

ĐỘ BỀN KHÍ HẬU CỦA VẢI TPU CHẾ TẠO BỂ MỀM CHỨA NHIÊN LIỆU VÀ NƯỚC PHỤC VỤ VÙNG BIỂN ĐẢO

CLIMATIC DURABILITY OF TPU FABRIC FOR FLEXIBLE FUEL AND WATER TANKS IN MARINE ENVIRONMENTS

ĐOÀN QUÝ HIẾU

Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt Nga

Email liên hệ: dqhieus57@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1028>

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thử nghiệm tự nhiên vải đặc chủng TPU sử dụng chế tạo bể mềm chứa xăng dầu và nước ngọt trong điều kiện khí hậu biển đảo. Mẫu vật liệu được phơi ngoài trời trên sân bê tông liên tục trong thời gian 6 tháng, chịu tác động đồng thời của bức xạ tử ngoại, nhiệt độ, độ ẩm cao. Các chỉ tiêu cơ lý và chức năng được đánh giá định kỳ gồm độ bền kéo đứt, độ bền xé rách, độ thấm nước toàn phần và độ bền màu ma sát theo các tiêu chuẩn TCVN/ISO tương ứng. Đồng thời, hình thái bề mặt vật liệu được quan sát bằng hiển vi điện tử quét (SEM) tại thời điểm 3 tháng và 6 tháng nhằm phân tích cơ chế lão hóa vi cấu trúc. Kết quả cho thấy sau 6 tháng phơi mẫu, các tính chất cơ học của vật liệu suy giảm ở mức độ hạn chế, độ chống thấm nước đạt yêu cầu 100%. Ảnh SEM ghi nhận cấu trúc liên kết giữa lớp phủ và cốt sợi vẫn được duy trì tương đối ổn định trong giai đoạn đầu lão hóa. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học bước đầu cho việc đánh giá độ bền khí hậu và dự báo tuổi thọ vật liệu vải TPU sử dụng trong bể mềm phục vụ hậu cần biển đảo.

Từ khóa: Vải TPU, bể mềm, lão hóa tự nhiên, cơ chế suy giảm, môi trường biển đảo.

Abstract

This paper presents the results of a natural exposure study on specialized TPU fabric used for manufacturing flexible tanks for fuel and freshwater storage in marine and island climatic conditions. The material samples were continuously exposed outdoors on a concrete yard for six months, under the combined effects of ultraviolet radiation, temperature, and high humidity. Mechanical and functional properties were periodically evaluated, including tensile strength, tear strength, total water permeability,

and color fastness to rubbing, in accordance with relevant TCVN/ISO standards. In addition, the surface morphology of the material was examined using scanning electron microscopy (SEM) at 3 and 6 months to analyze microstructural aging mechanisms. The results indicate that after six months of exposure, the mechanical properties of the material exhibited only limited degradation, while water resistance maintained 100% compliance with the required specification. SEM observations confirmed that the interfacial bonding structure between the TPU coating and the reinforcing fabric remained relatively stable during the early stage of aging. The obtained findings provide an initial scientific basis for evaluating climatic durability and predicting the service life of TPU fabric materials used in flexible tanks for marine and island logistics applications.

Keywords: TPU fabric, flexible tank, natural aging, degradation mechanism, marine and island environment.

1. Mở đầu

Vật liệu vải đặc chủng phủ polymer sử dụng trong chế tạo bể mềm chứa xăng dầu và nước ngọt là một hệ composite nhiều pha gồm lớp cốt sợi chịu lực và lớp phủ polymer đảm nhiệm chức năng chống thấm, kháng hóa chất và bảo vệ môi trường. Trong điều kiện khai thác tại vùng biển đảo nhiệt đới, vật liệu phải làm việc dưới tác động tổng hợp của bức xạ tử ngoại (UV), nhiệt độ cao, độ ẩm lớn, sol khí muối và vi sinh vật. Các yếu tố này gây ra quá trình lão hóa khí hậu phức hợp, dẫn đến biến đổi cấu trúc polymer và suy giảm tính chất cơ lý theo thời gian [1], [2].

Theo các nghiên cứu về thử nghiệm phơi mẫu ngoài trời đối với vật liệu polymer và dệt kỹ thuật, sự suy giảm tính chất trong điều kiện tự nhiên phản ánh tổng hợp tác động của quang oxy hóa, nhiệt phân và ẩm hóa kéo dài [3]. Phương pháp thử nghiệm khí hậu

tự nhiên (outdoor rack testing) cho phép đánh giá sát thực tế quy luật lão hóa vật liệu trong các vùng khí hậu khác nhau, đồng thời cung cấp cơ sở dữ liệu để dự báo tuổi thọ khai thác [3], [4]. Đặc biệt, tài liệu phương pháp luận của Kirillov và cộng sự nhấn mạnh rằng sự biến đổi tính chất cơ học của polymer sau phơi mẫu cần được phân tích gắn với cơ chế phá hủy cấu trúc ở cấp độ phân tử và vi mô [4].

