

REVIEW: LAPISAN SUPERHIDROFOBİK BERBASIS SILIKA SEBAGAI APLIKASI *SELF-CLEANING*

¹⁾Ariyanti Rasiana Putri, ²⁾Munasir

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: ariyanti.19016@mhs.unesa.ac.id

²⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: munasir_physics@unesa.ac.id

Abstrak

Teknologi *self-cleaning* sangat populer di kalangan para peneliti dan telah banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi permukaan. Lapisan *self-cleaning* dengan sifat superhidrofobik banyak dikembangkan dan diteliti lebih lanjut karena kemampuannya dalam melakukan pembersihan yang sangat baik. Kemampuan *self-cleaning* lapisan superhidrofobik berbasis silika (SiO_2) banyak diteliti. SiO_2 dianggap dapat meningkatkan kekasaran suatu permukaan karena memiliki energi permukaannya yang rendah dan menunjukkan sifat hidrofobik, hidrofilik, dan kestabilan termal. Lapisan superhidrofobik berbasis silika telah disintesis melalui berbagai metode fisik dan kimia. Metode sol-gel menjadi utama dengan ciri khas kemudahannya dalam sintesis melalui pencampuran beberapa material dan lebih hemat biaya. Selain itu, metode sol-gel telah banyak digunakan dalam sintesis material berbasis silika. Pada review ini, membahas mengenai fenomena *self-cleaning* di alam yang menjadi acuan peneliti, karakteristik lapisan superhidrofobik dalam kemampuan *self-cleaning*, metode sol-gel dan teknik coating dalam pembuatan lapisan superhidrofobik, dan material silika yang dimodifikasi dengan material lain untuk meningkatkan kemampuan *self-cleaning*.

Kata Kunci: Superhidrofobik; *Self-cleaning*; Silika; Sol-gel

Abstract

Self-cleaning technology is very popular among researchers and has been widely applied in various surface applications. Self-cleaning coatings with superhydrophobic properties have been developed and further researched because of their ability to perform excellent cleaning. The self-cleaning ability of silica-based superhydrophobic coatings (SiO_2) has been extensively studied. SiO_2 considered to be able to increase the roughness of a surface because it has a low surface energy and exhibits hydrophobic, hydrophilic, and thermal stability properties. Silica-based superhydrophobic coatings have been synthesized by various physical and chemical methods. The sol-gel method is the

main feature of its ease of synthesis through mixing several materials and is more cost-effective. In addition, the sol-gel method has been widely used in the synthesis of silica-based materials. This review discusses the phenomenon of self-cleaning in nature which is the reference for researchers, the characteristics of the superhydrophobic coating in terms of self-cleaning ability, the sol-gel method and coating techniques in the manufacture of superhydrophobic coatings, and silica material modified with other materials to increase self-cleaning ability.

Keywords: Superhydrophobicity; Self-cleaning; Silica; Sol-gel

I. PENDAHULUAN

Kemampuan *self-cleaning* yang dimiliki oleh daun lotus telah menarik perhatian peneliti dalam penelitian lapisan superhidrofobik. *Self-cleaning* merupakan salah satu topik yang banyak dibahas karena kemampuannya melakukan pembersihan permukaan tanpa sumber eksternal. *Self-cleaning* menjadi salah satu alternatif dalam pembersihan dan memberikan keuntungan besar dimana lebih menghemat biaya dan sumber daya air bersih. Kemampuan *self-cleaning* banyak diaplikasikan di bidang industri seperti industri otomotif, kaca, perangkat optic, sel surya, dan bangunan (Eshaghi, 2019). Secara umum, permukaan *self-cleaning* memiliki karakteristik hidrofobik yang menurunkan daya rekat antara partikel debu pada permukaan (Abu-Dheir et al., 2019). Prinsip dasar dari teknologi *self-cleaning* adalah pembentukan tetesan air yang dapat menghilangkan partikel kotoran dari permukaan. Hal penting lainnya dalam *self-cleaning* adalah adanya lilin epikutikuler yang menyebabkan permukaan hidrofobik. Keadaan ini menyebabkan permukaan memiliki sudut kontak air (CA) yang tinggi dan sudut geser tetesan air (SA) yang rendah (Dalawai et al., 2020).

Lapisan *self-cleaning* umumnya memiliki sifat superhidrofobik, dimana tetesan air di permukaan superhidrofobik akan lebih mudah menggelinding dengan mudah sehingga partikel debu yang menempel mudah terikat pada tetesan air lalu bergulir dan menciptakan permukaan yang bersih (Eshaghi, 2019). Pelapis superhidrofobik memiliki karakteristik sudut kontak air $>150^\circ$ dan sudut geser air $<10^\circ$. Struktur permukaan pelapis superhidrofobik dipengaruhi oleh lingkungan eksternal dimana seiring lamanya waktu dapat merusak karakteristik dari pelapis (K. Li et al., 2022). Permukaan dapat dikontrol menggunakan material yang memiliki energi permukaan rendah. Selain itu, kekasaran permukaan dapat disebabkan oleh kekasaran substrat awal yang diproses secara kimia ataupun mekanis ataupun kombinasi material mikro-nanopartikel dengan energi permukaan yang rendah dapat meningkatkan kekasaran permukaan dan hidrofobisitas yang menjadi sifat utama *self-cleaning* (Eshaghi, 2020) (Jiang et al., 2020) (Dalawai et al., 2020).

Sintesis bahan pelapis superhidrofobik dapat dilakukan melalui banyak metode, diantaranya *chemical vapor deposition* (CVD), *electrospinning*, template-based extrusion, self-assembly extrusion, plasma etching, sol-gel, layer by layer deposition, dan lithographic, electroceical deposition, laser texturing, solution immersion, (Lv et al., 2018) (Abu-Dheir et al., 2019). Dari metode yang telah disebutkan, terdapat salah satu metode yang banyak digunakan, mudah, dan efektif untuk memperoleh komposit bahan nano yaitu metode sol-gel. Metode ini lebih mudah, hemat biaya, dan dapat mengontrol ukuran dan kristalinitas, suhu pemrosesan rendah, preparasi sederhana (Rosales et al., 2021) (Tao et al., 2018). Metode sol-gel banyak digunakan untuk pembuatan bahan pelapis superhidrofobik karena mudah dalam penggabungan nanopartikel dan dapat mengontrol kekasaran yang diinginkan sehingga dapat meningkatkan hidrofobisitas permukaan (Abu-Dheir et al., 2019).

Fabrikasi bahan pelapis yang telah siap akan dilapiskan pada suatu substrat menggunakan beberapa teknik pelapisan. Teknik pelapisan yang umum dan banyak digunakan adalah *spray coating*, *dip coating*, dan *spin coating* (A et al., 2020).

Permukaan superhidrofobik dapat dimodifikasi melalui penggabungan material anorganik, organik, dan anorganik-organik. Material yang mengandung silika adalah pilihan paling umum untuk memperoleh lapisan nano superhidrofobik. Berdasarkan fakta yang ada, silika memiliki sifat hidrofilik, tetapi dapat menjadi hidrofobik ketika melalui perlakuan kimiawi (A et al., 2020). Bahan berbasis silika sangat populer dalam permasalahan pembuatan bahan superhidrofobik, hal ini dikarenakan silika memiliki bentuk biner organik/anorganik. Silika telah banyak digunakan untuk fabrikasi material hidrofobik sebagai bahan pelapis. Selain itu, silika juga dapat dan mudah disintesis menggunakan metode sol-gel. Silika memiliki keunggulan diantaranya, biaya yang rendah, toksisitas yang minim, stabilitas termal dan mekanis, energi permukaan yang rendah, dan dapat memberikan kekasaran pada permukaan sehingga banyak digunakan dalam pembuatan permukaan superhidrofobik (Hooda et al., 2018) (Nanda et al., 2017).

