

PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ CỦA LÒNG KHUÔN DƯƠNG VỚI CÁC THÔNG SỐ GIA NHIỆT KHÁC NHAU

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF THE POSITIVE MOLD CAVITY WITH DIFFERENT HEATING PARAMETERS

Huỳnh Văn An, Trần Thế San, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Trà Kim Quyên*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144046@student.hcmute.edu.vn;

santtt@hcmute.edu.vn;

hiendv@hcmute.edu.vn;

*quyennntk@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Ép phun là quá trình phun nhựa nóng chảy vào khuôn dưới áp lực, làm nguội để tạo sản phẩm như chén, vỏ điện thoại, linh kiện ô tô. Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng lớn đến chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu dự đoán nhiệt độ gia nhiệt khuôn dương 3D tiếp xúc nước, sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và phương pháp Taguchi (mảng L9). Các thông số như độ dày khuôn, hốc nước, lưu lượng, nhiệt độ được tối ưu. Kết quả xác thực ANN dự đoán chính xác, hỗ trợ cài đặt máy ép phun, giảm thử sai, nâng cao chất lượng.

Từ khóa: Ép phun; Nhiệt độ; Mạng nơ-ron nhân tạo; Taguchi.

ABSTRACT

Injection molding involves injecting molten plastic into a mold under pressure, then cooling it to form products like bowls, phone cases, and automotive parts. Mold temperature significantly impacts product quality. This study predicts the heating temperature of a 3D positive mold surface in contact with water, using an Artificial Neural Network (ANN) and the Taguchi method (L9 orthogonal array). Parameters such as mold thickness, water cavity thickness, flow rate, and heating temperature are optimized. The ANN model, validated against experimental data, accurately predicts temperatures, aiding machine setup, reducing trial-and-error, and enhancing product quality.

Keywords: Injection molding; Temperature; Artificial Neural Network; Taguchi.

1. TỔNG QUAN

Ép phun là một trong những phương pháp sản xuất nhựa phổ biến nhất, được ứng dụng rộng rãi để tạo ra các sản phẩm từ đơn giản đến phức tạp với độ chính xác cao, phù hợp cho sản xuất hàng loạt nhờ khả năng tối ưu hóa thời gian chu kỳ và chi phí vận hành [1]. Chất lượng sản phẩm ép phun phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm thiết kế chi tiết, cấu trúc khuôn, loại vật liệu nhựa, và các thông số vận hành như áp suất, thời gian làm mát, và đặc biệt là nhiệt độ khuôn [2]. Nhiệt độ khuôn đóng vai trò then chốt trong việc kiểm soát các hiện tượng như co ngót, biến dạng, và độ hoàn thiện bề mặt của sản phẩm, như đã được nghiên cứu trong các tài liệu về ảnh hưởng của nhiệt độ khuôn đến độ co rút của các sản phẩm nhựa dạng tấm [3]. Do đó, việc phát triển các phương pháp gia nhiệt khuôn hiệu quả, đảm bảo sự phân bố nhiệt độ đồng đều, là một yêu cầu cấp thiết để nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất [4].

Trong bối cảnh đó, các hệ thống gia nhiệt tiên tiến đã được nghiên cứu và triển khai nhằm cải thiện hiệu quả truyền nhiệt trong khuôn ép phun. So với các phương pháp gia nhiệt truyền thống sử dụng đường nước thẳng hoặc vòng, các hệ thống gia nhiệt sử dụng hốc nước ôm sát bề mặt khuôn (conformal heating) mang lại khả năng kiểm soát nhiệt độ vượt trội, đặc biệt đối với các khuôn có hình dạng phức tạp [5]. Hệ thống này tận dụng các kênh gia nhiệt được thiết kế theo đường cong của bề mặt khuôn, giúp tối ưu hóa quá trình truyền nhiệt và giảm thiểu sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng khuôn [6]. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng việc áp dụng hốc gia nhiệt có thể giảm thời gian chu kỳ sản xuất và cải thiện độ chính xác kích thước của sản phẩm nhựa [7].

