

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG DÂY CHUYỀN SMT NHẪM PHÂN TÍCH NĂNG SUẤT VÀ XÁC ĐỊNH NÚT THẮT TRONG SẢN XUẤT CÔNG NGHIỆP

MODELING AND SIMULATION OF AN SMT PRODUCTION LINE FOR PRODUCTIVITY ANALYSIS AND BOTTLENECK IDENTIFICATION IN INDUSTRIAL MANUFACTURING

Phạm Minh Ngọc*, Nguyễn Thị Minh Anh

Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email: ngocpm.mtb@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu mô hình hóa và mô phỏng dây chuyền SMT nhằm phân tích năng suất và xác định nút thắt trong sản xuất công nghiệp. Trên cơ sở dữ liệu thực tế của một dây chuyền lắp ráp bảng mạch điện tử gồm 750 PCB đầu vào, nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc bằng phần mềm ARENA Rockwell để mô tả dòng dịch chuyển của sản phẩm qua các công đoạn chính như in kem hàn, kiểm tra SPI, gắn linh kiện, kiểm tra quang học và hàn hồi lưu. Kết quả phân tích cho thấy thời gian một PCB đi qua toàn bộ dây chuyền xấp xỉ 10,54 phút, trong khi tổng thời gian hoàn thành lô sản xuất khoảng 12,68 giờ trong điều kiện vận hành cơ sở. Phân tích năng lực xử lý cho thấy cụm máy gắn linh kiện, đặc biệt là PnP1 và PnP2, là nhóm công đoạn có nguy cơ trở thành nút thắt theo thiết kế. Tuy nhiên, với tốc độ cấp liệu hiện tại là 60 PCB/giờ, công đoạn đầu vào đang đóng vai trò giới hạn nhịp sản xuất thực tế của toàn dây chuyền. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình hóa và mô phỏng là công cụ hữu ích trong đánh giá đặc điểm vận hành, nhận diện nút thắt và hỗ trợ định hướng cải tiến dây chuyền SMT trong doanh nghiệp sản xuất công nghiệp.

Từ khóa: Dây chuyền SMT; Mô phỏng sự kiện rời rạc; ARENA Rockwell; Năng suất; Nút thắt; Sản xuất công nghiệp.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation of an SMT production line for productivity analysis and bottleneck identification in industrial manufacturing. Based on real operational data from an electronic assembly line with 750 input PCBs, a discrete-event simulation model was developed in ARENA Rockwell to represent the product flow through key stages, including solder paste printing, SPI inspection, component placement, optical inspection, and reflow soldering. The results indicate that the average time for a PCB to pass through the entire line is approximately 10.54 minutes, while the total completion time for the production batch is about 12.68 hours under the baseline operating condition. The capacity analysis shows that the component placement cluster, especially PnP1 and PnP2, has the highest potential to become the design bottleneck of the

line. However, with the current input rate of 60 PCBs per hour, the input stage acts as the actual production-rate constraint of the whole system. The findings confirm that modeling and simulation is an effective approach for evaluating operational performance, identifying bottlenecks, and supporting improvement decisions for SMT production lines in industrial manufacturing.

Keywords: *SMT production line; Discrete-event simulation; ARENA Rockwell; Productivity; Bottleneck; Industrial manufacturing.*

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh ngành sản xuất điện tử ngày càng đòi hỏi năng suất cao, chất lượng ổn định và khả năng đáp ứng linh hoạt, dây chuyền SMT (Surface Mount Technology) giữ vai trò quan trọng trong quá trình lắp ráp bảng mạch điện tử. Dây chuyền này bao gồm nhiều công đoạn liên tiếp như in kem hàn, kiểm tra kem hàn, gắn linh kiện, kiểm tra quang học và hàn hồi lưu. Do tính liên kết chặt chẽ giữa các công đoạn, hiệu quả toàn dây chuyền có thể bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự mất cân bằng thời gian xử lý, hiện tượng chờ và sự khác biệt về năng lực giữa các trạm. Trong thực tế, việc đánh giá hiệu quả vận hành dây chuyền SMT nếu chỉ dựa trên theo dõi hiện trường thường khó phản ánh đầy đủ đặc tính động của hệ thống. Các chỉ tiêu như thời gian chu kỳ, năng suất hay tỷ lệ lỗi có thể được ghi nhận tại từng công đoạn, nhưng việc xác định chính xác nút thắt của toàn dây chuyền vẫn là một vấn đề phức tạp. Vì vậy, cần có một phương pháp phù hợp để mô tả quá trình vận hành và hỗ trợ phân tích hệ thống một cách toàn diện [1-4].

