

Numerical Simulation-Based Design of Experiments for Optimization of Injection Molding Parameters to Minimize Warpage in Plastic Parts

Tran Phu Nguyen 

Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Vietnam

Corresponding author. Email: phunt@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 09/03/2026
Revised: 18/03/2026
Accepted: 09/04/2026
Online First: 29/04/2026
Published:

KEYWORDS

Numerical simulation;
Injection molding;
Processing parameters;
Warpage;
DOE.

ABSTRACT

This study developed a numerical simulation model of the injection molding process to analyze the influence of processing parameters on product deformation and to determine an optimal parameter set for warpage minimization. The model successfully reproduced the filling, packing, and cooling stages, enabling detailed monitoring of temperature distribution, pressure evolution, and deformation fields throughout the entire molding cycle. The simulation results provide a scientific basis demonstrating that product warpage is primarily governed by two key mechanisms: differential temperature effects and volumetric shrinkage. For Ultramid A3 (PA66), volumetric shrinkage plays a dominant role, directly contributing to post-cooling deformation. By integrating the Design of Experiments (DOE) method with numerical simulation, the optimal processing parameters were determined as follows: melt temperature of 280 °C, mold temperature of 80 °C, packing time of 4 s, and maximum packing pressure of 60%. These conditions ensure a balanced interaction among filling behavior, packing effectiveness, and cooling rate, thereby significantly enhancing dimensional stability and reducing warpage. The proposed approach demonstrates strong effectiveness in injection molding process optimization and exhibits high potential for practical industrial application.

Ứng dụng mô phỏng số kết hợp thiết kế thí nghiệm để tối ưu thông số ép phun nhằm giảm độ cong vênh sản phẩm nhựa

Nguyễn Trần Phú 

Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Tác giả liên hệ. Email: phunt@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 09/03/2026
Ngày hoàn thiện: 18/03/2026
Ngày chấp nhận đăng: 09/04/2026
Ngày đăng trực tuyến: 29/04/2026
Ngày xuất bản:

TỪ KHÓA

Mô phỏng số;
Ép phun;
Thông số công nghệ;
Cong vênh;
DOE.

TÓM TẮT

Nghiên cứu đã xây dựng mô hình mô phỏng số quá trình ép phun nhằm phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến biến dạng và xác định bộ thông số tối ưu để giảm thiểu cong vênh. Mô hình số đã tái hiện đầy đủ các giai đoạn điền đầy, bảo áp và làm mát, đồng thời cho phép theo dõi chi tiết sự phân bố nhiệt độ, áp suất và trường biến dạng trong toàn bộ chu trình. Kết quả mô phỏng cung cấp cơ sở khoa học làm rõ rằng cong vênh của sản phẩm chủ yếu chịu chi phối bởi hai cơ chế chính là chênh lệch nhiệt độ và co rút thể tích. Đối với vật liệu PA66 Ultramid A3, co rút thể tích giữ vai trò quyết định, tác động trực tiếp đến sự biến dạng sau khi làm nguội. Kết hợp phương pháp thiết kế thí nghiệm (DOE) với mô phỏng số, bộ thông số tối ưu được xác định gồm: nhiệt độ nhựa 280 °C, nhiệt độ khuôn 80 °C, thời gian bảo áp 4 s và áp suất bảo áp 60% áp suất cực đại. Các thông số này đảm bảo sự cân bằng giữa điền đầy, bảo áp và làm mát, qua đó cải thiện đáng kể độ ổn định hình dạng và giảm cong vênh. Phương pháp đề xuất chứng minh hiệu quả trong tối ưu hóa quá trình ép phun và có tiềm năng ứng dụng thực tiễn cao.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2026.2113>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Ép phun là một trong những phương pháp gia công polymer phổ biến và quan trọng nhất hiện nay nhờ khả năng sản xuất hàng loạt với năng suất cao, độ lặp lại tốt và khả năng tạo hình các chi tiết có hình dạng phức tạp với chất lượng bề mặt cao. Sản phẩm nhựa chế tạo bằng ép phun được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp ô tô, điện – điện tử, thiết bị y tế, hàng tiêu dùng và bao bì. Nhờ ưu điểm về khối lượng nhẹ, chi phí hợp lý và tính linh hoạt trong lựa chọn vật liệu, công nghệ ép phun ngày càng giữ vai trò chủ đạo trong sản xuất các chi tiết kỹ thuật có yêu cầu cao về độ chính xác và hiệu năng sử dụng.

Tuy nhiên, quá trình ép phun chịu ảnh hưởng mạnh bởi các thông số công nghệ, đặc tính vật liệu và điều kiện làm mát trong khuôn. Trong số các khuyết tật thường gặp, hiện tượng cong vênh được xem là một trong những vấn đề nghiêm trọng nhất do ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định kích thước và hình dạng của sản phẩm. Cong vênh phát sinh chủ yếu từ sự co rút không đồng đều và sự hình thành ứng suất dư trong quá trình làm nguội. Sai lệch hình học do cong vênh có thể gây khó khăn trong lắp ráp, làm giảm tính năng cơ học, độ kín khít và độ tin cậy của sản phẩm, đồng thời làm gia tăng tỷ lệ phế phẩm và chi phí sản xuất. Vì vậy, việc kiểm soát và giảm thiểu cong vênh có ý nghĩa quan trọng trong đảm bảo chất lượng và nâng cao hiệu quả kinh tế của quá trình ép phun. Nghiên cứu cơ chế hình thành biến dạng và tối ưu hóa các thông số công nghệ là những hướng tiếp cận cần thiết nhằm cải thiện độ ổn định kích thước và đáp ứng các yêu cầu ngày càng khắt khe của sản xuất công nghiệp hiện đại.

Nhiều nghiên cứu đã tập trung phân tích cơ chế hình thành cong vênh trong ép phun thông qua mô phỏng số và thực nghiệm. Mô hình mô phỏng số ba chiều dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn nhằm mô tả quá trình điền đầy khuôn trong ép phun, đặt nền tảng cho việc phân tích phân bố nhiệt độ, áp suất và dòng chảy polymer đã phát triển trong nghiên cứu [1]. Trên cơ sở mô phỏng, các phương pháp tối ưu hóa như ANOVA, mạng nơ-ron và thuật toán di truyền đã được so sánh nhằm giảm cong vênh [2]. Tiếp đó, ảnh hưởng của các thông số ép phun và vật liệu khuôn đến tính chất cơ học đã được nghiên cứu, đồng thời phương pháp Taguchi đã được ứng dụng để tối ưu hóa các tham số công nghệ [3], [4]. Một mô hình đánh giá ảnh hưởng của hệ thống làm mát đến nhiệt độ và co rút đã được xây dựng [5], trong khi mối quan hệ giữa cấu hình làm mát và cong vênh đã được làm rõ [6]. Kiểm soát nhiệt độ cục bộ của khuôn đã được đề xuất nhằm giảm biến dạng đối với sản phẩm thành mỏng [7]. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ bền, co rút và cong vênh đã được hệ thống hóa trong một nghiên cứu tổng quan [8]. Mô phỏng số đã được sử dụng để phân tích hiện tượng cong vênh trong các sản phẩm lai nhẹ có chèn insert [9], trong khi việc kết hợp tối ưu tham số và xử lý ủ đã được áp dụng nhằm giảm biến dạng [10]. Cuối cùng, các phương pháp mô hình hóa và tối ưu hóa trong ép phun đã được tổng quan [11].

