

Fabrication de revêtements superhydrophobes durables pour les isolateurs en verre

A. Allahdini¹, G. Momen¹, R. Jafari¹

B. ¹*Department of Applied Sciences, University of Quebec in Chicoutimi (UQAC), 555, boul. de
l'Université, Chicoutimi, Québec, G7H 2B1, Canada*

SOMMAIRE

L'accumulation de pollution sur les équipements électriques et les isolateurs à haute tension est un problème majeur dans les zones industrielles et côtières. Elle provoque des dommages importants comme des pannes de courant et des contournements qui engendrent des pertes de plusieurs millions de dollars [1–3]. Ces problèmes ont fait l'objet de beaucoup d'attentions. Ainsi, de nombreux efforts ont été déployés pour étudier et mettre au point des méthodes permettant d'éliminer les conséquences néfastes de la pollution sur les isolateurs [4–6].

L'une des stratégies intéressantes pour lutter contre les problèmes d'accumulation de pollution consiste à utiliser des revêtements superhydrophobes/autonettoyants (l'angle de contact de l'eau est supérieur à 150° et l'hystérésis de l'angle de contact est inférieur à 10°). Ces revêtements peuvent réduire la mouillabilité de la surface et les pollutions peuvent être facilement nettoyées en éliminant les gouttelettes d'eau, réduisant ainsi l'accumulation de particules à leur surface [7–10].

Dans cet article, nous avons développé un revêtement à base de silicone superhydrophobe pour les applications à haute tension. Les propriétés du revêtement superhydrophobe fabriqué ont été étudiées en utilisant une goniométrie à angle de contact ainsi que des analyses SEM et FTIR. Le revêtement a montré un excellent autonettoyage en raison de son angle de contact élevé et de sa très faible hystérésis. Afin d'évaluer la résistance aux intempéries, un test QUV a été effectué. Le revêtement superhydrophobe pourrait conserver ses propriétés après 100 heures d'exposition.

MOTS CLÉS

Superhydrophobic coating, Self-cleaning, Silicone, Porcelain insulator

1. Introduction

Les surfaces superhydrophobes ont suscité un grand enthousiasme à la fois, dans le domaine de la recherche et dans le cadre des applications pratiques incluant les systèmes autonettoyants [11, 12]. On compte également parmi ces applications, la séparation huile-eau [13], les systèmes anticorrosion [14–16], les antigivrants [17–19] et l'encrassement biologique [20, 21].

En règle générale, une surface dont l'angle de contact avec l'eau est supérieur à 150°C et dont l'hystérésis de l'angle de contact est inférieure à 10°C est classée dans la catégorie superhydrophobe en termes de mouillabilité. Cette propriété de surface est obtenue par la combinaison de la chimie et de la topographie de surface [22]. Grâce au biomimétisme, l'autonettoyage ou l'effet feuille de lotus est un comportement attrayant motivé par la superhydrophobicité et peut être utilisé dans différentes applications pour les verres, les panneaux solaires, la conception de carreaux et de tissus [23].

Le verre et la porcelaine sont les matériaux les plus populaires pour les isolateurs à haute tension en raison de leurs propriétés isolantes et de leur résistance aux intempéries. Cependant, en raison de leur grande énergie de surface, ils sont facilement mouillés par la pluie et recouverts de différents polluants. Les types de contaminants présents dans l'environnement varient en fonction des conditions géographiques, en plus, de l'agriculture et des industries locales. Les types de polluants les plus courants observés sont les suivants: le sel, le ciment/chaux, les poussières, les excréments d'oiseaux, les produits chimiques, les émissions des voitures, sans omettre la glace et la neige [24, 25].

