



Perkembangan Penerapan Nanoteknologi di Bidang Pelapisan (Coating)

Febria Mita, Asiah Jumarni, Rosita Wati, Azizah Patimah, Dui Yanto Rahman*

Program Studi Fisika Fisika, FMIPA Universitas PGRI Palembang,
Palembang 30251, Indonesia

*e-mail: duiyantorahmanmsi@gmail.com

Received: 17 01 2024. Accepted: 29 02 2024. Published: 02 2024

Abstrak

Nanoteknologi telah menjadi salah satu bidang penelitian yang menjanjikan dalam berbagai industri, termasuk bidang pelapisan (*coating*). Artikel ini bertujuan untuk menggambarkan perkembangan penerapan nanoteknologi dalam bidang pelapisan dan mengungkapkan keunggulan yang dimilikinya. Penerapan nanoteknologi dalam pelapisan telah memberikan banyak manfaat signifikan. Salah satu keunggulannya adalah kemampuan untuk menghasilkan lapisan yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap korosi dan aus. Partikel skala nano yang digunakan dalam pelapisan dapat membentuk struktur yang padat dan merata, meningkatkan ketahanan mekanik dan kekuatan lapisan. Selain itu, penggunaan nanomaterial juga memungkinkan adanya peningkatan kemampuan proteksi terhadap radiasi ultraviolet (UV) dan panas, mengurangi risiko kerusakan akibat paparan sinar matahari dan suhu ekstrem. Selain keunggulan mekanik, nanoteknologi juga memberikan kemampuan fungsionalitas yang unik dalam pelapisan. Partikel nanopartikel dapat dimodifikasi untuk memberikan sifat tahan air, anti-bakteri, atau sifat anti-korosi yang lebih baik. Selain itu, kemampuan nanomaterial untuk mengubah sifat permukaan juga dapat dimanfaatkan dalam pengendalian kelekatan kotoran, menghasilkan lapisan *self-cleaning* yang mampu menjaga permukaan tetap bersih dan bebas dari kontaminan. Dengan memahami keunggulan nanoteknologi dalam pelapisan, diharapkan dapat memotivasi penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam mengoptimalkan penggunaan nanomaterial dalam industri pelapisan.

Kata Kunci: Nanoteknologi, Pelapisan, Anti-Korosi, *Self-cleaning*, Nanomaterial

Development of Applied Nanotechnology in Coating

Abstract

Nanotechnology has emerged as a promising field of research across various industries, including the coating sector. This article seeks to outline the progress of applying nanotechnology in coatings and clarify its inherent benefits. The implementation of nanotechnology in coating has yielded numerous significant benefits. One of its advantages lies in the ability to produce coatings that are stronger and more resistant to corrosion and wear. Nanoscale particles used in coating can form dense and uniform structures, enhancing mechanical resilience and the strength of the coating. Furthermore, the utilization of nanomaterials allows for improved protection against ultraviolet (UV) radiation and heat, thereby reducing the risk of damage from sunlight exposure and extreme temperatures. In addition to mechanical prowess, nanotechnology also imparts unique functional capabilities to coatings. Nanoparticle characteristics can be tailored to provide water resistance, anti-bacterial properties, or enhanced anti-corrosion features. Moreover, the ability of nanomaterials to alter surface properties can be harnessed for controlling dirt adhesion, resulting in self-cleaning coatings capable of keeping surfaces clean and free from contaminants. By comprehending the advantages of nanotechnology in coating, it is anticipated that this knowledge will stimulate further research and development to optimize the use of nanomaterials in the coating industry.

Keywords: *Nanotechnology, Coating, Anti-corrosion, Self-cleaning, Nanomaterials.*



PENDAHULUAN

Nanoteknologi telah menjadi topik menarik untuk dikaji dalam bidang pelapisan atau cat karena pentingnya peran pelapisan atau cat dalam berbagai aplikasi teknologi (Liu, Y., et.al., 2021). Dalam industri otomotif, *aerospace*, elektronik, dan industri lainnya, pelapisan atau cat memiliki peran penting dalam melindungi permukaan material dari kerusakan fisik, korosi, atau interaksi dengan lingkungan eksternal (Liu, Y., et.al., 2021). Salah satu tantangan utama dalam pelapisan atau cat konvensional adalah ketahanan terhadap aus, dimana pelapisan atau cat dapat mengalami keausan seiring waktu penggunaan yang berulang (Huang, Z., et.al., 2019). Selain itu, ketahanan terhadap korosi juga menjadi masalah serius, terutama dalam aplikasi yang terpapar lingkungan korosif, seperti di sektor maritim atau *aerospace* (Wu, Q., et.al., 2020).

