

CONTROLLING THE SURFACE MORPHOLOGY FOR WATER COLLECTING FROM THE AIR

Nguyen Thanh Binh^{1†}, Do Thuy Chi^{1†}, Nguyen Thuy Duong², Dao Quynh Mai², Hoang Huu Quy²,
Nguyen Thanh Vinh¹, Vu Thi Hong Hanh^{1*}

¹TNU - University of Education, ²Luong Ngoc Quyen High School

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 12/01/2023 Revised: 23/5/2023 Published: 23/5/2023 KEYWORDS Water collection Collection efficiency Hybrid Superhydrophobic Superhydrophilic	The study proposes a method of water collection from the air inspired by the water 'trapping' phenomenon of <i>Stenocara</i> beetles in the Sahara desert. The unique combination of hydrophilic and hydrophobic regions facilitates water collection. The square regions in superhydrophilic were generated using a designed shadow mask incorporated with UVO (Ultra Violet – Ozone). These superhydrophilic regions were surrounded by superhydrophobic areas to enhance the water-driven ability. The survey results demonstrated outstanding water collection efficiency on the combined surface compared to the surfaces with uniform wettabilities. This can be explained by the radical task differentiation of water collection and transmission, which is explained by the energy required for the heterogeneous nucleation from the gas phase at the interface between the Aluminum surface and humid air. The results illustrate the potential of controlling the wettability of the combined surface for application-oriented water collection purposes in arid and difficult areas.

KIỂM SOÁT HÌNH THÁI BỀ MẶT VẬT LIỆU ĐỂ THU THẬP NƯỚC TRONG KHÔNG KHÍ

Nguyễn Thanh Bình^{1†}, Đỗ Thùy Chi^{1†}, Nguyễn Thùy Dương², Đào Quỳnh Mai², Hoàng Hữu Quý²,
Nguyễn Thành Vinh¹, Vũ Thị Hồng Hạnh^{1*}

¹Trường Đại học Sư phạm – ĐH Thái Nguyên

²Trường Trung học phổ thông Lương Ngọc Quyến

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 12/01/2023 Ngày hoàn thiện: 23/5/2023 Ngày đăng: 23/5/2023 TỪ KHÓA Thu thập nước Hiệu năng thu thập Trạng thái kết hợp Hoàn toàn không dính ướt Hoàn toàn dính ướt	Nghiên cứu đề xuất phương pháp thu thập nước trong không khí lấy ý tưởng từ hiện tượng “bẫy” nước của bọ cánh cứng <i>Stenocara</i> trên sa mạc Sahara. Sự kết hợp độc đáo giữa khu vực ưa nước (hydrophilic) và không ưa nước (hydrophobic) tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình thu thập nước. Các ô hình vuông ở trạng thái hoàn toàn dính ướt được tạo ra trên bề mặt bằng cách sử dụng một lớp mặt nạ kim loại đã được thiết kế từ trước, kết hợp với UVO (Ultra Violet – Ozone). Những ô hoàn toàn dính ướt này được bao quanh bởi các khu vực hoàn toàn không dính ướt để tăng cường khả năng dẫn truyền. Kết quả khảo sát cho thấy hiệu quả thu nước vượt trội trên bề mặt kết hợp so với các bề mặt có độ ẩm đồng đều bao gồm mẫu nguyên bản, hoàn toàn dính ướt, hoàn toàn không dính ướt. Điều này được giải thích là do sự phân hóa nhiệm vụ triệt để của việc thu thập và dẫn truyền nước, vốn được giải thích bằng năng lượng cần thiết cho sự tạo mầm không đồng nhất từ pha khí sang pha lỏng tại mặt tiếp xúc giữa bề mặt Nhôm và không khí ẩm. Kết quả cho thấy tiềm năng trong việc kiểm soát độ dính ướt của bề mặt kết hợp cho các mục đích thu thập nước định hướng ứng dụng cho các khu vực khó khăn, khô hạn.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7224>

