

THỰC NGHIỆM ĐO NHIỆT ĐỘ LÒNG KHUÔN DẠNG PHẪNG

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF TEMPERATURE IN FLAT MOLD CAVITIES

Nguyễn Tấn Đạt, Trần Thanh Lam, Huỳnh Nguyễn Hoàng, Lê Thanh Tùng*

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

Email: 21144378@student.hcmute.edu.vn;

lamtt@hcmute.edu.vn;

hoanghn@hcmute.edu.vn;

*tunglt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Trong quy trình ép phun nhựa, nhiệt độ khuôn đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất. Nghiên cứu này thực hiện khảo sát thực nghiệm về sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn hình chữ nhật và ảnh hưởng của nó đến các khuyết tật phổ biến như cong vênh, rỗ khí và sai lệch kích thước. Đặc biệt, các viên bi thép với kích thước khác nhau được sử dụng như một phương tiện để kiểm tra và so sánh tốc độ gia nhiệt trong mỗi chu kỳ ép, nhằm đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của khuôn. Kết quả cho thấy sự chênh lệch nhiệt độ trong khuôn có ảnh hưởng trực tiếp đến độ đồng đều và chất lượng của sản phẩm nhựa. Việc kiểm soát tốt nhiệt độ không chỉ góp phần giảm thiểu lỗi sản phẩm mà còn nâng cao độ ổn định của quá trình ép và hiệu quả sản xuất tổng thể.

Từ khóa: Phân bố nhiệt độ khuôn; Gia nhiệt khuôn; Nhiệt độ khuôn; Kiểm soát nhiệt độ khuôn.

ABSTRACT

In the injection molding process, mold temperature plays a crucial role in ensuring product quality and production efficiency. This study conducts an experimental investigation on the temperature distribution within a rectangular mold cavity and its effects on common defects such as warpage, air traps, and dimensional deviations. Specifically, steel balls of varying sizes are used as a means to examine and compare the heating rate during each molding cycle, aiming to evaluate the mold's heat transfer efficiency. The results indicate that temperature variations within the mold have a direct impact on the uniformity and quality of plastic products. Proper temperature control not only helps minimize product defects but also enhances process stability and overall production performance.

Keywords: Mold temperature distribution; Mold heating; Mold temperature; Mold temperature control.

1. TỔNG QUAN

Ép phun là một trong những phương pháp gia công nhựa tiên tiến và phổ biến nhất hiện nay, được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất các chi tiết nhựa có hình dạng phức tạp với độ chính xác cao và năng suất lớn. Công nghệ này cho phép tạo ra các sản phẩm từ các chi tiết nhỏ như linh kiện điện tử đến các bộ phận lớn trong ngành công nghiệp ô tô và hàng không vũ trụ [1]. Sự thành công của quá trình ép phun phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó kiểm soát nhiệt độ khuôn là một trong những yếu tố then chốt ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm, hiệu suất sản xuất và độ bền của khuôn [2]. Nhiệt độ khuôn không chỉ tác động đến khả năng điền đầy nhựa vào lòng khuôn mà còn ảnh hưởng đến cấu trúc vi mô, tính chất cơ học và độ hoàn thiện bề mặt của sản phẩm [3]. Do đó, việc thực nghiệm đo và kiểm soát nhiệt độ lòng khuôn đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa quy trình ép phun, đặc biệt đối với khuôn dạng phẳng – một loại khuôn phổ biến trong sản xuất các sản phẩm nhựa dạng tấm hoặc chi tiết có độ dày đồng đều.

