



DOI:10.22144/ctujos.2026.097

## NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ HỆ THỐNG TẢN NHIỆT TỐI ƯU CHO KHUÔN ÉP PHUN KIM LOẠI

Cao Sang\* và Võ Thị Phương Loan

Khoa Kỹ thuật Cơ Khí, Trường Đại học Kỹ thuật – Công nghệ Cần Thơ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): csang@ctuet.edu.vn

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 28/02/2026

Sửa bài (Revised): 17/04/2026

Duyệt đăng (Accepted): 18/05/2026

**Title:** Development of a Conformal Cooling Channel Mold for Metal Injection Molding

**Author(s):** Cao Sang\* and Vo Thi Phuong Loan

**Affiliation(s):** Faculty of Mechanical Engineering, Can Tho University of Technology, Viet Nam

### TÓM TẮT

Đúc phun kim loại (MIM) là sự kết hợp giữa đúc phun nhựa và luyện kim bột để sản xuất các linh kiện kim loại có cường độ cao và hình học phức tạp. Mặc dù việc thiết kế khuôn đóng vai trò then chốt đối với chất lượng sản xuất, nhưng các kênh làm mát 2D truyền thống thường gây ra tình trạng phân bố nhiệt độ không đồng đều, dẫn đến hiện tượng quá nhiệt và các khuyết tật về cấu trúc sản phẩm. Trong nghiên cứu này, một phương pháp sản xuất tích hợp đã đề xuất bao gồm: phân tích dòng chảy trong khuôn, thiết kế kênh làm mát theo biên dạng 3D, thử nghiệm và đánh giá hiệu quả làm mát của thiết kế mới. Thông qua các thử nghiệm đúc phun thực tế, tính khả thi của công nghệ tích hợp này đã được xác thực. Kết quả cho thấy hệ thống làm mát 3D tối ưu giúp cải thiện đáng kể hiệu suất giải nhiệt và độ đồng đều của nhiệt độ khuôn. Do đó, phương pháp này không chỉ nâng cao chất lượng sản phẩm và giảm thiểu khuyết tật mà còn rút ngắn chu kỳ đúc, giúp tăng đáng kể năng suất sản xuất tổng thể.

**Từ khóa:** Ép phun kim loại, kênh làm mát biên dạng 3D, mô phỏng diễn đầy khuôn, gia công bồi đắp kim loại

### ABSTRACT

Metal Injection Molding (MIM) combines plastic injection molding with powder metallurgy to produce high-strength, complex metal components. While mold design is critical to production quality, conventional 2D cooling channels often cause non-uniform temperature distribution, leading to overheating and structural defects. This study proposes an integrated manufacturing approach involving mold flow analysis, 3D conformal cooling channel design, experiment, and evaluates the effect of the new design. Through experimental injection molding tests, the feasibility of this integrated technology was validated. Results demonstrate that the optimized 3D conformal cooling system significantly enhances cooling efficiency and mold temperature uniformity. Consequently, this approach not only improves product quality and reduces defects but also shortens the molding cycle, substantially increasing overall production productivity.

**Keywords:** Conformal cooling channel, metal injection molding, mold flow analysis, metal additive manufacturing

## 1. GIỚI THIỆU

### 1.1. Ép phun kim loại là gì (Metal Injection Molding – MIM)

MIM là công nghệ đúc định hình gần thành phẩm (near-net-shape), kết hợp giữa luyện kim bột và ép phun nhựa. Quy trình này bao gồm các công đoạn: phối trộn bột kim loại với chất kết dính để tạo nguyên liệu, thiết kế khuôn, ép phun, khử nhựa, thiêu kết và hậu xử lý. Do bao quát phạm vi công nghệ rộng lớn, việc duy trì chất lượng ổn định là một thách thức không nhỏ (Dehghan-Manshadi et al.). Tại mỗi mắt xích của chuỗi quy trình, luôn tồn tại những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng cuối cùng của chi tiết. Việc kiểm soát các yếu tố này đóng vai trò then chốt để hướng tới mục tiêu sản xuất không khuyết tật. Những năm gần đây, ngành công nghiệp đã dần hiểu rõ mối quan hệ phức tạp giữa các sản phẩm lỗi và các thông số sản xuất trong suốt quy trình MIM (Hu & Hwang, 2000). Việc xem xét thực trạng sản xuất MIM đối với các dòng sản phẩm cho thấy có độ phức tạp cao và số lượng lớn, một hệ thống giám sát chất lượng toàn diện có thể được áp dụng để điều chỉnh và kiểm chứng các bộ phận ở từng giai đoạn, từ đó giảm tỷ lệ phế phẩm.

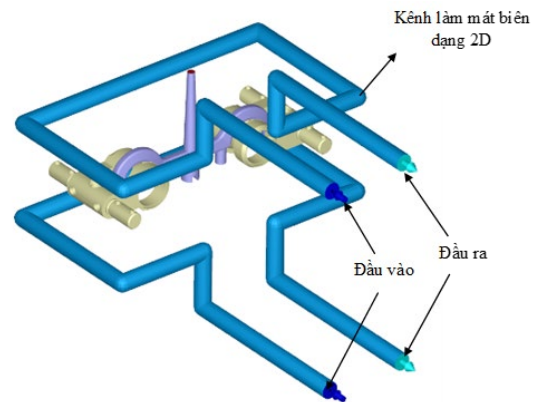
Trong quá trình ép phun, thời gian làm mát ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng sản xuất hàng loạt và chi phí của nhà sản xuất. Để rút ngắn thời gian này và nâng cao hiệu suất, việc thiết kế khuôn với kênh làm mát biên dạng 3D (conformal cooling channel) là cần thiết. Giải pháp này cho phép hệ thống làm mát bám sát theo đường cong và biên dạng của sản phẩm. Đối với các sản phẩm có độ dày không đồng đều hoặc những khu vực dễ tích tụ nhiệt, kênh làm mát biên dạng 3D giúp phân bố nhiệt độ đồng đều hơn trong giai đoạn làm mát, giảm ứng suất nhiệt dư thừa và rút ngắn thời gian làm mát một cách hiệu quả. Việc phân tích dòng chảy khuôn (mold flow analysis) có thể hỗ trợ đắc lực trong quá trình thiết kế hình học của kênh làm mát, đồng thời đánh giá thời gian làm mát cần thiết, nhiệt độ khuôn và lưu lượng dòng chảy trong hệ thống.

