



메쉬 특성에 따른 물방울 투과도 변화에 대한 연구

A Study of Droplet Transmissivity Change by Characteristic of Mesh

박진영¹, 황운봉^{1,#}

Jinyoung Park¹ and Woonbong Hwang^{1,#}

¹ 포항공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

Corresponding Author / E-mail: whwang@postech.ac.kr, TEL: +82-54-279-2174

ORCID: 0000-0001-9072-9732

KEYWORDS: Surface modification (표면개질), Superhydrophobic (극소수성), Superhydrophilic (극친수성), Droplet transmissivity (물방울 투과도), Self-assembled monolayer (자기조립단분자막)

Super-wettability surface has various applications and actively studied in many fields. However water droplet transmissivity on super-wettability mesh was not be studied. This work is about water droplet transmissivity of an aluminum mesh with super-wettability on its surface. The mesh which fabricated surface structures with semi-permanent and non-etching process has super-wettability without strength drop of mesh structure. With this process, water droplet transmissivity was measured along various mesh pore per inch and dropping angle. Also water droplet transmissivity along dropping height was measure with super-hydrophobic mesh. As a result, super-hydrophilic mesh shows similar transmissivity behavior with bare mesh which has hydrophilic surface at high pore per inch and high dropping angle, super-hydrophobic 120 mesh shows lowest water droplet transmissivity in various situation.

Manuscript received: November 6, 2017 / Revised: December 18, 2017 / Accepted: December 22, 2017

1. 서론

표면 접촉각이란 물방울이 표면에 떨어졌을 때 나타나는 물방울 면과 표면 사이의 각도를 이야기 하는데 주로 150도 이상을 가지는 표면을 극소수성 표면, 10도 이하를 가지는 표면을 극친수성 표면이라고 이야기한다. 극친수성 표면의 경우 세포배양,¹ 유리 표면 안개 억제,²등 분야에 적용되고 있고, 극소수성 표면의 경우 항공팬이,³ 자가세정,⁴ 서리방지,^{5,6} 부식방지,⁷ 유수분리,⁸ 등 분야에 적용되고 있어 많은 분야에 응용되고 있다.

이러한 표면을 만들기 위해서는 미세 표면 구조 제작이 필요한데 이를 구현하기 위해 다양한 방법의 표면 구조 생성 방법이 연구되고 있다. 금속 표면에 구조를 생성하는 방법들을 크게 세 가지로 나누면 표면에 미세 물질을 접착하여 만드는 방법⁹⁻¹¹이나 표면을 깎아서 구조를 만드는 방법,¹²⁻¹⁴ 그리고 표면에 화합물을 형성하는 방법¹⁵⁻¹⁷이 있다. 이 중 표면에 물질을 접착하는 방법은 주로 지속 시간이 짧은 단점이 있고 표면을 깎아서 구조를 만드는 방법은 메쉬와 같이 복잡한 구조체의 경우 강도나 형상에 변화를 주는 단점이 있다. 하지만 표면 화합물을 생성하는 방법으로

반영구적으로 젖음성을 구현할 수 있다면 메쉬와 같은 복잡한 구조에도 젖음성을 구현할 수 있다.

메쉬에 젖음성을 구현한 연구는 주로 공기 중 수분 채집,¹⁸ 유수분리의 방향으로 주로 연구가 되어왔으나 메쉬를 이용하여 물방울을 막아내는 연구는 많이 진행되지 않았다. 본 연구에서는 표면에 화합물을 형성하는 방법으로 일반, 극친수, 극소수성의 표면을 3가지 크기의 알루미늄 메쉬 표면에 제작하여 물방울을 투사하는 각도와 높이에 따라 투과율이 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 이를 바탕으로 물을 효과적으로 막을 수 있는 조건을 확립하고 어떤 종류의 메쉬가 물방울의 투과를 억제하는 성질이 가장 강한지 알아보며 이를 통해 산업 현장에서 사용될 수 있는 최적의 조건을 확립하고자 한다.