Trong quá trình ép phun, nhựa nóng chảy được bơm vào lòng khuôn với áp suất cao, sau đó được làm nguội để tạo hình sản phẩm. Nhiệt độ của nhựa nóng chảy khi tiếp xúc với lòng khuôn sẽ truyền một phần năng lượng nhiệt vào khuôn, làm tăng nhiệt độ của bề mặt khuôn [4]. Sau mỗi chu kỳ ép, nhiệt độ khuôn cần được điều chỉnh thông qua hệ thống làm mát để đảm bảo sản phẩm có thể được lấy ra dễ dàng mà không bị biến dạng, đồng thời duy trì độ bền và tuổi thọ của khuôn [5]. Tuy nhiên, để đảm bảo dòng nhựa chảy vào khuôn một cách trơn tru và điền đầy lòng khuôn mà không gây ra các khuyết tật như vết nổi, bọt khí hay co ngót không đều, khuôn cần được gia nhiệt trở lại đến một mức nhiệt độ phù hợp trước chu

kỳ ép tiếp theo [6]. Sự cân bằng giữa quá trình làm mát và gia nhiệt này đòi hỏi sự kiểm soát chính xác, đặc biệt đối với khuôn dạng phẳng, nơi nhiệt độ phân bố không đồng đều có thể dẫn đến các vấn đề về chất lượng sản phẩm.

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian chu kỳ ép, độ co ngót của sản phẩm và tính chất cơ học của nhựa [7]. Ví dụ, nhiệt độ khuôn quá thấp có thể làm tăng độ nhớt của nhựa, gây khó khăn trong việc điền đầy khuôn và dẫn đến các khuyết tật như dòng chảy không hoàn chỉnh hoặc bề mặt sản phẩm kém chất lượng. Ngược lại, nhiệt độ khuôn quá cao có thể kéo dài thời gian làm nguội, làm giảm năng suất và tăng nguy cơ biến dạng sản phẩm [8]. Do đó, việc đo lường và kiểm soát nhiệt độ lòng khuôn trong suốt quá trình ép phun là một nhiệm vụ quan trọng, đòi hỏi sự kết hợp giữa các phương pháp thực nghiệm và mô phỏng số để hiểu rõ hơn về sự phân bố nhiệt độ và tác động của nó đến chất lượng sản phẩm.

Trong các thí nghiệm đo nhiệt độ khuôn, các cảm biến nhiệt độ (thermocouple) thường được sử dụng để theo dõi sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trên bề mặt khuôn, bao gồm cả khu vực gần kênh dẫn nhựa và các vùng xa hơn [9]. Các thông số như nhiệt độ nước làm mát vào và ra, lưu lượng nước, và sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng trên khuôn được ghi nhận để đánh giá hiệu quả của hệ thống làm mát. Lưu lượng nước làm mát đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì nhiệt độ khuôn ổn định, đặc biệt trong các chu kỳ ép liên tục, nơi nhiệt độ khuôn có thể tăng dần do tích lũy nhiệt từ nhựa nóng chảy [10]. Ngoài ra, các yếu tố như thiết kế kênh làm mát, loại chất lỏng làm mát (nước, dầu hoặc khí), và vật liệu khuôn cũng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kiểm soát nhiệt độ. Đối với khuôn dạng phẳng, 

thiết kế kênh làm mát cần được tối ưu hóa để đảm bảo sự phân bố nhiệt độ đồng đều trên toàn bộ bề mặt khuôn, từ đó giảm thiểu các khuyết tật do chênh lệch nhiệt độ.

Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc sử dụng các công nghệ tiên tiến để cải thiện khả năng kiểm soát nhiệt độ khuôn. Ví dụ, các hệ thống làm mát thích nghi (adaptive cooling) sử dụng cảm biến và phần mềm điều khiển để tự động điều chỉnh lưu lượng và nhiệt độ chất lỏng làm mát dựa trên dữ liệu thời gian thực [1]. Ngoài ra, các phương pháp mô phỏng nhiệt dựa trên phần mềm như Moldflow hoặc ANSYS đã được áp dụng để dự đoán sự phân bố nhiệt độ và tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát trước khi chế tạo khuôn [2]. Tuy nhiên, các phương pháp này thường yêu cầu đầu tư lớn về thiết bị và phần mềm, khiến chúng khó áp dụng trong các cơ sở sản xuất quy mô nhỏ hoặc trung bình. Do đó, các nghiên cứu thực nghiệm đơn giản nhưng hiệu quả, như đo nhiệt độ lòng khuôn bằng cảm biến nhiệt độ, vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp dữ liệu thực tế để cải thiện quy trình ép phun.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu thực nghiệm đo nhiệt độ lòng khuôn dạng phẳng được thực hiện nhằm cung cấp dữ liệu chi tiết về sự phân bố nhiệt độ và hiệu quả của hệ thống làm mát trong quá trình ép phun. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xác định các thông số tối ưu cho hệ thống làm mát, bao gồm nhiệt độ nước vào/ra và lưu lượng nước, để đảm bảo khuôn đạt được nhiệt độ phù hợp cho mỗi chu kỳ ép. Các thí nghiệm được tiến hành bằng cách đặt các cảm biến nhiệt độ tại các vị trí chiến lược trên khuôn, chẳng hạn như gần cổng phun, vùng trung tâm và vùng biên, để ghi nhận sự thay đổi nhiệt độ trong suốt chu kỳ ép. Dữ liệu thu thập được sẽ được phân tích để đánh giá mức độ chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng và

