

## Komparasi Ketahanan Erosi dan Korosi pada *Coating* Hidrofobik Sol-Gel dan Silika-PDMS untuk Logam Alloy

I Gede Gilang Taruna Putra<sup>1</sup>, & Sovian Aritonang<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>). Proram Studi Fisika, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Sentul, Bogor, 16810.

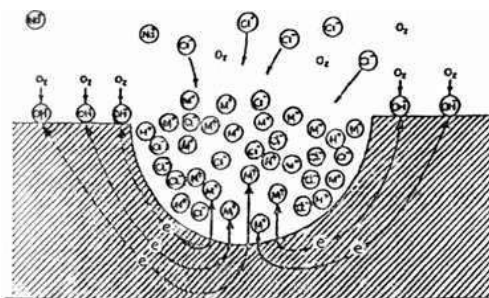
\*Email: i.putra@mipa.idu.ac.id

### ABSTRACT

Corrosion in metal alloys such as aluminum and carbon steel poses a major challenge in industries like aerospace, marine, and automotive, where such materials are frequently exposed to harsh environments. Hydrophobic coatings have emerged as promising solutions to enhance corrosion resistance. Among them, sol-gel and silica-PDMS coatings stand out due to their specific advantages. Sol-gel coatings are known for their excellent corrosion and erosion resistance, strong adhesion, and high mechanical durability, making them suitable for aggressive environments. On the other hand, silica-PDMS coatings provide superior hydrophobicity, ease of application, and flexibility, though with moderate corrosion resistance. This paper compares the performance of both coatings in terms of their corrosion and erosion resistance, application methods, and environmental suitability. The findings indicate that sol-gel coatings outperform silica-PDMS coatings in corrosion and erosion resistance, while silica-PDMS is more favorable for applications requiring high water repellency but in less corrosive conditions. Future research is recommended to optimize the formulation of both coatings and investigate hybrid solutions that combine the strengths of each material.

**Keywords:** *Hydrophobic Coating; Corrosion Resistance; Erosion Protection, Metal Alloy; Aluminum Alloy.*

### PENDAHULUAN



Gambar 1. Mekanisme Korosi pada Logam Alloy (Harsito, 2005)

Salah satu ancaman paling signifikan terhadap ketahanan logam paduan (*alloy*) adalah korosi, terutama ketika digunakan di lingkungan dengan kelembapan tinggi, paparan garam, atau kondisi asam. Korosi merupakan proses degradasi material yang terjadi akibat interaksi kimia atau elektrokimia antara logam dan lingkungannya. Logam paduan seperti aluminium dan baja karbon banyak digunakan dalam berbagai industri, seperti kedirgantaraan, maritim, otomotif, dan konstruksi. Dalam konteks industri-industri tersebut, korosi bukan hanya menjadi gangguan mekanis, tetapi juga menyebabkan peningkatan biaya pemeliharaan, peningkatan risiko kegagalan struktural, serta penurunan keandalan komponen atau struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, pengembangan teknik perlindungan yang efektif sangat penting untuk memperpanjang umur pakai dan meningkatkan keandalan logam paduan di masa depan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mencegah atau memperlambat laju korosi, seperti penggunaan inhibitor, pelapisan pelindung (*coating*), dan pengendalian lingkungan. Salah satu metode yang paling praktis adalah aplikasi *coating* pelindung. *Coating* berfungsi sebagai penghalang antara logam dan lingkungannya, sehingga mengurangi kontak langsung dengan agen korosif seperti oksigen, air, dan ion klorida. *Coating* yang bersifat hidrofobik memberikan perlindungan tambahan dengan menolak air, sehingga mengurangi penetrasi kelembapan ke dalam permukaan logam. Lapisan pelindung ini juga harus memiliki ketahanan terhadap getaran dan aliran fluida berkecepatan tinggi yang dapat menyebabkan keausan atau kerusakan dini pada permukaan. Oleh karena itu,

pemilihan material dan metode aplikasi *coating* menjadi faktor kunci dalam efektivitas perlindungan terhadap korosi dan erosi.