2. 시편 제작 및 실험 방법

산업계에서 주로 이용되는 대표적인 비철금속인 알루미늄을 메쉬의 재질로 선정하였다. 알루미늄의 종류는 가장 널리 사용되는

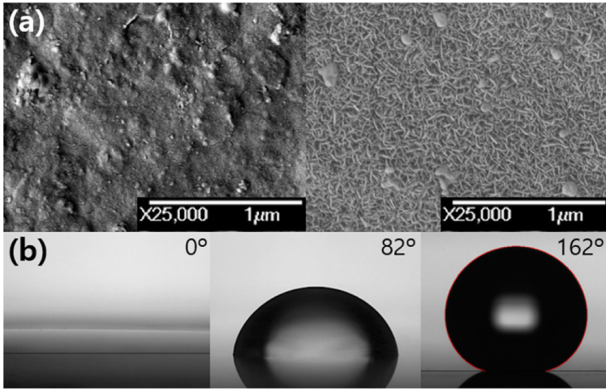


Fig. 1 Bare aluminum surface (left) and nano-structured aluminum surface (right) (a), surface contact angle of superhydrophilic (left), bare (middle), superhydrophobic (right) surface (b)

산업용 알루미늄(99.5% 순도)재질로 하여 각각 일반 표면, 극친수성 표면, 극소수성 표면을 제작하여 다양한 상황에서의 물방울 투과도 거동을 관찰하였다.

2.1 메쉬 표면 개질

알루미늄 메쉬의 표면에 극친수성, 극소수성 등의 젖음성을 부여하기 위해서는 알루미늄 표면에 미세구조를 제작하여야 한다. 일반 알루미늄 표면과 달리 표면 미세 구조를 가지는 알루미늄 표면 제작을 위해 먼저 알루미늄 메쉬를 1 M NaOH 용액에서 30 초간 담그어 표면에 Aluminat 이온을 생성하였다. 그 후 끓는 물에서 15 분간 안정화 시키면 표면에 생성되었던 수산화 알루미늄 이온이 물과 반응하여 수산화 알루미늄 나노 플레이크 형태의 구조가 생성된다(Fig. 1(a)). 이를 통해 생성된 표면은 표면 미세구조와 수산화 알루미늄의 친수성 때문에 극친수성을 가지게 된다. 이 표면 위에 극소수성을 띄는 자기조립단분자막을 형성하기 위해 Hexan과 Heptadecafluoro-1,1,2,2-Tetrahydrodecyl Trichlorosilane (HDFS)을 1000 : 1의 비율로 만들어진 용액에 10분간 담그어 처리하면 미세구조 위에 극소수성을 띄는 단분자막이 형성되어 극소수성을 나타내게 된다(Fig. 1(b)). 일반적인 단일 나노구조 표면의 경우 극소수성이 부족한 경우가 나타나지만 메쉬의 경우 메쉬 자체가 마이크로 구조를 형성하고 있어서 나노 구조만 구현을 하여도 젖음성 효과가 증폭되어 극친수, 극소수 성을 구현할 수 있다.

2.2 실험 설정

메쉬별 투과도를 측정하기 위해 각각의 메쉬를 일정한 각도로 지지 해 줄 수 있는 지지대와 일정한 높이에서 물방울을 떨어뜨릴 수 있는 스탠드를 설치하였다(Fig. 2). 각각의 물방울에 대한 투과도는 편차가 커서 본 실험에서는 같은 양의 물을 일정한 각도로 유지되는 메쉬 위에 한 방울씩 떨어뜨려 메쉬를 타고 흐르는 물을 제외한 망 자체를 통과한 물의 양을 측정하였다. 메쉬에 떨어뜨린 물의 양은 각 메쉬별로 15 g이었고 이때 메쉬에 떨어뜨린 전체 물의 무게 대비 메쉬를 통과하여 비커에 측정된 물의 무게를 나누어 투과도를 측정하였다. 측정 과정에서 메쉬의 종류에

