

NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG GIẢI NHIỆT CHO KHUÔN PHUN ÉP NHỰA

STUDY ON THE COOLING SYSTEM FOR INJECTION MOLD

Vũ Thị Như Quỳnh, Trần Minh Thế Uyên, Phạm Sơn Minh, Bùi Chấn Thanh*

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 2390414@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 hệ thống lớp giải nhiệt (cooling layer) nhằm kiểm soát phân bố nhiệt trong quá trình gia nhiệt khuôn ép phun, đặc biệt đối với sản phẩm nhựa thành mỏng. Một mô hình nghiên cứu đã được xây dựng và phân tích thông qua mô phỏng số và thực nghiệm. Phần mô phỏng được thực hiện bằng ANSYS CFX để đánh giá sự truyền nhiệt và dòng chảy trong lớp giải nhiệt, trong khi thực nghiệm sử dụng camera hồng ngoại để ghi nhận phân bố nhiệt trên bề mặt khuôn. Các thông số công nghệ quan trọng như nhiệt độ nước vào, lưu lượng dòng chảy và chiều dày lớp giải nhiệt được khảo sát để đánh giá ảnh hưởng đến sự đồng đều nhiệt và hiệu suất gia nhiệt. Kết quả cho thấy lớp giải nhiệt giúp cải thiện đáng kể sự phân bố nhiệt, rút ngắn thời gian gia nhiệt và giảm sai lệch nhiệt so với kênh giải nhiệt truyền thống. Sai số giữa mô phỏng và thực nghiệm dưới 5%, khẳng định tính chính xác và tiềm năng ứng dụng của phương pháp trong nâng cao chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa quy trình ép phun.

Từ khóa: Khuôn phun ép nhựa; Phân bố nhiệt độ; Gia nhiệt khuôn; Giải nhiệt khuôn; Dòng chảy nhựa; Tỷ lệ điền đầy.

ABSTRACT

This study investigates the application of a cooling layer system for thermal control in injection mold heating, focusing on thin-walled plastic products. A research model was developed and analyzed using both numerical simulations and experimental validation. The simulation, performed with ANSYS CFX, evaluated heat transfer and fluid flow inside the cooling layer, while infrared thermography was employed to capture temperature distribution on the mold surface during experiments. Key process parameters, including inlet water temperature, flow rate, and cooling layer thickness, were varied to assess their effects on thermal uniformity and heating efficiency. Results indicated that the cooling layer significantly improved temperature distribution across the mold cavity, reduced heating time, and minimized thermal gradients compared with conventional straight-drilled channels. The close agreement between simulation and experimental data (error <5%) confirmed the reliability of the model. These findings highlight the potential of cooling-layer-integrated molds for enhancing product quality and optimizing industrial injection molding processes.

Keywords: Injection molding; Temperature distribution; Mold heating; Mold cooling; Melt flow; Filling percent.

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh công nghiệp chế tạo sản phẩm nhựa ngày càng phát triển, công nghệ ép phun (injection molding) đã trở thành một trong những phương pháp phổ biến và hiệu quả nhất để sản xuất hàng loạt các chi tiết nhựa có hình dạng phức tạp và độ chính xác cao. Đặc biệt, các sản phẩm nhựa thành mỏng (thin-walled plastic parts) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực điện tử, y tế, ô tô và hàng tiêu dùng. Tuy nhiên, việc sản xuất các sản phẩm này đối mặt với nhiều thách thức, trong đó nổi bật là các khuyết tật như short-shot, cong vênh, và đường hàn, chủ yếu bắt nguồn từ sự không đồng đều nhiệt độ khuôn và hiện tượng đông đặc nhanh của vật liệu khi tiếp xúc với thành khuôn [1-4].

Hệ thống làm mát khuôn truyền thống sử dụng các kênh khoan thẳng thường không đáp ứng được yêu cầu kiểm soát nhiệt độ chính xác, dẫn đến phân bố nhiệt không đồng đều và chu kỳ làm mát kéo dài, vốn chiếm đến 60-80% tổng chu kỳ ép [5-8]. Để khắc phục nhược điểm này, nhiều hướng nghiên cứu đã được triển khai như kênh làm mát đồng hình (conformal cooling channel – CCC) chế tạo bằng in 3D kim loại, hệ thống gia nhiệt chủ động bằng khí nóng, hoặc tích hợp lớp giải nhiệt (cooling layer) trong cấu trúc khuôn. Các giải pháp này không chỉ giúp cải thiện phân bố nhiệt mà còn rút ngắn thời gian chu kỳ, nâng cao chất lượng và tính ổn định của sản phẩm [9-12].

