

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA SẢN PHẨM PHUN ÉP NHỰA CÓ HỖ TRỢ NƯỚC BẰNG PHẦN MỀM MOLDEX3D

APPLICATION OF MOLDEX3D TO DETERMINE OPTIMAL PARAMETERS FOR
WATER-ASSISTED INJECTION MOLDING PRODUCTS

Bành Quốc Nguyên*, Trương Phát Đạt

Bộ môn Chế tạo máy, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa,
Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: bqnguyen@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu tập trung tối ưu hóa quy trình ép phun hỗ trợ nước (WAIM) nhằm cải thiện độ đồng đều độ dày tường còn lại (RWTU), yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của sản phẩm rỗng. Mô hình mô phỏng số được xây dựng bằng Moldex3D và xác thực với dữ liệu thực nghiệm. Các thông số quá trình như nhiệt độ nhựa, khuôn, kích thước short-shot, áp suất nước, nhiệt độ nước, thời gian trễ và gia áp được phân tích bằng Thiết kế Trung tâm Tổ hợp (CCD) kết hợp Phương pháp Bề mặt Đáp ứng (RSM). Quá trình tối ưu hóa sử dụng thuật toán bầy đàn (PSO) để tối thiểu hóa độ lệch chuẩn (SD) của độ dày. Kết quả cho thấy phương pháp đã đề xuất giúp tăng độ đồng đều, tiết kiệm vật liệu và duy trì tính năng cơ học, đồng thời mang lại giá trị thực tiễn cao cho công nghiệp.

Từ khóa: Ép phun có hỗ trợ nước (WAIM); Moldex3D; Phương pháp Bề mặt Đáp ứng (RSM); Thiết kế Trung tâm Tổ hợp (CCD); Thuật toán Bầy đàn (PSO); Độ đồng đều bề dày tường còn lại (RWTU).

ABSTRACT

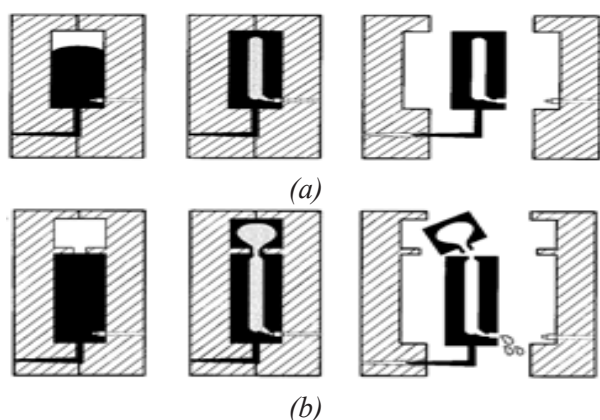
The study focuses on optimizing the Water-Assisted Injection Molding (WAIM) process to improve the uniformity of the remaining wall thickness (RWTU), a key factor affecting the mechanical properties of hollow plastic parts. A numerical simulation model was developed using Moldex3D and validated against experimental data. Process parameters such as melt temperature, mold temperature, short-shot size, water pressure, water temperature, delay time, and packing time were analyzed using Central Composite Design (CCD) combined with the Response Surface Methodology (RSM). The optimization was carried out using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to minimize the standard deviation (SD) of the wall thickness. Results showed that the proposed method significantly enhanced thickness uniformity, reduced material usage, and maintained mechanical performance, offering high practical value for industrial applications.

Keywords: Water-Assisted Injection Molding (WAIM); Moldex3D; Response Surface Methodology (RSM); Central Composite Design (CCD); Particle Swarm Optimization (PSO); Uniformity of Remaining Wall Thickness (RWTU).

1. GIỚI THIỆU

Công nghệ ép phun có hỗ trợ nước WAIM (Water-Assisted Injection Molding) [1] đã thu hút sự chú ý đáng kể trong thời gian gần đây nhờ các ưu điểm như sản phẩm nhẹ, rút ngắn chu kỳ sản xuất và mang lại sự linh hoạt trong thiết kế cũng như chế tạo các bộ phận nhựa. Quy trình này bao gồm việc bơm nhựa nóng chảy vào lòng khuôn, có thể là một phần (short-shot) như Hình 1 (a) [2] nguyên lý của quá trình ép phun ngắn hoặc toàn bộ (full-shot) như Hình 1 (b) [2] nguyên lý của quá trình ép phun đầy. Tiếp theo, chất lưu được bơm vào và ép chặt. Cuối cùng, tháo khuôn và lấy sản phẩm.

