

TOPOGRAPHY CONTROLLING FOR SELF-CLEANING AND ANTI-ICING PURPOSES ON COOPER SURFACE

Nguyen Thanh Binh, Giap Thi Thuy Trang*

TNU - University of Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 25/4/2025	This work presents a facile and scalable method for fabricating bioinspired superhydrophobic surfaces on copper substrates, emphasizing the interplay between surface morphology, surface energy, and interfacial liquid dynamics. The surface structuring is achieved via a two-step wet etching process with hydrochloric acid and secondary nanostructuring using hydrofluoric acid. This topography gives rise to a composite solid–air interface, thereby significantly suppressing water infiltration through capillary action. Subsequent surface functionalization with a low-surface-energy compound further reduces interfacial energy, yielding static contact angles of 161° and high liquid mobility. The modified surfaces exhibit superior self-cleaning behavior and minimal droplet pinning, attributable to reduced solid–liquid interfacial friction. Under icing conditions, the surfaces demonstrate notable anti-icing performance, characterized by delayed ice nucleation and markedly reduced ice adhesion strength. The results offer insight into the fundamental physics governing liquid–solid interactions on multiscale textured surfaces and provide a practical pathway for engineering anti-icing coatings for use in thermally extreme environments.
Revised: 26/6/2025	
Published: 26/6/2025	
KEYWORDS	
Surface wettability	
Nanostructure	
Anti-icing	
Self-cleaning	
Ice repellency	

KIỂM SOÁT HÌNH THÁI BỀ MẶT CHO MỤC ĐÍCH TỰ LÀM SẠCH VÀ CHỐNG BĂNG TUYẾT TRÊN KIM LOẠI ĐỒNG

Nguyễn Thanh Bình, Giáp Thị Thùy Trang*

Trường Đại học Sư phạm – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 25/4/2025	Nghiên cứu đề xuất phương pháp chế tạo bề mặt siêu kỵ nước lấy cảm hứng từ thiên nhiên trên nền đồng. Sự kết hợp độc đáo giữa cấu trúc nano và hợp chất hóa học kỵ nước ngăn trở sự xâm nhập của nước vào giữa các kết cấu. Các cấu trúc này được tạo ra bằng cách sử dụng phương pháp ăn mòn ướt bằng acid Hydrochloric và kết hợp với phương pháp ăn mòn ướt tăng cường bằng acid Hydrofluoric. Hình thái như vậy sẽ thúc đẩy sự kết hợp đặc biệt trên bề mặt tiếp xúc giữa cấu trúc và không khí, từ đó giảm thiểu hiệu quả sự xâm nhập của nước vào giữa các cấu trúc. Bề mặt sau khi được chức năng hóa bằng hợp chất hóa học không dính ướt có góc tiếp xúc 161° và nước có độ linh động cao. Kết quả khảo sát cho thấy khả năng tự làm sạch vượt trội và dính ướt tối thiểu, mà nguyên nhân là do ma sát cực thấp giữa chất lỏng và bề mặt. Bề mặt chức năng thể hiện hiệu suất chống đóng băng vượt trội, đặc trưng bởi sự giảm thiểu hình thành nhân tinh thể và suy giảm cường độ bám dính. Kết quả nghiên cứu cho thấy bản chất vật lý chi phối tương tác lỏng-rắn trên các bề mặt có cấu trúc micro/nano và đề xuất một cách tiếp cận trong thiết kế lớp phủ kháng băng tuyết cho các bề mặt hoạt động trong môi trường khắc nghiệt.
Ngày hoàn thiện: 26/6/2025	
Ngày đăng: 26/6/2025	
TỪ KHÓA	
Độ dính ướt	
Cấu trúc nano	
Chống đóng băng	
Tự làm sạch	
Kháng băng tuyết	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12678>

* Corresponding author. Email: tranggtt@tnue.edu.vn

1. Giới thiệu

Bề mặt chức năng hóa (Functional surfaces) là khái niệm để chỉ các bề mặt được xử lý để mô phỏng hình thái từ thiên nhiên định hướng cho các ứng dụng cụ thể [1] – [7]. Các nghiên cứu khai mở và tối ưu hóa được tập trung nghiên cứu và thu được những thành tựu nhờ sự phát triển của các công nghệ chế tạo.

