

# PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU HÓA THÔNG SỐ ÉP PHUN NHỰA NHẪM NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG SẢN PHẨM NHỰA PC TRONG SUỐT

OPTIMIZATION OF INJECTION MOLDING PARAMETERS TO ENHANCE THE QUALITY OF TRANSPARENT POLYCARBONATE (PC) PRODUCTS

Phan Thị Đăng Thu<sup>1</sup>, Trần Xuân Hiệp<sup>2</sup>, Nguyễn Hoài Nam<sup>1</sup>, Dương Thị Vân Anh<sup>1</sup>, Đồng Văn Keo<sup>3,4,5,\*</sup>

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>2</sup>Khoa Cơ khí, Đại học Quốc gia Trung ương (NCU), Đà Loan

<sup>3</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>4</sup>Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>5</sup>Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

\*Email tác giả liên hệ: [dvkeo@ctu.edu.vn](mailto:dvkeo@ctu.edu.vn)

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này cung cấp phương pháp tối ưu chế độ ép phun cho sản phẩm nhựa PC SABIC, loại LEXAN™ 141R với chỉ số nóng chảy 10.5g/10 phút bằng cách tiến hành thí nghiệm trên máy ép phun. Chi tiết được dùng trong thí nghiệm là vỏ ngoài trong suốt của một sản phẩm điện tử. Nghiên cứu xác định ảnh hưởng của các thông số ép lên khuyết tật ngoại quan là đường hàn và độ lệch của một kích thước quan trọng. Các thí nghiệm đã được thực hiện bằng cách sử dụng mảng trực giao L16 và được chuẩn hóa bằng phân tích quan hệ xám (GRA). Các biến đầu vào được xem xét bằng phương pháp ANOVA. Để xác định các thông số đúc tối ưu, phương pháp Taguchi đã được sử dụng kết hợp với GRA. Trong các thí nghiệm này, chúng tôi đã thu được các thông số tối ưu, giúp giảm chiều rộng đường hàn 69.28% và độ lệch kích thước giảm 65.76%.

**Từ khóa:** Sản phẩm nhựa trong suốt; Đường hàn; Độ lệch kích thước; Kỹ thuật Taguchi; Phân tích tương quan xám.

## ABSTRACT

This study provides an optimization method for the injection molding parameters of a SABIC PC product, grade LEXAN™ 141R, with a melt flow index of 10.5 g/10 min, by conducting experiments on an injection molding machine. The part used in the experiment is the transparent outer housing of an electronic product. The research investigates the influence of molding parameters on visual defects, namely weld lines, and the deviation of a critical dimension. The experiments were conducted using an L16 orthogonal array and were analyzed using Grey Relational Analysis (GRA). The input variables were examined using the ANOVA method. To determine the optimal molding parameters, the Taguchi method was used in combination with GRA. In these experiments, we obtained the optimal parameters, achieving a 69.28% reduction in weld line width and a 65.76% reduction in dimensional deviation.

**Keywords:** Transparent plastic product; Weld lines; Dimensional deviation; Grey relational analysis.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, công nghệ ép phun nhựa đang rất phổ biến với các tiêu chí cho chất lượng sản phẩm ngày càng tăng cao. Các yêu cầu đối với một sản phẩm chất lượng là kích thước, cơ tính cũng như ngoại quan là rất khắt khe. Đối với các sản phẩm trong suốt thì ngoại quan càng quan trọng hơn, đây cũng là một yếu tố để đánh giá một sản phẩm chất lượng cao. Một trong những lỗi thường gặp trên sản phẩm nhựa trong suốt nói riêng và các sản phẩm nhựa nói chung là lỗi đường hàn (weld lines). Khi nhựa chảy vòng qua một vật cản trong khuôn, điểm mà vật liệu gặp lại nhau được gọi là đường hàn [1]. Nhựa sẽ luôn tạo thành đường hàn khi dòng chảy bị chia tách trong khuôn.

