

NGHIÊN CỨU CÁC THÔNG SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN QUÁ TRÌNH GIA NHIỆT CỦA MÁY HÚT ÉP NHỰA TẮM ỨNG DỤNG TRONG CHẾ TẠO VỎ CHO CÁC THIẾT BỊ VẬT LÝ TRỊ LIỆU

INVESTIGATION OF PARAMETERS AFFECTING THE HEATING PROCESS IN VACUUM FORMING OF THERMOPLASTIC SHEETS FOR REHABILITATION DEVICE CASINGS

Nguyễn Trường Sơn¹, Trương Thị Thùy Trang¹, Nguyễn Văn Toàn²,
Nguyễn Trường An², Hà Trường Sang^{2,*}

¹Viện Vật lý Y Sinh học, Bệnh viện Quân y 175, Bộ Quốc phòng

²Học viện Kỹ thuật quân sự, Bộ Quốc phòng

*Email: sanght.st@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng số quá trình gia nhiệt tấm nhựa trong máy hút ép chân không ứng dụng trong chế tạo vỏ cho thiết bị vật lý trị liệu. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá định lượng ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến tốc độ gia nhiệt và độ đồng đều nhiệt độ trên tấm, từ đó làm cơ sở cho tối ưu hóa hệ thống gia nhiệt. Ba nhóm tham số chính được khảo sát gồm: (i) khoảng cách từ đèn halogen đến tấm nhựa (40-100 mm), (ii) số lượng bóng đèn (4, 6 và 8 bóng, công suất mỗi bóng 1200 W), và (iii) vật liệu tấm nhựa (PVC, ABS, Acrylic). Mô hình bức xạ bề mặt – bề mặt (S2S) được áp dụng trong ANSYS Fluent để mô phỏng đồng thời dẫn nhiệt, đối lưu tự nhiên và bức xạ hồng ngoại. Kết quả cho thấy số lượng bóng đèn là tham số ảnh hưởng mạnh nhất đến thời gian đạt nhiệt độ hóa mềm, trong khi khoảng cách đèn quyết định độ đồng đều nhiệt. Vật liệu PVC có tốc độ gia nhiệt nhanh nhất do dẫn nhiệt cao và nhiệt dung thấp. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học cho thiết kế và điều chỉnh chế độ gia nhiệt trong sản xuất vỏ nhựa kỹ thuật.

Từ khóa: Gia nhiệt tấm nhựa; Hút ép chân không; Bức xạ nhiệt S2S; Mô phỏng số; ANSYS Fluent.

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation of the heating process of thermoplastic sheets in a vacuum forming machine used for manufacturing casings of physical therapy devices. The objective is to quantitatively evaluate the influence of design parameters on heating rate and temperature uniformity, thereby supporting the optimal configuration of the heating system. Three primary parameters are analyzed: (i) heater-to-sheet distance (40-100 mm), (ii) number of halogen lamps (4, 6, and 8 units, 1200 W each), and (iii) sheet material (PVC, ABS, Acrylic). A Surface-to-Surface (S2S) radiation model is implemented in ANSYS Fluent to simultaneously account for conduction, natural convection, and infrared radiation. The results reveal that the number of lamps

is the dominant factor governing the time required to reach softening temperature, while the heater distance mainly affects temperature uniformity. Among the tested materials, PVC reaches the target temperature fastest due to its higher thermal conductivity and lower heat capacity. The findings provide a scientific basis for the thermal design and operation of vacuum forming systems in plastic enclosure manufacturing.

Keywords: Sheet heating; Vacuum forming; S2S radiation; Numerical simulation; ANSYS Fluent.