Các ứng dụng mà việc chức năng hóa bề mặt hướng tới rất rộng rãi, có thể kể đến các lĩnh vực nổi bật như chống bám bẩn (self-cleaning) [8] – [10], chống dính ướt (liquid repellency) [8], [9], kháng băng tuyết [11] – [15], hay thu thập nước [7], [8]. Trong số các ý tưởng ấy, bề mặt không dính ướt tìm thấy trên lá sen (*Nelumbo nucifera*) là một trong những mô hình được nhắc đến nhiều nhất và là hình mẫu đặc trưng của mô phỏng sinh học [16]. Đặc tính tự làm sạch của bề mặt lá sen có được do một cấu trúc hai lớp micro-nano kết hợp với các tinh thể sáp không ưa nước. Các cấu trúc micro kích thước 10 μm x 10 μm được bao phủ bởi lớp sợi nano kích thước 200-300 nm ở dưới một lớp sáp. Barthlott và cộng sự [17] là nhóm nghiên cứu đầu tiên trình bày khảo sát về khả năng tự làm sạch trên bề mặt lá sen. Theo nhóm nghiên cứu của Malshe [18], bề mặt hoàn toàn không dính ướt có thể đạt được với cấu trúc đều đặn hay cấu trúc ngẫu nhiên. Các bề mặt không dính ướt đã và đang được áp dụng cho các thiết bị tự làm sạch (cửa kính nhà cao tầng, kính chắn gió), chống băng tuyết (hệ thống làm lạnh điều hòa, tủ lạnh), chống bám bẩn sinh học (vỏ thân tàu biển) [19], [20], thu thập nước (hệ thống tưới tiêu ở các khu vực khô hạn).

Các kỹ thuật chế tạo cũng rất đa dạng để tạo lập chính xác các cấu trúc bằng kỹ thuật như in thạch bản, in laser hay các cấu trúc phân bố ngẫu nhiên bằng ăn mòn ướt, ăn mòn khô. Các lớp phủ hóa học cũng rất đa dạng, phụ thuộc vào đặc tính cần trang bị trên vật liệu, có thể kể đến như FOTS (Fluoroorthotetrasilane) là hợp chất hóa học thay đổi năng lượng bề mặt, các hợp chất họ FC (FluoroCarbon) hoạt động tương tự như lớp sáp trên bề mặt lá sen. Kết quả nghiên cứu gần đây đã trình bày về sự ăn mòn ngay trên bề mặt nhôm bằng acid cho thấy kết quả tốt khi tạo lập bề mặt cấu trúc đa lớp micro-nano [2]. Nhờ kiểm soát các tiền tố như acid, Isopropyl Alcohol (IPA) và thời gian phản ứng, chúng ta có thể chế tạo được các cấu trúc mong muốn định hướng cho các mục đích cụ thể [6]. Tuy vậy, việc chế tạo bề mặt không dính ướt đòi hỏi các kỹ thuật và sự kiểm soát quy trình cao. Các cấu trúc nano không dễ dàng để có thể tạo lập trên các bề mặt, cũng như sẽ dễ dàng bị phá hủy nếu các thông số không được kiểm soát chặt chẽ. Tương tự như vậy, quy trình bao phủ hợp chất hóa học chất kỵ nước cũng cần được thiết lập chặt chẽ để đảm bảo sự kết hợp hoàn hảo giữa cấu trúc nano với độ dày lớp hóa chất [21] – [25]. Các quy trình hiện nay đòi hỏi các kỹ thuật chế tác đắt tiền cũng như điều kiện chế tạo phức tạp, tốn kém.

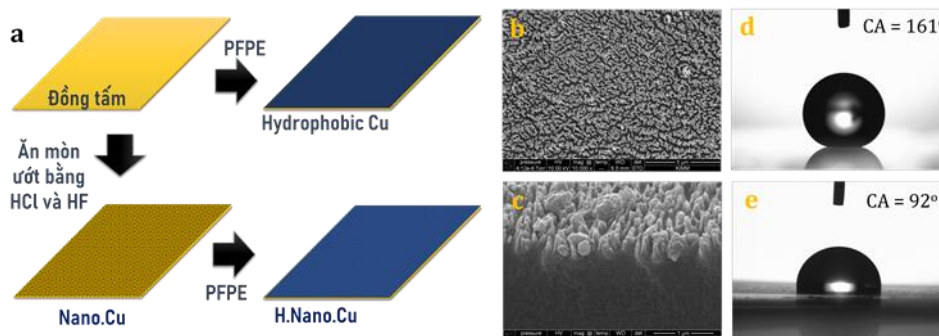
Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ trình bày quy trình chế tạo bề mặt đa chức năng trên đồng (Cu), khảo sát khả năng tự làm sạch và chống băng tuyết với hiệu quả cao. Các kết quả nghiên cứu đề xuất một phương pháp tiếp cận nhanh chóng, hiệu quả trên bề mặt vật thông dụng, định hướng ứng dụng cho các thiết bị làm việc trong môi trường khắc nghiệt.