Để giảm thiểu đường hàn trên sản phẩm cần tác động đến nhiều yếu tố, có thể quy về 4 tác nhân chính (nguyên lý 4M): Chế độ ép phun (Molding Process), Khuôn ép nhựa (Mold), Máy ép nhựa (Machine) và Vật liệu nhựa (Material) [2]. Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào phần chế độ ép phun để giải quyết vấn đề giảm thiểu khuyết tật đường hàn trên sản phẩm. Nhiệt độ nóng chảy, nhiệt độ khuôn, tốc độ phun, áp suất giữ và thời gian làm nguội là những thông số có ảnh hưởng lớn nhất [3], [4], [5], [6]. Nhiệt độ nóng chảy và nhiệt độ khuôn cao hơn, cũng như tốc độ phun tăng làm mờ đường hàn và cải thiện độ bền. Hasan Oktem và cộng sự [7] đã ứng dụng kết hợp phương pháp giải thuật di truyền (genetic algorithm) và tối ưu hóa bầy đàn (particle swarm optimization) nhằm giảm thiểu khuyết tật đường hàn trong ép phun nhựa. Các thuật toán này đã được sử dụng để xác định các điều kiện ép phun tối ưu, dẫn đến giảm 18,51% chiều rộng đường hàn thông qua điều chỉnh cẩn thận nhiệt độ nóng chảy, áp suất phun và thời gian làm nguội. Satoshi Kitayama và cộng sự [8] đề xuất phương pháp tối ưu hóa gần đúng tuần

tự (Sequential Approximate Optimization), sử dụng mạng hàm cơ sở bán kính (Radial Basis Function), được sử dụng để xác định cấu hình áp suất và vận tốc phun tối ưu nhằm giảm thiểu hiệu quả các khuyết tật đường hàn và thời gian chu kỳ ép.

Bên cạnh khuyết tật về ngoại quan thì kích thước sản phẩm nhựa cũng rất quan trọng, là điều kiện đánh giá sản phẩm có đạt được chất lượng hay không. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra việc điều chỉnh thông số ép phun có thể ảnh hưởng tới kích thước sản phẩm [9], [10], [11]. Chil-Chyuan KUO và cộng sự [12] nghiên cứu phương pháp thiết kế Taguchi có thể dùng để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số ép phun đến độ chính xác kích thước của thấu kính Fresnel trong quá trình ép phun nhựa. Kết quả cho thấy yếu tố chi phối ảnh hưởng đến độ sâu rãnh của thấu kính Fresnel là áp suất giữ. M. R. Mani và cộng sự [13] đã nghiên cứu sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm để phân tích ảnh hưởng của vận tốc phun, áp suất phun và nhiệt độ nóng chảy đối với độ chính xác kích thước và sự hình thành bavaria (flash) của các chi tiết ép phun vi mô. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng nhiệt độ nóng chảy và áp suất phun cao hơn thường dẫn đến độ chính xác kích thước tốt hơn.

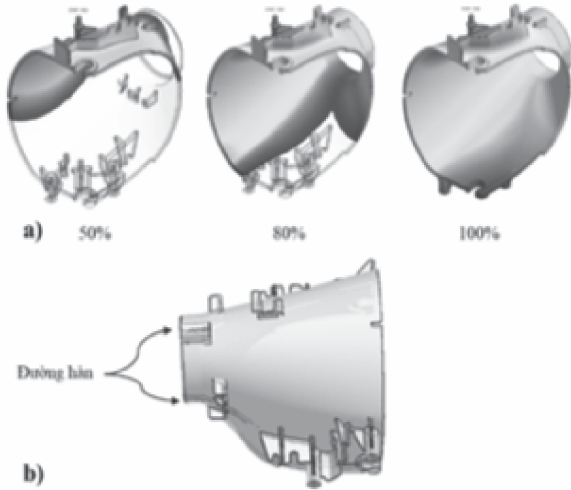
Trong nghiên cứu này, một phương pháp kết hợp giữa thiết kế Taguchi và phân tích tương quan xám (grey relational analysis) sẽ được đưa ra nhằm tối ưu các thông số ép phun nhằm cải thiện weld lines và tăng độ chính xác kích thước của một sản phẩm nhựa trong suốt làm từ nhựa PC (Polycarbonate).