## HASIL DAN DISKUSI

### Teknik *Coating* Hidrofobik untuk Logam Alloy

Metode perlindungan substrat logam yang digunakan adalah teknik *coating* hidrofobik. Teknik ini merupakan salah satu metode perlindungan permukaan yang memberikan perlindungan logam terhadap faktor lingkungan seperti korosi, erosi, dan lainnya. Pendekatan yang sering digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat ini melibatkan penggunaan *coating* berbasis sol-gel dan silika-polydimethylsiloxane (silika-PDMS), yang telah banyak diteliti. Proses di balik teknik ini melibatkan penerapan lapisan tipis pada permukaan logam untuk membuatnya hidrofobik, sehingga air dan komponen elektrolit tidak bercampur dengan lapisan dan merusak logam. Dari tinjauan literatur, dapat disimpulkan bahwa *coating* hidrofobik sol-gel dan silika-PDMS meningkatkan ketahanan logam terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Dibandingkan dengan sol-gel, alasan pemilihan material ini untuk penelitian adalah bahwa metode ini melibatkan reaksi kimia, dengan struktur yang bervariasi seiring menurunnya ukurannya. Sementara itu, silika-PDMS dikenal karena sifat fleksibilitasnya, daya lekat berkualitas tinggi, dan ketahanannya terhadap berbagai produk kimia.

Metode aplikasi *coating* meliputi teknik semprotan, pencelupan, atau *spin-coating*, yang dilakukan di bawah kendali suhu dan kelembapan ruangan. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, baik sol-gel maupun silika-PDMS terbukti produktif dalam melindungi logam. Dari gambaran singkat di atas, efektivitas *coating* ditentukan oleh spesies material, metode sintesis, komposisi, ketebalan lapisan, dan sifat fisik, termasuk homogenitas. Salah satu keunggulan utama *coating* adalah kemampuannya memberikan perlindungan melalui sudut kontak terhadap air, ketahanan terhadap abrasi, dan ketahanan panas in situ di berbagai kondisi. Dengan mempertimbangkan kriteria ini serta potensi aplikasinya di masa depan, pendekatan ini menyelidiki pengaruh penggunaan sol-gel dan silika-PDMS.

### *Coating* Silika-PDMS

*Coating* silika-PDMS adalah lapisan hidrofobik yang terdiri dari polydimethylsiloxane (PDMS) yang diperkuat dengan partikel silika, memberikan sifat superhidrofobik yang efektif dalam perlindungan terhadap korosi. PDMS mampu membentuk struktur mikro-nano, menyerupai permukaan daun lotus, yang memungkinkan terbentuknya lapisan udara saat berinteraksi dengan cairan. Lapisan udara ini berperan dalam mengurangi kontak langsung antara cairan korosif dan permukaan material, sehingga menjadi mekanisme utama dalam mencegah korosi (Xia et al., 2015).

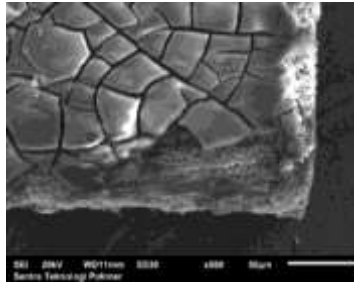
*Coating* silika-PDMS biasanya diaplikasikan menggunakan teknik *spin-coating* atau *dip-coating*, yang menghasilkan lapisan tipis, seragam, dan memiliki daya rekat tinggi terhadap substrat. Dalam aplikasi pada baja karbon, *coating* ini telah terbukti meningkatkan ketahanan terhadap korosi hingga 80 hari dalam larutan NaCl 3%, dibandingkan dengan baja tanpa pelapisan yang mengalami korosi lebih cepat dalam kondisi serupa. Selain itu, struktur mikro-nano dari kombinasi PDMS dan silika menciptakan permukaan superhidrofobik, yang mampu menangkal air dan cairan korosif melalui pembentukan lapisan udara pada permukaan material.

Partikel silika dalam *coating* ini memainkan peran penting dalam meningkatkan ketahanan korosi dengan memperpanjang jalur difusi air dan ion korosif, sehingga memperlambat degradasi material. Namun, penelitian oleh Ejenstam et al. (2015) menunjukkan bahwa konsentrasi silika yang terlalu tinggi dapat menyebabkan retakan mikro pada lapisan, yang berpotensi menjadi titik awal penetrasi air dan ion korosif. Oleh karena itu, optimasi proporsi pencampuran silika dan PDMS sangat penting untuk memastikan lapisan yang homogen, kuat, dan tahan lama. Berdasarkan penelitian terbaru, perbandingan silika dan PDMS yang ideal berkisar antara 10–30% silika terhadap volume total, guna menghindari retakan sekaligus mempertahankan sifat superhidrofobik yang optimal.

Meskipun masih menghadapi tantangan dalam formulasi, *coating* silika-PDMS memiliki prospek luas dalam berbagai industri. Dalam industri otomotif, *coating* ini dapat digunakan untuk melindungi bodi kendaraan dari kelembapan dan garam jalan. Sementara dalam industri maritim, *coating* ini berpotensi mengurangi pertumbuhan *biofouling* pada lambung kapal serta meningkatkan

ketahanan terhadap air laut. Dalam konstruksi, lapisan ini dapat diaplikasikan pada struktur baja yang terpapar lingkungan ekstrem, seperti jembatan dan gedung pencakar langit, untuk meningkatkan umur layanan material.