Đối với lớp phủ polymer như TPU hoặc PVC, cơ chế lão hóa chủ yếu bắt đầu bằng quá trình quang oxy hóa. Dưới tác dụng của bức xạ UV, các nhóm chức nhạy sáng hấp thụ năng lượng và hình thành gốc tự do. Các gốc này phản ứng với oxy tạo thành gốc peroxy và hydroperoxide, kích hoạt phản ứng oxy hóa dây chuyền, dẫn đến cắt mạch polymer hoặc hình thành liên kết ngang thứ cấp. Kết quả là giảm khối lượng phân tử trung bình, tăng độ giòn và xuất hiện vi nứt bề mặt [2]. Khi nhiệt độ bề mặt tăng cao do hấp thụ bức xạ hồng ngoại, động học phản ứng phân hủy được gia tốc theo quy luật Arrhenius, làm tăng tốc quá trình suy giảm cơ tính [4].

Bên cạnh đó, vật liệu dệt kỹ thuật còn chịu tác động của cấu trúc sợi và công nghệ hoàn tất. Các nghiên cứu về vải dệt polyester và cotton-acrylic cho thấy mật độ sợi, cấu trúc dệt và quá trình xử lý hoàn tất ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng thấm nước và độ bền cơ học [6], [7], [8]. Sự suy giảm lớp phủ polymer dưới tác động khí hậu có thể làm lộ cốt sợi bên trong, từ đó làm thay đổi cơ chế chịu tải của vật liệu tổng thể.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc đánh giá độ bền môi trường và cơ chế lão hóa của vật liệu thermoplastic polyurethane (TPU) khi chịu tác động của các yếu tố môi trường khác nhau. Choi và Kim [9] đã nghiên cứu sự suy giảm và dự đoán tuổi thọ của lớp phủ TPU trong môi trường nước biển, cho thấy các quá trình lão hóa có thể dẫn đến biến đổi cấu trúc và suy giảm tính chất cơ học của vật liệu. Liu và cộng sự [10] cũng chỉ ra rằng các tác động hóa học trong môi trường có thể gây biến đổi cấu trúc polymer polyurethane và ảnh hưởng đến tính ổn định của vật liệu. Bên cạnh đó, Kowalska và cộng sự [11] đã phân tích mối liên hệ giữa cấu trúc phân tử và độ bền thủy phân, nhiệt của các elastomer TPU, cho thấy cấu trúc polymer đóng vai trò quan trọng đối với độ bền môi trường của vật liệu.

Các nghiên cứu khác cũng cho thấy quá trình lão hóa nhiệt - oxy hóa có thể gây thay đổi vi cấu trúc và làm suy giảm tính chất cơ học của TPU trong các ứng dụng kỹ thuật [12]. Ngoài ra, nhiều công trình gần đây đã tập trung làm rõ cơ chế phân hủy và biến đổi cấu trúc của TPU thông qua các nghiên cứu thực nghiệm

và mô hình hóa, góp phần làm sáng tỏ các cơ chế suy giảm vật liệu trong quá trình sử dụng [13-15]. Những kết quả này cho thấy việc nghiên cứu đánh giá độ bền của vật liệu TPU trong điều kiện môi trường thực tế là cần thiết nhằm dự báo tuổi thọ và mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu trong các kết cấu mềm chứa chất lỏng.

Đối với bề mặt polymer dùng chứa và vận chuyển xăng dầu, yêu cầu kỹ thuật không chỉ dừng ở độ bền cơ học mà còn phải bảo đảm tính ổn định hóa học khi tiếp xúc lâu dài với hydrocarbon [5]. Quá trình khuếch tán nhiên liệu vào lớp polymer có thể gây trương nở và thay đổi mô đun đàn hồi. Đối với bề mặt chứa nước ngọt, vật liệu cần duy trì khả năng chống thấm và đáp ứng các yêu cầu thử nghiệm theo tiêu chuẩn đánh giá độ bền nước của vật liệu dệt.

