



ANTI-ICING SURFACE USING SLIPS CONCEPT (SLIPPERY LIQUID-INFUSED POROUS SURFACES)

Nguyen Thi Minh Thuy¹, Sung Thi Mai¹, Dam Thi Thanh Mai¹, Souphaphone Sonemany¹, Bui Thi Trang¹,
Nguyen Thanh Binh^{1,*}

¹Thai Nguyen University of Education, Vietnam

*Email address: binhnt@tnue.edu.vn

<https://doi.org/10.51453/2354-1431/2021/505>

Article info

Received:

6/4/2021

Accepted:

3/5/2021

Keywords:

Anti-icing, lubricant,
nanostructure, SLIPs

Abstract:

In this study, we aim to present a method to manufacture the anti-icing surfaces on polymer thin films based on a combination of porous nanostructures with lubricating compounds (SLIPs). The porous nanostructures on the aluminum surface after wet etching are combined with a lubricant compound with low surface tension to create a slippery surface for anti-icing purposes. The performance will be investigated by measuring the adhesion force per unit area between the ice and the surface. Survey results illustrated the advantages of SLIPs surface compared to non-functionalized surfaces, demonstrating the superiority of new surface morphology, stability, high reusability, manufacturing orientation anti-freeze surface in the indirect direction.



CHỐNG ĐÓNG BĂNG TRÊN CÁC BỀ MẶT SỬ DỤNG KHÁI NIỆM SLIPS (Slippery Liquid-Infused Porous surfaces)

Nguyễn Thị Minh Thủy¹, Sùng Thị Mai¹, Đàm Thị Thanh Mai¹, Souphaphone Sonemany¹, Bùi Thị Trang¹, Nguyễn Thanh Bình^{1,*}

¹Trường Đại học Sư phạm – Đại học Thái Nguyên, Việt Nam

*Địa chỉ email: binhnt@tmue.edu.vn

<https://doi.org/10.51453/2354-1431/2021/505>

Thông tin bài viết

Ngày nhận bài:

6/4/2021

Ngày duyệt đăng:

3/5/2021

Từ khóa:

Chống đóng băng, chất bôi trơn, cấu trúc nano, SLIPs

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này chúng tôi sẽ trình bày một phương pháp chế tạo các bề mặt chống đóng băng trên polymer, dựa trên sự kết hợp giữa các cấu trúc nano xốp với hợp chất bôi trơn (SLIPs). Các cấu trúc nano xốp trên bề mặt Nhôm sau quá trình ăn mòn ướt sẽ được kết hợp với hợp chất bôi trơn có sức căng bề mặt thấp để tạo nên các bề mặt trơn trượt với mục đích chống đóng băng. Hiệu năng của các bề mặt sẽ được khảo sát thông qua đo đặc lực liên kết trên một đơn vị diện tích giữa tinh thể băng và bề mặt. Kết quả khảo sát cho thấy sự vượt trội của bề mặt SLIPs so với các bề mặt chưa chức năng hóa, chứng minh sự ưu việt của một hình thái bề mặt mới, ổn định, tính tái sử dụng cao, định hướng chế tạo các bề mặt chống đóng băng theo hướng gián tiếp.

Giới thiệu

Chống đóng băng đã trở thành một trong những chủ đề mới, thu hút nhiều sự chú ý của các nhà khoa học vì tính cấp thiết của nó. Khái niệm anti-icing đề cập đến việc một bề mặt có thể phòng chống đóng băng trên các bề mặt, và nếu băng có hình thành thì cũng sẽ được loại bỏ dễ dàng. Quá trình chống đóng băng được chia ra làm hai hướng tiếp cận chính: trực tiếp và gián tiếp. Chống đóng băng trực tiếp (de-icing) là sử dụng các phương pháp như cơ học, nhiệt học, chất lỏng,... để loại bỏ băng đóng trên các bề mặt, trong khi chống đóng băng gián tiếp (anti-icing) là sử dụng các phương pháp lý hóa can thiệp vào bề mặt để khiến cho băng không thể hình thành được trên bề mặt, hoặc trong trường hợp xấu nhất khi băng đã hình thành thì chúng sẽ được loại bỏ một cách dễ dàng. Hiện nay,

chống đóng băng gián tiếp được phân chia ra làm ba hướng chính: băng hình thành trên những bề mặt từ những trận mưa siêu lạnh (impinging droplets)¹⁻⁴; băng hình thành từ quá trình ngưng tụ (water condensation)⁵⁻⁷; và băng hình thành từ những giọt nước tĩnh (static condition)^{4,8-12}. Trường hợp thứ 3 tương ứng với việc băng đã hình thành trên các bề mặt, cách tiếp cận sẽ là kéo dài thời gian hóa rắn của chúng và giảm thiểu liên kết giữa tinh thể và bề mặt¹⁰⁻¹².