### Coating Sol-Gel



Gambar 2. Ketahanan Erosi *Coating* Sol-Gel 12. (Budi Utomo, R., & Alva, S., 2017)

*Coating* sol-gel adalah lapisan pelindung yang dibuat melalui proses sintesis kimia dengan menggabungkan prekursor silikon yang dimodifikasi secara *organic* dan prekursor silikon yang stabil. Proses ini melibatkan reaksi hidrolisis dan kondensasi, yang mengubah larutan awal menjadi gel sebelum akhirnya mengeras menjadi lapisan padat. Lapisan ini berfungsi sebagai membran pelindung yang efektif dalam mencegah korosi pada substrat logam, seperti aluminium (Budi Utomo & Alva, 2017).

Lapisan sol-gel memiliki struktur berpori mikroskopis yang memungkinkan interaksi terbatas antara substrat dan lingkungan sekitarnya. Untuk meningkatkan ketahanan korosi, modifikasi dengan nanopartikel oksida logam seperti  $ZrO_2$  dan  $TiO_2$  telah dilakukan. Misalnya, Wu et al. (2021) melaporkan bahwa penambahan 5% berat  $ZrO_2$  dalam matriks sol-gel meningkatkan kekerasan lapisan sebesar 30% serta meningkatkan ketahanan termal hingga  $400^\circ C$ . Sementara itu, Feng et al. (2022) menemukan bahwa peningkatan kepadatan ikatan siloksan dalam jaringan sol-gel dapat mengurangi ukuran pori hingga skala nanometer, sehingga mengurangi penetrasi ion korosif ( $Cl^-$ ) dan memperlambat laju korosi hingga 50% dibandingkan dengan lapisan sol-gel konvensional.

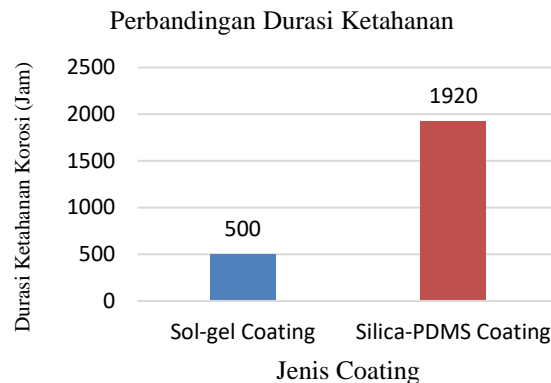
*Coating* sol-gel dapat diaplikasikan menggunakan metode *spin-coating*, *dip-coating*, atau teknik deposisi berbasis plasma. Penelitian oleh Chen & Zhang (2023) menunjukkan bahwa teknik deposisi berbasis plasma dapat meningkatkan adhesi lapisan hingga 40% dibandingkan metode konvensional, menghasilkan lapisan yang lebih homogen dan bebas cacat, yang penting untuk aplikasi di lingkungan agresif. Selain itu, dalam aplikasi pada paduan aluminium, proses anodisasi sering diterapkan sebelum pelapisan sol-gel. Lapisan tipis oksida aluminium yang terbentuk selama anodisasi bertindak sebagai penghalang tambahan terhadap difusi ion korosif. Menurut Hegde (2023), lapisan sol-gel yang dianodisasi mampu bertahan hingga 500 jam dalam uji semprotan garam tanpa menunjukkan tanda-tanda korosi yang signifikan.

Selain melindungi dari korosi, lapisan sol-gel juga meningkatkan ketahanan terhadap erosi dan abrasi. Penelitian oleh Li et al. (2022) menunjukkan bahwa lapisan sol-gel yang diperkuat dengan nanopartikel  $TiO_2$  mampu mengurangi laju erosi sebesar 60% dalam uji abrasi partikel. Hal ini menjadikan sol-gel sebagai solusi efektif untuk aplikasi industri yang membutuhkan perlindungan ekstra, terutama untuk aluminium alloy yang rentan terhadap degradasi lingkungan.

