

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHẦN MỀM CAE ĐỂ PHÂN TÍCH DÒNG CHẢY NHỰA TRONG KHUÔN ÉP NHỰA VÀ DỰ BÁO LỖI CHO SẢN PHẨM SAU KHI ÉP

A STUDY ON THE APPLICATION OF CAE SOFTWARE IN ANALYZING THE FLOW OF PLASTIC IN INJECTION MOLD AND PREDICTION OF THE FAULTS OF PLASTIC PRODUCTS AFTER INJECTION PROCESSES

Nguyễn Mạnh Nền, Nguyễn Chí Công
Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương án ứng dụng các phần mềm CAE (Computer-Aided Engineering) để mô phỏng và phân tích dòng chảy nhựa trong khuôn ép nhựa. Từ kết quả phân tích này có thể tìm ra vị trí đặt miệng phun tối ưu để đảm bảo quá trình điền đầy của nhựa trong khuôn, đồng thời có thể dự báo lỗi hay khuyết tật có thể xảy ra trong sản phẩm sau khi ép. Nhờ vào kết quả phân tích dự báo lỗi mà kỹ sư thiết kế khuôn ép nhựa có thể điều chỉnh kết cấu sản phẩm, điều chỉnh các thông số ép phun một cách phù hợp để hạn chế các khuyết tật có thể xảy ra. Việc này giúp người thiết kế khuôn lựa chọn và điều chỉnh thông số ép phun một cách thuận tiện và chính xác, đồng thời nó cũng giúp giảm đáng kể thời gian thử nghiệm và sửa chữa khuôn sau khi gia công.

Từ khóa: CAE; Khuôn ép nhựa; Mô phỏng.

ABSTRACT

This paper proposes a method for applying CAE (Computer-Aided Engineering) software to simulate and analyze the flow of plastic in injection molds. From this analysis, the optimal location for the sprue and gate can be determined to ensure proper filling of the mold with plastic, while also predicting potential faults or defects that may occur in the product after molding. Based on the predicted fault analysis, plastic mold designers can adjust the product structure and injection parameters appropriately to minimize potential defects. This allows mold designers to conveniently and accurately select and adjust injection parameters, significantly reducing testing and mold repair time after processing.

Keywords: CAE; Plastic injection mold; Simulation.



1. TỔNG QUAN

Trên thế giới cũng như ở Việt Nam, ngành công nghiệp nhựa dù còn non trẻ so với các ngành công nghiệp lâu đời khác như cơ khí, điện – điện tử, hoá chất, dệt may... nhưng đã có sự phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây. Ngành nhựa giai đoạn 2010-2020, là một trong những ngành công nghiệp có tăng trưởng cao nhất Việt Nam với mức tăng hàng năm từ 16-18% (chỉ sau ngành viễn thông và dệt may), có những mặt hàng tốc độ tăng trưởng đạt gần 100%/năm [1].

Hiện tại, các sản phẩm của nhựa Việt Nam đã có mặt tại 160 thị trường trên thế giới, kể cả những thị trường đòi hỏi chất lượng cao, tiêu chuẩn kỹ thuật tối ưu như Nhật Bản, Mỹ, EU [1]. Có thể nói, công nghiệp nhựa là ngành sản xuất có tiềm năng phát triển lớn ở Việt Nam.

Trong ngành công nghiệp sản xuất nhựa, phun ép nhựa là một trong những phương pháp được sử dụng phổ biến nhất để tạo ra các sản phẩm nhựa có hình dạng và kích thước từ đơn giản đến phức tạp. Để đảm bảo chất lượng sản phẩm cuối cùng và tối ưu hóa hiệu suất của quá trình sản xuất, việc áp dụng các phần mềm Mô phỏng và Phân tích (CAE) vào thiết kế khuôn ép nhựa đã trở nên ngày càng phổ biến.

