

THIẾT KẾ KHUÔN PHUN ÉP CHO MẪU COMPOSITE CÓ DÙNG CARBON FIBER DẠNG TẤM

INJECTION MOLD DESIGN FOR COMPOSITE SAMPLES USING SHEET-TYPE CARBON FIBER

Phạm Anh Tú, Võ Minh Tâm*

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

Email: 21144424@student.hcmute.edu.vn;

*tamvm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc phát triển một thiết kế khuôn phun ép tối ưu hóa, đặc biệt cho việc sản xuất các mẫu composite gia cố bằng tấm sợi carbon. Với mục tiêu hàng đầu là đạt được chất lượng bề mặt và giảm thiểu sự xuất hiện của các khuyết tật. Để đạt được điều này, quy trình nghiên cứu sẽ bao gồm các giai đoạn sau: đầu tiên là sử dụng phần mềm mô phỏng 3D để thiết kế khuôn hai tấm có sản phẩm dạng tròn xoay ruột rỗng nên cần có lõi insert để tạo lõi rỗng và bốn lòng khuôn có kích thước lớn dần sau đó phân tích dòng chảy vật liệu và tối ưu hóa cấu trúc khuôn. Tiếp theo, một bộ khuôn hai tấm sẽ được gia công chế tạo dựa trên kết quả thiết kế và mô phỏng. Giai đoạn thử nghiệm ép phun sẽ được tiến hành, trong đó cần gắn thủ công insert vào lòng khuôn để tạo lớp nhựa thứ nhất. Tiếp đến quấn lớp sợi carbon để tạo ra sản phẩm nhựa bao quanh lớp sợi carbon. Giai đoạn kế tiếp là thay lòng khuôn lớn hơn để tạo ra sản phẩm dày hơn nhằm đạt được sản phẩm cuối cùng có bốn lớp nhựa xen kẽ với ba lớp sợi carbon. Các thông số quan trọng như nhiệt độ trục vít (nhiệt độ nhựa), áp suất phun, thời gian phun, áp suất bảo áp, thời gian bảo áp và thời gian làm mát sẽ được tinh chỉnh dựa trên mô phỏng nhằm giảm thiểu các khuyết tật thường gặp như không điền đầy, lỗ rỗng, bọt khí, hoặc biến dạng không mong muốn. Hiệu suất hoạt động của khuôn và chất lượng bề mặt của các mẫu composite được tạo ra sẽ được đánh giá một cách toàn diện bằng các phương pháp đo lường và phân tích chuyên dụng. Cuối cùng, dựa trên những kết quả thu được, nghiên cứu sẽ đưa ra các khuyến nghị cụ thể và chi tiết về thiết kế khuôn, có tính ứng dụng cao trong môi trường sản xuất công nghiệp, nâng cao chất lượng sản phẩm và giảm thiểu chi phí.

Từ khóa: Thiết kế khuôn phun ép; Sợi carbon dạng tấm; Vật liệu composite; Mô phỏng Moldex3D; Creo Parametric; Lõi ép nhựa; Mẫu thử kéo.

ABSTRACT

This study presents the development of an optimized injection mold design for the fabrication of carbon fiber-reinforced composite samples. The primary objective is to enhance surface quality and minimize common molding defects. The methodology involves the use of 3D simulation software to design a two-plate mold for a rotationally symmetrical hollow product, incorporating

a manually inserted core and four interchangeable cavities with increasing dimensions. Flow analysis and mold structure optimization are conducted to refine the design. A two-plate mold is then fabricated based on simulation results. During molding trials, the insert is manually placed to form the initial plastic layer, followed by the application of carbon fiber sheets. Subsequent molding steps involve replacing the cavity with progressively larger ones to encapsulate additional layers, resulting in a final structure comprising four plastic layers alternating with three carbon fiber layers. Process parameters such as barrel temperature, injection pressure, injection time, holding pressure, holding time, and cooling time are fine-tuned through simulation to minimize defects like short shots, voids, air bubbles, and deformation. Mold performance and composite surface quality are evaluated using specialized measurement and analysis methods. The study concludes with practical recommendations for mold design applicable in industrial manufacturing to improve product quality and reduce production costs.

Keywords: Injection mold design; Sheet-type carbon fiber; Composite materials; Moldex3D simulation; Creo Parametric; Molding defects; Tensile test specimen.

