

MÔ PHỎNG PHÂN BỐ NHIỆT CỦA LÒNG KHUÔN DƯƠNG KHI DÙNG HỆ THỐNG GIẢI NHIỆT DẠNG LỚP (COOLING LAYER)

SIMULATE THE TEMPERATURE DISTRIBUTION FOR CORE PLATE WITH THE COOLING LAYER SYSTEM

Lê Nguyễn Liêm, Trần Ngọc Hào, Âu Thị Kim Loan, Trần Thanh Thường*

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

Email: 22144136@student.hcmute.edu.vn; haotn@hcmute.edu.vn;

loanatk@hcmute.edu.vn; *thuongtt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào mô phỏng phân bố nhiệt độ trên khuôn dương sử dụng hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Conformal Cooling System - CCS) trong quá trình ép phun nhựa, nhằm đánh giá hiệu quả làm mát và tối ưu hóa thiết kế khuôn. Sử dụng phần mềm Creo, mô phỏng tái hiện dòng chảy chất làm mát và quá trình truyền nhiệt, cho thấy CCS với các kênh làm mát ôm sát biên dạng khuôn vượt trội so với hệ thống kênh khoan thẳng truyền thống. Kết quả chỉ ra rằng CCS đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều, giảm chênh lệch nhiệt độ cục bộ, rút ngắn thời gian làm nguội, và hạn chế các khuyết tật như co ngót không đều hay biến dạng sản phẩm. Hệ thống này đặc biệt hiệu quả ở các vùng có hình học phức tạp, góp phần cải thiện chất lượng bề mặt, tiết kiệm năng lượng, và kéo dài tuổi thọ khuôn. Tuy nhiên, nghiên cứu cần bổ sung dữ liệu thực nghiệm để xác thực kết quả mô phỏng và phân tích định lượng về hiệu suất truyền nhiệt. Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng của CCS trong sản xuất nhựa, mở ra hướng tiếp cận mới cho ngành công nghiệp khuôn mẫu tại Việt Nam, đồng thời đặt nền tảng cho việc tích hợp các công nghệ tiên tiến như CFD và AI trong thiết kế khuôn.

Từ khóa: Lớp giải nhiệt; Phân bố nhiệt khuôn dương; Giải nhiệt dạng lớp; Khuôn nhựa.

ABSTRACT

This study focuses on simulating the temperature distribution on a male mold using a Conformal Cooling System (CCS) during the injection molding process to evaluate cooling efficiency and optimize mold design. Using Creo software, the simulation replicates coolant flow and heat transfer, demonstrating that CCS, with cooling channels closely following the mold's contour, outperforms traditional straight-drilled channel systems. Results indicate that CCS ensures uniform temperature distribution, reduces local temperature variations, shortens cooling time, and mitigates defects such as uneven shrinkage or product deformation. The system is particularly effective in complex geometric regions, enhancing surface quality, saving energy, and extending mold lifespan. However, the study requires experimental data to validate simulation results and quantitative analysis of heat transfer performance, such as heat transfer coefficients or coolant flow rates. The findings affirm the potential of CCS in plastic manufacturing, offering new approaches for the mold industry in Vietnam while laying the foundation for integrating advanced technologies like CFD and AI in mold design.

Keywords: Cooling layer; Heat distribution in mold cavity; Layered cooling system; Plastic mold.

1. TỔNG QUAN

Trong các quá trình sản xuất như ép phun nhựa và đúc kim loại, nhiệt lượng phát sinh trong giai đoạn làm đầy và đóng rắn vật liệu thường dẫn đến hiện tượng quá nhiệt cục bộ tại lòng khuôn [1]. Hiện tượng này gây ra nhiều vấn đề nghiêm trọng, bao gồm tăng nội ứng suất, biến dạng sản phẩm, và giảm tuổi thọ khuôn, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm và chi phí sản xuất [2]. Việc kiểm soát nhiệt độ khuôn một cách hiệu quả không chỉ đảm bảo tính đồng nhất của sản phẩm mà còn tối ưu hóa thời gian chu kỳ sản xuất, nâng cao hiệu suất kinh tế [3]. Các hệ thống làm mát truyền thống, sử dụng kênh thẳng hoặc khoan tròn, thường không đáp ứng được yêu cầu làm mát ở các vùng có hình dạng phức tạp, dẫn đến phân bố nhiệt không đồng đều và tích tụ nhiệt tại các điểm nóng (hot spots) [4]. Để khắc phục, hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Cooling Layer) đã được phát triển như một giải pháp tiên tiến, mang lại hiệu suất làm mát vượt trội và khả năng thích ứng với các thiết kế khuôn phức tạp [5].