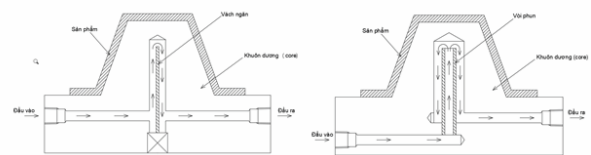
Trên thế giới, các nghiên cứu gần đây tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát bằng các phương pháp số như FEM và CFD, kết hợp với trí tuệ nhân tạo để kiểm soát nhiệt độ thời gian thực. Trong nước, nhiều công trình đã bước đầu ứng dụng mô phỏng số và công nghệ in 3D kim loại để phát triển các cấu

trúc làm mát mới, mang lại hiệu quả rõ rệt trong cải thiện hiệu suất truyền nhiệt.

Từ cơ sở trên, nghiên cứu ứng dụng lớp giải nhiệt (cooling layer) trong gia nhiệt khuôn ép phun nhựa thành mỏng được xem là hướng đi tiềm năng, vừa có ý nghĩa khoa học trong việc làm rõ cơ chế truyền nhiệt trong khuôn, vừa mang giá trị thực tiễn trong cải tiến quy trình sản xuất công nghiệp [13-20].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Các giai đoạn chính trong chu kỳ ép phun bao gồm thời gian đóng khuôn, làm đầy, giữ áp suất, làm mát và mở khuôn [21, 22]. Hình 1 cho thấy sự phân bố thời gian của từng giai đoạn trong một chu kỳ ép [23], trong đó, thời gian làm mát đóng vai trò quan trọng nhất, chiếm từ 60% đến 80% trên tổng thời gian của một chu kỳ ép phun đối với sản phẩm nhựa [24]. Vì vậy, thời gian chu kỳ ép phun và năng suất sản phẩm nhựa có sự liên kết chặt chẽ với quá trình làm mát, việc giảm thời gian làm mát là yếu tố quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả sản xuất.



Hình 1. Một số hệ thống giải nhiệt

Thời gian làm mát chủ yếu phụ thuộc vào hiệu quả làm mát của hệ thống kênh làm mát trong khuôn. Tuy nhiên, trong các phương pháp sản xuất truyền thống, kênh làm mát thường được thiết kế theo dạng các lỗ khoan, điều này gây ra sự không đồng đều về khoảng cách giữa kênh làm mát và lòng khuôn [25]. Kết quả là, các khu vực gần kênh làm mát sẽ có tốc độ làm mát nhanh hơn, trong khi các khu vực xa sẽ

làm mát chậm hơn. Những khu vực có tốc độ làm mát chậm sẽ kéo dài thời gian làm mát của toàn bộ sản phẩm, từ đó, làm tăng thời gian chu kỳ ép phun và giảm năng suất [26]. Việc ứng dụng hệ thống lớp giải nhiệt (cooling layer) cho sản phẩm 2D có thành mỏng sẽ giúp tối ưu hóa sự phân bố nhiệt của hệ thống mát, giúp nhiệt được loại bỏ nhanh chóng khỏi khuôn và rút ngắn thời gian làm mát, qua đó, cải thiện hiệu quả sản xuất và mang lại lợi ích kinh tế lớn hơn cho doanh nghiệp.

Bảng 1. Một số chất làm mát thường được sử dụng

Chất làm mát thông dụng	
Chất làm nguội	Nhiệt độ làm việc °C
Nước	5°C đến 90°C
Dầu khoáng	40°C đến 120°C
Glycol và nước	30°C đến 100°C
Propylene Glycol	-30°C đến 120°C
Ethylene Glycol	-30°C đến 100°C

3. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU VÀ MÔ PHỎNG

3.1. Sản phẩm

Nghiên cứu này đã sử dụng chi tiết có kích thước bao 98,5 mm × 71,9 mm × 1 mm. Tấm insert có kích thước bao là 301 mm × 252 mm × 1 mm như hình 2.