À ce jour, divers procédés ont été rapportés pour conférer une superhydrophobicité à une surface déjà existante notamment la gravure chimique [26], les procédés lithographiques [27], le dépôt chimique en phase vapeur [27, 28] et l'électrofilage [30]. Toutefois, l'application à grande échelle de la plupart de ces méthodes n'est pas réalisable en raison du coût élevé des matériaux et de la complexité de l'équipement. C'est pourquoi, les revêtements sont largement utilisés dans toutes les applications industrielles et l'utilisation de revêtements superhydrophobes peut être une solution très pratique pour bénéficier des particularités remarquables de la superhydrophobicité dans les industries.

D'un côté, les revêtements isolants RTV ont été développés en premier lieu pour améliorer les performances de contournement due à la contamination des équipements électriques. Le polydiméthylsiloxane (PDMS) est l'un des principaux composants des revêtements de caoutchouc silicone RTV, dont les chaînes moléculaires contiennent des groupes CH_3- offrant un certain degré d'hydrophobicité. Les angles de contact de l'eau sur la surface des revêtements de caoutchouc de silicone RTV sont d'environ 110° et un tel niveau d'hydrophobicité ne peut pas conférer un comportement autonettoyant efficace [31].

Les matériaux superhydrophobes sont généralement fabriqués en dispersant des nanoparticules dans une matrice. Des nanoparticules à adaptation hydrophobe modifient la chimie de surface en plus de former une micro/nano structure [32]. Ces particules peuvent être utilisées dans une variété de résines, à savoir des résines époxyde [33], polyuréthane [32], polystyrène [34], polydiméthylsiloxane [35], et de caoutchouc d'au silicium [36]. Il est important de préciser que les liants à faible tension de surface sont des choix plus appropriés pour les applications autonettoyantes et contribueraient à améliorer la durabilité.

Un revêtement hybride PDMS/nano-silice et un revêtement en caoutchouc de silicone RTV ont été appliqués sur des isolateurs en verre pour des expériences d'accumulation de glace. L'angle de contact de l'eau sur le revêtement hybride était de 161° . Les résultats ont montré que le taux d'accumulation de glace sur le revêtement hybride était significativement inférieur à celui des isolants en caoutchouc silicone RTV [31]. Wang et al. [37], ont fabriqué un revêtement superhydrophobe par dispersion de nanoparticules de silice modifiée dans une résine de fluorosilicone. Ces nanoparticules de silice ont été modifiées à l'aide de (1H, 1H, 2H, 2H) perfluorooctyltriéthoxysilane. L'angle de contact le plus élevé obtenu sur leurs échantillons était de 153° et le meilleur angle de glissement était de 2.5° . Martin et al. [35], ont également fabriqués des PDMS rendus superhydrophobes par la création de micromotifs et par la pulvérisation de nanoparticules de SiO_2 hydrophobes avec un liant de résine méthylphényl silicone. En ajoutant du fluorosilane, les revêtements ont été rendus super-oléophobes.

Bien que de nombreux revêtements superhydrophobes aient été obtenus avec succès par ces procédés, il existe encore certaines limitations dues au coût élevé des matériaux, à la teneur en fluor, aux étapes

multiples de mise en œuvre, à la présence de lignes de durcissement aux ultraviolets et au manque de durabilité.

Dans cette étude, nous avons développé un revêtement superhydrophobe simple et sans fluor qui est basé uniquement sur un composite de nanoparticules de résine de silice-polyester et de silice fumée, qui présente d'excellentes propriétés autonettoyantes, une non-mouillabilité et une grande stabilité aux UV utilisé sur les isolateurs en verre et en porcelaine. Les résines silicone-polyester allient les bonnes propriétés des silicones (résistance aux intempéries, faible tension superficielle, résistance chimique) à celles des polyesters (bonnes propriétés mécaniques, bon mouillage des charges et coût bas).

2. EXPÉRIENCES

2.1. Matériaux. La résine SILIKOFTAL HTT et la silice fumée AEROSIL R812S ont été gracieusement préparées par la société Evonik. Le tétrahydrofurane (THF) et l'acétone ont été achetés à Sigma-Aldrich.