Hệ thống giải nhiệt dạng lớp bao gồm các kênh làm mát hoặc lớp vật liệu dẫn nhiệt được bố trí sát bề mặt lòng khuôn, tuân theo biên dạng sản phẩm (conformal cooling) [6]. Thiết kế này cho phép truyền nhiệt nhanh chóng và đồng đều hơn so với các kênh làm mát truyền thống, đặc biệt ở các vùng có hình dạng không đều hoặc khó tiếp cận [7]. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng giải nhiệt dạng lớp có thể giảm thời gian chu kỳ ép phun từ 20-40%, đồng thời cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm và giảm tỷ lệ lỗi do nhiệt [8]. Việc sử dụng các vật liệu dẫn nhiệt cao, như hợp kim đồng, thép cải tiến, hoặc vật liệu composite, trong các lớp làm mát giúp tăng cường hiệu quả truyền nhiệt, đồng thời giảm thiểu nguy cơ biến dạng nhiệt và ứng

suất dư trong khuôn [9]. Sự phát triển của công nghệ in 3D kim loại đã mở ra khả năng chế tạo các kênh làm mát phức tạp, phù hợp với yêu cầu của giải nhiệt dạng lớp, từ đó nâng cao tính linh hoạt trong thiết kế khuôn [10].

Mô phỏng nhiệt độ trong lòng khuôn là một công cụ quan trọng để đánh giá và tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống giải nhiệt. Các phần mềm như ANSYS, COMSOL, hoặc Moldflow cho phép phân tích chi tiết phân bố nhiệt độ, dòng chảy chất làm mát, và ứng suất nhiệt trong khuôn [11]. Kết quả mô phỏng không chỉ giúp xác định các điểm nóng mà còn hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát trước khi chế tạo, giảm thiểu chi phí và thời gian thử nghiệm thực tế [12]. Phân tích động lực học chất lỏng (CFD) đã được ứng dụng rộng rãi để mô phỏng dòng chảy của chất làm mát trong các kênh dạng lớp, cho thấy sự cải thiện đáng kể về tính đồng nhất nhiệt độ và hiệu suất làm mát so với kênh truyền thống [13]. Một số nghiên cứu gần đây đã tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy (ML) vào mô phỏng nhiệt để dự đoán các thông số làm mát tối ưu, từ đó nâng cao độ chính xác và hiệu quả thiết kế [14].

Tại Việt Nam, việc ứng dụng giải nhiệt dạng lớp vẫn còn hạn chế do nhiều thách thức, bao gồm chi phí chế tạo cao, thiếu cơ sở hạ tầng công nghệ tiên tiến, và yêu cầu kỹ thuật phức tạp. Các doanh nghiệp sản xuất khuôn trong nước chủ yếu dựa vào các hệ thống làm mát truyền thống, dẫn đến hiệu suất thấp và khó đáp ứng các yêu cầu sản xuất hiện đại. Tuy nhiên, sự phát triển của các công nghệ chế tạo bồi đắp, đặc biệt là in 3D kim loại, đã mở ra cơ hội mới cho việc ứng dụng giải nhiệt dạng lớp tại Việt Nam. Các nghiên cứu quốc tế gần đây cũng nhấn mạnh tiềm năng của việc kết hợp giải nhiệt dạng lớp với các vật liệu tiên tiến, như hợp kim nhiệt độ cao hoặc vật liệu nano, 

để cải thiện hiệu suất làm mát và tuổi thọ khuôn. Ngoài ra, việc sử dụng các thuật toán tối ưu hóa, như thuật toán di truyền hoặc phân tích độ nhạy, trong thiết kế kênh làm mát đã giúp giảm đáng kể thời gian chu kỳ và tăng độ bền của khuôn.