Có nhiều phương pháp để chế tạo một bề mặt chống đóng băng, trong đó *bề mặt không dính ướt* (hydrophobic) được nhiều nhóm nghiên cứu tin tưởng là giải pháp chống đóng băng tiềm năng nhất vì những tính chất đặc biệt của nó như: góc tiếp xúc rất lớn (> 150°), góc trượt nhỏ¹³. Các phương pháp

ché tạo cấu trúc micro/nano có thể kể đến như: ăn mòn khô (dry etching), ăn mòn ướt (wet etching), sơn phủ bề mặt^{7,14-16}... với mục đích là tạo độ nhám càng nhỏ càng tốt. Các cấu trúc micro/nano sau đó sẽ được bao phủ bởi một lớp hợp chất hóa học kỵ nước (hydrophobic compounds) để đạt được bề mặt không dính ướt.

Tuy nhiên gần đây có một số nghiên cứu đã bày tỏ sự lo ngại về hiệu năng chống đóng băng của bề mặt siêu không dính ướt ở điều kiện độ ẩm cao^{17,18}. Lấy cảm hứng từ cây bắt muỗi *Nepenthes*¹⁹, bề mặt xếp kết hợp chất bôi trơn (SLIPs) gần đây đã thu hút rất nhiều sự chú ý và được tin tưởng sẽ trở thành một giải pháp chống đóng băng hiện đại và sáng tạo²⁰⁻²³. Ý tưởng mới này là sự kết hợp một bề mặt chất lỏng trơn tru không có khiếm khuyết với các tính chất như kỵ nước, tự tái tạo và hoạt động tốt ở điều kiện độ ẩm cao. Các chất lỏng khi tới bề mặt sẽ được nâng lên cao và cô lập khỏi các cấu trúc nano bên dưới do bản thân chất bôi trơn không tan được trong nước, từ đó đảm bảo một sự liên kết lỏng lẻo giữa bề mặt với các tinh thể băng được hình thành^{6,11,24,25}. Một bề mặt SLIPs có thể được hình thành dựa trên sự kết hợp giữa cấu trúc xếp với một chất bôi trơn có sức căng bề mặt thấp không tan trong nước và dễ dàng sơn phủ trên bề mặt nhám. Có nhiều phương pháp để tạo nên các cấu trúc xếp micro/nano như: quang khắc²⁶, sơn phủ các hạt nano²⁷ hoặc ăn mòn khô/ ăn mòn ướt^{11,24}. Một số loại chất bôi trơn thông dụng được sử dụng như: dầu Silicon, FC – 70, Kerosene, hoặc Krytox với các tính chất hóa lý khác nhau^{11,25}.

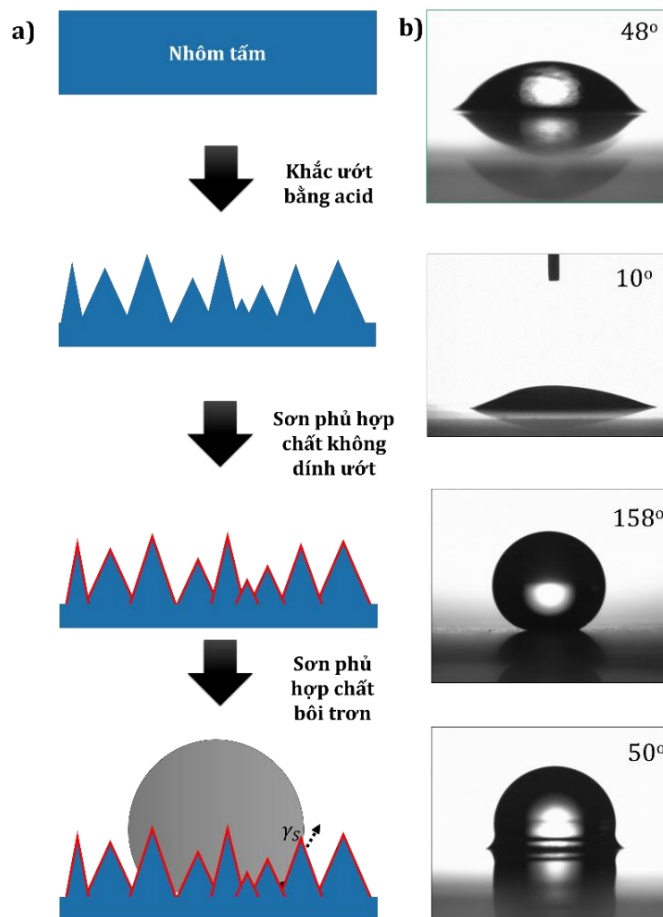
Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày nghiên cứu của mình về quá trình chế tạo và khảo sát khả năng chống đóng băng theo hướng gián tiếp sử dụng các chất bôi trơn có sức căng bề mặt thấp kết hợp với cấu trúc nano xếp. Hiệu năng chống đóng băng sẽ được khảo sát dựa trên tiêu chí lực liên kết giữa bề mặt và thể tích băng (adhesive strength) và thời gian hóa rắn. Kết quả được so sánh với các mẫu chưa xử lý và cho thấy sự vượt trội về các thông số khảo sát, khẳng định sự ưu việt của hiệu ứng SLIPs và vai trò quan trọng của việc xử lý bề mặt. Đây là một nghiên cứu có tính tiếp nối những kết quả nhóm nghiên cứu đã đạt được, đề xuất một phương pháp chế tạo bề mặt chức năng mới, kinh tế và tính tái sử dụng cao.