hiệu quả của hệ thống làm mát trong việc duy trì sự ổn định nhiệt độ.

Kết quả từ các thí nghiệm này không chỉ giúp cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn đóng góp vào việc giảm thời gian chu kỳ ép, từ đó tăng năng suất sản xuất. Hơn nữa, việc hiểu rõ sự phân bố nhiệt độ trên khuôn dạng phẳng có thể cung cấp thông tin hữu ích cho việc thiết kế khuôn và tối ưu hóa quy trình ép phun trong các ứng dụng thực tế. Các nghiên cứu tương tự trong quá khứ đã chỉ ra rằng việc kiểm soát nhiệt độ khuôn chính xác có thể giảm tỷ lệ sản phẩm lỗi từ 10-20% trong một số trường hợp [3]. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác cao, như sản xuất linh kiện y tế hoặc điện tử.

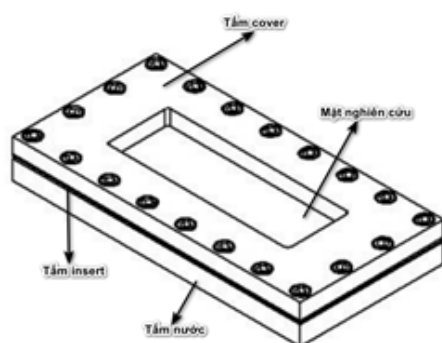
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong quy trình ép phun nhựa, quản lý nhiệt độ khuôn đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa chu kỳ sản xuất. Sau giai đoạn làm mát, quá trình gia nhiệt khuôn là bước quan trọng giúp chuẩn bị cho chu kỳ ép tiếp theo diễn ra ổn định và hiệu quả. Hiện nay, có nhiều phương pháp gia nhiệt khuôn được áp dụng, tùy thuộc vào đặc điểm khuôn, loại vật liệu nhựa và yêu cầu sản xuất. Phổ biến nhất là phương pháp gia nhiệt bằng điện trở, nhờ vào tính đơn giản, hiệu quả và dễ kiểm soát. Ngoài ra, các phương pháp như gia nhiệt bằng dầu hoặc nước nóng thông qua hệ thống tuần hoàn cũng được sử dụng để đảm bảo nhiệt độ ổn định và phân bố đều. Đối với những yêu cầu cao về tốc độ và độ chính xác, công nghệ gia nhiệt bằng cảm ứng đang được ứng dụng ngày càng nhiều nhờ khả năng làm nóng nhanh và hiệu quả. Bên cạnh đó, gia nhiệt bằng tia hồng ngoại cũng được áp dụng trong một số trường hợp đặc thù, nhất là khi cần tác động nhiệt cục bộ trên bề mặt khuôn.

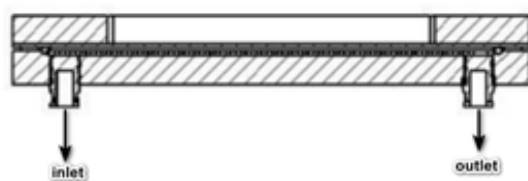
Tuy nhiên nghiên cứu này sử dụng phương pháp khác là sử dụng hệ thống gia nhiệt bằng nước nóng nhưng kết hợp với những viên bi thép có kích thước khác nhau để tập trung xem sự thay đổi nhiệt độ trong quá trình gia nhiệt khuôn.