Bài báo này tập trung vào nghiên cứu về ứng dụng các phần mềm CAE để phân tích dòng chảy nhựa trong quá trình ép nhựa và dự báo lỗi cho sản phẩm sau khi ép. Bằng cách kết hợp các công cụ mô phỏng và phân tích mạnh mẽ của CAE, người thiết kế có thể tiến hành các phân tích chi tiết về dòng chảy nhựa trong khuôn ép và dự đoán vị trí và nguyên nhân của các lỗi có thể xảy ra. Điều này giúp họ điều chỉnh các tham số quá trình để tối ưu hóa chất

lượng sản phẩm và giảm thiểu sản phẩm lỗi trong quá trình sản xuất.

Với sự phát triển không ngừng của công nghệ và khả năng tính toán ngày càng cao của các phần mềm CAE, việc ứng dụng chúng trong quá trình sản xuất nhựa đang trở thành một yếu tố quan trọng để nâng cao chất lượng sản phẩm, tối ưu hóa quy trình sản xuất và giảm thiểu lãng phí. Bài báo này sẽ đi sâu vào nghiên cứu về các ứng dụng cụ thể của các phần mềm CAE trong phân tích dòng chảy nhựa và dự báo lỗi cho sản phẩm ép nhựa.

Các nghiên cứu thiết kế khuôn ép nhựa nói chung và về ứng dụng CAE vào thiết kế khuôn ép nhựa ở Việt Nam vẫn còn chưa thực sự phổ biến. Tác giả Phạm Văn Sáng và các cộng sự đã nghiên cứu tập trung tìm ra phương pháp làm mát tối ưu cho khuôn ép nhựa bằng cách thay đổi đặc tính làm việc của hệ thống làm mát và với việc thay đổi vật liệu của chi tiết dựa trên phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm Simcenter STAR - CCM+ [2]. Các tác giả Nguyễn Thị Hiền, Hoàng Long ứng dụng phần mềm Moldflow để mô phỏng dòng chảy của nhựa trong quá trình ép phun sản phẩm [3], nghiên cứu này đã mô phỏng và phân tích được các đặc tính vật lý của dòng chảy nhựa, các thông số như các thông số về chu kỳ sản xuất, thời gian điền đầy, thời gian để lấy sản phẩm ra khỏi khuôn.

Tuy nhiên, các phần mềm CAE hiện nay có thể làm được nhiều hơn thế, ngoài việc mô phỏng các thông số vật lý của dòng chảy, nó còn có thể phân tích và dự báo một số lỗi có thể xảy ra trên sản phẩm.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu mô phỏng dòng chảy nhựa trong khuôn ép và dự báo các khuyết tật có thể

xảy ra của sản phẩm sau khi ép bằng cách ứng dụng phần mềm Moldflow.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Cơ sở lý thuyết về mô phỏng dòng chảy nhựa

Cơ sở lý thuyết cho việc mô phỏng dòng chảy trong khuôn ép nhựa có thể được chia thành các yếu tố sau:

Lực đẩy và lực cản: Trong quá trình ép nhựa, lực đẩy được áp dụng để đẩy nguyên liệu nhựa vào khuôn ép. Trái lại, lực cản xảy ra do ma sát giữa nhựa và bề mặt khuôn, cũng như do lực cản nội bộ trong quá trình chảy. Cả hai yếu tố này cần được xem xét để đánh giá được dòng chảy và áp suất cần thiết cho quá trình ép.

Biến dạng chảy: Nhựa trong quá trình ép sẽ trải qua một loạt các biến dạng từ trạng thái cứng đến trạng thái lỏng, rồi từ trạng thái lỏng đến trạng thái cứng trở lại sau khi làm nguội. Quá trình này thường được mô tả bằng các mô hình lưu biến học (Rheology), như mô hình Maxwell hoặc mô hình Kelvin-Voigt.

Phân tán nhiệt: Trong quá trình ép, nhiệt độ của nhựa thường tăng lên vì lực ma sát và lực cản, cũng như do nhiệt độ của khuôn ép. Việc quản lý nhiệt độ là một yếu tố quan trọng để đảm bảo chất lượng và độ đồng đều của sản phẩm cuối cùng.

