ỨNG DỤNG MẠNG NEURON TRONG DỰ ĐOÁN PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ LÒNG KHUÔN

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN PREDICTING TEMPERATURE DISTRIBUTION IN MOLD CAVITIES

Nguyễn Phạm Nguyên Quân, Trần Minh Thế Uyên, Phạm Sơn Minh, Bùi Chấn Thạnh*
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 2390412@student.hcmute.edu.vn;
uyentmt@hcmute.edu.vn;
minhps@hcmute.edu.vn;
**thanhbc.ncs@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng mạng neuron nhân tạo (ANN) để dự đoán phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn phun ép nhựa ở giai đoạn gia nhiệt trước khi ép. Bộ dữ liệu thực nghiệm gồm 25 mẫu được xây dựng dựa trên ma trận trực giao Taguchi L25 với bốn yếu tố đầu vào: nhiệt độ nước gia nhiệt, lưu lượng nước, bề dày hốc nước và bề dày tấm chặn nước. Mô hình ANN được xây dựng trong MATLAB dưới dạng perceptron đa lớp, huấn luyện bằng dữ liệu đã được tiền xử lý. Kết quả cho thấy mô hình ANN có khả năng dự đoán chính xác sự biến thiên nhiệt độ của khuôn, với sai số thấp nhất là 2,06% và không vượt quá 4,75% trong các trường hợp kiểm thử. Điều này khẳng định ANN là công cụ hiệu quả trong mô phỏng truyền nhiệt phi tuyến, giúp giảm thiểu số lượng thí nghiệm, tối ưu hóa thiết kế và nâng cao hiệu quả quy trình sản xuất.

Từ khóa: *Khuôn phun ép nhựa; Phân bố nhiệt độ; Gia nhiệt khuôn; Mạng neuron; Dự đoán quá trình.*

ABSTRACT

This study investigates the application of artificial neural networks (ANN) in predicting temperature distribution in injection mold cavities during the pre-heating stage. A database of 25 experimental samples was established using a Taguchi L25 orthogonal design, considering four input factors: heating water temperature, water flow rate, cooling channel thickness, and blocking plate thickness. The ANN model was developed in MATLAB with a multilayer perceptron architecture, trained on pre-processed experimental data. The results demonstrate that the ANN accurately predicts mold temperature evolution, with prediction errors as low as 2.06% and not exceeding 4.75% across test cases. The findings confirm that ANN-based models can capture nonlinear heat transfer behavior in mold heating and provide a reliable tool for process optimization, reducing experimental effort and improving mold design efficiency.

Keywords: *Injection molding; Temperature distribution; Mold heating; Neuron net work; Process prediction.*

1. TỔNG QUAN

Trong những thập kỷ gần đây, ngành công nghiệp ép phun đã chứng tỏ vai trò quan trọng và không thể thiếu trong sản xuất các sản phẩm nhựa. Quy trình ép phun không chỉ đảm bảo chất lượng cao cho các sản phẩm từ nhựa mà còn đáp ứng nhu cầu ngày càng đa dạng và khắt khe của thị trường [1]. Tuy nhiên, việc kiểm soát và dự đoán các thông số kỹ thuật trong quá trình ép phun, đặc biệt là nhiệt độ trong lòng khuôn, vẫn luôn là một thách thức lớn. Quy trình ép nhựa bao gồm nhiều bước nấu chảy nhựa, phun nhựa vào lòng khuôn để định hình, làm mát, và lấy sản phẩm ra khỏi khuôn (Hình 1). Mỗi bước trong quy trình đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định chất lượng cuối cùng của sản phẩm.

Trong quá trình này, nhiệt độ trong lòng khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm cuối cùng, và việc kiểm soát nhiệt độ không đều có thể dẫn đến các vấn đề như biến dạng, không đồng nhất về màu sắc và cấu trúc bề mặt [2, 3]. Để giải quyết vấn đề này, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện với hy vọng tối ưu hóa quy trình sản xuất và cải thiện chất lượng sản phẩm. Trong bối cảnh đó, việc áp dụng các công nghệ tiên tiến như mạng neuron để dự đoán phân bố nhiệt độ lòng khuôn ép phun được kỳ vọng sẽ mang lại những kết quả đột phá và đáng kể.