Dalam review ini akan dilakukan pembahasan mengenai lapisan *self-cleaning* superhidrofobik dengan material penyusun silika yang telah dimodifikasi dengan material lain. Pembuatan lapisan menggunakan metode sol-gel dimana menggabungkan silika dengan material lain yang dapat meningkatkan hidrofobisitas permukaan sehingga kemampuan *self-cleaning* mampu maksimal. Identifikasi sifat hidrofobisitas pada lapisan *self-cleaning* menggunakan pengukuran sudut kontak air dengan nilai sudut $>150^\circ$.

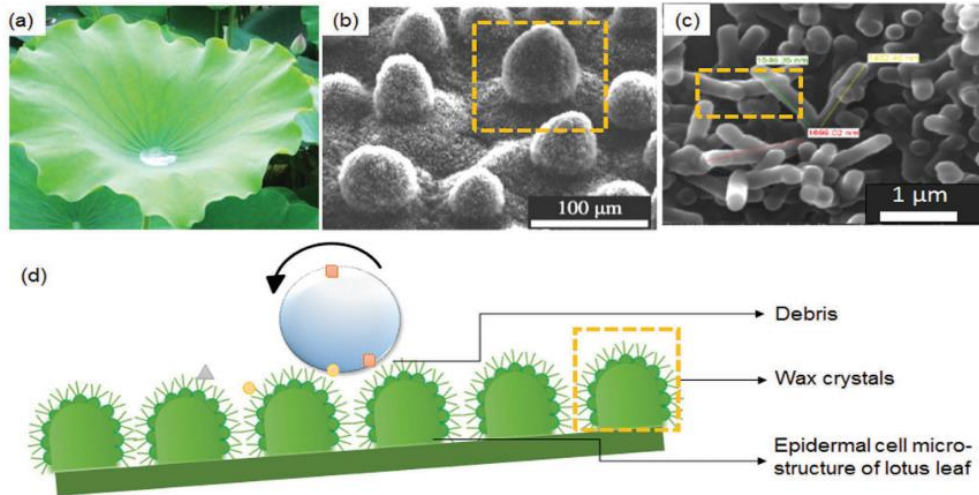
II. FENOMENA SELF-CLEANING DI ALAM

Fenomena *self-cleaning* terjadi ketika tetesan air mengalir dan membawa partikel debu yang ada di permukaan (Sutar et al., 2020). Dalam kemampuan hidrofobik perlu memperhatikan sudut kontak tetesan air dan kekasaran permukaan (Ahmad et al., 2018). Fenomena *self-cleaning* di alam telah banyak ditiru para peneliti dengan menginduksi sifat superhidrofobik ke dalam berbagai permukaan material sehingga menunjukkan sifat menolak air. Permukaan superhidrofobik memiliki kemampuan menolak air karena tekstur permukaannya ataupun sifat kimianya.

1. Daun Lotus

Daun Teratai menjadi objek hangat yang sedang dikagumi para peneliti, dikarenakan morfologi permukaannya yang mikro dan memiliki energi permukaan rendah sehingga dapat menolak tetesan air dipermukaan daun (Dalawai et al., 2020). Daun Teratai juga memiliki karakteristik unik lainnya, yaitu kemampuan *self-cleaning*, anti *fogging*, anti korosi, dan anti *icing* (Q. Li et al., 2016). Kemampuan permukaan *self-cleaning* superhidrofobik yang dimiliki daun Teratai memiliki struktur kekasaran mikro dari lilin epikutikular berukuran 20-40 μm (Féat et al., 2019). Kemampuan superhidrofobik yang dimiliki lebih stabil dibandingkan dengan tanaman lain ditunjukkan dengan nilai sudut kontak air sebesar 160° . Selain nilai sudut kontak air, adapun beberapa faktor yang menjadi pendukung dalam kemampuan superhidrofobiknya diantaranya, bentuk mikrostruktur epidermis, kristal lilin epikutikular nanoskopik dari daun, dan stabilitas superhidrofobik di bawah kondisi kondensasi lembab (Mohammed S., 2020). Sifat superhidrofobik daun Teratai dalam kemampuan *self-cleaning* disebut sebagai "*Lotus effect*" dimana sebutan ini digunakan untuk menggambarkan sifat permukaan analog yang ditunjukkan oleh bahan sintetis. Permukaan daun Teratai telah diselidiki secara menyeluruh ditunjukkan pada **Gambar 1(b-c)** dan diungkapkan bahwa terdapat orientasi acak

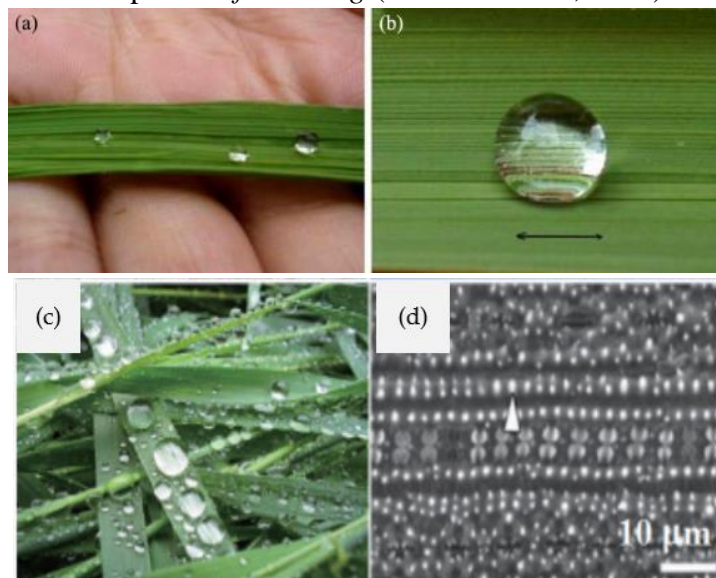
dari *micropapillae* dengan diameter 5-9 μm dan terdiri dari tabung lilin berstruktur nano seperti cabang dengan diameter $\approx 120\text{ nm}$ dimana memainkan peran utama sebagai sifat hidrofobik dan kemampuan *self-cleaning* (Konar et al., 2020).



Gambar 1. (a) Kemampuan self-cleaning permukaan daun Lotus (b) SEM permukaan mikrostruktur daun Lotus (c) tabung lilin berukuran nano pada permukaan struktur mikropilar daun Lotus (d) skema efek *self-cleaning* pada daun Lotus (Konar et al., 2020)

2. Daun Padi

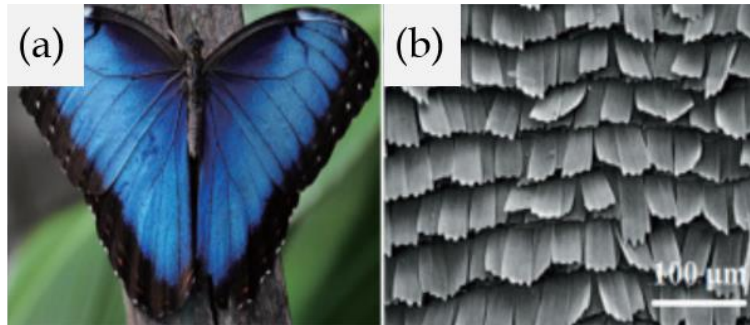
Daun padi (*Oryza sativa* L.) memiliki papilla yang tersusun sejajar tepi dan berdiameter 5-8 μm serta menghasilkan tekstur anisotropik yang memungkinkan tetesan air menggelinding ke arah tepi. Pada permukaan daun padi terdapat pin sub-nanometer yang berfungsi untuk memperbanyak udara terperangkap (Nguyen-Tri et al., 2019). Permukaan daun padi memiliki karakteristik hidrofobik seperti halnya daun Lotus. Selain itu, permukaan daun padi juga terdapat *nano-bumps* yang dapat menyebabkan permukaan kasar sehingga memiliki sifat superhidrofobik dan daya rekat yang rendah sehingga meningkatkan kemampuan *self-cleaning* (Mohammed S., 2020).



