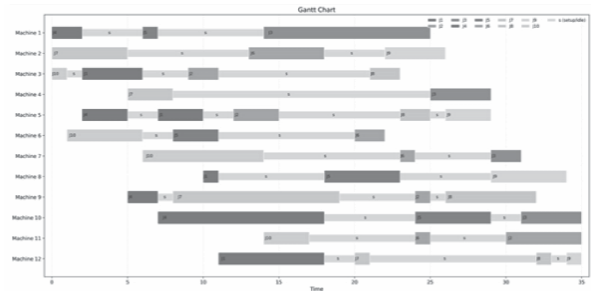


Hình 4a. Gantt chart của MILP cho 5 công việc, 3 công đoạn và 8 máy móc.

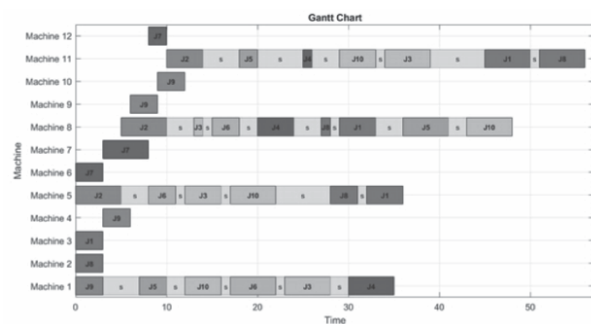


Hình 4b. Gantt chart của Heuristics cho 5 công việc, 3 công đoạn và 8 máy móc.

Tương tự như vậy, khi tăng khối lượng công việc, công đoạn và máy móc lần lượt theo thứ tự (10, 4, 12) trước khi đưa lên mức mô phỏng với thực tế của sản xuất, bao gồm 7 công đoạn, 19 máy và 41 công việc. Hình 4c, 4d thể hiện Gantt chart của MILP và Heuristics cho thấy MILP vẫn đưa ra kết quả tối ưu hơn (35 ngày due date so với kết quả Heuristics là 56 ngày).



Hình 4c. Gantt chart của MILP cho 10 công việc, 4 công đoạn và 12 máy móc.

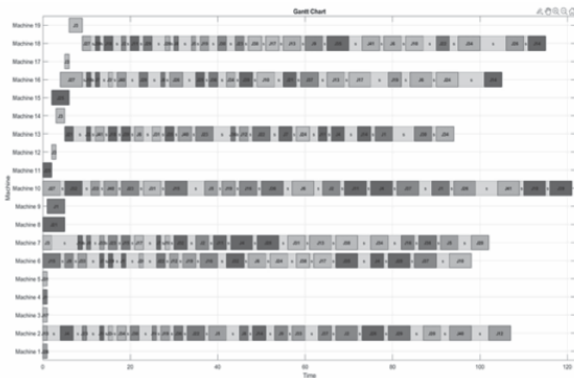


Hình 4d. Gantt chart của heuristics cho 10 công việc, 4 công đoạn và 12 máy móc

3.3. Khả năng ứng dụng vào thực tế

Hình 5 là kết quả mô phỏng lượng công việc ở thực tế trong một ngày của công ty AkzoNobel gồm 7 công đoạn, 19 máy móc và 41 công việc cần thực hiện, MILP bộc lộ hạn chế nghiêm trọng. Số biến và ràng buộc của mô hình tăng lên mức không thể xử lý trong thời gian hợp lý, do đó MILP không thể tìm được nghiệm khả thi. Ngược lại, heuristics vẫn vận hành hiệu quả. Kết quả cho thấy heuristics xây dựng lịch khả thi với makespan bằng 120 trong thời gian tính toán chỉ 14,6 giây. Khi xét thêm hạn giao chặt chẽ, có hai công việc bị trễ, song điều này vẫn chấp nhận được trong bối cảnh thực tế công nghiệp, nơi dữ liệu biến động liên tục và yêu cầu tốc độ ra quyết định cao.





Hình 5. Kết quả sử dụng thuật toán Heuristics chứng minh được tính khả thi khi ứng dụng thực tế.

Bảng 4. So sánh kết quả giữa MILP và heuristics

Bộ dữ liệu	Phương pháp	Makespan	Thời gian tính toán	Số đơn trễ hạn
Nhỏ (S)	MILP (CPLEX)	16	2,3 giây	0
Nhỏ (S)	Heuristics	18	2,6 giây	0
Nhỏ (S)	MILP (CPLEX)	35	120 giây	0
Nhỏ (S)	Heuristics	56	60 giây	0
Lớn (L)	MILP (CPLEX)	–	–	–
Lớn (L)	Heuristics	120	14,6 giây	2

Từ phân tích này có thể thấy rằng MILP đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp chuẩn tối ưu để đánh giá, nhưng không thể áp dụng cho quy mô công nghiệp. Ngược lại, heuristics chứng minh được tính khả thi, tốc độ và khả năng mở rộng, do đó là lựa chọn phù hợp hơn cho bài toán lập lịch sản xuất linh hoạt trong ngành sơn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng khung lập lịch sản xuất linh hoạt có xét đến setup phụ thuộc

trình tự, kết hợp mô hình MILP và thuật toán heuristics. Kết quả cho thấy MILP phù hợp với dữ liệu nhỏ, cung cấp nghiệm tối ưu làm chuẩn tham chiếu, trong khi heuristics hiệu quả với dữ liệu lớn, cho lịch khả thi nhanh và gần tối ưu. Heuristics nhờ đó là giải pháp phù hợp để ứng dụng trong thực tế công nghiệp, giúp giảm tỷ lệ trễ hạn, nâng cao hiệu quả sử dụng máy và rút ngắn thời gian lập lịch.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được hướng dẫn bởi thầy Phan Nguyễn Kỳ Phúc và sự giúp đỡ bộ phận Kế hoạch – Sản xuất của Công ty AkzoNobel đã hỗ trợ cung cấp dữ liệu và đóng góp ý kiến trong quá trình nghiên cứu. Lời cảm ơn cũng xin được gửi đến các đồng nghiệp đã tham gia góp ý và giúp hoàn thiện bài báo này.❖

Ngày nhận bài: 20/8/2025

Ngày phản biện: 09/9/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Cortés, B., “Flow-shop scheduling with multiple objectives and parallel machines”. European Journal of Operational Research (2011).
- [2]. Sun, X., Noble, J. S., Klein, C. M., “Single-machine scheduling with sequence-dependent setup”. Journal of Scheduling (2007).
- [3]. Wang, W., Wang, J., Yu, G., “Two-stage mixed-shop scheduling with sequence-dependent setup”. Computers & Operations Research (2019).
- [4]. Lê Thị Yến Vy, “A Flexible Flow Shop Scheduling Problem: A Case Study of Paint Company”. Luận văn cao học, Trường Đại học Quốc tế – Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (2025).
- [5]. Kazemi, M., et al., “Flexible flow shop with sequence-dependent setups”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2013).