2.2 Préparation des revêtements. 4.5 grammes de silice fumée R812S ont été dispersés dans 60 grammes de THF sous traitement aux ultrasons pendant 60 minutes. Ensuite, 10 grammes de SILIKOFTAL HTT ont été ajoutés à la solution, agités pendant 15 minutes et traités par sonication pendant 20 minutes. Les lames de verre ont été rincées à l'acétone. Deux grammes de la formulation de revêtement ont été placés sur des substrats de verre et appliqués à l'aide d'une enduction centrifuge (Laurel Company, modèle WS-400B-6NPP) à 800 tr / min pendant 30 secondes. Les échantillons ont été placés dans l'étuve à 250°C pendant 15 minutes, après refroidissement à température ambiante, une autre couche de revêtement a été appliquée sur les échantillons et placée dans l'étuve pendant 30 minutes supplémentaires pour un durcissement complet. À titre de comparaison, 30 grammes de SILIKOFTAL HTT ont été dilués avec du THF et appliqués selon le même processus et durcis pendant 30 minutes à 250°C. La Figure 1 est une représentation schématique du procédé de fabrication.

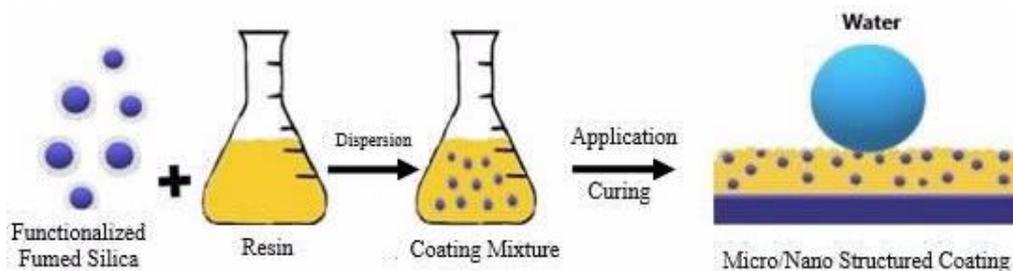


Figure 1. Représentation schématique de la préparation de revêtement superhydrophobe.

2.3. Caractérisation

Mesure de l'angle de contact. Les angles de contact statique et dynamique ont été mesurés à la température ambiante à partir de quatre positions différentes pour divers échantillons, et la valeur moyenne a été rapportée à l'aide d'un goniomètre à angle de contact Kruss TM DSA100. Une goutte d'eau de 4 μ l a été déposée sur la surface de l'échantillon et les angles de contact ont été approximés à l'aide de l'équation de Young-Laplace.

FTIR. La composition chimique des revêtements a été caractérisée à l'aide d'un spectromètre Cary 630 FTIR (Agilent, USA) en mode de réflexion totale atténuée (ATR) dans la gamme infrarouge de 400 à 4000 cm^{-1} .

Évaluation autonettoyante. La capacité d'autonettoyage des revêtements a été étudiée en utilisant de la poudre de kaolin comme contaminant et une caméra pour enregistrer les images.

Comportement non mouillant. Le comportement non mouillant du revêtement SHP a été évalué selon la méthode de Moose.

La microscopie électronique à balayage. Des images au microscope électronique à balayage (MEB) ont été prises à l'aide de d'un instrument SEM JSM-6480 LV fabriqué par JEOL Japon pour observer la morphologie des revêtements développés. Avant de procéder à l'imagerie, les échantillons ont été recouverts d'un mince film d'or par pulvérisation cathodique.