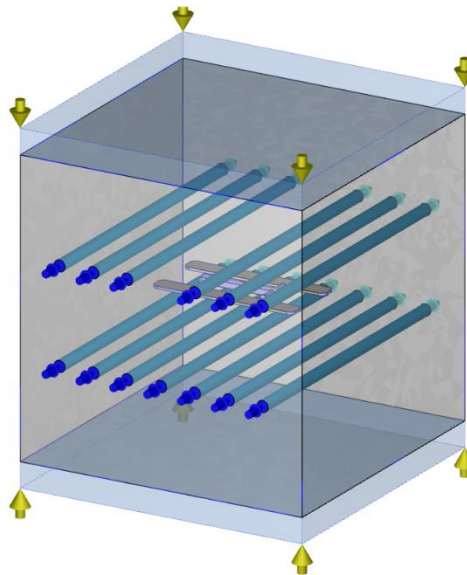
Một số nghiên cứu trong giai đoạn gần đây ghi nhận xu hướng tích hợp trí tuệ nhân tạo và các phương pháp thống kê. Mạng nơ-ron đã được ứng dụng để dự đoán co rút và cong vênh [12], trong khi các phương pháp Taguchi, RSM và GA-PSO đã được kết hợp nhằm tối ưu hóa quá trình [13]. Bên cạnh đó, các phương pháp DOE kết hợp với mạng nơ-ron đã được so sánh và phát triển cho mục đích mô hình hóa quá trình [14], [15]. Ảnh hưởng của thiết kế kênh làm mát đến cong vênh và độ chính xác hình học đã được tập trung nghiên cứu [16], [17], [18]. Một phương pháp cải thiện đồng thời cong vênh và thời gian làm mát đã được đề xuất [19]. Đồng thời, các tiên bộ gần đây trong tối ưu hóa nhằm giảm co rút và cong vênh đã được tổng hợp và phân tích [20], [21]. Gần đây, hiệu quả của phương pháp RSM trong việc giảm cong vênh sản phẩm ép phun tiếp tục được khẳng định [22].

Nhìn chung, các công trình cho thấy cong vênh là hệ quả của tương tác phức tạp giữa điều kiện nhiệt, đặc tính vật liệu và thông số công nghệ; đồng thời, việc kết hợp mô phỏng số với phương pháp DOE và các kỹ thuật tối ưu hóa hiện đại là xu hướng chủ đạo nhằm nâng cao độ chính xác dự đoán và hiệu quả

kiểm soát biến dạng. Từ tổng quan các nghiên cứu có thể nhận thấy rằng, mặc dù nhiều công trình đã phân tích cơ chế hình thành cong vênh và áp dụng các phương pháp tối ưu hóa khác nhau, việc tích hợp chặt chẽ giữa mô phỏng số và phương pháp thiết kế thí nghiệm (DOE) để xác định bộ thông số công nghệ tối ưu cho một sản phẩm và vật liệu cụ thể vẫn cần được tiếp tục làm rõ. Nghiên cứu này đã xây dựng mô hình mô phỏng số quá trình ép phun có độ tin cậy cao, kết hợp với phương pháp DOE nhằm đánh giá định lượng ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ cong vênh, từ đó xác định bộ tham số tối ưu giúp giảm thiểu biến dạng sản phẩm. Thông qua cách tiếp cận này, nghiên cứu không chỉ làm rõ cơ chế tác động của từng yếu tố công nghệ mà còn đề xuất giải pháp tối ưu có cơ sở khoa học và khả năng triển khai trong thực tiễn sản xuất. Kết quả đạt được kỳ vọng góp phần nâng cao độ ổn định kích thước, cải thiện chất lượng sản phẩm và giảm chi phí do phế phẩm trong quá trình ép phun công nghiệp.

2. Phương trình toán và quy trình mô phỏng

Mô hình số của bộ khuôn phun ép thể hiện trong Hình 1 được xây dựng nhằm mô phỏng toàn diện quá trình truyền nhiệt và dòng chảy của vật liệu trong chu kỳ phun ép. Cấu trúc mô hình bao gồm bốn thành phần chính: (1) sản phẩm mẫu ép, (2) hệ thống kênh dẫn nhựa, (3) hệ thống đường làm mát, và (4) khối khuôn bao quanh. Sản phẩm ép phun là mẫu thử uốn ba điểm dạng thanh lăng trụ, dùng để đánh giá tính chất cơ học, đặc biệt là độ bền tại đường hàn (weld line). Sản phẩm mẫu ép có chiều dài 100 mm, tiết diện chữ nhật, chiều rộng 12 mm độ dày 1.5 mm được thiết kế với hình dạng và kích thước phù hợp với mẫu thí nghiệm tiêu chuẩn, cho phép đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện gia công đến cơ tính tại vùng đường hàn và độ cong vênh trên sản phẩm. Hệ thống kênh dẫn nhựa được bố trí nhằm bảo đảm quá trình điền đầy đồng đều và ổn định trong khoang khuôn. Đường làm mát được thiết kế phân bố đối xứng quanh vùng tạo hình, với khoảng cách phù hợp đến bề mặt lòng khuôn nhằm đạt hiệu quả truyền nhiệt cao và kiểm soát tốt sự phân bố nhiệt độ trong chu kỳ làm nguội. Khối khuôn được mô hình hóa bao gồm cả phần lõi và phần lòng khuôn, được giả thiết là vật liệu kim loại có tính dẫn nhiệt cao. Toàn bộ mô hình được xây dựng trong phần mềm mô phỏng phun ép Moldex3D để phân tích quá trình dòng chảy, điền đầy, và làm nguội của vật liệu. Mô hình này cho phép đánh giá định lượng ảnh hưởng của các thông số thiết kế và điều kiện vận hành đến chất lượng sản phẩm và hiệu quả nhiệt của hệ thống khuôn.