Nanoteknologi adalah ilmu dan teknologi yang berkaitan dengan manipulasi dan pengolahan material pada skala nanometer, yaitu ukuran yang sangat kecil, sekitar satu miliar kali lebih kecil dari ukuran meter. Nanoteknologi telah menjadi inovatif dan menarik dalam berbagai bidang, termasuk bidang pelapisan atau cat, karena material nano memiliki sifat-sifat unik yang berbeda dari material makroskopik. Menurut penelitian oleh (Ling, X., et.al., 2020), sifat fisika dan kimia material nano berbeda dari material makroskopik karena efek kuantum dan permukaan yang sangat besar dibandingkan dengan volume. Sifat-sifat unik ini membuka peluang besar dalam pengembangan aplikasi baru di berbagai bidang teknologi, termasuk bidang pelapisan atau cat. Material nano memiliki sifat-sifat unik karena ukuran partikel yang sangat kecil. Material nano memiliki ukuran di bawah 100 nanometer dan sering kali memiliki sifat mekanik,

termal, dan optik yang berbeda dari material makroskopik. Menurut penelitian oleh (Chen, X., et.al., 2018), sifat mekanik material nano bergantung pada komposisi, struktur, dan ukuran partikel, dan sering kali menunjukkan kekakuan yang lebih besar dan kekuatan yang lebih tinggi daripada material makroskopik. Sifat termal material nano juga berbeda karena efek permukaan yang sangat besar dibandingkan dengan volume, yang dapat mempengaruhi konduktivitas termal material. Sifat optik material nano juga berbeda karena efek kuantum, yaitu bahwa material nano dapat menunjukkan fenomena seperti fluoresensi atau pelangi warna-warni saat terkena cahaya.

Potensi penerapan nanoteknologi dalam bidang pelapisan atau cat sangat menjanjikan. Dengan memanfaatkan sifat-sifat unik material nano, nanoteknologi dapat menjadi solusi untuk mengatasi tantangan atau masalah yang ada dalam pelapisan atau cat konvensional, serta memberikan keuntungan dalam hal efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan dalam proses pelapisan atau cat (Y. Li et.al., 2013). Salah satu potensi utama nanoteknologi dalam pelapisan atau cat adalah peningkatan ketahanan aus dan ketahanan korosi. Material nano, seperti nanopartikel atau nanokomposit, dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan aus pelapisan atau cat, sehingga dapat menghasilkan produk dengan umur pakai yang lebih lama dan performa yang lebih baik. Selain itu, material nano juga dapat digunakan untuk mengurangi korosi pada permukaan yang dilapisi, melalui pengaturan sifat permukaan, ketebalan, atau komposisi pelapisan, yang dapat meningkatkan daya tahan terhadap korosi (M. A. Golozar et.al., 2020). Selain itu, nanoteknologi juga dapat memberikan keuntungan dalam sifat adhesi pelapisan atau cat. Dengan penggunaan material nano, dapat diperoleh pelapisan atau cat

dengan sifat adhesi yang kuat terhadap substrat, sehingga dapat meningkatkan keberhasilan pelapisan dan mengurangi risiko pengelupasan atau pengelupasan pelapisan atau cat (H. J. Qi et.al., 2020). Nanoteknologi juga dapat memberikan efisiensi dalam proses pelapisan atau cat. Penggunaan nanoteknologi dapat mengurangi jumlah bahan yang dibutuhkan untuk melapisi suatu permukaan, karena material nano cenderung memiliki efisiensi tinggi dalam penggunaan bahan. Selain itu, teknologi nano dapat memberikan pengendalian yang lebih baik dalam distribusi dan penyebaran bahan pelapis atau cat, sehingga dapat menghasilkan pelapisan atau cat yang lebih seragam dan berkualitas tinggi (Y. Lu, et.al., 2020).

Nanoteknologi memiliki kelebihan dalam bidang pelapisan atau cat, salah satunya adalah efisiensi energi yang tinggi. Material nano dapat digunakan dalam pembuatan pelapis atau cat dengan ketebalan yang lebih tipis dan berpori-pori kecil. Hal ini mengurangi jumlah material yang digunakan dan meningkatkan efisiensi aplikasi. Selain itu, nanoteknologi juga memungkinkan pengaturan sifat permukaan benda yang dilapisi dengan kontrol yang tinggi. Menurut penelitian oleh (Ma, et.al., 2021), material nano dapat digunakan untuk mengubah sifat permukaan benda, seperti kekuatan ikatan, hidrofobisitas, atau aktivitas katalitik. Dengan kemampuan pengaturan sifat permukaan yang lebih baik, pelapis atau cat dapat meningkatkan kinerja, tahan lama, dan ramah lingkungan. Selain itu, nanoteknologi juga dapat meningkatkan daya tahan pelapis atau cat terhadap suhu tinggi. Material nano memiliki sifat termal yang khusus, di mana efek permukaan yang besar meningkatkan konduktivitas termal dan mengurangi deformasi termal. Hal ini memungkinkan pengembangan pelapis atau cat yang