Hình 2. Sản phẩm thiết kế và Tấm lòng khuôn thiết kế

3.2. Hệ thống giải nhiệt Cooling layer

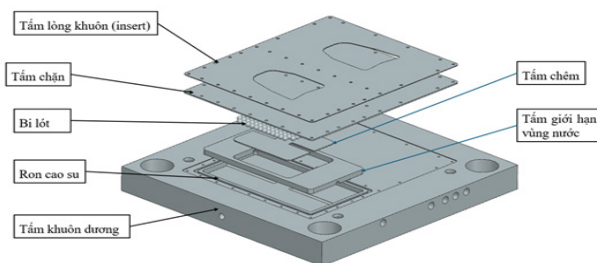
Trong nghiên cứu này, việc xây dựng mô hình nghiên cứu đóng vai trò then chốt nhằm làm rõ sự ảnh hưởng của lớp giải nhiệt (cooling layer) đến quá trình gia nhiệt khuôn ép phun sản phẩm nhựa thành mỏng. Mô hình được phát triển dựa trên cơ sở lý thuyết truyền nhiệt và động lực học chất lỏng, đồng thời được kiểm chứng bằng mô phỏng số và thực nghiệm.

Trước hết, hệ thống khuôn thí nghiệm được thiết kế với cấu trúc đặc thù bao gồm lớp giải nhiệt đặt xen kẽ trong tấm khuôn. Lớp này có nhiệm vụ duy trì sự phân bố nhiệt độ đồng đều, giảm thiểu gradient nhiệt và rút ngắn thời gian gia nhiệt. Các thông số chính của mô hình gồm: nhiệt độ nước đầu vào từ 50°C đến 90°C, chiều dày tấm chặn nước từ 1 đến 3 mm, chiều dày hốc nước từ 2 đến 8 mm, cùng với lưu lượng dòng chảy từ 27,7 đến 122,5 g/s. Việc lựa chọn phạm vi thông số này nhằm mô phỏng các điều kiện công nghiệp thực tế, đồng thời cung cấp cơ sở dữ liệu cho phân tích tối ưu hóa.

Trong giai đoạn mô phỏng, phần mềm ANSYS Fluent được sử dụng để giải bài toán truyền nhiệt và dòng chảy bên trong hệ thống cooling layer. Quá trình mô phỏng tập trung vào việc xác định sự phân bố trường nhiệt trong lòng khuôn, tốc độ ổn định nhiệt độ theo thời gian, và sự thay đổi của gradient nhiệt tại các vị trí quan trọng. Dữ liệu nhiệt độ được trích xuất tại các điểm đặc trưng dọc theo tâm sản phẩm để đánh giá sự đồng đều nhiệt. Ngoài ra, phân tích so sánh được thực hiện giữa trường hợp khuôn có lớp giải nhiệt và khuôn truyền thống sử dụng kênh làm mát khoan thẳng.

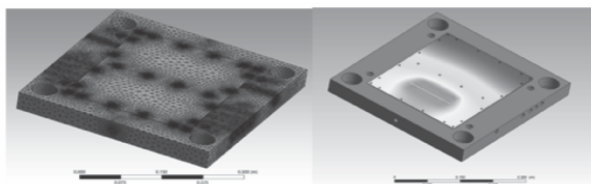
Song song với mô phỏng, một bộ khuôn thực nghiệm được chế tạo, trang bị lớp giải nhiệt và hệ thống gia nhiệt bằng nước nóng

tuần hoàn. Camera hồng ngoại Fluke Ti20 được sử dụng để ghi nhận nhiệt độ bề mặt khuôn, trong khi phần mềm Smartview hỗ trợ xử lý và trực quan hóa dữ liệu. Các thí nghiệm được tiến hành trong khoảng thời gian 600 giây, tương ứng với chu kỳ gia nhiệt điển hình trong công nghiệp. Dữ liệu đo được bao gồm sự thay đổi nhiệt độ tại nhiều vùng trên lòng khuôn, từ đó đánh giá khả năng điều khiển nhiệt độ của lớp giải nhiệt trong điều kiện vận hành thực tế.



Hình 3. Kết cấu khuôn

Kết quả phân tích cho thấy, mô hình nghiên cứu này có khả năng phản ánh chính xác cơ chế truyền nhiệt trong khuôn ép phun có tích hợp cooling layer. Đặc biệt, sự kết hợp giữa mô phỏng và thực nghiệm giúp nâng cao độ tin cậy, đồng thời chỉ ra được sự chênh lệch nhỏ giữa dữ liệu lý thuyết và thực nghiệm (sai số < 5%). Điều này chứng minh tính hợp lý của mô hình cũng như tiềm năng áp dụng rộng rãi trong sản xuất.