### 1.2. Kênh làm mát biên dạng 3D (Conformal Cooling Channel)

Trong những năm gần đây, các thuật toán tối ưu hóa đã được ứng dụng rộng rãi trong việc thiết kế hệ thống kênh làm mát khuôn. Qiao (2006) đã kết hợp ưu điểm của hai phương pháp: DFP - Davidon-Fletcher-Powell và luyện kim mô phỏng (SA - Simulated Annealing) để tối ưu hóa hệ thống kênh làm mát và tìm ra cấu hình tốt nhất. Để xác định vị trí phân bố làm mát tối ưu, ban đầu họ sử dụng

phương pháp DFP nhằm tìm ra cấu hình tối ưu cục bộ, sau đó áp dụng phương pháp SA để xác định vị trí tối ưu tổng thể của kênh làm mát, giúp nhiệt độ bề mặt lòng khuôn đạt được độ đồng đều. Park and Dang (2010) đã đề xuất một bộ phương pháp thiết kế cho mảng kênh làm mát dạng vách ngăn (baffle cooling channel array). Họ thiết lập mô hình toán học cho các thông số liên quan đến khuôn thông qua phương pháp DOE - thiết kế thí nghiệm và RSM - phương pháp bề mặt đáp ứng, từ đó tìm ra cách phân bố kênh làm mát vách ngăn 3D tốt nhất. Phương pháp này cải thiện hiệu quả tốc độ tản nhiệt, đặc biệt phù hợp cho các khuôn kích thước lớn hoặc sản phẩm có hình dáng phức tạp. Ngoài ra, họ cũng đề xuất thiết kế tối ưu cho kênh làm mát dạng rãnh chữ U gia công bằng phay, hướng tới sự đồng đều nhiệt độ khuôn và hiệu chỉnh thiết kế thông qua hỗ trợ từ máy tính (CAE). Ví dụ, việc phân tích thiết kế kênh làm mát trên khuôn chấn bùn ô tô đã được thực hiện để xác minh lý thuyết và so sánh sự khác biệt về chất lượng sản phẩm trước và sau khi tối ưu hóa.

Mục tiêu của nghiên cứu này là phát triển công nghệ chế tạo khuôn MIM tích hợp phân tích dòng chảy và thiết kế kênh làm mát biên dạng 3D (conformal cooling), sau đó được ứng dụng vào quy trình sản xuất một sản phẩm của các đối tác sản xuất để kiểm chứng tính khả thi của công nghệ tích hợp này. Hình 1 thể hiện thiết kế khuôn kênh làm mát 2D truyền thống cho sản phẩm mẫu từ nhà sản xuất hợp tác.



**Hình 1. Thiết kế khuôn với kênh làm mát truyền thống**

Hình ảnh cho thấy kênh làm mát 2D được thiết kế trên lõi khuôn, chủ yếu được đặt gần lòng khuôn để đạt hiệu quả làm mát tốt hơn. Tuy nhiên, việc thiết kế kênh làm mát 2D hiện tại vẫn tồn tại các vấn đề sau: Mặc dù đã được bố trí trên lõi khuôn, nhưng chúng chỉ là các đường ống song song, không thể bao quanh lòng khuôn có các hình khối hình học

phức tạp. Hệ quả là nhiệt độ tại lõi khuôn không đồng đều, dẫn đến phạm vi thiết lập các thông số đúc liên quan bị thu hẹp. Khi thử nghiệm và điều chỉnh khuôn ban đầu, việc tinh chỉnh các thông số này gây tiêu tốn nhiều thời gian. Nếu chỉ thay đổi các thông số đúc, hệ thống kênh làm mát 2D dạng song song truyền thống không thể đạt được hiệu quả làm mát như mong đợi. Kênh làm mát biên dạng 3D được phát triển trong nghiên cứu này khi được áp dụng cho khuôn hai lòng, giúp tăng hiệu suất sản xuất và giảm thiểu tác động của việc tăng chi phí do sử dụng thép tấm cho lõi khuôn. Các thông số mô phỏng và kết quả thực nghiệm của thiết kế khuôn làm mát biên dạng 3D này được so sánh với dữ liệu tương ứng của khuôn 2D nguyên bản để phân tích sự khác biệt giữa hai phương pháp thiết kế.

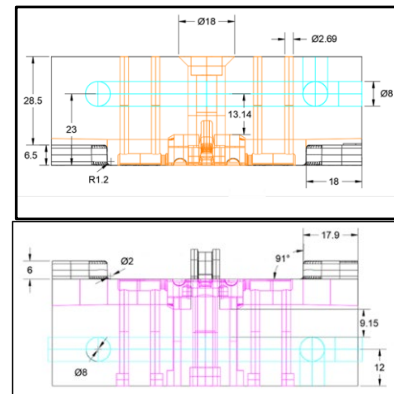
## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Thiết kế hệ thống làm mát biên dạng 3D

Khuôn đúc với kênh làm mát 2D nguyên bản của chi tiết ép phun kim loại (Metal injection molding - MIM) này được thiết kế theo dạng một khuôn một lòng khuôn, sử dụng kết cấu khuôn hai tấm. Hình 2 hiển thị mô hình CAD của lõi khuôn và hệ thống kênh làm mát 2D do nhà sản xuất đối tác cung cấp. Kích thước của lõi khuôn đục và khuôn cái lần lượt là 170 x 100, có độ dày tương ứng là 34 mm và 28 mm. Kênh làm mát 2D được gia công bằng phương pháp khoan với đường kính là 8 mm, cả lõi khuôn đục và khuôn cái đều có các cổng vào và cổng ra độc lập. Do hình dạng sản phẩm phức tạp và thiết kế hệ thống lỗ chốt bên trong lòng khuôn rất tinh vi, kênh làm mát 2D chỉ có thể bao quanh phía bên ngoài của lõi khuôn, dẫn đến khoảng cách quá xa so với lòng khuôn đúc. Sau một thời gian vận hành dài, nhiệt độ tại lõi khuôn tăng cao, thậm chí lõi khuôn có thể bị biến dạng nhiệt, gây ra các vết nứt ở lỗ trong của sản phẩm và làm gia tăng xu hướng cong vênh.

Nghiên cứu này được thực hiện dựa trên cấu hình khuôn nguyên bản để chuyển đổi thiết kế kênh làm mát từ dạng 2D sang dạng kênh làm mát theo biên dạng 3D. Việc thiết kế này đòi hỏi phải xác định kích thước của hệ thống kênh dẫn nguội và cổng phun, tăng lượng điện đầy vật liệu, xác định cấu hình của hệ thống kênh dẫn, cổng phun và hai lòng khuôn, đồng thời phân tích quá trình điện đầy bằng phần mềm mô phỏng dòng chảy nhựa. Kết quả mô phỏng đảm bảo rằng trong quá trình ép phun, vật liệu có thể được điện đầy đồng đều vào mỗi lòng khuôn, đồng thời hỗ trợ thiết lập bộ phận tràn, giúp thay đổi vị trí của đường hàn và cải thiện chất lượng cũng như độ bền của sản phẩm. Để tìm hiểu ảnh hưởng