3. THIẾT LẬP THIẾT BỊ ĐO

Thiết kế của tấm khuôn được trình bày ở trong Hình 1, việc quan sát nhiệt độ được quan sát thông qua khu vực nghiên cứu ở tại Hình 2. Khu vực nghiên cứu có kích thước và độ dày bằng với độ dày của tấm insert. Lắp đầy lòng khuôn bằng bi sắt trước khi tiến hành setup máy. Sử dụng các thiết bị có sẵn tại phòng thí nghiệm với setup như Hình 3.4 và 3.5, sử dụng 3 đồng hồ đo nhiệt tại 3 vị trí của tấm khuôn để có thể biết được nhiệt độ tại vị trí đầu vào, đầu ra và khu vực trung tâm. Thí nghiệm được thực hiện với nhiệt độ đầu vào của nước lần lượt là 40°C, 60°C, 80°C và thời gian gia nhiệt là 40 giây.



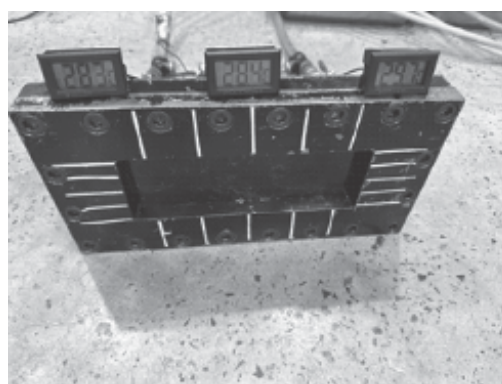
Hình 3.1. Thiết kế tấm khuôn



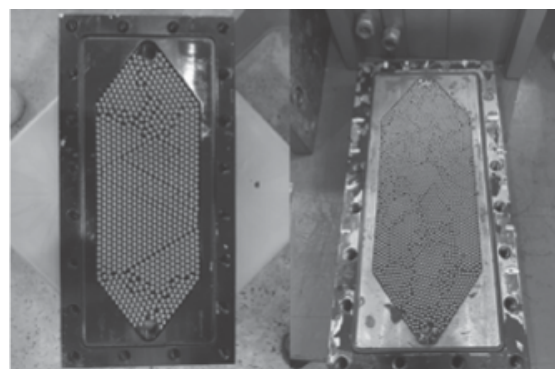
Hình 3.2. Vị trí đầu vào, đầu ra của nước



Hình 3.3. Kích thước khu vực nghiên cứu



Hình 3.4. Setup đồng hồ đo nhiệt



Hình 3.5. Bi được lắp đầy vào khu vực nước



Hình 3.6. Setup máy và khu vực đo

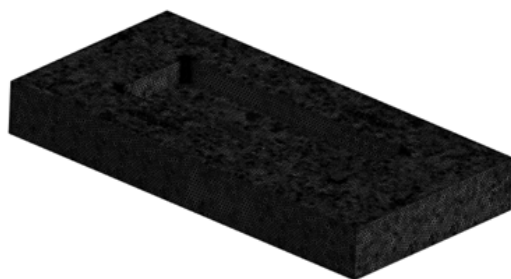


4. PHƯƠNG PHÁP ĐO

Để nghiên cứu phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn, một mô hình mô phỏng chi tiết đã được xây dựng. Mô hình được xây dựng với ba bộ phận chính là tấm cover, tấm insert (với bề dày: 1mm, 1.8mm, nghiêng), tấm nước (với bề dày: 3mm, 5mm, 8mm). Mô hình được chia lưới nhỏ để tăng độ chính xác khi mô phỏng. Phần mềm ANSYS được sử dụng để nghiên cứu quá trình gia nhiệt diễn ra trong khuôn và tái tạo điều kiện biên thí nghiệm. Với nhiệt độ môi trường là 30°C và hệ số truyền nhiệt là 10 W/m²K, mô hình được thiết kế theo một tấm khuôn và khu vực nước đi vào nằm trong một khu vực có thể quan sát, dòng chảy hài hòa. Mô phỏng sử dụng nhiệt độ lần lượt là 40°C, 60°C và 80°C cho đầu vào nước. Mô hình lưới bằng phần mềm ANSYS được mô tả ở hình 4.2.