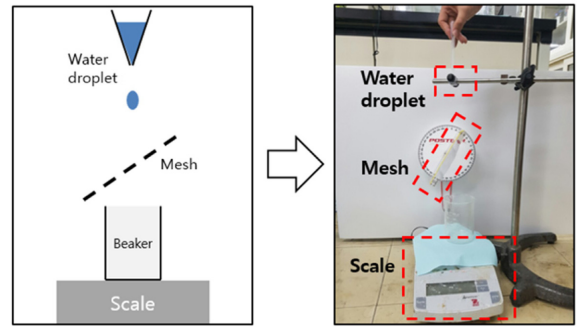


Fig. 2 Schematic view of experimental setup and real experimental setup

따라 물방울이 튀어서 저울의 다른 부분에서 측정되는 문제를 해결하기 위해 투과된 물의 양을 측정하는 비커와 저울 사이에 무진지를 매 측정 마다 교체하여 메쉬를 타고 메쉬 밖으로 흘러내리거나 메쉬 밖으로 튀어나간 물방울의 무게를 제외하였다. 젖음성에 따른 메쉬의 종류와 각도를 변화시켜 가며 실험을 진행하였고 가장 투과도가 낮은 메쉬에 대해서는 물방울이 낙하하는 높이에 따라 투과도를 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 메쉬 크기와 표면 젖음성의 물방울 투사각도에 따른 투과도 변화

일반, 극친수, 극소수 세가지 젖음성의 메쉬들을 사용하여 각각 30 cm 동일한 높이 조건에서 물방울의 투사각을 변화하는 조건을 기준으로 하였을 때 메쉬의 구멍 크기를 변화시키며 실험하였다(Fig. 3) 일반적으로 메쉬의 크기가 작아질수록 투사각이 작을수록 투과도가 낮아지는 것을 관찰 할 수 있었다. 메쉬의 크기는 각각 10, 20, 120을 사용하였는데 이는 1 inch 당 구멍의 수로 1 inch 당 구멍이 많을수록 촘촘한 메쉬임을 알 수 있다. 먼저 10 메쉬의 경우를 살펴보면 일반, 극친수 극소수 표면간에 투과도 거동에 큰 차이가 없음을 관찰할 수 있었다. 이 현상은 메쉬의 간격이 물방울의 크기에 비해 워낙 커서 물방울과 메쉬가 상호작용을 하여 표면 성질이 투과도에 영향을 미치기에 충분한 간격을 가지지 못하여 발생한 현상이다. 다만 그럼에도 불구하고 일반 표면이 극친수, 극소수 표면보다 높은 투과도를 가진 원인은 부족하지만 극친수 표면의 경우 물방울이 메쉬에 부딪혔을 때 표면과 물방울 사이에 발생하는 강한 집착력으로 물방울을 어느 정도 붙잡아서 표면을 따라 흘러 내리게 만들었고, 극소수성의 경우 역시 메쉬의 구멍이 커서 충분한 효과를 발휘하진 못하였지만 물방울이 메쉬 표면에 부딪혔을 때 극소수성 때문에 일부가 뿜겨져 나가서 특히 입사각도가 작을 때 상당한 양의 물방울을 막아냈다.

20 메쉬의 경우 극친수성 표면의 경우 10 메쉬와 큰 차이를 발견할 수 없었지만 일반 메쉬의 경우 극친수성 메쉬와 비슷한 거동을 보이기 시작하였다. 이는 일반 메쉬의 표면은 처리하지 않은 알루미늄 표면이고 이는 친수성을 띄지만 친수성이 극친수성 처리가

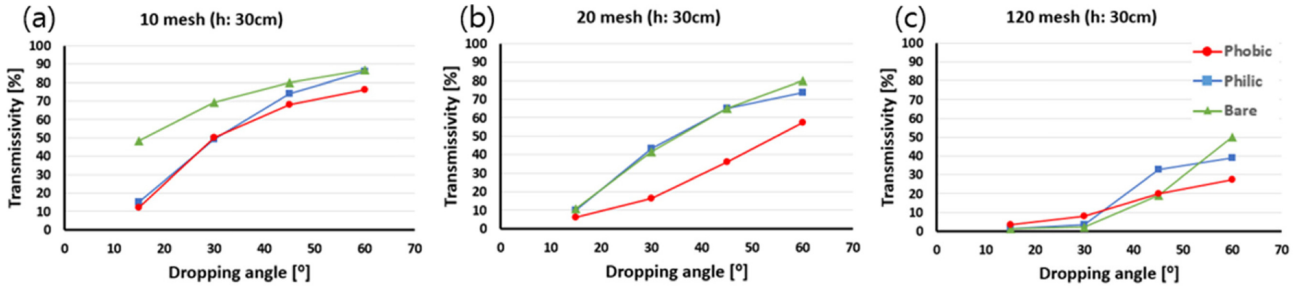


Fig. 3 Transmissivity by pore per inch and dropping angle of bare, superhydrophilic, superhydrophobic mesh