Gambar 2. (a-c) Penampakan tetesan air pada permukaan daun Padi (d) SEM permukaan daun Padi dengan alur memanjang dan struktur sinusoidal melintang (Sethi & Manik, 2018) (Mohammed S., 2020)

3. Sayap Kupu-Kupu

Sayap kupu-kupu memiliki permukaan kasar sehingga dapat bersifat hidrofobik dan dapat meningkatkan kemampuan *self-cleaning*, selain itu memiliki arah adhesi radial keluar ditunjukkan pada SEM sayap kupu-kupu pada **Gambar 2(b)** (Mohammed S., 2020). Kemampuan *self-cleaning* yang dimiliki karena permukaannya anisotropik yang menyebabkan sayapnya bebas kotoran secara alami. Hal ini dapat terjadi karena adanya interaksi spesifik antara topografi skala ganda sayap kupu-kupu dengan tetesan air. Tetesan air yang mengenai sayap menggelinding ke luar karena struktur periodic di sayapnya, yaitu skala epidermis (~40-80 mikro) dan relief mikro seperti pegunungan yang menutupi tiap skala sayap (lebar ~1200-1500 nm) yang secara bersamaan menciptakan daya rekat yang khas (Sethi & Manik, 2018).



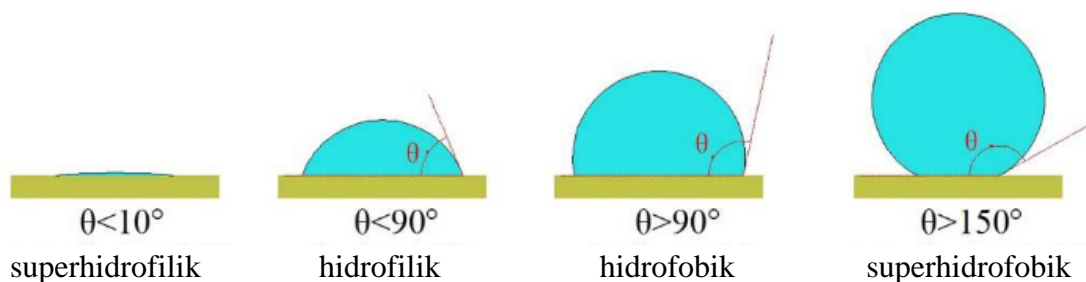
Gambar 3. (a) Sayap Kupu-Kupu (b) SEM sayap kupu-kupu dengan adhesi terarah yang memiliki arah keluar radial (Mohammed S., 2020)

III. KARAKTERISTIK PERMUKAAN SELF-CLEANING

Karakteristik permukaan *self-cleaning* dapat diketahui melalui pengukuran energi permukaan, kekasaran permukaan, dan sudut kontak tetesan cair. Pada umumnya, pengukuran yang banyak digunakan adalah sudut kontak air dimana melalui pengukuran sudut kontak maka dapat diidentifikasi kekasaran dan energi permukaan suatu bahan. Sebagian besar permukaan *self-cleaning* bersifat hidrofobik, dimana efek penolak air digunakan untuk menggulung atau menggeser tetesan air untuk menghilangkan partikel debu di jalurnya (Rifai et al., 2017).

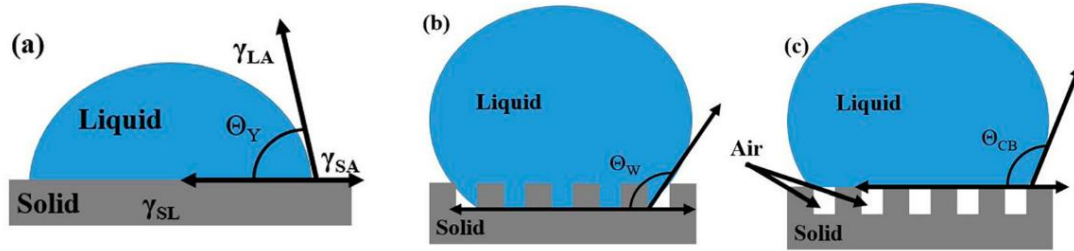
Dalam pengukuran sudut kontak, adapun istilah permukaan hidrofilik dan permukaan hidrofobik. Keduanya menggambarkan efek yang berlawanan ketika berinteraksi dengan air. Pada permukaan hidrofilik memiliki afinitas kuat terhadap molekul air, sedangkan permukaan hidrofobik menolak molekul air. Permukaan sudut kontak merupakan sudut yang terbentuk pada persimpangan permukaan cair-padat dan cair-gas (Ahmad et al., 2018).

Tetesan air pada permukaan ketika pengukuran sudut kontak, terbagi dalam beberapa kondisi, ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Kondisi dan sifat tetesan air pada permukaan (Zhang et al., 2022)

Kestabilan sudut kontak dapat diperoleh ketika permukaannya halus, homogen, data atau tidak dapat dideformasi (Sethi & Manik, 2018). Dalam pengukuran sudut kontak, terdapat 3 permodelan tetesan air terhadap permukaan yaitu, persamaan Young, Cassie, dan Wenzel.



Gambar 5. (a) Model Young (b) Model Wenzel (c) Model Cassie-Baxter (Ran et al., 2019)

Pada permukaan padat yang halus, ukuran sudut kontak dapat ditentukan melalui persamaan Young:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

Dimana θ merupakan sudut kontak Young pada permukaan ideal, γ_{SV} , γ_{SL} , dan γ_{LV} menunjukkan tegangan antarmuka padat-gas, padat-cair, dan cair-gas, masing-masingnya (Manoharan & Bhattacharya, 2019).

Pada permukaan kasar, sudut kontak ditentukan menggunakan metode Wenzel. Pada model Wenzel, tetesan air menembus permukaan kasar suatu material, sehingga persamaan sudut kontak yang diberikan sebagai berikut:

$$\cos \theta_w = \frac{r(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LV}} = r \cos \theta \quad (2)$$

Dimana θ_w merupakan sudut kontak tetesan air pada permukaan kasar dan nilainya bergantung pada kosinus sudut kontak Young serta faktor kekasaran permukaan, θ merupakan sudut kontak pada permukaan halus, r merupakan rasio luas permukaan aktual terhadap proyeksi. Pada persamaan Wenzel, kekasaran permukaan mempengaruhi keterbasahan permukaan dimana $\theta < 90^\circ$ maka keterbasahan meningkat dan $\theta > 90^\circ$ keterbasahan berkurang dikarenakan ada gelembung udara yang menempati rongga kosong di permukaan kasar sehingga mencegah tetesan air masuk ke dalam dan menyebabkan permukaan menjadi hidrofobik (Sethi & Manik, 2018).

Pada model Cassie-Baxter, terdapat gelembung udara pada permukaan kasar yang menyebabkan tetesan air terhambat menembus permukaan material dimana keadaan ini dikatakan hidrofobik. Berbeda dengan model Wenzel, dimana seluruh permukaan kasar terbasahi oleh tetesan air. Model Cassie-Baxter dapat diubah menjadi model Wenzel dengan mengisi permukaan kasar oleh tetesan air, sedangkan model Wenzel dianggap sebagai kasus khusus dari model Cassie-Baxter (Zeng et al., 2021). Model Cassie-Baxter memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\cos \theta_{cb} = f(1 + \cos \theta_w) - 1$$

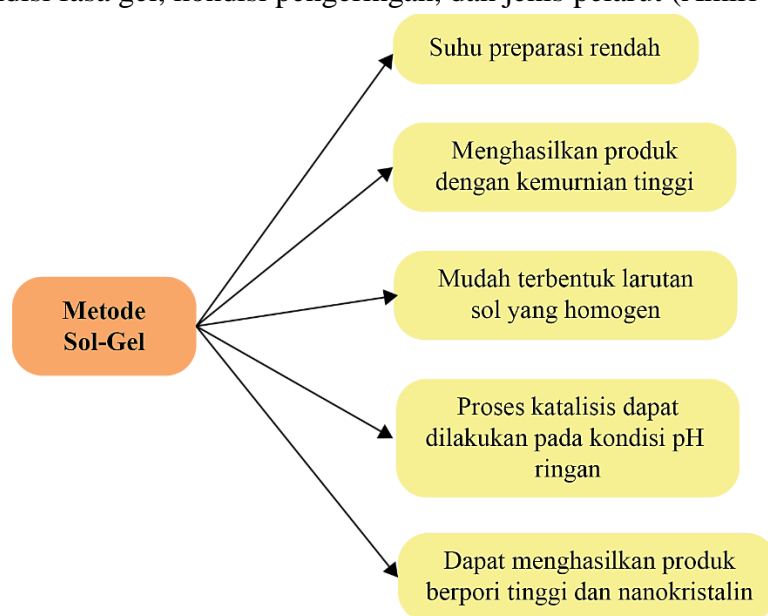
Dimana θ_{cb} merupakan sudut kontak pada permukaan kasar, parameter f (fraksi permukaan) memiliki variasi 0 – 1, untuk $f=0$ maka cairan tidak menyentuh permukaan sedangkan $f=1$ maka seluruh permukaan terbasahi sempurna (Zeng et al., 2021).