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

† Tác giả đóng góp tương đương

1. Giới thiệu

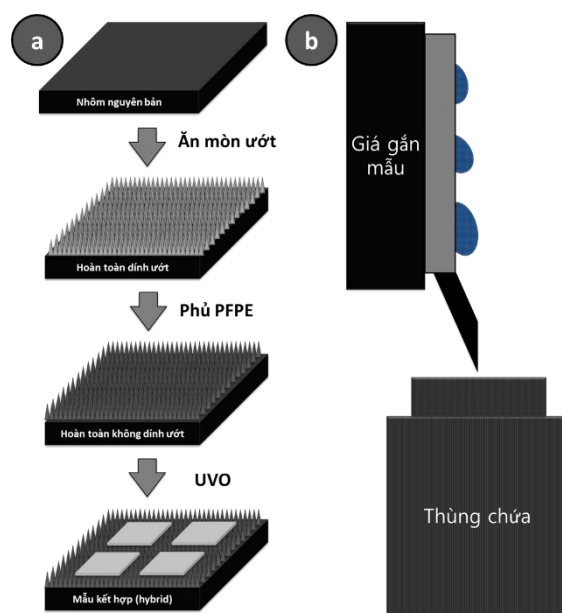
Ở sa mạc Sahara, sương là nguồn nước thay thế khả dĩ nhất cho sự sống [1]. Loài bọ cánh cứng *Stenocara* sử dụng cơ thể của chính mình với một cấu trúc lưng đặc trưng hoạt động như một bộ phận ngưng tụ và điều chuyển nước cho nhu cầu của nó [2]. Trong nghiên cứu đầu tiên về hiện tượng này, nhóm nghiên cứu của giáo sư Thomas Norgaard và cộng sự đã điều tra 4 loại bọ cánh cứng có hành vi thu thập nước và *Stenocara Gracilipes* cho thấy hiệu năng thu thập nước cao nhất [1]. Lấy ý tưởng từ quá trình độc đáo này, việc thu thập sương đã thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu nhằm mục đích hướng tới một nguồn nước thay thế tiềm năng [3]. Ngưng tụ nước là một quá trình tuần tự bao gồm 3 bước; tạo mầm, ngưng tụ và kết tụ [4]. Trong cả ba bước này, năng lượng của bề mặt đều đóng vai trò quan trọng vì nó quyết định hình thái của nước trên bề mặt, độ linh động và quá trình trao đổi nhiệt cho các vòng ngưng tụ tiếp nối [5], [6].

Trong khoảng 10 năm trở lại đây, đã có nhiều công trình nghiên cứu tập trung vào tối ưu hóa bề mặt cho mục đích ngưng tụ với nhiều loại vật liệu và kỹ thuật được khảo sát [7] – [11]. Một trong số những hình mẫu tiềm năng được đề xuất là sự đan xen độ dính ướt trên cùng một bề mặt, định hướng cho các ứng dụng rộng rãi cho các thiết bị thu thập nước [8], [9], [12], [13]. Điều này được giải thích bởi cấu trúc độc đáo của bề mặt kết hợp, vốn bao gồm các khu vực với độ tương phản về năng lượng bề mặt/ độ dính ướt. Nhờ năng lượng cần thiết nhỏ cho quá trình tạo mầm, các giọt nước nhỏ dễ dàng được tìm thấy ở các khu vực có độ dính ướt cao [14]. Chúng nhanh chóng kết hợp với các giọt nước lân cận và nhanh chóng đạt tới thể tích tới hạn (là thể tích giọt nước đạt được ngay trước khi rơi khỏi bề mặt khi trọng lực lớn hơn lực liên kết giữa các phân tử nước và bề mặt). Đáng chú ý là điều này chỉ có thể có ý nghĩa nếu như quá trình di chuyển của các giọt nước được thúc đẩy bởi các khu vực không dính ướt. Đó chính là lý do mà mô hình kết hợp được quan tâm trong thời gian gần đây, đặc biệt đối với các quá trình xảy ra trong một khoảng thời gian dài và phạm vi nhiệt độ thoáng giá lớn [12], [14].

