

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ VẬN HÀNH ĐẾN ĐỘ ĐỒNG ĐỀU VỀ ĐỘ DÀY SẢN PHẨM CỦA THIẾT BỊ NHIỆT ĐỊNH HÌNH DÙNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI

## STUDY THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS ON THE THICKNESS UNIFORMITY OF THERMOFORMED PRODUCTS OF A LABSCALE THERMOFORMING DEVICE USING THE TAGUCHI METHOD

Châu Đức Kiệt<sup>1</sup>, Nguyễn Chí Trung<sup>1</sup>, Nguyễn Khoa Triều<sup>1\*</sup>, Phạm Anh Đức<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nguyengkhoatrieu@iuh.edu.vn; ducpham@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 29/1/2024; Sửa bài / Revised: 30/5/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 31/5/2024)

**Tóm tắt** - Bài báo này trình bày quá trình tối ưu hóa các thông số hoạt động của một thiết bị nhiệt định hình dùng phương pháp Taguchi. Qua nghiên cứu tổng quan và các thí nghiệm tiền khả thi, bốn thông số quan trọng ảnh hưởng đến bề dày và sự đồng đều của sản phẩm bao gồm nhiệt độ, khoảng cách, thời gian gia nhiệt và tỷ số kéo của khuôn dương đã được lựa chọn cho nghiên cứu. Mỗi thông số có ba mức giá trị, vì vậy mảng trực giao L9 (3<sup>4</sup>) đã được lựa chọn cho quy hoạch thực nghiệm. Tiếp theo đó, tỷ số S/N được dùng để đưa ra các mức tối ưu của các thông số và những ảnh hưởng của chúng đến độ đồng đều sản phẩm. Kết quả đưa ra được tỷ số kéo (56,13%) và khoảng cách gia nhiệt (21,99%) là 2 yếu tố quan trọng nhất. Thí nghiệm thứ 10, sau đó, đã được thực hiện, cho kết quả 0,050mm, tối ưu hơn 9 kết quả đã thực hiện trước đó. Các kết quả này cũng đã được kiểm chứng bằng phương trình toán và phần mềm thương mại Minitab®.

**Từ khóa** - Nhiệt định hình; tối ưu hóa; phương pháp Taguchi; Độ đồng đều; Minitab

### 1. Đặt vấn đề

Nhiệt định hình (Thermorforming) là một trong những trụ cột của ngành sản xuất sản phẩm nhựa, đáp ứng hầu hết sản phẩm nhựa của con người [1]. Với phương pháp sản xuất linh hoạt và hiệu quả cho các sản phẩm có hình dạng phức tạp, có độ tính xoắn cao, công nghệ nhiệt định hình được áp dụng sản xuất hàng loạt lớn và nhỏ, thường sử dụng trong các ngành công nghiệp như đóng gói, y tế, ô tô và nhiều lĩnh vực khác. Với những ưu điểm sử dụng nhiệt độ thấp, vật liệu làm khuôn đa dạng, giá thành không cao nhưng sản lượng lớn và năng suất cao, đặc biệt là tạo ra được sản phẩm nhựa mỏng có độ đồng đều cho sản phẩm cao... nhiệt định hình có vai trò cực kì quan trọng trong ngành sản xuất nhựa [1].

Qua phần nghiên cứu tổng quan, trong kỹ thuật sản xuất này, các nghiên cứu trước đây chủ yếu sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa phức tạp. Tiêu biểu như [2], Yang sử dụng mạng nơ ron lan truyền ngược học tập có giám sát để tối ưu hóa. Dùng phần mềm thương mại Abaqus [3], nhưng O'Connor kết hợp sử dụng mô hình Ogden và Arruda-Boyce để mô hình hóa quá trình nhiệt định hình dùng phần tử hữu hạn. Cũng dùng mô hình phần tử hữu hạn [4], Ghobadnam thực nghiệm nghiên cứu thời gian gia nhiệt cho khuôn. Tương tự như vậy, mô hình phần tử hữu hạn

**Abstract** - This article outlines the process of optimizing the operational parameters of a thermoforming device through the application of the Taguchi method. After conducting general research and preliminary experiments, four key parameters influencing product thickness and uniformity were identified: heating temperature, heating distance, heating time, and the tensile ratio of the positive mold. Each parameter was set at three different levels, leading to the selection of the L9 (3<sup>4</sup>) orthogonal array. Subsequently, the Signal-to-Noise (S/N) ratio was employed to determine the optimal parameter settings and their impact on product uniformity. The findings indicated that the tensile ratio (56.13%) and heating distance (21.99%) were the two most significant factors affecting the process. To further validate the results, a 10th experiment was conducted, yielding a result of 0.050mm, which surpassed the result achieved in the previous nine experiments. Furthermore, these results underwent validation using a mathematical equation and the commercial software Minitab®.