된 표면만큼 강하지 않기 때문에 메쉬의 구멍 크기가 클 때는 친수성이 잘 드러나지 않았지만 구멍크기가 줄어들면서 극친수성 표면과 유사하게 물방울이 메쉬 표면에서 붙잡히기 시작하고 이런 물방울들이 표면을 타고 흘러 내리면서 극친수성 표면과 96.74% 유사한 투과도를 가지게 되었다. 이에 반해 극소수성 표면의 경우 10 메쉬를 사용 하였을 때와 확연히 다른 거동을 나타내기 시작하였고 물방울의 크기에 비해 구멍의 크기가 충분히 작아져서 물방울이 표면에 부딪혔을 때 10 메쉬에서와 같이 부딪치지 않고 극소수성 평판에 부딪혔을 때와 같이 튕겨져 나가는 거동을 보이기 시작하였다.

120 메쉬의 경우는 메쉬의 구멍이 매우 작아서 각각의 메쉬들에서 젖음성 특성들이 충분히 나타났다. 일반 메쉬와 극친수성 메쉬의 경우는 입사각이 낮아질 경우 대부분의 물방울이 표면에 붙잡혀 흘러내리는 현상을 나타내었다. 다만 극친수의 경우 물방울의 입사각이 충분히 낮아지지 않았을 때 표면에 붙잡힌 물의 양이 일반 표면 보다 커서 표면에 붙잡힌 물을 새로이 입사되는 물이 밀어내서 오히려 투과도가 높아지는 현상을 관찰 할 수 있었다. 반면 일반 표면의 경우 친수성을 띄는 표면이 물을 붙잡기는 하지만 붙잡힌 물이 일부를 제외하고 곧 흘러내려 메쉬 밖으로 떨어지기 때문에 특정 구간에서 극친수성 표면보다 낮은 투과도를 보이기도 하였다. 극소수성 표면의 경우 물방울이 표면에 부딪혔을 때 깨져서 메쉬 뒤로 산란되는 일부를 제외하고 주로 튕겨져 나갔으며 입사각이 작아질수록 표면과 물방울 사이에 작용하는 반발력이 작아지면서 깨지는 물방울도 줄어들어 투과도가 크게 줄어들었다. 하지만 낮은 입사각의 경우 극친수성 표면과 일반 표면은 거의 대부분의 물방울을 잡아내고 또 메쉬 밖으로 흘러내리게 하여 낮은 입사각에서도 일부 물방울이 깨져 투과되는 극소수성 표면보다 더 낮은 투과도를 보이기도 하였다.

실험결과 다양한 이유로 각각의 메쉬의 투과도가 달라졌기 때문에 전체적으로 투과도 변화를 살펴보기 위해 각각의 메쉬별 투과도 평균을 그래프로 나타내었다(Fig. 4). 위에서도 자주 언급된 바와 같이 극친수 표면과 일반 표면은 친수 계통의 표면이기 때문에 상당히 유사한 평균 투과도를 나타내고 있었고 극소수성 표면의 경우 일부 구간에서 극친수성 표면과 일반 표면에 비해 높은 투과도를 보이긴 했으나 전체적으로 낮은 투과도를 보였고 특히 20 메쉬 이상에서 평균 70% 이상의 물방울을 막아내는 모습을 보였다.

