

ỨNG DỤNG ANSYS CFX TRONG PHÂN TÍCH PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ LÒNG KHUÔN ÂM

APPLICATION OF ANSYS CFX IN THE ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE MOLD CAVITY

Hoàng Lê Mạnh Tiệp, Nguyễn Đức Tôn, Phạm Quân Anh, Nguyễn Hải Hoàn*

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

Email: 22144209@student.hcmute.edu.vn;

tonnd@hcmute.edu.vn;

anhpq@hcmute.edu.vn;

*hoannh@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này ứng dụng ANSYS CFX để phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm trong quá trình ép phun, tập trung vào hiệu quả của hệ thống làm mát được thiết kế theo biên dạng tấm insert. Mô hình mô phỏng được xây dựng với tấm insert và hệ thống làm mát bằng nước, sử dụng lưới tính toán Inflection để tăng độ chính xác tại các bề mặt tiếp xúc. Điều kiện biên bao gồm nhiệt độ khởi điểm của insert là 25°C, nước làm mát vào ở 80°C và thoát ra ở 25°C. Kết quả mô phỏng cho thấy sự phân bố nhiệt độ đồng đều, dao động từ 75.45°C đến 80.01°C, với chênh lệch nhiệt độ khoảng 4.5°C. Dòng chảy nước làm mát diễn ra ổn định, không ghi nhận hiện tượng tụ nhiệt hay dòng xoáy, chứng minh thiết kế hệ thống làm mát hiệu quả. ANSYS CFX đã thể hiện khả năng mô phỏng chính xác quá trình truyền nhiệt, hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế hệ thống làm mát, nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất trong công nghệ ép phun.

Từ khóa: Khuôn phun ép nhựa; Công nghệ ép phun nhựa; Lòng khuôn; Điều khiển nhiệt độ.

ABSTRACT

This study employs ANSYS CFX to analyze the temperature distribution within the cavity of an injection mold, focusing on the effectiveness of a cooling system designed to conform to the insert's profile. The simulation model was developed with the insert and a water-based cooling system, utilizing an Inflection meshing technique to enhance accuracy at contact surfaces. Boundary conditions included an initial insert temperature of 25°C, cooling water entering at 80°C, and exiting at 25°C. The simulation results revealed a uniform temperature distribution, ranging from 75.45°C to 80.01°C, with a temperature difference of approximately 4.5°C. The coolant flow was stable, with no evidence of heat accumulation or vortex formation, confirming the efficiency of the cooling system design. ANSYS CFX demonstrated its capability to accurately simulate heat transfer processes, facilitating the optimization of cooling system designs, thereby improving product quality and production efficiency in injection molding technology.

Keywords: Injection mold; Plastic injection molding technology; Mold cavity; Temperature control. 

1. TỔNG QUAN

Trong công nghệ ép phun, kiểm soát nhiệt độ khuôn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và hiệu quả quy trình sản xuất. Nhiệt độ không đồng đều hoặc không ổn định trong lòng khuôn có thể dẫn đến giảm độ bền sản phẩm, tăng tỷ lệ lỗi và ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất sản xuất [1, 2]. Với sự phát triển của các công cụ mô phỏng số, việc phân tích và tối ưu hóa phân bố nhiệt độ trong khuôn đã trở nên chính xác và hiệu quả hơn. Trong đó, ANSYS CFX, một phần mềm mô phỏng động lực học chất lỏng (CFD), đã được ứng dụng rộng rãi để mô phỏng và phân tích các quá trình truyền nhiệt phức tạp trong lòng khuôn âm [3, 4]. Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng ANSYS CFX để phân tích phân bố nhiệt độ trong khuôn ép phun, từ đó đề xuất các phương pháp kiểm soát nhiệt độ nhằm nâng cao tính đồng nhất của sản phẩm và tối ưu hóa hiệu quả sản xuất.

(*) Vai trò của kiểm soát nhiệt độ trong ép phun

Ép phun là một trong những phương pháp sản xuất phổ biến nhất để chế tạo các sản phẩm nhựa chính xác cao. Quá trình này đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số như áp suất, thời gian làm nguội và đặc biệt là nhiệt độ khuôn [5]. Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ làm nguội của vật liệu nhựa, từ đó tác động đến cấu trúc vi mô, độ co ngót và tính chất cơ học của sản phẩm [6]. Nhiệt độ không đồng đều có thể gây ra các khuyết tật như biến dạng, nứt gãy hoặc bề mặt không đạt yêu cầu [7]. Do đó, việc phân tích và tối ưu hóa phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm.