**Key words** - Thermoforming; optimization; Taguchi method; Uniformity; Minitab

được Stampolus sử dụng trong [5] để nghiên cứu về các khuyết tật, biến dạng và sự thay đổi về độ dày. Như các tác giả khác, Nardi và các cộng sự [6] sử dụng phân tích phần tử hữu hạn để dự đoán nhiệt độ cho vật liệu dẻo trong quá trình tạo hình nhiệt. Trong khi đó, Leite trong [7] sử dụng ANN với nhiều tham số phức tạp để giảm thiểu độ lệch sản phẩm. Sau đó, các tác giả này [8] tiếp tục sử dụng tối ưu hóa nhiều phản hồi chứng minh hiệu quả của mô hình MOR, nhưng các mô hình này sẽ không thể khái quát hóa cho các tình huống mới trong một phạm vi xa các giá trị nghiên cứu. Tương tự như Leite, Long Bin Tan cũng sử dụng ANN để cải thiện chất lượng sản phẩm [9]. Còn trong [10], Cobanoglu sử dụng tối ưu hóa tham số sử dụng đo nhiệt lượng quét vi sai và phân tích vi mô để chỉ ra các vấn đề cong vênh của tấm nhiệt định hình. Cũng nhằm tối ưu hóa nhiệt định hình, Takahashi sử dụng phân tích ANOVA kết hợp Bonferroni 2 chiều để tối ưu hóa vị trí góc của bề mặt thí nghiệm nhằm tối ưu hóa bề dày sản phẩm [11]. Ngoài ra, nhóm tác giả của Nga và Iran [12] nghiên cứu về tính lưu biến của vật liệu nhựa sử dụng công thức Cauchy và Lagrangian kết hợp lý thuyết Leonov. Sử dụng các phương pháp toán học cổ điển và phân tích trong MATLAB kết hợp sử dụng Minitab, trong [13], Karabegović thực hiện tối ưu hóa quy trình đóng gói thiết bị y

<sup>1</sup> Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam (Duc-Kiet Chau, Chi-Trung Nguyen, Trieu Khoa Nguyen)

<sup>2</sup> The University of Danang – University of Science and Technology, Vietnam (Anh-Duc Pham)

tế. Cũng giống như trên, khi thực hiện tối ưu hóa, các tác giả khác cũng dùng Taguchi kết hợp với các thuật toán phức tạp khác. Điển hình như trong [14], Yu và cộng sự của mình sử dụng mạng lưới neuron Taguchi mở kết hợp thuật toán di truyền, Taguchi lan truyền ngược được sử dụng để dự đoán đặc tính quy trình, quan hệ giữa các biến và sử dụng thuật toán di truyền ngược để tối ưu hóa. Hay trong [15], những nhà nghiên cứu sử dụng Taguchi kết hợp với khái niệm tiện ích hay hàm tiện ích để tối ưu hóa quá trình tạo hình của tấm composite. H.S Grewal và cộng sự dùng Taguchi để xử lý thông số nhiệt độ, áp suất và tốc độ tạo hình [16]. Cũng dùng Taguchi và cũng kiểm chứng bằng phần mềm thương mại Minitab, nhưng các tác giả trong [17] không thực hiện bước thành lập phương trình hồi quy, và do đó, không có phần kiểm chứng bằng phương trình toán học.

Những nghiên cứu trên sử dụng các thuật toán phức tạp như mạng nơ ron thần kinh, phần tử hữu hạn, thuật toán di truyền, Mooney-livlin, ... khó thực hiện và khó ứng dụng trong thực tiễn sản xuất. Còn trong công trình [18], các tác giả có dùng phương pháp Taguchi kết hợp với phần mềm Minitab và phân tích phương sai (ANOVA). Tuy nhiên, họ không kiểm chứng kết quả của họ bằng phương trình toán học.

Vì vậy, trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi đơn giản với mảng trực giao L9 đã được sử dụng. Tiếp theo, kết quả phân tích được kiểm chứng bằng một phương trình toán. Sau đó, phần mềm Minitab (một phần mềm thương mại) cũng được sử dụng để kiểm tra kết quả phân tích. Kết quả cho thấy, độ đồng đều tối ưu trong trường hợp đầu vào tối thiểu đã đạt được. Phần mềm thương mại Minitab® rất dễ dàng cài đặt tại xưởng sản xuất và quá trình tối ưu hóa có thể được thực hiện toàn bộ bởi phần mềm. Công thức tính toán đơn giản của Taguchi và việc sử dụng phần mềm hỗ trợ giúp nhân viên trực tiếp tại xưởng sản xuất có thể thấu hiểu được vấn đề của quy trình sản xuất và quá trình tối ưu. Do đó, tính mới của nghiên cứu này là việc đề xuất một phương pháp đơn giản, đã được kiểm chứng trong nghiên cứu, để có thể giúp các kỹ sư hiểu rõ quá trình tối ưu hóa trước khi có thể thực hiện nó một cách đơn giản bằng một phần mềm thương mại tại hiện trường sản xuất công nghiệp.

## 2. Vật liệu và phương pháp

### 2.1. Vật liệu polyethylene terephthalate (PET)

Nhựa PET là sản phẩm của phản ứng diethylene glycol với terephthalic axit ( $C_{10}H_8O_4$ )<sub>n</sub>, thuộc họ polyester. Tính chất vượt trội là chịu lực tốt, chịu nhiệt cao (vẫn giữ nguyên được cấu trúc hóa học khi gia nhiệt lên đến 200°C hoặc làm lạnh ở -90°C), kích thước ít biến động, tính chống thấm cao và có khả năng chống lại hóa chất. Do những tính chất trên kết hợp với ưu điểm về giá cả thị trường, dễ dàng gia công, dễ dàng tìm thấy trên thị trường, nhựa PET được sử dụng trong nghiên cứu này. Bảng 1 liệt kê những đặc tính của nhựa PET [19, 20].