dapat bertahan dalam kondisi suhu tinggi dan mencegah terjadinya oksidasi atau degradasi material. Menurut penelitian oleh (Liu, et.al., 2020), penggunaan material nano dalam pelapis atau cat juga dapat meningkatkan sifat antimikroba. Material nano seperti nanopartikel perak atau tembaga telah terbukti memiliki efek antimikroba yang kuat, yang dapat digunakan dalam pelapis atau cat untuk mencegah pertumbuhan mikroba pada permukaan benda. Dalam pengembangan pelapisan atau cat yang lebih canggih, tahan lama, atau ramah lingkungan, nanoteknologi juga dapat membawa dampak positif dengan memungkinkan penggunaan bahan-bahan yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Menurut penelitian oleh (Zhang, et.al., 2020), penggunaan material nano dapat mengurangi emisi CO₂ dan limbah dalam pembuatan pelapis atau cat. Dengan demikian, pengembangan pelapis atau cat yang lebih canggih dengan bahan-bahan nano dapat membawa dampak positif pada lingkungan dan kesehatan manusia. tuliskan reperensi lengkapnya.

Tujuan dari penulisan artikel review ini adalah untuk mengkaji perkembangan terbaru dalam penerapan nanoteknologi dalam bidang pelapisan atau cat. Artikel ini mengidentifikasi tantangan atau hambatan yang masih ada dalam penggunaan nanoteknologi dalam pelapisan atau cat konvensional, serta mengevaluasi keuntungan atau keterbatasan dari penggunaan nanoteknologi dalam bidang ini. Melalui artikel ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang potensi dan aplikasi nanoteknologi dalam pelapisan atau cat, serta dapat memberikan wawasan baru dalam pengembangan pelapisan atau cat yang lebih canggih, efisien, dan berkelanjutan. Selain itu, artikel ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami implikasi lingkungan, kesehatan, dan keselamatan terkait

penggunaan nanoteknologi dalam bidang ini, serta memberikan arahan bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan teknologi pelapisan atau cat yang inovatif dan berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Dalam penulisan artikel review ini, metode yang digunakan adalah literatur review dengan mengakses sumber data dari literatur nasional dan internasional melalui database. Data-literatur diperoleh dari *Google Scholar*, *Pubmed*, dan *ScienceDirect*, dengan rentang waktu penerbitan jurnal 10 tahun terakhir yakni tahun 2013-2023. Sebanyak 50 artikel yang sesuai dengan topik berhasil dikumpulkan dan menjadi bahan utama dalam melakukan review pada penelitian ini.

Dalam penelitian ini, digunakan data sekunder yang diperoleh dari penelitian-penelitian sebelumnya, bukan melalui pengamatan langsung. Metode pengumpulan data yang diterapkan adalah metode dokumentasi, dimana peneliti mencari dan mengumpulkan data dari literatur terkait dengan rumusan masalah penelitian. Proses pengumpulan data dilakukan secara sistematis dengan menggunakan teknik ilmiah tertentu untuk tujuan analisis seperti *content analysis* (analisis konten), *bibliometrik* atau analisis sitasi, *meta-analisis* (analisis meta), analisis tematik, analisis temporal, dan analisis kesamaan (*clustering*). Pendekatan yang digunakan dalam metode dokumentasi ini adalah metode naratif, di mana data hasil ekstraksi disintesis dan dikelompokkan berdasarkan kesamaan untuk menjawab permasalahan yang telah dirumuskan.

Pada tahap ini, data yang telah dikumpulkan akan menjalani proses analisis. Artikel penelitian yang memenuhi kriteria akan dihimpun dan ringkasan jurnal akan disusun, mencakup judul artikel, nama peneliti, bahan alam yang digunakan, metode pembuatan, dan hasil/temuan dari setiap jurnal yang relevan. Sintesis ringkasan jurnal ini kemudian ditulis pada bagian pembahasan. Abstrak maupun teks lengkap dari setiap jurnal dibaca dan dipelajari secara cermat untuk memperjelas hasil analisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi yang dilakukan oleh (Dwandaru, W.B., et.al., 2016) dan diterbitkan dalam Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan, Teknologi, dan Seni (INOTEKS), mengkaji pengaruh variasi konsentrasi bahan aditif larutan nanopartikel perak terhadap sifat anti-jamur cat dinding. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi perubahan sifat anti-jamur cat dinding dengan variasi konsentrasi aditif nanopartikel perak. Metode yang digunakan adalah dengan mengambil sampel cat dinding yang telah diberi aditif larutan nanopartikel perak pada berbagai konsentrasi, kemudian diuji untuk menentukan sifat anti-jamur dengan menggunakan metode standar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi konsentrasi bahan aditif larutan nanopartikel perak memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat anti-jamur cat dinding. Semakin tinggi konsentrasi aditif nanopartikel perak, semakin baik sifat anti-jamur yang dihasilkan, dengan persentase penghambatan pertumbuhan jamur mencapai 90% pada konsentrasi tertentu. Hal ini menunjukkan potensi aplikasi teknologi nano dalam industri cat

dinding untuk menghasilkan produk yang lebih tahan terhadap pertumbuhan jamur.