Các phương pháp kiểm soát nhiệt độ

truyền thống, chẳng hạn như sử dụng kênh làm mát bằng nước hoặc dầu, thường gặp khó khăn trong việc đạt được sự đồng nhất nhiệt độ trên toàn bộ bề mặt khuôn [8]. Những hạn chế này đã thúc đẩy sự phát triển của các kỹ thuật mô phỏng CFD, cho phép dự đoán chính xác phân bố nhiệt độ và tối ưu hóa thiết kế hệ thống làm mát [9]. ANSYS CFX, với khả năng mô phỏng các hiện tượng truyền nhiệt phức tạp, đã trở thành công cụ mạnh mẽ để giải quyết các thách thức này [10].

(*) Ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích nhiệt độ khuôn

ANSYS CFX là một phần mềm CFD tiên tiến, cho phép mô phỏng các quá trình truyền nhiệt, dòng chảy và tương tác chất lỏng-rắn trong các hệ thống phức tạp [11]. Trong lĩnh vực ép phun, CFX được sử dụng để phân tích sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm, đánh giá hiệu quả của các hệ thống làm mát và tối ưu hóa các thông số quy trình [12]. Phần mềm này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) để giải các phương trình Navier-Stokes và truyền nhiệt, từ đó cung cấp các kết quả mô phỏng có độ chính xác cao [13].

Nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng ANSYS CFX có thể mô phỏng chính xác sự phân bố nhiệt độ trong khuôn, bao gồm các yếu tố như truyền nhiệt đối lưu, truyền nhiệt dẫn nhiệt và ảnh hưởng của dòng chảy chất làm mát [14]. Ví dụ, một nghiên cứu của Zhang và cộng sự (2020) đã sử dụng CFX để phân tích tác động của cấu hình kênh làm mát đến sự đồng nhất nhiệt độ trong khuôn, cho thấy rằng thiết kế kênh tối ưu có thể giảm độ lệch nhiệt độ tới 30% [3]. Tương tự, Li và cộng sự (2021) đã áp dụng CFX để đánh giá hiệu quả của các chất làm mát khác nhau, kết luận rằng việc sử

dụng chất làm mát có độ nhớt thấp có thể cải thiện hiệu suất truyền nhiệt [4].

(*) Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu này nhằm ứng dụng ANSYS CFX để phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm, tập trung vào việc đánh giá các phương pháp kiểm soát nhiệt độ khác nhau. Các mục tiêu cụ thể bao gồm: (1) mô phỏng sự phân bố nhiệt độ trong khuôn dưới các điều kiện vận hành khác nhau; (2) đánh giá tác động của thiết kế kênh làm mát và loại chất làm mát đến hiệu quả truyền nhiệt; (3) đề xuất các giải pháp tối ưu hóa nhằm nâng cao tính đồng nhất nhiệt độ và hiệu quả sản xuất. Phạm vi nghiên cứu bao gồm việc sử dụng các mô hình CFD để phân tích các khuôn ép phun nhựa thông dụng, với các thông số nhiệt độ, áp suất và lưu lượng chất làm mát được điều chỉnh để phản ánh các điều kiện thực tế.

(*) Ý nghĩa của nghiên cứu

Việc ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích phân bố nhiệt độ khuôn không chỉ giúp cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn góp phần tối ưu hóa quy trình sản xuất. Bằng cách dự đoán chính xác các khu vực có nguy cơ nhiệt độ không đồng đều, các nhà thiết kế có thể điều chỉnh thiết kế khuôn và hệ thống làm mát trước khi chế tạo, từ đó giảm chi phí và thời gian thử nghiệm [9]. Ngoài ra, nghiên cứu này cũng đóng góp vào việc phát triển các kỹ thuật kiểm soát nhiệt độ tiên tiến, chẳng hạn như làm mát xung hoặc làm mát thích nghi, có thể được ứng dụng trong các ngành công nghiệp sản xuất nhựa hiện đại [10].