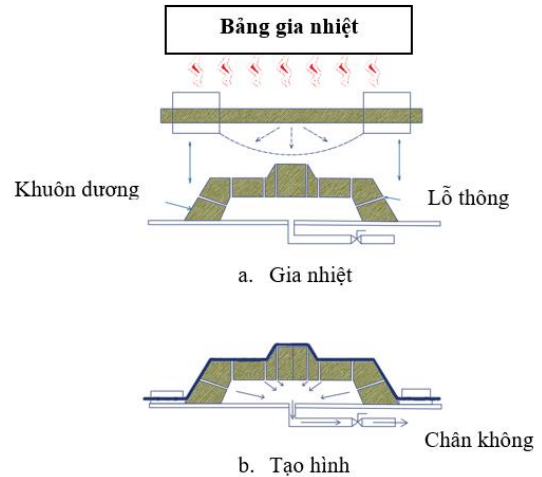
**Bảng 1.** Đặc tính chung của nhựa PET [19, 20]

STT	Tính chất	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng riêng nhựa PET tinh thể	1,370	g/cm <sup>3</sup>
2	Độ bền kéo ( $\sigma_t$ )	55-75	MPa
3	Giới hạn dẻo	50-150	%
4	Nhiệt độ thủy tinh (glass temperature)	75	°C
5	Điểm nóng chảy	260	°C

### 2.2. Phương pháp nhiệt định hình

Nhiệt định hình và ép phun là hai điểm tựa vững chắc của ngành nhựa. Nhiệt định hình có các ưu điểm mạnh hơn so với ép phun như: thiết bị công nghiệp ít phức tạp, quy trình dễ thực hiện, điều kiện nhiệt thấp.

Trong công nghệ nhiệt định hình, có khá nhiều nguyên lý đã được áp dụng. Trong đó, nhiệt định hình tạo hình chân không cơ bản được lựa chọn trong nghiên cứu này (Hình 1).



**Hình 1.** Tạo hình bằng chân không cơ bản dùng khuôn dương [19]

Tạo hình chân không cơ bản là phương pháp tạo hình đơn giản nhất mà trong đó chỉ có chân không được sử dụng để ép chất dẻo nóng dựa vào bề mặt khuôn [21]. Với kỹ thuật gia công này, vật liệu được cố định vào khung giữ và được gia nhiệt đến nhiệt độ yêu cầu sau đó được đưa vào vị trí áp với bề mặt khuôn. Kết hợp với chân không phía dưới khuôn qua những lỗ thông nhỏ được khoan qua thành khuôn. Áp suất được tạo ra hút tấm chất dẻo áp sát vào thành khuôn nhờ chân không cục bộ được tạo ra bởi tấm nhựa và khuôn. Sau đó, tấm nhựa được làm nguội cho đến khi in được hình của khuôn [21].

Lợi thế của tạo hình bằng khuôn dương so với tạo hình bằng khuôn âm bao gồm: giá thành làm khuôn thiết bị rẻ hơn, dễ dàng cắt và đánh bóng, độ sâu kéo lớn hơn dễ dàng đạt được mà không bị mỏng quá mức. Sản phẩm được tạo thành bởi ép trên khuôn dương có độ mỏng tương đối vì vậy chất lượng về độ dày sản phẩm cùng với độ đồng đều tốt hơn đối với tạo hình với khuôn âm [21].

### 2.3. Phương pháp Taguchi

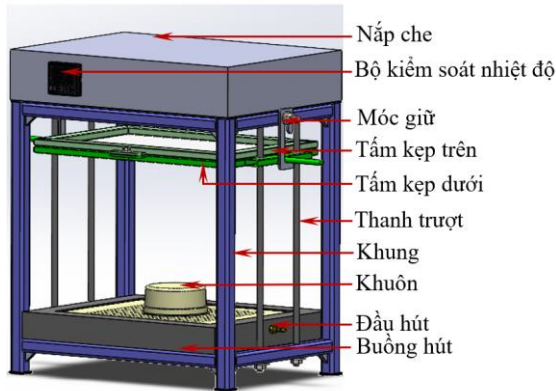
Hiện nay, phương pháp Taguchi được sử dụng rất phổ biến trong quy hoạch thực nghiệm [22]. Phương pháp Taguchi đóng góp vào quá trình nâng cao hiệu suất trong quá trình nghiên cứu và phát triển, giúp tạo ra được sản phẩm có giá thành thấp nhưng chất lượng sản phẩm cao hơn [23]. Để giảm được số lượng thực nghiệm, phương pháp Taguchi kết hợp mảng trực giao (Orthogonal Array) với bố trí thí nghiệm thích hợp. Ti số S/N được sử dụng để tối ưu hóa ở đây là: Nhỏ hơn-tốt hơn [24]:

$$S/N = -10 \log_{10} \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \times \sum (y_i^2) \right] \quad (1)$$

Trong đó:  $n$  là số thí nghiệm,  $y_i$  là kết quả thí nghiệm thứ  $i$  [25].

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Tham số quá trình và mảng trục giao



(a)



(b)

**Hình 2.** Thiết bị nhiệt định hình: (a) Mô hình 3D từ phần mềm SolidWorks®, (b) Thiết bị thực tế

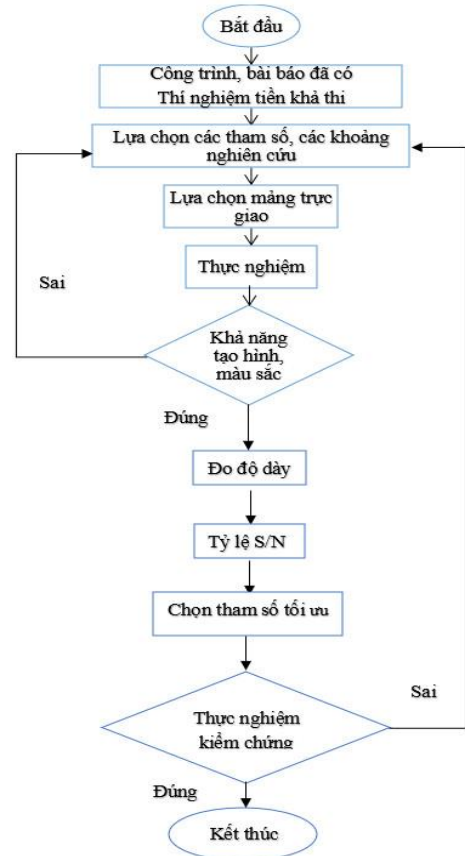
Hình ảnh 3D được thiết kế trên phần mềm SolidWorks®, Hình 2a. Sau đó, thiết bị được chế tạo thực tế như được mô tả trong Hình 2b.