Độ nhớt và cấu trúc chảy: Nhựa có thể có độ nhớt khác nhau tùy thuộc vào nhiệt độ và áp lực. Mô phỏng cần xem xét cả độ nhớt và cấu trúc chảy của nhựa để dự đoán hiệu suất chảy và độ hoàn hảo của sản phẩm.

Luồng chảy và lưu chất: Mô phỏng

dòng chảy cũng cần xem xét các thuật ngữ liên quan đến luồng chảy như tốc độ, áp lực, hàm lượng chất độn, và mô hình hóa lưu chất để đảm bảo rằng nhựa được đẩy mạnh mẽ và đồng đều vào khuôn ép.

Tính toán và mô phỏng: Các phương pháp tính toán và mô phỏng như phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM) hoặc phương pháp phần tử biên (Boundary Element Method – BEM) thường được sử dụng để mô phỏng quá trình chảy nhựa trong khuôn ép. Điều này bao gồm việc xem xét các điều kiện biên, đặc tính vật lý của vật liệu, và điều kiện biến đổi nhiệt độ và áp lực.

Tóm lại, cơ sở lý thuyết cho việc mô phỏng dòng chảy trong khuôn ép nhựa bao gồm các yếu tố về lực đẩy, lực cản, biến dạng chảy, nhiệt độ, độ nhớt, luồng chảy, các phương pháp tính toán và mô phỏng để dự đoán và tối ưu hóa quá trình sản xuất.

2.2. Các khuyết tật có thường gặp của sản phẩm nhựa sản xuất bằng phương pháp ép phun

Sản phẩm nhựa sản xuất bằng phương pháp ép phun có thể xuất hiện nhiều dạng khuyết tật khác nhau. Một số khuyết tật có thể được dự báo và có biện pháp xử lý thông qua mô phỏng, phân tích nhưng một số khuyết tật thì không thể dự báo trước. Các khuyết tật thường gặp trong quá trình ép phun có thể kể đến như sau:

Cong vênh (Warping): Cong vênh là hiện tượng mà sản phẩm nhựa sau khi ép xong, đưa ra ngoài môi trường tự nhiên bị cong, vênh so với thiết kế.

Lõm bề mặt (Sink marks): Đây là hiện tượng sản phẩm sau khi ép nhựa, trên bề mặt 

của nó xuất hiện một số vị trí bị lõm một phần xuống so với bề mặt xung quanh.

Thiếu liệu (Short Shots): Hiện tượng này xảy ra khi nhựa nóng chảy được phun vào lòng khuôn nhưng lại không thể điền đầy không gian bên trong lòng, hoặc các lòng khuôn khiến cho khi lấy sản phẩm ra, sản phẩm không hoàn thiện do thiếu một phần nào đó và trở thành phế phẩm.

Bọt khí – rỗ khí (Air trap, Vacuum Voids): Hiện tượng này gây ra các bọt khí nhỏ ở bên trong thành sản phẩm hoặc các lỗ nhỏ li ti trên bề mặt sản phẩm.

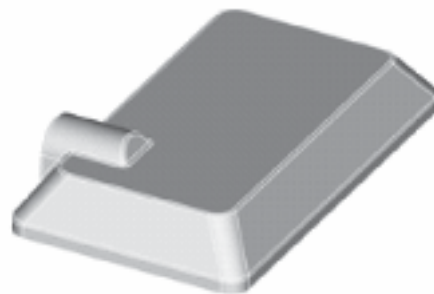
Đường hàn hay đường nối nhựa (Weld lines): Trong lòng khuôn, khi các dòng nhựa chảy theo các hướng khác nhau gặp nhau thì chính tại vị trí gặp nhau ấy thường hình thành nên đường hàn hay đường nối.

Ba-via (Burr): Hiện tượng sản phẩm bị ba-via xảy ra là do một lớp vật liệu mỏng bị tràn ra ngoài qua mặt phân khuôn hay ở vị trí các ti đẩy sản phẩm.

Ngoài ra, sản phẩm nhựa sản xuất bằng phương pháp ép phun có thể gặp các khuyết tật khác như: đường chảy liệu (Surface Delamination), cần do pin đẩy (Jetting), tràn xước (Flash)...