Mô hình hóa và mô phỏng là công cụ hiệu quả trong nghiên cứu các hệ thống sản xuất công nghiệp, cho phép tái hiện hoạt động của dây chuyền trong môi trường số, đánh giá các chỉ tiêu vận hành và nhận diện công đoạn giới hạn năng suất. Trên cơ sở đó, doanh nghiệp có thể phân tích hiện trạng và đề xuất các phương án cải tiến trước khi áp dụng trong thực tế. Xuất phát từ yêu cầu đó, bài báo này tập trung vào mô

hình hóa và mô phỏng dây chuyền SMT nhằm phân tích năng suất và xác định nút thắt trong sản xuất công nghiệp. Nghiên cứu sử dụng dữ liệu thực tế của dây chuyền để xây dựng mô hình mô phỏng, qua đó đánh giá đặc trưng vận hành của hệ thống và xác định công đoạn ảnh hưởng lớn đến năng lực thông qua toàn tuyến. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ khả năng ứng dụng mô phỏng trong phân tích và cải tiến dây chuyền SMT trong doanh nghiệp sản xuất.

2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU VÀ CƠ SỞ DỮ LIỆU

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là một dây chuyền SMT sử dụng trong lắp ráp bảng mạch điện tử trong môi trường sản xuất công nghiệp. Dây chuyền gồm các công đoạn chính: nạp PCB, in kem hàn, kiểm tra kem hàn, gắn linh kiện, kiểm tra quang học trước lò, hàn hồi lưu, kiểm tra quang học sau lò và chuyển sang công đoạn lắp ráp tiếp theo. Trong nghiên cứu này, mỗi PCB được xem như một đơn vị sản phẩm di chuyển tuần tự qua các trạm công nghệ để phục vụ phân tích năng suất và xác định công đoạn nút thắt của hệ thống.

Dữ liệu được thu thập từ một lô sản xuất gồm 750 PCB đầu vào. Các thông số chính bao gồm năng suất cấp liệu, thời gian xử lý trung bình tại từng công đoạn, thông số vận hành của lò hàn và tỷ lệ chất lượng tại các trạm kiểm tra. Cụ thể, công đoạn đầu vào có năng suất 60 PCB/giờ. Thời gian xử lý trung bình tại các công đoạn lần lượt là 26,1 giây đối với

máy in kem hàn, 14,89 giây tại SPI, 45,54 giây tại PnP1, 46,06 giây tại PnP2, 39,89 giây tại PnP3, 38,36 giây tại PnP4, 8,97 giây tại AOI-F và 21,86 giây tại AOI-B. Riêng AOI-B có thời gian chu kỳ thực tế là 30,53 giây do cần bổ sung thao tác kiểm tra bằng mắt trong một số trường hợp.

Đối với lò hàn hồi lưu, dữ liệu vận hành gồm tốc độ băng tải 110 cm/phút và chiều dài lò 7 m. Tại công đoạn SPI, tỷ lệ PCB đạt là 88,97%, tỷ lệ lỗi là 0,41% và tỷ lệ chấp nhận được là 10,62%. Nhìn chung, bộ dữ liệu này cho phép mô tả dòng dịch chuyển của PCB qua các công đoạn chính và là cơ sở để xây dựng mô hình mô phỏng dây chuyền SMT.

Nghiên cứu tập trung vào mô hình hóa và mô phỏng các công đoạn chính của dây chuyền SMT nhằm đánh giá năng suất và xác định công đoạn có khả năng gây nút thắt. Trong phạm vi bài báo, dữ liệu chủ yếu được sử dụng dưới dạng giá trị trung bình, chưa xét đến các yếu tố như phân bố xác suất thời gian xử lý, thời gian dừng máy, thay đổi mã sản phẩm hay tối ưu hóa lịch sản xuất. Vì vậy, mô hình được xây dựng ở mức cơ sở, phù hợp với mục tiêu phân tích đặc trưng vận hành của dây chuyền từ dữ liệu thực tế. Các thông số vận hành chính của dây chuyền SMT được tổng hợp trong Bảng 1 và được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho quá trình mô hình hóa và mô phỏng.