Hình 1. Mô hình hệ thống phun ép nhựa trong nghiên cứu.

- Các phương trình chính

Trong mô hình hiện tại, nhựa nóng chảy và nước được giả thiết là các chất lỏng không nén được. Các phương trình chính chi phối dòng chảy 3D, không ổn định theo thời gian được biểu diễn như sau:

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

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

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

Trong đó, ρ là khối lượng riêng, t là thời gian, \mathbf{u} là vectơ vận tốc, T là nhiệt độ, p là áp suất, $\boldsymbol{\tau}$ là tensor ứng suất, η là độ nhớt, k là hệ số dẫn nhiệt, C_p là nhiệt dung riêng, và $\dot{\gamma}$ là tốc độ cắt.

• Các điều kiện biên:

Tại bề mặt rắn-lỏng

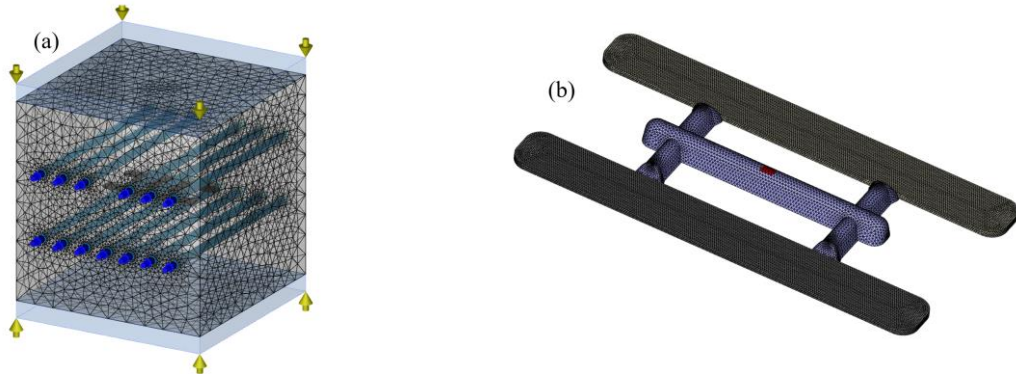
$$n \cdot (\lambda \nabla T) = \alpha (T_w - T_f) \quad (4)$$

Trong đó, vế trái tương trưng cho thông lượng nhiệt (heat flux) từ bên trong khuôn truyền đến bề mặt lòng khuôn thông qua quá trình dẫn nhiệt, vế phải trưng cho thông lượng nhiệt (heat flux) từ dòng khí nóng truyền đến bề mặt lòng khuôn thông qua quá trình đối lưu.

Điều kiện không trượt (no-slip boundary condition) tại bề mặt khuôn:

$$u = 0 \quad (5)$$

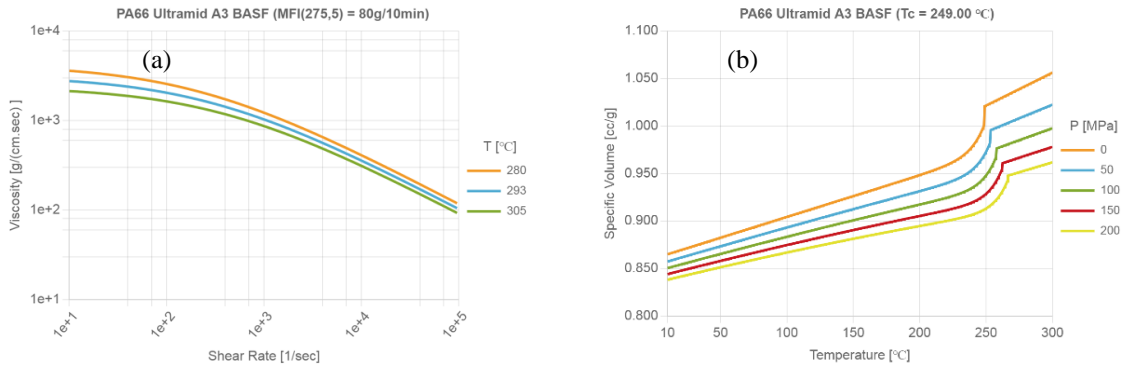
Moldex3D được sử dụng để giải quyết các phương trình chính và điều kiện biên trong mô hình này. Các phương trình chính được giải sử dụng nguyên lý bảo toàn thể tích kiểm soát. Tác giả sử dụng lưới theo biên dạng lớp biên (BLM). Lưới BLM bao gồm hai loại: năm lớp lưới lăng trụ trên bề mặt lớp biên và lưới tứ diện bên trong lớp lõi của sản phẩm, dự đoán tính toán chính xác hơn hiệu ứng gia nhiệt do ma sát trượt. Hình 2a thể hiện phân bố lưới trong toàn bộ mô hình với tổng cộng 997.446 phần tử lưới khối, và Hình 2b cho thấy lưới được chia mịn hơn trong sản phẩm và kênh dẫn.



Hình 2. Phân bố lưới trong toàn bộ mô hình (a) và sản phẩm mẫu ép uốn và kênh dẫn nhựa (b).

Các thông số công nghệ phun ép được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: Thời gian điền đầy: 0,29 s; Nhiệt độ nhựa nóng chảy: 290 °C; Nhiệt độ khuôn: 85 °C; Áp suất phun cực đại: 250 MPa; Thể tích nhựa phun: 5,73358 cm³; Thời gian giữ áp: 3 s; Áp suất giữ cực đại: 155 MPa; Thời gian làm nguội: 10 s; Thời gian mở khuôn: 2 s; Nhiệt độ khuôn khi lấy sản phẩm: 90 °C; Nhiệt độ môi trường: 25 °C; Chu kỳ ép tổng: 18,29 s. Các thông số công nghệ phun ép được lựa chọn dựa trên đặc tính của nhựa PA66 Ultramid A3 trong thư viện Moldex3D, kết hợp với các thử nghiệm mô phỏng sơ bộ. Cụ thể, nhiệt độ nhựa và khuôn được thiết lập ở mức cao nhằm giảm độ nhớt và cải thiện khả năng điền đầy; tốc độ và áp suất phun được điều chỉnh đủ để đạt trạng thái điền đầy hoàn toàn nhưng không làm gia tăng ứng suất trượt vượt ngưỡng; thời điểm chuyển V/P được chọn tại khoảng 98% thể tích điền đầy. Điều này nhằm đảm bảo quá trình điền đầy diễn ra hoàn toàn, không xuất hiện hiện tượng thiếu nhựa hoặc ứng