Một số thách thức trong việc triển khai giải nhiệt dạng lớp bao gồm sự phức tạp trong chế tạo kênh làm mát, chi phí vật liệu, và yêu cầu về độ chính xác trong mô phỏng nhiệt. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng sai số trong mô phỏng, do dữ liệu vật liệu không chính xác hoặc giả định đơn giản hóa, có thể dẫn đến thiết kế kênh làm mát không tối ưu. Để giải quyết, các phương pháp mô phỏng đa vật lý (multiphysics) đã được đề xuất, kết hợp phân tích nhiệt, cơ học, và dòng chảy để mô tả chính xác hơn các hiện tượng trong khuôn. Ngoài ra, việc tích hợp cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển thông minh vào khuôn đã được nghiên cứu để theo dõi và điều chỉnh nhiệt độ trong thời gian thực, nâng cao hiệu quả làm mát.

Nghiên cứu này tập trung vào mô phỏng phân bố nhiệt độ của lòng khuôn dương khi sử dụng hệ thống giải nhiệt dạng lớp, nhằm đánh giá hiệu quả làm mát và khả năng kiểm soát nhiệt độ trong các điều kiện vận hành thực tế. Bằng cách phân tích dòng chảy chất làm mát, sự phân bố nhiệt độ, và các yếu tố ảnh hưởng như vật liệu khuôn và thông số làm mát, nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát, giảm thời gian chu kỳ sản xuất, và cải thiện chất lượng sản phẩm. Kết quả không chỉ góp phần cải tiến công nghệ làm mát mà còn mở ra hướng tiếp cận mới cho sản xuất khuôn tại Việt Nam, nơi các giải pháp tiên tiến như giải nhiệt dạng lớp vẫn chưa được khai thác triệt để. Nghiên cứu cũng đặt nền tảng cho việc tích hợp các công nghệ hiện đại, như AI và in 3D, vào thiết kế và vận hành khuôn, từ đó nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành công

ng nghiệp sản xuất trong nước.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

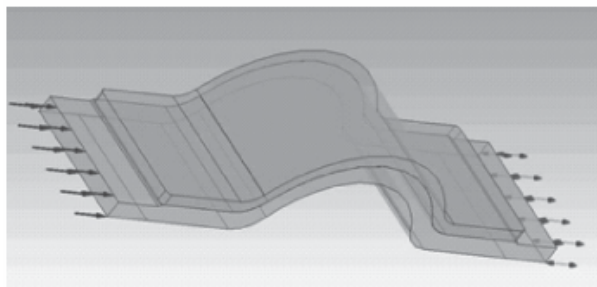
Trong quá trình ép phun, kiểm soát nhiệt độ khuôn – đặc biệt tại vùng lòng khuôn dương – đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và tuổi thọ khuôn. Việc tích tụ nhiệt không đều có thể gây ra các khuyết tật như cong vênh, rỗ bề mặt và biến dạng kích thước. Truyền nhiệt trong khuôn chủ yếu diễn ra qua dẫn nhiệt, được mô tả bởi phương trình truyền nhiệt không ổn định. Nhiệt lượng từ vật liệu nóng chảy truyền vào khuôn và sau đó được giải phóng ra ngoài thông qua hệ thống làm mát. Nếu hệ thống này không được thiết kế hiệu quả, nhiệt sẽ không thoát ra đồng đều, dẫn đến sự mất ổn định trong quá trình làm nguội sản phẩm. Hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Cooling Layer) là giải pháp hiện đại nhằm khắc phục hạn chế của các kênh làm mát truyền thống. Thay vì các kênh khoan thẳng, hệ thống này sử dụng các kênh làm mát được bố trí theo hình dạng tương thích với bề mặt khuôn, giúp tăng khả năng tiếp xúc và truyền nhiệt. Nhờ đó, nhiệt độ trong lòng khuôn được phân bố đồng đều hơn, rút ngắn thời gian làm mát và giảm lỗi sản phẩm.

3. MÔ PHỎNG

Thiết kế tấm insert trên khuôn dương và hệ thống giải nhiệt Cooling layer như Hình 1. Hệ thống giải nhiệt dạng lớp được thiết kế ôm theo hình dạng của tấm insert nhằm nâng cao hiệu quả giải nhiệt so với phương pháp truyền thống. Mô phỏng với thông số đầu vào Inlet (80 độ C) diễn ra trong 10 giây.