Quy trình chế tạo và thiết lập đo đạc

Hình 1 mô tả quá trình chế tạo mẫu của chúng tôi để đạt được các mẫu có độ dính ướt mong muốn. Các mẫu được chức năng hóa bằng phương pháp khắc ướt kết hợp với sơn phủ hợp chất hóa học kỵ nước FOTS (Fluoroorthotriclorosilane)¹⁵. Đầu tiên, các tấm nhôm (kích thước 3 cm x 3 cm) được súc rửa sạch lần lượt trong acetone, Iso-propanol, Ethanol (mỗi quá trình 10 phút x 3 lần) và rửa lại bằng nước sạch (10 phút x 3 lần). Quá trình khắc ướt được bắt đầu bằng cách nhúng các tấm nhôm vào trong hỗn hợp dung dịch của acid Clohidric (HCl) pha loãng với nước tinh khiết. Thí nghiệm được đặt trên đế gia nhiệt ở nhiệt độ 200°C trong vòng 15 phút. Sau khi hoàn tất, mẫu được súc rửa lại ngay với nước sạch (10 phút x 3 lần) và làm khô bằng khí Nitro. Hình 2 là ảnh SEM của bề mặt sau khi khắc ướt, cho thấy các cấu trúc nano hình thành ngẫu nhiên trên bề mặt. Sau khi tạo độ nhám, mẫu Nhôm được đưa vào sơn phủ hợp chất không dính ướt để đạt tới trạng thái Superhydrophobic (mẫu S.Phobic). FOTS là một hợp chất có mạch cacbon dài với một đầu là Cacbon sẽ liên kết chặt chẽ với nguyên tử nhôm, đầu còn lại là $SiCl_3$ không ưa nước. Các mẫu với độ dính ướt khác như Superhydrophilic (mẫu S.Philic), Hydrophilic, Hydrophobic được chế tạo bằng cách cho phơi sáng dưới ánh sáng UVO (Ultra Violet Ozone) để tạo lập các liên kết O-H trên bề mặt.

Bề mặt SLIPs được chế tạo bằng cách quay phủ (spin coating). Một lượng vừa đủ Krytox (Sigma Aldrich, Co., Ltd, Đức) được nhỏ lên bề mặt S.Phobic và trải qua 03 quá trình quay phủ, 50 vòng/phút trong 10 giây, 500 vòng/ phút trong 30 giây, và giảm tốc 50 vòng/ phút trong 10 giây.