Test de vieillissement accéléré. Afin d'estimer la stabilité de surface par rapport aux facteurs naturels, un essai de vieillissement accéléré par QUV de Q-LAB a été utilisé. La durabilité des revêtements a été évaluée selon la norme ASTM G154.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Mesure de l'angle de contact

La mouillabilité de la lame de verre non traitée, de la résine pure SILIKOFTAL HTT et du revêtement superhydrophobe a été étudiée par utilisation d'une goniométrie statique et dynamique à angle de contact d'une gouttelette d'eau de 4 μ L. L'eau peut facilement se répandre sur le verre en raison de l'énergie de surface plus élevée du verre par rapport à l'eau. Pendant ce temps, la résine SILIKOFTAL a montré des propriétés hydrophobes. En introduisant des particules de nanosilice dans le revêtement, l'hydrophobicité du revêtement augmente considérablement en raison de la formation d'une structure rugueuse à la surface. Les angles de contact avec l'eau et les hystérésis d'angle de contact de la résine pure SILIKOFTAL HTT et du revêtement superhydrophobe (revêtement SHP) sont illustrés dans le Tableau 1. Les gouttelettes d'eau étaient très instables sur les surfaces superhydrophobes développées et pouvaient rapidement s'envoler sous une petite vibration pendant les expériences, ce qui est une indication du régime de mouillage de Cassie-Baxter.

Tableau 1. Angle de contact statique et hystérésis de l'angle de contact de l'eau sur différents échantillons

<i>Sample</i>	<i>CA</i>	<i>CAH</i>
<i>Résine SILIKOFTAL</i>	91°	6.67°
<i>Revêtement SHP</i>	166.6°	1.69°
<i>Lame de verre non traitée</i>	54°	44°

L'angle de contact et l'hystérésis d'angle de contact de la gouttelette d'eau sur le revêtement SHP sont illustrés aux Figures 2a et b. La Figure 2c montre différentes tailles de gouttelettes d'eau doucement déposées sur le revêtement SHP.

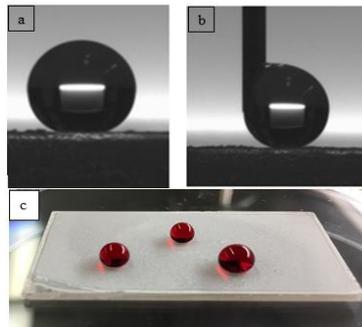


Figure 2. a) Goutte d'eau sessile sur le revêtement SHP, b) Mesure dynamique de l'angle de contact, c) Gouttelettes d'eau de couleur rouge sur le revêtement SHP.

3.2. La microscopie électronique à balayage (MEB)

Afin de comprendre la morphologie de surface des échantillons, des images au MEB du revêtement SHP en résine plate ont été prises comme indiqué à la Figure 3. Les images montrent les topographies distinctives de la résine pure et du revêtement SHP contenant des particules de silice fumée. La surface du SILIKOFTAL HTT était lisse, cependant, lorsque l'AEROSIL R812S a été ajouté à la résine, le revêtement a présenté une structure rugueuse. AEROSIL R812S est une silice fumée ayant une surface spécifique élevée (BET) égale à 195-245 m^2/g et les images au MEB confirment la très petite taille de particules de ce matériau. L'image MEB du revêtement SHP montre un réseau compact de nanoparticules liées les unes aux autres par une résine, tandis que la résine silicone-polyester présente de bonnes propriétés de mouillage pour les nanoparticules de silice, car il n'y a aucun signe

d'aggrégations énormes ou de séparation de phase. Les micro-nanostructures formées sont responsables de la transmission d'un comportement superhydrophobe au revêtement fabriqué.