IV. METODE SOL-GEL

Fabrikasi material hidrofobik telah menjadi topik penelitian hangat untuk menciptakan karakteristik hidrofobik alam seperti daun lotus. Terdapat banyak metode fabrikasi yang digunakan,

ada salah satu metode yang sering digunakan peneliti karena mudah dan murah yaitu metode sol-gel. Metode sol-gel merupakan metode pembuatan film tipis yang sederhana dan hemat biaya, selain itu telah banyak pembuatan pelapis menggunakan metode sol-gel (Ye et al., 2017). Pengolahan material menggunakan metode sol-gel memiliki sejumlah keuntungan, dan telah banyak digunakan untuk melakukan sintesis pelapis transparan di berbagai bidang. Proses sol-gel yang sederhana melibatkan hidrolisis dan kodensasi. Dalam prosesnya, metode ini dapat melakukan penyesuaian sifat fisik dan kimia dari material yang akan diperoleh seperti hidrofobisitas, stabilitas, fleksibilitas, dan porositas yang diinginkan (Power et al., 2016). Metode sol-gel termasuk dalam salah satu metode kimia basah, serta telah diterapkan dalam berbagai bidang multidimensi. Hal ini dikarenakan metode sol-gel memiliki keunggulan yaitu hemat biaya, dapat melapisi area yang luas, dan sintesis material pada suhu relatif rendah. (Adak et al., 2019) (Kesmez, 2020).

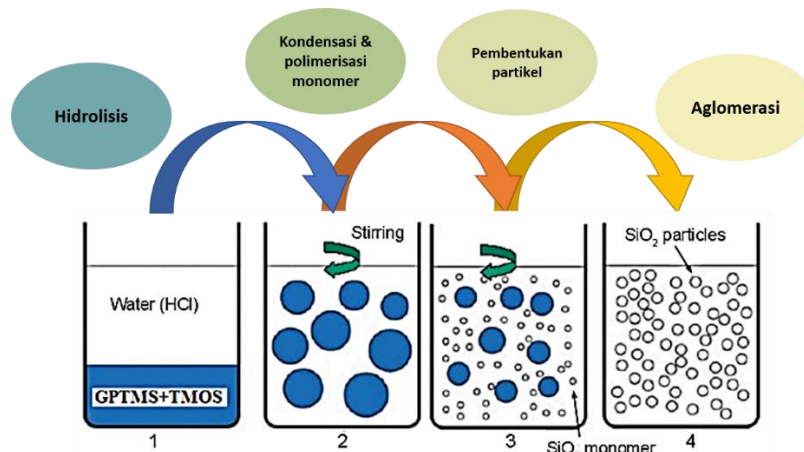
Metode sol-gel banyak diterapkan oleh peneliti dalam pembuatan permukaan hidrofobik yang tahan lama. Dalam proses sol-gel, senyawa yang digunakan mengandung komponen aktif kimiawi tinggi sebagai precursor untuk mencampur material secara homogen dalam fasa cair dan terjadi reaksi kimia hidrolisis dan kondensasi. Melalui sol-gel material nano yang memiliki energi permukaan rendah dapat dimodifikasi sebagai material superhidrofobik, hal ini dikarenakan kemudahan prosesnya yaitu reaksinya yang dapat berlangsung pada suhu rendah (Zeng et al., 2021). Metode sol-gel dapat menggabungkan komponen anorganik dan organik secara kimiawi maupun fisik dengan sederhana. Dalam penggabungan material terdapat faktor penting untuk meningkatkan kompatibilitas dalam bahan hybrid yaitu pembentukan ikatan kovalen antara komponen organik dan anorganik. Faktor yang mempengaruhi sifat material baru pada metode sol-gel, yaitu rasio hidrolisis, keasaman zat penghidrolisis, kondisi fasa gel, kondisi pengeringan, dan jenis pelarut (Amiri & Rahimi, 2016).



Gambar 6. Keunggulan metode sol-gel

Tahapan pembentukan sol-gel diilustrasikan pada **Gambar 7**, ketika terjadi tahap kondensasi dan polimerisasi monomer untuk membentuk rantai dan partikel, kemudian pada tahap aglomerasi akan diikuti pembentukan jaringan secara luas sehingga menghasilkan penebalan dan pembentukan gel. Pada proses sol-gel, reaksi hidrolisis dan kondensasi terjadi secara bersamaan setelah reaksi hidrolisis dimulai, kemudian akan menghasilkan produk sampingan dengan berat molekul rendah

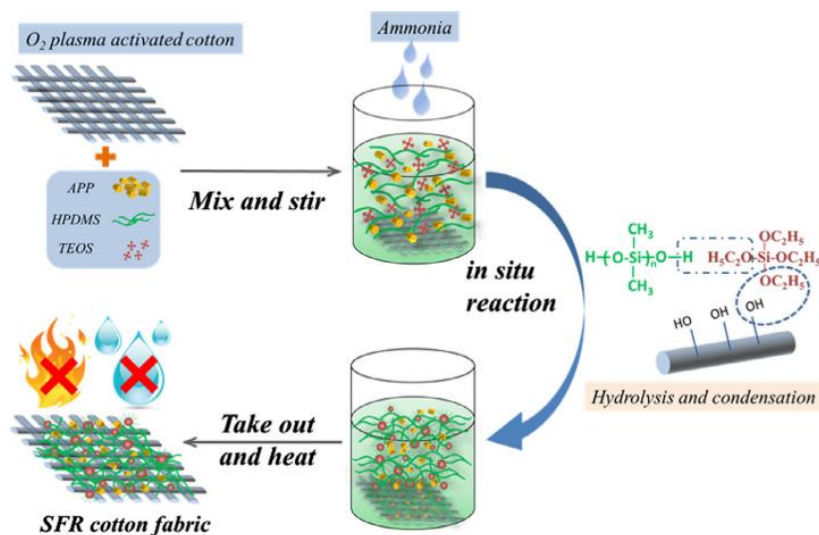
seperti alkohol dan air, lalu molekul-molekul ini akan menyusut ketika terjadi reaksi kondensasi lebih lanjut. (Amiri & Rahimi, 2016)



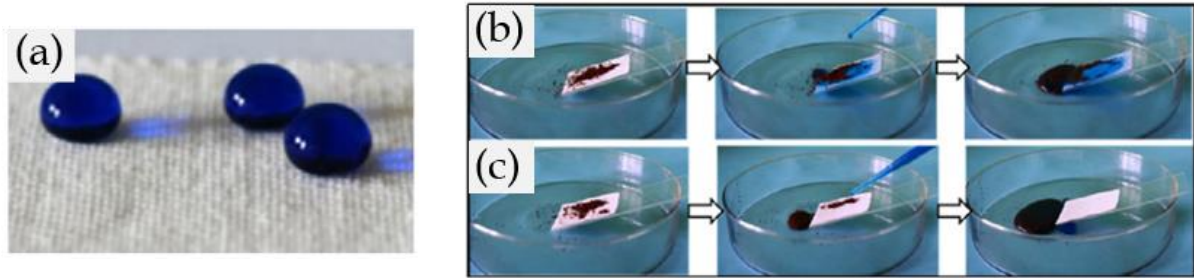
Gambar 7. Mekanisme Proses Metode Sol-Gel

Proses sol-gel mampu mengubah kekasaran suatu permukaan dan meningkatkan hidrofobisitas permukaan serta dapat mengontrol sifat permukaan material baru (C.-L. Xu et al., 2017) (Mahadik & Mahadik, 2021). Pada proses sol-gel, perkembangan jaringan anorganik terjadi melalui pembentukan suspensi koloid (sol) dan gelas sol untuk membentuk jaringan dalam fasa cair kontinu (gel). Sifat dan karakteristik material dipengaruhi oleh laju reaksi hidrolisis dan kondensasi seperti pH, suhu dan lamanya reaksi, konsentrasi reagen, sifat dan konsentrasi katalis, jumlah rasio molar precursor logam, temperatur dan waktu aging serta pengeringan (Ismail, 2016).