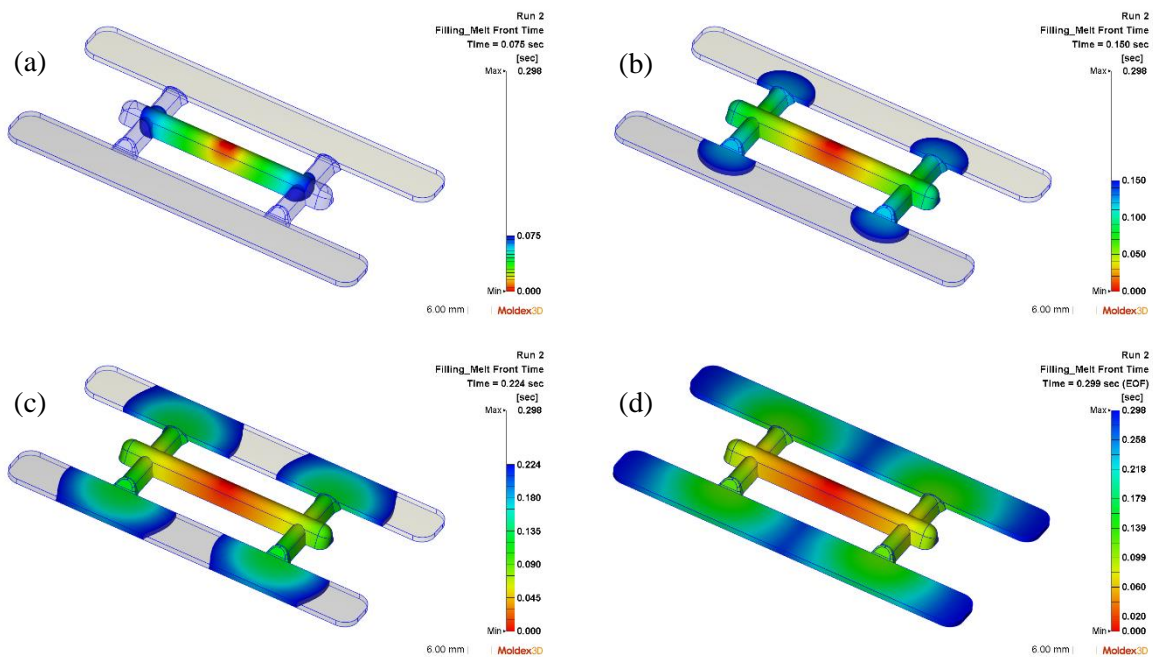
suất dòng chảy cao. Đồng thời, thời gian làm nguội và giữ áp được điều chỉnh để đạt được cân bằng giữa hiệu quả nhiệt và chất lượng hình dạng sản phẩm. Hình 3a thể hiện đồ thị độ nhớt theo tốc độ trượt và nhiệt độ; và Hình 3b cho thấy đồ thị PVT của nhựa PA66 Ultramid A3, là loại vật liệu được sử dụng trong toàn bộ quá trình mô phỏng.



Hình 3. Đồ thị độ nhớt theo tốc độ trượt và nhiệt độ (a) và đồ thị PVT của PA66 Ultramid A3 (b) [23].

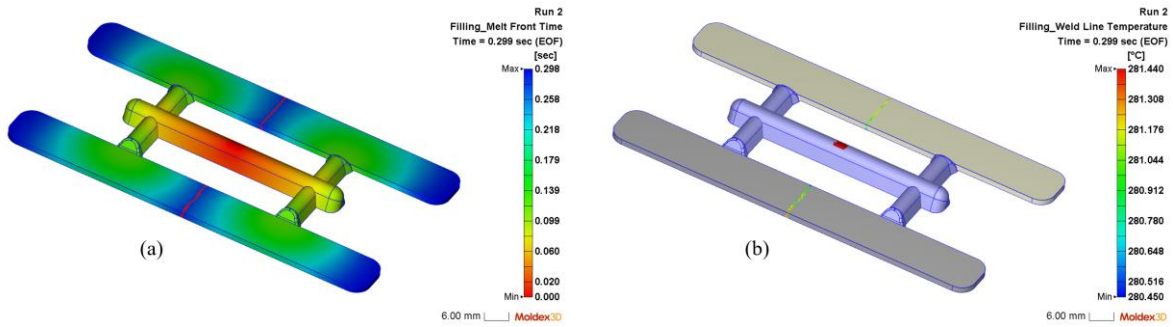
3. Kết quả và thảo luận

Hình 4 minh họa diễn biến quá trình điền đầy của nhựa nóng chảy trong khoang khuôn tại các thời điểm tương ứng 25%, 50%, 75% và 100% thể tích điền đầy. Tại thời điểm 25%, dòng nhựa vẫn đang ở trong kênh dẫn nhựa. Khi điền đầy đạt 50%, dòng nhựa bắt đầu lan tỏa từ vị trí công phun và tiến vào vùng trung tâm của sản phẩm. Vận tốc dòng chảy cao tập trung ở khu vực giữa, thể hiện vùng nhựa đầu tiên tiếp xúc và lan truyền theo hướng dọc trục sản phẩm. Ở thời điểm 75%, vật liệu nhựa đã phủ đều phần lớn thể tích khoang khuôn trung tâm và bắt đầu lan sang hai nhánh bên. Áp suất và vận tốc dòng chảy vẫn duy trì ổn định, đảm bảo sự phân bố đều của vật liệu mà không xuất hiện hiện tượng dòng chảy phân lớp hoặc tách dòng. Dòng chảy tại các nhánh bên gần như hợp nhất tại vị trí đường hàn, cho thấy quá trình điền đầy diễn ra cân đối giữa các kênh dẫn. Cuối cùng, tại thời điểm 100%, toàn bộ khoang khuôn được điền đầy hoàn toàn sau 0,3 giây. Quá trình mô phỏng cho thấy không xuất hiện hiện tượng thiếu nhựa, dòng chảy ổn định và đồng đều trong suốt quá trình điền đầy.