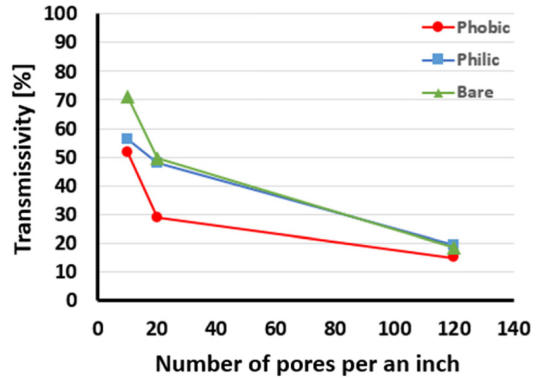


Fig. 4 Average transmissivity of bare, superhydrophilic, superhydrophobic mesh

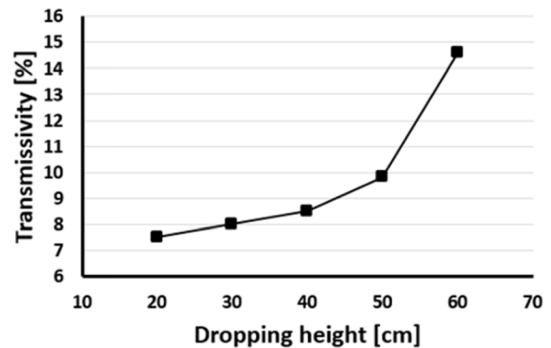


Fig. 5 Transmissivity along dropping height of superhydrophobic 120 mesh

3.2 물방울 투사 높이에 따른 물방울 투과도의 변화

위의 메쉬 크기와 표면 젖음성의 물방울 투사 각도에 따른 투과도 변화 결과를 바탕으로 물방울 높이에 따른 투과도의 변화를 관찰 하기 위하여 가장 평균 투과도가 낮았던 극소수성 120 메쉬에 대해서 높이에 따른 물방울 투과도 측정을 실행하였다. 기존 30 cm 결과에서 극소수성 메쉬의 특징인 물방울을 밀어내는 특성이 잘 구현되는 30도 각도에서 높이 변화를 주어 실행하였다. 실험 결과 40 cm까지는 기존의 특성이 잘 구현 되어 대부분의 물을 막아낼 수 있었으나 50 cm에서 물방울의 산란이 시작되었고 60 cm에서는 많은 물방울이 깨지는 양이 급격히 많아져서 메쉬를 투과하는 물의 양이 급격하게 증가하였다. 비록 85% 이상의 물을 막아내긴 했지만 30 cm에서 떨어뜨린 물방울에 비해 1.83배 더

많은 물이 투과되는 것을 보아 비록 극소수성으로 처리하긴 했지만 결국 구멍이 뚫려있는 메쉬의 구조적 한계 때문에 물의 표면장력을 과도하게 넘어서는 힘을 받았을 때 물방울이 깨지면서 투과를 막을 수 없는 임계점이 존재할 것이고 이를 넘어서는 물방울에 대해서는 효과적으로 투과를 막아 낼 수 없을 것이라 예측을 확인할 수 있었다.

4. 결론

표면 미세 구조를 통해 젖음성을 구현한 메쉬를 통해 젖음성과 물방울 투과율 간의 상관관계를 알아 낼 수 있었다. 일반 메쉬의 경우 친수성을 나타내기 때문에 메쉬의 구멍 크기가 작아지면 어느 정도 극친수성의 메쉬와 비슷한 거동을 보임을 관찰 할 수 있었다. 반면 극소수성의 메쉬의 경우 메쉬의 구멍 크기가 충분히 작을 경우 물방울을 극소수 표면과 비슷하게 반발시켜 튕겨내는 모습을 관찰할 수 있었다. 다만 물방울의 속도가 빨라지면 물방울의 형상을 유지시켜주는 표면 장력 보다 메쉬에 부딪혔을 때 충격이 현저하게 커져서 물방울이 작은 물방울로 쪼개지며 투과도가 급격히 상승하는 현상을 관찰할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 전반적으로 극소수성 메쉬가 다양한 상황에서 일반, 극친수 메쉬보다 낮은 투과율을 나타내었고 평균적으로도 가장 낮은 투과율을 보였다. 이러한 자료를 바탕으로 산업계에서 물방울이 튀는 것을 방지해야 하지만 통기성은 유지되어야 선박 외부에 설치하는 센서 등에 극소수성 메쉬를 설치한다면 조건에 따라 90% 이상의 물을 막아 낼 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012H1B8A2026127).