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu composite sợi carbon đã và đang trở thành một trong những vật liệu tiên tiến được ưa chuộng trong các ngành công nghiệp kỹ thuật cao như cơ khí, ô tô, hàng không vũ trụ và năng lượng tái tạo [1]. Với đặc tính nổi bật là trọng lượng nhẹ, độ cứng cao và khả năng chịu tải vượt trội, composite sợi carbon cho phép chế tạo các chi tiết kỹ thuật có hiệu suất cao, đồng thời giảm thiểu tiêu thụ năng lượng trong các ứng dụng di động [2]. So với các vật liệu truyền thống như thép hay nhôm, composite sợi carbon không chỉ mang lại lợi thế về trọng lượng mà còn cải thiện đáng kể các tính chất cơ học, bao gồm độ bền kéo, độ cứng và khả năng chống mỏi [3].

Ngoài ra, composite sợi carbon còn sở hữu khả năng chống mài mòn, chịu nhiệt và kháng hóa chất vượt trội, giúp kéo dài tuổi thọ sản phẩm và giảm chi phí bảo trì [4]. Những đặc điểm này đã thúc đẩy sự đổi mới trong thiết kế và sản xuất, từ các chi tiết máy móc nhỏ gọn đến các bộ phận lớn như khung gầm ô tô, cánh máy bay hay vỏ tàu vũ trụ [5]. Trong bối

cảnh nhu cầu về các sản phẩm hiệu năng cao và bền vững ngày càng tăng, composite sợi carbon đóng vai trò then chốt trong việc đáp ứng các tiêu chuẩn khắt khe của ngành công nghiệp hiện đại [6].

(*) Vai trò của phun ép trong sản xuất composite sợi carbon

Phun ép là một trong những phương pháp sản xuất quan trọng để tạo hình các sản phẩm composite sợi carbon, đặc biệt là các chi tiết có hình dạng phức tạp và yêu cầu độ chính xác cao [7]. Quá trình này bao gồm việc phun nhựa nhiệt dẻo hoặc nhiệt rắn vào khuôn chứa các lớp sợi carbon đã được định hình sẵn, từ đó tạo ra sản phẩm composite với cấu trúc đồng nhất và tính chất cơ học tối ưu [8]. So với các phương pháp khác như ép nóng hay đúc thủ công, phun ép mang lại hiệu quả sản xuất cao hơn, khả năng lặp lại tốt và khả năng tạo ra các sản phẩm với dung sai chặt chẽ [9].

Tuy nhiên, quá trình phun ép composite sợi carbon đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật. Một trong những vấn đề chính là đảm

bảo dòng nhựa chảy đồng đều bao quanh các lớp sợi carbon để tránh các khuyết tật như lỗ rỗng, bọt khí hay sự phân bố không đồng đều của sợi [10]. Những khuyết tật này có thể làm giảm đáng kể độ bền và tính chất cơ học của sản phẩm cuối cùng [11]. Ngoài ra, việc đạt được bề mặt sản phẩm mịn, không có các lỗi như vết cháy, biến dạng hay nứt gãy đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số phun ép, bao gồm áp suất, nhiệt độ và thời gian làm nguội [12]. Do đó, việc thiết kế khuôn phun ép phù hợp và tối ưu hóa quy trình sản xuất là yếu tố quyết định để đảm bảo chất lượng sản phẩm composite sợi carbon [13].

(*) Thách thức trong thiết kế khuôn phun ép cho composite sợi carbon

Thiết kế khuôn phun ép cho các sản phẩm composite sợi carbon dạng tấm đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng về cả khía cạnh kỹ thuật và vật liệu. Một trong những thách thức lớn nhất là đảm bảo khả năng chứa đựng các lớp sợi carbon dạng tấm trong lòng khuôn mà không làm ảnh hưởng đến quá trình phun nhựa [14]. Khuôn phải được thiết kế sao cho có thể mở rộng lòng khuôn để đặt sợi carbon một cách chính xác, đồng thời duy trì độ kín để ngăn chặn rò rỉ nhựa trong quá trình phun [1].