Mặc dù đã có các nghiên cứu về chế tạo bề mặt polymer [5] và thử nghiệm khí hậu vật liệu dệt [3], dữ liệu định lượng về quá trình lão hóa tự nhiên dài hạn của vải phủ TPU trong điều kiện biển đảo Việt Nam còn hạn chế. Việc phân tích sự suy giảm cơ tính kết hợp với quan sát vi cấu trúc là cơ sở để thiết lập mối tương quan giữa biến đổi hóa học - hình thái và tuổi thọ khai thác vật liệu.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này thực hiện thử nghiệm phơi mẫu tự nhiên 6 tháng đối với vải đặc chủng phủ TPU dùng chế tạo bề mặt chứa xăng dầu và nước ngọt. Các chỉ tiêu đặc trưng vi cấu trúc, độ bền kéo, độ bền xé rách và độ thấm nước được đánh giá định kỳ nhằm làm rõ cơ chế lão hóa polymer trong điều kiện khí hậu biển đảo nhiệt đới.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là vải đặc chủng phủ polyurethane nhiệt dẻo (TPU) sử dụng trong chế tạo bề mặt chứa xăng dầu và nước ngọt hoạt động tại vùng biển đảo. Vật liệu có cấu trúc composite nhiều lớp gồm cốt vải dệt polyester chịu lực và lớp phủ TPU hai mặt nhằm bảo đảm khả năng chống thấm và kháng hóa chất.



Hình 1. Bể mềm chứa dầu trên vùng biển đảo

Các thông số kỹ thuật danh định của vật liệu được nhà sản xuất cung cấp gồm: Khối lượng 900-1200 g/m², chiều dày 0,8-1,2 mm, độ bền kéo đứt dọc $\geq 3000N$, độ bền kéo đứt ngang $\geq 2500N$ (Bảng 1). Việc lựa chọn vật liệu này nhằm đánh giá khả năng duy trì tính chất cơ học và tính toàn vẹn cấu trúc polymer khi chịu tác động lâu dài của môi trường khí hậu biển đảo nhiệt đới.

Bảng 1. Đặc tính của vải TPU

Các chỉ số	Thông số
Khối lượng 1m ² vải, g	900 ÷ 1200
Độ dày của vải, mm	0,8 ÷ 1,2
Độ bền kéo đứt dọc, N	≥ 3000
Độ bền kéo đứt ngang, N	≥ 2500

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Thử nghiệm khí hậu tự nhiên được thực hiện bằng phương pháp phơi mẫu ngoài trời (outdoor exposure testing) tại Trạm Nghiên cứu thử nghiệm tự nhiên. Giá phơi mẫu được chế tạo theo tiêu chuẩn ISO 8565:2011 và GOST 9.906-83, bảo đảm độ nghiêng 45° so với mặt phẳng ngang và hướng về phía Nam nhằm tối đa hóa cường độ bức xạ mặt trời tiếp nhận.

Thử nghiệm tự nhiên trên sân bê tông

Mẫu vải có kích thước ban đầu 22×44 cm, được cố định trên khung kim loại bằng kẹp không gỉ, khoảng cách giữa các mẫu tối thiểu 10 cm để tránh che bóng và bảo đảm thông gió tự nhiên. Các mẫu được ký hiệu và theo dõi riêng biệt. Thời gian thử nghiệm 6 tháng. Chu kỳ thu mẫu phân tích: 0 tháng (ban đầu), 1 tháng, 2 tháng, 3 tháng, 6 tháng. Trong quá trình thử nghiệm, các yếu tố môi trường như nhiệt độ không khí, độ ẩm tương đối, lượng mưa và cường độ bức xạ mặt trời được ghi nhận định kỳ tại Trạm Nghiên cứu thử nghiệm tự nhiên nhằm phục vụ phân tích tương quan với mức suy giảm tính chất vật liệu.

Chuẩn bị mẫu sau phơi

Sau mỗi chu kỳ thu mẫu, phần mép ngoài 1 cm của mẫu được loại bỏ nhằm tránh ảnh hưởng của tập trung ứng suất và biến dạng cơ học tại vùng kẹp. Phần vật liệu còn lại được gia công thành các mẫu tiêu chuẩn phù hợp với từng phép thử cơ lý. Trước khi thử nghiệm, các mẫu được điều hòa trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ (23±2)°C và độ ẩm tương đối (65±5)% trong tối thiểu 24 giờ để ổn định trạng thái ẩm.