(*) Kết luận

Phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng

khuôn âm bằng ANSYS CFX là một bước tiến quan trọng trong việc nâng cao chất lượng và hiệu quả của quá trình ép phun. Nghiên cứu này không chỉ cung cấp cái nhìn sâu sắc về tác động của các phương pháp kiểm soát nhiệt độ mà còn đề xuất các giải pháp thiết thực để tối ưu hóa quy trình sản xuất. Các kết quả dự kiến sẽ đóng góp vào việc cải thiện thiết kế khuôn và hệ thống làm mát, từ đó nâng cao tính cạnh tranh của ngành công nghiệp ép phun.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong bối cảnh ngành công nghiệp nhựa ngày càng đòi hỏi cao về độ chính xác, hình dạng phức tạp và chất lượng bề mặt của sản phẩm, kỹ thuật ép phun đang không ngừng được cải tiến để đáp ứng những yêu cầu khắt khe đó. Một trong những yếu tố then chốt ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm ép phun chính là khả năng kiểm soát nhiệt độ khuôn. Nhiệt độ khuôn không chỉ ảnh hưởng đến khả năng điền đầy vật liệu vào lòng khuôn mà còn quyết định đến cấu trúc vi mô, độ bền cơ học và thẩm mỹ bề mặt của sản phẩm sau cùng.

Hiện nay, nhiều hướng nghiên cứu và cải tiến đã tập trung vào việc tối ưu hóa quá trình kiểm soát nhiệt trong khuôn ép, với mục tiêu vừa đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều, vừa duy trì được thời gian chu kỳ sản xuất ngắn – yếu tố sống còn trong sản xuất hàng loạt. Để đạt được điều đó, một số công nghệ gia nhiệt hiện đại đã được đưa vào áp dụng như: gia nhiệt bằng tia hồng ngoại (IR), tia laser, cảm ứng điện từ (induction heating), và gia nhiệt bằng khí nóng.

Mỗi phương pháp gia nhiệt đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. Gia nhiệt bằng tia hồng ngoại được biết đến với khả năng

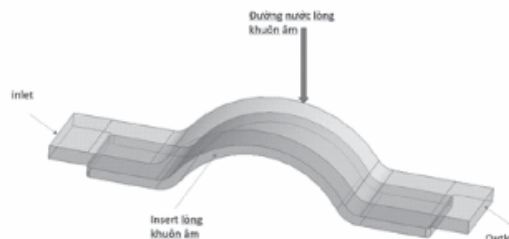
làm nóng nhanh và tập trung năng lượng tốt, rất phù hợp trong các ứng dụng yêu cầu làm nóng nhanh bề mặt khuôn có kích thước nhỏ. Tuy nhiên, phương pháp này lại gặp hạn chế về độ sâu thâm nhập nhiệt và tính đồng đều khi áp dụng cho các khuôn có hình dạng lớn hoặc phức tạp. Gia nhiệt bằng cảm ứng mang lại tốc độ làm nóng nhanh và hiệu quả năng lượng cao, nhưng đòi hỏi thiết kế hệ thống cuộn dây phù hợp với hình học khuôn – một thách thức lớn khi khuôn có các rãnh dẫn nhiệt phức tạp hoặc hình dạng bất đối xứng. Hơn nữa, việc kiểm soát và phân bố nhiệt đều trong toàn bộ lòng khuôn vẫn là một bài toán nan giải với phương pháp này.

Trên nền tảng đó, nghiên cứu này lựa chọn và tập trung vào việc cải tiến kỹ thuật truyền nhiệt khi sử dụng khí nóng để gia nhiệt khuôn. Phương pháp này, tuy không mới, nhưng có tiềm năng cao trong việc đảm bảo phân bố nhiệt đồng đều, đặc biệt là trong các khuôn có hình dạng phức tạp và nhiều rãnh dẫn nhiệt. Thông qua việc mô phỏng dòng khí nóng và quá trình truyền nhiệt trong lòng khuôn, nghiên cứu hướng tới việc tối ưu hóa thiết kế đường dẫn khí và điều kiện vận hành để nâng cao hiệu suất gia nhiệt. Đồng thời, việc áp dụng mô phỏng số cũng giúp đánh giá chính xác hơn sự thay đổi nhiệt độ tại các vùng khác nhau của khuôn, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn chiến lược gia nhiệt phù hợp nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất...