1. GIỚI THIỆU

Trong lĩnh vực chế tạo thiết bị vật lý trị liệu, phần vỏ thiết bị đóng vai trò không chỉ bảo vệ phần tử chức năng bên trong mà còn quyết định yếu tố thẩm mỹ, độ bền cơ học và khả năng vệ sinh. Tại Việt Nam, đa số vỏ thiết bị y tế cỡ nhỏ và trung bình hiện vẫn được chế tạo theo phương pháp thủ công từ tấm nhựa PVC, thông qua các công đoạn cắt CNC, ghép dán, bả matit và sơn hoàn thiện. Quy trình này có nhược điểm rõ rệt: năng suất thấp, độ đồng đều hình học kém, thời gian gia công dài và khó tạo hình các bề mặt cong phức tạp, từ đó năng suất trung bình chỉ đạt khoảng 50-60 vỏ máy/tháng/người, đồng thời tiêu hao vật liệu lớn do phải xử lý bề mặt nhiều lần [1].

Trong bối cảnh đó, công nghệ hút ép chân không (vacuum forming) nổi lên như một giải pháp thay thế khả thi. Đây là phương pháp gia công nhựa nhiệt dẻo dạng tấm bằng cách gia nhiệt tấm nhựa đến trạng thái dẻo, sau đó hút ép lên khuôn bằng chênh lệch áp suất giữa môi trường và khoang khuôn [2]. Công nghệ này đã được ứng dụng rộng rãi trên thế giới trong sản xuất bao bì, thiết bị tiêu dùng, công nghiệp ô tô và y tế nhờ ưu điểm: chi phí khuôn thấp, khả năng thay đổi mẫu mã linh hoạt, phù hợp sản xuất loạt nhỏ và trung bình [3]-[5]. So sánh với ép phun (injection molding), vacuum forming có cấu trúc thiết bị đơn giản hơn nhiều, không yêu cầu khuôn thép đắt tiền, trong khi

vẫn có thể tạo ra sản phẩm có bề mặt liên tục, không mối ghép và đáp ứng yêu cầu thẩm mỹ ở mức khá [6].

Một trong những yếu tố quyết định chất lượng tạo hình trong vacuum forming là quá trình gia nhiệt tấm nhựa trước khi ép hút. Tấm nhựa phải đạt trạng thái hóa mềm đồng đều, đặc biệt ở vùng sẽ biến dạng lớn, để tránh hiện tượng mỏng cục bộ, rách tấm hoặc không bám sát khuôn. Bản chất truyền nhiệt trong giai đoạn này là tổng hợp ba cơ chế: bức xạ nhiệt từ đèn halogen, đối lưu tự nhiên không khí và dẫn nhiệt trong vật liệu nhựa [7]. Nhiều nghiên cứu cho thấy sự phân bố nhiệt độ trên tấm phụ thuộc mạnh vào: (i) tính chất nhiệt vật liệu (ρ , C_p , k , ϵ), (ii) khoảng cách nguồn nhiệt, (iii) số lượng và bố trí đèn sấy, và (iv) điều kiện bức xạ phản xạ từ thành buồng [8]-[10].

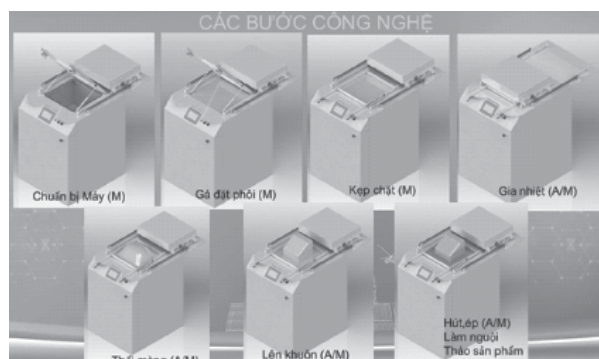
Trong đề tài cấp bệnh viện “Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong chế tạo vỏ cho các thiết bị vật lý trị liệu” [1], hệ thống gia nhiệt được thiết kế sử dụng đèn halogen công suất 1200 W, bố trí phía trên tấm nhựa. Để tối ưu hiệu quả gia nhiệt, nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng số nhằm khảo sát ảnh hưởng các thông số thiết kế, bao gồm: Khoảng cách từ đèn đến tấm nhựa, số lượng bóng đèn, ảnh hưởng của tấm phản xạ nhiệt cũng như đặc tính vật liệu của tấm nhựa sẽ quyết định đến thời gian gia nhiệt như các nghiên cứu trước đây trên thế giới [11]. 