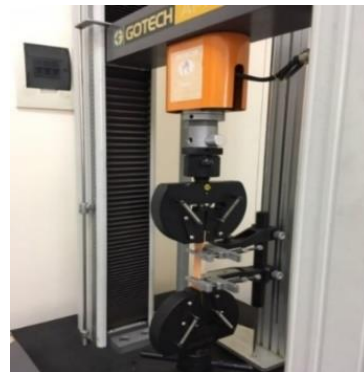
Phương pháp xác định tính chất cơ lý

Để đánh giá mức độ suy giảm cấu trúc polymer và khả năng chịu tải của vật liệu, các chỉ tiêu quan trọng sau được đánh giá theo các tiêu chuẩn Việt Nam sau mỗi chu kỳ thu mẫu:

Bảng 2. Các chỉ tiêu quan trọng

Chỉ tiêu quan trọng	Phương pháp đánh giá các chỉ tiêu quan trọng
Độ bền kéo đứt	TCVN 9549:2013 (ISO 1421:1998)
Độ bền xé rách	TCVN 10501-1:2014 (ISO 4674-1:2003)
Độ thấm nước toàn phần	TCVN 4640:1988
Độ bền mài mòn	TCVN 4538:2007 (ISO 105-X12: 2001)

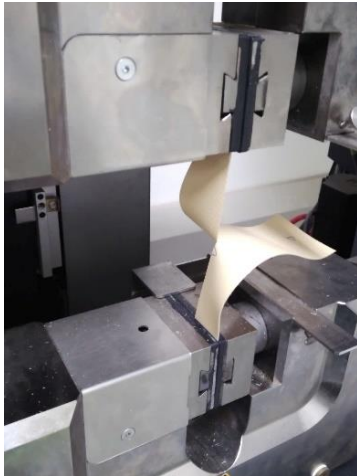
Độ bền kéo đứt của vật liệu được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 9549:2013 (ISO 1421:1998) trên máy kéo nén GOTECH với tốc độ gia tải không đổi (Hình 2). Trong quá trình thử, các thông số như lực kéo cực đại, độ giãn dài tại điểm đứt được ghi nhận đầy đủ. Kết quả thu được cho phép đánh giá khả năng chịu tải của vật liệu vải sau quá trình lão hóa tự nhiên, đồng thời phản ánh mức độ suy giảm liên kết trong mạng polymer và hiệu quả truyền ứng suất giữa lớp phủ TPU và cốt vải chịu lực.



Hình 2. Máy GOTECH đo độ bền kéo

Độ bền xé rách được xác định theo TCVN 10501-1:2014 (ISO 4674-1:2003) (Hình 3). Chỉ tiêu này đặc biệt nhạy với sự xuất hiện và phát triển của vi nứt cũng như các khuyết tật nội tại hình thành trong quá trình lão hóa quang - nhiệt. Sự suy giảm độ bền xé rách cho thấy mức độ tổn thương cấu trúc vi mô và khả năng lan truyền vết nứt trong vật liệu dưới tác động tải trọng tập trung.

Khả năng chống thấm của vật liệu được đánh giá thông qua chỉ tiêu độ thấm nước toàn phần theo TCVN 4640:1988. Phép thử này nhằm xác định mức độ suy giảm tính toàn vẹn của lớp phủ TPU sau phơi mẫu tự nhiên, đặc biệt dưới tác động của cơ chế thủy phân và sự hình thành vi nứt bề mặt. Sự gia tăng độ thấm nước là dấu hiệu trực tiếp của quá trình suy giảm cấu trúc polymer và phá vỡ liên kết giữa các pha của vật liệu.



Hình 3. Máy GOTECH đo độ bền xé rách

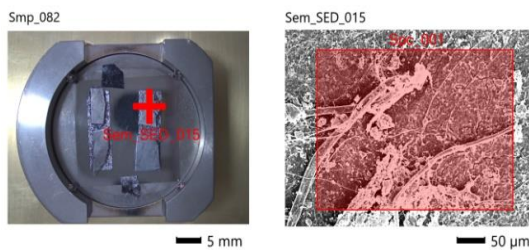
Độ bền màu ma sát được xác định theo TCVN 4538:2007 (ISO 105-X12:2001), nhằm đánh giá mức độ ổn định của hệ sắc tố và bề mặt polymer khi chịu tác động đồng thời của bức xạ tử ngoại và ma sát cơ học. Sự thay đổi màu sắc hoặc suy giảm độ bền màu phản ánh quá trình phân hủy quang hóa của polymer và các chất phụ gia ổn định.

Mỗi phép thử được tiến hành tối thiểu trên năm mẫu lặp lại để bảo đảm độ tin cậy thống kê của kết quả, đồng thời cho phép đánh giá mức độ phân tán dữ liệu và xu hướng suy giảm tính chất theo thời gian phơi mẫu.

