

Nghiên cứu chế tạo và tính chất của vật liệu composite silica/phenolic và carbon/phenolic

Phạm Văn Toại, Phạm Kim Đạo*, Phạm Quang Hiếu, Lê Duy Thứ

Viện Thuốc phóng Thuốc nổ, 192 Đức Giang, phường Việt Hưng, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 6/8/2025; ngày chuyển phản biện 8/8/2025; ngày nhận phản biện 29/8/2025; ngày chấp nhận đăng 4/9/2025

Tóm tắt:

Bài báo trình bày công nghệ chế tạo vật liệu composite silica/phenolic (SP) và carbon/phenolic (CP) bằng phương pháp nén ép. Vật liệu composite SP và CP được chế tạo từ các tấm vải sợi (silica hoặc carbon) trên nền nhựa phenolic, trong đó hỗn hợp keo nền phenolic được chuẩn bị trong dung môi furfural có mặt chất đóng rắn urotropin và chất khơi mào AIBN. Kết quả thực nghiệm cho thấy, các vật liệu nghiên cứu có mật độ thấp, độ cứng và độ bền nén cao. Khả năng chịu nhiệt và chịu xói mòn được đánh giá trong điều kiện khắc nghiệt, thông qua phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) và đốt thử nghiệm trong động cơ nhiên liệu rắn hỗn hợp. Độ hao hụt khối lượng của vật liệu composite SP và CP ở nhiệt độ đến 800°C lần lượt là 34,7 và 33,7%. Khi đốt thử nghiệm trong động cơ nhiên liệu rắn hỗn hợp với việc sử dụng vật liệu composite SP và CP làm khối tới hạn của loa phụt, tốc độ xói mòn của vật liệu composite SP và CP đạt lần lượt là 0,552 và 0,348 mm/s. Do đó, vật liệu composite SP và CP có tính chất cơ lý cao, khả năng chịu nhiệt và xói mòn tốt khi thử nghiệm trong điều kiện khắc nghiệt.

Từ khóa: carbon/phenolic, silica/phenolic, tốc độ xói mòn, vật liệu ablative, vật liệu composite chịu nhiệt.

Chỉ số phân loại: 2.4, 2.5

Research on fabrication and properties of silica/phenolic and carbon/phenolic composites

Van Toai Pham, Kim Dao Pham*, Quang Hieu Pham, Duy Thu Le

Institute of Propellants and Explosives, 192 Duc Giang Street, Viet Hung Ward, Hanoi, Vietnam

Received 6 August 2025; revised 29 August 2025; accepted 4 September 2025

Abstract:

The article presents the technology for manufacturing silica/phenolic (SP) and carbon/phenolic (CP) composite materials using compression molding. SP and CP composite materials are fabricated from fiber sheets (silica or carbon) on a phenolic resin matrix, where the phenolic resin matrix mixture is prepared in a furfural solvent in the presence of urotropin curing agent and AIBN initiator. The experimental results indicate that the studied materials exhibit low density, high stiffness, and high compressive strength. In particular, to evaluate heat resistance and erosion behaviour, thermogravimetric analysis (TGA) and combustion testing in a solid composite propellant motor were conducted. The mass loss of SP and CP composite materials at temperatures up to 800°C was 34.7 and 33.7%, respectively. When tested in a solid composite propellant motor using SP and CP materials as the nozzle throat insert, the erosion rates of SP and CP materials were 0.552 and 0.348 mm/s, respectively. Therefore, SP and CP composite materials exhibit high mechanical properties, good heat resistance, and erosion resistance under severe conditions.

Keywords: ablative material, carbon/phenolic, composite heat-resistant material, erosion rate, silica/phenolic.