Trên cơ sở đó, bài báo này tập trung trình bày kết quả mô phỏng truyền nhiệt trong quá trình gia nhiệt tấm nhựa bằng đèn halogen, nhằm đánh giá định lượng ảnh hưởng của hình học bố trí và vật liệu tấm đến chất lượng gia nhiệt. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn thông số thiết kế tối ưu của máy hút ép nhựa tấm, hướng đến ứng dụng trong ngành thiết bị vật lý trị liệu và lĩnh vực sản xuất vỏ nhựa kỹ thuật trong nước.

2. MÔ HÌNH KHẢO SÁT QUÁ TRÌNH GIA NHIỆT CỦA TẤM NHỰA

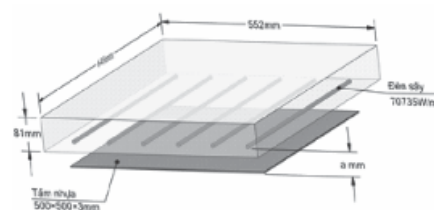
Hình 1 trình bày chu trình công nghệ của quá trình hút ép tấm nhựa, gồm bảy bước chính: chuẩn bị máy, gá đặt phôi, kẹp chặt, gia nhiệt, thổi màng (nếu cần), ép hút và làm nguội sản phẩm. Trong đó, giai đoạn gia nhiệt là bước quan trọng nhất, quyết định khả năng tạo hình của tấm nhựa cũng như chất lượng bề mặt sau ép. Nếu gia nhiệt không đủ hoặc không đồng đều, tấm có thể bị rách, mỏng cục bộ, hoặc không bám sát khuôn. Ngược lại, gia nhiệt quá mức có thể gây cháy, biến màu hoặc biến dạng ngoài ý muốn.

Quá trình gia nhiệt là một hiện tượng truyền nhiệt đa vật lý, trong đó đồng thời xảy ra ba cơ chế: dẫn nhiệt trong vật liệu rắn, đối lưu tự nhiên của không khí bao quanh tấm, và bức xạ nhiệt từ các đèn halogen. Vì cấu trúc hình học phức tạp và có sự tương tác giữa chất khí – chất rắn, bài toán không thể giải tích chính xác. Thực nghiệm trực tiếp tốn thời gian, khó kiểm soát điều kiện và chi phí cao. Do đó, phương pháp mô phỏng số được lựa chọn để đánh giá ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến quá trình gia nhiệt, từ đó hỗ trợ tối ưu cấu hình máy hút ép trong thực tế sản xuất.

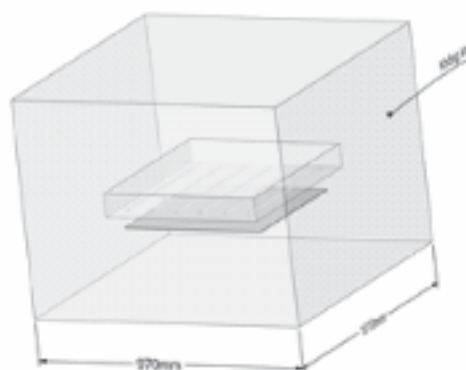


Hình 1. Quy trình các bước công nghệ quá trình hút ép tấm nhựa

2.1. Miền tính toán và điều kiện biên



(a) Mô hình sấy gia nhiệt



(b) Mô hình vùng mô phỏng

Hình 2. Mô hình mô phỏng sấy gia nhiệt trong máy ép tấm

Mô hình 3D của hệ thống gia nhiệt được xây dựng bằng phần mềm CAD và thể hiện trong Hình 2. Tấm nhựa có kích thước $500 \times 500 \times 3$ mm đặt nằm ngang, phía trên là các đèn halogen bố trí song song và cách nhau đều. Mỗi đèn có công suất cực đại 1200 W. Hệ thống đèn được bố trí trong một khoang kim loại dạng

hộp, có thể lắp thêm tấm phản xạ (gương) để tăng hiệu quả gia nhiệt khi cần. Miền mô phỏng bao gồm:

- Không khí bao quanh tấm;
- Không khí giữa đèn và tấm;
- Bề mặt bức xạ của đèn;
- Tấm nhựa (miền rắn cần tính dẫn nhiệt);
- Thành bao ngoài (giả thiết cách nhiệt).