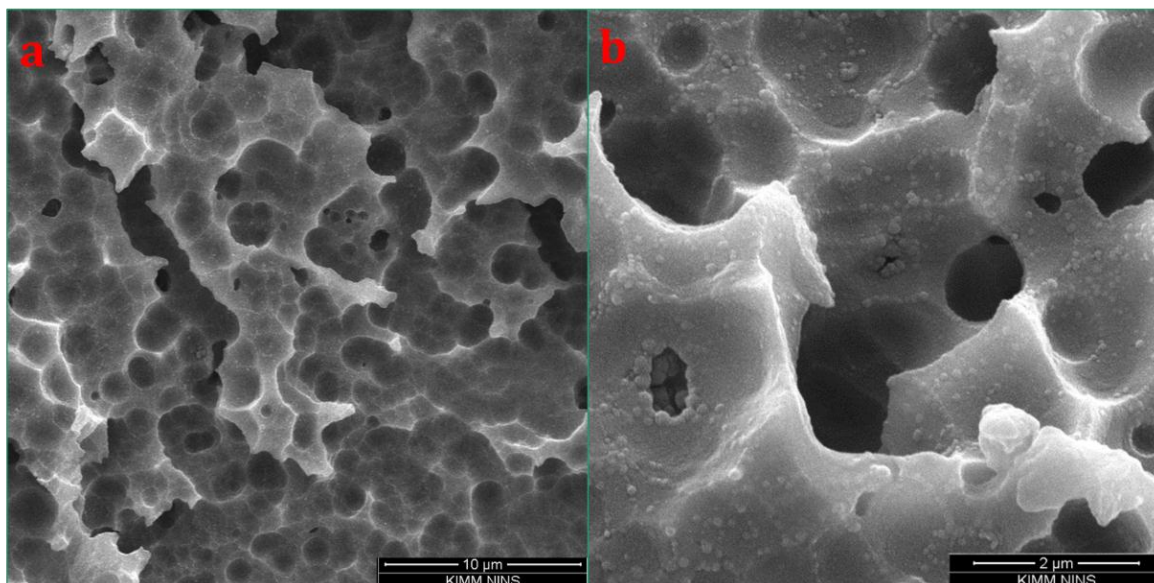
Tất cả các mẫu đều được đo đạc độ dính ướt bằng các phép đo góc tiếp xúc với 10 vị trí khác nhau và lấy trung bình. Các phép đo góc tiếp xúc và kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy – SEM) được thực hiện tại phòng thí nghiệm cảm hứng thiên nhiên, Viện nghiên cứu máy và vật liệu Hàn Quốc, Daejeon, Hàn Quốc. Phép đo góc tiếp xúc là một trong những phương pháp điển hình nhất để kiểm tra sự dính ướt của một cặp bề mặt chất rắn – chất lỏng tại mặt phân cách giữa 3 pha rắn – lỏng – khí.



Hình 1. Mô phỏng quá trình tạo bề mặt SLIPs (a) và các góc tiếp xúc tương ứng với mỗi quá trình (b)

Lực liên kết giữa thể tích băng và bề mặt chức năng được đo đạc bởi Load-cell^{12,28-31}. Một thể tích nước (10 ul) được đặt nhẹ nhàng trên bề mặt mẫu. Ở dưới mẫu là để làm lạnh được giữ ở nhiệt độ -10°C với mục đích hóa rắn thể tích nước trước khi đo lực liên kết. Một sensor lực (Load-Cell) được kết nối với một bộ điều khiển để đến tiếp xúc nhẹ

nhàng với thể tích băng, đẩy nó với một tốc độ chậm (50 um/s) đến khi thể tích băng hoàn toàn bị tách khỏi bề mặt. Các kết quả đo được từ Load-cell được ghi nhận bằng phần mềm trên máy tính và được vẽ dưới dạng biểu đồ tăng dần với một đỉnh ứng với lực liên kết giữa bề mặt và thể tích băng.



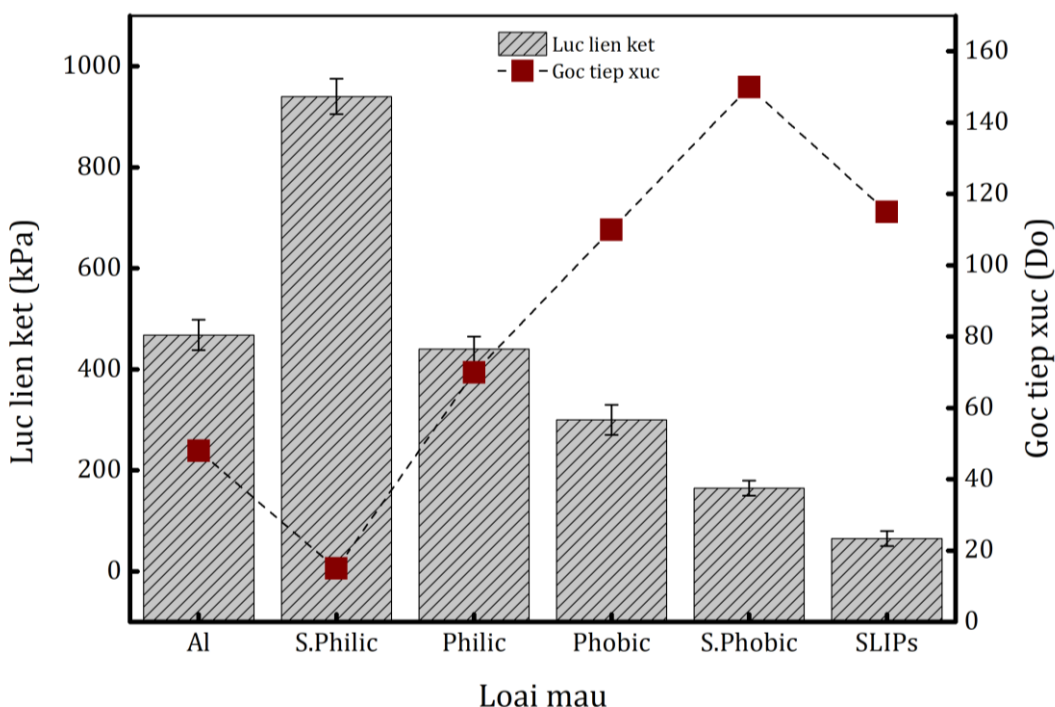
Hình 2. Cấu trúc nano với các độ phóng đại khác nhau được chế tạo trên Nhôm sau quá trình khắc ướt