2.3. Sản phẩm và vật liệu của sản phẩm nghiên cứu

Nghiên cứu này tiến hành mô phỏng và phân tích, dự báo khuyết tật có thể xảy ra cho sản phẩm chụp đèn bàn làm bằng vật liệu nhựa ABS.



Hình 1. Sản phẩm chụp đèn bàn

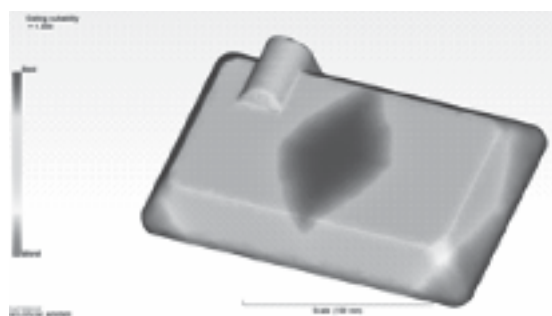
Nhựa ABS là loại nhựa được sử dụng phổ biến trong thực tế. Thành phần đặc trưng của nhựa ABS gồm 15-35% Acrylonitrile, 5-30% Butadiene, 40-60% Styrene. Các thông số vật lý khi ép phun như sau: nhiệt độ nóng chảy 210 ~ 280°C; độ co ngót 0,5 ~ 0,6%; nhiệt độ bề mặt khuôn khi ép phun 25 ~ 70°C; áp suất phun 500 ~ 1000 bar...

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

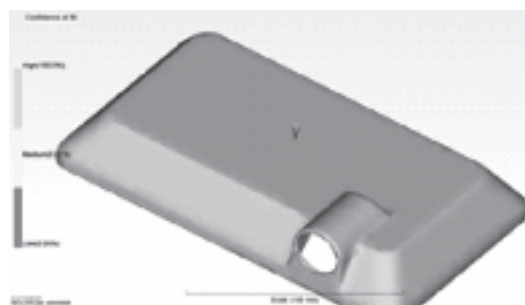
3.1. Vị trí đặt miệng phun tối ưu và các thông số dòng chảy nhựa

Các thông số phun được lựa chọn như sau: nhiệt độ bề mặt khuôn là 50°C, nhiệt độ nhựa nóng chảy là 230°C, áp suất phun tối đa là 180MPa, thời gian mở kẹp máy là 5s. Chia lưới phần tử trên phần mềm, ta thu được 1.022.498 phần tử khối tứ diện, 184.614 nút liên kết. Thực hiện quá trình phân tích, ta thu được kết quả cụ thể như sau:

- Vị trí đặt miệng phun tối ưu: Theo kết quả mô phỏng ở Hình 2, ta thấy rằng biểu đồ theo màu trải đều từ màu xanh dương tới màu đỏ, nghĩa là từ vị trí đặt cổng thích hợp nhất đến vị trí đặt cổng tệ nhất. Từ đó, ta xác định khu vực đặt cổng phù hợp nhất ở chính giữa chi tiết và ứng với màu xanh dương.