Nguồn nhiệt được xác định từ công suất phát của đèn, phân bố đều theo diện tích phát xạ (tương đương thông lượng khoảng 70735 W/m^2 ở chế độ cực đại). Quá trình mô phỏng dừng khi nhiệt độ bề mặt tấm đạt giá trị yêu cầu cho hút ép. Điều kiện biên chính:

- Trao đổi nhiệt bức xạ và dẫn nhiệt tại bề mặt tấm;
- Độ đen (emissivity) thay đổi theo vật liệu;
- Bề mặt đèn được coi là nguồn bức xạ hồng ngoại;
- Các mặt ngoài còn lại giả thiết cách nhiệt.

2.2. Đặc tính vật liệu

Ba loại vật liệu được khảo sát là PVC, ABS và Acrylic. Các thông số vật liệu được lấy từ tài liệu kỹ thuật, trình bày trong Bảng 1. Không khí được mô phỏng ở điều kiện ban đầu 30°C , với các tính chất nhiệt phụ thuộc theo nhiệt độ.

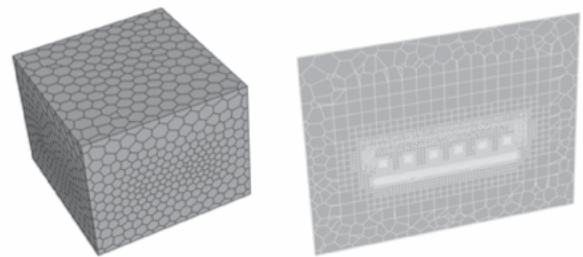
Bảng 1. Thông số vật liệu của tấm nhựa

Vật liệu	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/kgK)}$	$k \text{ (W/mK)}$	$\varepsilon \text{ (độ đen)}$
PVC	1400	1025	0.2265	0.8
ABS	1115	1480	0.215	0.8
Acrylic	1195	1470	0.195	0.8

2.3. Lưới tính toán

Miền mô phỏng được rời rạc bằng lưới đa diện (polyhedral mesh), cho phép mô tả tốt các vùng hình học phức tạp và giữ được độ chính xác cao với số phần tử hợp lý. Lưới được tinh chỉnh tại các vị trí có gradient nhiệt lớn, gồm: vùng sát bóng đèn và bề mặt trên và dưới của tấm nhựa.

Với trường hợp 6 bóng đèn, khoảng cách $a = 60 \text{ mm}$, số phần tử đạt 810,060 như thể hiện trên hình 3. Do vận tốc đối lưu tự nhiên trong khoang gia nhiệt nhỏ, không cần sử dụng lưới siêu mịn như các mô phỏng dòng chảy tốc độ cao.



Hình 3. Lưới đa diện cho mô phỏng số

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

Quá trình gia nhiệt tấm nhựa được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS Fluent, sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) để giải bài toán truyền nhiệt liên hợp gồm dẫn nhiệt trong tấm, đối lưu tự nhiên của không khí và trao đổi bức xạ giữa các bề mặt. Mô phỏng được thực

hiện trong miền không gian ba chiều, theo bài toán không ổn định phụ thuộc thời gian.

3.1. Phương trình cơ bản

(1) Phương trình năng lượng trong nhựa (dẫn nhiệt có phụ thuộc thời gian) được thể hiện như sau:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (1)$$

Trong đó, q''' là thông lượng nhiệt tỏa ra.

Do không khí được coi là môi chất không tham gia hấp thụ bức xạ, ảnh hưởng bức xạ được đưa vào mô hình dưới dạng thông lượng biên theo điều kiện trao đổi nhiệt bức xạ – đối lưu.