Trong quá trình thử nghiệm, tấm nhựa PET được kẹp chặt bởi tấm kẹp trên và tấm kẹp dưới. Sau đó, tấm nhựa được đưa lên cách bộ phận gia nhiệt một khoảng và được gia nhiệt đến trạng thái dẻo. Tiếp đó, khung kẹp chứa tấm nhựa tiếp tục được di chuyển đến vị trí bề mặt khuôn dương bằng tay nhờ đường dẫn của thanh trượt trên thân máy. Cuối cùng, máy hút chân không được sử dụng để hút không khí trong buồng hút thông qua các lỗ thông. Nhờ sự chênh lệch áp suất, tấm nhựa đang ở trạng thái mềm dẻo được kéo dãn ra áp vào khuôn dương tạo thành sản phẩm theo hình dạng của khuôn.

Nghiên cứu quá trình tạo hình nhiệt chủ yếu là nghiên cứu sự thay đổi về độ dày từ tấm nhựa phẳng đến khi thành sản phẩm nhựa với hình dạng mong muốn.

Từ phần khảo sát những nghiên cứu đã có trước đây [26, 27] và những thí nghiệm tiền khả thi, bốn thông số quá trình được lựa chọn bao gồm: Nhiệt độ gia nhiệt (oC), khoảng cách gia nhiệt (mm), thời gian gia nhiệt (s), và tỷ số kéo  $R_a$  (-). Quá trình này được thể hiện trong Hình 3. Trong đó, khoảng cách gia nhiệt là khoảng cách giữa nhiệt điện trở (nằm ở phía trong nắp che) và tấm nhựa PET. Khoảng cách này được quyết định bởi chiều dài của các

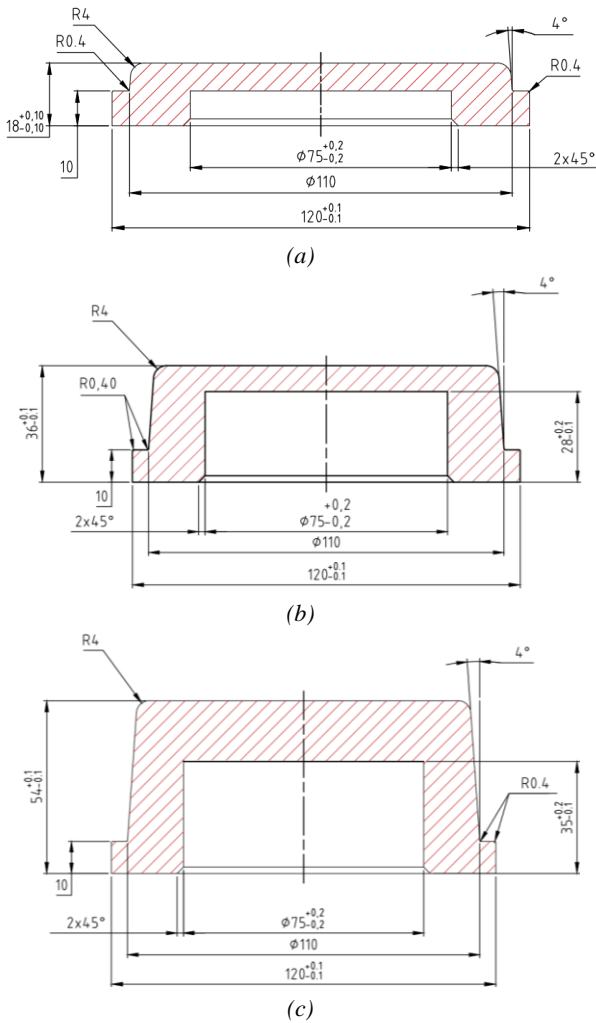
móc giữ. Do đó, có 3 loại móc giữ với các chiều dài khác nhau đã được sử dụng trong thí nghiệm. Còn tỷ số kéo  $R_a$  là tỷ số giữa phần diện tích ban đầu phần tạo hình của tấm nhựa PET và diện tích bề mặt của sản phẩm nhựa sau quá trình tạo hình. Trong đó, diện tích ban đầu phần tạo hình của tấm nhựa PET là diện tích phần hình tròn đáy của khuôn. Còn diện tích bề mặt của sản phẩm nhựa sau quá trình tạo hình là tổng diện tích các mặt bên của khuôn. Bản vẽ của khuôn với các tỷ số kéo khác nhau được trình bày trong Hình 4.



**Hình 3.** Quy trình tối ưu hóa quá trình nhiệt định hình

Một số thử nghiệm tiền khả thi đã được thực hiện để chọn được phạm vi nghiên cứu, giá trị của các tham số và phạm vi các tham số. Quá trình thử nghiệm dựa trên phương pháp thực nghiệm thử và sai kết hợp tìm hiểu các thông số máy móc đã có trên thị trường nhờ những đánh giá của chuyên gia.