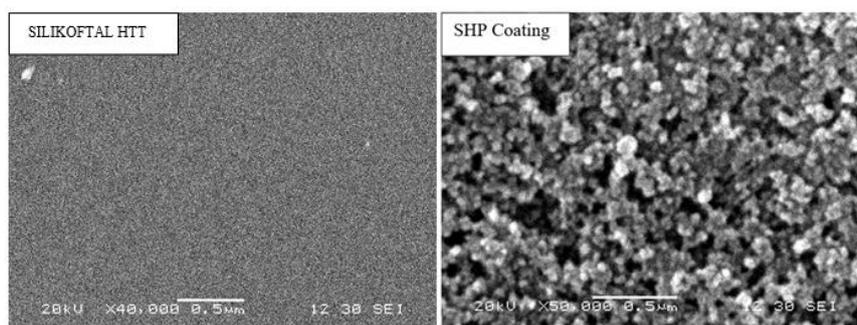


Figure 3. Images MEB de la résine SILIKOFTAL HTT et du revêtement SHP.

3.3. FTIR

Dans le but d'évaluer la présence de liaisons chimiques sur des échantillons, une analyse FTIR a été réalisée. Les résultats du spectre FTIR pour la résine, la silice fumée et le revêtement SHP sont représentés à la Figure 4.

La résine SILIKOFTAL HTT est une résine hybride silicone polyester et les résultats FTIR montrent les deux pics concernant les groupes polyester et les groupes Si. Le pic net à 1800 cm^{-1} représente un ester insaturé et le pic à 1710 cm^{-1} est une vibration anti-symétrique de la liaison Si – O – Si tandis que le large pic à 870 cm^{-1} montre l'étirement des bandes Si-OR. La bande d'adsorption à 1430 cm^{-1} est attribuée à l'étirement asymétrique des groupes $-\text{CH}_3$. Les pics observés à $600\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ dans la région de l'empreinte digitale sont liés au C-C et à la flexion des bandes C-H des chaînes polymères. La silice pyrogénée utilisée dans ces expériences était l'AEROSIL R812S et on observe les étirements des groupes Si-OR à 870 cm^{-1} . Le revêtement SHP montre tous les pics liés à la fois à la résine et à la silice fumée.

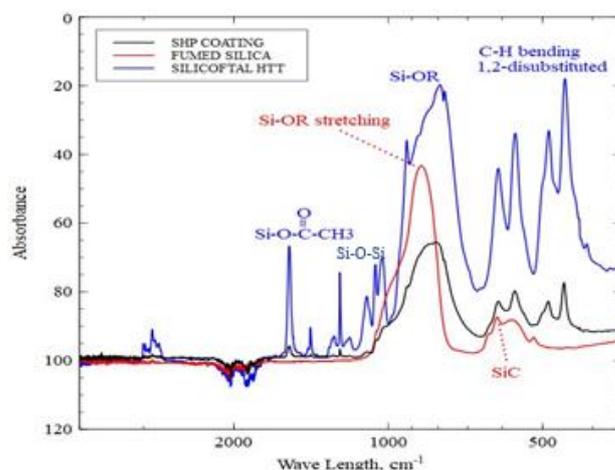


Figure 4. Spectres FTIR pour les revêtements SILIKOFTAL HTT, AEROSIL R812S et SHP

3.4. Capacité d'auto nettoyage ou autonettoyante

Dans la nature, les gouttelettes d'eau peuvent facilement se détacher de nombreuses feuilles de plantes, telles que le lotus et la Salvinia Molesta, et les aider à rester exemptes de saleté et de pollution grâce au comportement autonettoyant. L'auto nettoyage des revêtements superhydrophobes développés a été vérifié en utilisant de la poudre de kaolin comme contaminant. Une couche épaisse de poudre de kaolin a été saupoudrée sur la surface du revêtement et, à l'aide d'une seringue, une gouttelette d'eau pendante a été lentement balayée à travers le revêtement pollué. La gouttelette d'eau a efficacement recueilli la poudre de kaolin lors de son déplacement sur le revêtement (Figure 5).



Figure 5. Propriété autonettoyante du revêtement SHP (une gouttelette d'eau pendante collecte efficacement le Kaolin sur son trajet)

Lors de cet essai, l'eau pourrait bien collecter la pollution sur le revêtement SHP. Ce phénomène est dû à la force d'adhérence plus faible des particules de poussière sur le revêtement par rapport à la force d'adhérence de la poussière aux gouttelettes d'eau en raison de la faible énergie de surface du revêtement combinée à des structures micro / nano rugueuses.