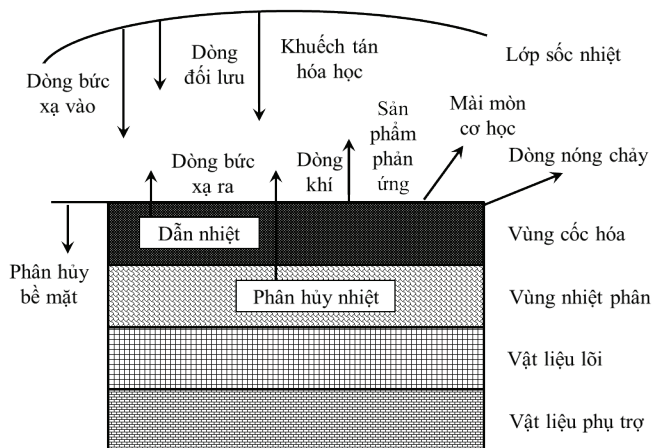
Classification numbers: 2.4, 2.5

*Tác giả liên hệ: Email: phamkimdao@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Vật liệu composite SP và CP đã và đang được nghiên cứu, phát triển và ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: xây dựng công trình, công nghiệp ô tô, điện dân dụng, đặc biệt trong lĩnh vực hàng không vũ trụ (máy bay dân dụng, máy bay không người lái) và tên lửa (thân vỏ tên lửa, lớp bảo vệ nhiệt vỏ động cơ, lớp bảo vệ nhiệt và khối tới hạn của cụm loa phụt) [1-5]. Những ưu điểm nổi bật của các loại vật liệu này là mật độ thấp, độ cứng, độ bền cao, khả năng chịu nhiệt và chịu xói mòn tốt [4, 6-8]. Thêm vào đó, các loại vật liệu composite này có công nghệ chế tạo tương đối đơn giản và chi phí thấp so với các loại vật liệu kim loại, hợp kim và phi kim khác. Hiện nay, công nghệ chế tạo các loại vật liệu composite SP và CP chủ yếu được sử dụng nhiều là công nghệ cuộn và công nghệ nén ép, trong đó sợi silica hay sợi carbon đóng vai trò là cốt sợi (dạng vải hoặc dạng sợi), còn nhựa phenolic có vai trò là vật liệu nền (dạng novolac hoặc rexit) [2, 9].

Cơ chế phân hủy nhiệt của vật liệu composite dưới tác động của dòng nhiệt cao được trình bày trên hình 1. Đây là quá trình hóa lý phức tạp, bao gồm các quá trình vật lý như bức xạ nhiệt, trao đổi nhiệt, mài mòn cơ học... và quá trình hóa học như dòng thoát khí phân hủy sản phẩm cháy, các phản ứng hóa học, khuếch tán hóa học, nóng chảy, cốc hóa polyme trong pha ngưng tụ... Đặc trưng của quá trình phân hủy nhiệt của vật liệu composite là xảy ra đồng thời nhiều quá trình vật lý và hóa học của các sản phẩm phân hủy song song và liên tiếp tại các pha khác nhau (pha rắn, pha lỏng và pha khí) [10].



Hình 1. Cơ chế phân hủy nhiệt của vật liệu composite [10].

Để đánh giá khả năng chịu nhiệt, chịu xói mòn của vật liệu composite, người ta thường sử dụng nhiều phương pháp khác nhau như: Phân tích nhiệt trọng lượng (TGA), phân tích nhiệt quét vi sai (DSC), phân tích nhiệt cơ học (TMA), hoặc cũng có thể sử dụng phương pháp khô bằng ngọn lửa oxy-axetylene (đến 3000°C) hay bằng ngọn lửa khí oxy-butan (đến 1500°C) [11-13]. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày kết quả nghiên cứu về công nghệ chế tạo vật liệu composite SP và CP, đồng thời đánh giá các tính chất cơ lý, khả năng chịu nhiệt và chịu xói mòn của chúng trong điều kiện thử nghiệm khắc nghiệt.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Vật liệu composite được chế tạo từ vải sợi silica với hàm lượng SiO_2 trên 96% hoặc vải sợi carbon 6K (Xiangsheng Technology Co., Ltd, Trung Quốc) và nhựa nền phenolic dạng novolac (Chemprom, Nga). Đặc tính kỹ thuật của vải sợi silica và vải sợi carbon được trình bày trong bảng 1. Để chế tạo hỗn hợp chất keo nền phenolic chúng tôi sử dụng dung môi furfural (hàm lượng chất chính 99%, Aladdin, Trung Quốc), chất đóng rắn hexamethylenetetramine hay urotropin (Aladdin, Trung Quốc) và chất khơi mào phản ứng 2,2'-azobisisobutyronitril (AIBN, Aladdin, Trung Quốc).

Bảng 1. Đặc tính kỹ thuật vải sợi silica và vải sợi carbon.