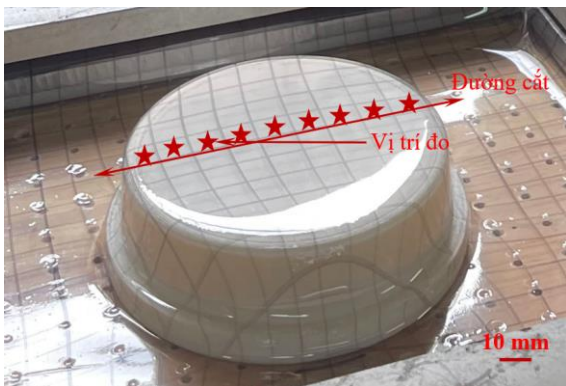
Tấm nhựa PET độ dày là 0,25 mm được sử dụng để thử nghiệm cho đến khi sản phẩm đạt được yêu cầu về mức độ chép hình của khuôn như Hình 5 thì bắt đầu tối ưu hóa thông số hoạt động của thiết bị. Trong đó, yêu cầu về mức độ chép hình được khảo sát trong quá trình thực hiện trong các thử nghiệm tiền khả thi. Mức độ chép hình là khả năng sao chép lại hình dạng của khuôn của tấm nhựa PET trong khi thử nghiệm. Thêm vào đó, sau khi thử nghiệm kết thúc, hay nói cách khác là sau khi tấm nhựa nguội hoàn toàn, sản phẩm nhựa vẫn tiếp xúc sát với khuôn trên toàn bộ bề mặt của nó. Hình 5 cho thấy, khuôn trong nghiên cứu này có hình dạng đơn giản. Mục đích của sự đơn giản này, không chỉ là để dễ dàng đánh giá khả năng chép hình mà còn là để dễ dàng thiết kế khuôn có các tỷ số kéo  $R_a$  cho trước.



**Hình 4.** Khuôn cho nhiệt định hình: (a) Tỷ số kéo là 1,5, (b) Tỷ số kéo là 2,0, (c) Tỷ số kéo là 2,5

**Bảng 2.** Các yếu tố và các mức yếu tố trong thí nghiệm chính

STT	Ký hiệu	Thông số	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Đơn vị
1	A	Nhiệt độ	350	360	370	°C
2	B	Khoảng cách	38	40	42	mm
3	C	Thời gian gia nhiệt	60	70	80	s
4	D	Tỷ số kéo	1,5	2	2,5	-



**Hình 5.** Sản phẩm đạt yêu cầu về khả năng tạo hình

Cấu trúc tạo nên màng trực giao dựa trên các yếu tố và các mức của các yếu tố đó. Đối với 4 yếu tố và mỗi yếu tố có 3 mức độ thì cấu trúc của màng trực giao được chọn là

L9 (3<sup>4</sup>) như Bảng 3. Trong Bảng 3, độ đồng đều là hiệu số giữa bề dày lớn nhất và nhỏ nhất của phần sản phẩm nhựa. Như đã trình bày ở trên, do đây là bước thử nghiệm đánh giá khả năng của thiết bị nhiệt định hình trước khi đưa vào những ứng dụng cụ thể cũng như chuẩn bị cho việc chế tạo những máy nhiệt định hình (có động cơ) cho những ứng dụng phức tạp hơn, khuôn ở đây được thiết kế đơn giản, thuận tiện cho việc đánh giá. Từ đó, độ đồng đều ở đây được xác định bằng cách cắt làm đôi 3 trong những sản phẩm thử nghiệm được đánh giá là tốt nhất, như Hình 5. Các độ dày được đo bằng thước panme điện tử tại các vị trí giữa các ô vuông trên đường cắt. Vì mỗi ô có kích thước 10mm×10mm, trước khi thực hiện quá trình nhiệt định hình, ta có tổng cộng 21 vị trí đo trên sản phẩm như minh họa trên Hình 5. Độ dày được chọn là giá trị giữa của 3 lần đo này.

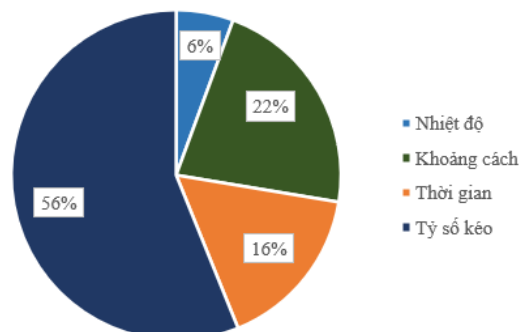
**Bảng 3.** Cấu trúc mảng trực giao L9

STN	A	B	C	D	Độ đồng đều	MSD	SN
1	1	1	1	1	0,064	0,004096	23,8764
2	1	2	2	2	0,086	0,007396	21,3100
3	1	3	3	3	0,101	0,010201	19,9136
4	2	1	2	3	0,112	0,012544	19,0156
5	2	2	3	1	0,067	0,004489	23,4785
6	2	3	1	2	0,068	0,004624	23,3498
7	3	1	3	2	0,094	0,008836	20,5374
8	3	2	1	3	0,094	0,008836	20,5374
<b>9</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0,054</b>	<b>0,002916</b>	<b>25,3521</b>

Độ lệch toàn phương trung bình (MSD: Mean squared deviation) của một phép ước lượng là trung bình của bình phương các sai số [28].