### Performa Ketahanan Korosi dan Erosi Ketahanan Korosi

Ketahanan korosi dari *coating* sol-gel dan silika-PDMS telah dievaluasi secara komprehensif menggunakan berbagai metode uji, termasuk polarisasi potensiodinamik dan uji *salt spray* (kabut garam). *Coating* sol-gel menunjukkan ketahanan korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *coating* silika-PDMS, terutama karena sifatnya yang padat, adhesif, dan mampu membentuk lapisan pelindung yang homogen. Pada aluminium alloy, *coating* sol-gel yang dianodisasi menunjukkan performa superior dengan nilai potensial korosi (Ecorr) yang lebih positif, yaitu sekitar  $-0,45$  V vs SCE (*Saturated Calomel Electrode*), dibandingkan dengan *coating* silika-PDMS yang memiliki Ecorr sekitar  $-0,65$  V vs SCE (Hegde et al., 2023). Nilai Ecorr yang lebih positif menunjukkan kecenderungan yang lebih rendah untuk mengalami korosi, sehingga *coating* sol-gel memberikan perlindungan yang lebih efektif terhadap lingkungan korosif. Selain itu, uji *salt spray* selama 500 jam

menunjukkan bahwa *coating* sol-gel mampu mempertahankan integritasnya tanpa menunjukkan tanda-tanda korosi yang signifikan, sementara *coating* silika- PDMS mulai menunjukkan degradasi setelah 80 hari, atau 1920 jam dalam larutan NaCl 3% (Ejenstam et al., 2015).



Gambar 3. Grafik Perbandingan Durasi Ketahanan Korosi dari *Coating* Sol-Gel dan Silika-PDMS

*Coating* silika-PDMS, meskipun memberikan hidrofobisitas yang baik dengan sudut kontak air mencapai  $150^\circ$  (Xia et al., 2015), menunjukkan ketahanan korosi yang moderat dibandingkan dengan *coating* sol-gel. Partikel silika dalam lapisan ini berperan memperpanjang jalur difusi air dan ion korosif, sehingga memperlambat laju korosi. Namun, penelitian oleh Ejenstam et al. (2015) mengungkapkan bahwa konsentrasi silika yang terlalu tinggi (di atas 20% berat) dapat menyebabkan retakan mikro pada lapisan. Retakan ini menjadi titik lemah yang memungkinkan penetrasi air dan ion korosif, sehingga mengurangi efektivitas lapisan. Misalnya, pada konsentrasi silika 25%, laju korosi meningkat sebesar 15% dibandingkan dengan konsentrasi optimal 15% (Ejenstam et al., 2015). Hal ini menunjukkan pentingnya optimasi formulasi untuk mencapai keseimbangan antara hidrofobisitas dan ketahanan mekanis.

Secara ilmiah, keunggulan *coating* sol-gel dapat dikaitkan dengan struktur kimianya yang membentuk jaringan silika terikat secara kovalen, memberikan kekuatan mekanis dan adhesi yang tinggi. Sementara itu, *coating* silika-PDMS mengandalkan struktur mikro-nano yang meniru permukaan daun lotus untuk mencapai sifat superhidrofobik. Namun, ketahanan mekanisnya yang lebih rendah dan potensi retakan mikro membatasi performanya dalam aplikasi yang memerlukan perlindungan jangka panjang. Dengan demikian, meskipun kedua jenis *coating* ini memiliki kelebihan masing-masing, *coating* sol-gel lebih unggul dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan korosi tinggi, sementara *coating* silika-PDMS lebih cocok untuk aplikasi yang memprioritaskan hidrofobisitas dan ketahanan terhadap pembersihan.

#### Ketahanan Erosi

*Coating* yang digunakan dalam lingkungan dengan aliran fluida berkecepatan tinggi atau kondisi kavitasi, seperti pada turbin hidroelektrik, propeller kapal, dan pompa sentrifugal, harus memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap erosi. Kavitasi, yang terjadi ketika tekanan lokal dalam fluida turun hingga mencapai tekanan uapnya, menyebabkan terbentuknya gelembung-gelembung yang kemudian runtuh dengan cepat, menghasilkan gelombang kejut yang dapat merusak permukaan material secara bertahap (Franc & Michel, 2004). Untuk mengatasi permasalahan ini, pengembangan *coating* dengan ketahanan erosi tinggi menjadi fokus utama dalam berbagai penelitian material.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Kehilangan Massa Akibat Erosi Kavitasi dari *Coating Sol-Gel* dan Silika-PDMS

Salah satu jenis *coating* yang semakin banyak digunakan adalah *coating sol-gel*, yang menawarkan ketahanan erosi lebih baik dibandingkan *coating* berbasis silika-polydimethylsiloxane (PDMS). Hal ini disebabkan oleh struktur silang tiga dimensi dalam lapisan sol-gel yang meningkatkan kekuatan mekanis dan ketahanan terhadap tekanan berulang yang dihasilkan oleh kavitasi (Schmidt, 2019). Selain itu, *coating sol-gel* dapat dimodifikasi dengan berbagai nanopartikel seperti zirconia ( $ZrO_2$ ), alumina ( $Al_2O_3$ ), dan titania ( $TiO_2$ ) untuk meningkatkan ketahanan erosi serta sifat hidrofobiknya, yang dapat mengurangi adhesi fluida dan memperlambat degradasi permukaan akibat erosi kavitasi (Xu et al., 2022).