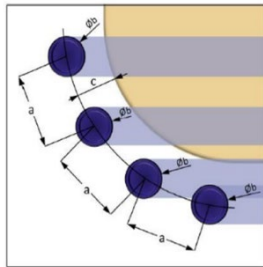
của kênh làm mát 2D nguyên bản đối với thiết kế mới, kênh làm mát 2D ban đầu cũng đã được sửa đổi. Hình 2 cũng cho thấy thiết kế của kênh làm mát 2D với đường kính kênh làm mát là 8 mm. Trong một chu kỳ ép phun, thời gian làm mát thường chiếm gấp ba lần tổng thời gian điện đầy và thời gian giữ áp. Do đó, một thiết kế kênh làm mát hiệu quả có thể rút ngắn thời gian làm mát và tăng hiệu suất sản xuất sản phẩm. Hơn nữa, nếu khuôn được làm mát đồng đều thì ứng suất dư trên chi tiết giảm xuống, đồng thời hạn chế tối đa hiện tượng cong vênh và nứt vỡ. Vì vậy, việc thiết kế kênh làm mát bao gồm hình dạng và vị trí là một vấn đề trọng yếu. Bên cạnh đó, các quy tắc thiết kế phù hợp cần được tuân thủ để đảm bảo rằng ngay cả những vùng mỏng nhất của chi tiết cũng có thể được thiêu kết thành công. Theo các quy tắc thiết kế từ EOS[4], khoảng cách tối thiểu giữa đường tâm của các kênh làm mát liền kề, hoặc giữa đường tâm kênh làm mát và bề mặt lòng khuôn, có thể được xác định dựa trên đường kính của chính kênh làm mát đó.



**Hình 2. Mô hình CAD của lõi khuôn và hệ thống kênh làm mát 2D**

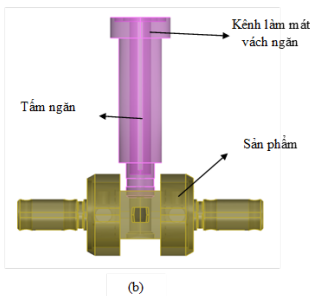
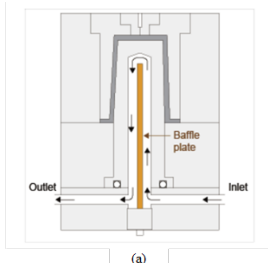
Do cấu trúc bên trong của lõi khuôn phức tạp, kênh làm mát theo biên dạng 3D (conformal cooling) là lựa chọn thay thế để cải thiện quá trình làm mát, hình dạng của kênh 3D này có thể uốn cong và tiếp cận càng gần vùng nhiệt độ cao càng tốt. Đã có 12 phương án kênh làm mát theo biên dạng được thiết kế dựa trên quy tắc thiết kế tại Hình 3, mỗi phương án đều giúp giảm đáng kể nhiệt độ. Tuy nhiên, khi vùng lỗ sâu trong lòng khuôn nằm quá xa kênh làm mát, nhiệt thường dễ tích tụ tại đó. Cấu trúc khuôn tại vị trí này là một lõi khuôn động mảnh dài. Lõi này thoát ra khỏi sản phẩm trước khi mở khuôn, sau đó sản phẩm mới được đẩy ra ngoài trong nhờ cơ chế đẩy. Việc thiết kế kênh làm mát kiểu vách ngăn (baffle cooling channel) có thể được áp dụng trong trường hợp này. Đây là dạng kênh làm

mát được khoan thẳng đứng xuyên qua kênh làm mát chính. Một tấm vách ngăn bằng kim loại được sử dụng để chia dọc kênh làm mát thành hai kênh bán nguyệt. Do đó, một hệ thống kênh làm mát vách ngăn độc lập đã được thiết kế bên trong lõi khuôn có đường kính 5 mm và độ dày của tấm vách ngăn là 1 mm. Hình 4 cho thấy thiết kế của kênh làm mát vách ngăn độc lập được thiết kế lồng ghép vào chốt tạo hình lỗ của sản phẩm. Hình 5 là mô hình CAD của phương án 12 (Type 12), kết hợp giữa kênh làm mát theo biên dạng 3D với đường kính 4 mm và kênh làm mát vách ngăn.



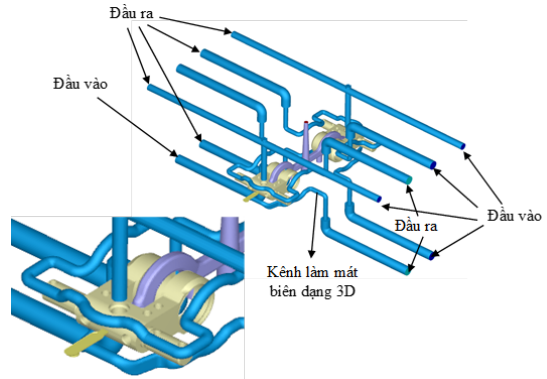
Wall thickness of molded product (in mm)	Hole diameter (in mm)	Centerline distance between holes	Distance between center of holes and cavity
	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>c</b>
0 - 2	4 - 8	2 - 3 x b	1.5 - 2 x b
2 - 4	8 - 12	2 - 3 x b	1.5 - 2 x b
4 - 6	12 - 14	2 - 3 x b	1.5 - 2 x b

Hình 3. Quy tắc thiết kế kênh làm mát 3D [4]



Hình 4. Thiết kế kênh làm mát vách ngăn

Ghi chú: (a) ý tưởng thiết kế kênh làm mát vách ngăn và (b) kênh làm mát vách ngăn được thiết kế trong đề tài.

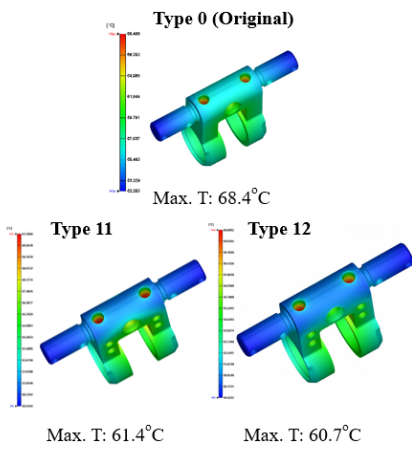


Hình 5. Mô hình 3D thiết kế Kênh làm mát biên dạng 3D (Type 12)

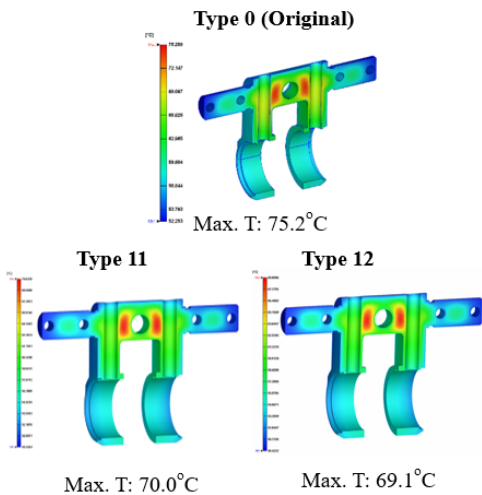
## 2.2. Mô phỏng dự đoán nhiệt độ và các thông số liên quan