Lin *et al.* (2019) telah melakukan fabrikasi pelapis hibrida Polidimethylsiloxan-silica (PDMS-silica) pada kain katun menggunakan metode sol-gel, proses sol-gel ditunjukkan pada Gambar 8. Dalam penelitiannya, pelapis yang diperoleh memiliki karakteristik superhidrofobik karena memiliki nilai sudut kontak air lebih dari 160° dan sliding angle sekitar 15° . Melalui sifat hidrofobiknya, kain katun tersebut memiliki kemampuan dalam *self-cleaning*, ditunjukkan pada Gambar 9(b-c).



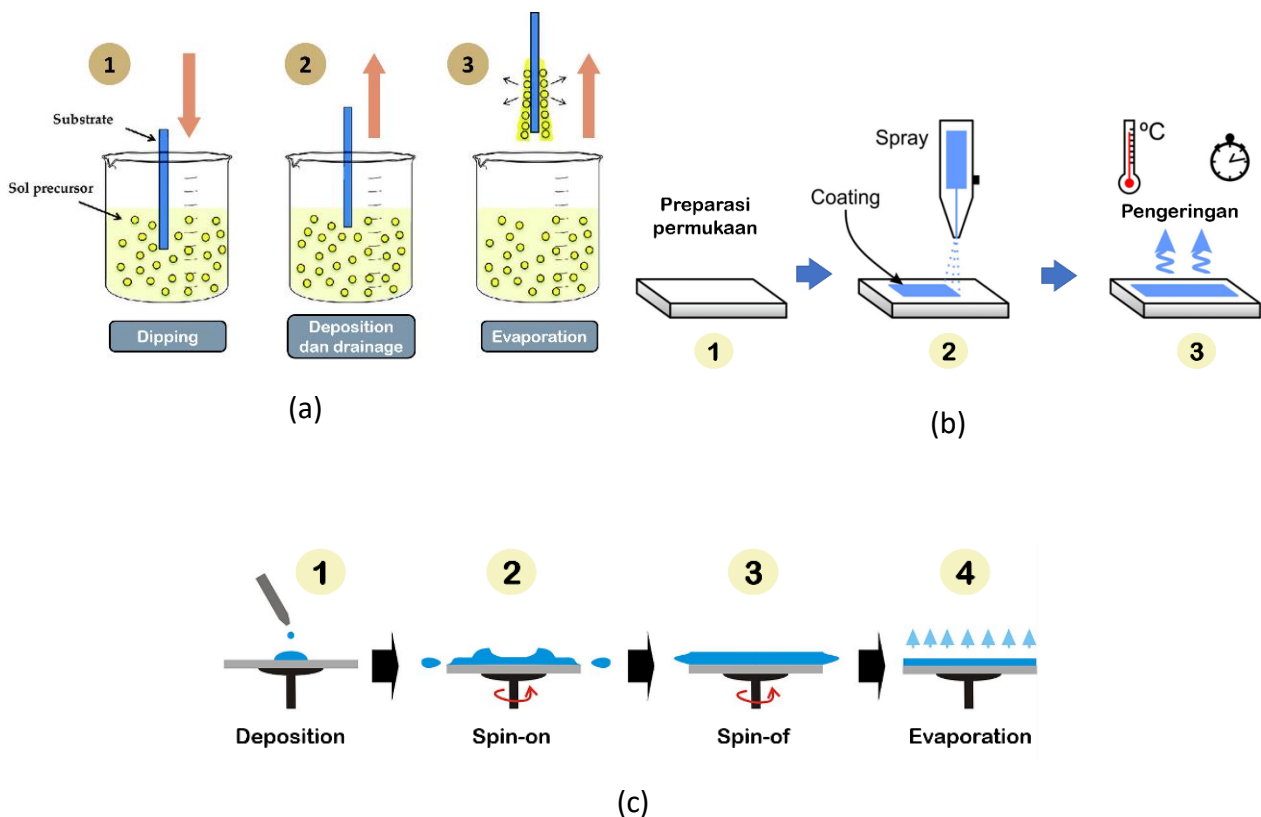
Gambar 8. Proses sol-gel pembuatan lapisan PDMS-Silica (Lin et al., 2019)



Gambar 9. (a) Fotograf tetesan air pada permukaan SFR cotton fabric yang telah dilapisi PDMS-Silica, kemampuan self-cleaning pada (b) SFR cotton fabric tanpa pelapisan (c) SFR cotton fabric dengan lapisan PDMS-Silica (Lin et al., 2019)

V. TEKNIK PELAPISAN (COATING)

Teknik pelapisan (coating) digunakan untuk melapiskan bahan lapisan (suspensi) di permukaan suatu substrat. Teknik coating yang sering digunakan adalah dip-coating, spray-coating, dan spin-coating, dari ketiga teknik tersebut memiliki proses yang berbeda tetapi dengan tujuan yang sama yaitu melapisi.



Gambar 10. Mekanisme teknik coating (a) Dip-coating (b) Spray-coating (c) Spin-coating

Teknik *dip-coating* merupakan teknik pencelupan substrat ke dalam larutan bahan pelapis. Penggunaan teknik dip-coating memberikan keunggulan efisiensi produksi yang tinggi, pengoperasiannya yang sederhana dan tidak boros larutan dalam proses pelapisan, serta cocok untuk menciptakan bahan superhidrofobik yang tahan lama dengan struktur yang kompleks (Zeng et al.,

2021). Proses teknik dip-coating ditunjukkan pada **Gambar 10(a)**, mekanisme yang digunakan dalam teknik ini adalah dengan mencelupkan atau merendam substrat ke dalam larutan. Adapun beberapa parameter yang akan memengaruhi hasil coating, yaitu waktu dan kedalaman perendaman substrat. Substrat yang telah dicelupkan ke dalam bahan lapisan kemudian dikeringkan pada suhu tertentu.

Spray-Coating atau teknik penyemprotan adalah salah satu teknik pelapisan yang hemat biaya dan ramah lingkungan dalam pembuatan lapisan superhidrofobik (Ran et al., 2019). Teknik ini banyak digunakan dalam pembuatan film tipis pada permukaan substrat karena bebas kontak dengan bahan substrat yang akan dilapiskan (Carey et al., 2018). Mekanisme pada teknik spray-coating ditunjukkan pada **Gambar 10(b)**, prosesnya hampir sama dengan dip-coating, perbedaannya hanya terletak pada distribusi larutan bahan pelapisnya dimana spray-coating dilakukan dengan menyemprotkan bahan lapisan di atas permukaan substrat.

Spin-coating merupakan teknik pelapisan pada permukaan substrat dengan meneteskan larutan bahan pelapis ke pusat substrat yang diputar. Prinsip dari metode ini adalah dengan metesakan suatu larutan pelapis berindeks bias tinggi di atas substrat yang berindeks bias rendah (Sariroh & Asnawi, 2018). Mekanisme spin-coating ditunjukkan pada **Gambar 10(c)** yang terdiri dari empat tahapan, (1) deposisi, larutan pelapis diteteskan di atas substrat, (2) *spin-up*, substrat yang telah diteteskan bahan pelapis selanjutnya diputar dimana tujuannya untuk meratakan larutan pelapis pada permukaan substrat, (3) *spin-off*, pemutaran pada substrat dihentikan yang menunjukkan bahwa substrat telah terlapis merata, dan (4) evaporasi, substrat yang telah dilapisi kemudian dilakukan proses pengeringan.