Dalam studi yang dilakukan oleh Hegde et al. (2023), pengujian ketahanan erosi dilakukan menggunakan perangkat kavitasi ultrasonik untuk mensimulasikan kondisi aliran fluida berkecepatan tinggi. Metode ini mensimulasikan pembentukan dan keruntuhan gelembung kavitasi yang menyebabkan tekanan tinggi pada permukaan *coating*. Pada pengujian ini, sampel *coating sol-gel* dan silika-PDMS diekspos terhadap kondisi kavitasi berulang dengan intensitas tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa *coating sol-gel* mampu menahan laju erosi dengan penurunan massa yang lebih sedikit dibandingkan silika-PDMS setelah sejumlah siklus uji tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa struktur material yang lebih padat dan sifat mekanis superior dari *coating sol-gel* berkontribusi terhadap daya tahannya yang lebih baik terhadap erosi kavitasi (Hegde et al., 2023).

Selain ketahanan mekanis, penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa modifikasi kimiawi pada sol-gel dapat meningkatkan ketahanan erosi lebih lanjut. Misalnya, penambahan organosilane dalam proses sol-gel dapat meningkatkan fleksibilitas struktur *coating* dan mengurangi retakan akibat benturan berulang dari gelembung kavitasi (Matsuda et al., 2021). Studi lain oleh Li et al. (2023) menemukan bahwa penggunaan *coating* berbasis hybrid silika-zirconia dapat meningkatkan kekerasan permukaan hingga 30% lebih tinggi dibandingkan *coating sol-gel* konvensional, yang secara signifikan mengurangi laju keausan akibat kavitasi.

Dari berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa *coating* berbasis sol-gel memiliki potensi besar sebagai material pelindung dalam lingkungan dengan risiko erosi tinggi. Keunggulan utamanya terletak pada struktur mekanis yang kuat, kemampuan untuk dimodifikasi dengan nanopartikel fungsional, serta sifat hidrofobiknya yang mengurangi adhesi fluida dan efek degradasi akibat kavitasi. Pengembangan lebih lanjut dalam komposisi dan metode aplikasi *coating sol-gel* diharapkan dapat menghasilkan solusi perlindungan permukaan yang lebih tahan lama dalam aplikasi industri, termasuk pada turbomachinery, sistem propulsi kapal, dan komponen berbasis fluida lainnya.

Data analisis dari pengujian ini menunjukkan perbedaan signifikan dalam ketahanan erosi antara *coating sol-gel* dan silika-PDMS ketika diuji dalam kondisi kavitasi ultrasonik. Pengujian ini dilakukan untuk mensimulasikan lingkungan dengan aliran fluida berkecepatan tinggi, seperti pada turbin hidroelektrik, propeller kapal, dan pompa sentrifugal, di mana permukaan material mengalami tekanan mekanis berulang akibat keruntuhan gelembung kavitasi (Franc & Michel, 2004).

Hasil pengujian kehilangan massa *coating* dalam berbagai siklus menunjukkan bahwa *coating sol-gel* memiliki ketahanan erosi yang lebih tinggi dibandingkan silika-PDMS, sebagaimana dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 1. Perbandingan Kehilangan Massa Antara Dua Jenis Lapisan (*Coating*) Akibat Uji Kavitasasi Pada Berbagai Siklus

Siklus Uji Kavitasasi	Kehilangan Massa <i>Coating</i> Sol-Gel	Kehilangan Massa <i>Coating</i> Silika-PDMS
50 Siklus	2–3%	5–7%
100 Siklus	5–7%	10–12%

Setelah 50 siklus kavitasasi, lapisan sol-gel hanya mengalami kehilangan massa 2-3% yang merupakan hasil yang sangat baik yang menunjukkan ketahanan terhadap erosi. Setelah 100 siklus kavitasasi, kehilangan massa sekitar 5-7% tetapi masih jauh lebih rendah daripada lapisan silika-PDMS. Ini membuktikan bahwa struktur jaringan tiga dimensi dari lapisan sol-gel secara mekanis melindunginya lebih baik dari tekanan gelembung kavitasasi yang runtuh. Sebuah studi sebelumnya oleh Huang et al. juga melaporkan bahwa lapisan sol-gel berbasis silika-zirkonia memiliki ketahanan erosi 30% lebih baik dibandingkan dengan lapisan organik konvensional. Hal ini dijelaskan oleh struktur sol-gel yang membentuk lapisan keramik amorf dengan kepadatan tinggi, sehingga mampu menahan erosi dampak kavitasasi lebih lama daripada bahan yang lebih lunak seperti silika-PDMS. Alasan mengapa lapisan sol-gel lebih tahan erosi dapat dikaitkan dengan beberapa faktor utama:

- Struktur Jaringan Tiga Dimensi – pelapis sol-gel, memiliki ikatan silang yang sangat kuat sehingga membentuk lapisan dengan kepadatan tinggi dengan ketahanan mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan silika-PDMS. Penelitian oleh Li et al. juga menunjukkan bahwa pelapis sol-gel menunjukkan kekerasan permukaan yang tinggi dibandingkan dengan pelapis berbasis polimer.
- Kekerasan Permukaan yang Lebih Tinggi – pelapis sol-gel berbasis silika-zirkonia memiliki kekerasan permukaan hingga 30% lebih tinggi dibandingkan dengan pelapis berbasis polimer. Hal ini membuatnya lebih tahan terhadap deformasi di bawah tekanan mekanis berulang.
- Stabilitas Kimia yang Lebih Baik – pelapis sol-gel lebih stabil terhadap degradasi yang disebabkan oleh interaksi fluida, sedangkan silika-PDMS lebih rentan terhadap pelapukan dan pelarutan dalam kondisi ekstrem.

Berdasarkan hasil yang telah dipertimbangkan, dapat disimpulkan bahwa pelapis sol-gel akan lebih baik diterapkan di lingkungan dengan erosi tinggi seperti komponen turbin, baling-baling kapal, pompa fluida, dan sistem hidrodinamik lainnya. Aplikasi pelapis yang melindungi substrat dengan peningkatan ketahanan erosi tidak hanya mendapatkan masa pakai yang lebih lama, tetapi juga meminimalkan biaya perawatan dan penggantian karena keausan. Sebaliknya, erosi lapisan silika-PDMS menunjukkan kehilangan massa yang jauh lebih besar. Setelah 50 siklus, persentase kehilangan massa mencapai 5-7%, yang dua kali lipat dari sol-gel. Namun, dengan jumlah siklus pengujian ditingkatkan menjadi 100 siklus, kerapatan kehilangan massa meningkat menjadi 10-12%, yang menunjukkan degradasi mekanis yang lebih tinggi.

Analisis mikrostruktur setelah pengujian menunjukkan degradasi pasca-eksperimen yang signifikan karena pembebanan tegangan mekanis yang berulang. Matsuda dkk. Penelitian Matsuda dkk. menjelaskan beberapa mekanisme utama yang memicu kesalahan kinerja pelapisan ini. Retakan permukaan lapisan muncul akhirnya karena tingkat tegangan siklik oleh munculnya dan menghilangnya gelembung kavitasasi yang konstan pada permukaan material. Tegangan siklik ini menyebabkan tegangan tarik melampaui titik putus lapisan, sehingga retakan mikro muncul dan menunjukkan retakan yang lebih besar setelah siklus. Adanya retakan meningkatkan tekanan fluida yang menembus ke dalam material pelapis, sehingga mengakibatkan degradasi material lebih cepat. Pecahnya lapisan pelindung juga diamati, yang meningkatkan kehilangan massa material. Hal ini terjadi ketika tekanan fenomena kavitasasi terlalu kuat, sehingga gaya kohesi putus dan bagian permukaan pelindung terpisah dari pelapis. Perambatan ini meningkatkan kehilangan volume material, sehingga pengurangan ketebalan pelapis lebih cepat dan tingkat perlindungannya terhadap substrat melemah setelah sejumlah siklus tertentu.

Selain itu, delaminasi, alias lapisan yang terlepas dari substrat, juga merupakan masalah utama

untuk pelapis silika-PDMS. Faktanya, ketidakmampuan pelapis untuk melekat dengan kuat pada substrat membahayakannya terhadap daya tarik konstruktif alami dari proses kavitas. Dengan kata lain, perbedaan sifat mekanis antara pelapis dan substrat dapat menyebabkan tugas adhesi, dan tegangan sisa pelapis juga dapat memengaruhi korosi itu sendiri. Jenis delaminasi pada hasil sistem pelapisan ini terkadang mempertimbangkan kegagalan pelatihan dengan konsekuensi substrat terpapar lingkungan korosif atau gaya erosi lebih lanjut. Dengan semua perhitungan ini, pengujian jangka panjang yang terkait dengan delaminasi adalah salah satu dari dua yang gagal. Benar, kesimpulan dari jenis ini adalah bahwa meskipun pelapis silika-PDMS memiliki sifat hidrofobik yang lebih baik, pelapis tersebut hampir tidak dapat menahan daya rusak mekanis dari tekanan kavitas yang tinggi. Oleh karena itu, penjelajah area aplikasi yang peta daya abrasinya lebih tinggi juga mencakup dalam genom turbin, atau propulsi, dan pelapis sol-gel atau pelapis hibrida berdasarkan nanokomposit dengan struktur jaringan mahkota komposit silika, diameter hierarki galangan kapal dan dermaga dibandingkan. Hal ini dapat dijelaskan oleh sifat materialnya, sehingga silika-PDMS adalah tingkat ketidakseimbangan kimia