Nhóm nghiên cứu đã tiến hành thiết

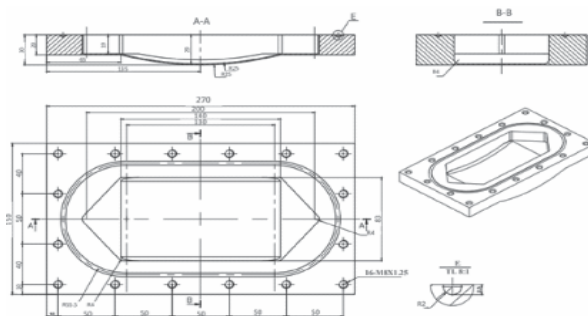
kế một mô hình thí nghiệm với khuôn dương mỏng, sử dụng hệ thống hốc nước ôm sát bề mặt cong để gia nhiệt, thay thế cho các đường nước truyền thống. Mục tiêu là đánh giá sự phân bố nhiệt độ của lòng khuôn dương dưới các thông số gia nhiệt khác nhau, từ đó xác định các điều kiện tối ưu cho quá trình ép phun. Để đảm bảo tính hệ thống và hiệu quả của thí nghiệm, phương pháp Taguchi đã được áp dụng thông qua phần mềm Minitab, cho phép thiết kế một tập hợp 27 thí nghiệm dựa trên các thông số đầu vào chính [8]. Các thông số được chọn bao gồm độ dày khuôn dương (1 mm, 1.8 mm, và thay đổi từ 1.8 mm đến 1 mm), độ dày hốc nước (3 mm, 5 mm, 8 mm), lưu lượng nước nóng (3, 5, 7.7 lít/phút), và nhiệt độ nước (40°C, 60°C, 80°C). Nhiệt độ bề mặt khuôn được đo sau 40 giây gia nhiệt để đánh giá sự phân bố nhiệt độ và hiệu quả của hệ thống [9].

Kết quả từ các thí nghiệm được sử dụng để huấn luyện một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), nhằm dự đoán nhiệt độ khuôn dưới các điều kiện thông số ngẫu nhiên. Mô hình ANN đã được chứng minh là một công cụ hiệu quả trong việc mô phỏng và tối ưu hóa các quá trình sản xuất phức tạp, đặc biệt trong ngành ép phun, nhờ khả năng xử lý các mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số đầu vào và đầu ra [10]. Việc sử dụng ANN không chỉ giúp giảm số lượng thí nghiệm cần thực hiện mà còn hạn chế phương pháp thử và sai, từ đó tiết kiệm thời gian và chi phí trong quá trình nghiên cứu và phát triển [5]. Kết quả dự đoán từ mô hình ANN cho thấy tiềm năng ứng dụng trong việc điều chỉnh các thông số gia nhiệt để đạt được sự phân bố nhiệt độ đồng đều, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất [7].

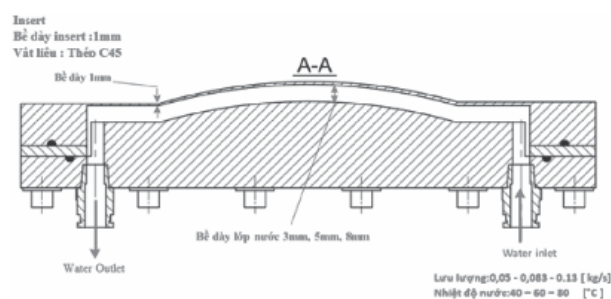
Mặc dù hệ thống gia nhiệt hốc nước mang lại nhiều lợi ích, nó cũng đối mặt với một số thách thức. Việc gia công các hốc nước ôm 

2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

(lít/phút), nhiệt độ gia nhiệt ($^{\circ}\text{C}$), với thời gian gia nhiệt 40 giây. Từ thiết kế 3D, ta mô phỏng gia nhiệt các trường hợp bằng phần mềm Ansys và tiến hành gia công mô hình thực tế, sau đó dựa vào thiết kế thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi trên phần mềm Minitab. Từ kết quả đó, ta có bộ thông số đã được thiết kế để tiến hành thí nghiệm đo nhiệt. Sau đó thu kết quả, xử lý số liệu qua phần mềm SmartView classic, và tiến hành training ANN trên phần mềm Matlab. Sau khi training ANN thì chúng tôi tiến hành so sánh nhiệt độ thực tế ở trường hợp ngẫu nhiên đo được không trùng với bộ thông số đầu vào với kết quả dự đoán của ANN đối với trường hợp đó, rồi đưa ra kết luận.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu

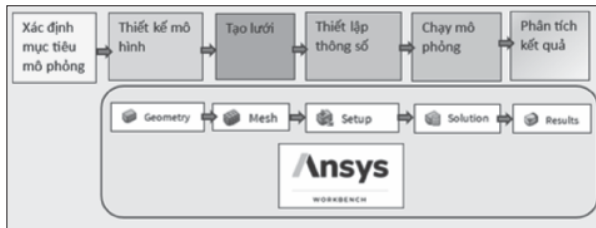


Hình 2. Mô hình kênh giải nhiệt

3. MÔ PHỎNG

Mục đích mô phỏng dòng chảy lưu chất cũng như nhiệt độ khi gia nhiệt của mô hình nghiên cứu là để giảm sai sót cũng như tối ưu trong quá trình thiết kế, giảm chi phí gia công mô hình nhưng vẫn đảm bảo độ hợp lý của mô

hình thí nghiệm sát với thực tế. Điều này cũng giúp có thể đánh giá sự khác nhau giữa nhiệt độ mô phỏng trên Ansys, trên thực tế đo khi thực nghiệm và khi kiểm nghiệm dự đoán của ANN. Sau khi thiết kế và thử mô phỏng mô hình thí nghiệm, chúng tôi tiến hành gia công các mô hình thí nghiệm thực tế.



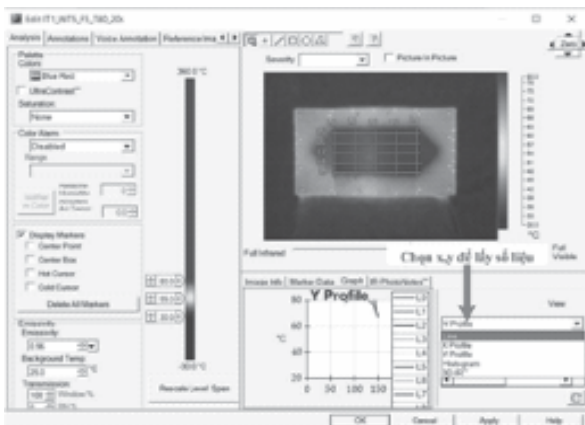
Hình 3. Trình tự mô phỏng Ansys



Hình 4. Kết quả mô phỏng

4. THỰC NGHIỆM SO SÁNH

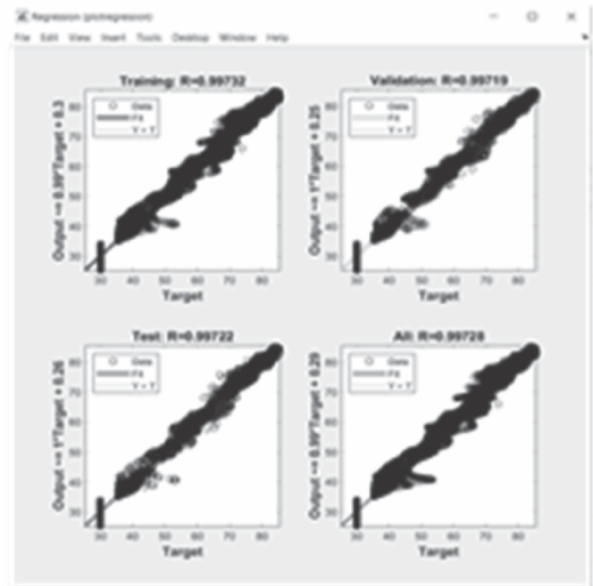
Sau khi mô phỏng mô hình 3D và gia công xong mô hình, chúng ta cần thiết kế thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi và ở đây nhóm sử dụng phần mềm Minitab để thiết kế thí nghiệm.



Hình 5. Đo phân bố nhiệt độ bề mặt khuôn

Bảng 1. Kết quả thiết kế thí nghiệm

THÔNG SỐ PHÂN TÍCH THEO TAGUCHI			
STT	Bề dày hốc nước (mm)	Lưu lượng (lít/phút)	Nhiệt độ (độ C)
1	3	3	40
2	3	5	60
3	3	7.7	80
4	5	3	60
5	5	5	80
6	5	7.7	40
7	8	3	80
8	8	5	40
9	8	7.7	60