Khuôn mẫu là một công cụ có vai trò quan trọng và đa chức năng. Trước tiên, khuôn mẫu định hình hình dạng của sản phẩm cần tạo ra. Ngoài ra, nó có thể cung cấp các chi tiết bề mặt như kết cấu, chữ cái, logo và các chi tiết khác được đúc sẵn vào sản phẩm. Khuôn mẫu cũng hoạt động như một bộ trao đổi nhiệt, giúp rút nhiệt từ phần sản phẩm đã được tạo hình để giảm thời gian làm mát. Hơn nữa, khuôn mẫu có thể định vị các vị trí để cắt tỉa sản phẩm hoặc thậm chí thực hiện quá trình cắt tỉa ngay trong quá trình tạo hình, gọi là "in-mold trimming". Như vậy, khuôn mẫu không chỉ định hình sản phẩm mà còn đảm nhận nhiều chức năng khác nhau trong quy trình sản xuất sản phẩm [4-6].

Khuôn mẫu có hai phần chính: phần âm (cavity) và phần dương (core). Trong quá trình sản xuất, vật liệu được bơm hoặc đổ vào khuôn mẫu và sau đó được làm nguội hoặc rắn lại để tạo ra sản phẩm có hình dạng như mong muốn. Khuôn mẫu được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như sản xuất nhựa, đúc kim loại,…

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Thiết kế kết cấu khuôn

Thiết kế khuôn là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ lòng khuôn ép phun. Cụ thể, vị trí và số lượng kênh dẫn, đặc biệt là số lượng kênh dẫn của dẫn nóng sẽ quyết định sự phân bố nhiệt độ. Các kênh dẫn nóng được thiết kế ở các vị trí khác nhau sẽ dẫn đến sự phân bố nhiệt độ không đều trong khuôn. Ngoài ra, hình dạng bên ngoài của khuôn cũng ảnh hưởng đến dòng chảy và sự đối lưu nhiệt bên trong. Khuôn có hình dạng phức tạp hơn sẽ làm tăng sự phức tạp của dòng chảy và sự đối lưu nhiệt, dẫn đến sự phân bố nhiệt độ không đều trong khuôn [7].

Việc thiết kế các thông số về vị trí, số lượng cũng như kích thước kênh dẫn (đặc biệt là kênh dẫn nóng) cùng với hình dạng khuôn cần được cân nhắc kỹ lưỡng để đạt được sự phân bố nhiệt đồng đều trong lòng khuôn ép phun.

Hình 1. Một số hệ thống giải nhiệt [8]

2.2. Vật liệu và kích thước khuôn

Các vật liệu làm khuôn và vật liệu ép khác nhau sẽ có hệ số dẫn nhiệt khác nhau, điều này sẽ ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt và sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn. Bên cạnh sự khác nhau về vật liệu, thì kích thước khuôn khác nhau cũng sẽ ảnh hưởng phân bố nhiệt đối với các kích thước và hình dạng khuôn khác nhau cần thiết kế hệ thống gia và giải nhiệt thích hợp từng trường hợp để đảm bảo sự phân bố đồng đều của nhiệt trong lòng khuôn [9-12].

2.3. Nhiệt độ môi trường

Nhiệt độ và độ ẩm của môi trường sẽ ảnh hưởng đến sự truyền nhiệt, điều này góp phần gây nên sự không đồng đều của nhiệt độ trong lòng khuôn:

- Nhiệt độ môi trường: Nhiệt độ môi trường cao sẽ làm sự chênh lệch nhiệt độ so với nhiệt độ khuôn, ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt.

- Độ ẩm môi trường: Độ ẩm cao có thể ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt do có sự hình thành của hơi nước.

Thông qua các mục đã trình bày, ta thấy được phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác nhau, nên việc dự đoán nhanh và chính xác của nhiệt độ lòng khuôn vẫn đang là một thách thức.