#### Kelebihan dan Keterbatasan *Coating* Hidrofobik

*Coating* hidrofobik digunakan untuk meningkatkan sifat penolakan air pada permukaan material, yang penting dalam berbagai aplikasi industri seperti perlindungan infrastruktur, komponen otomotif, penerbangan, dan peralatan kelautan. Dua jenis *coating* hidrofobik yang sering digunakan adalah sol-gel dan silika-PDMS. Masing-masing memiliki karakteristik unik yang menentukan penggunaannya dalam berbagai kondisi operasional.

*Coating* sol-gel dibuat melalui proses reaksi kimia antara prekursor silika, seperti tetraethyl orthosilicate (TEOS) atau tetramethyl orthosilicate (TMOS), dengan pelarut dan katalis yang sesuai. Proses ini menghasilkan struktur jaringan tiga dimensi yang padat, memberikan ketahanan mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan *coating* berbasis polimer. Keunggulan utama dari *coating* sol-gel adalah ketahanan mekanis yang tinggi, adhesi yang kuat terhadap substrat, serta ketahanan terhadap korosi dan erosi. Studi yang dilakukan oleh Zhang et al. (2022) menunjukkan bahwa *coating* sol-gel mampu meningkatkan ketahanan korosi hingga tiga kali lipat dibandingkan dengan substrat tanpa perlakuan. Jika dikombinasikan dengan proses anodisasi, ketahanan korosi dapat lebih ditingkatkan dengan mengurangi penetrasi air dan ion perusak ke dalam substrat logam. Namun, penerapan *coating* sol-gel memerlukan proses yang cukup kompleks, termasuk metode aplikasi seperti pencelupan atau penyemprotan, serta curing pada suhu tinggi yang berkisar antara 200–400°C. Persyaratan curing ini membatasi penerapan *coating* sol-gel pada material yang sensitif terhadap panas, seperti plastik. Selain itu, waktu curing yang relatif lama juga menjadi tantangan dalam penerapan skala industri yang membutuhkan efisiensi produksi tinggi.

Sebaliknya, *coating* silika-PDMS menawarkan kemudahan aplikasi dan fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan sol-gel. *Coating* ini dapat diterapkan menggunakan metode sederhana seperti penyemprotan atau pelapisan dengan kuas tanpa memerlukan curing pada suhu tinggi. Teknik ini lebih hemat energi dan cocok untuk berbagai jenis substrat, termasuk material polimer yang tidak tahan terhadap panas tinggi. *Coating* silika-PDMS memiliki sifat hidrofobik yang sangat baik, dengan sudut kontak air mencapai lebih dari 150°, yang menunjukkan bahwa air hampir tidak menempel pada permukaannya. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Li et al. (2023), sudut kontak sebesar 155° dicatat untuk *coating* ini, menunjukkan sifat superhidrofobik yang signifikan. Namun, meskipun *coating* silika-PDMS unggul dalam kemudahan penerapan dan fleksibilitas, ketahanannya terhadap korosi dan erosi tidak sebaik sol-gel. Dalam lingkungan dengan konsentrasi ion klorida yang tinggi, *coating* ini cenderung lebih cepat mengalami degradasi. Selain itu, ketahanan erosi *coating* silika-PDMS relatif lebih rendah dibandingkan sol-gel, sehingga kurang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya tahan tinggi terhadap abrasi dan tekanan mekanis yang ekstrem.

Dengan mempertimbangkan kelebihan dan keterbatasan masing-masing *coating*, pemilihan *coating* hidrofobik harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi spesifik. *Coating* sol-gel lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan mekanis dan korosi yang tinggi, meskipun membutuhkan proses aplikasi yang lebih kompleks dengan suhu curing tinggi. Sementara itu, *coating* silika-PDMS lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan kemudahan penerapan, fleksibilitas, dan biaya lebih rendah, tetapi memiliki keterbatasan dalam hal ketahanan terhadap korosi dan erosi pada kondisi lingkungan yang ekstrem.