## 2. QUY TRÌNH THỬ NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu và khuôn

Trong nghiên cứu này, nhựa PC SABIC,

loại LEXAN™ 141R với chỉ số nóng chảy 10.5g/10 phút đã được chọn cho quy trình ép phun. Chi tiết trong suốt là vỏ ngoài của một thiết bị điện tử đã được chọn để phân tích, sử dụng công phun nóng với bộ điều khiển đóng/mở công. Các thí nghiệm tiến hành trên máy ép phun 470 tấn hiệu Haitian (MA4700II S model). Các mô phỏng dòng chảy được thực hiện nhằm tìm ra vị trí đường hàn trước khi đưa vào thử nghiệm. Kết quả mô phỏng được trình bày ở Hình 1.



Hình 1. Mô phỏng quá trình điền đầy của sản phẩm (a), vị trí đường hàn trên sản phẩm (b).

## 2.2. Các nhân tố đầu vào

Các nhân tố đầu vào và các mức giá trị được tổng hợp và đưa ra từ các nghiên cứu trước đây cũng như lời khuyên từ các chuyên gia. Chi tiết các thông số được trình bày ở Bảng 1.

## 2.3. Các nhân tố đầu ra

Đầu ra để đánh giá chất lượng sản phẩm là bề rộng đường hàn (1) và độ chính xác của một kích thước quan trọng (2). Các thông số đánh giá và thiết bị đo được trình bày ở Bảng 2.

## 2.4. Kết quả thực nghiệm

Kết quả thực nghiệm tương ứng với mỗi thí nghiệm được trình bày ở bảng. Ở bảng cũng trình bày giá trị SNR (Signal to Noise ratio) của các kết quả theo chuẩn nhỏ nhất tốt nhất.

## 3. PHÂN TÍCH TƯƠNG QUAN XÁM

Tỷ lệ S/N được chuẩn hóa từ 0 đến 1. Ở đây, chúng ta thấy tỷ lệ S/N càng lớn thì quá trình thực nghiệm càng tốt, chuẩn hóa càng lớn càng tốt được áp dụng bằng Công thức (1). Khi đó, tỷ lệ S/N chuẩn hóa theo lớn nhất tốt nhất được biểu thị như trong Bảng 3.

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (1)$$

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \varphi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \varphi \Delta_{\max}} \quad (2)$$

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{x_{vj}} \max_{x_{vk}} |x_0(k) - x_i(k)| \quad (4)$$

$$\Delta_{\min} = \min_{x_{vj}} \min_{x_{vk}} |y_0(k) - y_i(k)| \quad (5)$$

$$Y_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n w_k \xi_i(k) \quad (6)$$

Trong đó:  $x_i^*(k)$  là giá trị quan hệ xám;  $\max x_i^0(k)$  và  $\min x_i^0(k)$  lần lượt là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất trong dãy  $x_i^0(k)$ ;  $\xi_i(k)$  là hệ số quan hệ xám;  $\Delta_{oi}(k)$  là hiệu số giữa các vị trí tương ứng trong dãy  $x_0(k)$  và  $x_i(k)$ ;  $\varphi$  là hệ số nhận dạng, thường là 0.5.

Kết quả tính toán hệ số tương quan xám (grey correlation calculation – GRC) và cấp quan hệ xám (grey relational grade – GRG) được trình bày trong Bảng 3. Phân tích khoảng

(range analysis) cho giá trị GRG được trình bày ở Bảng 4, từ đây có thể thấy các nhân tố áp suất giữ và vận tốc phun nhựa ảnh hưởng lớn đến đầu ra của nghiên cứu. Thông số tối ưu được suy ra từ Bảng 4 là A1B1C1D1E1.