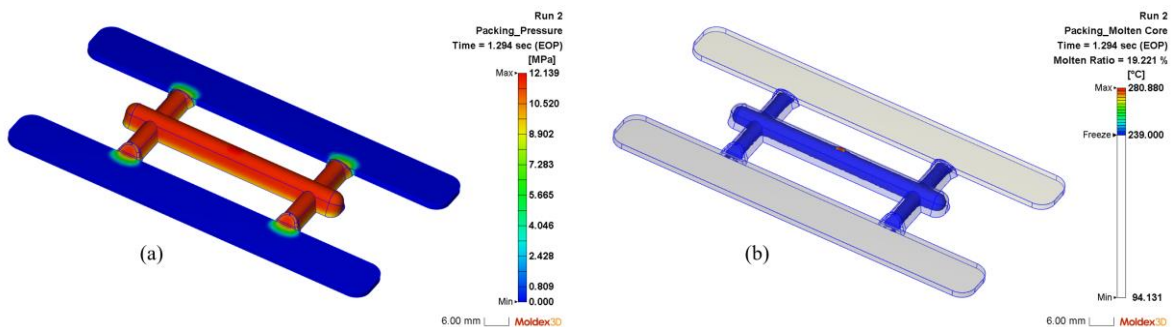
Hình 4. Quá trình điền đầy trong các giai đoạn: (a) 25%, (b) 50%, (c) 75%, và (d) 100%.

Hình 5a thể hiện vị trí hình thành đường hàn - khu vực mà hai hoặc nhiều dòng nhựa nóng chảy gặp nhau sau khi điền đầy quanh các chi tiết hoặc lỗ thoát khí. Đường hàn thường là vị trí yếu về cơ học do các phân tử nhựa tại đây không liên kết hoàn toàn, dẫn đến giảm độ bền kéo, uốn hoặc va đập của sản phẩm. Hình 5b cũng cho thấy nhiệt độ tại vị trí đường hàn đạt hơn 280 °C, giá trị này được xem là tương đối cao, giúp tăng khả năng hàn dính giữa các dòng nhựa và giảm nguy cơ xuất hiện khuyết tật, thông thường là vết hở hoặc bề mặt xám mờ. Nhiệt độ đường hàn càng cao thì mức độ khuếch tán phân tử giữa hai dòng chảy càng tốt, từ đó nâng cao chất lượng bề mặt và độ bền liên kết của vùng hàn.

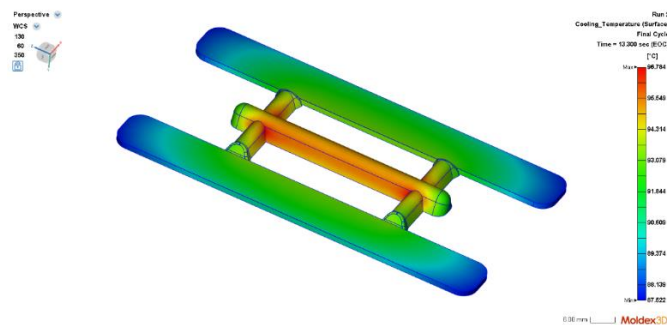


Hình 5. Hình vẽ thể hiện vị trí đường hàn (a) và nhiệt độ của đường hàn (b).

Hình 6a trình bày phân bố áp suất trong lòng khuôn tại thời điểm cuối quá trình bảo áp. Áp suất tập trung chủ yếu ở vùng trung tâm của mẫu uốn – vị trí xa cổng phun nhất, do đây là khu vực khó điền đầy hoàn toàn và chịu tác động nén của dòng nhựa từ nhiều hướng. Phân bố áp suất giảm dần về phía xa các cổng phun, thể hiện sự phân tán năng lượng dòng chảy khi nhựa lỏng di chuyển trong lòng khuôn. Việc duy trì áp suất cao tại vùng trung tâm giúp hạn chế hiện tượng rỗ khí và co rút thể tích, góp phần nâng cao độ đặc chắc của sản phẩm. Hình 6b cũng biểu diễn trạng thái phân bố pha rắn – pha lỏng tại cuối quá trình bảo áp. Dễ nhận thấy phần lớn thể tích sản phẩm đã rắn hóa, ngoại trừ một lớp mỏng ở trung tâm vẫn còn ở trạng thái bán lỏng. Sự tồn tại của vùng bán lỏng này giúp cân bằng co ngót khi khuôn bắt đầu giai đoạn làm mát, đồng thời duy trì sự liên kết vật liệu trong suốt quá trình nén bù thể tích.



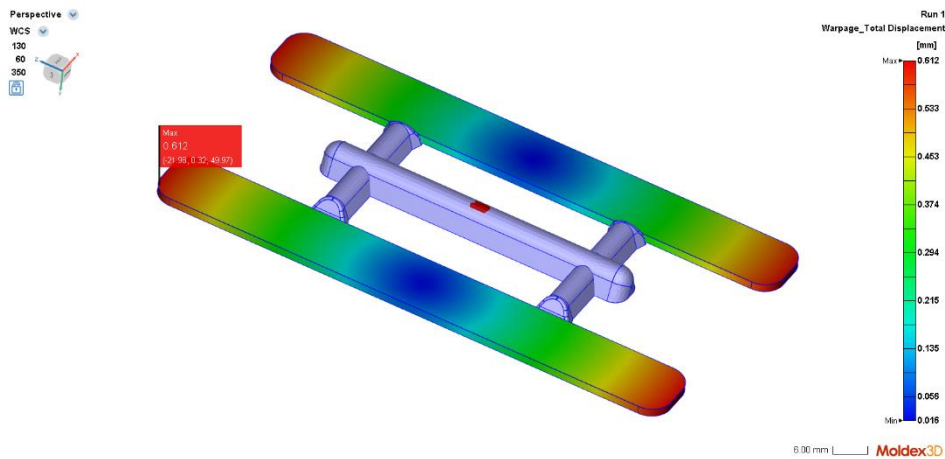
Hình 6. Phân bố áp suất trong lòng khuôn (a) và phân bố phần nhựa chưa đông (b) tại cuối quá trình bảo áp.