(2) Phương trình bức xạ (S2S):

Giả thiết xám – khuếch tán – mờ đục. Với N bề mặt trao đổi bức xạ, hệ phương trình radiosity dạng:

$$J_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) G_i, i = 1, N \quad (2)$$

Trong đó:

$$G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j$$

Với: J_i là năng lượng bề mặt i ; G_i là năng lượng tới bề mặt i ; ϵ_i là độ phát xạ; σ là hằng số Stefan-Boltzmann; và F_{ij} là hệ số hình dạng giữa bề mặt i và j .

(3) Phương trình đối lưu không khí:

Không khí mô phỏng ở chế độ đối lưu tự nhiên, dùng mô hình Laminar và phương trình Navier-stokes như sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0 \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] &= -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \rho g \beta (T - T_0) \end{aligned} \quad (3)$$

3.2. Thuật toán và thiết lập mô phỏng

Thuật giải theo thời gian sử dụng phần mềm thương mại Ansys Fluent để giải các phương trình vi phân đề cập ở mục 3.1. Các thiết đặt để chạy phần mềm được thể hiện trên bảng 2.

Bảng 2. Các thiết lập cho mô phỏng

Hạng mục	Thiết lập
Solver	Pressure-based, transient
Viscosity	Laminar
Radiation model	Surface to surface (S2S)
Time step	0.001 s, tổng thời gian 20 s
Convergence	RMS residual $< 10^{-6}$
Coupling	PISO
Wall emissivity	0.8 (nhựa), 0.1 (gương phản xạ nếu có)

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Quá trình mô phỏng được tiến hành nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến phân bố nhiệt độ của tấm nhựa trong giai đoạn gia nhiệt. Các thông số khảo sát gồm khoảng cách giữa đèn và tấm, số lượng bóng đèn halogen, vật liệu tấm nhựa, đồng thời có xét thêm trường hợp sử dụng tấm phản xạ quang. Các kết quả thu được được phân tích theo từng nhóm tham số, trên cơ sở so sánh sự biến thiên nhiệt độ theo thời gian và mức độ đồng đều trên bề mặt tấm.

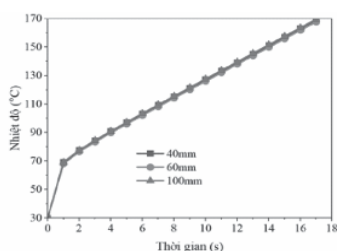
4.1. Ảnh hưởng của khoảng cách từ đèn đến tấm nhiệt

Trước hết, ảnh hưởng của khoảng cách

giữa đèn và tấm được thể hiện trong Hình 4, nơi phân bố nhiệt độ trên cả bề mặt trên và bề mặt dưới của tấm tại thời điểm $t = 17$ s được so sánh với ba khoảng cách 40 mm, 60 mm và 100 mm. Khi khoảng cách nhỏ (40 mm), nhiệt độ bề mặt trên thể hiện độ chênh lệch lớn, với các vùng cực đại xuất hiện ngay dưới vị trí của bóng đèn. Khi tăng khoảng cách lên 60 mm và 100 mm, sự phân bố nhiệt trở nên đồng đều hơn. Tuy nhiên, như thể hiện trong Hình 5, nhiệt độ trung bình theo thời gian của tấm gần như không thay đổi đáng kể giữa ba trường hợp. Điều này cho thấy mặc dù cường độ bức xạ suy giảm theo khoảng cách, sự gia tăng diện tích nhận bức xạ đã bù đắp cho tổn thất năng lượng, khiến tốc độ gia nhiệt trung bình gần như không đổi. Như vậy, có thể nhận định rằng việc tăng khoảng cách đèn chủ yếu cải thiện độ đồng đều nhiệt độ nhưng không ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ gia nhiệt.



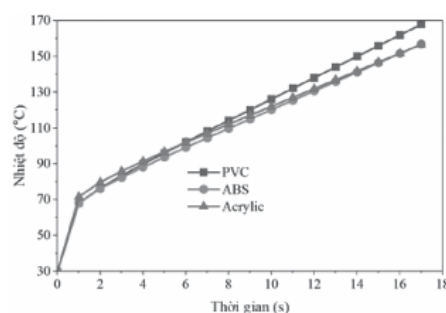
Hình 4. Trường nhiệt độ tại thời gian 17 s; hàng trên là nhiệt độ bề mặt trên, hàng dưới là nhiệt độ mặt dưới của tấm. Bên trái với $a = 40$ mm; giữa $b = 60$ mm; phải $a = 100$ mm.