Hình 6. Kết quả đào tạo mạng ANN

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

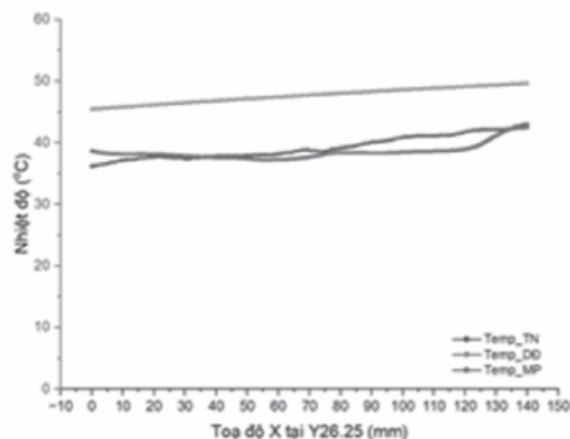
Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng và đào tạo ba mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network – ANN) tương ứng với ba trường hợp tấm khuôn dương có bề dày khác nhau: 1 mm, 1.8 mm và một trường hợp đặc biệt với sự thay đổi độ dày từ 1.8 mm đến 1 mm theo chiều dọc. Sau quá trình huấn luyện, các mạng ANN được đưa vào giai đoạn kiểm tra với các dữ liệu chưa từng thấy trước đó, đồng thời tiến hành đo thử nghiệm thực tế trên các mẫu khuôn đã gia công để tạo cơ sở

so sánh. Kết quả từ mô phỏng bằng phần mềm Ansys, kết quả thực nghiệm và kết quả dự đoán từ mạng ANN được tổng hợp và đối chiếu với nhau nhằm đánh giá mức độ chính xác và độ tin cậy của phương pháp dự đoán bằng ANN.

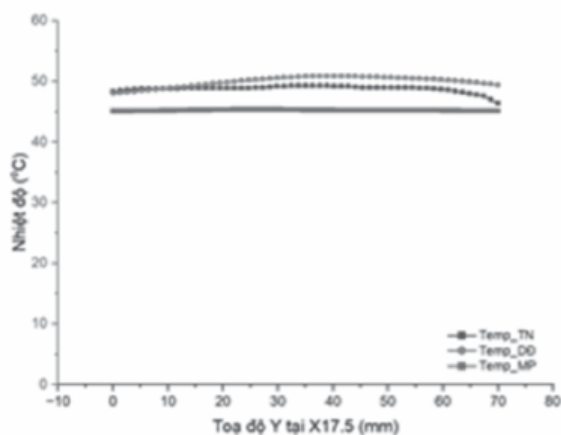
Để minh họa rõ hơn, các biểu đồ gia nhiệt theo thời gian được xây dựng và thể hiện ở Hình 6 (biểu đồ tại thời điểm 5 giây) và Hình 7 (biểu đồ tại thời điểm 20 giây). Các biểu đồ này mô tả sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn tại các thời điểm khác nhau trong chu kỳ gia nhiệt, với các đường biểu diễn tương ứng cho ba nguồn dữ liệu: thực nghiệm, mô phỏng bằng Ansys và dự đoán bởi ANN.

Hình 6 cho thấy sự phân bố nhiệt độ tại thời điểm 5 giây đầu tiên sau khi bắt đầu gia nhiệt. Tại giai đoạn này, rõ ràng có sự chênh lệch lớn giữa các đường biểu diễn. Điều này phản ánh hiện tượng gia nhiệt không đồng đều và không ổn định, chủ yếu do ảnh hưởng từ các yếu tố ngoại vi trong quá trình thí nghiệm thực tế – cụ thể là hiện tượng tụt nhiệt đột ngột khi xả nước nóng vào khuôn, làm ảnh hưởng đến hiệu suất ban đầu của máy gia nhiệt. Trong thời điểm này, mô hình ANN cũng chưa thể đưa ra dự đoán chính xác do dữ liệu đầu vào chưa đạt trạng thái ổn định, từ đó dẫn đến sai số cao giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng.

Tuy nhiên, bước sang thời điểm 20 giây (Hình 7), biểu đồ cho thấy sự hội tụ rõ ràng hơn giữa ba nguồn dữ liệu. Các đường biểu diễn dần tiến gần đến nhau, chứng tỏ hệ thống đã đạt được trạng thái ổn định trong quá trình gia nhiệt. Sai số giữa các giá trị mô phỏng, thực nghiệm và dự đoán ANN giảm đáng kể, phản ánh độ chính xác của mô hình ANN trong điều kiện loại bỏ các yếu tố ngoại vi. Điều này cũng chứng minh tính khả thi và độ tin cậy của ANN trong việc mô phỏng và dự đoán quá trình gia nhiệt của khuôn.