3.5. Effet de Moïse

Le revêtement SHP et une lame de verre non traitée ont été placés dans deux boîtes de Pétri distinctes et de l'eau a été lentement versée dans les deux boîtes de Pétri. Pour une meilleure visibilité, l'eau était colorée en rouge par un colorant alimentaire. Le verre non traité était simplement recouvert d'eau, alors qu'il restait une colonne d'air de près de 6.3 mm de hauteur autour de la lame revêtue (Figure 6). Cet essai montre la capacité du revêtement superhydrophobe à rester sec.



Figure 6. Capacité du revêtement SHP à rester sec (la photo de gauche montrant le revêtement SHP et la photo de droite le verre non traité).

3.6. Test de vieillissement accéléré

Le vieillissement artificiel a été conduit dans une chambre UV selon la norme ASTM G154 qui utilise une source de lumière fluorescente simulant UVA-340. Le cycle de vieillissement accéléré a été défini comme suit: l'irradiation UV pendant 8h à 60°C avec une intensité d'irradiation de 0,68 W / m², et une condensation pendant 4h à 50°C. Les angles de contact des échantillons après 100 heures d'exposition dans une chambre QUV sont répertoriés dans le Tableau 2. Ce temps d'exposition sur lequel nous nous sommes appuyés correspond à une exposition d'environ six mois en Ontario, au Canada.

Tableau 2. Angle de contact et CAH des échantillons après une exposition de 100 heures dans une chambre QUV

<i>Sample</i>	<i>CA</i>	<i>CAH</i>
<i>Résine SILIKOFTAL HTT</i>	82°	20°
<i>Revêtement SHP</i>	160.8°	3.53°

L'angle de contact des échantillons a légèrement diminué au cours de l'essai. Le revêtement SHP a conservé sa superhydrophobie après 100 h de tests QUV. Ces résultats indiquent que le revêtement SHP présente une bonne résistance aux intempéries, tout en conservant sa propriété d'auto nettoyage.

CONCLUSION

Un revêtement superhydrophobe facile à fabriquer a été développé en utilisant une résine hybride en silice-polyester et une silice pyrogénée modifiée de façon hydrophobe. Le revêtement présentait un