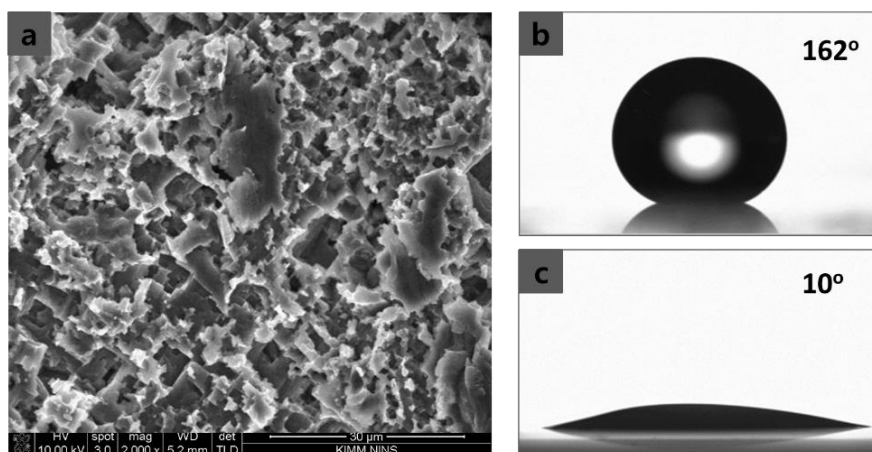
Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu tại Trường Đại học Sư phạm – Đại học Thái Nguyên sẽ đánh giá hiệu quả ngưng tụ nước của mẫu có bề mặt hỗn hợp với độ tương phản cao giữa các khu vực. Các hoàn toàn dính ướt (superhydrophilic dots) sẽ có dạng hình vuông và duy trì kích thước ở 500 μm để mô phỏng kích thước của các bump trên lưng bọ cánh cứng *Stenocara*, bố trí đồng đều trên bề mặt nhôm, trong khi các khu vực xung quanh được đảm bảo trạng thái hoàn toàn không dính ướt (superhydrophobic) để thúc đẩy quá trình di chuyển của các giọt nước tới hạn. Các kết quả thu được cũng sẽ được so sánh với khả năng thu thập nước trên các bề mặt có độ dính ướt đồng nhất bao gồm: Hoàn toàn dính ướt, hoàn toàn không dính ướt, và Nhôm nguyên bản để chứng minh lợi thế của bề mặt kết hợp trong quá trình thu thập nước.

2. Bố trí thí nghiệm

Hình 1a mô tả quy trình chế tạo bề mặt kết hợp gồm bốn bước. Đầu tiên, bề mặt nhôm nguyên bản được mài kỹ bằng giấy nhám và làm sạch với ethanol, acetone. Để tạo nên các cấu trúc nano, bề mặt mẫu sau khi mài được ăn mòn bằng acid Hydrochloric trong 30 phút. Sau khi ăn mòn, bề mặt mẫu trở thành hoàn toàn dính ướt, được thể hiện bằng góc tiếp xúc khoảng 10° (Hình 2c). Để chế tạo bề mặt hoàn toàn không dính ướt, mẫu ăn mòn được bao phủ bởi dung môi PFPE (PerfluoroPolyEther) trong 1 giờ và sau đó sấy khô thêm 1 giờ trong môi trường. Sau khi phủ hóa chất, bề mặt đạt kết quả siêu kỵ nước với góc tiếp xúc nước rất cao ($>150^\circ$). Hình 2a là hình ảnh chụp bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM – Scanning Electron Microscopy) bề mặt mẫu sau khi được ăn mòn ướt bằng acid, cho thấy các cấu trúc nano phân bố ngẫu nhiên trên bề mặt. Sau khi được chức năng hóa bằng hợp chất PFPE, bề mặt đạt tới trạng thái hoàn toàn không dính ướt (2b), trong khi nếu không được phủ PFPE sẽ giữ nguyên trạng thái hoàn toàn dính ướt (2c). Góc tiếp xúc được xác định bằng thiết bị chụp ảnh Contact Angle (Kyowa, Co., Ltd, Nhật Bản).



Hình 1. Mô hình chế tạo bề mặt kết hợp (a) và bố trí thử nghiệm thu thập nước (b)