Đặc tính	Vải sợi silica	Vải sợi carbon
Hình ảnh		
Màu sắc	Trắng	Đen
Khổ rộng (mm)	820	1000
Bề dày (mm)	0,41	0,38
Khối lượng (g/m^2)	290	320

2.2. Phương pháp nghiên cứu

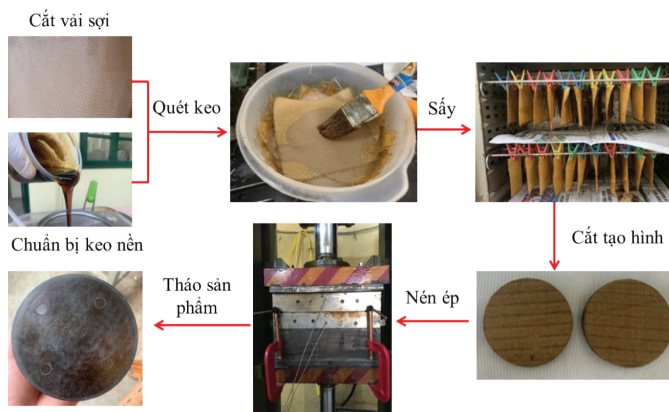
Đơn thành phần hỗn hợp chất keo nền phenolic được trình bày trong bảng 2, trong đó hàm lượng nhựa phenolic thay đổi theo 100 phần khối lượng (pkl) của hàm lượng dung môi furfural, còn chất đóng rắn urotropin và chất khơi mào AIBN không thay đổi (tính theo dung môi furfural).

Bảng 2. Đơn thành phần hỗn hợp keo nền phenolic.

Thành phần	Hàm lượng (pkt)			
	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4
Furfural	100	100	100	100
Nhựa phenolic	90	100	110	120
Urotropin	15	15	15	15
AIBN	0,5	0,5	0,5	0,5

Phương pháp chế tạo keo nền phenolic: Cân định lượng dung môi furfural và urotropin cho vào thiết bị khuấy trộn. Các hạt urotropin được hòa tan trong dung môi furfural ở nhiệt độ 35-40°C trong thời gian 2-3 h với tốc độ khuấy 500-700 vòng/phút. Sau đó, cho từng phần định lượng hạt nhựa phenolic vào bình trộn, tiến hành khuấy hỗn hợp cho đến khi thu được hỗn hợp đồng nhất (khoảng 10 h), tiếp theo cho tiếp chất khơi mào AIBN vào bình và khuấy đều trong khoảng 1,0 h.

Phương pháp chế tạo vật liệu composite: Vải sợi (vải silica hoặc vải carbon) được cắt thành các tấm có kích thước khoảng 120x120 mm, sau đó dùng chổi sơn hoặc con lăn để quét đều lớp keo nền lên cả hai bề mặt lớp vải. Tiếp đến, các tấm vải sợi đã quét keo được treo lên giá và sấy sơ bộ ở nhiệt độ 90°C trong thời gian không quá 1,0 h. Các bán thành phẩm sau khi sấy được cắt định hình theo kích thước khuôn ép và được sắp xếp từng lớp vào khuôn ép. Tiến hành ép mẫu trên máy ép thủy lực. Nhiệt độ ép được thiết lập tại nhiệt độ 80, 100 và 155°C trong thời gian tương ứng 15 phút, 15 phút và 60 phút. Trong đó, trong khoảng nhiệt độ 80-100°C duy trì áp suất máy ép ở 10-20 kg/cm², sau đó tăng lên 80-100 kg/cm² ở nhiệt độ 155°C. Kết thúc, phôi vật liệu composite được làm nguội tự nhiên đến nhiệt độ 70-80°C và tháo ra khỏi khuôn ép. Sơ đồ công nghệ chế tạo vật liệu composite được trình bày trên hình 2. Phôi vật liệu composite sau đó được gia công để tiến hành đo đạc và thử nghiệm.

**Hình 2. Sơ đồ công nghệ chế tạo vật liệu composite.**

Phương pháp xác định độ nhớt của keo nền phenolic: Độ nhớt của hỗn hợp chất keo nền nhựa phenolic được đo bằng phễu VZ 246 (Nga) với đường kính lỗ 4 mm ở nhiệt độ phòng. Tiến hành đo ít nhất 3 lần/mẫu, sau đó lấy giá trị trung bình.

Phương pháp xác định hàm lượng nhựa phenolic: Hàm lượng nhựa phenolic trong bán thành phẩm (sau khi nhúng keo và sấy) được xác định là hiệu số khối lượng của bán thành phẩm và khối lượng vải sợi ban đầu. Hàm lượng nhựa phenolic trong mẫu sản phẩm là hiệu số của khối lượng mẫu sản phẩm trước và sau khi nung ở 600°C trong 2,0 h.