Hiện nay, các loại nhựa nhiệt dẻo tổng hợp có gia cường sợi thủy tinh ngắn (short glass-fiber reinforced thermoplastic composites) phát triển nhanh nhất và chiếm khoảng 30% thành phần nhựa tổng hợp [3]. Michaeli và cộng sự [4] đã nghiên cứu quá trình ép phun hỗ trợ nước đối với cả polypropylene và các chi tiết ống PP composite gia cường sợi thủy tinh. Họ nhận thấy thời gian làm mát cần thiết cho các PP composite ép phun hỗ trợ nước ngắn hơn so với các composite ép phun hỗ trợ khí.



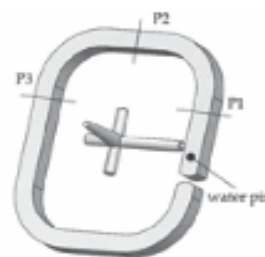
Hình 1. Sơ đồ minh họa: (a) Quy trình ép phun hỗ trợ nước ngắn (short-shot); (b) Quy trình ép phun đầy có van tràn hỗ trợ nước (full-shot with overflow) [2].

Nghiên cứu này tối ưu hóa quy trình WAIM cho vật liệu PP gia cường 20% sợi thủy tinh (PP + 20% GF) nhằm cải thiện độ đồng đều bề dày thành tường sản phẩm, với độ lệch chuẩn làm tiêu chí đánh giá chính. Các bước trong bài báo này như sau: (i) Thiết kế thực nghiệm theo phương pháp CCD (Central Composite Design) để khảo sát ảnh hưởng của các tham số quá trình; (ii) Xử lý ảnh từ mô phỏng CFD (Computational Fluid Dynamics) để tính toán độ chênh lệch bề dày; (iii) Xây dựng mô hình RSM (Re-sponse Surface Methodology) mô phỏng mối quan hệ giữa tham số đầu vào và độ dày thành; (iv) Tối ưu hóa bằng thuật toán PSO (Particle Swarm Optimization).

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

2.1. Phát biểu bài toán

Mô hình mô phỏng sử dụng lòng khuôn dạng ống cong với mặt cắt vuông 15×15 mm như Hình 2 [1], trong đó ba vị trí đặc trưng (P1, P2, P3) được chọn để đo lường giá trị đầu ra.



Hình 2. Mô hình hình học sử dụng trong mô phỏng.

Bảy tham số công nghệ đầu vào được khảo sát gồm: Nhiệt độ nóng chảy $[220-240$ °C], nhiệt độ khuôn $[45-75$ °C], kích thước bắn ngắn $[61-71$ %], áp suất nước $[6-9$ MPa], nhiệt độ nước $[45-65$ °C], thời gian trễ $[0-3$ giây] và thời gian gia áp $[20-40$ °C].

Mục tiêu là tối thiểu hóa độ lệch chuẩn dựa của bề dày thành tường của sản phẩm để

đảm bảo thành mỏng đều, qua đó nâng cao độ chính xác hình học, tính lặp lại và độ tin cậy trong sản xuất hàng loạt.

2.2. Mô hình toán học

Để đảm bảo quá trình tính toán hội tụ và phù hợp với điều kiện ép phun thực tế, mô hình toán học giả định như sau: (i) Áp dụng điều kiện không trượt giữa dòng nhựa nóng chảy và thành khuôn; (ii) Xem nhiệt độ quá trình điền đầy nhựa là đẳng nhiệt; (iii) Bỏ qua sự sinh nhiệt nhót do ma sát nội tại trong chất lỏng gây ra bởi lực cắt. Do đó, phương trình chi phối (bảo toàn khối lượng, động lượng, năng lượng) [5] cho dòng chảy ba chiều không đẳng nhiệt như sau:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \boldsymbol{\tau}) = -\nabla \cdot \mathbf{p} + \rho \cdot \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

Trong đó: $\mathbf{u}$ = vector vận tốc, T = nhiệt độ, t = thời gian, p = áp suất, $\boldsymbol{\tau}$ = tenxơ ứng suất, $\mathbf{g}$ = vector gia tốc trọng trường, ρ = mật độ, η = độ nhót, $\mathbf{k}$ = độ dẫn điện, C_p = nhiệt dung riêng và $\dot{\gamma}$ = tốc độ cắt.