Bảng 1. Thông số vận hành chính của dây chuyền SMT nghiên cứu

STT	Công đoạn	Thiết bị/Trạm	Thông số chính	Giá trị	Đơn vị
1	Đầu vào PCB	Input	Sản lượng đầu vào	750	PCB
2	Đầu vào PCB	Input	Năng suất cấp liệu	60	PCB/h
3	In kem hàn	Solder Printer	Thời gian xử lý	26,1	s/PCB
4	In kem hàn	Solder Printer	Tốc độ in	40	mm/s
5	Kiểm tra kem hàn	SPI	Thời gian kiểm tra	14,89	s/PCB
6	Kiểm tra kem hàn	SPI	Tỷ lệ đạt	88,97	%
7	Kiểm tra kem hàn	SPI	Tỷ lệ lỗi	0,41	%
8	Kiểm tra kem hàn	SPI	Tỷ lệ chấp nhận (PASS)	10,62	%
9	Gắn linh kiện 1	PnP1	Thời gian xử lý	45,54	s/PCB
10	Gắn linh kiện 2	PnP2	Thời gian xử lý	46,06	s/PCB
11	Gắn linh kiện 3	PnP3	Thời gian xử lý	39,89	s/PCB
12	Gắn linh kiện 4	PnP4	Thời gian xử lý	38,36	s/PCB
13	Kiểm tra trước lò	AOI-F	Thời gian kiểm tra	8,97	s/PCB
14	Hàn hồi lưu	Reflow	Tốc độ băng tải	110	cm/min
15	Hàn hồi lưu	Reflow	Chiều dài lò	7	m
16	Kiểm tra sau lò	AOI-B	Thời gian kiểm tra	21,86	s/PCB
17	Kiểm tra sau lò	AOI-B	Thời gian chu kỳ thực tế	30,53	s/PCB
18	Kiểm tra sau lò	AOI-B	Tỷ lệ lỗi thực	0,26	%

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHÒNG

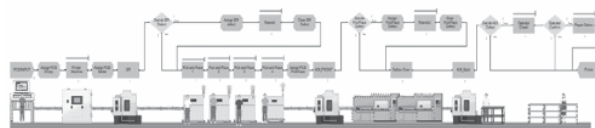
Trong nghiên cứu này, dây chuyền SMT được mô hình hóa theo phương pháp mô phỏng sự kiện rời rạc bằng phần mềm ARENA Rockwell [5]. Mỗi bảng mạch PCB được xem là một thực thể di chuyển tuần tự qua các công đoạn của hệ thống. Các trạm như in kem hàn, kiểm tra kem hàn, gắn linh kiện, kiểm tra quang học và hàn hồi lưu được biểu diễn như các phần tử xử lý trong mô hình. Cách tiếp cận này cho phép mô tả dòng dịch chuyển của sản phẩm, thời gian xử lý tại từng công đoạn và mối quan hệ trước – sau giữa các trạm trong toàn dây chuyền.

Mô hình được xây dựng bám sát trình tự công nghệ thực tế của dây chuyền SMT, gồm các công đoạn: nạp PCB, in kem hàn, kiểm tra SPI, gắn linh kiện tại các máy PnP1 đến PnP4, kiểm tra AOI-F, hàn hồi lưu, kiểm tra AOI-B và chuyển sang công đoạn lắp ráp tiếp theo. Trong đó, các PCB được giả thiết di chuyển theo đúng thứ tự công nghệ của dây chuyền.

Dữ liệu đầu vào của mô hình bao gồm sản lượng đầu vào, thời gian xử lý trung bình tại từng công đoạn, thông số vận hành của lò hàn hồi lưu và một số tỷ lệ chất lượng tại các trạm kiểm tra. Trong phạm vi nghiên cứu này, các thông số thời gian được sử dụng dưới dạng giá trị trung bình để xây dựng mô hình cơ sở trong ARENA Rockwell [6]. Cách tiếp cận này phù hợp với mục tiêu đánh giá đặc điểm vận hành chung của dây chuyền và xác định công đoạn có khả năng trở thành nút thắt.

Để đơn giản hóa mô hình, nghiên cứu đưa ra một số giả thiết: (i) PCB di chuyển liên tục theo đúng thứ tự công đoạn; (ii) thời gian xử lý tại mỗi trạm được xem là ổn định theo giá trị trung bình; (iii) chưa xét đến hỏng hóc thiết

bị, thời gian dừng máy và thời gian chuyển đổi mã sản phẩm; (iv) các công đoạn kiểm tra được mô hình hóa theo thời gian xử lý trung bình thu thập từ thực tế. Đối với công đoạn hàn hồi lưu, thời gian lưu của PCB trong lò được xác định từ chiều dài lò và tốc độ băng tải.