Nghiên cứu tính chất cơ lý của vật liệu: Mật độ mẫu được xác định bằng máy đo mật độ điện tử DH-2000 (DahoMeter, Trung Quốc), độ phân giải 0,001 g/cm³. Độ cứng Shore D của mẫu vật liệu được đo trên máy Digi test micro Shore D trong giải từ 0 đến 100 đ.v, thời gian duy trì 30 s.

Độ bền nén của mẫu được đo đặc theo phương pháp ASTM D3410 trên máy đo độ bền kéo, nén M350-10 CT với tốc độ 1 mm/phút. Mẫu đo được gia công chế tạo thành hình khối có kích thước 9x5x5 mm và được đặt trên bàn ép, sao cho bề mặt vải sợi song song với bàn nén ép.

Nghiên cứu tính chất chịu nhiệt và chịu xói mòn của vật liệu: Nhóm tác giả sử dụng phương pháp phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) để phân tích khả năng chịu nhiệt của mẫu vật liệu composite. Mẫu nghiên cứu được mài nhỏ theo hướng vuông góc với tấm vải sợi và cân định lượng khoảng 20-30 mg/mẫu. Tiến hành đo đạc trên máy NETZSCH TG 209F1 (NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb, Đức) từ nhiệt độ 25 đến 800°C với tốc độ gia nhiệt 10°C/phút trong môi trường khí nitơ.

Để đánh giá khả năng chịu xói mòn của vật liệu composite SP và CP trong điều kiện khắc nghiệt (nhiệt độ và áp suất cao), chúng tôi tiến hành đốt thử nghiệm trong động cơ mẫu nhiên liệu rắn hỗn hợp với việc sử dụng vật liệu composite nghiên cứu làm khối tới hạn của cụm loa phụt (hình 3).

**Hình 3. Khối tới hạn của cụm loa phụt làm từ vật liệu composite.**

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Nghiên cứu công nghệ chế tạo vật liệu composite

Vật liệu composite được nghiên cứu chế tạo từ hai thành phần chính là: Vải sợi silica (hoặc vải sợi carbon) và hỗn hợp keo nền nhựa phenolic. Trong đó, lớp vải sợi đóng vai trò là thành phần cốt sợi chịu nhiệt, chịu xói mòn, còn hỗn hợp keo là thành phần nền để liên kết các tấm vải sợi. Trong thành phần keo nền, quá trình tương tác của các nguyên liệu đầu được thể hiện qua hai giai đoạn: Sự phối trộn dung môi furfural với chất xúc tác phản ứng trùng ngưng (urotropin) và sự phối trộn hỗn hợp furfural-urotropin với nhựa phenolic (novolac). Trong quá trình khuấy trộn furfural và urotropin sẽ xảy ra sự phân hủy urotropin, dẫn đến tạo ra các cầu nối dimethylamin ($-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{CH}_2-$) và trimethylamin ($-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$). Tiếp đến, tương tác giữa các phân tử nhựa novolac và urotropin sẽ tạo ra các cầu nối metyl ($-\text{CH}_2-$) và liên kết bền nhiệt dạng ($-\text{CH}=\text{N}-\text{CH}_2-$). Việc sử dụng dung môi furfural thay vì các dung môi bay hơi thông thường (như cồn ethylic, axeton...) có một số ưu điểm sau: Dung môi furfural khi có mặt của urotropin sẽ tạo ra mạng không gian dạng nhựa trong quá trình đóng rắn, đồng thời hạn chế được lỗ xốp trong vật liệu composite so với các dung môi thông thường.

Trong bảng 3 trình bày sự ảnh hưởng nhiệt độ và thời gian sấy đến chất lượng bán thành phẩm vật liệu composite. Kết quả cho thấy, dưới sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian sẽ xảy ra quá trình đóng rắn sơ bộ của hỗn hợp keo nền. Điều kiện tối ưu để thu được bán thành phẩm khô và có màu vàng nhạt là ở nhiệt độ 90°C và thời gian sấy 0,5-1,0 h.

Kết quả đo hàm lượng nhựa phenolic trong bán thành phẩm và phôi sản phẩm được trình bày trong bảng 4. Nhận thấy rằng, khi tăng hàm lượng nhựa phenolic thì độ nhớt của hỗn hợp keo nền tăng, đồng thời hàm lượng nhựa phenolic trong bán thành phẩm và phôi sản phẩm của vật liệu composite cũng sẽ tăng. Tuy nhiên, từ thực nghiệm cho thấy, mẫu 4 có độ nhớt tương đối cao (704 ± 10 s), gây khó khăn cho công đoạn quét hỗn hợp keo lên bề mặt lớp vải sợi. Cho nên, tỷ lệ hàm lượng nhựa phenolic tối ưu là 90-110 pkl so với hàm lượng dung môi furfural. Độ hao hụt khối lượng nhựa phenolic trong bán

thành phẩm giảm so với trong mẫu phôi sản phẩm là do trong quá trình nén ép một phần hỗn hợp keo bị đẩy ra ngoài vải sợi và một phần lượng dung môi furfural không tham gia liên kết bị thoát ra ngoài.