Phần mềm Moldex3D R17 được sử dụng để mô phỏng và phân tích dòng chảy khuôn mẫu. Các mô-đun phân tích bao gồm ép phun bột (PIM) và phân tích kênh làm mát theo biên dạng 3D. Mô-đun PIM được áp dụng để thực hiện việc phân tích quá trình điền đầy cho các cấu trúc cấp liệu đặc biệt, đồng thời dự báo và phân tích nồng độ bột kim loại của phôi thô (green embryo). Chỉ khi nồng độ bột được phân bố đồng đều mới có thể đảm bảo sự đồng nhất về độ co ngót trong quá trình thiêu kết và ngăn ngừa các khuyết tật bề mặt do sự phân tách bột gây ra. Bên cạnh đó, phần mềm có thể mô phỏng sự phân bố nhiệt độ tổng thể, các vùng tích tụ nhiệt, biến dạng cong vênh và xu hướng dòng chảy của chất lỏng làm mát dưới các hướng hình học khác nhau của kênh dẫn. Các khuyết tật phát sinh trong quá trình ép phun như đường hàn, bẫy khí,... cũng có thể được dự báo trước. Kết quả mô phỏng này cung cấp cơ sở quan trọng để tối ưu hóa thiết kế khuôn và các thông số kỹ thuật trong quá trình sản xuất. Mục đích của việc mô phỏng là chứng minh kênh làm mát được thiết kế có thể cải thiện chất lượng sản phẩm và hiệu suất làm mát trong giai đoạn làm mát. Mười hai thiết kế kênh làm mát khác nhau được sử dụng để phân tích dòng chảy khuôn và so sánh. Trong bài báo này, chỉ có 3 loại đại diện được trình bày để xem xét. Đầu tiên là thiết kế kênh làm mát 2D truyền thống, được gọi là Type 0 (trường hợp gốc); thứ hai là kênh làm mát biên dạng 3D được gọi là Type 11; thứ ba là kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn, được gọi là Type 12. Việc so sánh kết quả phân tích của ba nhóm này và hiệu thiết kế của các loại kênh làm mát khác nhau đóng vai trò rất quan trọng trong việc thiết kế hệ thống làm mát cho khuôn. Hình 6 và Hình 7 lần lượt thể hiện kết quả mô phỏng dự đoán nhiệt độ bên ngoài và bên trong

sản phẩm sau khi chu kỳ làm mát kết thúc. Nhiệt độ bề mặt cao nhất của thiết kế kênh làm mát 2D là  $68,4^{\circ}\text{C}$  và nhiệt độ bề mặt cao nhất của kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp vách ngăn là  $60,7^{\circ}\text{C}$ , mức chênh lệch là  $7,7^{\circ}\text{C}$ . Tương tự với nhiệt độ bên trong là  $75,2^{\circ}\text{C}$  với kênh làm mát 2D và  $69,1^{\circ}\text{C}$  với kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp vách ngăn, mức chênh lệch là  $6,1^{\circ}\text{C}$ . Hai kết quả mô phỏng này cho thấy, kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp vách ngăn làm mát vách ngăn được dự đoán có hiệu quả làm mát cao hơn kênh làm mát 2D truyền thống.



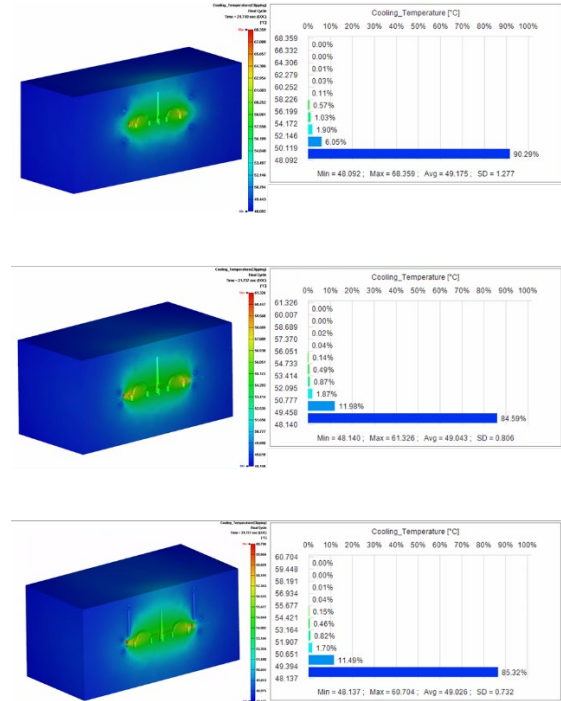
Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt độ bên ngoài sản phẩm sau chu kỳ làm mát



Hình 7. Kết quả mô phỏng nhiệt độ bên trong sản phẩm sau chu kỳ làm mát

Hình 8 thể hiện kết quả mô phỏng dự đoán nhiệt độ bên ngoài và bên trong lòng khuôn sau khi chu kỳ làm mát kết thúc. Nhiệt độ bề mặt cao nhất của lòng khuôn có thiết kế kênh làm mát 2D là  $68,4^{\circ}\text{C}$

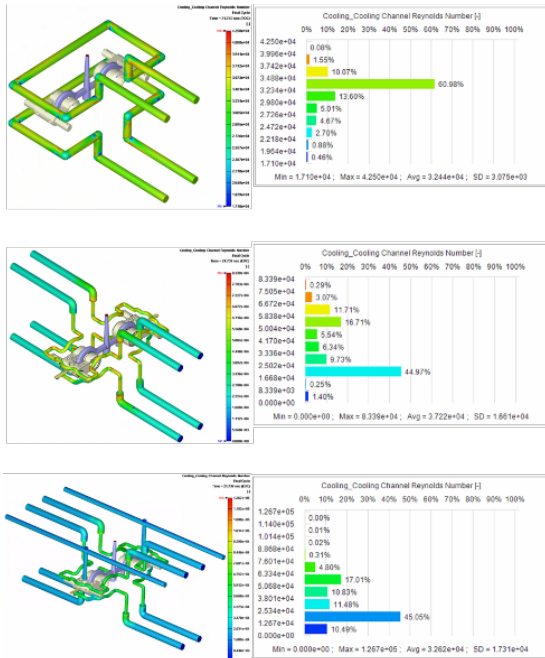
và nhiệt độ bề mặt cao nhất của lòng khuôn kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp vách ngăn là  $61,3^{\circ}\text{C}$ , mức chênh lệch là  $7,1^{\circ}\text{C}$ . Điều này cho thấy thiết kế kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp vách ngăn được dự đoán có hiệu quả làm mát tốt hơn thiết kế ban đầu.