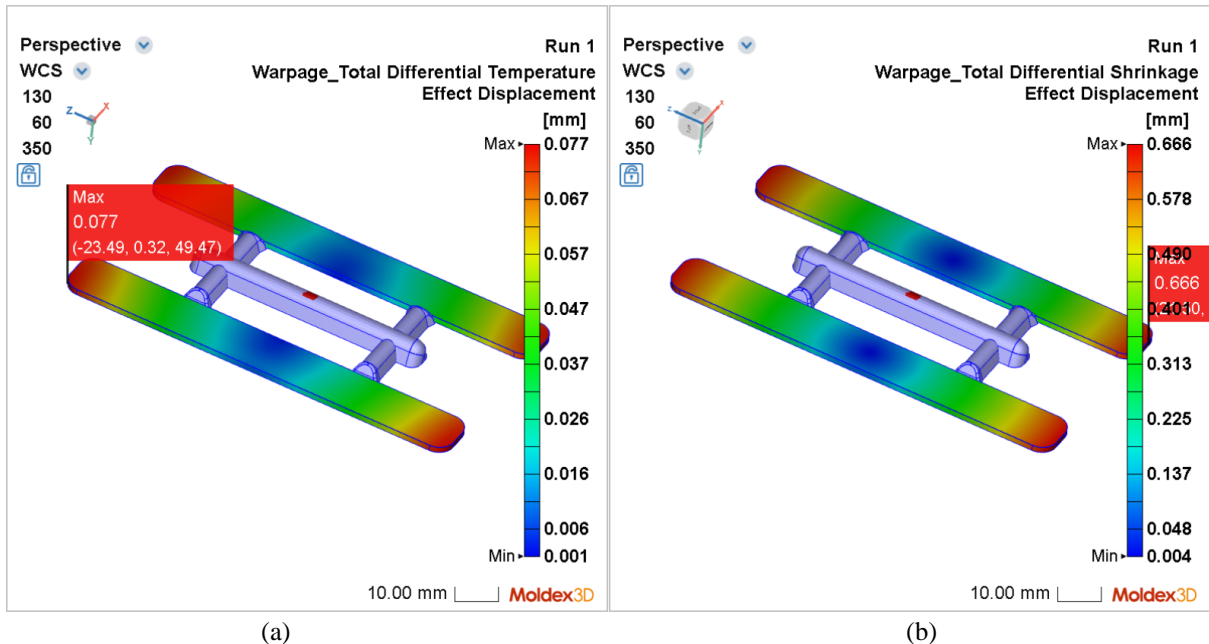
Hình 7. Phân bố nhiệt độ bề mặt sản phẩm tại cuối quá trình làm mát.

Hình 7 thể hiện phân bố nhiệt độ trên bề mặt sản phẩm tại cuối quá trình làm mát. Nhiệt độ cao nhất tập trung ở vùng giữa sản phẩm – nơi có bề dày lớn và xa kênh làm mát nhất. Nhiệt độ giảm dần về phía mép sản phẩm do tiếp xúc gần với bề mặt khuôn lạnh. Phân bố nhiệt độ đồng đều cho thấy hệ thống kênh làm mát được bố trí hợp lý, giúp hạn chế biến dạng nhiệt và cong vênh sau khi tách khuôn.

Hình 8 trình bày tổng chuyển vị cong vênh của sản phẩm được mô phỏng với vật liệu PA66 Ultramid A3. Kết quả cho thấy độ biến dạng tổng thể của sản phẩm đạt giá trị cực đại khoảng 0.612 mm, tập trung chủ yếu ở hai đầu thanh biên. Đây là các vùng xa cổng phun, chịu ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ và co ngót lớn nhất trong suốt quá trình làm mát. Dạng biến dạng thể hiện xu hướng uốn cong nhẹ theo phương dọc của mẫu, phản ánh sự co rút không đồng đều giữa các vùng vật liệu.



Hình 8. Tổng chuyển vị cong vênh trên sản phẩm.



Hình 9. Nguyên nhân cong vênh trên sản phẩm: so sánh giữa hiệu ứng nhiệt độ (a) và co rút (b).

Hình 9 trình bày sự so sánh giữa hai cơ chế gây cong vênh: hiệu ứng chênh lệch nhiệt độ và hiệu ứng co rút thể tích. Kết quả mô phỏng cho thấy chuyển vị do co rút thể tích lớn hơn đáng kể so với do nhiệt độ, chứng minh rằng nguyên nhân chủ yếu dẫn đến cong vênh của sản phẩm là sự co rút không đồng đều trong quá trình làm nguội. Hiện tượng này chủ yếu xuất phát từ hiệu quả bảo áp chưa cao, đặc biệt ở các vùng xa cổng phun, nơi áp suất truyền đến yếu hơn và không đủ để bù đắp thể tích co rút khi vật

liệu chuyển từ trạng thái nóng chảy sang rắn. Sự chênh lệch mật độ và độ co rút giữa các vùng trong lòng khuôn tạo nên ứng suất dư phi tuyến, dẫn đến biến dạng hình học sau khi tách khuôn. Do đó, để giảm thiểu cong vênh tổng thể, cần cải thiện khả năng duy trì áp suất bảo áp và phân bố đều áp suất trong lòng khuôn, thông qua việc tối ưu vị trí cổng phun, thời gian bảo áp và cấu trúc đường dẫn nhựa. Ngoài ra, việc kết hợp điều khiển nhiệt độ khuôn hợp lý cũng có thể giúp cân bằng quá trình đông đặc, hạn chế sai lệch hình dạng cuối cùng của sản phẩm.

Trong nghiên cứu này, phương pháp thiết kế thí nghiệm (DOE) được áp dụng nhằm đánh giá có hệ thống ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ cong vênh của sản phẩm ép phun. Bốn yếu tố điều khiển được lựa chọn bao gồm: nhiệt độ nhựa nóng chảy (Melt Temperature), nhiệt độ khuôn (Mold Temperature), thời gian bảo áp (Packing Time) và áp suất bảo áp cực đại (Maximum Packing Pressure). Mỗi yếu tố được khảo sát ở ba mức giá trị, tạo thành ma trận thí nghiệm trực giao gồm 9 tổ hợp chạy (L9), đảm bảo tính cân bằng và giảm số lượng thí nghiệm so với phương pháp toàn phần. Miền khảo sát của các thông số được xác định dựa trên điều kiện gia công thực tế và khuyến nghị của vật liệu, cụ thể: nhiệt độ nhựa từ 280–300 °C, nhiệt độ khuôn từ 80–90 °C, thời gian bảo áp từ 2–6 s và áp suất bảo áp từ 40–80% áp suất cực đại. Biến đáp ứng được lựa chọn là độ dịch chuyển cong vênh tổng lớn nhất với mục tiêu tối ưu theo tiêu chí “càng nhỏ càng tốt”.