Bảng 3. Sự ảnh hưởng nhiệt độ và thời gian sấy đến chất lượng bán thành phẩm.

Thời gian (h)	Nhiệt độ (°C)			
	70	80	90	100
0,5	Dính, ướt	Dính, ướt	Khô, màu vàng nhạt	Khô, màu nâu đen
1,0	Dính, ướt	Còn dính, ướt	Khô, màu vàng nhạt	-
1,5	Dính, ướt	Khô, màu vàng nhạt	Khô, màu nâu đen	-

Bảng 4. Tính chất của hỗn hợp keo nền nhựa phenolic.

Tính chất	Giá trị			
	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4
Furfural/phenolic	100/90	100/100	100/110	100/120
Độ nhớt hỗn hợp keo nền (s)	80 ± 5	147 ± 5	326 ± 7	704 ± 10
Hàm lượng nhựa phenolic trong bán thành phẩm (%)	$37,50 \pm 0,7$	$38,80 \pm 0,5$	$40,10 \pm 0,5$	$42,85 \pm 0,5$
Hàm lượng nhựa phenolic trong phôi sản phẩm (%)	$35,20 \pm 0,7$	$36,15 \pm 0,5$	$37,21 \pm 0,5$	$39,95 \pm 0,5$

Công nghệ nén ép vật liệu composite ảnh hưởng trực tiếp chất lượng phôi sản phẩm, chúng bao gồm các yếu tố như nhiệt độ, thời gian và áp lực ép. Thực nghiệm cho thấy, sau khi sắp xếp các bán thành phẩm vào khuôn ép, chúng cần được ép sơ bộ ở nhiệt độ khoảng 80-100°C (thấp hơn nhiệt độ đóng rắn 155°C) dưới áp lực ép thấp 10-20 kg/cm². Điều này sẽ giúp cho hỗn hợp keo nền phenolic được dẻo hóa trước khi đóng rắn, đồng thời giúp điền đầy bề mặt các tấm vải sợi và đẩy toàn bộ phần dung môi còn lại ra khỏi khuôn ép. Tiếp theo, tăng nhiệt độ đến 155°C và lực ép đến 80-100 kg/cm², thời gian đóng rắn 1,0 h. Sau đó, khuôn được làm nguội tự nhiên dưới áp lực ép. Với công nghệ chế tạo này, phôi sản phẩm vật liệu composite sẽ không có khuyết tật, lỗ khí...

3.2. Tính chất cơ lý của vật liệu composite

Tính chất cơ lý là một trong những đặc tính quan trọng để đánh giá độ bền của vật liệu composite. Kết quả một số tính chất cơ lý của các mẫu vật liệu composite SP

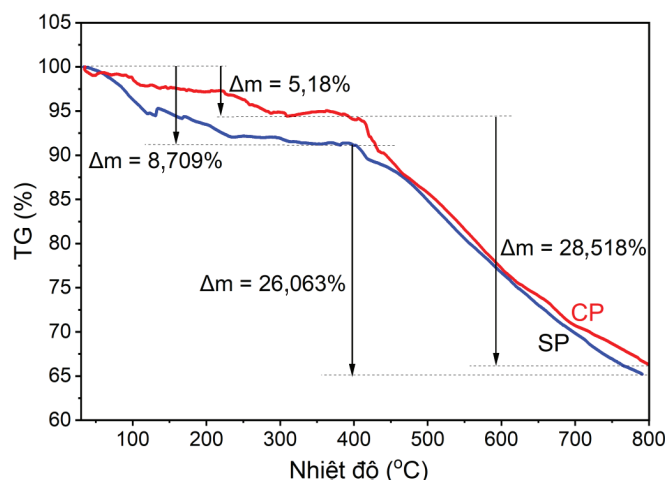
và CP được trình bày trong bảng 5. Kết quả cho thấy, các mẫu vật liệu composite nghiên cứu có mật độ tương đối thấp, độ cứng và độ bền nén tương đối cao. Trong đó, vật liệu composite CP có độ cứng và độ bền nén cao hơn vật liệu composite SP lần lượt là 3,3 và 30,3%. Thực tế, bản chất lớp vải sợi carbon đã có độ bền kéo, độ dai, độ cứng và khả năng chịu lực nén tốt hơn lớp vải sợi silica.