Hình 8. Kết quả mô phỏng nhiệt độ bên trong sản phẩm sau chu kỳ làm mát

Sau cùng, để đánh giá được tính hiệu quả, tăng tuổi thọ của lòng khuôn và giảm thiểu hiện tượng đóng cặn bên trong kênh làm mát, một đại lượng cần được mô phỏng và xem xét là số Reynolds (Reynolds Number). Số Reynolds có thể được sử dụng để xác định tốc độ tản nhiệt của từng phần trong kênh làm mát đối với khuôn. Khi thiết kế kênh làm mát, số Reynolds nên đạt giá trị lý tưởng là 10.000 (càng sát giá trị này càng tốt), để chất lỏng làm mát bên trong kênh có thể đạt đến trạng thái chảy rối hoàn toàn. Trạng thái chảy rối (turbulent flow) giúp cải thiện hiệu suất tản nhiệt. Trong trường hợp không thể đạt được giá trị lý tưởng, số Reynolds tối thiểu phải đạt 4.000 để tránh hiện tượng chảy tầng (laminar flow) của chất làm mát bên trong kênh, điều này sẽ làm giảm hiệu suất tản nhiệt. Hình 9 thể hiện kết quả mô phỏng của phân tích số Reynolds của chất làm mát đối với các loại kênh làm mát khác nhau. Có thể thấy số Reynolds trung bình của Type 0 là  $3,244.10^4$ . Số Reynolds trung bình của Type 11 là  $3,722.10^4$ , số Reynolds trung bình của Type 12 là  $3,262.10^4$ , do tiết diện

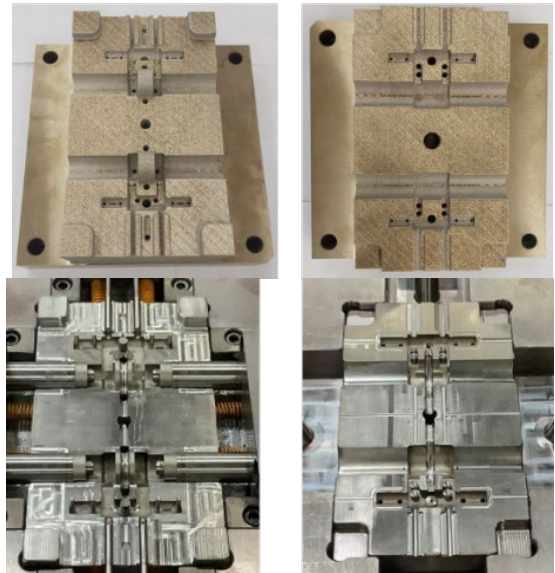
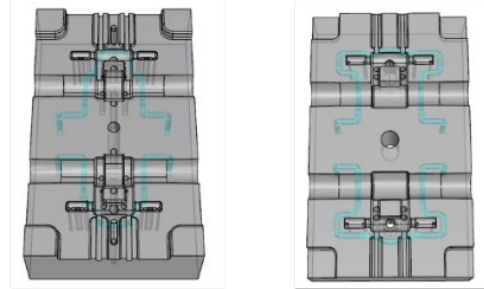
dòng chảy của kênh làm mát có vách ngăn bị thu hẹp, làm cho tốc độ dòng chảy của chất lỏng chậm hơn, từ đó làm giảm số Reynolds của tổng thể thiết kế kênh làm mát. Tóm lại, cả ba thiết kế kênh làm mát đều đảm bảo được dòng chảy rối trong quá trình làm việc, đảm bảo tính hiệu quả và giảm hiện tượng đóng cặn



Hình 9. Kết quả mô phỏng số Reynolds của cả ba thiết kế kênh làm mát

### 2.3. Gia công lòng khuôn và thực nghiệm

Khuôn là bộ phận quan trọng nhất trong quá trình ép phun. Vật liệu nóng chảy ở nhiệt độ cao được máy ép phun bơm vào và làm nguội bên trong khuôn. Do đó, chất lượng thiết kế và chế tạo khuôn sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến sản phẩm hoàn thiện. Trong quá trình thiết kế khuôn cho nghiên cứu này, nhóm tác giả đã làm việc nhiều lần với các đối tác sản xuất và đội ngũ kỹ thuật của công ty (Chin & Hsu, 2012). Sau khi thảo luận về các vấn đề như: lõi khuôn có kênh làm mát theo biên dạng 3D được chế tạo bằng phương pháp gia công bồi đắp kim loại (Selective laser melting, SLM) với vật liệu được sử dụng là thép không gỉ SUS420J2, gia công tấm khuôn và lắp ráp khuôn, cuối cùng các bên đã đạt được sự thống nhất và hoàn thiện khuôn ép. Khi được chế tạo, bề mặt được gia công thiêu kết với kích thước dày hơn 0,5 mm so với thiết kế ban đầu nhằm thực hiện các bước gia công tinh sau đó. Trong quá trình hậu xử lý, các lòng khuôn được đưa về kích thước chuẩn bằng các phương pháp gia công đánh bóng trên hệ thống CNC.



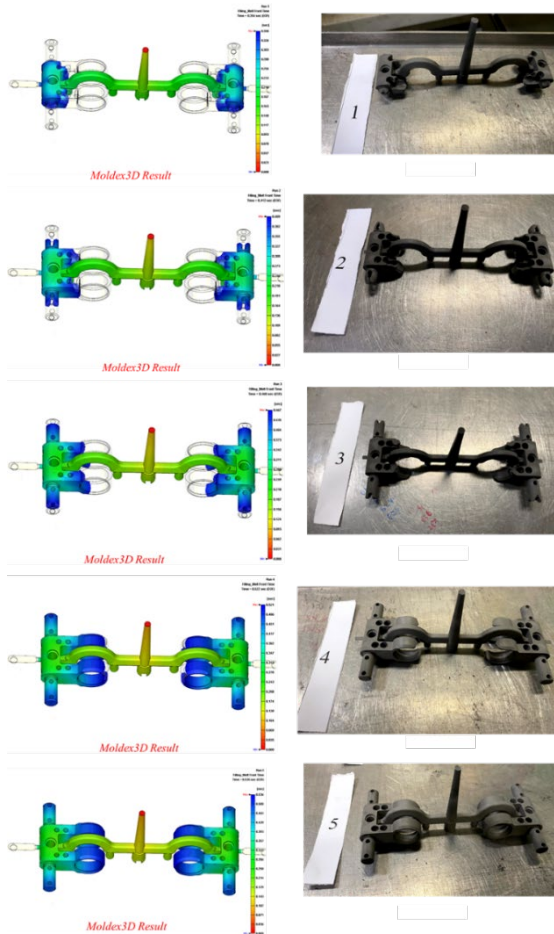
Hình 10. Lòng khuôn sau khi được gia công bằng phương pháp SLM và gia công tinh