Hình 4.1. Thiết lập đầu vào và đầu ra cho nước trong phần mềm ANSYS để mô phỏng



Hình 4.2. Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình được sử dụng để đánh giá phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn, nhiệt độ nước (TW) đặt ở 40°C 60°C 80°C, water thickness (WT) là 3mm 5mm 8mm, lưu lượng nước (F) 1.9 l/p 2.8 l/p 3 l/p, insert (IS) 1mm 1.8mm

1mm-1.8mm và thời gian gia nhiệt là 40 giây, để tìm hình dạng tốt nhất cho quá trình gia nhiệt. Kết quả cho thấy nhiệt độ tối đa đạt được là 76.1°C và nhiệt độ tối thiểu là 71.4°C. Mặt khác, các giá trị WT, F, TW, T khác nhau thì nhiệt độ phân bố trong lòng khuôn khác nhau. Những phát hiện này cho thấy giá trị của các bộ phận ảnh hưởng đáng kể đến phân bố nhiệt trong lòng khuôn.

Phân kết quả và thảo luận của nghiên cứu đã phân tích rõ ràng ảnh hưởng của các thông số như độ dày kênh nước (WT), lưu lượng nước (F), nhiệt độ nước đầu vào (TW) và thời gian gia nhiệt (T) đến sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn dạng phẳng. Mô phỏng được thực hiện với nhiệt độ nước đầu vào lần lượt là 40°C, 60°C và 80°C, thời gian gia nhiệt 40 giây, kết hợp với các biến đổi về độ dày insert và lưu lượng nước nhằm đánh giá tính đồng đều nhiệt độ. Kết quả đáng chú ý là ở điều kiện tối ưu (WT = 8 mm, F = 2.8 lít/phút, TW = 80°C), nhiệt độ cao nhất đạt 76.1°C và thấp nhất là 71.4°C – cho thấy biên độ chênh lệch nhỏ (4.7°C), chứng tỏ sự đồng đều nhiệt độ khá tốt. Biểu đồ nhiệt độ theo tọa độ X-Y cho thấy mức tăng nhiệt đều đặn từ đầu vào đến trung tâm và giảm nhẹ ở phần biên, phản ánh tính chất truyền nhiệt lan tỏa. Đặc biệt, việc sử dụng bi thép lấp đầy khuôn hỗ trợ hiệu quả cho việc kiểm tra độ truyền nhiệt và lưu giữ nhiệt độ khuôn trong thời gian ngắn. Nhờ đó, nhóm nghiên cứu đã xác định được rằng yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến phân bố nhiệt là nhiệt độ đầu vào và lưu lượng nước. Điều này chứng minh tính khả thi của hệ thống gia nhiệt bằng nước kết hợp với thiết kế kênh giải nhiệt dạng lớp trong việc đảm bảo điều kiện nhiệt tối ưu cho quy trình ép phun. Qua đó, kết quả nghiên cứu mang lại giá trị thực tiễn cao, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất trong công nghệ chế tạo khuôn mẫu.



Hình 5.1. Sự thay đổi nhiệt độ tại các điểm x,y trên tọa độ xOy

Bảng 1. Bảng thông số kết quả của quá trình mô phỏng

STT	WT (mm)	F (lit/min)	TW (°C)	T (s)	X	Y	Nhiệt độ
1	8	2.8	80	40	95	0	71.4
2	8	2.8	80	40	95	1	72
3	8	2.8	80	40	95	2	72.7
4	8	2.8	80	40	95	3	73.2
5	8	2.8	80	40	95	4	73.6
6	8	2.8	80	40	95	5	73.9
7	8	2.8	80	40	95	6	74.3
8	8	2.8	80	40	95	7	74.6
9	8	2.8	80	40	95	8	74.8
10	8	2.8	80	40	95	9	75
11	8	2.8	80	40	95	10	75.2
12	8	2.8	80	40	95	11	75.3
13	8	2.8	80	40	95	12	75.5
14	8	2.8	80	40	95	13	75.6
15	8	2.8	80	40	95	14	75.7
16	8	2.8	80	40	95	15	75.8
17	8	2.8	80	40	95	16	75.9
18	8	2.8	80	40	95	17	76
19	8	2.8	80	40	95	18	76.1
20	8	2.8	80	40	95	19	76.1
21	8	2.8	80	40	95	20	76.1
22	8	2.8	80	40	95	21	76
23	8	2.8	80	40	95	22	75.9
24	8	2.8	80	40	95	23	75.9
25	8	2.8	80	40	95	24	75.9