Hình 4. Mô hình lưới và kết quả mô phỏng

Nhìn chung, việc xây dựng mô hình nghiên cứu trong mục 3.3 không chỉ cung cấp công cụ hữu hiệu để dự đoán và phân tích ảnh hưởng của lớp giải nhiệt, mà còn tạo nền tảng

khoa học cho các nghiên cứu mở rộng về tối ưu hóa thiết kế khuôn và cải thiện chất lượng sản phẩm nhựa thành mỏng.

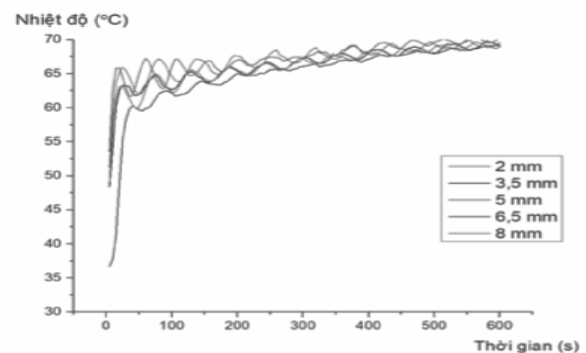
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mục tiêu chính của việc phân tích kết quả mô phỏng là kiểm nghiệm và đánh giá mức độ tương quan giữa các thông số thu được từ mô phỏng lý thuyết với dữ liệu thực nghiệm, nhằm xác định độ chính xác của mô hình thực nghiệm.

Kết quả mô phỏng được phân tích dựa trên sự phân bố nhiệt độ tại bề mặt sản phẩm, trong đó nghiên cứu tập trung vào khu vực biên dạng sản phẩm, cụ thể là vùng hốc nước. Nhằm nâng cao độ chính xác và tính trực quan trong quá trình đánh giá, nhiệt độ được trích xuất dọc theo một đường thẳng đi qua tâm sản phẩm với tọa độ là $X = -57 \text{ mm}$ đến 57 mm , $Y = -75 \text{ mm}$, $Z = 0$, tại các thời điểm 300 s.

Kết quả được thể hiện qua biểu đồ tốc độ gia nhiệt (hình 5) với các thông số:

- Nhiệt độ nước đầu vào: 70°C ;
- Chiều dày tấm chặn: 2 mm;
- Chiều dày hốc nước: 2 mm, 3,5 mm, 5 mm, 6,5 mm, 8 mm;
- Lưu lượng: 75,1 g/s.



Hình 5. Biểu đồ thể hiện tốc độ gia nhiệt theo thời gian khi thay đổi chiều dày hốc nước

*Nhận xét:

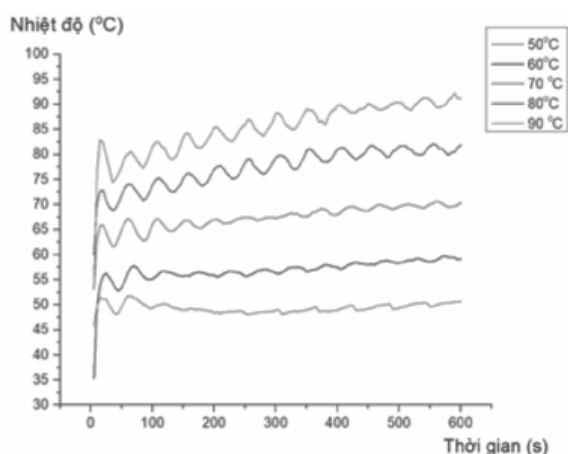
Biểu đồ cho thấy sự ảnh hưởng của chiều dày hốc nước đến tốc độ gia nhiệt. Các đường cong đại diện cho các chiều dày khác nhau cho thấy rằng chiều dày hốc nước có ảnh hưởng đến thời gian cần thiết để nước đạt đến nhiệt độ ổn định.

- Có thể thấy rằng các đường cong sau một khoảng thời gian nhất định sẽ tiến tới giá trị nhiệt độ nước đầu vào là 70°C.