## 4. PHÂN TÍCH PHƯƠNG SAI

Phân tích phương sai (ANOVA) trên GRG được thực hiện để tìm ra những yếu tố chính ảnh hưởng đến đầu ra của các đầu vào khác nhau, từ đó cho phép chúng ta tìm ra nhân tố đóng vai trò chính trong việc ảnh hưởng đến đầu ra và được trình bày trong các thông số ép có ảnh hưởng lớn đến GRG (Bảng 5). Kết quả là hai thông số ép: áp suất giữ (tác động: 36.68%), và vận tốc phun (tác động: 34.44%) được coi là đóng vai trò chính đến chiều rộng

đường hàn và độ lệch kích thước quan trọng của sản phẩm.

## 5. KẾT QUẢ XÁC THỰC

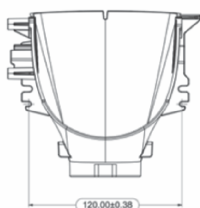
Bảng 6 trình bày kết quả của các thí nghiệm xác nhận, cho thấy hiệu quả rõ rệt của các thông số tối ưu. Cụ thể, độ rộng đường hàn đã giảm từ 0.0625 xuống 0.0192 (cải thiện 69.28%), và độ lệch kích thước giảm từ 0.1452 xuống 0.0518 (cải thiện 65.76%). Kết quả từ các thí nghiệm này cũng cho thấy sự tương quan chặt chẽ giữa giá trị GRG dự đoán và thực nghiệm. Điều này khẳng định tính hiệu quả của phương pháp GRA dựa trên Taguchi trong tối ưu hóa đa mục tiêu, giúp giảm thiểu khuyết tật đường hàn đồng thời nâng cao độ chính xác kích thước.

Bảng 1. Các nhân tố đầu vào và mức độ

Ký hiệu	Nhân tố	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A	Nhiệt độ nhựa	70	80	85	90
B	Nhiệt độ khuôn	295	300	305	310
C	Vận tốc phun	60	65	70	75
D	Áp suất giữ	25	30	35	40
E	Thời gian làm nguội	20	25	30	35

Bảng 2. Các thông số đánh giá và thiết bị đo lường

Mục tiêu tối ưu	Đơn vị	Giá trị yêu cầu	Thiết bị đo lường
Weld lines width	mm	Ideal = 0	Keyence IM 7500 - 0.0001 mm (Hình 2b)
Dimension 1 (Hình 2a)	mm	109.65 ± 0.38	



(a)



(b)

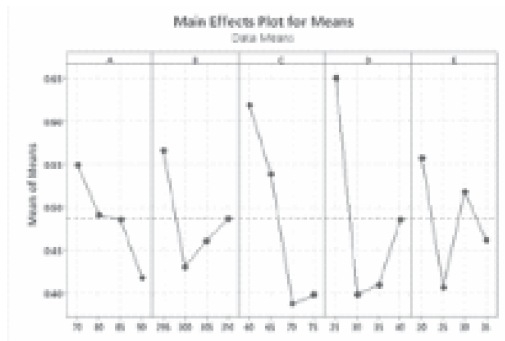
Hình 2. Kích thước quan trọng của sản phẩm (a), thiết bị đo lường Keyence IM 7500 (b).