Bảng 5. Tính chất cơ lý của vật liệu composite.

Tính chất	Silica/phenolic	Carbon/phenolic
Mật độ (g/cm ³)	1,580±0,014	1,620±0,018
Độ cứng Shore D	93,57±0,90	96,70±0,70
Độ bền nén (MPa)	334,8±2,5	436,2±3,8
Độ biến dạng khi vỡ (%)	18,42±0,81	22,40±0,71

3.3. Tính chất chịu nhiệt và chịu xói mòn của vật liệu composite

Tính chịu nhiệt là một trong những đặc tính hóa lý quan trọng để đánh giá vật liệu composite dưới tác động của dòng nhiệt độ cao. Đường cong phân hủy nhiệt (TGA) của mẫu SP và CP được trình bày trên hình 4. Độ hao hụt khối lượng của mẫu vật liệu composite SP và CP ở nhiệt độ nhỏ hơn 400°C lần lượt là 8,7% và 5,18%, trong khoảng nhiệt độ 400-800°C lần lượt là 26,063 và 28,518%, tương ứng tổng khối lượng hao hụt là 34,7 và 33,7%. Như vậy, trong khoảng nhiệt độ đến 800°C, phần lớn thành phần nhựa nền phenolic bị phân hủy hoàn toàn đối với cả hai mẫu vật liệu, thành phần còn lại là lớp



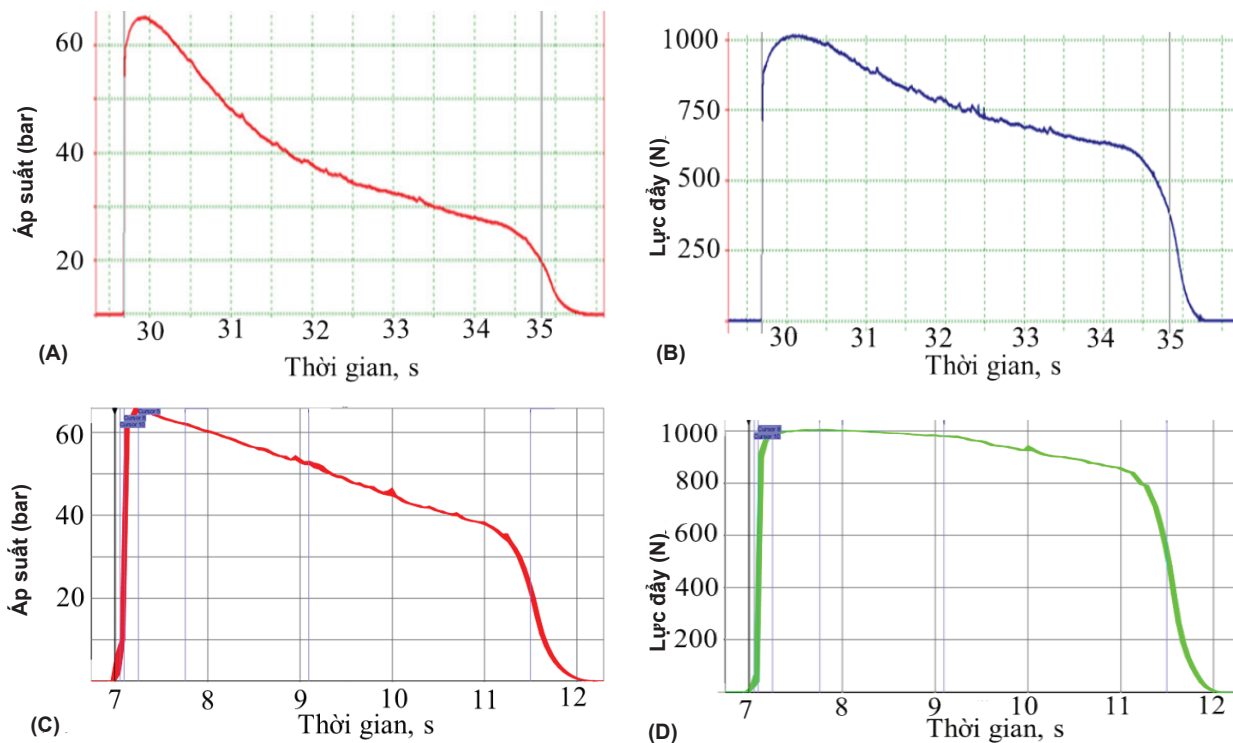
Hình 4. Đường cong phân hủy nhiệt của vật liệu composite SP và CP.

vải sợi không bị phân hủy. Điều này cho thấy, khả năng chịu nhiệt của hai loại vật liệu composite là tương đối cao. Tuy nhiên, để so sánh hai loại vật liệu này cần tiến hành thử nghiệm ở điều kiện khắc nghiệt hơn, ví dụ như đốt thử nghiệm trong động cơ nhiên liệu rắn hỗn hợp (nhiệt độ đến 2500-3000°C).