2. Bố trí thí nghiệm

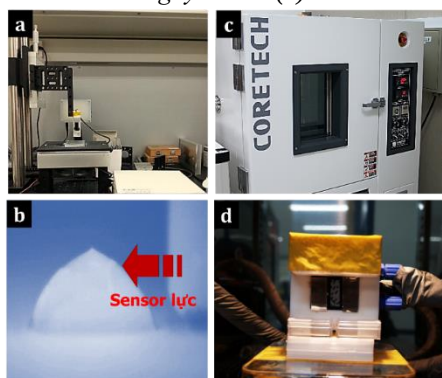
Hình 1a mô tả quy trình chế tạo bề mặt chức năng trên Cu gồm ba bước. Đầu tiên, bề mặt Cu nguyên bản được làm sạch với ethanol, acetone và nước tinh khiết (đã được loại bỏ tạp chất và các ion). Để tạo nên các cấu trúc nano, bề mặt mẫu sau khi mài được ăn mòn sơ cấp bằng acid Hydrochloric (nồng độ 35%) trong 10 phút. Bề mặt đồng được ăn mòn ướt để tạo nên các cấu trúc nano dạng sợi đều đặn có chiều cao từ 200-300 nm được quan sát bằng ảnh SEM bề mặt. Để đạt tới độ nhám cao hơn nữa, mẫu được ăn mòn tăng cường bằng acid Hydrofloric (nồng độ 40%) để tạo nên các cấu trúc nhọn, dày đặc đan xen trên bề mặt (Hình 1b,c). Để chế tạo bề mặt hoàn toàn không dính ướt, mẫu ăn mòn Nano.Cu được bao phủ bởi dung môi PFPE (PerfluoroPolyEther, 1000 ml, nồng độ 25%) trong 1 giờ và sau đó sấy khô thêm 1 giờ trong môi trường phòng thí nghiệm. PFPE là một loại polymer kỵ nước, trong đó các phân tử có cấu trúc được đặc trưng bởi các chuỗi dài của nguyên tử flo (F). Khi được sử dụng làm lớp phủ, các phân

từ PFPE tương tác với bề mặt chất nền và hướng các chuỗi nguyên tử F ra ngoài. Điều này tạo ra một lớp bề mặt có khả năng kỵ nước tốt. Sau khi phủ hóa chất, bề mặt cho thấy góc tiếp xúc nước rất cao (161°, Hình 1d) so với bề mặt nguyên bản (Hình 1e). Góc tiếp xúc và khả năng chống bám dính được xác định bằng thiết bị chụp ảnh Contact Angle (Kyowa, Co., Ltd, Nhật Bản) kết hợp với camera tốc độ cao và một đồng hồ bấm giây.

Khả năng chống bám bẩn của bề mặt chức năng được khảo sát thông qua một camera tốc độ cao. Cát mịn được trải ngẫu nhiên trên bề mặt để mô phỏng trạng thái trong thực tế. Một thể tích nước sẽ được cho lăn trượt trên bề mặt. Quá trình di chuyển này của thể tích nước được ghi nhận thông qua camera tốc độ cao.



Hình 1. Mô hình chế tạo bề mặt chức năng (a), cấu trúc bề mặt khảo sát bằng SEM với các độ phóng đại khác nhau (b, c), góc tiếp xúc đối với mẫu sau khi được chức năng hóa (d) trong sự đối sánh với mẫu đồng nguyên bản (e)



Hình 2. Bố trí thí nghiệm để đo đặc độ bám dính (a), hình ảnh sensor lực đang đo đặc độ bám dính (b), buồng môi trường khảo sát khả năng kháng băng tuyết (c) và ảnh chụp thực tế của các bề mặt chức năng đang trong quá trình đo (d)

Hình 2 trình bày bố trí thí nghiệm để đo đặc độ bám dính của băng trên bề mặt. Một thể tích nước (20 μ l) được đặt trên đế làm lạnh (thiết lập ở -10 °C) và làm lạnh nhanh thể tích nước. Sau khi hóa rắn, một cảm biến lực được sử dụng để tác động vào thể tích băng đến khi nó hoàn toàn tách khỏi bề mặt. Giá trị lớn nhất ghi nhận được trên phần mềm kết nối với cảm biến lực sẽ là độ bám dính giữa băng và bề mặt. Bằng việc đối chiếu giá trị này trên các bề mặt, chúng ta có thể khảo sát định lượng việc loại bỏ băng tuyết là dễ dàng hay khó khăn.

Để khảo sát khả năng kháng băng tuyết, mẫu được gắn trên đế làm lạnh và đặt trong buồng thí nghiệm duy trì nhiệt độ -20 °C để mô phỏng môi trường lạnh giá. Một camera tốc độ cao được sử dụng để quan sát quá trình hình thành băng trên bề mặt. Sau mỗi giờ, ảnh chụp bề mặt sẽ được ghi nhận và sử dụng phần mềm ImageJ để xử lý. Kết quả sẽ cho thấy tỉ lệ bề mặt bị bao phủ bởi băng tuyết và là cơ sở để so sánh các mẫu có hình thái bề mặt khác nhau.