Ngoài ra, việc kiểm soát dòng chảy của nhựa trong khuôn là một vấn đề phức tạp, đặc biệt khi sợi carbon dạng tấm có thể cản trở sự phân bố đồng đều của nhựa [2]. Nếu dòng nhựa không được tối ưu hóa, sản phẩm có thể xuất hiện các khuyết tật như vùng thiếu nhựa, bọt khí hoặc sự phân tầng giữa nhựa và sợi [3]. Hơn nữa, các thông số vận hành như áp suất phun, tốc độ phun và nhiệt độ khuôn cần được điều chỉnh tỉ mỉ để phù hợp với tính chất của cả nhựa và sợi carbon, nhằm đạt được sản phẩm có chất lượng bề mặt và cơ tính tốt nhất [4].

Một thách thức khác là giảm thiểu các lỗi sản xuất tiềm ẩn, chẳng hạn như biến dạng nhiệt, co ngót không đồng đều hoặc ứng suất dư trong sản phẩm [5]. Những lỗi này không chỉ ảnh hưởng đến hình dạng và kích thước của sản phẩm mà còn làm giảm độ bền lâu dài của composite [6]. Do đó, việc đánh giá hiệu suất khuôn và kiểm tra chất lượng sản phẩm mẫu là cần thiết để xác định các giải pháp thiết kế và vận hành tối ưu [7].

(*) Mục tiêu và phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế một hệ thống khuôn phun ép cho sản phẩm composite sợi carbon dạng tròn xoay lõi rỗng, với mục tiêu chính là tối ưu hóa quá trình sản xuất và chất lượng sản phẩm [8]. Cụ thể, nghiên cứu sẽ tập trung vào việc mở rộng lòng khuôn để chứa các lớp sợi carbon dạng tấm, đồng thời tinh chỉnh các thông số vận hành như áp suất, nhiệt độ và thời gian phun để giảm thiểu các khuyết tật sản xuất [9].

Để đạt được mục tiêu này, hiệu suất hoạt động của khuôn sẽ được đánh giá thông qua các thí nghiệm mô phỏng và thực nghiệm, tập trung vào khả năng phân bố nhựa và độ chính xác của sản phẩm [10]. Chất lượng bề mặt của các sản phẩm mẫu cũng sẽ được kiểm tra kỹ lưỡng để xác định các lỗi như bọt khí, vết cháy hoặc biến dạng [11]. Kết quả từ các phân tích này sẽ cung cấp cơ sở để đề xuất các giải pháp thiết kế khuôn mang tính thực tiễn, phù hợp với môi trường sản xuất công nghiệp [12].

2. THIẾT KẾ BỘ KHUÔN HOÀN CHỈNH

• Mục tiêu mẫu đề ra:

Mẫu thử được thiết kế với dạng hình tròn xoay rỗng ruột, bao gồm bốn lớp nhựa xếp

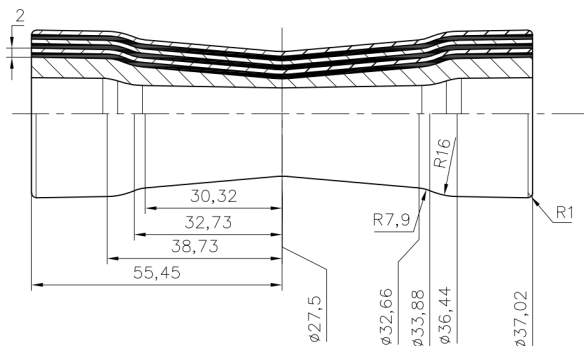
chồng lên nhau. Để tăng cường độ bền cơ học, giữa các lớp nhựa có thể được chèn thêm các lớp sợi carbon (carbon fiber).

Để đảm bảo vị trí đứt xảy ra tại vùng giữa khi chịu tải, hình dạng mẫu được thiết kế với bề dày giảm dần từ hai đầu về trung tâm, trong đó đường kính nhỏ nhất nằm tại phần giữa mẫu thử.

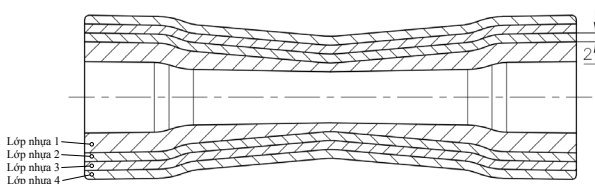
Mục tiêu nghiên cứu của mẫu thử là phục vụ thí nghiệm kéo, do đó yêu cầu mẫu phải đạt chất lượng cao với độ hoàn thiện bề mặt tốt. Điều này giúp đảm bảo tính ổn định và độ tin cậy của kết quả thử nghiệm.