VI. SILICON DIOXIDE (SiO₂)

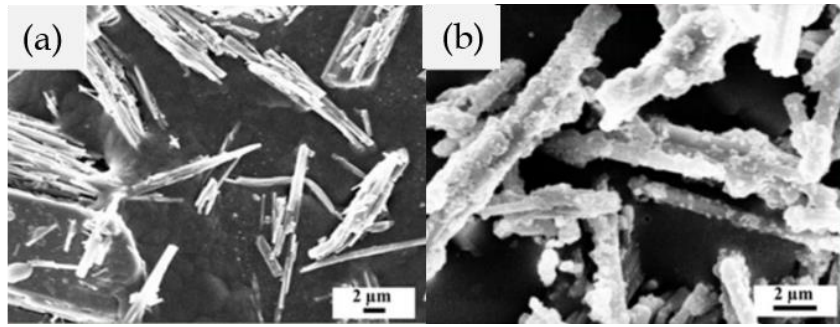
Silika (SiO₂) merupakan oksida asam yang banyak terdapat dalam kristal alami, kuarsa, dan pasir, serta terdapat di kerak bumi sekitar 12%. Setiap atom silika terikat pada atom oksigen (Si-O) dan tiap atom oksigen terikat pada dua atom silikon (Si-O-Si). Pada ikatan Si-O menunjukkan energi tinggi yang dimiliki silika. Silika memiliki struktur yang teratur, selain itu menjadi material ideal karena kelembaman kimiawinya yang tinggi, ketahanan suhu tinggi, dan kekuatan mekanik yang baik (Liang et al., 2020).

Silika telah banyak digunakan untuk fabrikasi material hidrofobik sebagai bahan pelapis. Selain itu, silika juga dapat dan mudah disintesis menggunakan metode sol-gel. Silika memiliki keunggulan diantaranya, biaya yang rendah, toksisitas yang minim, stabilitas termal dan mekanis (Hooda et al., 2018). Silika juga memiliki energi permukaan rendah yang berbeda dan juga dapat memberikan stabilitas dan kekasaran pada permukaan sehingga banyak digunakan dalam pembuatan permukaan superhidrofobik (Nanda et al., 2017). Kemampuan lapisan anti refleksi dari suspensi silika menarik perhatian peneliti karena memiliki indeks bias yang rendah dan ketahanan lingkungan dari silika (Chi et al., 2019). Beberapa bahan berbasis silika umumnya akan memiliki transparansi yang tinggi, memiliki kemampuan kontrol yang baik, sifat fisik dan mekanik, dan stabilitas kimia. Hal ini menunjukkan bahwa silika dapat bekerja dengan baik dalam modifikasi permukaan superhidrofobik (Liang et al., 2020) (Tian & Guo, 2017).

Tabel 1. Hasil Pengukuran Sudut Kontak Air (WCA) dan Sudut Geser (SA) sebagai Karakteristik *Self-Cleaning* pada Modifikasi Silika

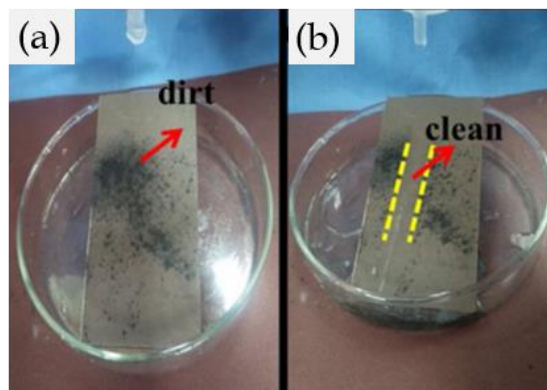
No.	Bahan Pelapis	Metode Fabrikasi	Teknik Coating	Water Contact Angle (WCA)	Sliding Angle (SA)	Ref.
1	SiO ₂ dengan TMES sebagai co-prekursor	Sol-gel	<i>Dip-coating</i>	152°	-	(J. Xu et al., 2017)
2	PPS/ASO/PTW-SiO ₂	Sol-gel	<i>Spray-coating</i>	161°	2°	(Lv et al., 2018)
3	PS/TOS-SiO ₂	Sol-gel	<i>Dip-coating</i>	162°	3°	(Hooda et al., 2018)
4	SiO ₂ -SiO ₂ nanotube/PFTS		<i>Spray-coating</i>	152°	-	(Eshaghi, 2020)
5	Nanokomposit SiO ₂ -PMMA	Sol-gel	<i>Dip-coating</i>	165°	~4°	(Sutar et al., 2020)
6	Komposit SiO ₂ /PDMS	Sol-gel	<i>Spray-coating</i>	158°	<10°	(Liang et al., 2020)
7	Nanokomposit PDMS/SiO ₂	Sol-gel	<i>Spray-coating</i>	156.4°	<5°	(Gong & He, 2020)
8	SiO ₂ /Silicone hybrid	Sol-gel	<i>Dip-coating</i>	156°	5°	(Jiang et al., 2020)
9	PTFE-SiO ₂	Sol-gel	<i>Dip-coating</i>	156°	3°	(Eshaghi et al., 2021)
10	Superhidrofobik SiO ₂ berbasis MTES	Sol-gel	<i>Dip-coating</i>	153°	9°	(Mahadik & Mahadik, 2021)

Bahan pelapis superhidrofobik sebagai *self-cleaning* yang disintesis dari silika termodifikasi telah dilakukan oleh banyak peneliti dengan modifikasi yang berbeda, ditunjukkan pada Tabel (). Kemampuan *self-cleaning* yang baik memiliki sifat superhidrofobik dimana sudut kontak air memiliki nilai $>150^\circ$ dan sudut geser (SA) $<10^\circ$. Sudut geser menunjukkan kemampuan tetesan air selama menggelinding pada suatu substrat. Pada penelitian Lv *et al.* (2018) lapisan superhidrofobik berbasis silika diperoleh melalui metode sol-gel. Dalam penelitiannya, silika yang digunakan berupa TEOS dan kemudian ditambahkan ke dalam larutan PTW-PDA sehingga diperoleh larutan PTW-PDA-SiO₂, larutan tersebut kemudian ditambahkan dengan *amino silicone oil* (ASO) untuk menambah sifat hidrofobitas larutan. Larutan ASO/PTW-SiO₂ dikompositkan dengan *poly(phenylene sulphide)* (PPS) yang merupakan suatu polimer. Lapisan superhidrofobik diuji menggunakan sudut kontak air dan diperoleh 161° dan sudut geser (SA) 2°. Adanya penambahan SiO₂ memberikan pengaruh pada permukaan lapisan, dapat dilihat pada **Gambar 11** dimana SiO₂ memberikan kekasaran pada lapisan.



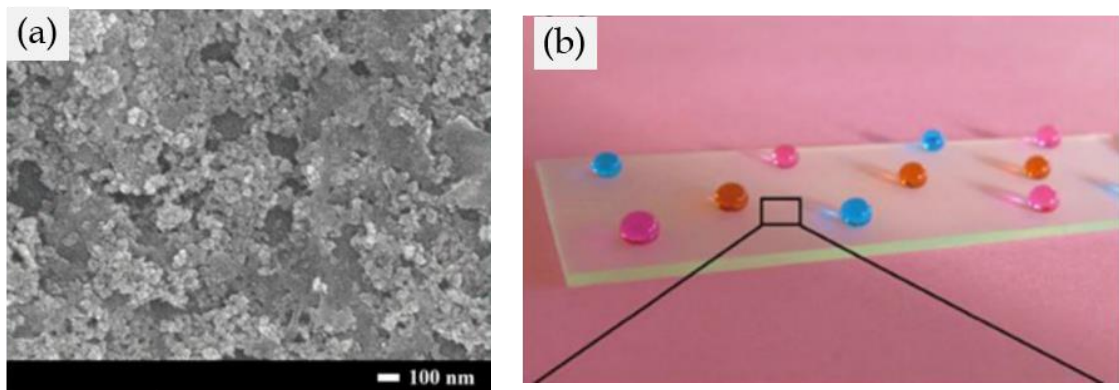
Gambar 11. SEM (a) lapisan PPS/ASO/PTW (b) lapisan PPS/ASO/PTW-SiO₂ (Lv et al., 2018)

Pengujian kemampuan *self-cleaning* dilapiskan dengan teknik spray pada permukaan aluminium. Pada **Gambar 12** menunjukkan aluminium memiliki permukaan kotor dengan adanya bubuk karbon, kemudian diteteskan air dan partikel kotor terangkat oleh aliran air yang lewat sehingga area tersebut bersih.