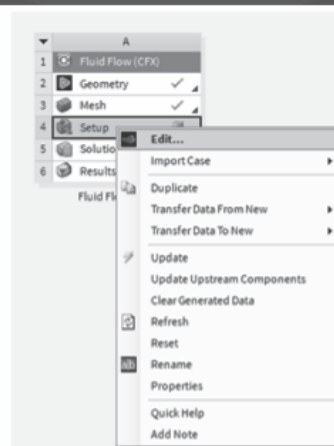
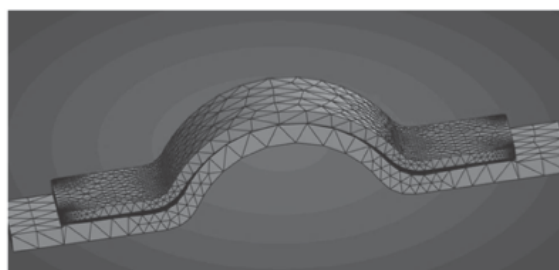


The flowchart illustrates the finite element analysis process in ANSYS. It begins with the goal 'Xác định mục tiêu mô phỏng' (Define simulation goal). This leads to a sequence of five main steps: 'Thiết kế mô hình' (Model design), 'Tạo lưới' (Meshing), 'Thiết lập thông số' (Parameter setup), 'Chạy mô phỏng' (Simulation), and 'Phân tích kết quả' (Result analysis). Below this sequence, a detailed workflow is shown within a rounded rectangle: 'Geometry' (with a sphere icon) → 'Mesh' (with a cube icon) → 'Setup' (with a gear icon) → 'Solution' (with a play button icon) → 'Results' (with a bar chart icon). The ANSYS logo and the word 'WORKBENCH' are positioned at the bottom of this detailed workflow box.



Hình 2. Thiết lập điều kiện biên cho mô phỏng

Inflection được áp dụng cho các bề mặt tiếp xúc để cải thiện độ chính xác mô phỏng. Một phần tử tứ diện được sử dụng để đại diện cho thể tích khí. Phần mềm ANSYS được sử dụng để nghiên cứu quá trình giải nhiệt khi nước đi qua thi biên dạng của tấm cooling và tái tạo điều kiện biên thí nghiệm. Với nhiệt độ ban đầu của tấm insert là 25 độ C, nhiệt độ nước đi vào (inlet) là 80 độ C, nhiệt độ nước đi ra là 25 độ C.



Hình 3. Chia lưới cho mô phỏng.

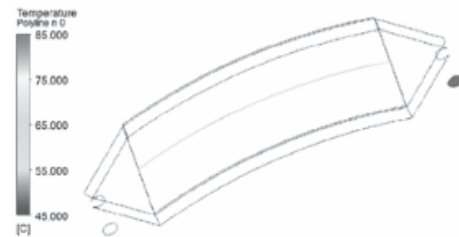
Hình 4. Biên dạng nhiệt độ thay đổi trên khuôn
dương.

Mô phỏng phân bố nhiệt độ trên khuôn dương được thực hiện để đánh giá hiệu quả của hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Conformal Cooling System - CCS), với các kênh làm mát được thiết kế ôm sát biên dạng khuôn. Sử dụng phần mềm Creo, nghiên cứu tái hiện dòng chảy chất làm mát và quá trình truyền nhiệt trong khuôn dương – bộ phận chịu tải nhiệt lớn trong quá trình ép phun nhựa. Kết quả mô phỏng, được minh họa qua Hình 4 (biên dạng nhiệt độ thay đổi), Hình 5 và Hình 6 (phân bố nhiệt độ tại tâm lòng khuôn), cho thấy CCS vượt trội so với hệ thống làm mát truyền thống sử dụng kênh khoan thẳng.