• Thiết kế mẫu thử:

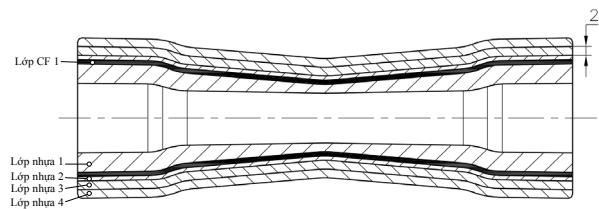
Mẫu thử được thiết kế dựa trên kích thước chiều dài theo tiêu chuẩn ISO 6892-1:2019 (Loại mẫu thử được sử dụng cho dạng ống).



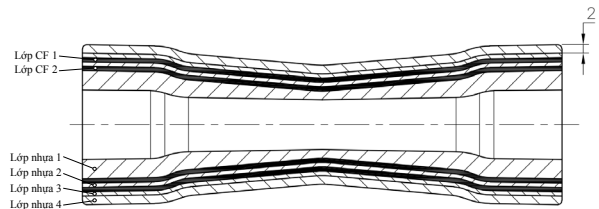
Hình 2.1. Kích thước của mẫu thử.



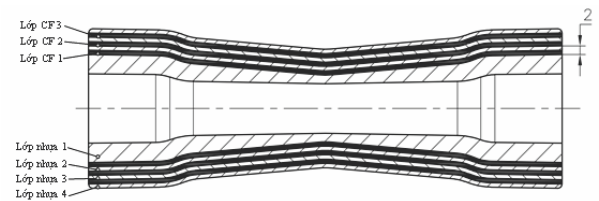
Hình 2.2. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 0 CF



Hình 2.3. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 1 CF



Hình 2.4. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 2 CF



Hình 2.5. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 3 CF

• Thiết kế ô hình 3D cho khuôn:

Sau khi áp dụng các công thức tính toán để xác định các thông số cần thiết cho thiết kế khuôn, nhóm thực hiện đã sử dụng phần mềm Creo Parametric 11.0 để xây dựng mô hình 3D của khuôn.

Creo Parametric là một phần mềm CAD (Computer-Aided Design) chuyên nghiệp, được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực thiết kế kỹ thuật, bao gồm cả thiết kế khuôn ép nhựa. Phần mềm này cung cấp các công cụ mạnh mẽ cho phép xây dựng mô hình chi tiết, tối ưu hóa thiết kế và dễ dàng chỉnh sửa theo yêu cầu.

• Quy trình thiết kế khuôn bằng phần mềm Creo 11 bao gồm các bước chính như sau:

- Chuẩn bị mô hình sản phẩm: Tạo hoặc

nhập mô hình 3D sản phẩm, kiểm tra tính hoàn chỉnh và độ chính xác. Xác định hướng mở khuôn, đường và mặt phân khuôn.

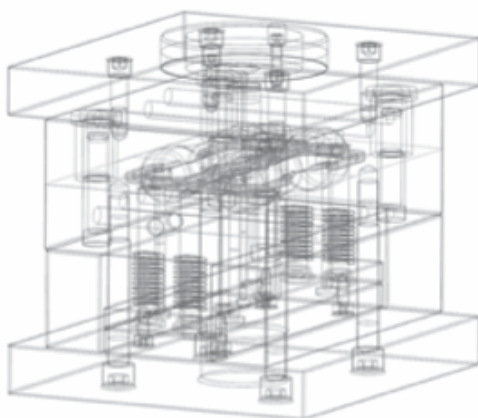
- Tách khuôn: Sử dụng Module Mold Cavity để vẽ mặt phân khuôn và tách khuôn. Thiết lập kênh dẫn nhựa, cổng phun. Tùy chỉnh các kích thước để thiết kế tấm khuôn âm và dương.