Kết quả và thảo luận

Hình 3 cho thấy lực liên kết giữa thể tích băng đối với các bề mặt được chức năng với những điều kiện khác nhau. Bằng cách nâng cao góc tiếp xúc, chúng tôi đã có thể giảm thiểu lực liên kết giữa bề mặt với khối băng. Góc tiếp xúc càng lớn, lực liên kết càng nhỏ. Đó chính là lí do vì sao mà bề mặt không dính ướt (superhydrophobic) đã được lựa chọn cho mục tiêu chống đóng băng gián tiếp.

Tuy vậy, các nghiên cứu gần đây đã cho thấy độ bền của các mẫu không dính ướt là không tốt, đặc biệt trong điều kiện ẩm ướt. Chính vì thế, chúng tôi đã khảo sát mẫu SLIPs và đem so sánh với các mẫu với điều kiện khác nhau. Kết quả cho thấy lực liên kết ở mẫu SLIPs giảm đáng kể khi so sánh với các mẫu chưa được chức năng hóa. Lực liên kết đo được là 65 ± 15 kPa, tương ứng với ~300% nhỏ hơn so với mẫu không dính ướt, 500% nhỏ hơn mẫu Phobic, và 800% so với mẫu nhôm nguyên bản. Điều này cho thấy sự ưu việt của bề mặt trơn trượt

kết hợp với cấu trúc nano trong việc giảm thiểu lực liên kết. Sự giảm thiểu này có thể được giải thích bằng sự không hòa tan của nước và chất bôi trơn, dẫn đến việc các giọt nước được “nâng” lên khỏi bề mặt và cách xa các cấu trúc nano ngay từ khi mới tiếp xúc cho đến khi hóa rắn hoàn toàn. Kết quả là dù cho diện tích tiếp xúc có lớn (góc tiếp xúc 115 độ) nhưng vì sự trơn trượt và sự ngăn cách với bề mặt nên giảm thiểu được sự bám dính, móc neo vào các cấu trúc nano dẫn đến lực liên kết rất nhỏ. Nói như vậy để thấy rằng kể cả ở bề mặt không dính ướt S.Phobic đi chăng nữa thì sự thâm nhập của nước vào không gian giữa các cấu trúc là không thể tránh khỏi, thể tích nước sẽ tồn tại ở đó và hóa rắn, cuối cùng trở thành các “mỏ neo” bám dính chặt vào cấu trúc bề mặt, gây khó khăn cho việc loại bỏ. Bề mặt nào có độ dính ướt càng cao, nước càng dễ dàng len lỏi vào không gian giữa các cấu trúc. Đó chính là lí do vì sao mà S.Phobic lại cho ta kết quả lực liên kết cao nhất, và giảm dần khi tăng độ dính ướt.



Hình 3. Tương quan giữa lực liên kết, góc tiếp xúc với các mẫu tương ứng.