Hình 1. Mô hình mô phỏng dây chuyền SMT xây dựng trên phần mềm ARENA Rockwell

Mô hình mô phỏng được xây dựng trong ARENA Rockwell trên cơ sở các khối chức năng cơ bản của mô phỏng sự kiện rời rạc. PCB được tạo tại công đoạn đầu vào, sau đó lần lượt đi qua các khối mô tả từng công đoạn xử lý của dây chuyền SMT. Thời gian xử lý tại mỗi trạm được gán theo dữ liệu thực tế đã thu thập. Đối với các công đoạn kiểm tra như SPI và AOI-B, mô hình phản ánh đặc điểm vận hành thông qua thời gian kiểm tra và các trạng thái đầu ra tương ứng với dữ liệu chất lượng hiện có.

Thông qua mô hình này, ARENA Rockwell cho phép theo dõi dòng dịch chuyển của PCB, thời gian chờ giữa các công đoạn, mức độ sử dụng của từng trạm và khả năng tích lũy bán thành phẩm trong hệ thống. Đây là cơ sở để phân tích hiệu quả vận hành và xác định công đoạn giới hạn năng suất của dây chuyền.

Mô hình được sử dụng để đánh giá các chỉ tiêu vận hành chính của dây chuyền SMT, bao gồm năng suất đầu ra, thời gian chu kỳ của hệ thống, thời gian chờ giữa các công đoạn và mức độ sử dụng của các trạm. Trên cơ sở đó, công đoạn nút thắt được xác định là công đoạn có thời gian xử lý lớn hoặc gây ra hiện tượng chờ đáng kể trong toàn dây chuyền. Mô hình

mô phỏng dây chuyền SMT được xây dựng trên phần mềm ARENA Rockwell dựa trên trình tự công nghệ và các thông số vận hành thực tế của hệ thống được thể hiện trong Hình 1. Kết quả mô phỏng từ ARENA Rockwell là cơ sở để đánh giá đặc điểm vận hành của dây chuyền SMT, đồng thời hỗ trợ nhận diện công đoạn giới hạn năng suất và đề xuất định hướng cải tiến trong sản xuất công nghiệp.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trên cơ sở dữ liệu đầu vào của dây chuyền SMT, mô hình mô phỏng được sử dụng để phân tích đặc điểm vận hành của hệ thống thông qua các chỉ tiêu như năng lực xử lý của từng công đoạn, thời gian hoàn thành lô sản xuất và mức độ sử dụng của các trạm. Kết quả phân tích cho phép nhận diện sơ bộ công đoạn có khả năng trở thành nút thắt, đồng thời làm rõ mối quan hệ giữa tốc độ cấp liệu và năng lực xử lý của toàn dây chuyền.

Bảng 2. Năng lực xử lý mô phỏng của các công đoạn

Công đoạn	Thời gian xử lý/chu kỳ	Năng lực mô phỏng (PCB/h)
Printer	26,1 s/PCB	137,93
SPI	14,89 s/PCB	241,77
PnP1	45,54 s/PCB	79,05
PnP2	46,06 s/PCB	78,16
PnP3	39,89 s/PCB	90,25
PnP4	38,36 s/PCB	93,85
AOI-F	8,97 s/PCB	401,34
AOI-B	30,53 s/PCB	117,92

Bảng 3. Mức sử dụng ước lượng của các công đoạn theo kịch bản cơ sở

Công đoạn	Năng lực lý thuyết (PCB/h)	Mức sử dụng ước lượng (%)
Printer	137,93	43,50
SPI	241,77	24,82
PnP1	79,05	75,90
PnP2	78,16	76,76
PnP3	90,25	66,48
PnP4	93,85	63,93
AOI-F	401,34	14,95
AOI-B	117,92	50,88

Bảng 4. Kết quả tổng hợp của mô hình cơ sở

Chỉ tiêu	Giá trị
Số PCB đầu vào	750
Tốc độ cấp liệu	60 PCB/h
Thời gian qua toàn dây chuyền của 1 PCB	10,54 phút
Thời gian hoàn thành toàn bộ lô	12,68 giờ
Công đoạn có năng lực thấp nhất	PnP2
Nhóm công đoạn chịu tải lớn nhất	PnP1-PnP2

Với lô sản xuất gồm 750 PCB và tốc độ cấp liệu đầu vào 60 PCB/giờ, dây chuyền được vận hành theo nhịp cấp liệu tương đương 1 PCB/phút. Trên cơ sở các thông số thời gian xử lý tại từng công đoạn, thời gian một PCB đi qua toàn bộ dây chuyền được xác định xấp xỉ 632,16 giây, tương đương khoảng 10,54 phút. Theo đó, tổng thời gian hoàn thành toàn bộ lô sản xuất được ước lượng khoảng 12,68 giờ trong điều kiện hệ thống vận hành ổn định và

chưa xét đến các yếu tố hồng học hoặc gián đoạn bất thường.