- Thiết kế vỏ khuôn: Thiết kế các tấm kẹp trên, tấm kẹp dưới, tấm đẩy, tấm giữ. Chọn các chi tiết dẫn hướng, định vị theo tiêu chuẩn.

- Thiết kế hệ thống đẩy sản phẩm: Bố trí chốt đẩy và hệ thống đẩy sản phẩm hiệu quả.

- Lắp ráp khuôn: Hoàn thiện mô hình khuôn bằng chế độ Assembly, bao gồm tất cả các thành phần.

Sau khi tính toán và dựng hình, khuôn mẫu thử được nhóm thiết kế gồm hai bộ riêng biệt, mỗi bộ gồm hai lòng khuôn. Bộ khuôn thứ nhất dùng để ép lớp thứ nhất và thứ hai, trong khi bộ khuôn thứ hai được sử dụng để ép lớp thứ ba và thứ tư. Các lớp được thiết kế với bán kính tại vị trí cần kéo đứt chênh lệch nhau 2 mm.



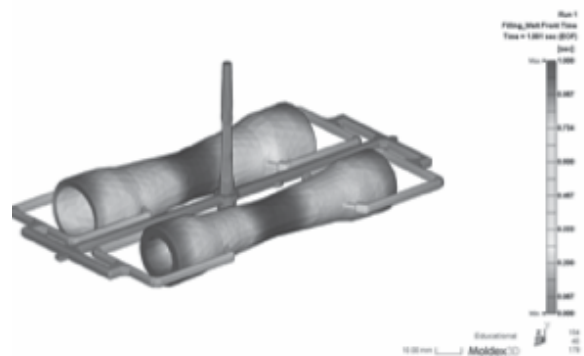
Hình 2.6. Mô hình khuôn 3D hoàn chỉnh

3. ỨNG DỤNG CAE MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH PHUN

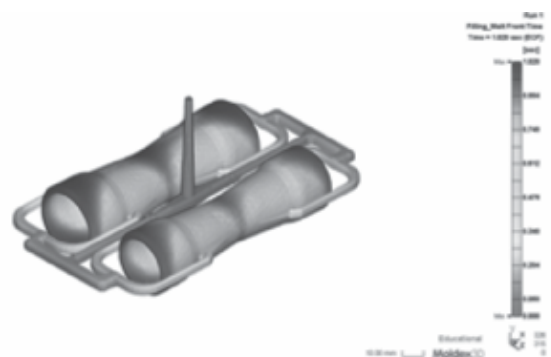
Nghiên cứu này sử dụng phần mềm Moldex3D 2024 để phân tích dòng chảy nhựa nhằm tìm ra các thông số ép phù hợp. Kiểm tra tính khả thi của thiết kế, phát hiện các vấn đề tiềm ẩn như biến dạng sản phẩm, nhiệt độ không đồng đều.

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu là nhựa PA6.

Kết quả mô phỏng cho thấy với thời gian điền đầy (Filling times) 1s, sản phẩm điền đầy hoàn toàn.



a) Lòng khuôn thứ nhất



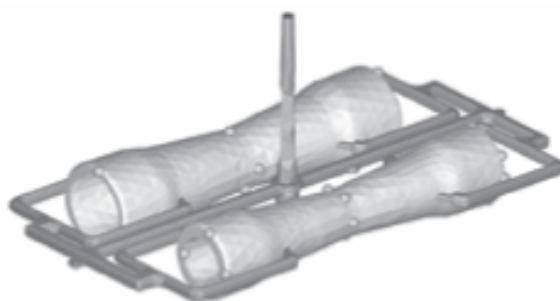
b) Lòng khuôn thứ hai

Hình 3.1. Thời gian điền đầy.

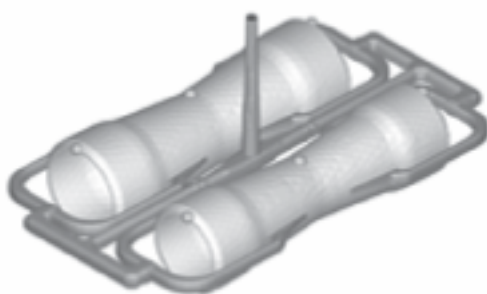
Sản phẩm xuất hiện hiện tượng bẫy khí, chủ yếu tại các vị trí không quan trọng, không

ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng tổng thể. Tuy nhiên, một số ít bẫy khí được ghi nhận tại vùng vị trí kéo đứt của mẫu thử, có thể ảnh hưởng đến tính chính xác của kết quả thí nghiệm kéo. Một số cách khắc phục mà không cần thay đổi kết cấu khuôn:

- ✓ Tăng thời gian điền đầy;
- ✓ Giảm tốc độ phun.



a) Lòng khuôn thứ nhất



b) Lòng khuôn thứ hai

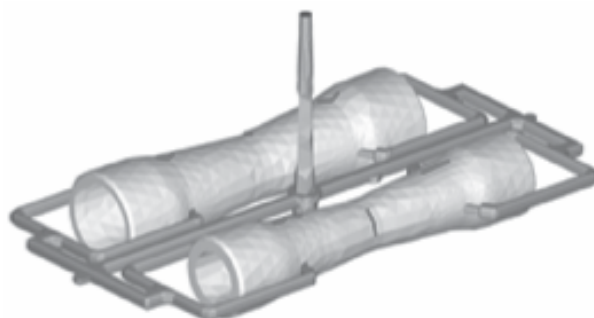
Hình 3.2. Vị trí xuất hiện bẫy khí

Kết quả mô phỏng cho thấy, đường hàn đã được phát hiện ở một số vị trí trên sản phẩm. Các đường hàn này có thể xuất hiện tại vị trí kéo, điều này có thể ảnh hưởng đến tính độ bền của sản phẩm nếu không được xử lý đúng cách.

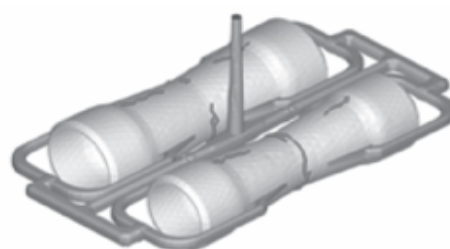
Một số cách khắc phục:

- ✓ Tăng nhiệt độ khuôn hoặc nhiệt độ nhựa nóng chảy;

- ✓ Giảm thời gian điền đầy;
- ✓ Tăng tốc độ phun.



a) Lòng khuôn thứ nhất

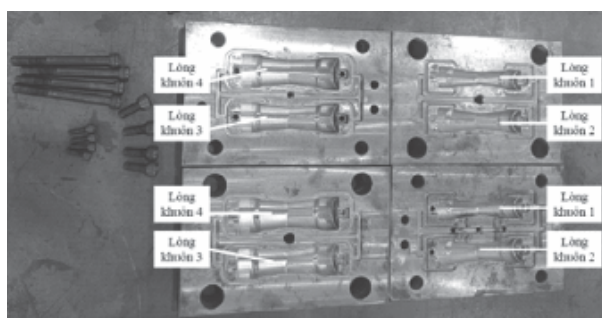


b) Lòng khuôn thứ hai

Hình 3.3. Vị trí xuất hiện đường hàn.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

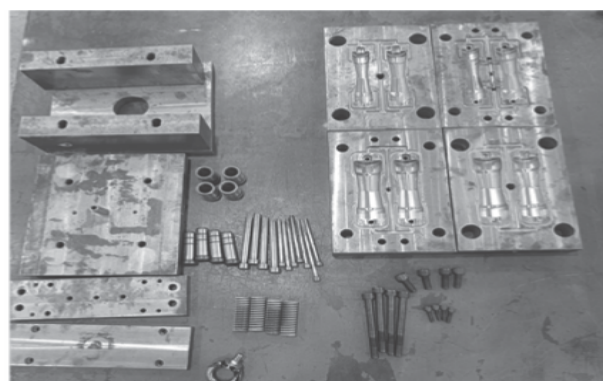
Về phần khuôn, sau quá trình gia công, khuôn đã đạt được các yêu cầu đề ra cả về mặt kỹ thuật lẫn kinh tế. Cụ thể, kích thước khuôn được gia công chính xác theo đúng bản vẽ thiết kế, đảm bảo độ phù hợp cao với chi tiết cần tạo hình (hình 1a). Bên cạnh đó, sản phẩm khuôn cũng tiệm cận với các yêu cầu thực tế trong quá trình sản xuất, cho thấy sự hợp lý trong lựa chọn vật liệu, phương pháp gia công cũng như kết cấu tổng thể (hình 1b). Ngoài ra, chi phí thực hiện khuôn nằm trong phạm vi ngân sách cho phép, cho thấy hiệu quả kinh tế được đảm bảo mà vẫn không ảnh hưởng đến chất lượng. Nhìn chung, khuôn sau khi gia công có thể sử dụng tốt trong thực tiễn sản xuất, đồng thời đáp ứng được các tiêu chí về kích thước, độ chính xác và tính kinh tế một cách hợp lý.