Trong nghiên cứu này, khuôn MIM (ép phun kim loại) có hệ thống kênh làm mát theo biên dạng được đưa vào vận hành thử nghiệm. Thông qua các phương pháp thử nghiệm ép thiếu (short shot) và ép đầy (full shot), nhóm tác giả có thể xác định các điều kiện ép phun ổn định trong quy trình và thu được các sản phẩm không có lỗi khuyết tật. Đồng thời, kết quả thực nghiệm được so sánh với kết quả mô phỏng phân tích dòng chảy để xác minh độ chính xác của phần mềm mô phỏng. Nhiệt độ bề mặt lõi khuôn cũng được kiểm tra tương ứng để theo dõi sự thay đổi nhiệt độ khuôn trong suốt quá trình ép phun kim loại; cuối cùng, kết quả thử nghiệm của hai loại kênh làm mát (truyền thống và theo biên dạng) đã được phân tích và đối chiếu.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Thử nghiệm ép thiếu và ép đầy (Short-shot, full shot)

Kết quả quan sát từ thực nghiệm cho thấy quá trình ép phun kim loại tạo ra một dòng chảy dạng rắn bề ngoài ở giai đoạn đầu của quá trình điền đầy, giống như kết quả của nhóm thử nghiệm ép thiếu đầu tiên được thể hiện trong Hình 11. Trong quá trình thực hiện thử nghiệm ép thiếu, do các bộ phận của sản phẩm có hình dạng rất phức tạp nên giai đoạn điền đầy tổng thể cũng gặp nhiều khó khăn. Tuy nhiên, không xuất hiện các lỗi như dòng chảy nhanh (race flow) hay điền đầy không đủ do sự khác biệt về độ dày thành sản phẩm. Ở nhóm thử nghiệm ép thiếu đầu tiên, phần thân chính và lỗ chính gần như đã được hình thành và có thể quan sát rõ.



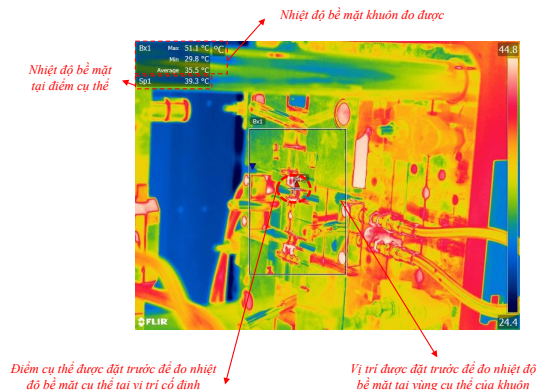
**Hình 11. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm của Thử nghiệm ép thiếu và ép đầy**

Sau đó, ở nhóm thứ 2 và thứ 3, các chi tiết bên của bộ phận liên kết dần được điền đầy. Đến nhóm

thứ 4, các phần chi tiết bên này đã được lấp đầy hoàn toàn và dòng vật liệu bắt đầu chảy tới để điền đầy cấu trúc hình tròn của chi tiết. Trong nhóm thứ 5 của thử nghiệm, sản phẩm đã được điền đầy hoàn toàn; ngay cả phần mỏng nhất của các cấu trúc hình tròn cũng được tạo hình thành công mà không xuất hiện bất kỳ vết nứt nào. Thông qua thử nghiệm trên, các điều kiện ép phun ổn định trong quy trình có thể được xác định và thu được các sản phẩm không có lỗi khuyết tật. Đồng thời, độ tin cậy của phần mềm mô phỏng điền đầy đang được sử dụng cũng có thể được xác định.

#### 3.2. Thử nghiệm so sánh nhiệt độ

Trong suốt quá trình làm việc, nhiệt độ bề mặt khuôn tăng lên, dẫn đến hiện tượng quá nhiệt và làm giảm hiệu quả của giai đoạn làm nguội. Điều này có thể khiến nhiệt độ bên trong của chi tiết tăng cao, gây ra các biến dạng như nứt vỡ (cracking), cong vênh (warping), v.v. Mục tiêu của thử nghiệm này là tìm hiểu hiệu suất của kênh làm nguội biên dạng 3D trong quy trình ép phun so với kênh làm nguội truyền thống trong cùng một khoảng thời gian vận hành.



**Hình 12. Giao diện của camera nhiệt trong quá trình thực nghiệm**

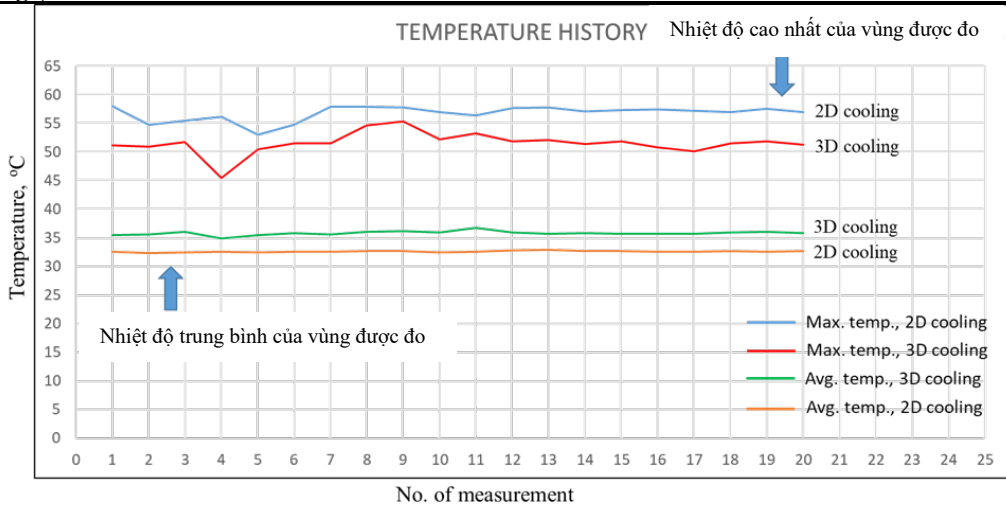
Các thiết bị được sử dụng cho thử nghiệm này tương tự như thử nghiệm trước đó (máy ARBURG – 320C GOLDEN EDITION 500-170), nhưng được chia làm hai: một máy sử dụng khuôn có kênh làm nguội 2D truyền thống và máy còn lại sử dụng khuôn có kênh làm nguội biên dạng 3D. Cả hai đều sử dụng cùng một loại vật liệu, cùng môi trường làm việc và số lượng chu kỳ vận hành như nhau. Cả hai máy đều vận hành 20 chu kỳ đầy đủ của quy trình ép phun chi tiết mẫu. Dữ liệu về sự thay đổi nhiệt độ được thu thập bằng một camera đo nhiệt chuyên dụng, dùng để đo nhiệt độ bề mặt khuôn thông qua hình ảnh. Sau mỗi chu kỳ, khuôn được mở ra để

kiểm tra và hình ảnh nhiệt độ tức thời sẽ được ghi lại. Sau khi chụp đủ 20 bức ảnh cho mỗi loại khuôn, các hình ảnh này được so sánh đối chiếu giữa hai loại khuôn với nhau. Tình trạng thay đổi nhiệt độ

được phân tích sau 10 và 20 lần vận hành và giá trị nhiệt độ trung bình được sử dụng để đưa ra kết quả cuối cùng.