Hình 5. Nhiệt độ trung bình theo thời gian khi khoảng cách a thay đổi.

4.2. Ảnh hưởng của vật liệu tấm nhựa

Ảnh hưởng của vật liệu tấm nhựa được trình bày trong Hình 6, với ba vật liệu PVC, ABS và Acrylic. Kết quả cho thấy vật liệu PVC đạt tốc độ gia nhiệt nhanh nhất, tiếp theo là ABS và Acrylic. Sau 17 giây, nhiệt độ trung bình của PVC cao hơn hai vật liệu còn lại khoảng 15°C . Xu hướng này xuất phát từ sự khác biệt về tính chất nhiệt: PVC có hệ số dẫn nhiệt cao hơn, cho phép truyền nhiệt hiệu quả hơn, trong khi ABS và Acrylic có nhiệt dung riêng lớn nên cần nhiều năng lượng hơn để đạt cùng mức nhiệt độ. Kết quả này nhất quán với các nghiên cứu trước đây về truyền nhiệt trong nhựa nhiệt dẻo.

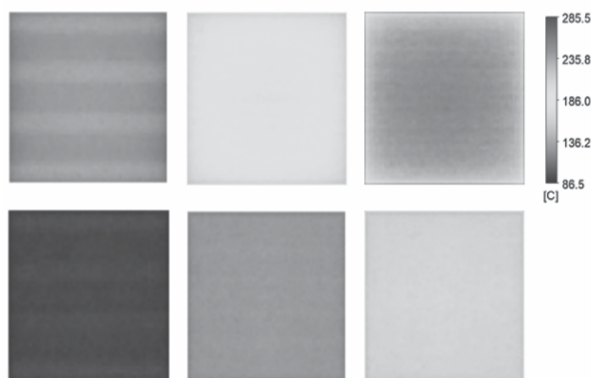


Hình 6. Nhiệt độ trung bình theo thời gian khi thay đổi vật liệu của tấm nhựa

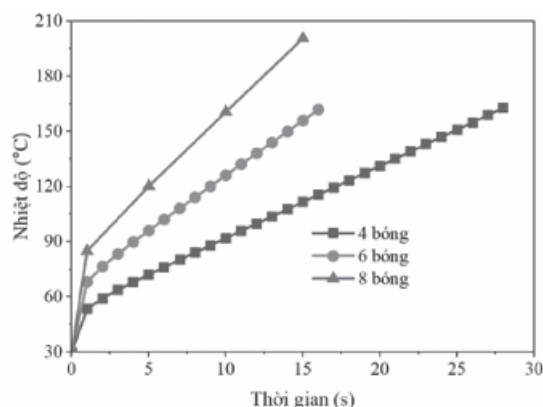
4.3. Ảnh hưởng của số bóng đèn chiếu

Ảnh hưởng của số lượng bóng đèn halogen được minh họa trong Hình 7 và Hình 8. Khi số bóng tăng từ 4 lên 6 và 8, quá trình gia nhiệt diễn ra nhanh hơn rõ rệt. Trường nhiệt độ tại thời điểm $t = 15$ s cho thấy cấu hình 4 bóng xuất hiện vùng lạnh rõ rệt giữa các bóng đèn, trong khi cấu hình 8 bóng cho phân bố nhiệt đồng đều hơn. Biểu đồ nhiệt độ trung bình (Hình 8) cũng chỉ ra rằng để đạt mức nhiệt 150°C , hệ 8 bóng chỉ cần dưới 10 s, hệ 6 bóng cần khoảng 15 s, trong khi hệ 4 bóng vượt quá 25 s. Điều này chứng tỏ số lượng bóng đèn là tham số ảnh hưởng mạnh nhất đến tốc độ gia nhiệt.