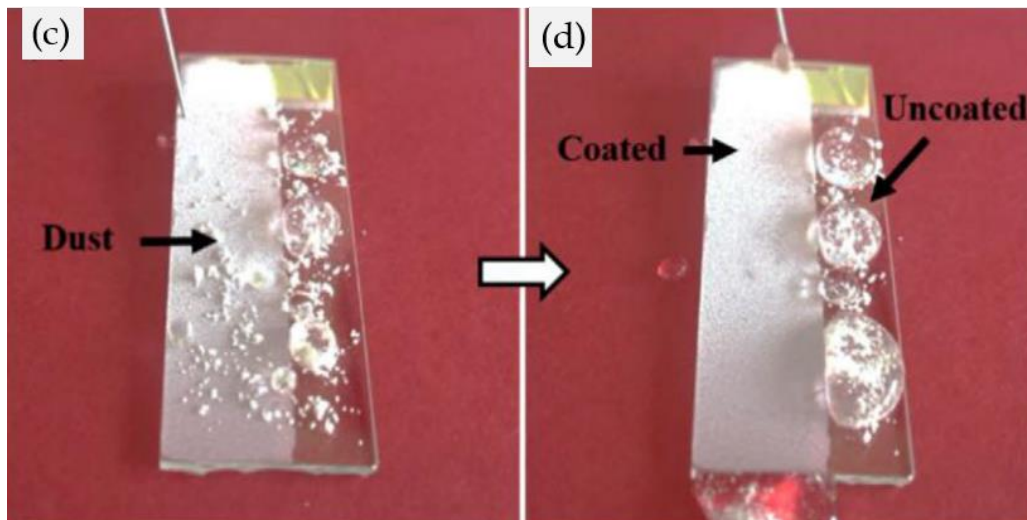
Gambar 12. Pengujian *Self-Cleaning* pada aluminium dilapisi PPS/ASO/PTW-SiO₂ (a) sebelum ditetes air (b) setelah ditetes air (Lv et al., 2018)

Sutar *et al.* (2020) melakukan pembuatan nanokomposit PMMA/SiO₂ dimana silika disintesis secara sol-gel menggunakan *methyltrimethoxylane* (MTMS) dan kemudian dikompositkan dengan PMMA. Larutan yang telah diperoleh kemudian dilapiskan pada permukaan kaca preparat dengan teknik dip-coating. Permukaan lapisan yang diperoleh memiliki struktur kasar, ditunjukkan pada hasil SEM **Gambar 13(a)** yang kemudian dibuktikan dengan tetesan air berbeda warna pada permukaannya.



Gambar 13. (a) SEM lapisan nanokomposit PMMA/SiO₂ (b) Tetesan air pada substrat yang telah dilapisi nanokomposit PMMA/SiO₂ (Sutar et al., 2020)

Penggabungan nanopartikel SiO_2 dengan PMMA menjadi nanokomposit memberikan morfologi kasar dan berpori, selain itu silika juga menjadi penyebab kekasaran karena tertanam dalam struktur PMMA. Melalui kekasaran yang dimiliki, lapisan PMMA/ SiO_2 memiliki nilai sudut kontak air (WCA) sebesar 165° dan sudut geser (SA) 4° . Kemampuan *self-cleaning* juga diuji melalui substrat kotor yang telah dilapisi lapisan PMMA/ SiO_2 lalu ditetaskan dengan air, ditunjukkan pada **Gambar 14**.



Gambar 14. (c-d) Kemampuan *self-cleaning* pada substrat yang dilapisi dan tidak dilapisi nanokomposit PMMA/ SiO_2 (Sutar et al., 2020)

VII. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa silika memiliki kemampuan dalam meningkatkan sifat hidrofobisitas yang diidentifikasi melalui pengukuran sudut kontak (WCA), dimana semakin tinggi nilai sudut kontak maka sifat hidrofobik lapisan semakin tinggi. Selain itu, silika juga dapat meningkatkan kekasaran permukaan dengan diikuti penambahan precursor lain yang disesuaikan dengan kebutuhan. Melalui data hasil review dari beberapa penelitian dengan meninjau hasil pengukuran sudut kontak (WCA) dan sudut geser (SA), dapat diketahui bahwa sudut kontak terbesar dimiliki oleh suspensi nanokomposit SiO_2 -PMMA yang memiliki nilai WCA sebesar 165° dan SA $\sim 4^\circ$. Sifat hidrofobisitas yang tinggi pada suatu lapisan menunjukkan semakin baiknya kemampuan *self-cleaning* dalam melakukan pembersihan suatu substrat terhadap partikel kotor.

DAFTAR PUSTAKA

- A, J., S Jayan, J., Saritha, A., Sethulekshmi, A. S., & Venu, G. (2020). Superhydrophobic graphene-based materials with self-cleaning and anticorrosion performance: An appraisal of neoteric advancement and future perspectives. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 606, 125395. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125395>
- Abu-Dheir, N., Rifai, A., Yilbas, B. S., Yousaf, M. R., Al-Sharafi, A., Ali, H., Khaled, M., & Al-Aqeeli, N. (2019). Sol-gel coating of colloidal particles deposited glass surface pertinent to self-cleaning applications. *Progress in Organic Coatings*, 127(November 2018), 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.11.022>
- Adak, D., Bhattacharyya, R., Saha, H., & Maiti, P. S. (2019). Sol-gel processed silica based highly