Để đánh giá khả năng chịu xói mòn của vật liệu composite SP và CP, nhóm tác giả đã tiến hành đốt thử nghiệm trong động cơ mẫu nhiên liệu rắn hỗn hợp (kiểu cháy định diện) với việc sử dụng các vật liệu composite làm khối tới hạn của cụm loa phụt (hình 5). Đồ thị áp suất và lực đẩy theo thời gian của động cơ được trình bày trong hình 6. Đồ thị đường cong áp suất và lực đẩy theo thời gian đảm bảo quy luật cháy khi đốt thử nghiệm trong động cơ nhiên liệu rắn hỗn hợp, sử dụng vật liệu composite SP và CP làm khối tới hạn của loa phụt [4, 14-15]. Sản phẩm cháy của nhiên liệu rắn hỗn hợp bao gồm các sản phẩm khí như CO, H₂O, CO₂, HCl, N₂, H₂, đặc biệt còn có các sản phẩm rắn dạng hạt từ bột nhôm (Al, Al₂O₃, AlCl₃, Al(OH)₃). Kết quả đốt thử nghiệm trong động cơ mẫu nhiên liệu rắn hỗn hợp được trình bày trong bảng 6. Dưới tác động dòng chảy của các sản phẩm này trong điều kiện áp suất và nhiệt độ cao, vật liệu composite SP và CP bị xói mòn tuyến tính, với tốc độ xói mòn lần lượt là 0,552 và 0,348 mm/s. Trong đó, trong cùng một điều kiện thử nghiệm, vật liệu composite CP có tốc độ xói mòn thấp hơn, nghĩa là khả năng chịu xói mòn dưới tác động của sản phẩm cháy cao hơn so với vật liệu composite SP, điều này có thể lý giải là do lớp vải sợi carbon (đã được graphit hóa) bền hơn, dai hơn, chịu nhiệt tốt hơn (đến 2000-3000°C) so với lớp vải sợi silica (đến 1700°C).



Hình 5. Cụm loa phụt. (A) Cụm loa phụt trước và sau khi đốt thử nghiệm; (B) Khối tới hạn sau khi đốt thử nghiệm.



Hình 6. Kết quả đốt thử nghiệm của động cơ sử dụng khối tới hạn làm từ vật liệu composite. (A) Đồ thị áp suất đối với vật liệu composite SP; (B) Đồ thị lực đẩy đối với vật liệu composite SP; (C) Đồ thị áp suất đối với vật liệu CP; (D) Đồ thị lực đẩy đối với vật liệu CP.

Bảng 6. Kết quả đốt thử nghiệm động cơ sử dụng khối tới hạn làm từ vật liệu composite.

Tính chất	Silica/phenolic	Carbon/phenolic
Áp suất cực đại (bar)	65,1	65,8
Lực đẩy cực đại (N)	1017	1050
Tổng xung lực đẩy (N.s)	3965	4108
Đường kính tới hạn ban đầu (mm)	12,0	12,0
Đường kính tới hạn sau khi đốt (mm)	17,69	15,10
Thời gian cháy (s)	5,15	4,45
Tốc độ xói mòn (mm/s)	0,552	0,348

Như vậy, nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu công nghệ chế tạo vật liệu composite SP và CP, đồng thời nghiên cứu các tính chất cơ lý, khả năng chịu nhiệt và chịu xói mòn của chúng. Tùy thuộc vào mục đích và yêu cầu sử dụng, chúng ta có thể lựa chọn loại vật liệu có các tính chất phù hợp.