Hình 4.1. Hai nửa khuôn



Hình 4.3. Mẫu bị lỗi



Hình 4.2. Các chi tiết khuôn

Về phần mẫu ép, trong những lần thử nghiệm ban đầu, nhóm đã tiến hành ép theo các thông số lấy từ mô phỏng. Tuy nhiên, kết quả thu được vẫn chưa thực sự ổn định và xuất hiện một số lỗi đáng chú ý. Cụ thể, ở lớp 1 và lớp 2 (hình 2) của sản phẩm có hiện tượng không điền đầy vật liệu, dẫn đến các khuyết tật về hình dạng và kết cấu. Đồng thời, một số vị trí còn xảy ra tình trạng hở lớp và lõi sợi carbon (CF), ảnh hưởng đến chất lượng tổng thể của mẫu.

Bảng 4.1. Thông số ép ban đầu

Nhiệt độ nhựa	280°C
Áp suất điền đầy	50 Mpa
Thời gian điền đầy	1s
Áp suất bảo áp	48 Mpa
Thời gian bảo áp	5s
Thời gian làm mát	20s

Trước những vấn đề đó, nhóm đã tiến hành điều chỉnh lại các thông số ép như nhiệt độ, áp suất, thời gian giữ lực,... Qua một vài lần thử nghiệm và tinh chỉnh, các lỗi dần được khắc phục, và mẫu ép đã đạt được độ hoàn thiện tốt hơn rõ rệt ở cả bốn lớp 1, 2, 3 và 4 (hình 3). Kết quả này cho thấy việc hiệu chỉnh thông số ép đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm cuối cùng.

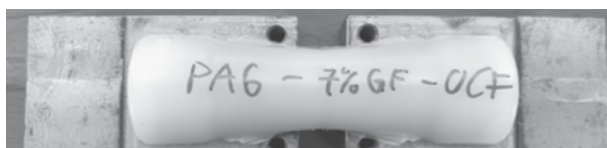
Bảng 4.2. Thông số ép đã thay đổi

Nhiệt độ nhựa	260°C
Áp suất điền đầy	70 Mpa
Thời gian điền đầy	2s
Áp suất bảo áp	65 Mpa
Thời gian bảo áp	5s
Thời gian làm mát	25s



Hình 4.4. Mẫu

Kết quả ép thử nghiệm cho thấy mẫu nhựa sau khi ép đã đạt chất lượng tốt, với việc hạn chế tối đa các khuyết tật hình học thường gặp như thiếu vật liệu (short shot), bavaria (flash), rỗ khí (voids) và hiện tượng lõi sợi carbon (CF). Điều này cho thấy quá trình điều chỉnh thông số ép đã được thực hiện hiệu quả, giúp cải thiện đáng kể chất lượng sản phẩm. Bề mặt mẫu ép đạt độ ổn định cao, không xuất hiện các vết nứt, xước hay hiện tượng xù xì, cho thấy quá trình kiểm soát nhiệt độ và áp suất trong khuôn đã được tối ưu hóa. Việc kiểm soát chặt chẽ các thông số này giúp tránh được các khuyết tật bề mặt như vết cháy, vết sần hay vết hằn từ chốt đẩy. Về độ chính xác kích thước, khu vực trung tâm của mẫu đạt gần như chính xác so với thiết kế ban đầu, với sai lệch nhỏ nằm trong giới hạn cho phép. Sai lệch này chủ yếu do hiện tượng co rút của nhựa trong quá trình làm nguội, một yếu tố thường gặp trong ép nhựa và đã được dự tính trước trong thiết kế khuôn. Đối với các lớp sợi carbon (CF), khi được quấn đúng kỹ thuật và theo đúng hướng dẫn, hiện tượng lõi sợi ra ngoài bề mặt đã được giảm thiểu đáng kể. Việc sắp xếp hợp lý các lớp CF không chỉ giúp cải thiện tính thẩm mỹ mà còn đảm bảo dòng chảy của nhựa không bị cản trở, từ đó nâng cao chất lượng và độ bền của sản phẩm.