Tabel 2. Perbandingan Ketahanan Korosi dan Erosi *Coating* Sol-Gel dan Silika- PDMS

Parameter	<i>Coating</i> Sol- Gel	<i>Coating</i> Silika- PDMS
Potensial Korosi (Ecorr)	-580 mV	-640 mV
Kerapatan Arus Korosi (Icorr)	5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Durasi Uji Salt Spray	500 jam	80 hari
Kehilangan Massa (Setelah 30 Menit)	0.05 g	0.12 g

### KESIMPULAN

*Coating* sol-gel dan silika-PDMS keduanya menawarkan manfaat signifikan untuk perlindungan korosi dan erosi pada logam alloy, meskipun kesesuaiannya tergantung pada persyaratan spesifik dari aplikasi. *Coating* sol-gel memberikan ketahanan korosi dan erosi yang unggul, menjadikannya ideal untuk lingkungan yang keras di mana kekuatan mekanis sangat penting. Di sisi lain, *coating* silika- PDMS menawarkan hidrofobisitas yang sangat baik dan kemudahan aplikasi, menjadikannya pilihan yang cocok untuk kondisi dengan tekanan korosif yang moderat. Penelitian di masa depan sebaiknya berfokus pada pengoptimalan komposisi dan teknik aplikasi dari kedua jenis *coating* untuk meminimalkan keterbatasannya dan meningkatkan sifat pelindungnya.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Harsito, Mekanisme Korosi pada Logam. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2005.
- [2] L. Ejenstam, M. Halvarsson, dan J. E. Svensson, "Corrosion protection by hydrophobic silica particle-polydimethylsiloxane composite *coatings*," *Corrosion Science*, vol. 95, pp. 1–10, 2015.
- [3] M. Hegde, Y. Zhao, dan S. Liu, "Cavitation erosion and corrosion resistance of hydrophobic sol-gel *coatings* on aluminium alloy," *Wear*, vol. 524–525, p. 204766, 2023.
- [4] A. Mishra dan S. Banerjee, "Hydrophobic *coatings* for corrosion protection: A comprehensive review," *Progress in Organic Coatings*, vol. 163, p. 106676, 2022.
- [5] X. Zhang, T. Liu, dan Q. Ma, "Superhydrophobic *coatings* for corrosion and tribological protection: A review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 368, pp. 22–41, 2019.
- [6] H. Wu, L. Zhang, dan R. Chen, "Sol-gel derived superhydrophobic *coatings* for aluminum alloy protection," *Surface and Coatings Technology*, vol. 409, p. 126874, 2021.
- [7] Y. Li dan J. Chen, "PDMS-based hydrophobic *coatings*: Properties and applications in corrosion resistance," *Journal of Materials Science*, vol. 55, pp. 9183–9195, 2020.
- [8] R. Kumar, B. Singh, dan R. Sharma, "Multifunctional sol-gel *coatings* for improved corrosion resistance of metals: A review," *Progress in Organic Coatings*, vol. 123, pp. 346–362, 2018.
- [9] A. Singh dan R. Thakur, "Recent advances in sol-gel technology for corrosion resistant *coatings*," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 100, pp. 1–18, 2021.
- [10] L. Gao, H. Yin, dan W. Zhang, "Effect of surface microstructure on the superhydrophobic properties of silica-PDMS *coatings*," *Materials & Design*, vol. 215, p. 110473, 2022.
- [11] Z. Huang, W. Li, dan J. Xu, "Erosion and corrosion resistance of superhydrophobic *coatings* on magnesium alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 709, pp. 669–678, 2017.
- [12] R. B. Utomo dan S. Alva, "Studi dan karakterisasi laju korosi logam aluminium dengan pelapisan membran sol-gel," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 6, no. 3, pp. 191–198, 2017.
- [13] L. Feng, Y. Zhou, dan Y. Zhang, "Corrosion resistance and hydrophobicity of fluorine-modified sol-gel *coatings*," *Corrosion Science*, vol. 105, pp. 233–242, 2016.
- [14] Q. Chen dan X. Zhang, "Recent progress in superhydrophobic *coatings* for corrosion protection," *Surface Engineering*, vol. 36, no. 5, pp. 392–405, 2020.

- 
- [15] M. Tiwari, V. Patel, dan P. Desai, “Functionalized nanocomposite *coatings* for enhanced corrosion resistance,” *Advanced Materials Interfaces*, vol. 6, no. 12, p. 1900132, 2019.
- [16] Y. Jiang dan Y. Li, “Hybrid *coatings* with corrosion protection properties: A critical review,” *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 18, pp. 1097–1114, 2021.
- [17] R. Xia, B. Zhang, K. Dong, Y. Yan, dan Z. Guan, “HD-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Sol@PDMS superhydrophobic *coating* with good durability and anti-corrosion for protection of Al sheets,” *Materials*, vol. 16, no. 9, p. 3532, 2023.