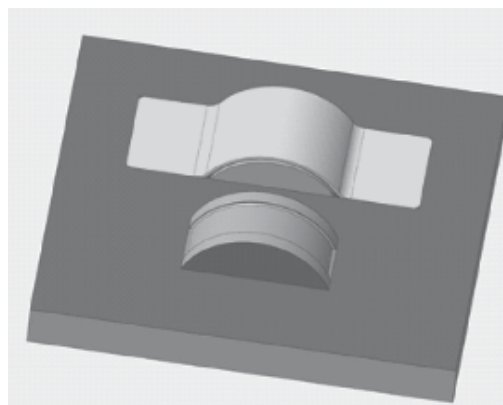
3. MÔ PHỎNG

Đầu tiên thiết kế tấm insert dưới khuôn âm và hệ thống và có hệ thống làm mát (đường nước). Hệ thống làm mát được thiết kế theo biên dạng insert lòng khuôn âm để có hiệu quả tốt, làm giảm nhiệt độ của tấm insert tốt hơn

cách truyền thống. Mô phỏng với inlet (80 độ C) trong quá trình 10 giây.



Hình 3.1. Thiết kế đường làm mát theo biên dạng insert



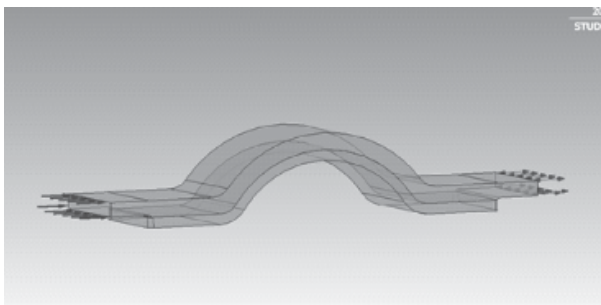
Hình 3.2. Vị trí lớp giải nhiệt trong tấm khuôn

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Để khảo sát sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm (tấm insert) với hệ thống làm mát bo theo biên dạng insert của lòng khuôn âm, mô phỏng đã được thiết lập. Mô hình này được xây dựng nhằm đánh giá khả năng truyền nhiệt từ khu vực quanh tấm insert bên trong khuôn âm. Cấu trúc mô hình gồm hai phần chính: phần insert và dòng chảy của nước làm mát. Hình 2 và Hình 3 thể hiện rõ các điều kiện biên cũng như lưới tính toán được thiết lập. Hệ thống lưới được tạo ra bằng kỹ thuật Inflection, giúp mô phỏng chính xác hơn tại các vị trí tiếp xúc giữa các bề mặt. Ngoài ra, mô hình còn tích

hợp các phần tử điện mô phỏng môi trường khí nhằm tăng độ chính xác trong tính toán.

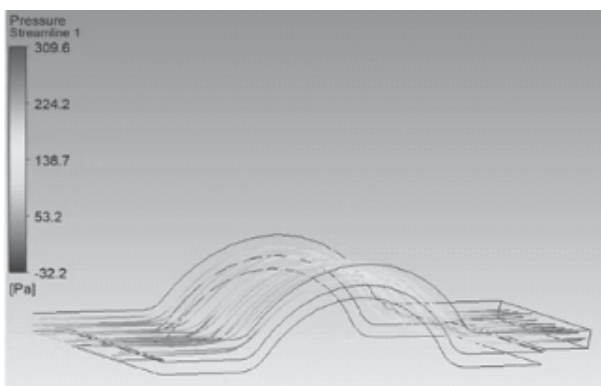
Phần mềm ANSYS được lựa chọn để thực hiện mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt giữa dòng nước và khối insert, đồng thời mô phỏng lại các điều kiện thực nghiệm. Trong quá trình mô phỏng, nhiệt độ khởi điểm của tấm insert được đặt ở 25°C, nước làm mát đi vào với nhiệt độ 80°C, và được kiểm soát để thoát ra ở 25°C.