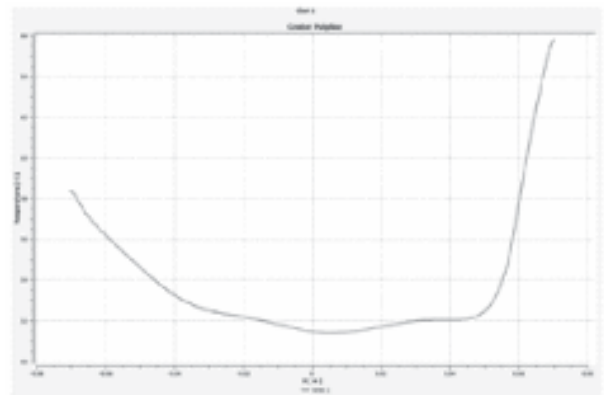
Thiết kế kênh làm mát dạng lớp giúp tối ưu hóa khoảng cách giữa kênh và bề mặt khuôn, tăng cường khả năng tiếp xúc với các vùng tích tụ nhiệt. Điều này dẫn đến sự phân bố nhiệt độ đồng đều hơn, giảm chênh lệch nhiệt độ cục bộ, và hạn chế các vấn đề như co ngót không đều, biến dạng sản phẩm, hoặc khuyết tật bề mặt. So với kênh khoan thẳng, CCS đặc biệt hiệu quả ở các khu vực có hình học phức tạp, như góc cong hoặc vùng dày, nhờ khả năng uốn cong theo biên dạng 3D của khuôn. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng thời gian làm nguội được rút ngắn đáng kể, từ đó giảm thời gian chu kỳ sản xuất, tiết kiệm năng lượng, và kéo dài tuổi thọ khuôn do giảm ứng suất nhiệt.

Cụ thể, Hình 4 cho thấy sự thay đổi nhiệt độ trên toàn bộ khuôn dương, với các vùng nhiệt độ cao được kiểm soát hiệu quả nhờ CCS. Hình 5 và Hình 6 minh họa phân bố nhiệt tại tâm lòng khuôn, nơi tải nhiệt tập trung, khẳng định khả năng làm mát đồng đều của hệ thống. Tuy nhiên, để nâng cao tính thuyết phục, mô phỏng cần được bổ sung dữ liệu thực nghiệm, chẳng hạn như phép đo nhiệt độ thực tế hoặc phân tích định lượng về hiệu suất truyền nhiệt (hệ số truyền nhiệt, lưu lượng chất làm mát).

Những dữ liệu này sẽ giúp xác thực kết quả mô phỏng và cung cấp cơ sở so sánh chi tiết hơn với các hệ thống làm mát truyền thống.



Hình 5. Phân bố nhiệt tại tâm lòng khuôn



Hình 6. Phân bố nhiệt độ tại tâm lòng khuôn

Nghiên cứu này khẳng định tiềm năng của CCS trong việc tối ưu hóa sản xuất nhựa, đặc biệt cho các khuôn có hình dạng phức tạp. Bằng cách cải thiện hiệu suất làm mát, CCS không chỉ nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn góp phần giảm chi phí sản xuất và tăng tính cạnh tranh trong ngành công nghiệp ép phun. Trong tương lai, việc tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến, như phân tích CFD hoặc AI, có thể nâng cao độ chính xác của thiết kế kênh làm mát, mở ra cơ hội ứng dụng rộng rãi hơn trong sản xuất công nghiệp hiện đại.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu mô phỏng phân bố nhiệt độ trên khuôn dương sử dụng hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Conformal Cooling System - CCS)

đã chứng minh tiềm năng vượt trội của phương pháp này trong việc tối ưu hóa quá trình ép phun nhựa. Kết quả mô phỏng, được thực hiện bằng phần mềm Creo, cho thấy CCS với các kênh làm mát ôm sát biên dạng khuôn mang lại sự phân bố nhiệt độ đồng đều, giảm chênh lệch nhiệt độ cục bộ và thời gian làm nguội so với hệ thống kênh khoan thẳng truyền thống. Điều này giúp hạn chế các khuyết tật sản phẩm như co ngót không đều, biến dạng, và cải thiện chất lượng bề mặt, đồng thời rút ngắn chu kỳ sản xuất, tiết kiệm năng lượng và kéo dài tuổi thọ khuôn. Đặc biệt, CCS thể hiện hiệu quả vượt trội ở các vùng có hình học phức tạp, như góc cong hoặc khu vực dày, nhờ thiết kế kênh linh hoạt theo biên dạng 3D.