3. Kết quả và thảo luận

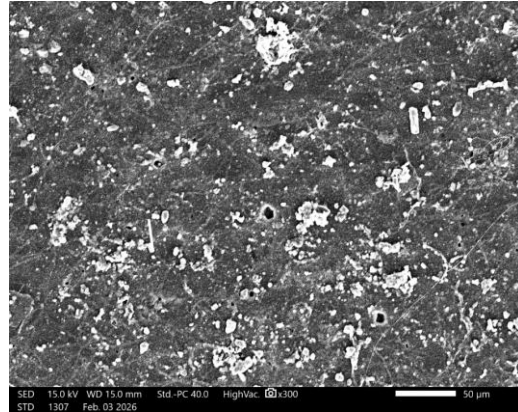
3.1. Hình ảnh chụp SEM các mẫu vải

Trước khi tiến hành thử nghiệm phơi mẫu ngoài trời, bề mặt vật liệu vải phủ TPU ở trạng thái ban đầu (0 tháng) được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) nhằm đánh giá sự biến đổi vi cấu trúc bề mặt và đặc điểm hình thái ban đầu của lớp phủ polymer. Các ảnh SEM được chụp bằng thiết bị JSM-IT200 với độ phóng đại 300 lần. Mẫu vải được chuẩn bị gồm 3 mẫu nhỏ đặt trên khay mẫu. Hình ảnh chuẩn bị mẫu chụp được trình bày ở Hình 4.



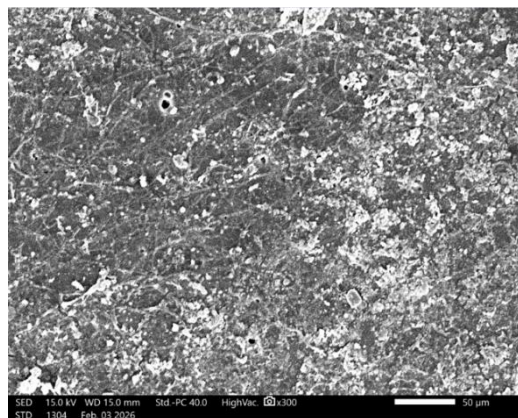
Hình 4. Chuẩn bị mẫu vải chụp SEM

Kết quả quan sát cho thấy bề mặt lớp phủ TPU tương đối phẳng và đồng nhất, không phát hiện các khe nứt hoặc khuyết tật bề mặt có kích thước đáng kể (Hình 5). Lớp phủ polymer bám dính tốt vào cốt vải polyester gia cường, tạo nên cấu trúc composite liên tục và ổn định. Đặc điểm vi cấu trúc này phản ánh trạng thái ban đầu của vật liệu sau quá trình sản xuất và được sử dụng làm cơ sở đối chứng để đánh giá các biến đổi hình thái bề mặt trong quá trình lão hóa khí hậu tự nhiên.



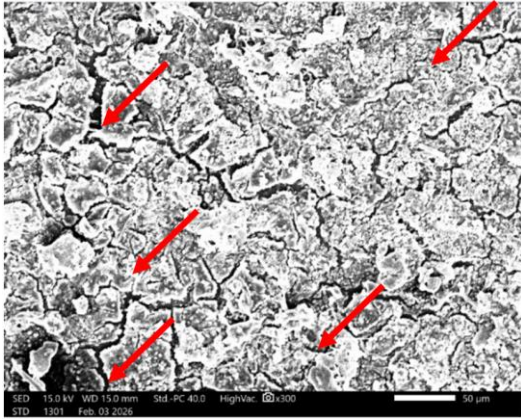
Hình 5. Hình ảnh chụp SEM các mẫu vải trên sân bê tông tại thời điểm ban đầu với độ phóng đại 300 lần

Tại thời điểm 3 tháng thử nghiệm, bề mặt lớp phủ TPU quan sát ở độ phóng đại 300 lần cho thấy xuất hiện các vi khe nứt ngắn, phân bố rải rác và chưa liên kết với nhau thành mạng lưới liên tục (Hình 6). Các vi nứt này có chiều rộng rất nhỏ, chủ yếu phát triển theo hướng ngẫu nhiên và tập trung tại các vị trí có ứng suất dư cao, đặc biệt gần các vùng tiếp xúc với khung cố định. Cấu trúc tổng thể của lớp phủ tương đối đồng nhất, không có hiện tượng bong tách khỏi cốt sợi. Điều này phù hợp với mức suy giảm cơ tính nhỏ trong giai đoạn đầu.



Hình 6. Hình ảnh chụp SEM các mẫu vải trên sân bê tông sau 3 tháng thử nghiệm với độ phóng đại 300 lần

Tại thời điểm 6 tháng, hình ảnh SEM cho thấy mật độ vết nứt tế vi tăng lên rõ rệt so với mốc 3 tháng (Hình 7, tại vị trí các mũi tên đỏ). Các vi nứt bắt đầu có xu hướng kéo dài hơn và xuất hiện một số vị trí liên kết cục bộ giữa các khe nứt lân cận, tạo thành cấu trúc vi mạng chưa hoàn chỉnh. Bề mặt lớp phủ xuất hiện dấu hiệu nhám hóa và có biểu hiện phân hóa nhẹ. Sự hình thành các vết nứt này có thể liên quan đến quá trình lão hóa vật liệu dưới tác động tổng hợp của bức xạ UV, nhiệt độ, môi trường khí quyển trong thời gian phơi mẫu.