Hình 2. Kết cấu chung của khuôn phun ép nhựa

3. THỰC NGHIỆM XÂY DỰNG CƠ SỞ DỮ LIỆU HUẤN LUYỆN MẠNG NEURON NHÂN TẠO

3.1. Thiết kế thí nghiệm

Như những yếu tố ở phần giới hạn đề tài, quá trình thực nghiệm được giới hạn trong giai đoạn gia nhiệt trước khi ép phun nhựa và khuôn sử dụng trong thực nghiệm là khuôn sản phẩm 2D có thành mỏng và được trang bị lớp làm mát (cooling layer). Với mô hình sản phẩm và khuôn có kích thước tổng quan như hình 3. Với bốn yếu tố và mỗi yếu tố có năm mức (Bảng 1).

Hình 3. Sản phẩm thiết kế và Tấm lòng khuôn thiết kế

Bảng 1. Ma trận trực giao L25 theo Taguchi

STT	NHIỆT ĐỘ NƯỚC (°C)	BỀ DÀY TẤM CHẶN NƯỚC (mm)	BỀ DÀY HỐC NƯỚC (mm)	LƯU LƯỢNG (ml/giây)
1	50	1	2	27,7
2	50	1,5	3,5	51,4

3	50	2	5	75,1
4	50	2,5	6,5	98,8
5	50	3	8	122,5
6	60	1	3,5	75,1
7	60	1,5	5	98,8
8	60	2	6,5	122,5
9	60	2,5	8	27,7
10	60	3	2	51,4
11	70	1	5	122,5
12	70	1,5	6,5	27,7
13	70	2	8	51,4
14	70	2,5	2	75,1
15	70	3	3,5	98,8
16	80	1	6,5	51,4
17	80	1,5	8	75,1
18	80	2	2	98,8
19	80	2,5	3,5	122,5
20	80	3	5	27,7
21	90	1	8	98,8
22	90	1,5	2	122,5
23	90	2	3,5	27,7
24	90	2,5	5	51,4
25	90	3	6,5	75,1

3.2. Tập dữ liệu sau khi thực hiện thực nghiệm

Sau khi tiến hành các bước thực nghiệm theo thiết kế đã trình bày ở các mục trước, nhóm nghiên cứu đã thu thập được một tập dữ liệu bao gồm tổng cộng 25 mẫu.

Trước khi đưa vào mô hình học máy, dữ liệu đã được tiền xử lý nhằm loại bỏ các giá trị ngoại lai, xử lý thiếu dữ liệu và chuẩn hóa về cùng một thang đo. Các hình ảnh nhiệt cũng được cắt và chuyển đổi về kích thước đồng nhất, đồng thời gán nhãn tương ứng với điều kiện thực nghiệm.

Một số mẫu dữ liệu tiêu biểu được trình bày trong Hình 3.10 dưới đây, minh họa rõ ràng mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và kết quả đầu ra. Qua quá trình đánh giá sơ bộ, tập dữ liệu thu được có độ đầy đủ và tính nhất quán cao, với tổng số lượng mẫu là 25 mẫu đáp ứng tốt yêu cầu cho việc huấn luyện và kiểm thử mô hình mạng neuron.

Sau khi hoàn tất quá trình thu thập và tiền xử lý dữ liệu, các biểu đồ được xây dựng nhằm phân tích tốc độ gia nhiệt của khuôn, dưới ảnh hưởng của các tổ hợp thông số: Tấm chắn (TC), Hốc nước (HN) và Lưu lượng nước (LL). Mỗi biểu đồ tương ứng với một mức nhiệt độ mục tiêu (từ 50°C đến 90°C), với 5 thí nghiệm khác nhau, tổng cộng 25 thí nghiệm.

Các biểu đồ này không chỉ giúp đánh giá trực quan hiệu quả truyền nhiệt của từng yếu tố, mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc xác định tính đa dạng và độ bao phủ của tập dữ liệu, phục vụ cho quá trình huấn luyện mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN).