**Bảng 1. Kết quả thực nghiệm của khuôn có kênh tản nhiệt 2D truyền thống**

Lần thử	Nhiệt độ bề mặt khuôn (°C)			Nhiệt độ khuôn tại điểm cố định
	Thấp nhất (Min.)	Cao nhất (Max.)	Trung bình (Average)	
1	27	58	32,6	38,6
2	27	54,7	32,3	37,7
3	27,3	55,4	32,5	38,3
4	27,12	56,1	32,6	39,1
5	27,3	53	32,4	37,4
6	27,3	54,7	32,6	38,2
7	27	57,9	32,6	38,9
8	27,1	57,9	32,7	39
9	27,2	57,8	32,7	39
10	27,1	56,9	32,5	38,3
11	27,2	56,4	32,6	38,5
12	27,2	57,6	32,8	39,1
13	27,3	57,8	32,9	39,4
14	27,1	57,1	32,7	38,9
15	27,1	57,3	32,7	38,7
16	26,9	57,4	32,6	38,7
17	26,9	57,2	32,6	38,5
18	27,3	56,9	32,7	38,4
19	27	57,5	32,6	38,5
20	27,2	57	32,7	38,4
<b>Trung bình (Average)</b>	<b>27,135</b>	<b>56,73</b>	<b>32,62</b>	<b>38,58</b>



**Hình 13. Đồ thị lịch sử nhiệt độ cho cả khuôn dùng kênh làm mát 2D và khuôn dùng kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn.**

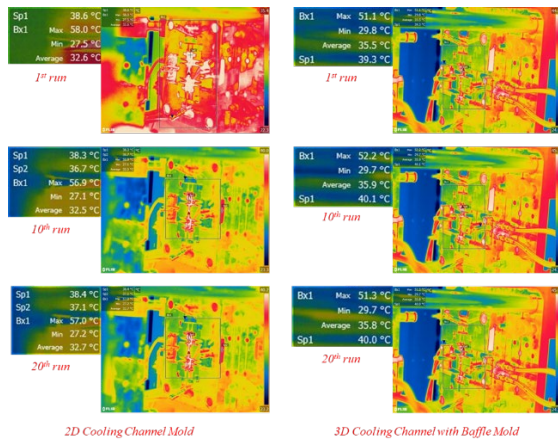
**Bảng 2. Kết quả thực nghiệm của khuôn có kênh tản nhiệt theo biên dạng 3D**

Lần thử	Nhiệt độ bề mặt khuôn (°C)			Nhiệt độ khuôn tại điểm cố định
	Thấp nhất (Min.)	Cao nhất (Max.)	Trung bình (Average)	
1	29,8	51,1	35,5	39,3
2	29,9	50,9	35,6	39,3
3	29,7	51,7	36	39,6
4	23,2	45,4	34,9	37,3
5	29,6	50,5	35,5	39
6	29,6	51,5	35,8	39,4
7	29,7	51,5	35,6	39,7
8	29,5	54,6	36	40,4
9	29,7	55,3	36,2	40,9
10	29,7	52,2	35,9	40,1
11	30	53,2	36,8	40,4
12	29,7	51,8	35,9	40
13	29,6	52,1	35,7	40,1
14	29,5	51,4	35,8	39,9
15	29,5	51,8	35,7	40
16	29,5	50,8	35,7	39,7
17	29,5	51,1	35,7	39,7
18	29,6	51,5	35,9	40,1
19	29,5	51,8	36	40,3
20	29,7	51,3	35,8	40
<b>Trung bình (Average)</b>	<b>29,325</b>	<b>51,525</b>	<b>35,8</b>	<b>39,76</b>

Sau một số chu kỳ làm việc nhất định, nhiệt độ trên bề mặt lõi khuôn tăng lên đáng kể so với nhiệt độ ban đầu, điều này cho thấy hiệu quả của kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn so với kênh làm mát 2D nguyên bản. Hình 12 hiển thị giao diện của camera nhiệt trong quá trình thực nghiệm. Trước khi kiểm tra, một khung hình chữ nhật đã được vẽ để đo nhiệt độ bề mặt lõi khuôn. Sau đó, một điểm cụ thể được thiết lập ở giữa khung hình, nơi có điểm nhiệt độ cao nhất để đo nhiệt độ. Kết quả đo nhiệt độ được hiển thị ở góc trên bên trái của hình ảnh. Bảng 1 và Bảng 2 cho thấy sự thay đổi nhiệt độ qua 20 lần chạy. Đối với khuôn dùng kênh làm mát 2D, nhiệt độ tối đa ở “lần chạy 1” là 58°C và nhiệt độ tối thiểu là 32,6°C. Tại “lần chạy 10”, nhiệt độ tối đa là 56,9°C và nhiệt độ tối thiểu là 27,1°C. Tuy nhiên, sau 20 lần chạy, nhiệt độ có vẻ tăng nhẹ với nhiệt độ tối đa là 57°C và nhiệt độ tối thiểu là 27,2°C.

Đối với khuôn dùng kênh làm mát theo biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn, nhiệt độ tối đa ghi nhận được ở “lần chạy 1” là 51,1°C và nhiệt độ tối thiểu là 29,8°C. Tại “lần chạy 10”, nhiệt độ tối đa là 52,2°C và nhiệt độ tối thiểu là 29,7°C. Cuối cùng, tại “lần chạy 20”, nhiệt độ giảm nhẹ với nhiệt độ tối đa là 51,3°C và nhiệt độ tối thiểu là 29,7°C. Với kết quả này, chúng ta có thể thấy rằng

khuôn dùng kênh làm mát biên dạng 3D có hiệu quả làm mát tốt hơn so với khuôn dùng kênh làm mát 2D. Hình 13 hiển thị đồ thị lịch sử nhiệt độ cho cả khuôn dùng kênh làm mát 2D và khuôn dùng kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn. Nhiệt độ tối đa trung bình của khuôn kênh làm mát 2D là 56,73°C và nhiệt độ tối đa trung bình của khuôn kênh làm mát biên dạng 3D là 51,53°C. Loại khuôn trước cao hơn loại khuôn sau 5,2°C. Bên cạnh đó, nhiệt độ trung bình của kênh làm mát biên dạng 3D là 29,33°C và nhiệt độ trung bình của kênh làm mát 2D là 27,14°C. Điều này giúp xác nhận rằng nhiệt độ trung bình của kênh làm mát 2D cao hơn do nhiệt độ của khuôn kênh làm mát biên dạng 3D lúc bắt đầu cao hơn (40°C) so với khuôn kênh làm mát 2D nguyên bản (30°C). Hình 14 hiển thị hình ảnh nhiệt độ của các lần chạy thứ 1, 10 và 20 của mỗi loại khuôn để so sánh nhiệt độ tối đa giữa chúng. Tóm lại, sau thí nghiệm, kết quả có thể cho thấy rằng khuôn dùng kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp vách ngăn hoạt động khá hiệu quả trong việc giảm nhiệt độ khuôn khi cường độ làm việc cao, nhưng vẫn giữ nguyên chu kỳ thời gian và đảm bảo chất lượng kết quả tốt.