Hình 2. Vị trí đặt cổng phun khả thi

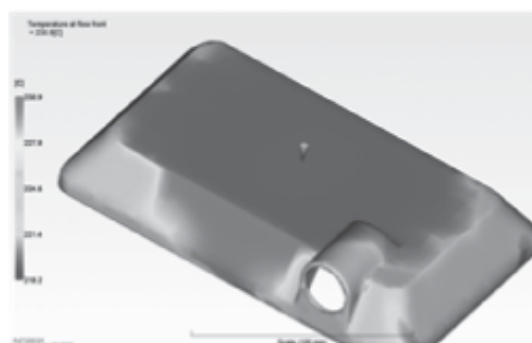


Hình 3. Khả năng điền đầy khuôn

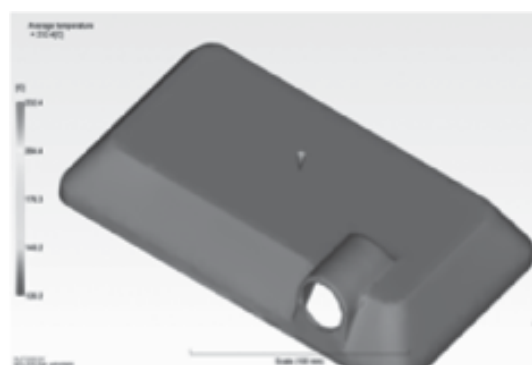
- Khả năng điền đầy khuôn: Khả năng điền đầy nhựa trong khuôn cho phép ta dự đoán những vị trí mà nhựa khó điền đầy hoặc không thể điền đầy dẫn đến khuyết tật thiếu liệu. Theo kết quả mô phỏng ở hình 3, ta thấy rằng toàn bộ sản phẩm đều được điền đầy, có nghĩa là không xảy ra khuyết tật thiếu liệu.

- Nhiệt độ ở phía trước dòng chảy và nhiệt độ trung bình: Nhiệt độ phía trước dòng chảy tại một điểm là nhiệt độ của dòng chảy nhựa khi đi đến vị trí đó. Trên Hình 4, ta thấy nhiệt độ phía trước dòng chảy nhựa cao nhất ở vị trí miệng phun là $230,9^{\circ}\text{C}$ và giảm dần đến rìa ngoài với nhiệt độ vào khoảng $218,2^{\circ}\text{C}$. Về nhiệt độ trung bình trên sản phẩm sau khi điền đầy khuôn được thể hiện ở Hình 5. Nhiệt độ trung bình tính đến khi điền đầy của sản phẩm đa phần cao hơn nhiệt độ nóng chảy của vật liệu ($232,4^{\circ}\text{C}$), có một số vị trí ở rìa ngoài cách xa miệng phun có nhiệt độ trung bình là $204,4^{\circ}\text{C}$ thấp hơn nhiệt độ nóng chảy của vật liệu. Điều

này có nghĩa là tại các vị trí này có khả năng xảy ra khuyết tật đường hàn hoặc cong vênh, cần phân tích khả năng xảy ra các khuyết tật tại vị trí này để đưa ra phương án xử lý.



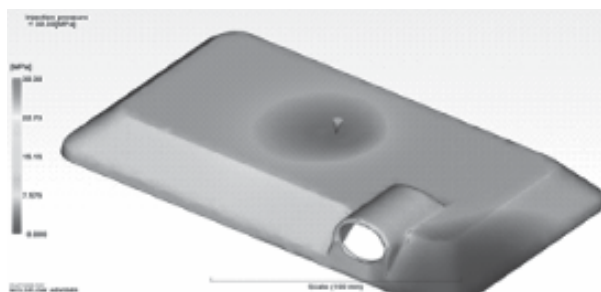
Hình 4. Nhiệt độ phía trước dòng chảy



Hình 5. Nhiệt độ trung bình

- Áp suất cuối quá trình điền đầy: Khi bắt đầu điền đầy thì áp suất dư bằng không (hay 1 atm theo thang áp suất tuyệt đối) trên toàn bộ khuôn và tăng cao hơn khi dòng chảy nhựa liên tục chảy qua. Kết quả phân tích giúp ta xác định những vị trí có áp suất quá cao. Ngoài ra, sự thay đổi áp suất cần được giảm thiểu vào giai đoạn bù liệu để tránh xảy ra khuyết tật co ngót. Trên Hình 6 cho ta thấy áp suất phun lớn nhất tại vị trí miệng phun với áp suất vào $30,3\text{ MPa}$ và giảm dần về phía vị trí xa miệng phun nhất và giảm còn 0 Mpa. Ta có thể thấy áp suất không tăng quá cao so với áp suất phun.