Để mô tả các tính chất lưu biến của nhựa nóng chảy trong kênh dòng chảy của khuôn, phương trình cấu thành Cross kết hợp với hàm Arrhenius [5] được lựa chọn:

$$\boldsymbol{\tau} = -\eta(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (4)$$

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_o(T)}{1 + (\eta_o \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}}, \quad (5)$$

$$\eta_o(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (6)$$

Trong đó: n = chỉ số định luật lũy thừa, η_o = độ nhót khi không có biến dạng, τ^* = tham số mô tả vùng chuyển tiếp giữa vùng không có tốc độ biến dạng và vùng tuân theo định luật lũy thừa trên đường cong độ nhót.

2.3. Phương pháp số

Phần mềm Moldex3D được sử dụng để mô phỏng quá trình WAIM nhờ khả năng tái hiện đầy đủ các giai đoạn ép nhựa và tích hợp mô-đun WAIM với mô hình dòng chảy hai pha (nhựa – nước) [5]. Công cụ này giúp đánh giá chính xác hiện tượng rồng hóa, phân bố vật liệu, tối ưu thông số công nghệ, giảm chi phí thử nghiệm và nâng cao hiệu quả sản xuất.

2.4. Thiết kế quá trình tối ưu

Quá trình tối ưu hóa được thực hiện theo các bước được trình bày rõ ràng trong lưu đồ Hình 3. Đầu tiên, xác định các thông số quy trình và mục tiêu tối ưu, trong nghiên cứu này là giảm độ lệch chuẩn (SD) của sản phẩm ép nhựa. Bày nhân tố đầu và các mức được chọn để khảo sát như Bảng 1.

Tiếp theo, thiết kế thực nghiệm được xây dựng dựa trên thiết kế trung tâm tổ hợp (CCD) trong phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) [6], với tổng cộng 41 thí nghiệm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến SD. Sau đó, chạy mô phỏng để thu thập dữ liệu cần thiết, từ đó xây dựng mô hình

thay thế thông qua phương trình hồi quy bội bậc hai, biểu diễn mối quan hệ giữa các biến đầu vào và độ lệch chuẩn đầu ra [6].

Khi mô hình đã được xây dựng, tiến hành đánh giá chất lượng mô hình thông qua phân tích hồi quy và ANOVA (Analysis of variance) bằng phần mềm Design-Expert 12. Nếu mô hình chưa đủ tốt, cần quay lại bước thiết kế và mô phỏng. Khi mô hình đạt yêu cầu, sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) [7] để tìm giá trị tối ưu của các tham số đầu vào. Trong nghiên cứu này, PSO được cấu hình với 10 lần chạy độc lập, 500 vòng lặp tối đa và 100 hạt trong quần thể.

Quá trình tối ưu được lặp lại cho đến khi đạt hội tụ, tức là không còn cải thiện đáng kể về kết quả. Khi hội tụ được xác nhận, ta thu được giải pháp tối ưu. Cuối cùng, xác thực kết quả được thực hiện để đảm bảo rằng điều kiện tối ưu thực sự mang lại giá trị SD nhỏ nhất như kỳ vọng.

Bảng 1. Các nhân tố và mức được lựa chọn [1].

	Mức 1	Mức 2	Mức 3
A	220	230	240
B	45	60	75
C	61	66	71
D	6	7.5	9
E	45	55	65
F	0	1.5	3
G	20	30	40