Năng lực xử lý mô phỏng của các công đoạn trong dây chuyền SMT được tổng hợp trong Bảng 2. Kết quả cho thấy có sự khác biệt đáng kể giữa các trạm trong hệ thống. Trong số các công đoạn chính, SPI và AOI-F có năng lực xử lý cao, lần lượt đạt 241,77 PCB/giờ và 401,34 PCB/giờ. Trong khi đó, cụm máy gắn linh kiện có năng lực thấp hơn rõ rệt, đặc biệt tại PnP1 và PnP2 với giá trị tương ứng 79,05 PCB/giờ và 78,16 PCB/giờ.

Sự chênh lệch này cho thấy cụm gắn linh kiện là khu vực có ảnh hưởng lớn đến năng lực thông qua của dây chuyền. Xét theo năng lực lý thuyết, PnP2 là công đoạn có khả năng trở thành nút thắt thiết kế của hệ thống do có thời gian xử lý lớn nhất trong các trạm chính. PnP1 cũng cho thấy vai trò tương tự khi có năng lực chỉ nhỉnh hơn không đáng kể so với PnP2. Trong khi đó, AOI-B mặc dù có thời gian chu kỳ thực tế 30,53 giây/PCB do bổ sung thao tác kiểm tra bằng mắt, nhưng năng lực xử lý tương ứng vẫn đạt 117,92 PCB/giờ, cao hơn đáng kể so với cụm PnP.

Khi đổi chiều tốc độ cấp liệu đầu vào 60 PCB/giờ với năng lực xử lý của từng công đoạn, mức sử dụng ước lượng của các trạm được xác định như trong Bảng 3. Kết quả cho thấy PnP2 có mức sử dụng cao nhất, đạt khoảng 76,76%, tiếp theo là PnP1 với 75,90%. Các công đoạn còn lại có mức sử dụng thấp hơn, trong đó AOI-F và SPI chỉ chiếm tỷ lệ nhỏ so với năng lực xử lý hiện có.

Điều này phản ánh rằng cụm máy gắn linh kiện là nhóm công đoạn chịu tải lớn nhất trong dây chuyền. Tuy nhiên, do tốc độ cấp liệu đầu vào hiện tại chỉ đạt 60 PCB/giờ, toàn dây chuyền chưa vận hành đến mức khai thác tối

đa năng lực của các trạm chính. Nói cách khác, trong điều kiện vận hành hiện tại, công đoạn đầu vào có thể đang đóng vai trò giới hạn nhịp sản xuất thực tế của toàn tuyến.

Kết quả phân tích cho thấy cần phân biệt giữa nút thắt theo thiết kế và nút thắt theo vận hành thực tế. Nếu xét riêng năng lực kỹ thuật của các công đoạn, PnP2 là trạm có năng lực thấp nhất và do đó là ứng viên nút thắt rõ ràng nhất của dây chuyền. PnP1 cũng có đặc điểm tương tự và cùng với PnP2 tạo thành cụm công đoạn có ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng thông qua của hệ thống.

Tuy nhiên, nếu xét trong điều kiện vận hành thực tế của mô hình cơ sở với tốc độ cấp liệu 60 PCB/giờ, công đoạn đầu vào lại là yếu tố giới hạn nhịp sản xuất chung. Khi tốc độ đưa PCB vào dây chuyền thấp hơn năng lực xử lý của toàn bộ các trạm phía sau, hiện tượng chờ và tích lũy bán thành phẩm trong hệ thống sẽ không xảy ra rõ rệt. Do đó, trong trạng thái hiện tại, dây chuyền chưa bộc lộ đầy đủ giới hạn năng lực của cụm gắn linh kiện. Đây là một kết quả có ý nghĩa thực tiễn, cho thấy việc đánh giá nút thắt của hệ thống cần gắn với điều kiện vận hành cụ thể, thay vì chỉ dựa trên thời gian xử lý riêng lẻ của từng công đoạn.