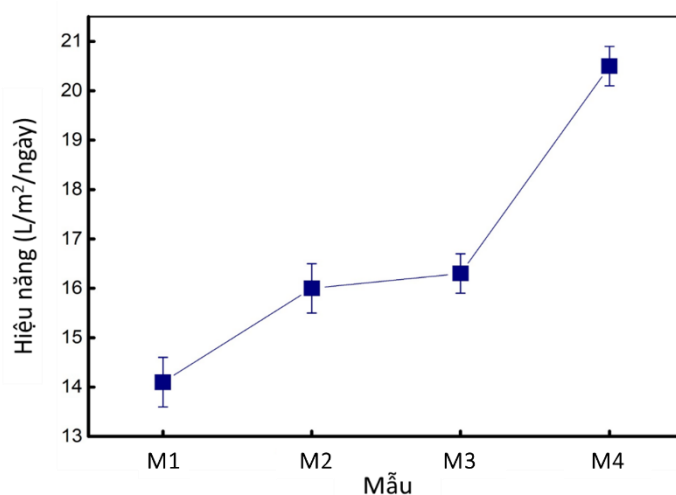


Hình 2. Ảnh cấu trúc bề mặt Nhôm sau khi ăn mòn chụp bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) (a), góc tiếp xúc trên bề mặt hoàn toàn không dính ướt (b) và hoàn toàn dính ướt (c)

Như đã trình bày ở trên, các hình thái bề mặt khác nhau sẽ quyết định quá trình ngưng tụ khác nhau trên bề mặt. Để nghiên cứu mối tương quan giữa các phân diện tích có độ dính ướt khác nhau, chúng tôi đã sử dụng một lớp mặt nạ kim loại được thiết kế sẵn (kích thước $500\ \mu\text{m}$) gắn trên bề mặt hoàn toàn không dính ướt và cho phơi sáng với UVO (UltraViolet – Ozone). Khu vực được mặt nạ che phủ sẽ giữ nguyên trạng thái kỵ nước, trong khi điểm phơi sáng sẽ thể hiện trạng thái hoàn toàn dính ướt với góc tiếp xúc dưới 10° . Mẫu được gắn chặt vào để giữ ở phương thẳng đứng, đối diện với một camera tốc độ cao để quan sát quá trình hình thành nước trên bề mặt. Quá trình thu thập nước được thực hiện trong buồng môi trường duy trì ở điều kiện nhiệt độ 30°C và độ ẩm 60% trong 24 giờ và lặp lại 5 lần để thu được giá trị trung bình. Kết quả khảo sát trên mẫu hybrid (Kí hiệu M4) được so sánh với các bề mặt đồng nhất bao gồm nhôm tấm nguyên bản (mẫu M1), mẫu hoàn toàn dính ướt (mẫu M2), hoàn toàn không dính ướt (mẫu M3). Sự khác biệt về độ dính ướt và hình thái nước trên bề mặt (thể hiện ở góc tiếp xúc θ) sẽ ảnh hưởng đến quá trình hình thành và dẫn truyền nước.

3. Kết quả nghiên cứu

Trái ngược với hình thái nước dạng màng mỏng trên các mẫu nguyên bản (M1) và hoàn toàn dính ướt (M2), sự ngưng tụ dạng giọt thu được quan sát trên các bề mặt hoàn toàn không dính ướt (M3) và kết hợp (M4). Điều này được giải thích là do lớp phủ hóa học kết hợp với các cấu trúc nano tạo nên trạng thái Cassie-Baxter tại mặt phân cách giữa các giọt nước với bề mặt. Ngược lại, các giọt nước hình thành trên bề mặt M2 có độ dính ướt cao sẽ bị “giữ lại” trong các cấu trúc bề mặt và nhanh chóng tạo nên một lớp nước bao phủ bề mặt, ngăn cách sự truyền nhiệt và quá trình tái tạo mầm, vì thế cho kết quả hiệu năng thu thập nước thấp hơn nhiều so với các bề mặt khác. Có một sự khác biệt đã được quan sát thấy trên bề mặt M1 so với M2 khi các giọt nước ngưng tụ trên các vùng khác nhau một cách tự nhiên và nhanh chóng kết hợp để tạo ra các giọt nước có hình dạng bất kì. Tuy nhiên, chúng cũng nhanh chóng kết tụ lại và tạo thành một màng nước trên bề mặt.



Hình 3. Hiệu năng thu thập nước trên các bề mặt có hình thái khác nhau

Ngược lại, quá trình thu thập nước cho thấy tính ưu việt trên mẫu M4 so với các mẫu đơn lẻ khi đo được ít nhất 20,7 (L/m²/ngày), cao hơn 1,1 lần so với bề mặt M2 và 1,2 lần so với bề mặt M3 (Hình 3). Điều này có thể được giải thích bằng mối tương quan giữa thể tích của các giọt nước và khoảng cách giữa các điểm ưa nước cũng như sự kết hợp hoàn hảo giữa vai trò thu thập nước với vai trò vận chuyển nước của vùng hoàn toàn dính ướt.