4. Kết luận

Nhóm tác giả đã nghiên cứu công nghệ chế tạo vật liệu composite SP và CP, trong đó lớp vải sợi silica hoặc vải sợi carbon đóng vai trò làm thành phần cốt sợi, còn nhựa phenolic là thành phần nền. Đã thiết lập các điều kiện kỹ thuật trong chế tạo sản phẩm, trong đó hàm lượng nhựa

phenolic tối ưu là 90-110 pkl dung môi furfural, bán thành phẩm được sấy ở nhiệt độ 90°C trong thời gian 0,5-1,0 h, lực ép phôi sản phẩm là 10-20 kg/cm² ở nhiệt độ 80-100°C và 80-100 kg/cm² ở nhiệt độ 155°C. Vật liệu composite SP và CP lần lượt có mật độ là 1,58 và 1,62 g/cm³, độ cứng shore D là 93,57 và 96,70, và độ bền nén là 334,8 và 436,2 MPa. Độ hao hụt khối lượng của vật liệu composite SP và CP ở nhiệt độ đến 800°C lần lượt là 34,7 và 33,7%. Khi đốt thử nghiệm trong động cơ nhiên liệu rắn hỗn hợp, tốc độ xói mòn của vật liệu composite SP và CP lần lượt là 0,552 và 0,348 mm/s. Như vậy, vật liệu composite do nhóm tác giả nghiên cứu chế tạo có độ bền cơ lý cao, khả năng chịu nhiệt và khả năng chịu xói mòn tốt khi thử nghiệm trong điều kiện khắc nghiệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Wanberg (2013), *Composite Materials, Fabrication Handbook*, 146pp.
- [2] R.W. Farmer (1974), "Extended heating ablation of carbon phenolic and silica phenolic", *National Technical Information Service*, Ohio, pp.1-55.
- [3] J.R. Johnston, R.A. Signorelli, J.C. Freche (1966), "Performance of rocket nozzle materials with several solid propellants", *National Aeronautics and Space Administration*, pp.1-26.

- [4] G. Ayyappan, S.B. Tiwari, R.S. Praveen, et al. (2017), "Investigation on composite throat insert for cryogenic engines", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **171**, pp.1-9, DOI: 10.1088/1757-899X/171/1/012146.
- [5] X. Chen, R. Liu, H.Y. Du (2015), "Erosion study of silica phenolic nozzles with graphite Inserts in solid rocket motors", *Advanced Materials Research*, **1095**, pp.573-578, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1095.573.
- [6] J.A. Jithin, S.K. Panigrahi, P. Pasikumar, et al. (2022), "Ablative properties, thermal stability, and compressive behaviour of hybrid silica phenolic ablative composites", *Polymer Degradation and Stability*, **203**, DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110063.
- [7] G.P. Richter, T.D. Smith (1995), "Ablative material testing for low-pressure, low-cost rocket engines", *NASA Technical Memorandum*.
- [8] C.O. Alanyalioglu, Y. Ozyoruk (2021) "Conjugate analysis of silica-phenolic charring ablation coupled with interior ballistics", *Journal of Propulsion and Power, AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, DOI: 10.2514/1.B37839.
- [9] A.J.A. Jithin, S.K. Panigrahi, P. Pasikumar, et al. (2022), "Thermophysical properties of hybrid silica phenolic ablative composite: Theoretical and experimental analysis", *Polymer Composites*, **43(10)**, pp.1-18, DOI: 10.1002/pc.26766.
- [10] G. Pulci, J. Tirillo, F. Marra, et al. (2010), "Carbon-phenolic ablative materials for re-entry space vehicles: Manufacturing and properties", *Composites: Part A*, **41**, pp.1483-1490, DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.06.010.
- [11] H. Cheng, Z. Fan, C. Hong, et al. (2021), "Lightweight multiscale hybrid carbon-quartz fiber fabric reinforced phenolic-silica aerogel nanocomposite for high temperature thermal protection", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **143**, DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106313.
- [12] Y. Ji, S. Han, Z. Chen, et al. (2022), "Understanding the role of carbon fiber skeletons in silicone rubber-based ablative composites", *Polymers*, **14**, DOI: 10.3390/polym14020268.
- [13] G. Pelin, C.E. Pelin, A. Stefan, et al. (2023), "Oxy-butane ablation testing of thermal protection systems based on nanomodified phenolic resin matrix materials", *Polymers*, **15**, DOI: 10.3390/polym15194016.
- [14] C.O. Alanyalioglu (2017), "Simple and accurate method for determination of solid rocket motor nozzle throat history", *AIAA Propulsion and Energy Forum*, pp.1-8, DOI: 10.2514/6.2017-4860.
- [15] J.R. Wilhelm (1965), "Ablation of reffrasil-phenolic nozzle inserts in solid propellant exhausts", *Journal of Spacecraft*, **2(3)**, pp.337-344, DOI: 10.2514/3.28181.