Hình 7. Hình ảnh chụp SEM các mẫu vải trên sân bê tông sau 6 tháng thử nghiệm với độ phóng đại 300 lần

3.2. Độ bền kéo đứt

Kết quả độ bền kéo đứt của mẫu vải theo hai phương dọc và ngang được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Giá trị độ bền kéo mẫu vải

Thời gian	Độ bền kéo đứt (N)	
Ban đầu	Dọc	3998
	Ngang	3280
1 tháng	Dọc	3870
	Ngang	3250
2 tháng	Dọc	3840
	Ngang	3233
3 tháng	Dọc	3810
	Ngang	3220
6 tháng	Dọc	3750
	Ngang	3129

Ban đầu, độ bền kéo đạt 3998N (dọc) và 3280N (ngang). Sau 6 tháng phơi mẫu tự nhiên, giá trị này giảm xuống còn 3750N (dọc) và 3129N (ngang).

Như vậy phương dọc giảm 6,2%, phương ngang giảm 4,6% so với ban đầu. Xu hướng suy giảm diễn ra tương đối đều theo thời gian, không xuất hiện sự sụt giảm đột ngột. Điều này cho thấy trong 6 tháng

đầu, vật liệu vẫn nằm trong vùng suy giảm tuyến tính và chưa đạt đến ngưỡng phát triển vi nứt liên kết mạng, vốn là đặc trưng của giai đoạn lão hóa tăng tốc.

Sự suy giảm cơ tính được giải thích bởi cơ chế quang oxy hóa bề mặt lớp phủ TPU dưới tác động của bức xạ UV kết hợp với nhiệt độ môi trường cao. Quá trình cắt mạch polymer làm giảm khả năng truyền ứng suất từ lớp phủ sang cốt sợi polyester. Tuy nhiên, do cốt vải chịu lực chính vẫn giữ được tính toàn vẹn cấu trúc, nên mức suy giảm tổng thể của độ bền kéo chưa lớn.

3.3. Độ bền xé rách

Độ bền xé rách cũng thể hiện xu hướng suy giảm tương tự. Giá trị ban đầu đạt 426N (dọc) và 603N (ngang). Sau 6 tháng, các giá trị này lần lượt còn 402N và 568N, tương ứng mức giảm khoảng 5,6% và 5,8% (Bảng 4).

Bảng 4. Giá trị độ bền xé rách mẫu vải

Thời gian	Độ bền xé rách (N)	
	Dọc	426
Ban đầu	Ngang	603
	Dọc	421
1 tháng	Ngang	600
	Dọc	418
2 tháng	Ngang	598
	Dọc	410
3 tháng	Ngang	580
	Dọc	402
6 tháng	Ngang	568

So với độ bền kéo, độ bền xé rách nhạy cảm hơn với sự xuất hiện của các vi khuyết tật bề mặt vì cơ chế phá hủy trong phép thử xé phụ thuộc mạnh vào khả năng chống lan truyền vết nứt. Sự suy giảm này phản ánh sự hình thành các vi nứt phân tán trong lớp phủ TPU trong quá trình phơi mẫu ngoài trời.

3.4. Độ thấm nước toàn phần

Kết quả đo độ thấm nước toàn phần cho thấy trong toàn bộ 6 tháng thử nghiệm, giá trị độ thấm nước duy trì ở mức 0%.

Điều này chứng tỏ rằng mặc dù các tính chất cơ học có xu hướng suy giảm nhẹ, lớp phủ TPU vẫn duy trì được tính toàn vẹn và chưa hình thành hệ vi kênh xuyên suốt cấu trúc. Nước chưa thể khuếch tán xuyên qua lớp phủ để tạo thành hiện tượng thấm toàn phần. Đây là kết quả quan trọng đối với ứng dụng bề mặt chứa nước ngọt và xăng dầu, vì yêu cầu chống thấm là tiêu chí an toàn hàng đầu.