Quá trình ngưng tụ phụ thuộc vào cả quá trình tạo mầm và quá trình kết tụ, vì vậy một thể tích nước ngưng tụ trên một khu vực hoàn toàn dính ướt (hydrophilic dot) nên được xem xét trong mối tương quan với khoảng cách với các khu vực lân cận. Trong nghiên cứu này, chúng tôi mô phỏng khoảng cách 500 μm giữa các dots giống như khoảng cách giữa các bump trên lưng bọ cánh cứng *Stenocara*. Kết quả thể hiện hiệu suất cao vượt trội và mô tả mối tương quan phù hợp trong quá trình ngưng tụ.

Để khảo sát tương quan giữa thể tích tối hạn của từng giọt nước đơn lẻ với hiệu năng thu thập tổng quát, chúng tôi sử dụng mô hình tính toán do Furmidge giới thiệu lần đầu tiên [15]. Thể tích tối hạn V_{th} có thể được tính toán như sau:

$$V_{th} = \frac{\pi(1 - \cos \theta_a)^2(2 + \cos \theta_a)}{2 \sin^3 \theta_a} w^3 \quad (1)$$

Trong công thức trên V_{th} , θ_a , w lần lượt là thể tích tối hạn, góc tiếp xúc tiến và đường kính của một giọt. Bảng 1 trình bày kết quả tính toán thể tích tối hạn dựa trên góc tiếp xúc tiến. Thể tích lớn nhất được tìm thấy trên mẫu kết hợp M4 trong khi giá trị thể tích nhỏ nhất thuộc về mẫu nguyên bản. Chúng tôi không thể đo được giá trị V_{th} trên mẫu M2 dựa trên mô hình của

Furmidge do nước nhanh chóng tạo nên màng mỏng trên bề mặt. Kết quả cho thấy góc tiếp xúc tiến θ_a và kích thước giọt càng cao thì thể tích tới hạn đạt được càng cao. Tuy nhiên, cần tìm ra mối tương quan giữa góc tiếp xúc tiến và kích thước giọt do các hiệu ứng khác nhau. Bề mặt ưa nước hơn có thể dẫn đến thể tích tới hạn thấp do góc tiếp xúc tiến θ_a nhỏ. Ngược lại, kích thước giọt nước quá nhỏ tạo ra hình thái dạng gần hình cầu của giọt nước và ngăn nhiệt truyền qua mẫu. Ngoài ra, góc tiếp xúc tiến θ_a có thể tương đối giống nhau ở các mẫu nhưng sự hình thành giọt nước thì có thể khác và được giải thích thông qua góc tiếp xúc lùi. Góc tiếp xúc lùi θ_r cao hơn dẫn đến xu hướng lan rộng của giọt nước thấp, do đó ngăn cản sự truyền nhiệt cho quá trình tạo màng tiếp diễn. Nhìn chung, sự kết hợp tối ưu cần được khảo sát bằng cách tìm hiểu độ trễ góc tiếp xúc giữa θ_r , θ_a khi nó là kết quả của các hiệu ứng kết hợp từ hình thái bề mặt và độ ẩm. Ngoài ra, các kích thước khác của dots cũng cần được khảo sát thêm nữa trong tương quan của nó với độ trễ góc.

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

STT	Mẫu		θ_r	θ_a	$V_{th}(mm^3)$
M1	Mẫu nguyên bản	82	115	67	3,55
M2	Hoàn toàn dính ướt	10	--	--	--
M3	Hoàn toàn không dính ướt	162	165	2	4,15
M4	Mẫu kết hợp	155	8	162	5,5