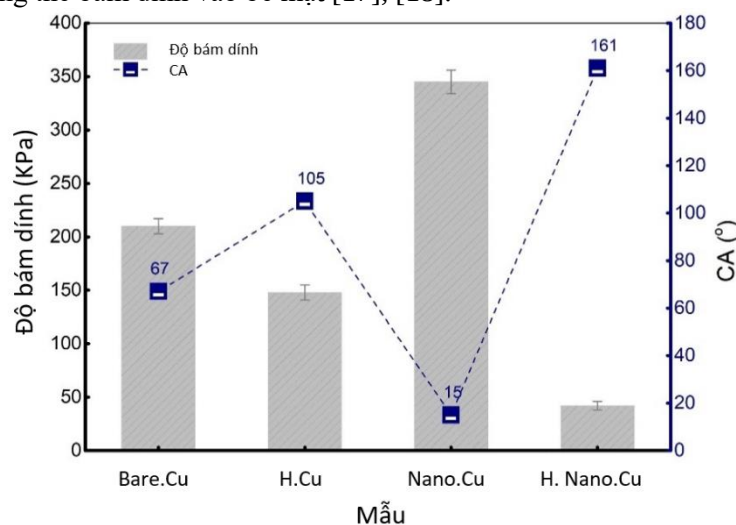
3. Kết quả và bàn luận

Bảng 1 là kết quả khảo sát trên các mẫu nguyên bản và mẫu chức năng hóa.

Bảng 1. Thông tin và kết quả khảo sát trên các mẫu được chức năng hóa

STT	Mẫu	θ (°)	Góc trượt (°)	Độ bám dính (KPa)	Diện tích bề mặt bị bao phủ (%)
#1	Đồng nguyên bản (Bare.Cu)	67	15	210	77,65
#2	Hydrophobic Cu (H.Cu)	105	10	148	64,38
#3	Nanostructure Cu (Nano.Cu)	15	--	345	89,15
#4	Functional Nanostructure Cu (H.Nano.Cu)	161	1,5	42	28,05

Sau khi được chức năng hóa, bề mặt đã ngăn cản nước mở rộng diện tích bám dính trên bề mặt. Hình thái tiếp xúc này cho thấy sự tương quan đồng nhất với các nghiên cứu có liên quan trên bề mặt silicon, hay sắt và mở ra các hướng nghiên cứu định hướng chống băng tuyết và bám bẩn vì nước không thể bám dính vào bề mặt [17], [18].

**Hình 3.** Độ bám dính đo đạc được trên các bề mặt chức năng hóa

Kết quả khảo sát khả năng kháng băng tuyết với tiêu chí độ bám dính được thể hiện trong Hình 3 với các bề mặt với hình thái khác nhau. Để kiểm tra thông số này, một thể tích nước không đổi được đặt nhẹ trên các bề mặt và làm lạnh đến khi hóa rắn. Một cảm biến lực được di chuyển theo phương ngang và đẩy khối băng đến khi nó bị tách ra khỏi bề mặt. Lực tác dụng ghi nhận bởi cảm biến lực sẽ được hiển thị trên thang đo gắn với máy tính. Độ bền liên kết được xác định là giá trị lớn nhất ghi nhận trên phần mềm.

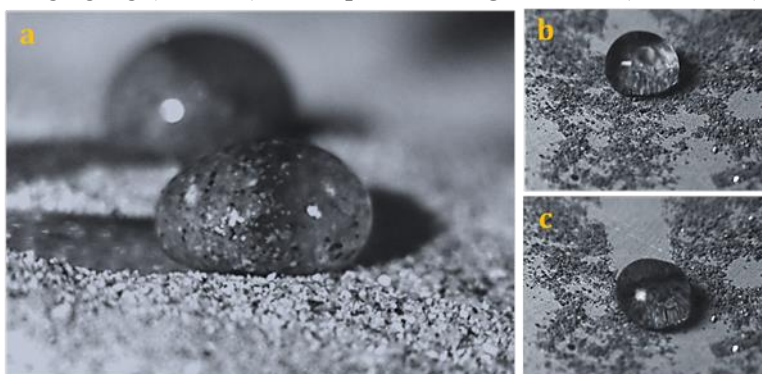
Kết quả khảo sát trên Hình 3 trình bày mối quan hệ giữa độ bám dính (KPa) và góc tiếp xúc của bốn mẫu bề mặt được chế tạo từ đồng gồm: Bare Cu (đồng nguyên bản), H.Cu (đồng phủ hợp chất PFPE), Nano.Cu (đồng được ăn mòn bằng acid HCl và tăng cường với acid HF), và H.Nano.Cu (mẫu Nano.Cu được phủ PFPE). Kết quả cho thấy ảnh hưởng lớn của cấu trúc nano và năng lượng bề mặt đến khả năng bám dính của nước trên nền vật liệu đồng với cùng một thể tích nước ban đầu. Ở mẫu Bare.Cu, tức là đồng nguyên bản chưa qua xử lý, giá trị độ bám dính tương đối cao (210 KPa), tương ứng với góc tiếp xúc của nó là 67°. Bare.Cu có tính chất ưa nước tương đối mạnh, thúc đẩy nước có xu hướng lan trải ra trên bề mặt, làm tăng diện tích tiếp xúc trước khi hóa rắn, và làm cho lực bám dính lớn hơn giữa bề mặt và băng. Đây là mẫu nền tiêu chuẩn để so sánh với các mẫu sẽ được chức năng hóa.