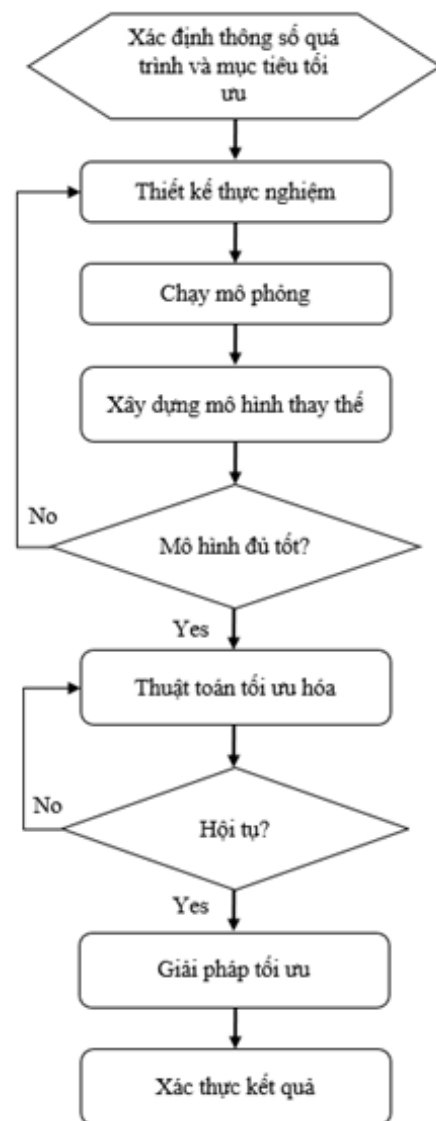
2.5. Tiêu chí đánh giá

Để đánh giá hiệu suất của mô hình trong việc dự đoán SD, hai chỉ số thống kê bao gồm căn bậc hai sai số trung bình bình phương RMSE và hệ số xác định (R^2) đã được tính toán. Các tham số thống kê này được định nghĩa như sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \|y(i) - \hat{y}(i)\|^2}{N}}, \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

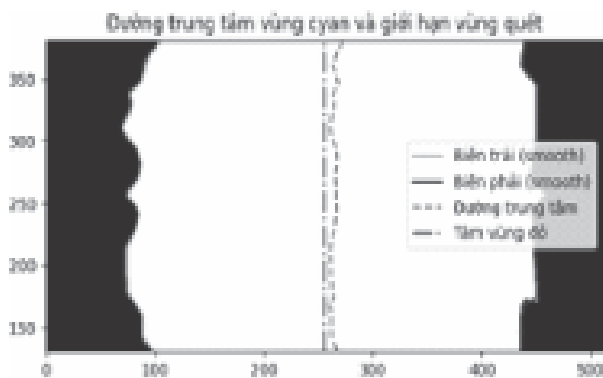
Trong đó: N = số điểm dữ liệu; $y(i)$ = giá trị đo lường thứ i ; $\hat{y}(i)$ = giá trị dự đoán thứ i ; $\bar{y}$ = giá trị trung bình của tất cả các thí nghiệm.



Hình 3. Lưu đồ tối ưu hóa

2.6. Tính toán độ lệch thành tường

Để tự động hóa việc đo đạc từ ảnh mô phỏng sản phẩm phức tạp, một mô hình xử lý ảnh bằng Python được xây dựng nhằm trích xuất các thông số như độ dày và độ lệch tâm (xem Hình 4).



Hình 4. Biểu diễn độ lệch bề dày thành tường.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác thực mô phỏng

Để kiểm tra độ tin cậy mô phỏng, phân tích hội tụ được thực hiện bằng cách tăng số phần tử lưới và theo dõi sự thay đổi chiều dài ngẫu nước (Penetration Length - LP). Định nghĩa về LP được giải thích rõ trong tài liệu [1]. Khi số phần tử tăng từ 847000 lên 1042000, giá trị LP gần như không đổi như Hình 5, cho thấy mô hình đã hội tụ. Tuy nhiên, thời gian tính tăng mạnh, nên lưới 847000 phần tử được chọn là tối ưu giữa độ chính xác và hiệu quả tính toán.

3.2. Kết quả tối ưu hóa

Mô hình dự đoán SD được xây dựng từ dữ liệu mô phỏng và đánh giá độ chính xác bằng hai chỉ số R^2 và RMSE. Kết quả trong Bảng 2 cho thấy mô hình có độ tin cậy cao, đủ

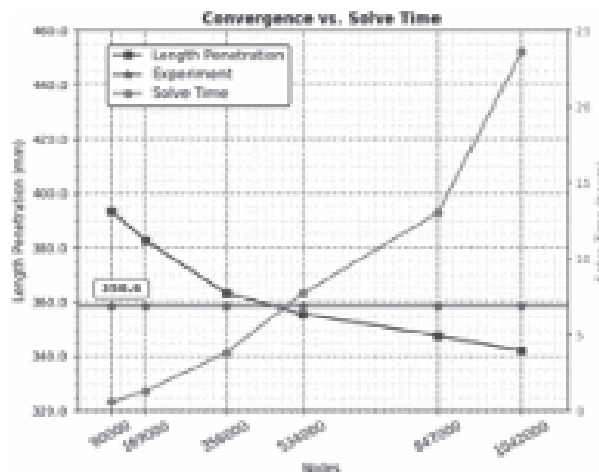
điều kiện sử dụng trong bài toán tối ưu. Một số kết quả mô phỏng theo thiết kế thực nghiệm được trình bày trong Bảng 3.