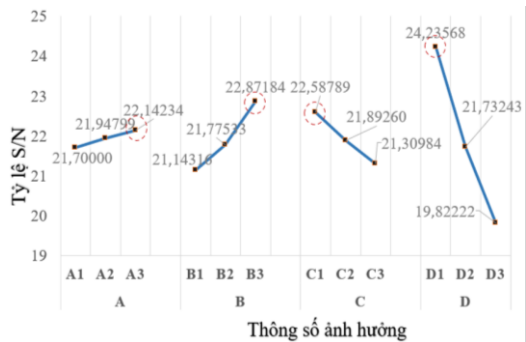
**3.2. Tỷ số S/N**

Hàm S/N (signal-to-noise) được sử dụng để tính toán tín hiệu nhiễu. Với mục tiêu là tối ưu hóa độ đồng đều về bề dày của sản phẩm tạo thành, giá trị đáp ứng “Nhỏ hơn-tốt hơn” đã được chọn để đánh giá. Kết quả cho thấy, sản phẩm của nhiệt định hình có độ đồng đều cao khi tỷ số kéo và thời gian gia nhiệt càng bé, nhiệt độ gia nhiệt kết hợp với khoảng cách gia nhiệt cao nhất. Trong đó, tỷ số kéo có mức độ đóng góp cao nhất là 56,13% như được trình bày trong Hình 6. Thục nghiệm cho thấy, khi tỷ số kéo quá lớn, tấm nhựa sẽ bị kéo dãn ra nhiều hơn dẫn đến độ đồng đều giảm. Cũng cần lưu ý rằng, qua quá trình tiền khả thi chọn lọc, 4 thông số quá trình được chọn lựa có độ quan trọng không quá cách biệt nhau. Các kết quả về mức độ ảnh hưởng của các thông số quá trình tới kết quả đầu ra được thể hiện trong Hình 7.



**Hình 6.** Biểu đồ phần trăm đóng góp của các yếu tố





Hình 7. Kết quả tỷ số S/N

Bảng 4. Kết quả tỷ số S/N cho các thông số

Yếu tố	Nhiệt độ	Khoảng cách	Thời gian	Tỷ số kéo	Tổng cộng
Tỷ lệ SN	Mức 1 21,70000	21,14316	22,58789	24,23568	197,37098
	Mức 2 21,94799	21,77533	21,89260	21,73243	
	Mức 3 22,14234	22,87184	21,30984	19,82222	
Độ chênh lệch	0,44234	1,72868	1,27805	4,41346	<b>7,86252</b>
Phần trăm %	5,63	<b>21,99</b>	16,25	<b>56,13</b>	100

Bảng 5. Kết quả phân tích hệ số bằng phần mềm SPSS

Mô hình	Hệ số chưa chuẩn hóa		t	Sig.
	B	Sai số chuẩn		
Hệ số (Constant)	0,082	0,001	126,445	< 0,001
Nhiệt độ	-0,002	0,001	-0,066	0,133
Khoảng cách	-0,008	0,001	-0,345	0,001
Thời gian	0,006	0,001	0,264	0,002
Tỷ số	0,020	0,001	0,895	< 0,001

a. Biến phụ thuộc: Độ đồng đều

3.3. Kiểm tra xác thực bằng phương trình toán

Bằng cách ứng dụng phần mềm SPSS, mô hình hồi quy tuyến tính được đưa ra để tìm mối liên hệ giữa biến phụ thuộc là độ đồng đều sản phẩm và các biến độc lập là nhiệt độ gia nhiệt, khoảng cách gia nhiệt, thời gian gia nhiệt và tỷ số kéo.

Từ hệ số hồi quy (Bảng 5), phương trình hồi quy chuẩn hóa được xây dựng như sau:

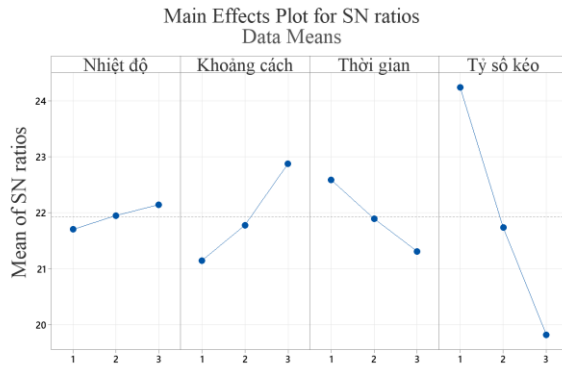
$$Y = -0,066 \times \text{Nhiệt độ} - 0,354 \times \text{Khoảng cách} + 0,264 \times \text{Thời gian} + 0,895 \times \text{Tỷ số} + \varepsilon \quad (2)$$

Từ phương trình hồi quy chuẩn hóa, độ lớn của các hệ số của các thông số xếp từ lớn đến nhỏ lần lượt là D, B, C, A. Các kết quả này hoàn toàn trùng khớp với các kết quả về độ đóng góp trong Hình 6. Như vậy, kết quả từ phương trình đã xác nhận các kết quả tính toán tỷ số S/N.