Bảng 5. Giá trị độ thấm nước toàn phần

Thời gian	Độ thấm nước toàn phần (%)
Ban đầu	0
1 tháng	0
2 tháng	0
3 tháng	0
6 tháng	0

3.5. Độ bền màu ma sát

Độ bền màu ma sát duy trì ở mức 4-5 trong 3 tháng đầu, cả trong điều kiện ma sát khô và ướt. Sau 6 tháng, giá trị ma sát khô giảm xuống mức 3-4, trong khi ma sát ướt vẫn giữ ở mức 4-5 theo phương dọc và 3-4 theo phương ngang. Sự suy giảm nhẹ này phản ánh quá trình phân hủy quang hóa của lớp bề mặt polymer và hệ sắc tố dưới tác động của bức xạ tử ngoại. Hiện tượng phân hóa nhẹ bắt đầu xuất hiện, làm giảm khả năng chống mài mòn bề mặt khi ma sát khô, nhưng chưa ảnh hưởng đáng kể đến chức năng sử dụng.

Bảng 6. Giá trị độ bền màu ma sát

Thời gian	Độ bền màu ma sát (cấp)		
Ban đầu	Khô	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
	Uớt	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
1 tháng	Khô	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
	Uớt	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
2 tháng	Khô	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
	Uớt	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
3 tháng	Khô	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
	Uớt	Dọc	4-5
		Ngang	4-5
6 tháng	Khô	Dọc	3-4
		Ngang	3-4
	Uớt	Dọc	4-5
		Ngang	3-4

Nhìn chung, kết quả 6 tháng thử nghiệm cho thấy quá trình lão hóa của vải phủ TPU trong điều kiện khí hậu tự nhiên chủ yếu diễn ra ở lớp bề mặt và theo cơ chế quang oxy hóa kết hợp với ứng suất nhiệt chu kỳ. Mức độ suy

giảm chưa đủ lớn để làm mất chức năng làm việc của vật liệu, nhưng các dấu hiệu vi cấu trúc cho thấy nếu kéo dài thời gian phơi mẫu, quá trình vi nứt có thể phát triển mạnh hơn và dẫn đến giai đoạn suy giảm tăng tốc.

Thực tế, các vi nứt quan sát được trên ảnh SEM chủ yếu là các vi nứt bề mặt có kích thước rất nhỏ và chưa xuyên qua toàn bộ chiều dày của lớp phủ TPU. Do đó, trong giai đoạn thử nghiệm 6 tháng đầu, các vi nứt này chưa tạo thành các đường dẫn liên tục cho nước thấm qua lớp phủ polymer. Vì vậy, vật liệu vẫn duy trì được khả năng chống thấm hoàn toàn trong phép thử độ thấm nước toàn phần. Hiện tượng này phù hợp với cơ chế lão hóa điển hình của vật liệu polymer, trong đó các vi nứt bề mặt thường hình thành ở giai đoạn đầu và phát triển dần theo thời gian, trong khi khả năng chống thấm chỉ bị suy giảm đáng kể khi các vi nứt phát triển đủ lớn hoặc liên kết với nhau tạo thành mạng lưới xuyên suốt lớp phủ.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, thời gian thử nghiệm phơi mẫu tự nhiên sẽ được kéo dài lên 12-24 tháng nhằm đánh giá đầy đủ hơn quy luật suy giảm tính chất của vật liệu theo thời gian. Đồng thời, các thử nghiệm lão hóa gia tốc trong phòng thí nghiệm cũng sẽ được triển khai nhằm thiết lập mối tương quan giữa kết quả lão hóa tự nhiên và lão hóa gia tốc, qua đó phục vụ việc dự báo tuổi thọ khai thác của vật liệu vải phủ TPU sử dụng trong bể mềm phục vụ hậu cần vùng biển đảo. Ngoài ra có thể kết hợp thử nghiệm lão hóa môi trường với tải trọng cơ học như áp lực thủy tĩnh của chất chứa, ứng suất cơ học do quá trình nạp và xả chất lỏng, tương tác hóa học giữa lớp phủ TPU và chất lỏng chứa trong bể nhằm đánh giá toàn diện hơn độ bền khai thác của vật liệu bể mềm.

4. Kết luận

Kết quả thử nghiệm khí hậu tự nhiên trong 6 tháng cho thấy vải phủ TPU sử dụng chế tạo bể mềm biển đảo có độ ổn định cơ học tương đối tốt, với mức suy giảm độ bền kéo và độ bền xé rách dưới 7%, phản ánh khả năng chống lão hóa ngắn hạn hiệu quả trong điều kiện bức xạ UV và độ ẩm cao.

Lớp phủ TPU vẫn duy trì được tính chống thấm tuyệt đối trong toàn bộ thời gian thử nghiệm, chứng tỏ cấu trúc polymer chưa bị suy thoái đến mức hình thành vi kênh xuyên thấu, đảm bảo yêu cầu an toàn đối với ứng dụng chứa nước ngọt và xăng dầu cho vùng biển đảo.