Hình 4. Phân bố nhiệt độ quá trình gia nhiệt khuôn tại các thời điểm khác nhau

3.3. Cấu trúc của mô hình mạng neuron nhân tạo ANN

Mô hình được xây dựng dưới dạng Multilayer Perceptron (MLP) với kiến trúc mạng truyền thẳng nhiều lớp, phù hợp với bài toán hồi quy dự đoán thời gian gia nhiệt từ các thông số kỹ thuật đầu vào. Việc thiết lập mô hình được thực hiện thông qua công cụ Neural Network Fitting Tool (nftool) trong phần mềm MATLAB.

Để đảm bảo mô hình có khả năng học tốt mối quan hệ giữa các thông số đầu vào, cấu trúc mạng ANN được thiết kế theo nguyên tắc đơn giản nhưng hiệu quả, phù hợp với đặc điểm của bài toán và công cụ huấn luyện sử dụng. Cấu trúc tổng quát của mô hình được trình bày như sau:

Lớp đầu vào: Gồm 4 nút đầu vào là nhiệt độ nước gia nhiệt (°C) (NĐ), lưu lượng nước (ml/ giây) (LL), bề dày hốc nước (mm) (HN), bề dày tấm chặn nước (mm) (CN). Các yếu tố này được xử lý và đưa vào ma trận "input" kích thước 4×1.

Hình 5. Sơ đồ tổng quát của ANN

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau khi hoàn tất quá trình thiết kế và thực hiện thực nghiệm, chương trước đã trình bày chi tiết quá trình thu thập và phân tích dữ liệu liên quan đến tốc độ gia nhiệt trong các điều kiện kỹ thuật khác nhau. Tập dữ liệu thu được phản ánh rõ ràng mối quan hệ giữa các thông số đầu vào như độ dày tấm chắn, kích thước hốc nước và lưu lượng dòng chảy với hiệu suất truyền nhiệt. Tuy nhiên, như đã phân tích, mối quan hệ này không hoàn toàn tuyến tính và có thể chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố phức tạp.

Nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích, so sánh và đánh giá hiệu quả của mô hình dựa trên các kết quả của 5 thực nghiệm thu được với thông số đầu vào ngẫu nhiên không nằm trong tập dữ liệu dùng để huấn luyện. Mục tiêu là xác định mức độ chính xác, khả năng tổng quát và độ tin cậy của mô hình trong việc dự đoán nhiệt độ cao nhất của lòng khuôn theo thời gian thực từ các thông số kỹ thuật đầu vào.

Hình 6 thể hiện sự so sánh giữa kết quả dự đoán từ mô hình mạng neuron nhân tạo ☞

(ANN) và kết quả thực nghiệm thu được trong điều kiện cụ thể:

- Nhiệt độ gia nhiệt: 90°C;
- Độ dày tấm chắn: 1mm;
- Kích thước hốc nước: 8mm;
- Lưu lượng dòng chảy: 122,5 ml/s.

Hình 6. Biểu đồ gia nhiệt với nhiệt độ: 90°C – Tấm chặn: 1mm – Hốc nước: 8mm – Lưu lượng: 122,5 ml/s

Biểu đồ thể hiện nhiệt độ theo thời gian thực, với:

- Đường màu đen biểu diễn kết quả thực nghiệm;
- Đường màu đỏ biểu diễn kết quả dự đoán từ mô hình ANN.

Quan sát biểu đồ cho thấy hai đường có xu hướng biến thiên tương đồng trong quá trình gia nhiệt. Mô hình ANN đã mô phỏng khá sát với thực tế, phản ánh đúng xu hướng tăng nhiệt độ theo thời gian. Tuy nhiên, vẫn còn một số sai lệch xuất hiện, với độ chênh lệch giữa kết quả thực tế và lý thuyết là 4,75%.

Biểu đồ hình 7 thể hiện quá trình gia nhiệt trong điều kiện: nhiệt độ mục tiêu 70°C, độ dày tấm chắn 2mm, kích thước hốc nước 2mm, và lưu lượng dòng chảy 75,1 ml/s. Đây là một cấu hình có độ cản nhiệt cao hơn so với các thí nghiệm trước, do tấm chắn dày hơn và hốc nước nhỏ hơn.