Bên cạnh đó, kết quả cũng cho thấy công đoạn hàn hồi lưu có thời gian lưu lớn, khoảng 6,36 phút cho mỗi PCB tính theo chiều dài lò và tốc độ băng tải. Tuy nhiên, do đây là công đoạn làm việc theo nguyên lý dòng liên tục, thời gian lưu lớn không đồng nghĩa trực tiếp với việc trở thành nút thắt của hệ thống. Đối với AOI-B, sự chênh lệch giữa thời gian kiểm tra máy và thời gian chu kỳ thực tế phản ánh ảnh hưởng của thao tác xác nhận lại bằng mắt, cho thấy yếu tố con người vẫn có tác động nhất định đến nhịp vận hành của dây chuyền.

Nhìn chung, kết quả phân tích mô hình cơ sở cho thấy dây chuyền SMT có tiềm năng nâng cao năng suất nếu tăng tốc độ cấp liệu đầu vào và đồng thời theo dõi chặt chẽ cụm PnP1-PnP2, là khu vực có nguy cơ trở thành nút thắt khi hệ thống vận hành ở mức tải cao hơn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày cách tiếp cận mô hình hóa và mô phỏng dây chuyền SMT trên cơ sở dữ liệu vận hành thực tế nhằm phân tích năng suất và xác định nút thắt trong sản xuất công nghiệp. Mô hình mô phỏng được xây dựng bằng phần mềm ARENA Rockwell đã cho phép mô tả dòng dịch chuyển của PCB qua các công đoạn chính của dây chuyền, đồng thời hỗ trợ đánh giá các chỉ tiêu đặc trưng như thời gian xử lý, năng lực công đoạn và mức độ sử dụng của hệ thống.

Kết quả nghiên cứu cho thấy thời gian một PCB đi qua toàn bộ dây chuyền vào khoảng 10,54 phút và tổng thời gian hoàn thành lô 750 PCB xấp xỉ 12,68 giờ trong điều kiện vận hành cơ sở. Phân tích năng lực xử lý chỉ ra rằng cụm máy gắn linh kiện, đặc biệt là PnP1 và PnP2, là khu vực có nguy cơ trở thành nút thắt theo thiết kế do có thời gian xử lý lớn và mức sử dụng cao hơn so với các công đoạn còn lại. Tuy nhiên, xét theo điều kiện vận hành hiện tại với tốc độ cấp liệu 60 PCB/giờ, công đoạn đầu vào đang đóng vai trò giới hạn nhịp sản xuất thực tế của toàn dây chuyền.

Từ các kết quả trên, có thể thấy rằng mô hình hóa và mô phỏng là công cụ phù hợp để phân tích đặc điểm vận hành của dây chuyền SMT, nhận diện công đoạn ảnh hưởng lớn đến năng suất và hỗ trợ đề xuất định hướng cải tiến trong thực tế sản xuất. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình có thể được phát triển theo hướng bổ sung phân bố xác suất thời gian xử

lý, thời gian dừng máy, thay đổi mã sản phẩm và các kịch bản cải tiến để nâng cao độ chính xác cũng như giá trị ứng dụng của kết quả mô phỏng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26.27. ❖

Ngày nhận bài: 30/3/2026

Ngày phản biện: 10/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023), "An automatic assembly SMT production line operation technological process simulation model development". International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2(2), 1-9.
- [2]. Sun, W. (2017, June), "Accurate EM simulation of SMT components in RF designs". In 2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC) (pp. 140-143). IEEE.
- [3]. Tirpak, T. M., Mohapatra, P. K., Nelson, P. C., & Rajbhandari, R. R. (2002), "A generic classification and object-oriented simulation toolkit for SMT assembly equipment". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 32(1), 104-122.
- [4]. Tan, S. M., Hwang, J. Q., & Ab-Samat, H. (2019, May), "WITNESS simulation of preventive and corrective maintenance for Surface Mounted Technology (SMT) line". In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 505, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- [5]. Takus, D. A., & Profozich, D. M. (1997, December), "ARENA software tutorial". In Proceedings of the 29th conference on Winter simulation (pp. 541-544).
- [6]. Ghaleb, M. A., Suryahatmaja, U. S., & Alharkan, I. M. (2015, March), "Modeling and simulation of Queuing Systems using arena software: A case study". In 2015 international conference on industrial engineering and operations management (IEOM) (pp. 1-7). IEEE.