Tuy nhiên, để tăng tính thuyết phục, nghiên cứu cần bổ sung dữ liệu thực nghiệm nhằm xác thực kết quả mô phỏng, bao gồm các phép đo nhiệt độ thực tế và phân tích định lượng về hiệu suất truyền nhiệt, như hệ số truyền nhiệt hoặc lưu lượng chất làm mát. Việc tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến, như phân tích động lực học chất lỏng (CFD) hoặc trí tuệ nhân tạo (AI), cũng có thể nâng cao độ chính xác và tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát trong tương lai. Kết quả nghiên cứu không chỉ khẳng định tiềm năng ứng dụng của CCS trong sản xuất nhựa mà còn mở ra hướng tiếp cận mới cho ngành công nghiệp khuôn mẫu tại Việt Nam, nơi các giải pháp làm mát tiên tiến vẫn chưa được khai thác triệt để. Nghiên cứu này đặt nền tảng cho việc phát triển các hệ thống làm mát thông minh, góp phần nâng cao hiệu suất sản xuất và chất lượng sản phẩm trong các ứng dụng công nghiệp hiện đại.

(*) 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: Lê Nguyễn Liêm, Trần Ngọc Hào, Âu Thị Kim Loan, Trần Thanh Thương.

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: SV2025-338.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Mojaver, M., Azdast, T., & Hasanzadeh, R. (2021), “*Taguchi analysis on hydrogen rich syngas production via gasification of polymer wastes*”. International Journal of Hydrogen Energy, 46, 29846-29857.
- [2]. Ramakrishnan, K., Le Moigne, N., De Almeida, O., Regazzi, A., & Corn, S. (2019), “*Optimized manufacturing of thermoplastic biocomposites by fast induction-heated compression moulding*”. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 124, 105493.
- [3]. Li, Z., Wang, X., Gu, J., Ruan, S., Shen, C., Lyu, Y., & Zhao, Y. (2018), “*Topology optimization for conformal cooling in thin-wall molding based on BEM*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94, 1041-1059.
- [4]. Do, T., Uyen, T., & Minh, P. (2021), “*The feasibility of an internal gas-assisted heating method for improving the melt filling ability of polyamide 6 thermoplastic composites*”. Polymers, 13, 1004.
- [5]. Shayfull, Z., Sharif, S., Zain, A. M., Ghazali, M. F., & Saad, R. M. (2014), “*Potential of conformal cooling channels in rapid heat cycle*”

- molding*". Advances in Polymer Technology, 33, 1-24.
- [6]. Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, J. A., & Jong, W. R. (2004), "*Simulations and verifications of induction heating on a mould plate*". International Communications in Heat and Mass Transfer, 31, 971-980.
- [7]. Gim, J., & Turng, L.-S. (2022), "*A review of current advancements in high surface quality injection molding*". Polymer Testing, 115, 107718.
- [8]. Chang, P. C., & Hwang, S. J. (2006), "*Experimental investigation of infrared rapid surface heating for injection moulding*". Journal of Applied Polymer Science, 102, 3704-3713.
- [9]. Ahmad, M. N., Ishak, M. R., Taha, M. M., Mustapha, F., Leman, Z., Lukista, D. D. A., Irianto, & Ghazali, I. (2022), "*Application of Taguchi method to FDM using oil palm fiber thermoplastics*". Polymers, 14, 2140.
- [10]. Park, H.-S., & Dang, X.-P. (2017), "*Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels*". Procedia Manufacturing, 10, 48-59.
- [11]. Li, X. P., Zhao, G. Q., Guan, Y. J., & Ma, M. X. (2009), "*Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mould*". Materials & Design, 30, 4317-4323.
- [12]. Minh, P., & Le, M.-T. (2021), "*Improving the melt flow length of ABS in thin-wall injection molding by external induction heating*". Polymers, 13, 2288.
- [13]. Nhan, P. T., Do, T. T., Anh Son, T., & Son Minh, P. (2019), "*Study on external gas-assisted mold temperature control for improving the melt flow length of thin rib products*". Advances in Polymer Technology, 2019, 5973403.
- [14]. Bui, H.-T., & Hwang, S.-J. (2015), "*Modeling a working coil coupled with magnetic flux concentrators for barrel induction heating in an injection molding machine*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 86, 16-30.