Sau khi tối ưu bằng PSO, bộ thông số đầu vào tốt nhất đã được xác định như Bảng 4. Việc kiểm chứng lại bằng mô phỏng cho thấy giá trị SD tại điểm tối ưu sai lệch dưới 10% so với dự đoán và có thể ứng dụng thực tiễn nhằm nâng cao hiệu quả thiết kế so với bộ thông số thiết kế ban đầu. Dựa trên thiết kế CCD kết hợp phân tích ANOVA, một phương trình đa thức bậc hai mô tả mối quan hệ giữa bảy thông số quá trình độc lập và SD dạng mã hóa được xác định:

$$\begin{aligned} SD = & 1.33 + 0.0346A - 0.0470C + 0.0440D - \\ & 0.0260E + 0.0247AC - 0.0478AD \\ & + 0.0442AE - 0.0889B - 0.0413CE + 0.0128C \\ & + 0.0115CG \\ & + 0.0200DF + 0.0152EF - 0.0645F + 0.1339A^2 \\ & - 0.1025B^2 \\ & + 0.1110D^2 \end{aligned}$$

Bảng 2. Các tham số thống kê của mô hình RSM

R^2	0.9078
RMSE	0.0414



Hình 5. Đồ thị kiểm tra lưới hội tụ

Bảng 3. Ma trận thí nghiệm và các kết quả tương ứng

Run	A	B	C	D	E	F	G	SD
1	230	60	66	7.5	65	1.5	30	1.2942
2	220	75	61	9	45	0	20	1.4968
3	230	60	66	9	55	1.5	30	1.5281
-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	230	60	66	7.5	55	1.5	30	1.2638
41	230	75	66	7.5	55	1.5	30	1.2692

Bảng 4. Bảng tính giá trị tối ưu và sai số giữa giá trị dự đoán và mô phỏng

Factors	A	B	C	D	E	F	G	SD		Error
	^o C	^o C	%	MPa	^o C	s	s	Optimum	Verification	%
Value	233.4	75.0	64.7	7.3	58.9	2.1	20.0	1.1492	1.2465	7.8

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này chứng minh hiệu quả của việc tích hợp Moldex3D với thiết kế thí nghiệm CCD, mô hình RSM và thuật toán PSO nhằm tối ưu độ đồng đều độ dày tường còn lại (RWTU) trong sản phẩm WAIM. Kết quả tối ưu từ PSO cho thấy SD giảm đáng kể trong khi vẫn đảm bảo điều kiện công nghệ khả thi. Ngoài ra, phương pháp xử lý ảnh tự động giúp nâng cao tốc độ và độ chính xác trong phân tích kết quả.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVKSTN-2024-CK-44. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày phản biện: 03/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. S.-J. Liu and Y.-S. Chen, "The manufacturing of thermoplastic composite parts by water-assisted injection-molding technology". *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 35, no. 2, pp. 171-180, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.10.006.
- [2]. S. Liu, W. Lin, and K. Lin, "Morphological development in water assisted injection molded polyethylene/polyamide 6 blends". *Polym Adv Technol*, vol. 22, no. 12, pp. 2062-2068, Dec. 2011, doi: 10.1002/pat.1721.
- [3]. D. Hull and T. W. Clyne, "An Introduction to Composite Materials". Cambridge University Press, 1996. doi: 10.1017/CBO9781139170130.
- [4]. W. Michaeli, T. Juntgen, and A. Brunswick, "WIT – an route to series production: first industrial application of the water injection technique". *Kunststoffe Plast Europe*, vol. 91, p. 37, 2001.
- [5]. CoreTech System Co., "Release Note of Moldex3D R14.0 SPI". Taiwan, 2016.
- [6]. H. Zhou, H. Liu, T. Kuang, Q. Jiang, Z. Chen, and W. Li, "Optimization of Residual Wall Thickness Uniformity in Short-Fiber-Reinforced Composites Water-Assisted Injection Molding Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network-Genetic Algorithm". *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, pp. 1-10, Feb. 2020, doi: 10.1155/2020/6154694.
- [7]. P. Zhao et al., "Optimization of Injection-Molding Process Parameters for Weight Control: Converting Optimization Problem to Classification Problem". *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, pp. 1-9, Mar. 2020, doi: 10.1155/2020/7654249.