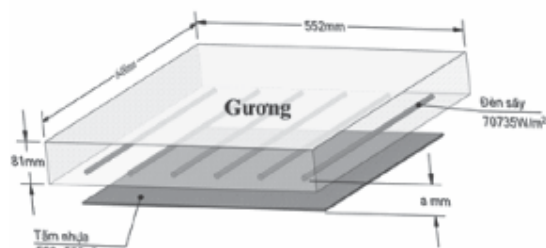
Hình 7. Trường nhiệt độ tại thời gian 15 s; hàng trên là nhiệt độ bề mặt trên, hàng dưới là nhiệt độ mặt dưới của tấm. Bên trái với 4 bóng; giữa 6 bóng; phải 8 bóng.



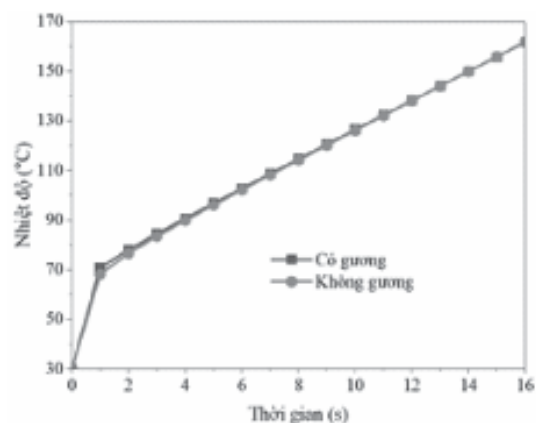
Hình 8. Nhiệt độ trung bình tấm nhựa theo thời gian khi số bóng thay đổi.

4.4. Ảnh hưởng của gương phản xạ quang

Cuối cùng, ảnh hưởng của tấm phản xạ quang được đánh giá bằng cách so sánh hai trường hợp có và không sử dụng gương phản xạ (Hình 9 và Hình 10). Kết quả chỉ ra rằng sự khác biệt về nhiệt độ trung bình chỉ rõ rệt trong những giây đầu tiên; sau đó, hai đường nhiệt độ dần tiến gần nhau. Nguyên nhân là dòng đối lưu trong khoang gia nhiệt làm suy giảm hiệu quả phản xạ tích lũy. Do đó, trong cấu hình hiện tại, tấm phản xạ không đem lại lợi ích đáng kể và chỉ phù hợp khi khoang gia nhiệt được thiết kế kín hoặc cách nhiệt tốt hơn.



Hình 9. Mô hình gia nhiệt có gương phản xạ



Hình 10. So sánh nhiệt độ trung bình khi có gương phản xạ

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày nghiên cứu mô phỏng quá trình gia nhiệt tấm nhựa trong máy hút ép chân không bằng phương pháp phân tích số, xem xét ảnh hưởng của ba tham số thiết kế chính gồm khoảng cách giữa đèn và tấm, số lượng bóng đèn halogen và vật liệu của tấm nhựa, đồng thời đánh giá bổ sung hiệu quả của tấm phản xạ quang. Các kết quả mô phỏng cho phép xác định rõ cơ chế chi phối và mức độ ảnh hưởng của từng tham số đến tốc độ và độ đồng đều của quá trình gia nhiệt.

Kết quả cho thấy số lượng bóng đèn là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến tốc độ gia nhiệt; khi số bóng tăng từ 4 lên 8, thời gian đạt nhiệt độ hóa mềm giảm hơn hai lần. Khoảng cách đèn không làm thay đổi đáng kể nhiệt độ trung bình nhưng ảnh hưởng rõ rệt tới độ đồng

đều nhiệt độ trên bề mặt tấm, trong đó khoảng cách 60-100 mm cho phân bố nhiệt hợp lý hơn. Vật liệu nhựa quyết định tốc độ dẫn nhiệt và nhiệt dung, dẫn đến sự khác biệt rõ rệt về thời gian gia nhiệt giữa PVC, ABS và Acrylic; trong đó PVC đạt nhiệt độ mục tiêu nhanh nhất. Tấm phản xạ quang chỉ tạo ra sự cải thiện nhỏ trong giai đoạn đầu của quá trình và không làm thay đổi đáng kể tốc độ gia nhiệt tổng thể trong cấu hình khảo sát.