**Hình 14. Hình ảnh nhiệt độ của các lần chạy thứ 1, 10 và 20 của mỗi loại khuôn**

#### 4. KẾT LUẬN

Trong giai đoạn phát triển thiết kế khuôn MIM, phần mềm phân tích dòng chảy khuôn có thể được sử dụng để hỗ trợ đánh giá thiết kế việc đóng mở khuôn. Thông qua phân tích diện đầy, có thể đảm bảo rằng việc thiết kế kênh dẫn và vị trí công phun cho phép việc cấp liệu ở trạng thái nóng chảy nhiệt độ cao diễn ra khả thi. Do sự sắp xếp phức tạp của kênh làm mát biên dạng 3D và chi phí gia công đắt đỏ của các lòng khuôn, mô phỏng quá trình làm mát

có thể dự đoán thời gian làm nguội sản phẩm và sự chênh lệch nhiệt độ của khuôn, đồng thời phân tích nhanh chóng và chính xác thiết kế kênh làm mát và khu vực tích nhiệt của khuôn. Các phương án thiết kế kênh làm mát khác nhau cũng đã được so sánh để đánh giá hiệu quả chi phí của việc chế tạo khuôn. Do nhu cầu tăng cường thiết kế của khuôn, cấu trúc trở nên phức tạp hơn, việc gia công khó khăn và chi phí cao.

Trong thí nghiệm kiểm tra nhiệt độ khuôn, kết quả kiểm tra nhiệt độ của kênh làm mát biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn đã được so sánh với kênh làm mát 2D truyền thống. Vì hệ thống kênh làm mát hiện được đặt gần lòng khuôn sản phẩm hơn nên hiệu quả làm mát của khuôn dùng kênh làm mát biên dạng 3D tốt hơn so với khuôn dùng kênh làm mát 2D truyền thống. So với kênh làm mát 2D truyền thống, việc thiết kế làm mát biên dạng 3D kết hợp kênh làm mát vách ngăn có thể giảm nhiệt độ tối đa của lõi khuôn sau giai đoạn làm nguội đi 9,2%. Tuy nhiên, mặc dù khuôn kênh làm mát biên dạng 3D bắt đầu quy trình với nhiệt độ cao hơn 10°C, nhiệt độ trung bình của kênh làm mát 2D truyền thống vẫn được đánh giá là cao hơn. Điều này có nghĩa là khuôn dùng kênh làm mát biên dạng 3D không chỉ tăng hiệu quả làm mát mà còn giúp kéo dài tuổi thọ làm việc của khuôn.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Dehghan-Manshadi, A., Bermingham, M., Dargusch, M., StJohn, D., & Qian, M. (2017). Metal Injection Moulding of Titanium and Titanium Alloys: Challenges and Recent Development. *Powder Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.053>
- Hu, S. C., & Hwang, K. S. (2000). Powder Metallurgy, 43, 239-244.  
<https://doi.org/10.1179/003258900666005>
- Thornagel, M. (2010). Simulating flow can help avoid mould mistakes. *Metal Powder Report*, 65(3), 26-29.  
[https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(10\)70072-2](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(10)70072-2)
- Thornagel, M. (2012). Injection moulding simulation: New developments offer rewards for the PIM industry. *Powder Injection Moulding International*, 6(1), 65-68.
- Sachs, E., Wylonis, E., Allen, S., Cima, M., & Guo, H. (2000). Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process. *Polymer Engineering and Science*, 40(5), 1232-1247.  
<https://doi.org/10.1002/pen.11251>
- Yan, C., & Hsu, A. (2012). Introduction of composite technology, combining machining with selective laser melting for metal powder forming. *Molding Innovation*, 5-10.
- Hsu, F., Wang, K., Huang, C., & Chang, R. (2013). Investigation on conformal cooling system design in injection moulding. *Advances in Production Engineering & Management*, 8(2), 107-115.  
<https://doi.org/10.14743/apem2013.2.158>
- Qiao, H. (2006). A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(4), 430-439.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.11.001>
- Park, H. S., & Dang, X. P. (2010). Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(6), 879- 890.  
<https://doi.org/10.1007/s12541-010-0107-z>
- Dang, X. P., & Park, H.S. (2011). Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mold. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(1), 73-84. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0009-8>

- OSAOPN. (2017). *Laser Additive Manufacturing: Going Mainstream*.  
[https://www.osaopn.org/home/articles/volumr\\_28/february\\_2017/features/laser\\_additive\\_manufacturing\\_going\\_mainstream/](https://www.osaopn.org/home/articles/volumr_28/february_2017/features/laser_additive_manufacturing_going_mainstream/).
- Mayer, S. (2009). Optimized mould temperature control procedure using DMLS. *EOS Whitepaper*.
- Beaumont, J. P. (2004). *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding*. Carl Hanser Verlag, Munich.
- Jahan, S. A., Wu, T., Zhang, Y., Zhang, J., Tovar, A., & Elmounayri, H. (2017). Thermo-mechanical design optimization of conformal cooling channels using design of experiments approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 898-911. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.078>
- Heaney, D. F., & Greene, C.D. (2012). *Molding of components in metal injection molding (MIM)*. *Handbook of Metal Injection Molding*. Woodhead Publishing, 109-133e. <https://doi.org/10.1533/9780857096234.1.109>
- Jahan, S. A. & El-Mounayri, H., (2016). Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding. *Procedia Manufacturing*, 5, 888-900. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.076>
- Jahan, S. A. & El-Mounayri, H., (2018). A Thermomechanical Analysis of Conformal Cooling Channels in 3D Printed Plastic Injection Molds. *Applied Sciences*, 8(12), 2567. <https://doi.org/10.3390/app8122567>
- Chin, Y., & Hsu, A. (2012). *Introduction of Composite Technology, Combining Machining with Selective Laser Melting for Metal Powder Forming*, *moldex3d.com*.