- transparent self-cleaning coatings for solar glass covers. *Materials Today: Proceedings*, 33(xxxx), 2429–2433. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.331>
- Ahmad, D., van den Boogaert, I., Miller, J., Presswell, R., & Jouhara, H. (2018). Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 40(22), 2686–2725. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1511642>
- Amiri, S., & Rahimi, A. (2016). Hybrid nanocomposite coating by sol–gel method: a review. *Iranian Polymer Journal*, 25(6), 559–577. <https://doi.org/10.1007/s13726-016-0440-x>
- Carey, T., Jones, C., Le Moal, F., Deganello, D., & Torrisi, F. (2018). Spray-Coating Thin Films on Three-Dimensional Surfaces for a Semitransparent Capacitive-Touch Device. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(23), 19948–19956. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02784>
- Chi, F., Liu, D., Wu, H., & Lei, J. (2019). Mechanically robust and self-cleaning antireflection coatings from nanoscale binding of hydrophobic silica nanoparticles. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200(May), 109939. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109939>
- Dalawai, S. P., Saad Aly, M. A., Lathe, S. S., Xing, R., Sutar, R. S., Nagappan, S., Ha, C. S., Kumar Sadasivuni, K., & Liu, S. (2020). Recent Advances in durability of superhydrophobic self-cleaning technology: A critical review. *Progress in Organic Coatings*, 138(September 2019), 105381. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105381>
- Eshaghi, A. (2019). Transparent hard self-cleaning nano-hybrid coating on polymeric substrate. *Progress in Organic Coatings*, 128(November 2018), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.021>
- Eshaghi, A. (2020). Fabrication of transparent silica-silica nanotube/PFTS nano-composite thin films with superhydrophobic, oleophobic, self-cleaning and anti-icing properties. *Optical and Quantum Electronics*, 52(12), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02656-3>
- Eshaghi, A., Mesbahi, M., & Aghaei, A. A. (2021). Transparent hierarchical micro-nano structure PTFE-SiO₂ nanocomposite thin film with superhydrophobic, self-cleaning and anti-icing properties. *Optik*, 241(April), 166967. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166967>
- Féat, A., Federle, W., Kamperman, M., & van der Gucht, J. (2019). Coatings preventing insect adhesion: An overview. *Progress in Organic Coatings*, 134, 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.013>
- Gong, X., & He, S. (2020). Highly Durable Superhydrophobic Polydimethylsiloxane/Silica Nanocomposite Surfaces with Good Self-Cleaning Ability. *ACS Omega*, 5(8), 4100–4108. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03775>
- Hooda, A., Goyat, M. S., Kumar, A., & Gupta, R. (2018). A facile approach to develop modified nano-silica embedded polystyrene based transparent superhydrophobic coating. *Materials Letters*, 233, 340–343. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.043>
- Ismail, W. N. W. (2016). Sol–gel technology for innovative fabric finishing-A Review. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 78(3), 698–707. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4027-y>
- Jiang, Q., Huang, J., Ma, B., Yang, Z., & Zhang, T. (2020). SiO₂/silicone hybrid superhydrophobic coating on gypsum-based materials with self-cleaning and moisture resistance. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 96(1), 207–218. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05347-3>
- Kesmez, Ö. (2020). Preparation of hybrid nanocomposite coatings via sol-gel method for hydrophobic and self-cleaning properties. *Journal of Molecular Structure*, 1205. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127572>
- Konar, M., Roy, B., & Govindaraju, T. (2020). Molecular Architectonics-Guided Fabrication of Superhydrophobic and Self-Cleaning Materials. *Advanced Materials Interfaces*, 7(11), 1–16. <https://doi.org/10.1002/admi.202000246>
- Li, K., Xu, L., Yuan, X., Pan, H., Wang, L., Shen, Y., Li, T., & Li, J. (2022). Preparation of self-healing superhydrophobic cotton fabric based on silica aerogel for self-cleaning and oil/water separation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 0(0), 1–21. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2117915>

- Li, Q., Yan, Y., Yu, M., Song, B., Shi, S., & Gong, Y. (2016). Synthesis of polymeric fluorinated sol-gel precursor for fabrication of superhydrophobic coating. *Applied Surface Science*, 367, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.155>
- Liang, Z., Geng, M., Dong, B., Zhao, L., & Wang, S. (2020). Transparent and robust SiO₂/PDMS composite coatings with self-cleaning. *Surface Engineering*, 36(6), 643–650. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1691367>
- Lin, D., Zeng, X., Li, H., Lai, X., & Wu, T. (2019). One-pot fabrication of superhydrophobic and flame-retardant coatings on cotton fabrics via sol-gel reaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 533, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.08.060>
- Lv, C., Wang, H., Liu, Z., Zhang, W., Wang, C., Tao, R., Li, M., & Zhu, Y. (2018). A sturdy self-cleaning and anti-corrosion superhydrophobic coating assembled by amino silicon oil modifying potassium titanate whisker-silica particles. *Applied Surface Science*, 435, 903–913. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.205>
- Mahadik, S. A., & Mahadik, S. S. (2021). Surface morphological and topographical analysis of multifunctional superhydrophobic sol-gel coatings. *Ceramics International*, 47(20), 29475–29482. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.115>
- Manoharan, K., & Bhattacharya, S. (2019). Superhydrophobic surfaces review: Functional application, fabrication techniques and limitations. *Journal of Micromanufacturing*, 2(1), 59–78. <https://doi.org/10.1177/2516598419836345>
- Mohammed S., S. (2020). Superhydrophobic Self-cleaning Surfaces in Nature. *Nanoarchitectonics*, 1(1), 26–37. <https://doi.org/10.37256/nat.112020121.26-37>
- Nanda, D., Varshney, P., Satapathy, M., Mohapatra, S. S., & Kumar, A. (2017). Self-assembled monolayer of functionalized silica microparticles for self-cleaning applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 529, 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.06.007>
- Nguyen-Tri, P., Tran, H. N., Plamondon, C. O., Tuduri, L., Vo, D. V. N., Nanda, S., Mishra, A., Chao, H. P., & Bajpai, A. K. (2019). Recent progress in the preparation, properties and applications of superhydrophobic nano-based coatings and surfaces: A review. *Progress in Organic Coatings*, 132(March), 235–256. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.03.042>
- Power, A. C., Barrett, A., Abubakar, J., Suarez, L. J., Ryan, L., Wencel, D., Sullivan, T., & Regan, F. (2016). Versatile Self-Cleaning Coating Production Through Sol-Gel Chemistry. *Advanced Engineering Materials*, 18(1), 76–82. <https://doi.org/10.1002/adem.201500112>
- Ran, M., Zheng, W., & Wang, H. (2019). Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 35(3), 313–326. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1560985>
- Rifai, A., Abu-Dheir, N., Khaled, M., Al-Aqeeli, N., & Sami Yilbas, B. (2017). Characteristics of oil impregnated hydrophobic glass surfaces in relation to self-cleaning of environmental dust particles. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171(June), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.017>
- Rosales, A., Ortiz-Frade, L., Medina-Ramirez, I. E., Godínez, L. A., & Esquivel, K. (2021). Self-cleaning of SiO₂-TiO₂ coating: Effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105483. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105483>
- Sariroh, A., & Asnawi. (2018). Pengaruh Kecepatan dan Waktu Putar Spin Coating terhadap Ketebalan Lapisan Tipis Material Berbasis Polimer PMMA (Polymethyl Methacrylate). *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 07, 1–4. <https://jurnal.mahasiswa.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia/article/download/22177/20326>
- Sethi, S. K., & Manik, G. (2018). Recent Progress in Super Hydrophobic/Hydrophilic Self-Cleaning Surfaces for Various Industrial Applications: A Review. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 57(18), 1932–1952. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1447128>

- Sutar, R. S., Gaikwad, S. S., Latthe, S. S., Kodag, V. S., Deshmukh, S. B., Saptal, L. P., Kulal, S. R., & Bhosale, A. K. (2020). Superhydrophobic Nanocomposite Coatings of Hydrophobic Silica NPs and Poly(methyl methacrylate) with Notable Self-Cleaning Ability. *Macromolecular Symposia*, 393(1), 1–5. <https://doi.org/10.1002/masy.202000116>
- Tao, C., Zou, X., Du, K., Zhou, G., Yan, H., Yuan, X., & Zhang, L. (2018). Fabrication of robust, self-cleaning, broadband TiO₂-SiO₂ double-layer antireflective coatings with closed-pore structure through a surface sol-gel process. *Journal of Alloys and Compounds*, 747, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.008>
- Tian, P., & Guo, Z. (2017). Bioinspired silica-based superhydrophobic materials. *Applied Surface Science*, 426, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.134>
- Xu, C.-L., Song, F., Wang, X.-L., & Wang, Y.-Z. (2017). Surface modification with hierarchical CuO arrays toward a flexible, durable superhydrophobic and self-cleaning material. *Chemical Engineering Journal*, 313, 1328–1334. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.024>
- Xu, J., Liu, Y., Du, W., Lei, W., Si, X., Zhou, T., Lin, J., & Peng, L. (2017). Superhydrophobic silica antireflective coatings with high transmittance via one-step sol-gel process. *Thin Solid Films*, 631, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.03.005>
- Ye, L., Zhang, Y., Song, C., Li, Y., & Jiang, B. (2017). A simple sol-gel method to prepare superhydrophilic silica coatings. *Materials Letters*, 188, 316–318. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.043>
- Zeng, Q., Zhou, H., Huang, J., & Guo, Z. (2021). Review on the recent development of durable superhydrophobic materials for practical applications. *Nanoscale*, 13(27), 11734–11764. <https://doi.org/10.1039/d1nr01936h>
- Zhang, Y., Zhang, Z., Yang, J., Yue, Y., & Zhang, H. (2022). A review of recent advances in superhydrophobic surfaces and their applications in drag reduction and heat transfer. *Nanomaterials*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/nano12010044>