Những phân tích trên góp phần xác lập cơ sở khoa học cho việc thiết kế và tối ưu hóa hệ thống gia nhiệt của máy hút ép nhựa tấm. Trong thực tiễn sản xuất, có thể ưu tiên sử dụng cấu hình 6-8 bóng đèn kết hợp khoảng cách chiếu 60-100 mm để đạt được sự cân bằng giữa thời gian chu trình, hiệu quả năng lượng và độ đồng đều nhiệt. Đồng thời, việc lựa chọn vật liệu nhựa cần gắn với chế độ gia nhiệt riêng, thay vì dùng một cấu hình chung cho nhiều loại vật liệu.

Các kết quả mô phỏng này sẽ là tiền đề để hiệu chỉnh và tối ưu quy trình thực nghiệm trên máy hút ép đã chế tạo, đồng thời mở ra khả năng mở rộng nghiên cứu theo hướng tối ưu hóa năng lượng, tự động điều khiển công suất gia nhiệt theo phản hồi nhiệt độ thời gian thực, hoặc kết hợp mô hình mô phỏng với thuật toán tối ưu hình học để thiết kế bố trí đèn đạt độ đồng đều cao hơn.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Cơ sở “Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong sản xuất vỏ thiết bị vật lý trị liệu”, mã số: ĐT.2025.003, do Viện Vật lý Y Sinh học, Bệnh viện Quân y 175 chủ trì. ❖

Ngày nhận bài: **23/10/2025**

Ngày phản biện: **05/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Trường Sơn, “Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong sản xuất vỏ thiết bị vật lý trị liệu”. Viện Vật lý Y Sinh học, 2025. Đề tài khoa học cấp bệnh viện mã số: ĐT.2025.003, 2025. Viện Vật lý Y Sinh học, Bệnh viện Quân y 175.
- [2]. Gruenwald, G. (2018), “*Thermoforming: a plastics processing guide*”. Routledge.
- [3]. Hosseinianari, H., Ramezankhani, M., Seethaler, R., & Milani, A. S. (2023), “*Development of a computationally efficient model of the heating phase in thermoforming process based on the experimental radiation pattern of heaters*”. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(1), 48.
- [4]. Throne, J. (2024), “*Thermoforming*”. In Applied Plastics Engineering Handbook (pp. 449-480). William Andrew Publishing.
- [5]. Pancrace, J. (2013), “*Coupled heating/forming optimization of knitted reinforced composites*”. Lehigh University.
- [6]. Ziedan, M. J., Hassan, A. F., Saad, N. A., & Al-Mukhtar, A. M. (2024) “*A Comprehensive Review of Forming Methods for Composite Materials and Cracking*”. Procedia Structural Integrity, 66, 229-246.
- [7]. Le Maoult, Y., & Schmidt, F. (2016), “*Infrared radiation applied to polymer processes*”. Heat Transfer in Polymer Composite Materials: Forming Processes, 385-423.
- [8]. Hosseinianari, H., Ramezankhani, M., Seethaler, R., & Milani, A. S. (2023), “*Development of a computationally efficient model of the heating phase in thermoforming process based on the experimental radiation pattern of heaters*”. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(1), 48.
- [9]. Baek, J. H., Park, T. I., Kim, Y. J., Park, J. S., & Kim, H. S. (2025), “*Integrated design and validation of 3D radiant heater for electric vehicles: Thermo-Electrical finite element analysis considering strain-dependent resistance in thermo-forming*”. Materials & Design, 114701.
- [10]. Mallick, P. K. (2017), “*Processing of polymer matrix composites*”. CRC Press.
- [11]. Hou, B. Y., Ren, L., Sun, Y. N., Zhang, M. Y., & Zhang, H. X. (2023), “*Structure and properties of heat-resistant ABS resins innovated via MSAMI random copolymer*”. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 36(3), 1004-1016.