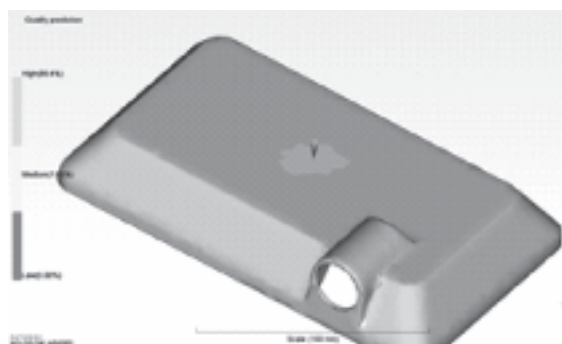




Hình 6. Áp suất phun

3.2. Dự báo khuyết tật cho sản phẩm

Ngoài những thông số vật lý của dòng chảy nhựa, phần mềm Moldflow còn cho phép người thiết kế đánh giá và dự báo khả năng xảy ra một số khuyết tật trong sản phẩm sau khi ép phun. Ở nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ dùng phần mềm để dự đoán chất lượng sản phẩm, phân tích khả năng xảy ra rỗ khí và đường hàn cho sản phẩm.

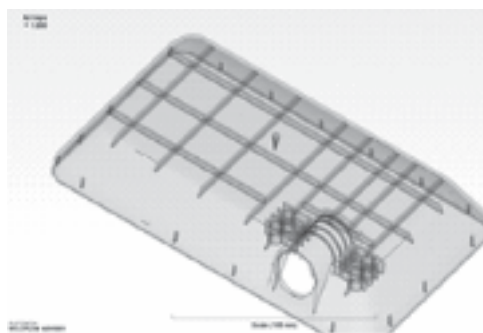


Hình 7. Dự đoán chất lượng sản phẩm

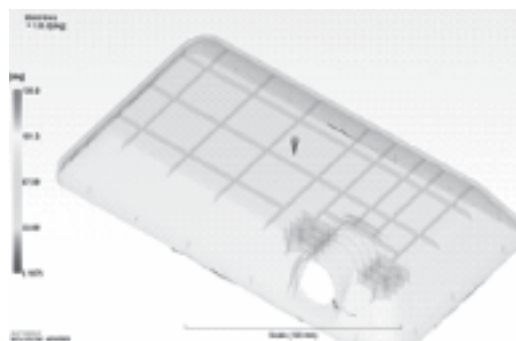
- Chất lượng sản phẩm: Kết quả phân tích chất lượng sản phẩm giúp người thiết kế ước tính chất lượng của các tính chất cơ học và hình thức bên ngoài của sản phẩm. Theo kết quả phân tích ở Hình 7, ta thấy hầu hết toàn bộ sản phẩm đều có chất lượng ở mức độ cao – chiếm đến 98,4%; chỉ có 1,6% bề mặt ở mức trung bình và thuộc vị trí xung quanh cổng phun là vị trí có áp suất và nhiệt độ trung bình cao hoặc vị trí có kết cấu rất phức tạp. Điều này có nghĩa các vị trí gần cửa phun hoặc vị trí kết cấu phức

tạp có khả năng xảy ra vấn đề về chất lượng.

- Rỗ khí: Kết quả phân tích độ rỗ khí ở Hình 8 cho thấy toàn bộ sản phẩm có độ rỗ khí đồng đều ở mức 1, điều này có nghĩa là sản phẩm không có khuyết tật rỗ khí sau khi ép.



Hình 8. Độ rỗ khí



Hình 9. Khả năng xuất hiện khuyết tật đường hàn

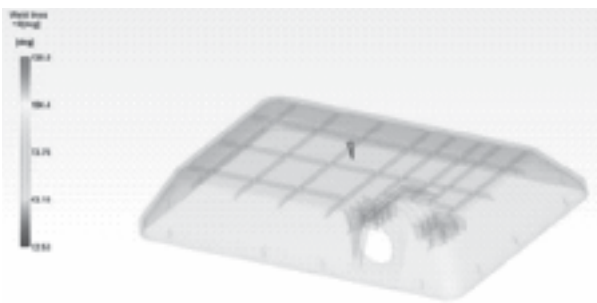
- Khuyết tật đường hàn: Ở Hình 9, ta thấy sản phẩm có khả năng xảy ra khuyết tật đường hàn ở một số vị trí. Các vị trí này gần như trùng với các vị trí đã được xác định là có khả năng xuất hiện khuyết tật trong các phân tích trước đó như vị trí có nhiệt độ trung bình thấp hay vị trí chất lượng sản phẩm chưa cao.