Khi phủ hợp chất kỵ nước lên bề mặt đồng nguyên bản để tạo thành mẫu Hydrophobic đồng H.Cu, chúng tôi quan sát thấy sự thay đổi đáng kể ở góc tiếp xúc (tăng lên 105°) và trở nên kỵ nước hơn. Nhờ góc tiếp xúc lớn hơn so với Bare.Cu nên độ bám dính giảm xuống còn 148 KPa. Điều này phù hợp với nguyên lý khi góc tiếp xúc tăng – đồng nghĩa với việc nước ít lan tỏa ra bề mặt – thì diện tích tiếp xúc giữa chất lỏng và bề mặt rắn giảm, dẫn đến lực bám dính nhỏ hơn.

[15], [26]. Từ đó cho thấy tầm quan trọng của việc phủ hợp chất kỵ nước để giảm năng lượng bề mặt, nhờ đó hạn chế tương tác giữa nước và vật liệu nền vì bản chất của lực bám dính chính là tương tác điện từ giữa các phân tử, nguyên tử tại mặt phân cách.

Mẫu Nano.Cu được chế tạo bằng phương pháp ăn mòn bề mặt sử dụng acid HCl và tăng cường thêm với acid HF đã cung cấp một cấu trúc nano trên bề mặt và biểu thị trạng thái hoàn toàn dính ướt với góc tiếp xúc chỉ còn 15° . Nước trên bề mặt hoàn toàn trong trạng thái Wenzel, nghĩa là tiếp xúc với toàn bộ cấu trúc bề mặt, tạo nên độ bám dính có giá trị cao nhất trong toàn bộ khảo sát (345 KPa). Sự bất thường này có thể được giải thích bởi sự gia tăng diện tích bề mặt thực tế do cấu trúc vi mô/nhám do quá trình ăn mòn bằng acid tạo ra. Nước lan rộng hoàn toàn trên bề mặt, xen kẽ sâu vào các cấu trúc nano sẽ làm tăng lực tương tác cơ học (mechanical interlocking) khi hóa rắn và dẫn đến độ bám dính rất lớn như vậy. Tuy vậy, mẫu Nano.Cu sau khi được phủ thêm hợp chất kỵ nước PFPE lại có góc tiếp xúc tăng vọt lên 161° và đạt tới trạng thái hoàn toàn không dính ướt với độ bám dính giảm xuống rất nhỏ, chỉ còn khoảng 40 KPa, thấp nhất trong bốn mẫu. Đây là kết quả được dự đoán cho một bề mặt siêu kỵ nước và đồng nhất với nghiên cứu có liên quan [27]. Trên bề mặt H.Nano.Cu, nước gần như không tiếp xúc với đáy của các cấu trúc mà chỉ tiếp xúc với đỉnh các cấu trúc theo cơ chế Cassie-Baxter. Nhờ góc tiếp xúc cao, nước trên bề mặt có dạng gần như hình cầu với độ linh động cao, làm giảm tối đa sự tương tác giữa nước và bề mặt. Kết quả khảo sát trên mẫu nguyên bản và các mẫu chức năng hóa đã cho thấy một mối liên hệ chặt chẽ giữa cấu trúc bề mặt, tính chất kỵ nước và độ bám dính. Góc tiếp xúc càng cao thường đi kèm với độ bám dính càng thấp – tuy nhiên, yếu tố cấu trúc bề mặt Cu cũng đóng vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh độ bám dính thực tế. Điều này rất hữu ích trong việc thiết kế các bề mặt định hướng chức năng.