6. KẾT LUẬN

Để đánh giá phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn bằng việc sử dụng hệ thống gia nhiệt, giải nhiệt với các biến WT, F, TW, T, nghiên cứu này đã tiến hành các tính toán và thí nghiệm độc lập. Chín trường hợp các giá trị biến được ngẫu nhiên với nhau theo phương pháp Taguchi để xác định các thông số quan trọng nhất và mức giá trị tối ưu của chúng. Ảnh hưởng của lớp giải nhiệt đến phân bố nhiệt độ bề mặt khuôn cho thấy được khả năng của phương pháp gia nhiệt sử dụng nước và kênh giải nhiệt dạng 3D, tìm ra được nhược và ưu điểm của hệ thống thiết kế làm mát từ đó có áp dụng vào lĩnh vực công nghệ khuôn mẫu. Kết quả nghiên cứu của việc gia nhiệt bằng nước nóng, kênh giải nhiệt theo hình dạng sản phẩm giúp tăng khả năng gia nhiệt đồng đều đối với những sản phẩm giúp ích cho ngành công nghệ khuôn mẫu.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Đặng Hùng Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Tấn Đạt, Trần Thanh Lam, Huỳnh Nguyễn Hoàng, Lê Thanh Tùng;

- Tác giả liên hệ: Lê Thanh Tùng.

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: SV2025-346.❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 22/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Bianchi, M. F., Gameros, A. A., Axinte, D. A., Lowth, S., Cendrowicz, A. M., & Welch, S. T. (2019), "On the effect of mould temperature on the orientation and packing of particles in ceramic injection moulding". Journal of the European Ceramic Society, 39(10), 3194-3207. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.04.025>
- [2]. Zheng, R., Tanner, R. I., & Fan, X.-J. (2011), "Injection molding: Integration of theory and modeling methods". Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21163-8>.
- [3]. Shengjie, Y., Li, Q. F., & Yong, M. S. (2006), "Method for determination of critical powder loading for powder-binder processing". Powder Metallurgy, 49(3), 219-223. <https://doi.org/10.1179/174329006X146418>
- [4]. Uematsu, K., Ohsaka, S., Shinohara, N., & Okumiyu, M. (1997), "Grain-oriented microstructure of alumina ceramics made through the injection molding process". Journal of the American Ceramic Society, 80(5), 1313-1315. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb02977.x>
- [5]. Wang, X., Zhao, G., & Wang, G. (2014), "Optimal design of heating system for rapid thermal cycling mold using particle swarm optimization and finite element method". Applied Thermal Engineering, 64(1-2), 462-470. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.028>
- [6]. Wang, X., Zhao, G., & Wang, G. (2013), "Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process". Materials & Design, 47, 779-792. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.047>
- [7]. Wang, G., Zhao, G., & Wang, X. (2013), "Effects of cavity surface temperature on mechanical properties of specimens with and without a weld line in rapid heat cycle molding". Materials & Design, 46, 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.054>
- [8]. Somé, S. C., Delaunay, D., Faraj, J., Bailleul, J.-L., Boyard, N., & Quilliet, S. (2015), "Modeling of the thermal contact resistance time evolution at polymer-mold interface during injection molding: Effect of polymers' solidification". Applied Thermal Engineering, 84, 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.037>
- [9]. Dong, Y., Li, X., Zhao, Q., Yang, J., & Dao, M. (2017), "Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades". Journal of Materials Processing Technology, 244, 190-203. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.005>
- [10]. Gromada, M., Świeca, A., Kostecki, M., Olszyna, A., & Cygan, R. (2015), "Ceramic cores for turbine blades via injection moulding". Journal of Materials Processing Technology, 220, 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.010>