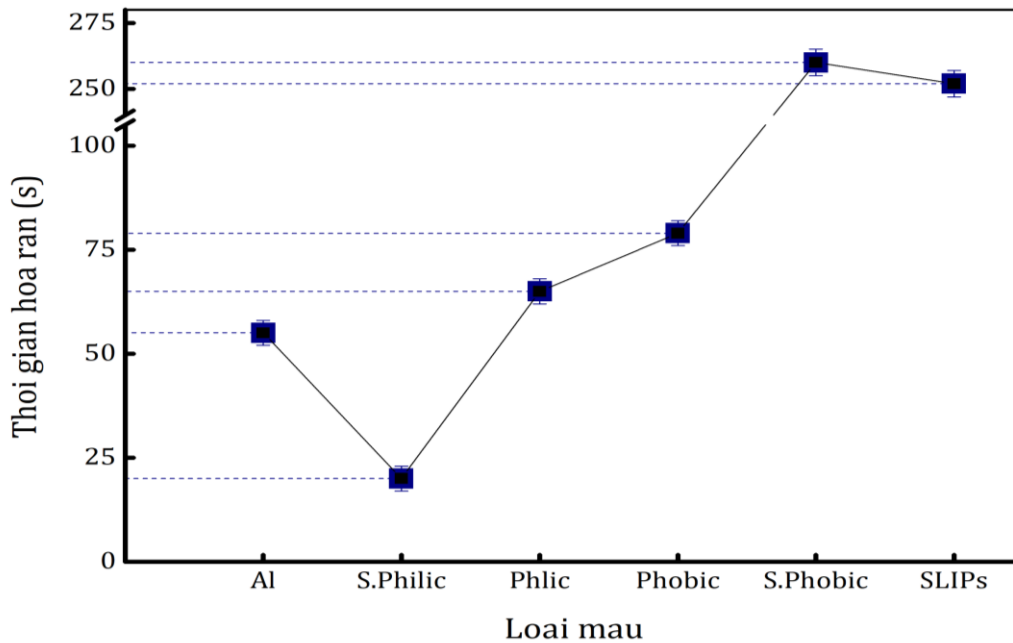
Sự xuất hiện của lớp chất bôi trơn không những để ngăn trở việc tiếp xúc giữa tinh thể băng và cấu trúc nano, mà còn có đóng góp rất lớn vào việc kìm hãm nhiệt truyền từ thể tích nước tới bề mặt đang làm lạnh. Chất bôi trơn với hệ số truyền nhiệt rất nhỏ sẽ đóng vai trò như một lớp ngăn cách nhiệt. Tất nhiên, nếu nhiệt lượng của giọt nước (đang ở

hiệt độ phòng) truyền xuống để làm lạnh (-10°C) càng lâu thì thời gian đạt đến 0°C để hóa rắn của nó càng lâu.

Kết quả khảo sát được trình bày trong hình 4 và bảng thống kê số 1. Dễ dàng nhận thấy thời gian hóa rắn kém nhất thuộc về bề mặt S.Philic. Với góc

tiếp xúc cỡ 15°, và vì thế diện tích tiếp xúc quá lớn, nó chỉ duy trì được 20 giây từ khi bắt đầu thí nghiệm là bắt đầu hóa rắn. Khi độ dính ướt tăng lên, thời gian hóa rắn được gia tăng với các tốc độ khác nhau ở các mẫu tương ứng. Đơn kể là bề mặt nguyên bản Nhôm với góc tiếp xúc 48° có thể kim hãm được 55 giây, tương đương 275% so với mẫu S.Philic. Thời gian tiếp tục tăng chậm ở khoảng Philic và Phobic, nhưng đột ngột tăng rất nhanh khi mẫu đạt đến trạng thái S.Phobic – mẫu không dính ướt điển hình tìm thấy

trên lá sen. Điều này có thể dễ dàng giải thích bằng diện tích tiếp xúc rất nhỏ, dẫn đến nhiệt lượng trao đổi trong một đơn vị thời gian cũng rất nhỏ. Điều thú vị được tìm thấy ở mẫu SLIPs khi mà thời gian hóa rắn của nó xấp xỉ với mẫu S.Phobic cho dù diện tích tiếp xúc lớn hơn nhiều lần (xấp xỉ với mẫu Phobic). Kết quả này đã thêm một lần nữa nhấn mạnh vai trò của lớp chất bôi trơn trong việc kim hãm nhiệt lượng trao đổi giữa đế làm lạnh và giọt nước.



Hình 4. Tương quan giữa thời gian hóa rắn và các mẫu tương ứng

Bảng 1. Thống kê kết quả nghiên cứu

	Góc tiếp xúc (Độ)	Lực liên kết ()	Thời ()
Al	48	468	55
S.Philic	15	940	20
Philic	70	440	65
Phobic	110	300	79
S.Phobic	150	165	260
SLIPs	115	65	252

Xét một cách toàn diện, mẫu SLIPs đã cho thấy ưu thế ở cả 2 phương diện: lực liên kết và thời gian hóa rắn khi so sánh với các mẫu thí nghiệm khác. Điều này được giải thích bằng sự kết hợp giữa cấu trúc nano với chất bôi trơn, sự không hòa tan của nước với chất bôi trơn, và hệ số truyền nhiệt rất nhỏ của chất bôi trơn. Vì thế, việc kiểm soát lượng chất bôi trơn trên bề mặt cũng như tối ưu hóa sự kết hợp giữa nó với kích thước bề mặt là một vấn đề đáng được lưu tâm ở các nghiên cứu kế tiếp.

Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã trình bày quá trình chế tạo và khảo sát hiệu năng chống đóng băng của bề mặt SLIPs với các tiêu chí như: lực liên kết, thời gian hóa băng. Kết quả khảo sát được so sánh với các bề mặt tham khảo và cho thấy các ưu thế của SLIPs so với các bề mặt khác ở tất cả các tiêu chí kể trên, khẳng định sự quan trọng của việc kết hợp cấu trúc nano với hợp chất bôi trơn. Nghiên cứu đã đề xuất một cách thức chế tạo bề mặt mô phỏng sinh học với chức năng chống đóng băng đơn giản, nhanh chóng chế tạo trên Nhôm định hướng ứng dụng và tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp nối.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.02-2019.333.

REFERENCES

[1] Liu, Y., Hu, H. An Experimental Investigation on the Unsteady Heat Transfer Process over an Ice Accreting Airfoil Surface. *Int J Heat Mass Transf* (2018). 122: 707–718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.023>.

[2] Bu, X., Lin, G., Shen, X., Hu, Z., Wen, D. Numerical Simulation of Aircraft Thermal Anti-Icing System Based on a Tight-Coupling Method. *Int J Heat Mass Transf* (2020). 148, 119061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119061>.

[3] Li, L., Liu, Y., Zhang, Z., Hu, H. Effects of

Thermal Conductivity of Airframe Substrate on the Dynamic Ice Accretion Process Pertinent to UAS Inflight Icing Phenomena. *Int J Heat Mass Transf* (2019). 131: 1184–1195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.132>.

[4] Sarshar, M. A., Swartz, C., Hunter, S., Simpson, J., Choi, C.-H. Effects of Contact Angle Hysteresis on Ice Adhesion and Growth on Superhydrophobic Surfaces under Dynamic Flow Conditions. *Colloid Polym Sci* (2013) 291 (2): 427–435. <https://doi.org/10.1007/s00396-012-2753-4>.

[5] Hao, Q., Pang, Y., Zhao, Y., Zhang, J., Feng, J., Yao, S. Mechanism of Delayed Frost Growth on Superhydrophobic Surfaces with Jumping Condensates: More Than Interdrop Freezing. *Langmuir* (2014). 30 (51): 15416–15422. <https://doi.org/10.1021/la504166x>.

[6] Wang, N., Xiong, D., Pan, S., Wang, K., Shi, Y., Deng, Y. Robust Superhydrophobic Coating and the Anti-Icing Properties of Its Lubricants-Infused-Composite Surface under Condensing Condition. *New J Chem* (2017). 41 (4): 1846–1853. <https://doi.org/10.1039/C6NJ02824A>.

[7] Zhang, Y., Yu, X., Wu, H., Wu, J. Facile Fabrication of Superhydrophobic Nanostructures on Aluminum Foils with Controlled-Condensation and Delayed-Icing Effects. *Appl Surf Sci* (2012). 258 (20): 8253–8257. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.05.032>.

[8] Farhadi, S., Farzaneh, M., Kulinich, S. A. Anti-Icing Performance of Superhydrophobic Surfaces. *Appl Surf Sci* (2011). 257 (14): 6264–6269. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.02.057>.

[9] Kulinich, S. A., Farzaneh, M. On Ice-Releasing Properties of Rough Hydrophobic Coatings. *Cold Reg Sci Technol* (2011). 65 (1): 60–64. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.001>.