- Chiều dày 2 mm và 3.5 mm cho thấy tốc độ gia nhiệt nhanh hơn so với độ dày lớn hơn như 6,5 mm và 8 mm. Điều này chứng minh rằng chiều dày hốc nước mỏng hơn giúp tăng cường khả năng truyền nhiệt và tốc độ gia nhiệt.

Kết quả được thể hiện qua biểu đồ tốc độ gia nhiệt (hình 6) với các thông số:

- Nhiệt độ nước đầu vào: 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C;
- Chiều dày tấm chặn: 2 mm;
- Chiều dày hốc nước: 5 mm;
- Lưu lượng nước: 75,1 g/s.



Hình 6. Biểu đồ thể hiện tốc độ gia nhiệt theo thời gian khi thay đổi nhiệt độ nước

*Nhận xét:

Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng lớn đến quá trình ép phun. Nước ở nhiệt độ cao như 90°C cho phép gia nhiệt khuôn nhanh chóng, giúp nhựa dễ dàng điền đầy khuôn, nhưng cần thời gian lâu hơn để nước đạt đến nhiệt độ ổn định ở mức 90°C. Ngược lại, nhiệt độ nước đầu vào ở mức 50°C lại dễ dàng đạt được nhiệt độ ổn định. Điều này cho thấy rằng sự lựa chọn nhiệt độ nước cần phải cân nhắc kỹ lưỡng dựa trên mục đích sản xuất và tính chất của từng loại nhựa, nhằm tối ưu hóa cả hiệu suất sản xuất lẫn chất lượng sản phẩm cuối.

5. KẾT LUẬN

Qua kết quả thực nghiệm và phân tích, có thể khẳng định rằng việc ứng dụng lớp giải nhiệt (cooling layer) trong gia nhiệt khuôn ép phun đã mang lại những cải thiện đáng kể về khả năng kiểm soát và phân bố nhiệt độ. Các thí nghiệm cho thấy hệ thống cooling layer giúp duy trì nhiệt độ khuôn ổn định và đồng đều hơn so với phương pháp truyền thống, đồng thời rút ngắn thời gian gia nhiệt và giảm thiểu sai lệch nhiệt giữa các vùng của lòng khuôn. Điều này góp phần hạn chế các khuyết tật thường gặp ở sản phẩm thành mỏng như cong vênh, đường hàn và co ngót.

So sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm cũng cho thấy sự tương quan cao, với sai số nhỏ hơn 5%, chứng tỏ tính chính xác và độ tin cậy của mô hình nghiên cứu. Các kết quả đạt được không chỉ khẳng định hiệu quả của lớp giải nhiệt trong nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn mở ra hướng phát triển cho các giải pháp tối ưu hóa khuôn ép nhựa trong công nghiệp. Nhìn chung, chương 4 đã chứng minh giá trị thực tiễn của hệ thống cooling layer, làm nền tảng vững chắc cho việc phát triển các nghiên cứu ứng dụng và cải tiến tiếp theo.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh, Trần Minh Thế Uyên, Bùi Chấn Thanh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Vũ Thị Như Quỳnh, Bùi Chấn Thanh.