Hình 4.5. Mẫu 4 lớp nhựa 0 lớp CF

5. KẾT LUẬN

Trong quá trình thực hiện đề tài thiết kế và chế tạo khuôn ép nhựa, nhóm đã hoàn thành việc gia công khuôn đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật và kinh tế. Kích thước khuôn được gia công chính xác theo bản vẽ thiết kế, đảm bảo độ phù hợp cao với chi tiết cần tạo hình.

Sản phẩm sau khi ép thử nghiệm đạt được các yêu cầu về hình dáng và kích thước gần giống với thiết kế ban đầu. Tuy nhiên, trong quá trình ép thử, nhóm gặp phải một số khó khăn do phải thực hiện thao tác thay lòng khuôn, dẫn đến thời gian ép kéo dài. Mặc dù vậy, với kết quả đạt được, bộ khuôn vẫn có thể áp dụng hiệu quả trong học tập và nghiên cứu, đồng thời là cơ sở cho các hướng phát triển tiếp theo của đề tài.

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: SV2025-368.❖

Ngày nhận bài: **12/5/2025**

Ngày phản biện: **30/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Advani, S. G., & Sozer, E. M. (2002), “*Process modeling in composites manufacturing*”. CRC Press.
- [2]. Cysne Barbosa, A. P., Fulco, A. P. P., Guerra, E. S. S., Arakaki, F. K., Tosatto, M., Costa, M. C. B., & Melo, J. D. D. (2016), “*Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites*”. Composites Part B: Engineering, 110, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.004>
- [3]. De Cicco, D., Asaee, Z., & Taheri, F. (2017), “*Use of nanoparticles for enhancing the interlaminar properties of fiber-reinforced composites and adhesively bonded joints – A review*”. Nanomaterials, 7(11), 360. <https://doi.org/10.3390/nano7110360>
- [4]. Ding, J., & Cheng, L. (2020), “*Experimental study on ultrasonic three-point bending fatigue of CFRP under ultraviolet radiation*”. Engineering Fracture Mechanics,

- 242, 107435. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107435>
- [5]. Forintos, N., & Czigany, T. (2019), “Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review”. *Composites Part B: Engineering*, 162, 331-343. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.096>
- [6]. Goel, A., Chawla, K. K., Vaidya, U. K., Koopman, M., & Dean, D. R. (2008), “Effect of UV exposure on the microstructure and mechanical properties of long fiber thermoplastic (LFT) composites”. *Journal of Materials Science*, 43(13), 4423-4432. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2635-6>
- [7]. Iqbal, K., Khan, S. U., Munir, A., & Kim, J. K. (2009), “Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix”. *Composites Science and Technology*, 69(11-12), 1949-1957. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.04.016>
- [8]. Jaber, A. A., Obaid, A. A., Advani, S. G., & Gillespie, J. W., Jr. (2021a), “Experimental investigation of dry powder coating processing parameters on the polystyrene particle's distribution on the surface of carbon fibers”. *Powder Technology*, 393, 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.079>
- [9]. Jaber, A. A., Obaid, A. A., Advani, S. G., & Gillespie, J. W., Jr. (2021b), “Prediction of equilibrium spacing between charged polymer particles in contact with a carbon fiber”. *Journal of Electrostatics*, 111, 103577. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103577>
- [10]. Khayyam, H., Jazar, R. N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S. M., Kumar, S., & Naebe, M. (2020), “PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling”. *Progress in Materials Science*, 107, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100575>
- [11]. Lee, H., Huh, M., Yoon, J., Lee, D., Kim, S., & Kang, S. (2017), “Fabrication of carbon fiber SMC composites with vinyl ester resin and effect of carbon fiber content on mechanical properties”. *Carbon Letters*, 22, 101-104.
- [12]. Lewis, S. (1994), “The use of carbon fibre composites on military aircraft”. *Composites Manufacturing*, 5(2), 95-103. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0956-7143(94)90065-5)