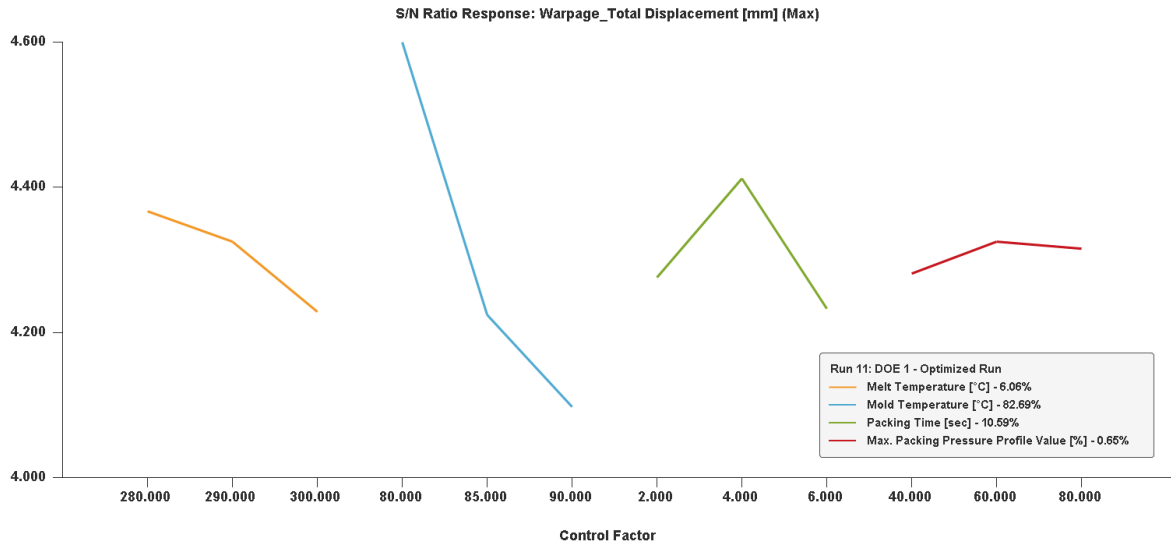
Hình 10 thể hiện kết quả mô phỏng của từng tổ hợp thí nghiệm được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán và xác định mức ảnh hưởng của từng yếu tố. Từ phân tích DOE, bộ thông số tối ưu được xác định tại mức: nhiệt độ nhựa 280 °C, nhiệt độ khuôn 80 °C, thời gian bảo áp 4 s và áp suất bảo áp 60% áp suất cực đại, cho giá trị cong vênh dự đoán nhỏ nhất. Phương pháp bố trí này cho phép đánh giá hiệu quả tương tác giữa các thông số và rút ngắn đáng kể thời gian nghiên cứu so với thử nghiệm truyền thống.

DOE Table							
Control Factor	Melt Temperature [°C]	Mold Temperature [°C]	Packing Time [sec]	Max. Packing Pressure Profile Value [%]	Quality Factor	Warpage_Total Displacement [mm] (Max)	Add Quality Factor
Level	3	3	3	3	Target	Global	
Min	280	80	2	40	Goal	Smaller	
Max	300	90	6	80	Weighting	1	0
1. Run 2	280	80	2	40	1. Run 2	0.588684	
2. Run 3	280	85	4	60	2. Run 3	0.602082	
3. Run 4	280	90	6	80	3. Run 4	0.624414	
4. Run 5	290	80	4	80	4. Run 5	0.579997	
5. Run 6	290	85	6	40	5. Run 6	0.620771	
6. Run 7	290	90	2	60	6. Run 7	0.623601	
7. Run 8	300	80	6	60	7. Run 8	0.598005	
8. Run 9	300	85	2	80	8. Run 9	0.622175	
9. Run 10	300	90	4	40	9. Run 10	0.623912	
Run 11*	280	80	4	60	Run 11*	0.575871	
Prediction							
Setting	280	80	4	60	Predicted Value	0.575871	

Hình 10. Bảng kết quả bố trí thí nghiệm theo phương pháp tối ưu hóa Taguchi.

Hình 11 cho thấy biểu đồ thể hiện đáp ứng tỷ số tín hiệu–nhiều (S/N ratio) theo tiêu chí “càng nhỏ càng tốt” đối với độ cong vênh cực đại của sản phẩm. Trong phân tích Taguchi, giá trị S/N càng lớn (theo trị tuyệt đối) tương ứng với mức biến dạng càng nhỏ và độ ổn định quá trình càng cao. Do đó, mức thông số có giá trị S/N cao nhất được xem là tối ưu cho mục tiêu giảm cong vênh. Biểu đồ S/N đối với chuyển vị cong vênh tổng thể [mm]) theo các yếu tố điều khiển ở hình 11 cho thấy tỷ số S/N thay đổi đáng kể theo các thông số công nghệ. Đối với nhiệt độ nhựa nóng chảy, giá trị S/N giảm dần khi nhiệt độ tăng từ 280 °C lên 300 °C, cho thấy mức 280 °C mang lại độ cong vênh nhỏ nhất trong phạm vi khảo sát; khi nhiệt độ quá cao, sự gia tăng độ co rút và chênh lệch nhiệt độ có thể làm tăng biến dạng sản phẩm. Đối với nhiệt độ khuôn, đường biểu diễn có độ dốc lớn nhất ($\approx -92,6\%$), chứng tỏ đây là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất; giá trị S/N cao nhất đạt được tại 80 °C và giảm rõ rệt khi tăng lên 85–90 °C,

khẳng định vai trò chi phối của nhiệt độ khuôn trong kiểm soát co rút và ứng suất dư. Với thời gian bảo áp, S/N đạt cực đại tại 4 s, trong khi thời gian quá ngắn (2 s) hoặc quá dài (6 s) đều làm tăng cong vênh, cho thấy tồn tại giá trị tối ưu nhằm cân bằng quá trình bù vật liệu và làm nguội. Tương tự, áp suất bảo áp cực đại đạt hiệu quả tối ưu tại mức 60%; áp suất quá thấp không đủ bù co rút, còn áp suất quá cao có thể gây tích lũy ứng suất dư, dẫn đến gia tăng biến dạng. Từ phân tích S/N ratio, tổ hợp tối ưu được xác định là: 280 °C – 80 °C – 4 s – 60%, phù hợp với kết quả dự đoán trong bảng DOE. Tổng thể, biểu đồ cho thấy nhiệt độ khuôn là thông số có ảnh hưởng mạnh nhất đến cong vênh, tiếp theo là thời gian bảo áp và nhiệt độ nhựa, trong khi áp suất bảo áp có mức ảnh hưởng thấp hơn trong phạm vi khảo sát.