Khả năng chống bám bẩn của bề mặt chức năng được quan sát thông qua một camera tốc độ cao, tiến hành quay chụp ở nhiều góc độ khác nhau. 10 mg cát mịn được trải ngẫu nhiên trên bề mặt mẫu H.Nano.Cu để mô phỏng bụi bẩn xuất hiện trong điều kiện làm việc ngoài trời. Lượng cát mịn này được đặt giữa bề mặt mẫu và được trải ra trên bề mặt bằng phương pháp phủ quay với tốc độ chậm (100 rpm/vòng trên phút) để đảm bảo cát xuất hiện một cách ngẫu nhiên. Sau đó, mẫu được đặt nghiêng một góc rất nhỏ (2°) để nước có thể di chuyển nhờ trọng lực. Một thể tích nước ($20\ \mu\text{l}$) được đặt trên bề mặt bằng pipette và quan sát quá trình di chuyển của thể tích nước bằng camera tốc độ cao. Hình 4 là trạng thái nước trên bề mặt tại các thời điểm khác nhau với các góc chụp khác nhau. Ảnh chụp từ video cho thấy nước đã loại bỏ hoàn toàn bụi bẩn trên đường đi của mình theo hướng ngang (Hình 4a) và chụp theo hướng trực diện (Hình 4b, c).

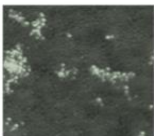
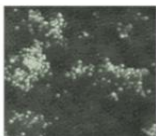
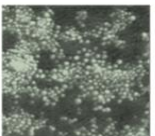
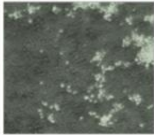
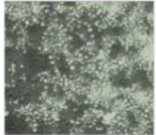
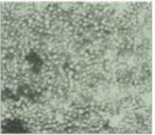
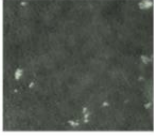
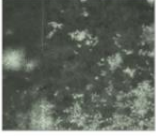
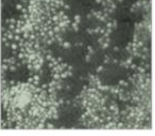
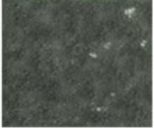
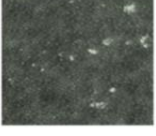
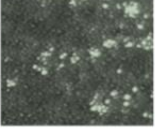


Hình 4. Khảo sát khả năng tự làm sạch với hình ảnh chụp từ camera theo phương ngang (a) và theo phương xiên góc (b,c) quá trình di chuyển của thể tích nước

Hình 5 mô tả tiến trình hình thành băng theo thời gian trên bốn mẫu bề mặt khác nhau, từ trên xuống lần lượt là Bare.Cu, H.Cu, Nano. Cu và H.Nano.Cu. Mỗi mẫu gồm bốn ảnh được chụp bằng camera tốc độ cao theo từng giờ, để quan sát ảnh hưởng của hình thái bề mặt đến khả năng kháng băng. Mẫu đồng nguyên bản Bare.Cu cho thấy khả năng kháng băng kém, thể hiện qua

việc băng gần như phủ kín bề mặt sau 180 phút (83,15%). Bề mặt trơn, năng lượng bề mặt cao khiến nước dễ lan rộng và kết tinh nhanh chóng. Sau khi được phủ PFPE, mẫu H.Cu cho thấy khả năng kháng băng tuyệt vời hơn (78,65%) nhưng không đáng kể. Mặc dù lớp phủ giúp tăng góc tiếp xúc và hạn chế phần nào việc lan rộng của nước, nhưng do độ ưa nước cao nên nước vẫn lưu lại lâu trên bề mặt, từ đó hình thành băng theo thời gian.

Mẫu Nano.Cu (có cấu trúc nhưng không phủ hóa chất kỵ nước) cho thấy lượng băng tăng nhanh và gần như bao phủ toàn bộ bề mặt sau 180 phút. Do thiếu lớp phủ, nước dễ xâm nhập vào các cấu trúc vi mô, bị giữ lại và kết tinh khi nhiệt độ giảm. Các cấu trúc nano trong trường hợp này không có tác dụng kháng băng mà thậm chí còn tăng khả năng giữ nước lại trên bề mặt và thúc đẩy hình thành và lan rộng của băng (92,02%).

	0 phút	60 phút	120 phút	180 phút	Diện tích
Bare - Cu					83,15%
Nano.Cu					92,02%
H.Cu					78,65%
H.Nano.Cu					34,50%

Hình 5. Kết quả khảo sát khả năng kháng băng tuyệt vời của 04 mẫu chế tạo trên nền Cu