3.3. Nhận xét chung và phương pháp khắc phục khuyết tật

Như vậy, với kết quả của quá trình mô phỏng và phân tích, ta thấy sản phẩm sau khi ép phun mặc dù đã chọn được vị trí đặt miệng

phun tối ưu, nhưng với các thông số ép phun đã chọn vẫn có khả năng xuất hiện một số vị trí chất lượng sản phẩm không cao, đặc biệt là có thể xuất hiện khuyết tật đường hàn làm giảm độ bền và tính thẩm mỹ của sản phẩm.

Với các dạng khuyết tật này, ta có thể có hai phương án xử lý là xử lý trên khuôn với sản phẩm hoặc xử lý qua máy ép phun. Ở đây, nhóm tác giả sử dụng phương pháp thứ hai, cụ thể là thay đổi nhiệt độ phun. Tiến hành mô phỏng lại với nhiệt độ khuôn là 70°C và nhiệt độ dòng nhựa phun là 280°C thì thu được kết quả là chất lượng sản phẩm đã đạt yêu cầu. Nhiệt độ trung bình sau khi ép đã tăng lên, không còn điểm nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ nóng chảy của vật liệu. Những điểm có chất lượng ở mức trung bình đã giảm xuống rất thấp (dưới 1%) nằm ở gần miệng phun, nó trùng với khu vực cần xử lý cuộn phun nên không ảnh hưởng đến chất lượng tổng thể. Và điểm quan trọng nhất là kết quả phân tích về khuyết tật đường hàn cho thấy không còn khả năng xuất hiện dạng khuyết tật này trong sản phẩm (Hình 10).



Hình 10. Kết quả phân tích lỗi đường hàn sau khi thay đổi thông số phun.

4. KẾT LUẬN

Qua mô phỏng, phân tích dòng chảy nhựa trong khuôn và dự báo khuyết tật sản phẩm sau khi ép phun có thể thấy rằng, các phần mềm CAE nói chung và Moldflow nói

riêng có khả năng hỗ trợ mạnh mẽ cho công việc thiết kế khuôn ép nhựa. Nó giúp người thiết kế xác định vị trí đặt miệng phun tối ưu để phân bố đều dòng chảy nhựa, lựa chọn và điều chỉnh các thông số phun phù hợp, phân tích và chỉ ra trực tiếp các vị trí có thể xảy ra khuyết tật. Ngoài ra, với một số khuyết tật khác mà phần mềm chưa phân tích và chỉ ra cụ thể thì người thiết kế cũng có thể dự đoán được sự xuất hiện của chúng thông qua phân tích các thông số của dòng chảy nhựa trong khuôn. Điều này có ý nghĩa to lớn với công việc thiết kế khuôn vì nó giúp giảm thời gian, công sức trong việc thiết kế, thử nghiệm và đặc biệt là sửa chữa khuôn sau thử nghiệm.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường, trong khuôn khổ đề tài mã số DT23-24.30. ❖

Ngày nhận bài: **22/02/2024**

Ngày phản biện: **28/3/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Website Bộ Công Thương Việt Nam: <https://violet.org.vn/>
- [2]. Phạm Duy Nam, Phạm Lê Bắc, Phạm Văn Sáng; *Nghiên cứu hiệu quả làm mát khuôn ép nhựa sử dụng phương pháp mô phỏng số*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Hàng hải số 71 (8-2022).
- [3]. Nguyễn Thị Hiền, Hoàng Long; *Ứng dụng phần mềm Moldflow trong mô phỏng quá trình ép phun nhựa*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng, Trường Đại học Điện lực, số 32.
- [4]. Piotr Tutak, *Application of Moldflow simulation in injection molding of plastic tank*, JACSM 2017, Vol. 9, No. 1, pp. 79 – 88 (2017).