Phân tích SEM cho thấy quá trình lão hóa mới dừng ở giai đoạn hình thành và phát triển vi nứt bề mặt, chưa xảy ra bóc tách nghiêm trọng hoặc phá hủy cấu trúc vải TPU. Điều này khẳng định vật liệu đáp ứng yêu cầu sử dụng trong điều kiện biển đảo ở giai đoạn ngắn hạn, đồng thời đặt cơ sở khoa học cho việc tiếp tục nghiên cứu đánh giá tuổi thọ dài hạn.

Lời cảm ơn

Bài báo này là sản phẩm của nhiệm vụ nghiên cứu khoa học thực hiện tại Viện Độ bền Nhiệt đới. Tác giả cảm ơn các thủ trưởng Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga đã tạo điều kiện thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Doãn Q.H. (2024), *Đánh giá hiệu quả làm việc của một số loại sơn chống nóng bằng thử nghiệm độ bền khí hậu*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 80, tr.64-70.
- [2] Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л., Николаев Е.В. (2012), *Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов*, ВИАМ, Москва.
- [3] Bedenko V.E., Stefanskaya I.V., Tropanikhin I.Y., et al. (2015), *Study of weathering resistance of textile materials in outdoor rack testing: effect of climate zone*, Fibre Chemistry, Vol.47(1), pp.58-65.
Doi: 10.1007/s10692-015-9638-5.
- [4] Karpov V.A., Kovalchuk Y.L., Komarova K.A., et al. (2023), *Study of the antimicrobial resistance of ZnO-nanocoated fabrics in tropical climates*, Technology of Inorganic Substances and Materials, Vol.57(9), pp.1088-1093.
- [5] Lê A.T., Phạm Đ.D., Vũ T.H., Nguyễn Đ.N. (2025), *Nghiên cứu chế tạo bề mặt polyme dùng để bảo quản và vận chuyển xăng dầu*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới, Số 28, tr.232-239.
Doi: 10.58334/vrtc.jtst.n28.25.
- [6] Ozturk M.K., Nergis B., Candan C. (2011), *A study of wicking properties of cotton-acrylic yarns and knitted fabrics*, Textile Research Journal, Vol.81(3), pp.324-328.
Doi: 10.1177/0040517510383611.
- [7] Luu T.T., Duong T.P. (2021), *Effect of some structural parameters on water resistance of polyester woven fabrics*, Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, Vol.57(6), pp.99-104.
- [8] Lưu T.T., Giản T.T.H., Cao T.B. (2022), *Đánh giá một số tính chất cơ lý của vải dệt thoi trước và sau xử lý hoàn tất kháng nước*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Công nghiệp Hà Nội, Số 58(4).
- [9] Choi E.Y., Kim C.K. (2023). *Degradation and lifetime prediction of thermoplastic polyurethane encapsulants in seawater for underwater acoustic sensor applications*. Polymer Degradation and Stability, Vol.209.
Doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2023.110281.
- [10] Liu H., Zhang X., Karanfil T., Liu C. (2024). *Insight into the chemical transformation and organic release of polyurethane microplastics during chlorination*. Environmental Pollution, Vol.341.
Doi: 10.1016/j.envpol.2023.122976.
- [11] Kowalska M., et al. (2024). *Structure versus hydrolytic and thermal stability of bio-based thermoplastic polyurethane elastomers*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol.149, pp.2147-2160.
Doi: 10.1007/s10973-023-12817-7.
- [12] Zhang Y., et al. (2024). *Exploring the interplay between thermo-oxidative degradation and asphalt aging in thermoplastic polyurethane-modified asphalt*. Construction and Building Materials, Vol.412.
- [13] Zhao W., Luo S., Zhuo Q., Liang Y., Li Y., Dong H., et al., (2025), *A comprehensive study on the degradation behavior and mechanism of expanded thermoplastic polyurethane*, Polymers, Vol.17(8), p. 1033.
Doi: 10.3390/polym17081033.
- [14] Salas R., Villa R., Velasco F., Macia M., Navarro V., Dupont J., Garcia-Verdugo E., Lozano P., (2025), *On the hydrolytic depolymerization of polyurethane foam wastes by ionic liquids*, Molecules, Vol.30(17), p. 3523.
Doi: 10.3390/molecules30173523.
- [15] Roig A., Wang H., Du Prez F.E., (2025), *Turning down the heat: catalyst-free, low-temperature chemical degradation of thermoplastic polyurethanes*, Polymer Chemistry, Vol.16, pp.4834-4842.

Ngày nhận bài:	26/02/2026
Ngày nhận bản sửa:	06/03/2026
Ngày duyệt đăng:	11/03/2026