3.4. Kiểm tra xác thực bằng phần mềm thương mại

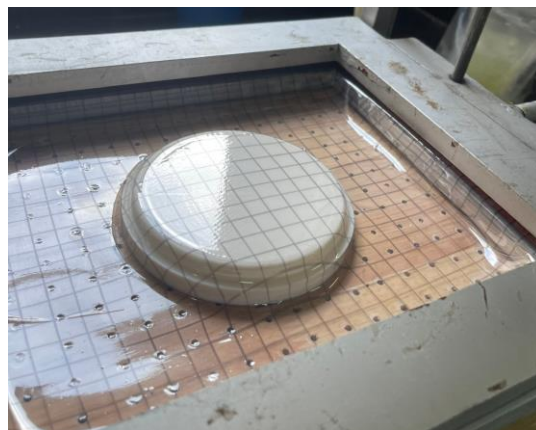
Sau khi thực hiện phân tích tỷ số S/N với yêu cầu “nhỏ hơn, tốt hơn” tức là độ đồng đều (hay độ biến thiên của bề dày sản phẩm) là càng nhỏ càng tốt, phương pháp Taguchi đưa ra các mức thông số quá trình A3-B3-C1-D1 như Hình 7. Điều này được tiếp tục kiểm tra xác thực bằng cách sử dụng phần mềm thương mại Minitab®. Kết quả được đưa ra ở Hình 8 cho ta thấy, sự đồng bộ giữa tính toán tay bằng Excel®, phương trình toán và sử dụng phần mềm Minitab®. Kết quả cho thấy, quá trình áp dụng công thức tính toán là chính xác. Điều đáng chú ý là, trong các công xưởng thực tế, người ta có thể sử dụng các phần mềm như Minitab® để quy hoạch thực nghiệm và phân tích kết quả nhằm giảm tối đa

thời gian, thay vào đó, tập trung cho sản xuất.

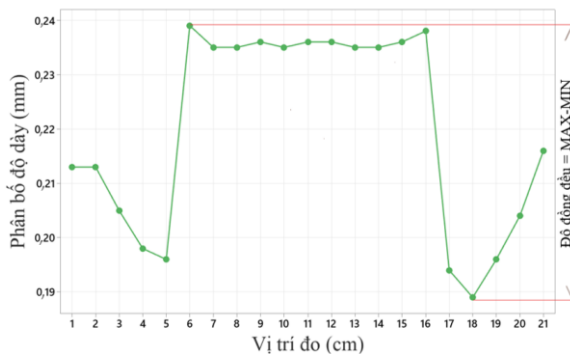


Signal-to-noise: Smaller is better

Hình 8. Kết quả thực hiện phương pháp Taguchi bằng phần mềm Minitab®



Hình 9. Thực nghiệm xác thực bằng điều kiện tối ưu



Hình 10. Kết quả phân tích thực nghiệm xác thực bằng điều kiện tối ưu

Để xác nhận, một thực nghiệm nữa được thực hiện sử dụng các điều kiện ở Hình 9. Kết quả hiệu số giữa bề dày lớn nhất và nhỏ nhất tức độ đồng đều về bề dày của sản phẩm là 0,050 mm, Hình 10. So sánh với tất cả giá trị độ đồng đều của các trường hợp trong mảng trực giao được đưa ra ở Bảng 4 thì giá trị này đều thấp hơn.

Từ kết quả của thực nghiệm trên, ta có thể kết luận rằng Taguchi là phương pháp có thể tạo ra sự kết hợp các thông số quá trình tốt hơn nhằm tăng độ đồng đều về bề dày sản phẩm.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi được sử dụng để nghiên cứu các thông số ảnh hưởng đến độ đồng đều sản phẩm, là kết quả của quá trình nhiệt định hình,

dùng quy hoạch mạng trực giao. Sử dụng kỹ thuật tạo hình chân không cơ bản dùng khuôn dương, các tham số quá trình được lựa chọn gồm nhiệt độ gia nhiệt ( $^{\circ}\text{C}$ ), khoảng cách gia nhiệt (mm), thời gian gia nhiệt (s), và tỷ số kéo  $R_a$  (-). Dùng màng trực giao L9, kết quả phân tích S/N cho thấy, tỷ số kéo và khoảng cách gia nhiệt là hai yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất, để sản phẩm được đồng đều và giảm độ dày. Khi điều kiện vận hành ở nhiệt độ  $370^{\circ}\text{C}$ , khoảng cách gia nhiệt 42 mm, thời gian gia nhiệt 60 s và tỷ số kéo 1,5, độ đồng đều đạt được là 0,050 mm. Kết quả này tốt hơn kết quả độ đồng đều nhỏ nhất trong 9 thí nghiệm trước đó là thí nghiệm số 9 (0,054 mm).