Hình 6. Biểu đồ gia nhiệt 5s



Hình 7. Biểu đồ gia nhiệt 20s

Nhận xét: Bên cạnh quá trình huấn luyện và kiểm nghiệm ANN, nghiên cứu còn tiến hành khảo sát thực nghiệm trên nhiều biến thể thiết kế của module hàn nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố cơ học và nhiệt đến chất lượng mối hàn. Kết quả cho thấy hình dạng mối hàn, lực ép và sự phân bố nhiệt độ đều là các yếu tố có vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm cuối cùng.

Đáng chú ý, module hàn được tích hợp cơ cấu kẹp linh hoạt, cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển hành trình tự động đã chứng minh được hiệu suất vượt trội trong thử

nghiệm. Thiết kế này không chỉ giúp đảm bảo sự ổn định trong quá trình truyền nhiệt mà còn cải thiện đáng kể sự đồng đều của nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trên bề mặt khuôn. Các dữ liệu thu thập được từ hệ thống cảm biến cũng góp phần nâng cao độ chính xác của ANN thông qua việc cung cấp dữ liệu đầu vào phong phú và có độ phân giải cao.

Song song đó, các kịch bản hoạt động khác nhau cũng được mô phỏng bằng phần mềm Ansys để đánh giá khả năng ứng phó của hệ thống với các tình huống bất thường, chẳng hạn như phân bố nhiệt không đều hoặc biến dạng cục bộ. Việc này giúp phát hiện các điểm yếu tiềm tàng trong thiết kế, từ đó cho phép các kỹ sư điều chỉnh nhanh chóng nhằm tối ưu hóa cấu trúc module, giảm thiểu sai số và rút ngắn chu kỳ thiết kế.

6. KẾT LUẬN

Kết quả so sánh cho thấy nhiệt độ mô phỏng và thực nghiệm tương đồng, chứng minh vai trò của phần mềm mô phỏng trong chế tạo khuôn. Gia nhiệt bằng nước nóng và kênh giải nhiệt theo hình dạng sản phẩm đảm bảo nhiệt độ đồng đều. Khóa luận hoàn thành các mục tiêu, ứng dụng kiến thức vào thiết kế khuôn, tối ưu kênh giải nhiệt, phân tích dữ liệu nhiệt độ và so sánh mô phỏng – thực nghiệm. Đề tài thể hiện khả năng cải tiến, sử dụng công cụ kỹ thuật, và tạo ra sản phẩm: 3 tấm insert, 2 tấm chêm, 1 tấm cover, cùng hình ảnh phân bố nhiệt độ.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Võ Kim Hằng;
- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài

báo: Huỳnh Văn An, Trần Thế San, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Trà Kim Quyên.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-339.❖

Ngày nhận bài: 05/5/2025

Ngày phản biện: 19/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ljung, L. (1995), “*System identification toolbox for use with MATLAB*”. The MathWorks Inc.
- [2]. Johannaber, F. (1983), “*Injection molding machines*”. Carl Hanser Verlag.
- [3]. Sukanek, P. C., & Campbell, G. A. (1990), “*Advanced process monitoring in injection molding*”. In SPE ANTEC Technical Papers (Vol. 36, p. 218).
- [4]. Dontula, N. P., Sukanek, H., Devanathan, H., & Campbell, G. A. (1991), “*Simulation and modeling of polymer melt behavior*”. Polymer Engineering and Science, 31, 1674.
- [5]. Dubay, R., Diduch, C., & Li, W. G. (2004), “*Model-based predictive control of injection molding processes*”. Polymer Engineering and Science, 44, 2318.
- [6]. Bambang, P., & Dubay, R. (2002), “*Neural-network-based approach to injection molding process optimization*”. Journal of Injection Molding Technology, 6, 247.
- [7]. Ljung, L. (1999), “*System identification: Theory for the user*” (2nd ed.). Prentice-Hall Inc.
- [8]. Dubay, R. (2002), “*Application of model predictive control in polymer processing*”. ISA Transactions, 41, 81.
- [9]. Agrawal, R., Pandelidis, I. O., & Pecht, M. (1986). SRC, 86.
- [10]. Dubay, R., Gupta, Y. P., & Bell, A. C. (1998), “*Injection molding process modeling using neural networks*”. Journal of Injection Molding Technology, 2, 37.