Trong khi đó, mẫu H.Nano.Cu thể hiện hiệu quả kháng băng tuyệt vời nhất trong 4 mẫu. Sau 180 phút, lượng băng hình thành rất ít và rải rác, chỉ là vài điểm màu sáng được quan sát (34,5%). Điều này được lý giải bởi sự kết hợp giữa cấu trúc vi mô và lớp phủ kỵ nước, tạo nên một bề mặt hoàn toàn không dính ướt có góc tiếp xúc rất cao (161°). Theo mô hình Cassie-Baxter, giọt nước trên bề mặt này không thể lan ra mà bị treo trên đỉnh của các cấu trúc nhám, với phần lớn thể tích chứa không khí phía dưới – điều này làm giảm diện tích tiếp xúc thật và ngăn cản sự hình thành mầm băng [27]. Theo thời gian, nước sẽ bị kéo rơi xuống do trọng lực và để lại một bề mặt khô ráo. Bề mặt H.Nano.Cu cho thấy tiềm năng lớn nhờ khả năng chống bám băng, với bản chất là sự kết hợp giữa cấu trúc hình học và năng lượng bề mặt, đề xuất một giải pháp hiệu quả trong các ứng dụng ngoài trời.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày một phương pháp chế tạo bề mặt chống bám bẩn và độ bám dính thấp dựa trên bản chất của hiện tượng không dính ướt. Sau khi được chức năng hóa bằng PFPE, bề mặt đạt tới trạng thái hoàn toàn không dính ướt và cho thấy khả năng chống bám bẩn, kháng băng tuyệt vời. Kết quả nghiên cứu cho thấy hình thái bề mặt ảnh hưởng rõ rệt đến độ bám dính và khả năng kháng băng tuyệt vời của vật liệu. Đặc biệt, mẫu H.Nano.Cu cho thấy hiệu quả cao nhất trong cả việc suy giảm độ bám dính và ngăn cản sự hình thành băng tuyết theo thời gian nhờ sự kết hợp giữa cấu trúc và năng lượng bề mặt. Những kết quả này đề xuất một phương pháp đơn giản để tạo lập một bề mặt chức năng chống đóng băng hiệu quả hơn trên kim loại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Xiang, H. Xia, Y. Chen, Y. Wu, H. Chen, and M. Yan, "Pavement anti-icing coating based on a functional composite of NaCl microcapsules," *Constr. Build Mater.*, vol. 307, 2021, Art. no. 125010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125010.
- [2] Q. Chen, M. Fang, R. Guo, L. Li, Y. Tan, W. Qin, N. Liu, and Z. Mo, "Multi-functional and durable anti-corrosion coatings with hydrophobic, freeze time retardation and photothermal properties by means of a simple spraying method," *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp.*, vol. 679, 2023, Art. no. 132549, doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132549.
- [3] J. Zhao, X. Wang, L. Xin, J. Ren, Y. Cao, and Y. Tian, "Concrete pavement with microwave heating enhancement functional layer for efficient de-icing: Design and case study," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 210, 2023, Art. no. 103846, doi: 10.1016/j.coldregions.2023.103846.
- [4] T. H. H. Vu, X. T. Mai, and T. B. Nguyen, "Anti-icing approach on flexible slippery microstructure thin-film," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 186, 2021, Art. no. 103280, doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103280.
- [5] T. H. H. Vu, T. C. Do, V. H. Chu, M. A. Pham, T. M. T. Nguyen, T. T. Bui, T. M. Duong, S. Sonemany, and T. B. Nguyen, "Icephobic approach on hierarchical structure polymer thin-film," *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 13, 2022, Art. no. 15004, doi: 10.1088/2043-6262/ac5400.
- [6] T. M. T. Nguyen and T. B. Nguyen, "Proposed Surface Topography for Frosting Inhibition and Ease Ice Removal," *J. Tribol.*, vol. 147, 2025, doi: 10.1115/1.4067554.
- [7] C. Lu, Z. Zhang, Y. Qiang, F. Zhao, and D. Wang, "A hydrophobic and sustainable anti-icing sand fog seal for asphalt pavement: Its preparation and characterization," *Constr. Build Mater.*, vol. 401, 2023, Art. no. 132918, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132918.
- [8] T. Heckenthaler, S. Sadhuhan, Y. Morgenstern, P. Natarajan, M. Bashouti, and Y. Kaufman, "Self-Cleaning Mechanism: Why Nanotexture and Hydrophobicity Matter," *Langmuir*, vol. 35, pp. 15526–15534, 2019, doi: 10.1021/acs.langmuir.9b01874.
- [9] N. T. Padmanabhan and H. John, "Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, 2020, Art. no. 104211, doi: 10.1016/j.jece.2020.104211.
- [10] K. M. Wisdom, J. A. Watson, X. Qu, F. Liu, G. S. Watson, and C.-H. Chen, "Self-cleaning of superhydrophobic surfaces by self-propelled jumping condensate," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 110, pp. 7992–7997, 2013, doi: 10.1073/pnas.1210770110.
- [11] Y. Liu, H. Sun, X. Song, and C. Liu, "A mechanically durable induction heating coating with desirable anti-/de-icing performance," *Surf Eng.*, vol. 39, pp. 413–420, 2023, doi: 10.1080/02670844.2023.2229563.
- [12] N. Karpen, S. Diebald, F. Dezitter, and E. Bonaccorso, "Propeller-integrated airfoil heater system for small multirotor drones in icing environments: Anti-icing feasibility study," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 201, 2022, Art. no. 103616, doi: 10.1016/j.coldregions.2022.103616.
- [13] S. Zhang, F. Gao, Z. Jiang, Q. He, J. Lu, Y. Hou, X. Zhan, and Q. Zhang, "Bioinspired durable interpenetrating network anti-icing coatings enabled by binders and hydrophobic-ion specific synergies," *Chem. Eng J.*, vol. 479, 2024, Art. no. 147836, doi: 10.1016/j.cej.2023.147836.
- [14] Y. Yu, B. Jin, M. I. Jamil, D. Cheng, Q. Zhang, X. Zhan, and F. Chen, "Highly Stable Amphiphilic Organogel with Exceptional Anti-icing Performance," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, pp. 12838–12845, 2019, doi: 10.1021/acsami.8b20352.
- [15] V.-H. Nguyen, B. D. Nguyen, H. T. Pham, S. S. Lam, D.-V.N. Vo, M. Shokouhimehr, T. H. H. Vu, T.-B. Nguyen, S. Y. Kim, and Q. V. Le, "Anti-icing performance on aluminum surfaces and proposed model for freezing time calculation," *Sci. Rep.*, vol. 11, 2021, doi: 10.1038/s41598-020-80886-x.
- [16] S.-C. Park, N. Kim, S. Ji, and H. Lim, "Fabrication and characterization of moth-eye mimicking nanostructured convex lens," *Microelectron Eng.*, vol. 158, pp. 35–40, 2016, doi: 10.1016/j.mee.2016.03.011.
- [17] H. J. Ensikat, P. Ditsche-Kuru, C. Neinhuis, and W. Barthlott, "Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf," *Beilstein J. Nanotechnol.*, vol. 2, pp. 152–161, 2011.
- [18] F. Nilsson, A. Moyassari, Á. Bautista, A. Castro, I. Arbeloa, M. Järn, U. Lundgren, J. Welinder, and K. Johansson, "Modelling anti-icing of railway overhead catenary wires by resistive heating," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 143, 2019, Art. no. 118505, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118505.
- [19] Y. Liu, X. Li, J. Jin, J. Liu, Y. Yan, Z. Han, and L. Ren, "Anti-icing property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model," *Appl. Surf Sci.*, vol. 400, pp. 498–505, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.12.219.
- [20] A.-S. Milaković, F. Li, R. U. F. von Bock und Polach, and S. Ehlers, "Equivalent ice thickness in ship ice transit simulations: overview of existing definitions and proposition of an improved one," *Sh. Technol. Res.*, vol. 67, 2019, doi: 10.1080/09377255.2019.1655260.
- [21] H.-W. Yun, G.-M. Choi, H. K. Woo, S. J. Oh, and S.-H. Hong, "Superhydrophobic, antireflective, flexible