angle de contact de l'eau de 166° et une hystérésis d'angle de contact de moins de 2°, ce qui donnait d'excellentes propriétés autonettoyantes. Les nanoparticules ont été choisies en raison de leur surface spécifique élevée, de leur taille très fine et de la morphologie du revêtement composite. Les microstructures ont évidemment été observées sur une image SEM. Le revêtement présentait une bonne résistance aux intempéries et conservait sa superhydrophobicité après 100 heures d'exposition par test QUV. Ce revêtement superhydrophobe peut être utilisé pour les isolateurs en verre et en porcelaine afin de prévenir les contournements causés par les polluants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. Kumar and V. Dave, "Impact of Pollution on High Voltage Insulators: Research Status and Recommendations," vol. 9, no. 2, pp. 722–730, 2018.
- [2] M. T. Genc, "The pollution flashover on high voltage insulators Electric Power Systems Research The pollution flashover on high voltage insulators," no. November 2008, 2016.
- [3] M. Dimitropoulou, D. Pylarinos, K. Siderakis, E. Thalassinakis, and M. Danikas, "Comparative Investigation of Pollution Accumulation and Natural Cleaning for Different HV Insulators," vol. 5, no. 2, pp. 764–774, 2015.
- [4] J. F. J. Zhang and M. Farzaneh, "Experimental study and mathematical modelling of flashover on extra-high voltage insulators covered with ice," vol. 3480, no. April, pp. 3471–3480, 2004.
- [5] Y. Lv, W. Zhao, J. Li, and Y. Zhang, "Simulation of Contamination Deposition on Typical Shed Porcelain Insulators," 2017.
- [6] A. Bojovschi, T. V. Quoc, H. N. Trung, and D. T. Quang, "applied sciences Environmental Effects on HV Dielectric Materials and Related Sensing Technologies."
- [7] K. Maghsoudi, G. Momen, R. Jafari, and M. Farzaneh, "Direct replication of micro-nanostructures in the fabrication of superhydrophobic silicone rubber surfaces by compression molding," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 458, no. July, pp. 619–628, 2018.
- [8] T. Kamegawa, Y. Shimizu, and H. Yamashita, "Superhydrophobic Surfaces with Photocatalytic Self-Cleaning Properties by Nanocomposite Coating of TiO₂ and Polytetrafluoroethylene," *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 27, pp. 3697–3700, 2012.
- [9] V. A. Online, S. S. Latthe, C. Terashima, K. Nakata, M. Sakai, and A. Fujishima, "transparent and self-cleaning superhydrophobic," pp. 5548–5553, 2014.
- [10] S. S. Latthe, R. S. Sutar, V. S. Kodag, A. K. Bhosale, and A. M. Kumar, "Progress in Organic Coatings Self – cleaning superhydrophobic coatings : Potential industrial applications," *Prog. Org. Coatings*, vol. 128, no. August 2018, pp. 52–58, 2019.
- [11] Z. Zuo, J. Gao, R. Liao, X. Zhao, and Y. Yuan, "A novel and facile way to fabricate transparent superhydrophobic film on glass with self-cleaning and stability," *Mater. Lett.*, vol. 239, pp. 48–51, 2019.
- [12] A. Bake, N. Merah, A. Matin, M. Gondal, T. Qahtan, and N. Abu-dheir, "Progress in Organic Coatings Preparation of transparent and robust superhydrophobic surfaces for self- cleaning applications," *Prog. Org. Coatings*, vol. 122, no. May, pp. 170–179, 2018.
- [13] Z. Zhang, H. Wang, Y. Liang, X. Li, L. Ren, and Z. Cui, "One-step fabrication of robust superhydrophobic and superoleophilic surfaces with self- cleaning and oil / water separation function," *Sci. Rep.*, no. December 2017, pp. 1–12, 2018.
- [14] C. Wang, F. Tang, Q. Li, Y. Zhang, and X. Wang, "Spray-coated superhydrophobic surfaces with wear-resistance, drag-reduction and anti-corrosion properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 514, pp. 236–242, 2017.
- [15] G. Momen and M. Farzaneh, "Facile approach in the development of icephobic hierarchically textured coatings as corrosion barrier," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 299, pp. 41–46, 2014.
- [16] E. Vazirinasab, R. Jafari, and G. Momen, "Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 341, no. November 2017, pp. 40–56, 2018.
- [17] W. Shi, L. Wang, Z. Guo, and Y. Zheng, "Excellent Anti-Icing Abilities of Optimal Micropillar Arrays with Nanohairs," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 2, no. 18, pp. 1–8, 2015.
- [18] G. Momen, R. Jafari, and M. Farzaneh, "Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 349, pp. 211–218, 2015.
- [19] L. Foroughi Mobarakeh, R. Jafari, and M. Farzaneh, "The ice repellency of plasma polymerized hexamethyldisiloxane coating," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 284, pp. 459–463, 2013.
- [20] J. Genzer and A. Marmur, "Biological and Synthetic Self- Cleaning Surfaces," vol. 33, no. August 2008, pp. 15–19, 2019.
- [21] C. Xue, X. Guo, J. Ma, and S. Jia, "Fabrication of Robust and Antifouling Superhydrophobic Surfaces via Surface-Initiated Atom Transfer Radical Polymerization," 2015.
- [22] A. Marmur, "From hydrophilic to superhydrophobic: Theoretical conditions for making high-contact-