Nghiên cứu này sử dụng một phương pháp đơn giản nhưng mang lại hiệu quả, có thể ứng dụng trong sản xuất, tốn ít thời gian nghiên cứu, phân tích và dễ thực hiện. Phương pháp này giúp các kỹ sư dễ dàng thực hiện mà không mất nhiều thời gian cũng như không sử dụng các thuật toán phức tạp. Hơn thế nữa, toàn bộ quá trình tối ưu hóa có thể được thực hiện bằng việc sử dụng phần mềm Minitab®, một phần mềm thương mại dễ dàng cài đặt tại nhà xưởng. Có thể kết quả trong nghiên cứu này chưa tối ưu nếu so với việc dùng các phương pháp phức tạp hơn như RSM, ANN, PSO, ..., tuy nhiên, sự tiện lợi và nhanh chóng của nó có thể giúp các kỹ sư sản xuất tại hiện trường trong việc cải tiến quy trình.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. L. Throne, *Understanding thermoforming (Introduction to Thermoforming)*. Hanser Gardner Publications Cincinnati, OH, 2008.
- [2] C. Yang and S.-W. Hung, "Modeling and Optimization of a Plastic Thermoforming Process", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, no. 1, pp. 109-121, 2004.
- [3] C. P. J. O'Connor, G. Menary, P. J. Martin, and E. McConville, "Finite element analysis of the thermoforming of Polypropylene", *International Journal of Material Forming*, vol. 1, no. 1, pp. 779-782, 2008.
- [4] M. Ghobadnam, P. Mosaddegh, M. Rezaei Rejani, H. Amirabadi, and A. Ghaei, "Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 5, pp. 1079-1089, 2015.
- [5] A. Stamopoulos and A. Di Ilio, "Numerical and experimental analysis of the thermoforming process parameters of semi-spherical glass fibre thermoplastic parts", *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 420-425, 2021.
- [6] D. Nardi and J. Sinke, "Design analysis for thermoforming of thermoplastic composites: prediction and machine learning-based optimization", *Composites Part C: Open Access*, vol. 5, p. 100126, 2021.
- [7] W. D. Leite, J. C. Campos Rubio, F. Mata Cabrera, A. Carrasco, and I. Hanafi, "Vacuum Thermoforming Process: An Approach to Modeling and Optimization Using Artificial Neural Networks", *Polymers*, vol. 10, no. 2, 2018. <https://doi.org/10.3390/polym10020143>
- [8] W. Leite, J. C. Rubio, F. Mata, I. Hanafi, and A. J. M. S. R. Carrasco, "Dimensional and geometrical errors in vacuum thermoforming products: an approach to modeling and optimization by multiple response optimization", *Measurement Science Review*, vol. 18, no. 3, p. 113, 2018.
- [9] L. B. Tan and N. D. Nhat, "Prediction and Optimization of Process Parameters for Composite Thermoforming Using a Machine Learning Approach," *Polymers*, vol. 14, no. 14, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14142838>
- [10] M. Çobanoğlu, R. E. Ece, and F. ÖZÜRK, "Thermoforming Process Parameter Optimization of Thermoplastic PEKK/CF and PPS", (in en), *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, vol. 22, no. Vol:22- 8th ULPAS - Special Issue 2021, pp. 51-58, 2021.
- [11] M. Takahashi and Y. Bando, "Effect of acute angle model on mouthguard thickness with the thermoforming method and moving the model position just before fabrication", *Dental Traumatology*, vol. 37, no. 1, pp. 138-144, 2021.
- [12] H. Hosseini, B. V. Berdyshev, and A. Mehrabani-Zeinabad, "Rheological modeling of fracture in plug-assisted vacuum thermoforming", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 117, no. 1, pp. 171-177, 2010.
- [13] E. Karabegović, R. J. A. T. Đuzelić, and Materials, "The optimization of thermoforming process parameters in the packaging of medical products", *Advanced Technologies and Materials*, vol. 44, no. 2, pp. 21-24, 2019.
- [14] J.-C. Yu, X.-X. Chen, T.-R. Hung, and F. Thibault, "Optimization of extrusion blow molding processes using soft computing and Taguchi's method", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 15, no. 5, pp. 625-634, 2004.
- [15] C. Yang and S. W. Hung, "Optimising the thermoforming process of polymeric foams: an approach by using the Taguchi method and the utility concept", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 5, pp. 353-360, 2004.
- [16] H. S. Grewal and M. Hojiati, "Thermoforming Process Optimization for Reduction of Inter-Ply Friction of Out-of-Autoclave Material", in *American Society of Composites-30th Technical Conference*, Michigan, America, 2015.
- [17] M. A. Boca, A. Sover, and L. Slătineanu, "Determining the Influencing Factors on the Cooling of a 3D Printed Thermoforming Mould", *Macromolecular Symposia*, vol. 404, no. 1, p. 2100399, 2022.
- [18] K. M. Hyie, S. Budin, and M. A. A. Wahab, "Effect of injection moulding parameters in reducing the shrinkage of polypropylene product using Taguchi analysis", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 505, no. 1, p. 012060, 2019.
- [19] P. G. Karagiannidis, A. C. Stergiou, and G. P. Karayannidis, "Study of crystallinity and thermomechanical analysis of annealed poly(ethylene terephthalate) films", *European Polymer Journal*, vol. 44, no. 5, pp. 1475-1486, 2008.
- [20] C. A. Seneci, M. Mor, D. Fausti, G. Petrogalli, C. Remino, and V. Zacché, "Simulation and Design of an Oven for PET Blow Molding Machines", in *2012 COMSOL Conference*, Milan, 2012, pp. 2855-2871.
- [21] N. M. Long, *Plastic materials and technology*, Education Publishing House, 2013.
- [22] A. Freddi and M. Salmon, *Introduction to the Taguchi Method*, in *Design Principles and Methodologies: From Conceptualization to First Prototyping with Examples and Case Studies*, A. Freddi and M. Salmon, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 159-180.
- [23] M. Cho, S. Kim, and M. S. Joun, "Optimal Process Design of an Optimal, Single-Stage, Symmetrical L-Bending Process Employing Taguchi Method with Finite Element Method, and Experimental Verification Thereof", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 23, no. 4, pp. 395-404, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00631-4>
- [24] T. K. Nguyen, C. J. Hwang, and B.-K. Lee, "Numerical investigation of warpage in insert injection-molded lightweight hybrid products", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 18, no. 2, pp. 187-195, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0024-5>
- [25] M.-S. Tran, V.-T. Hoang, and J.-M. Park, "The One/Multi-objective Optimization for Tensile Yield and Impact Strength Responses of Optical PC/PMMA Blends", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 23, no. 4, pp. 405-419, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00627-0>
- [26] N. K. Trieu, N. Thong, N. Trung, T. Tuan, N. Vinh, and T. Vu, "Application of axiomatic design theory in thermoforming apparatus design and fabrication", *Journal of Science and Technology - IUH*, vol. 40, 2020.
- [27] T. K. Nguyen et al., "Development and Characterization of a Thermoforming Apparatus Using Axiomatic Design Theory and Taguchi", *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, vol. 43, no. 6, pp. 255-268, 2020.
- [28] T. Genichi, C. Subir, and W. Yuin, *Fundamentals of Data Analysis*, in *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, 2004, pp. 506-514.