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: **09/8/2025**

Ngày phản biện: **21/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M.-L. Wang, R.-Y. Chang, và C.-H. Hsu, "Molding Simulation: Theory and Practice". Carl Hanser Verlag, 2018.
- [2]. H. P. Kale và U. V. Hambire, "Optimization of Injection Moulding Process Parameter for Reducing Shrinkage of High Density Polyethylene (HDPE) Material". Proceedings of the 69th IRF International Conference, Pune, India, Mar. 2017.
- [3]. SS. Saxena, M. S. Khidiya, B. L. Salvi, và M. A. Saloda, "An Experimental Study of Effects of Injection Molding Parameters on Shrinkage and Plastic Fill". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 7, no. 10, 2020.
- [4]. P. Chinchkhede và K. M. Ashtankar, "Determining Appropriate Cooling System for Plastic Injection Molding Through Computer Simulation". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 3, no. 6, Jun. 2016.
- [5]. S. Arman và I. Lazoglu, "A comprehensive review of injection mold cooling by using conformal cooling channels and thermally enhanced molds". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 127, pp. 2035-2106, Jun. 2023.
- [6]. T. Lucyshyn, L.-V. D. Enffans d'Avernas, và C. Holzer, "Influence of the Mold Material on the Injection Molding Cycle Time and Warpage Depending on the Polymer Processed". Polymers, vol. 13, no. 18, Art. no. 3196, Sep. 2021.
- [7]. M. Koli, "Cycle Time Optimization in Injection Moulding". International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, vol. 4, no. 6, Nov.-Dec. 2018.
- [8]. Zhongde, "Injection Molding Cooling Systems, Cooling Methods and Design". Zhongde Knowledge Hub, Oct. 12, 2023.
- [9]. D. E. Dimla, M. Camilotto, và F. Miani, "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools". Journal of Materials Processing Technology, vol. 164-165, pp. 1294-1300, May 2005.
- [10]. P. D. Nam, P. L. Bac, và P. V. Sang, "Nghiên cứu hiệu quả làm mát khuôn ép nhựa sử dụng phương pháp mô phỏng số". Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, 2022.
- [11]. Đ. X. Phương, "Tối đa hóa hiệu năng của hệ thống làm mát khuôn đúc ép phun nhựa chế tạo bằng công nghệ in 3D kim loại". Hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về Cơ khí lần thứ V, 2018.
- [12]. T. M. T. Uyên, "Nghiên cứu ảnh hưởng của gia nhiệt khuôn phun ép bằng khí nóng đến độ bền sản phẩm nhựa dạng thành mỏng". Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, 2020.
- [13]. G. K. P. Kumar, P. R. P. Singh, and D. A. Raj, "Active Heating Technology for Injection Molding: A Review". Journal of Materials Processing Technology, vol. 255, pp. 152-167, 2018.
- [14]. S. Jagadeesan and K. Annamalai, "The Impact of Thermal Conductivity Mold Material in the Injection Molding Process". SSRG International Journal of Mechanical

- Engineering, vol. 12, no. 5, pp. 27-40, May 2025.
- [15]. C. E. Mgbemena and F. N. Okeagu, “Development of an IoT-based real-time remote monitoring device for the maintenance of injection moulding machines in plastic industries”. UNIZIK Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 260-278, Jun. 2023.
- [16]. A. Torres-Alba, J. M. Mercado-Colmenero, J. A. Amate-Teva, and C. Martín-Doñate, “Application of New Conformal Cooling Systems for Sustainable Injection Molds”. In: Proc. XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering, pp. 284-290, Aug. 2023.
- [17]. A. Torres-Alba, J. M. Mercado-Colmenero, D. Diaz-Perete, and C. Martin-Doñate, “A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models”. Polymers, vol. 12, no. 1, p. 154, 2020.
- [18]. D. C. J. Chalicheemalapalli, T. Tröster, and T. Marten, “Optimizing Injection Molding Tool Design with Additive Manufacturing: A Focus on Thermal Performance and Process Efficiency”. Materials, vol. 18, no. 3, p. 571, 2025.
- [19]. A. Gnatowski, M. Golas, and R. Gnatowska, “Numeric modelling of the temperature distribution of moulded piece in the simulation of injection molding process”. AIP Conference Proceedings, vol. 1648, p. 850126, Mar. 2015.
- [20]. G. Wagner and J. M. Nóbrega, “Conformal Cooling Channels in Injection Molding and Heat Transfer Performance Analysis Through CFD – A Review”. Energies, vol. 18, no. 8, Art. no. 1972, Apr. 2025.
- [21]. D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. G. Rosato, “Injection Molding Handbook”, 3rd ed.. Springer, 2000.
- [22]. I. Adam, W. B. du Preez, and J. Combrinck, “Design considerations for additive manufacturing of conformal cooling channels in injection moulding tools”. Central University of Technology, 2016.
- [23]. J. Li, Y. C. Ong, and W. M. W. Muhamad, “Optimization design of injection mold conformal cooling channel for improving cooling rate”. Processes, 2024.
- [24]. D. E. Dimla, M. Camilotto, and F. Miani, “Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools”. J. Mater. Process. Technol., vol. 164-165, pp. 1294-1300, May 2005.
- [25]. G. Venkatesh, Y. R. Kumar, and G. Raghavendra, “Comparison of straight line to conformal cooling channel in injection molding”. Mater. Today Proc., vol. 4, no. 2, pt. A, pp. 1167-1173, 2017.
- [26]. J. Li, Y. C. Ong, and W. M. W. Muhamad, “Optimization design of injection mold conformal cooling channel for improving cooling rate”. Processes, 2024.