- angle surfaces from low-contact-angle materials,” *Langmuir*, vol. 24, no. 14, pp. 7573–7579, 2008.
- [23] S. Nishimoto and B. Bhushan, “RSC Advances Bioinspired self-cleaning surfaces with,” pp. 671–690, 2013.
- [24] M. Ehsani, H. Borsi, E. Gockenbach, J. Morshedean, and G. R. Bakhshandeh, “An investigation of dynamic mechanical, thermal, and electrical properties of housing materials for outdoor polymeric insulators,” *Eur. Polym. J.*, vol. 40, no. 11, pp. 2495–2503, 2004.
- [25] M. Hadipour and M. A. Shiran, “Various Pollutions of Power Line Insulators Various Pollutions of Power Line Insulators,” no. December, 2017.
- [26] C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, O. Akar, and T. Akin, “Effect of pattern size and geometry on the use of Cassie-Baxter equation for superhydrophobic surfaces,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 386, no. 1–3, pp. 116–124, 2011.
- [27] B. Bhushan and Y. Chae Jung, “Wetting study of patterned surfaces for superhydrophobicity,” *Ultramicroscopy*, vol. 107, no. 10–11, pp. 1033–1041, 2007.
- [28] M. M. Aljumaily *et al.*, “Optimization of the Synthesis of Superhydrophobic Carbon Nanomaterials by Chemical Vapor Deposition,” *Sci. Rep.*, no. 52, pp. 1–12, 2018.
- [29] A. Maria, Y. Shi, and K. K. Gleason, “Super-Hydrophobic and Oleophobic Crystalline Coatings by Initiated Chemical Vapor Deposition,” vol. 46, no. Eurocvd 19, pp. 56–61, 2013.
- [30] B. D. B. Tiu, H. N. Nguyen, D. F. Rodrigues, and R. C. Advincula, “Electrospinning Superhydrophobic and Antibacterial PS / MWNT Nanofibers onto Multilayer Gas Barrier Films,” vol. 1600138, pp. 1–7, 2017.
- [31] J. Li, Y. Zhao, J. Hu, L. Shu, and X. Shi, “Anti-icing performance of a superhydrophobic PDMS/modified nano-silica hybrid coating for insulators,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 4–5, pp. 665–679, 2012.
- [32] J. Seyfi *et al.*, “Applied Surface Science Fabrication of robust and thermally stable superhydrophobic nanocomposite coatings based on thermoplastic polyurethane and silica nanoparticles,” vol. 347, pp. 224–230, 2015.
- [33] X. Zhang, “Large-scale fabrication of translucent and repairable superhydrophobic spray coatings with remarkable mechanical , chemical durability and UV resistance †,” pp. 10622–10631, 2017.
- [34] M. T. Masood, J. A. Heredia-guerrero, L. Ceseracciu, F. Palazon, A. Athanassiou, and I. S. Bayer, “Superhydrophobic high impact polystyrene (HIPS) nanocomposites with wear abrasion resistance,” *Chem. Eng. J.*, vol. 322, pp. 10–21, 2017.
- [35] S. Martin and B. Bhushan, “Journal of Colloid and Interface Science poly (dimethylsiloxane) (PDMS) surfaces,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 488, pp. 118–126, 2017.
- [36] H. Zhou, H. Wang, H. Niu, A. Gestos, X. Wang, and T. Lin, “Fluoroalkyl Silane Modified Silicone Rubber / Nanoparticle Composite : A Super Durable , Robust Superhydrophobic Fabric Coating,” pp. 2409–2412, 2012.
- [37] X. Wang, X. Li, Q. Lei, Y. Wu, and W. Li, “Subject Category : Subject Areas : Fabrication of superhydrophobic composite coating based on fluorosilicone resin and silica nanoparticles,” 2018.