Hình 11. Đồ thị phân hồi tỉ số S/N đối với chuyển vị cong vênh tổng thể [mm] theo các yếu tố điều khiển.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình số nhằm mô phỏng toàn diện các giai đoạn trong một chu trình ép phun, bao gồm điền đầy, bảo áp và làm nguội. Mô hình cho phép phân tích trường nhiệt độ, áp suất và phân bố ứng suất trong suốt quá trình gia công, qua đó cung cấp cơ sở tin cậy để đánh giá biến dạng sau khi tách khuôn. Kết quả mô phỏng cho thấy độ cong vênh của sản phẩm có thể được dự đoán định lượng với mức độ phù hợp cao, đồng thời xác định được nguyên nhân chi phối trong trường hợp nghiên cứu này là hiệu ứng bảo áp, thể hiện qua sự phân bố áp suất không đồng đều và quá trình bù co rút dẫn đến tích lũy ứng suất dư. Trên cơ sở mô hình đã xây dựng, phương pháp quy hoạch thực nghiệm (DOE) được áp dụng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ và xác định tổ hợp thông số tối ưu nhằm giảm thiểu cong vênh. Kết quả cho thấy bộ thông số tối ưu bao gồm: nhiệt độ nhựa nóng chảy 280 °C, nhiệt độ khuôn 80 °C, thời gian bảo áp 4 s và áp suất bảo áp 60% áp suất cực đại. Tổ hợp này cho giá trị tỷ số S/N cao nhất theo tiêu chí “càng nhỏ càng tốt”, qua đó làm giảm đáng kể độ cong vênh so với các điều kiện còn lại trong phạm vi khảo sát. Những kết quả đạt được khẳng định tính hiệu quả của việc tích hợp mô phỏng số với DOE trong tối ưu hóa quá trình ép phun, đồng thời có ý nghĩa thực tiễn trong nâng cao độ ổn định kích thước và chất lượng sản phẩm.

Lời cảm ơn

Công trình được tài trợ kinh phí bởi Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh.

Xung đột lợi ích

Tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Y. Chang and W. H. Yang, "Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three-dimensional finite volume approach," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 37, no. 2, pp. 125–148, 2001.
- [2] B. Ozcelik and T. Erzurumlu, "Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 171, no. 3, pp. 437–445, 2006.
- [3] B. Ozcelik, A. Ozbay, and E. Demirbas, "Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 9, pp. 1359–1365, 2010.
- [4] B. Ozcelik, "Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 8, pp. 1067–1072, 2011.
- [5] H. Hassan, N. Regnbay, C. Pujos, E. Arquis, and G. Defaye, "Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 1547–1557, 2010.
- [6] R. Sánchez, J. Aisa, A. Martínez, and D. Mercado, "On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding," *Measurement*, vol. 45, no. 5, pp. 1051–1056, 2012.
- [7] S. C. Nian, C. Y. Wu, and M. S. Huang, "Warpage control of thin-walled injection molding using local mold temperatures," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 57, pp. 24–30, 2015.
- [8] M. Mohan, M. N. M. Ansari, and R. A. Shanks, "Review on the effects of process parameters on strength, shrinkage, and warpage of injection molding plastic component," *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, vol. 55, no. 8, pp. 819–830, 2016.
- [9] T. K. Nguyen, C. J. Hwang, and B. K. Lee, "Numerical investigation of warpage in insert injection-molded lightweight hybrid products," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 18, no. 2, pp. 187–195, 2017.
- [10] S. Sudsawat and W. Sriseubsai, "Warpage reduction through optimized process parameters and annealed process of injection-molded plastic parts," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 11, pp. 4787–4799, 2018.
- [11] C. Fernandes, A. J. Pontes, J. C. Viana, and A. Gaspar-Cunha, "Modeling and optimization of the injection-molding process: A review," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 37, no. 2, pp. 429–449, 2018.
- [12] Z. Song, S. Liu, X. Wang, and Z. Hu, "Optimization and prediction of volume shrinkage and warpage of injection-molded thin-walled parts based on neural network," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 109, pp. 755–769, 2020.
- [13] W. C. Chen, M. H. Nguyen, and W. H. Chiu, "Optimization of the plastic injection molding process using the Taguchi method, RSM, and hybrid GA-PSO," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, pp. 1873–1886, 2021.
- [14] J. Heinisch, Y. Lockner, and C. Hopmann, "Comparison of design of experiment methods for modeling injection molding experiments using artificial neural networks," *J. Manuf. Process.*, vol. 61, pp. 357–368, 2021.
- [15] Y. Lockner and C. Hopmann, "Induced network-based transfer learning in injection molding for process modelling and optimization with artificial neural networks," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 112, pp. 3501–3513, 2021.
- [16] T. P. Nguyen, T. L. Le, and M. T. U. Tran, "Numerical simulation on the effect of the cooling channel design on the warpage of a thin-wall injection molding product," *Mater. Sci. Forum*, vol. 1075, pp. 95–101, 2022.
- [17] T. P. Nguyen and T. A. Bui, "Numerical optimization of the process conditions to improve the warpage inside the product and reduce the cooling time in the injection molding product," *Lect. Notes Mech. Eng.*, vol. 1, pp. 1–8, 2022.
- [18] T. P. Nguyen, H. X. L. Nguyen, X. V. Nguyen, and T. L. Le, "Reduce the displacement and the roundness of the round plastic product by the baffle cooling channel in the injection molding system," *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 4, Art. no. 430, 2024.
- [19] C. C. Kuo and Y. X. Xu, "A simple method of improving warpage and cooling time of injection molded parts simultaneously," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 122, pp. 619–637, 2022.
- [20] N. Y. Zhao, J. Y. Lian, and P. F. Wang, "Recent progress in minimizing the warpage and shrinkage deformations by the optimization of process parameters in plastic injection molding: A review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 120, pp. 85–101, 2022.
- [21] N. B. Guerra, T. M. Reis, T. Scopel, M. S. de Lima, C. A. Figueroa, and A. F. Michels, "Influence of process parameters and post-molding condition on shrinkage and warpage of injection-molded plastic parts with complex geometry," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 128, pp. 479–490, 2023.
- [22] V. L. Trinh, "Reducing warpage of injection molding products using response surface methodology," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 15, no. 3, pp. 22355–22359, 2025.
- [23] CoreTech System Co., Ltd., "Moldex3D material database," in *Moldex3D Simulation Software*. Hsinchu, Taiwan: CoreTech System Co., Ltd., 2025.

Tran Phu Nguyen was born in Khanh Hoa, Vietnam, in 1987. He received the B.S. degree in Engineering and Technology from Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2009, and the PhD degree in Mechanical Engineering from National Central University, Taoyuan City, Taiwan, in 2018. Since 2020, he has been a Lecturer with the Department of Renewable Energy, Faculty of Energy Engineering and Transport, Ho Chi Minh University of Technology and Engineering (formerly Ho Chi Minh City University of Technology and Education), Ho Chi Minh City, Vietnam. He has served as a section chairperson at several international conferences and was awarded the Excellent Conference Paper Award at the International Conference on Sustainable Energy and Environment in 2023. His research interests include heat transfer; fluid mechanics; computational fluid dynamics; injection molding; mold thermal management; and computer-aided engineering software.

Email: phunt@hcmute.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0008-2256-8269>.