- hard coatings with mechanically ultra-resilient moth-eye structure for foldable displays," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 20, pp. 1163–1170, 2020, doi: 10.1016/j.cap.2020.07.001.
- [22] M. Hasegawa, H. Endo, K. Morita, H. Sakaue, and S. Kimura, "Behavior of Sliding Angle as Function of Temperature Difference between Droplet and Superhydrophobic Coating for Aircraft Ice Protection Systems," *Aerospace*, vol. 8, 2021, doi: 10.3390/aerospace8080219.
- [23] S. Xuan, H. Yin, G. Li, Z. Zhang, Y. Jiao, Z. Liao, J. Li, S. Liu, Y. Wang, C. Tang, W. Wu, G. Li, and K. Yin, "Trifolium repens L.-Like Periodic Micronano Structured Superhydrophobic Surface with Ultralow Ice Adhesion for Efficient Anti-Icing/Deicing," *ACS Nano*, vol. 17, pp. 21749–21760, 2023, doi: 10.1021/acsnano.3c07385.
- [24] X. Huang, M. Sun, X. Shi, J. Shao, M. Jin, W. Liu, R. Zhang, S. Huang, and Y. Ye, "Chemical vapor deposition of transparent superhydrophobic anti-icing coatings with tailored polymer nanoarray architecture," *Chem. Eng. J.*, vol. 454, 2023, Art. no. 139981, doi: 10.1016/j.cej.2022.139981.
- [25] X. Li, G. Wang, A. S. Moita, C. Zhang, S. Wang, and Y. Liu, "Fabrication of bio-inspired non-fluorinated superhydrophobic surfaces with anti-icing property and its wettability transformation analysis," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 505, 2020, Art. no. 144386, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.144386.
- [26] W. Hou, Y. Shen, J. Tao, Y. Xu, J. Jiang, H. Chen, and Z. Jia, "Anti-icing performance of the superhydrophobic surface with micro-cubic array structures fabricated by plasma etching," *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp.*, vol. 586, 2020, Art. no. 124180, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.124180.
- [27] T.-B. Nguyen, S. Park, and H. Lim, "Effects of morphology parameters on anti-icing performance in superhydrophobic surfaces," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 435, pp. 585–591, 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.11.137.