Quan sát biểu đồ cho thấy xu hướng tương đồng trong suốt quá trình gia nhiệt. Mức độ khớp giữa hai đường là khá cao, đặc biệt ở giai đoạn giữa và cuối. Phần trăm chênh lệch giữa kết quả thực tế và lý thuyết là 2,06%, cho thấy mô hình dự đoán rất chính xác trong điều kiện này.

Hình 7. Biểu đồ gia nhiệt với nhiệt độ: 70°C – Tấm chặn: 1,5mm – Hốc nước: 5mm – Lưu lượng: 75,1 ml/s

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công một mô hình mạng neuron nhân tạo (ANN) để dự đoán phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn phun ép nhựa. Thông qua 25 thí nghiệm được thiết kế theo ma trận trực giao Taguchi L25, dữ liệu đầu vào và kết quả đo nhiệt độ được sử dụng để huấn luyện mô hình. Kết quả cho thấy ANN có khả năng mô phỏng chính xác sự thay đổi nhiệt độ trong các điều kiện kỹ thuật khác nhau, với sai số dao động từ 2,06% đến 4,75%. Điều này chứng tỏ ANN có tiềm năng lớn trong việc thay thế hoặc bổ trợ cho các phương pháp mô phỏng

truyền thống, giúp rút ngắn thời gian, giảm chi phí và nâng cao hiệu quả thiết kế khuôn.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng phạm vi khảo sát với số lượng mẫu lớn hơn, tích hợp thêm các yếu tố ảnh hưởng khác như vật liệu khuôn, điều kiện môi trường và giai đoạn điền đầy nhựa. Ngoài ra, việc kết hợp ANN với các thuật toán tối ưu hóa cũng là hướng nghiên cứu đầy hứa hẹn nhằm nâng cao hơn nữa độ chính xác và khả năng ứng dụng trong thực tiễn sản xuất.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh, Trần Minh Thế Uyên, Bùi Chấn Thạnh;
- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Phạm Nguyên Quân, Bùi Chấn Thạnh.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **08/8/2025**
Ngày phản biện: **21/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. J. Blazek, "*Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*". Butterworth-Heinemann, 2015.

[2]. C. Liu and L. T. Manzione, "*Process studies in precision injection molding. I: Process parameters and precision*". Polym. Eng. Sci., 1996, p. 1-9.

[3]. Junhan Lee, Dongcheol Yang, Kyunghwan Yoon, Jongsun Kim, "*Effects of Input Parameter Range on the Accuracy of Artificial*". Polymers, 2022.

[4]. Rashi A. Yadav, S.V. Joshi, N.K. Kamble, "*Recent Methods for Optimization of Plastic Injection Molding Process - A Literature Review*", tập 3. International Journal of Scientific and Engineering Research (IJSER), 2012.

[5]. Peter Klein, Michael Kennedy, "*Mold/Tool Design*". Cham: Springer, 2025.

[6]. P. S. Minh và T. M. T. Uyên, "*Giáo trình thiết kế và chế tạo khuôn phun ép nhựa*". NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2014.

[7]. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera and David P. DeWitt, "*Fundamentals of heat and mass transfer*". Wiley, 2011.

[8]. Frank P. Incropera; Adrienne S. Lavine; Theodore L. Bergman; David P. DeWitt, "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*". Wiley, 2011.

[9]. E. Alfinito và L. Reggiani, "*Stefan-Boltzmann Law Revisited*", arXiv, 2021.

[10]. G. Montambaux, "*Generalized Stefan-Boltzmann Law*", arXiv, 2016.

[11]. L. Reggiani; E. Alfinito, "*The Puzzling of Stefan-Boltzmann Law: Classical or Quantum Physics*". Vol. 124, EPL, 2023.

[12]. O. Valenzuela, A. Catala, D. Anguita, và I. Rojas, "*New Advances in Artificial Neural Networks and Machine Learning Techniques*". Neural Processing Letters, 2023.