- [10] Nguyen, T.B., Park, S., Lim, H. Effects of Morphology Parameters on Anti-Icing Performance in Superhydrophobic Surfaces. *Appl Surf Sci* (2018) 435. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.137>.
- [11] Nguyen, T.B., Park, S., Jung, Y., Lim, H. Effects of Hydrophobicity and Lubricant Characteristics on Anti-Icing Performance of Slippery Lubricant-Infused Porous Surfaces. *J Ind Eng Chem* (2019). 69. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.09.003>.
- [12] Nguyen, B.D., Cao, B.X., Do, T.C., Trinh, H.B., Nguyen, T.B. Interfacial Parameters in Correlation with Anti-Icing Performance. *J Adhes* (2019). 1–13. <https://doi.org/10.1080/00218464.2019.1709172>.
- [13] Zhang, B., Zeng, Y., Wang, J., Sun, Y., Zhang, J., Li, Y. Superamphiphobic Aluminum Alloy with Low Sliding Angles and Acid-Alkali Liquids Repellency. *Mater Des* (2020). 188, 108479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108479>.
- [14] Zhang, G., Hu, J., Tu, Y., He, G., Li, F., Zou, H., Lin, S., Yang, G. Preparation of Superhydrophobic Films Based on the Diblock Copolymer P(TFEMA-r-Sty)-b-PCEMA. *Phys Chem Chem Phys* (2015). 17 (29): 19457–19464. <https://doi.org/10.1039/C5CP02751A>.
- [15] Ji, S., Ramadhianti, P. A., Nguyen, T.B., Kim, W.D., Lim, H. Simple Fabrication Approach for Superhydrophobic and Superoleophobic Al Surface. *Microelectron Eng* (2013). 111. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.04.010>.
- [16] Cao, L., Jones, A. K., Sikka, V.K., Wu, J., Gao, D. Anti-Icing Superhydrophobic Coatings. *Langmuir* (2009). 25 (21): 12444–12448. <https://doi.org/10.1021/la902882b>.
- [17] Jung, S., Dorrestijn, M., Raps, D., Das, A., Megaridis, C.M., Poulikakos, D. Are Superhydrophobic Surfaces Best for Icephobicity? *Langmuir* (2011), 27 (6): 3059–3066. <https://doi.org/10.1021/la104762g>.
- [18] Kulinich, S.A., Farhadi, S., Nose, K., Du, X.W. Superhydrophobic Surfaces: Are They Really Ice-Repellent? *Langmuir* (2011). 27 (1): 25–29. <https://doi.org/10.1021/la104277q>.
- [19] Bohn, H.F., Federle, W. Insect Aquaplaning: Nepenthes Pitcher Plants Capture Prey with the Peristome, a Fully Wetttable Water-Lubricated Anisotropic Surface. *Proc Natl Acad Sci USA* (2004). 101 (39): 14138–14143. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405885101>.
- [20] Yeong, Y.H., Wang, C., Wynne, K.J., Gupta, M.C. Oil-Infused Superhydrophobic Silicone Material for Low Ice Adhesion with Long-Term Infusion Stability. *ACS Appl Mater Interfaces* (2016). 8 (46): 32050–32059. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11184>.
- [21] Wong, T.S., Kang, S.H., Tang, S.K.Y., Smythe, E.J., Hatton, B.D., Grinthal, A., Aizenberg, J. Bioinspired Self-Repairing Slippery Surfaces with Pressure-Stable Omniphobicity. *Nature* (2011). 477 (7365): 443–447.
- [22] Vogel, N., Belisle, R. A., Hatton, B., Wong, T.S., Aizenberg, J. Transparency and Damage Tolerance of Patternable Omniphobic Lubricated Surfaces Based on Inverse Colloidal Monolayers. (2013) 4, 2176.
- [23] Kim, P., Wong, T.S., Alvarenga, J., Kreder, M. J., Adorno-Martinez, W. E., Aizenberg, J. Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with Extreme Anti-Ice and Anti-Frost Performance. *ACS Nano* (2012). 6 (8): 6569–6577. <https://doi.org/10.1021/nn302310q>.
- [24] Stamatopoulos, C., Hemrle, J., Wang, D., Poulikakos, D. Exceptional Anti-Icing Performance of Self-Impregnating Slippery Surfaces. *ACS Appl Mater Interfaces* (2017). 9 (11): 10233–10242. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00186>.
- [25] Wang, T., Zheng, Y., Raji, A.R.O., Li, Y., Sikkema, W.K.A., Tour, J.M. Passive Anti-Icing and Active Deicing Films. *ACS Appl Mater Interfaces* (2016). 8 (22): 14169–14173. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03060>.
- [26] Subramanyam, S.B., Rykaczewski, K.,

Varanasi, K.K. Ice Adhesion on Lubricant-Impregnated Textured Surfaces. *Langmuir* 2013, 29 (44): 13414–13418. <https://doi.org/10.1021/la402456c>.

[27] Chu, F., Wu, X., Wang, L. Dynamic Melting of Freezing Droplets on Ultraslippery Superhydrophobic Surfaces. *ACS Appl Mater Interfaces* (2017). 9 (9): 8420–8425. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b16803>.

[28] Duc, N.B., Binh, N.T. Investigate on Structure for Transparent Anti-Icing Surfaces. *AIP Adv* (2020). 10 (8), 85101. <https://doi.org/10.1063/5.0019119>. Vietnam.

[29] Nguyen, T.B., Park, S., Lim, H. Effects of Morphology Parameters on Anti-Icing Performance in Superhydrophobic Surfaces. *Appl Surf Sci* (2018). 435: 585–591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.137>.

[30] Binh, N.T., Hanh, V.T.H., Ngoc, N.T., Duc, N.B. Anti-Icing Efficiency on Bio-Inspired Slippery Elastomer Surface. *Mater Chem Phys* (2021). 265, 124502. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124502>. Vietnam.

[31] Hanh, V.T.H., Truong, M.X., Nguyen, T.B. Anti-Icing Approach on Flexible Slippery Microstructure Thin-Film. *Cold Reg Sci Technol* (2021). 186, 103280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103280>. Vietnam.