Hình 4.1. Thiết lập inlet và outlet của đường làm mát trong phần mềm ANSYS để mô phỏng



Hình 4.2. Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS



Hình 4.3. Kết quả mô phỏng dòng chảy trong lớp giải nhiệt

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 5.1 thể hiện mô phỏng phân bố nhiệt độ trong insert của lòng khuôn âm, với dải nhiệt độ dao động từ khoảng 75,45°C đến 80,01°C. Kết quả này phản ánh sự phân bố nhiệt độ tương đối đồng đều trên bề mặt insert, một yếu tố quan trọng để đảm bảo chất lượng sản phẩm và tuổi thọ của khuôn trong quá trình sản xuất. Các đường dòng được minh họa rõ ràng, cho thấy hướng chuyển động của nước làm mát từ phía trái sang phải, đồng thời ghi nhận sự giảm dần nhiệt độ dọc theo chiều dòng chảy. Sự thay đổi màu sắc từ đỏ (vùng nhiệt độ cao) sang xanh (vùng nhiệt độ thấp) thể hiện quá trình truyền nhiệt diễn ra liên tục và ổn định, không có sự gián đoạn hay biến đổi đột ngột.

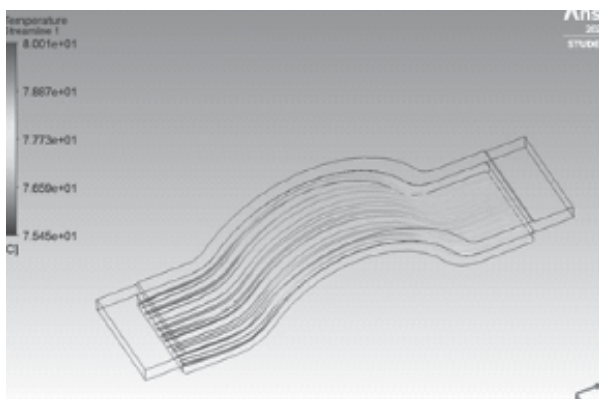
Sự chênh lệch nhiệt độ trong khoảng 4,56°C (từ 75,45°C đến 80,01°C) cho thấy hệ thống làm mát hoạt động hiệu quả, duy trì nhiệt độ khuôn ở mức ổn định trong suốt chu kỳ vận hành. Điều này rất quan trọng trong các ứng dụng sản xuất đòi hỏi độ chính xác cao, như ép phun nhựa, nơi nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt và tính chất cơ học của sản phẩm. Việc không ghi nhận hiện tượng tụ nhiệt (hot spots) hoặc dòng xoáy (turbulence) trong mô phỏng chứng minh rằng thiết kế kênh làm mát được tối ưu hóa, đảm bảo dòng chảy của chất làm mát phân bố đều và không gặp trở ngại.

Hệ thống làm mát hợp lý không chỉ giúp kiểm soát nhiệt độ mà còn giảm thiểu nguy cơ biến dạng nhiệt hoặc ứng suất dư trong khuôn, từ đó kéo dài tuổi thọ của insert và giảm chi phí bảo trì. Kết quả mô phỏng này cũng cung cấp cơ sở để đánh giá và cải tiến thiết kế hệ thống làm mát, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp yêu cầu hiệu suất cao. So với các nghiên cứu trước, thiết kế kênh làm mát trong



nguyên cứu này cho thấy sự cải thiện đáng kể về tính đồng nhất của dòng chảy và khả năng kiểm soát nhiệt độ. Trong tương lai, việc tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến hơn, như phân tích động lực học chất lỏng (CFD), có thể được áp dụng để tối ưu hóa thêm hiệu suất làm mát, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của sản xuất hiện đại.

Tóm lại, mô phỏng phân bố nhiệt độ trong Hình 5.1 khẳng định hiệu quả của hệ thống làm mát, với sự truyền nhiệt đồng đều và thiết kế kênh tối ưu. Kết quả này không chỉ đóng góp vào việc cải thiện hiệu suất khuôn mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống sản xuất tiên tiến, nơi kiểm soát nhiệt độ là yếu tố then chốt.



Hình 5.1. Sự thay đổi nhiệt độ của Insert lòng khuôn âm

6. KẾT LUẬN

Việc ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm của khuôn ép phun đã chứng minh được độ tin cậy và chính xác trong việc mô phỏng các quá trình truyền nhiệt phức tạp. Nghiên cứu này đã mô phỏng thành công hành vi nhiệt của tấm insert với hệ thống làm mát theo biên dạng, cho thấy phân bố nhiệt độ ổn định và đồng đều, dao động từ 75,45°C đến 80,01°C, với độ chênh

lệch nhiệt độ chỉ khoảng 4,5°C. Việc không ghi nhận hiện tượng tụ nhiệt hay dòng xoáy trong dòng chảy chất làm mát khẳng định hiệu quả của các kênh làm mát được thiết kế phù hợp với hình dạng tấm insert. Những kết quả này nhấn mạnh khả năng của ANSYS CFX trong việc dự đoán và tối ưu hóa hiệu suất nhiệt, hỗ trợ thiết kế các hệ thống làm mát hiệu quả, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả quy trình trong công nghệ ép phun.