4. Kết luận

Trong công trình này, chúng tôi trình bày khảo sát việc thu thập nước trên bề mặt kết hợp lấy cảm hứng từ cấu trúc cánh của bộ cánh cứng *Stenocara*. Mẫu được chế tạo bằng quá trình kết hợp giữa ăn mòn acid và sơn phủ hợp chất hóa học kỵ nước có chọn lọc sử dụng lớp mặt nạ được thiết kế. Kết quả cho thấy lợi thế đáng kể của mẫu kết hợp trong tương quan với các bề mặt có độ dính ướt đồng đều khác, chứng minh ưu thế của việc phân hóa nhiệm vụ giữa các dots hoàn toàn dính ướt và khu vực dẫn truyền hoàn toàn không dính ướt. Sự khác biệt về độ trễ góc tiếp xúc quyết định thể tích tới hạn của từng giọt nước đơn lẻ và phụ thuộc vào tương quan năng lượng giữa hai trạng thái tại mặt phân cách. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào khảo sát các kích thước dots khác nhau cũng như các hình thái khác nhau của các dots.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hoàn thành dưới sự tài trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo (Việt Nam) với mã số đề tài B2023-TNA-04. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Sư phạm – Đại học Thái Nguyên, Trường Trung học phổ thông Lương Ngọc Quyến đã tạo điều kiện hỗ trợ để nghiên cứu được hoàn thành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. Nørgaard and M. Dacke, "Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles," *Front Zool*, vol. 7, 2010, Art. no. 23.
- [2] A. R. Parker and C. R. Lawrence, "Water capture by a desert beetle," *Nature*, vol. 414, pp. 33–34, 2001.
- [3] C. R. Tracy, N. Laurence, and K. A. Christian, "Condensation onto the Skin as a Means for Water Gain by Tree Frogs in Tropical Australia," *Am. Nat.*, vol. 178, pp. 553–558, 2011.
- [4] A. F. Mills and R. A. Seban, "The condensation coefficient of water," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 10, pp. 1815–1827, 1967.
- [5] A. Lee, M.-W. Moon, H. Lim, W.-D. Kim, and H.-Y. Kim, "Water harvest via dewing," *Langmuir*, vol. 28, pp. 10183–10191, 2012.
- [6] S. Danilo, C. Dominique, and P. Frédéric, "Experimental dropwise condensation of unsaturated humid air – Influence of humidity level on latent and convective heat transfer for fully developed turbulent flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, no. 102, pp. 846–855, 2016.

-
- [7] H. Li, Z. You, and H. Zhang, "Experimental investigation on the heat transfer enhancement of steam condensation on tube with hydrophilic-hydrophobic hybrid surface," *J. Phys. Conf. Ser.*, no. 2280, 2022, Art. no. 12059.
- [8] K.-S. Yang, K.-H. Lin, C.-W. Tu, Y.-Z. He, and C.-C. Wang, "Experimental investigation of moist air condensation on hydrophilic, hydrophobic, superhydrophilic, and hybrid hydrophobic-hydrophilic surfaces," *Int. J. Heat Mass Transf.*, no. 115, pp.1032–1041, 2017.
- [9] R. A. Pinheiro, A. A. Silva, V. J. Trava-Airoldi, and E. J. Corat, "Water vapor condensation and collection by super-hydrophilic and super-hydrophobic VACNTs," *Diam Relat Mater.*, vol. 87, pp. 43–49, 2018.
- [10] S. Baba, K. Sawada, K. Tanaka, and A. Okamoto, "Dropwise Condensation on a Hierarchical Nanopillar Structured Surface," *Langmuir*, vol. 36, pp. 10033–10042, 2020.
- [11] E. K. Her, T.-J. Ko, K.-R. Lee, K. H. Oh, and M.-W. Moon, "Bioinspired steel surfaces with extreme wettability contrast," *Nanoscale*, vol. 4, pp. 2900–2905, 2012.
- [12] C.-W. Yao, J. L. Alvarado, C. P. Marsh, B. G. Jones, and M. K. Collins, "Wetting behavior on hybrid surfaces with hydrophobic and hydrophilic properties," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 290, pp. 59–65, 2014.
- [13] B. Qi, J. Wei, and X. Li, "Enhancement of condensation heat transfer on grooved surfaces: Numerical analysis and experimental study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 1287–1297, 2017.
- [14] R. P. Sear, "Nucleation: theory and applications to protein solutions and colloidal suspensions," *J. Phys. Condens Matter.*, vol. 19, 2007, Art. no. 033101.
- [15] C. G. L. Furmidge, "Studies at phase interfaces. I. The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention," *J. Colloid Sci.*, vol. 17, pp. 309–324, 1962.