Bảng 3. Bảng tính giá trị GRC cho 16 thí nghiệm

STT	Nhân tố đầu vào					Kết quả thực nghiệm		SNR		GRA		GRG
	A	B	C	D	E	Bề rộng đường hàn	Sai lệch kích thước	Bề rộng đường hàn	Sai lệch kích thước	Bề rộng đường hàn	Sai lệch kích thước	
1	70	295	60	25	20	0.0625	0.1511	29.1435	16.4147	1.0000	0.3337	0.9978
2	70	300	65	30	25	0.0498	0.0882	15.5301	21.0906	0.3457	0.5506	0.3816
3	70	305	70	35	30	0.0381	0.0913	14.7605	20.7906	0.3333	0.5286	0.3816
4	70	310	75	40	35	0.0267	0.1104	15.7669	19.1406	0.3496	0.4332	0.4374
5	80	295	65	35	35	0.0487	0.1305	16.5363	17.6878	0.3632	0.3738	0.5242
6	80	300	60	40	30	0.0476	0.1426	16.2892	16.9176	0.3588	0.3484	0.5987
7	80	305	75	25	25	0.0349	0.1137	17.3484	18.8848	0.3788	0.4214	0.4625
8	80	310	70	30	20	0.0322	0.0608	19.2674	24.3219	0.4214	1.0000	0.3773
9	85	295	70	40	25	0.0423	0.0889	16.0986	21.0220	0.3554	0.5454	0.3879
10	85	300	75	35	20	0.036	0.0611	15.2844	24.2792	0.3416	0.9893	0.3379
11	85	305	60	30	35	0.0416	0.1212	16.5014	18.3299	0.3626	0.3979	0.4816
12	85	310	65	25	30	0.0362	0.1513	20.9635	16.4032	0.4678	0.3333	0.7339
13	90	295	75	30	30	0.0384	0.0714	15.8365	22.9260	0.3508	0.7393	0.3562
14	90	300	70	25	35	0.0394	0.1015	14.8512	19.8707	0.3347	0.4708	0.4054
15	90	305	65	40	20	0.0328	0.1316	14.9042	17.6149	0.3356	0.3712	0.5161
16	90	310	60	35	25	0.0339	0.0917	16.5246	20.7526	0.3630	0.5259	0.3973

Bảng 4. Bảng đáp ứng cho các giá trị trung bình của GRG

Mức	Nhiệt độ khuôn	Nhiệt độ nhựa	Vận tốc phun	Áp suất giữ	Thời gian làm mát
1	0.5496	0.5665	0.6189	0.6499	0.5573
2	0.4907	0.4309	0.5390	0.3992	0.4073
3	0.4853	0.4604	0.3881	0.4102	0.5176
4	0.4188	0.4865	0.3985	0.4850	0.4621
Delta	0.1309	0.1356	0.2308	0.2507	0.1500
Rank	5	4	2	1	3



Bảng 5. Phân tích ANOVA cho GRG.

Nhân tố	Deviation sum of squares S	Degree of freedom f	Mean square value	F	P (%)
A	0.03437	3	0.01146	0.34	7.85%
B	0.04068	3	0.01356	0.41	9.29%
C	0.1508	3	0.05027	2.10	34.44%
D	0.1606	3	0.05352	2.32	36.68%
E	0.05137	3	0.01712	0.53	11.73%

Bảng 6. Giá trị xác thực tại điều kiện ép tối ưu.

	Nhiệt độ khuôn	Nhiệt độ nhựa	Vận tốc phun	Áp suất giữ	Thời gian làm mát	Bề rộng đường hàn	Độ lệch kích thước
Điều kiện ép tối ưu	70	295	60	25	20	0.0192	0.0183

## 6. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, kỹ thuật GRA dựa trên Taguchi mang đến cơ hội cải thiện và tối ưu hóa các thông số ép phun. Trong nghiên cứu này, chiều rộng đường hàn và độ lệch kích thước được lấy làm đầu, được GRA chuyển đổi thành một GRG duy nhất, điều này rõ ràng giúp đạt được một thông số quy trình lý tưởng để giảm thiểu các khuyết tật đường hàn và độ lệch kích thước, đồng thời đạt được sự kết hợp lý tưởng của các thông số đúc là A1B1C1D1E1.

### Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUTE) trong đề tài nghiên cứu mã số T2024-14. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về cơ sở vật chất và nguồn lực đã cung cấp để thực hiện nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 10/11/2025

Ngày phân biện: 19/11/2025

### Tài liệu tham khảo:

- [1]. D. O. Kazmer, "Injection mold design engineering". Hanser, 2007. doi: 10.3139/9783446434196.
- [2]. R. Kerkstra and S. Brammer, "Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide", R. Kerkstra and S. B. T.-I. M. A. T. G. (Second E. Brammer, Eds., Hanser, 2021, pp. I-XX. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569908358.fm>.
- [3]. T. M. T. Uyen, H. T. Nguyen, V.-T. Nguyen, P. S. Minh, T. T. Do, and V. T. T. Nguyen, "Optimizing the Tensile Strength of Weld Lines in Glass Fiber Composite Injection Molding". Materials (Basel)., vol. 17, no. 14, p. 3428, Jul. 2024, doi: 10.3390/ma17143428.
- [4]. C. Wu and W. Liang, "Effects of geometry and injection molding parameters on weld line strength". Polym. Eng. Sci., vol. 45, no. 7, pp. 1021-1030, Jul. 2005, doi: 10.1002/pen.20369.
- [5]. S. M. Nasir, Z. Shayfull, S. Sharif, A. E. Abdellah, M. Fathullah, and N. Z. Noriman, "Evaluation of shrinkage and weld line strength of thick flat part in injection moulding process". J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 43, no. 10, p. 452, Oct. 2021, doi: 10.1007/s40430-021-03060-y.

- [6]. B. Purgleitner, D. Viljoen, I. Kühnert, and C. Burgstaller, “Influence of injection molding parameters, melt flow rate, and reinforcing material on the weld - line characteristics of polypropylene”. *Polym. Eng. Sci.*, vol. 63, no. 5, pp. 1551-1566, May 2023, doi: 10.1002/pen.26305.
- [7]. H. Oktem, I. Uygur, E. S. Sari, and D. Shinde, “The hybrid approach of genetic algorithm and particle swarm optimization on reduced weld line defect in plastic injection molding”. *Prog. Rubber, Plast. Recycl. Technol.*, Aug. 2024, doi: 10.1177/14777606241270516.
- [8]. S. Kitayama, S. Hashimoto, M. Takano, Y. Yamazaki, Y. Kubo, and S. Aiba, “Multi-objective optimization for minimizing weldline and cycle time using variable injection velocity and variable pressure profile in plastic injection molding”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 107, no. 7-8, pp. 3351-3361, Apr. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05235-8.
- [9]. S. Li, G. Zhao, and J. Wang, “A method to improve dimensional accuracy and mechanical properties of injection molded polypropylene parts”. *J. Polym. Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 323-334, 2017, doi: 10.1515/polyeng-2015-0526.
- [10]. S. Kashyap and D. Datta, “Process parameter optimization of plastic injection molding: a review”. *Int. J. Plast. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 1-18, Jun. 2015, doi: 10.1007/s12588-015-9115-2.
- [11]. C.-T. T. Huang, T.-W. W. Lin, W.-R. R. Jong, and S.-C. C. Chen, “A methodology to predict and optimize ease of assembly for injected parts in a family mold system”. *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 18, p. 3065, Sep. 2021, doi: 10.3390/polym13183065.
- [12]. C.-C. K. KUO and H.-Y. LIAO, “Dimensional accuracy optimization of the micro-plastic injection molding process using the Taguchi design method”. *Mater. Sci.*, vol. 21, no. 2, Jun. 2015, doi: 10.5755/j01.ms.21.2.5864.
- [13]. M. R. Mani, R. Surace, P. Ferreira, J. Segal, I. Fassi, and S. Ratchev, “Process parameter effects on dimensional accuracy of micro-injection moulded part”. *J. Micro Nano-Manufacturing*, vol. 1, no. 3, pp. 1-8, 2013, doi: 10.1115/1.4025073.
- [14]. R. A. Fisher, “Statistical Methods for Research Workers”, 1992, pp. 66-70. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9\_6.