Kết quả nghiên cứu xác nhận rằng các kênh làm mát theo biên dạng vượt trội hơn so với thiết kế truyền thống nhờ đảm bảo tản nhiệt đồng đều trên bề mặt khuôn, giảm thiểu khuyết tật và cải thiện thời gian chu kỳ. Nghiên cứu này đóng góp vào sự tiến bộ trong thiết kế khuôn bằng cách cung cấp một khung công tác đáng tin cậy để đánh giá và tinh chỉnh các chiến lược làm mát trước khi chế tạo mẫu thử, từ đó giảm chi phí và thời gian sản xuất. Hơn nữa, việc tích hợp các kỹ thuật chia lưới tiên tiến như Inflection đã nâng cao độ chính xác của mô phỏng, đặc biệt tại các giao diện tiếp xúc quan trọng. ANSYS CFX là một công cụ không thể thiếu cho các kỹ sư trong việc giải quyết các thách thức nhiệt trong ép phun, mở đường cho các đổi mới trong làm mát thích nghi và sản xuất thông minh. Những hiểu biết từ nghiên cứu này có thể định hướng phát triển các công nghệ ép phun thế hệ mới, đảm bảo độ chính xác cao hơn và tính bền vững trong quy trình sản xuất nhựa.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Lê Bá Tân;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Hoàng Lê Mạnh Tiệp, Nguyễn Đức Tôn, Phạm Quân Anh, Nguyễn Hải Hoàn.

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: SV2025-342.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**

Ngày phản biện: **16/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Shinde, M. S., & Ashtankar, K. M. (2017), “Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes”. *Advances in Mechanical Engineering*, 9, 1687814017699764.
- [2]. Zhang, H., Ren, L., Gao, Y., & Jin, B. (2017), “A comprehensive study of energy conservation in electric-hydraulic injection-molding equipment”. *Energies*, 10, 1768.
- [3]. Singh, G., & Verma, A. (2017), “A brief review on injection moulding manufacturing process”. *Materials Today: Proceedings*, 4, 1423-1433.
- [4]. Hassan, H., Regnier, N., Le Bot, C., & Defaye, G. (2010), “3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding”. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 161-169.
- [5]. Hassan, H., Regnier, N., Lebot, C., Pujos, C., & Defaye, G. (2009), “Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding”. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1786-1791.
- [6]. Kuo, C.-C., Jiang, Z.-F., Yang, M.-X., You, B. J., & Zhong, W.-C. (2021), “Effects of cooling channel layout on the cooling performance of rapid injection mold”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 2697-2710.
- [7]. Mathivanan, D., Nouby, M., & Vidhya, R. (2010), “Minimization of sink mark defects in injection molding process Taguchi approach”. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 13-22.
- [8]. Kashyap, S., & Datta, D. (2015), “Process parameter optimization of plastic injection molding: A review”. *International Journal of Plastics Technology*, 19, 1-18.
- [9]. Khosravani, M. R., & Nasiri, S. (2019), “Injection molding manufacturing process: Review of case-based reasoning applications”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 847-864.
- [10]. Chen, Z., & Turng, L. (2005), “A review of current developments in process and quality control for injection molding”. *Advances in Polymer Technology*, 24, 165-182.
- [11]. Fernandes, C., Pontes, A. J., Viana, J. C., & Gaspar-Cunha, A. (2016), “Modeling and optimization of the injection-molding process: A review”. *Advances in Polymer Technology*, 37, 429-449.
- [12]. Khan, M., Afaq, S. K., Khan, N. U., & Ahmad, S. (2014), “Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design”. *ISRN Mechanical Engineering*, 2014, 1-8.
- [13]. Farouq, Y., Nicolazo, C., Sarda, A., & Deterre, R. (2005), “Temperature measurements in the depth and at the surface of injected thermoplastic parts”. *Measurement*, 38, 1-14.
- [14]. Tan, C., Wang, D., Ma, W., Chen, Y., Chen, S., Yang, Y., & Zhou, K. (2020), “Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds”. *Materials & Design*, 196, 109147.