REFERENCES

- Liu, Y., Wang, X., Wan, W., Li, L., Dong, Y., et al., "Multifunctional Nitrogen-Doped Graphene Nanoribbon Aerogels for Superior Lithium Storage and Cell Culture," *Nanoscale*, Vol. 8, No. 4, pp. 2159-2167, 2016.
- Jiang, Y., Li, Y., Wang, X., Piao, L., Shi, Z., et al., "Fabrication of New Transparent and Hydrophilic Hybrid Anti-Fog Coating from Silane Coupler Modified by Polyethylene Glycols," *Chemical Research in Chinese Universities*, Vol. 33, No. 1, pp. 150-154, 2017.
- Kim, Y. and Hwang, W., "Wettability Modified Aluminum Surface for a Potential Antifungal Surface," *Materials Letters*, Vol. 161, pp. 234-239, 2015.
- George, J. E., Rodrigues, V. R., Mathur, D., Chidangil, S., and George, S. D., "Self-Cleaning Superhydrophobic Surfaces with Underwater Superaerophobicity," *Materials & Design*, Vol. 100, pp. 8-18, 2016.
- Kim, P., Wong, T. S., Alvarenga, J., Kreder, M. J., Adorno-Martinez, W. E., et al., "Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with Extreme Anti-Ice and Anti-Frost Performance," *ACS Nano*, Vol. 6, No. 8, pp. 6569-6577, 2012.
- Jing, T., Kim, Y., Lee, S., Kim, D., Kim, J., et al., "Frosting and Defrosting on Rigid Superhydrophobic Surface," *Applied Surface Science*, Vol. 276, pp. 37-42, 2013.
- Park, B. and Hwang, W., "A Facile Fabrication Method for Corrosion-Resistant Micro/Nanostructures on Stainless Steel Surfaces with Tunable Wettability," *Scripta Materialia*, Vol. 113, pp. 118-121, 2016.
- Cao, W. T., Liu, Y. J., Ma, M. G., and Zhu, J. F., "Facile Preparation of Robust and Superhydrophobic Materials for Self-Cleaning and Oil/Water Separation," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 529, pp. 18-25, 2017.
- Zhi, D., Lu, Y., Sathasivam, S., Parkin, I. P., and Zhang, X., "Large-Scale Fabrication of Translucent and Repairable Superhydrophobic Spray Coatings with Remarkable Mechanical, Chemical Durability and UV Resistance," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 5, No. 21, pp. 10622-10631, 2017.
- Liu, H., Huang, J., Chen, Z., Chen, G., Zhang, K. Q., et al., "Robust Translucent Superhydrophobic PDMS/PMMA Film by Facile One-Step Spray for Self-Cleaning and Efficient Emulsion Separation," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 330, pp. 26-35, 2017.
- Qahtan, T. F., Gondal, M. A., Alade, I. O., and Dastageer, M. A., "Fabrication of Water Jet Resistant and Thermally Stable Superhydrophobic Surfaces by Spray Coating of Candle Soot Dispersion," *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, Article No. 7531, 2017.
- Jie, H., Xu, Q., Wei, L., and Min, Y., "Etching and Heating Treatment Combined Approach for Superhydrophobic Surface on Brass Substrates and the Consequent Corrosion Resistance," *Corrosion Science*, Vol. 102, pp. 251-258, 2016.
- Rezayi, T. and Entezari, M. H., "Toward a Durable Superhydrophobic Aluminum Surface by Etching and ZnO Nanoparticle Deposition," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 463, pp. 37-45, 2016.
- Kim, Y., Lee, S., Cho, H., Park, B., Kim, D., et al., "Robust Superhydrophilic/Hydrophobic Surface Based on Self-Aggregated Al_2O_3 Nanowires by Single-Step Anodization and Self-Assembly Method," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 4, No. 10, pp. 5074-5078, 2012.
- Cho, H., Kim, D., Lee, C., and Hwang, W., "A Simple Fabrication Method for Mechanically Robust Superhydrophobic Surface by Hierarchical Aluminum Hydroxide Structures,"

- Current Applied Physics, Vol. 13, No. 4, pp. 762-767, 2013.
16. Zhang, H., Yin, L., Liu, X., Weng, R., Wang, Y., et al., "Wetting Behavior and Drag Reduction of Superhydrophobic Layered Double Hydroxides Films on Aluminum," Applied Surface Science, Vol. 380, pp. 178-184, 2016.
 17. De, D. and Sarkar, D., "Superhydrophobic ZnAl Double Hydroxide Nanostructures and ZnO Films on Al and Glass Substrates," Materials Chemistry and Physics, Vol. 185, pp. 195-201, 2017.
 18. Azad, M., Ellerbrok, D., Barthlott, W., and Koch, K., "Fog Collecting Biomimetic Surfaces: Influence of Microstructure and Wettability," Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 10, No. 1, Paper No. 016004, 2015.