Penelitian yang dilakukan (Sulistyono, A., et.al., 2018) yang diterbitkan dalam *Indonesian Journal of Chemical Science* membahas tentang sintesis dan karakterisasi partikel TiO₂ (nanorod)-SiO₂ serta aplikasinya dalam cat akrilik. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan partikel TiO₂ (nanorod)-SiO₂ dengan sifat yang baik sebagai bahan baku cat akrilik yang ramah lingkungan. Metode sol-gel digunakan dengan variasi suhu pengeringan dan suhu kalsinasi. Hasil yang signifikan menunjukkan bahwa partikel TiO₂ (nanorod)-SiO₂ yang dihasilkan memiliki ukuran nanometer dengan bentuk nanorod yang baik. Partikel ini juga meningkatkan sifat hidrofobik dan ketahanan gores cat akrilik. Pengujian menunjukkan persentase transmisi cahaya cat akrilik yang mengandung partikel TiO₂ (nanorod)-SiO₂ mencapai 77%, lebih tinggi daripada cat akrilik tanpa partikel TiO₂ (nanorod)-SiO₂. Penelitian ini menyimpulkan bahwa partikel TiO₂ (nanorod)-SiO₂ dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam cat akrilik untuk meningkatkan sifat hidrofobik, ketahanan gores, dan persentase transmisi cahaya.

Penelitian yang dilakukan oleh (Syafiq, A., et.al., 2020) bertujuan untuk menghasilkan lapisan nano-CaCO₃ berbasis hidrofobik yang transparan, dapat membersihkan diri, dan anti-kabut. Metode yang digunakan adalah metode sol-gel dengan mereaksikan kalsium klorida dan natrium karbonat dalam larutan etanol. Campuran ini dicampur dengan 3-glycidyloxypropyltrimethoxysilane (GPTMS) dan diperoleh lapisan transparan nano-CaCO₃ yang hidrofobik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan nano-CaCO₃ dapat meningkatkan sifat hidrofobik dan anti-kabut pada permukaan. Hal ini ditunjukkan oleh

sudut kontak permukaan yang meningkat menjadi 124.8° dan penurunan nilai transmisi cahaya yang rendah sekitar 2% pada permukaan yang diberi lapisan nano-CaCO₃. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi lapisan hidrofobik dan anti-kabut yang transparan dan efektif.

Selanjutnya penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan korosi dari lapisan berbasis nanomaterial dua dimensi pada substrat stainless steel telah dilakukan oleh Mujib, S.B., et.al., (2020). Penelitian ini diterbitkan dalam jurnal *Royal Society Open Science*. Penelitian ini melibatkan pengujian ketahanan korosi dari lapisan berbasis nanomaterial dua dimensi yang diaplikasikan pada substrat stainless steel. Para penulis menggunakan metode pelapisan kimia untuk menghasilkan lapisan tipis dari nanomaterial, termasuk grafitena, disulfida molibdenum (MoS₂), dan diselenida molibdenum (MoSe₂). Data eksperimen menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk dari nanomaterial dua dimensi mampu meningkatkan ketahanan korosi dari substrat stainless steel. Hasil uji korosi menunjukkan penurunan laju korosi yang signifikan pada substrat yang dilapisi dengan lapisan nanomaterial dibandingkan dengan substrat tanpa lapisan. Pada pengujian korosi, substrat stainless steel yang dilapisi dengan grafitena mengalami penurunan laju korosi sebesar 35% dibandingkan dengan substrat tanpa lapisan. Sementara itu, lapisan MoS₂ dan MoSe₂ juga menunjukkan penurunan laju korosi yang signifikan sebesar 28% dan 31% secara berturut-turut. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi stabilitas lapisan nanomaterial pada kondisi korosif. Data eksperimen menunjukkan bahwa lapisan nanomaterial tetap stabil dan mempertahankan ketahanan korosinya setelah terpapar larutan korosif dalam waktu yang cukup lama.

Dalam penelitian yang dilakukan Erol, K., et.al., (2020), bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi cryogels komposit yang mengandung nanopartikel perak (AgNPs) serta menguji aktivitas antibakteri dari cryogels tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *freeze-thaw polymerization* yang memanfaatkan ikatan hidrogen antara polimer dan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cryogels komposit yang mengandung AgNPs memiliki sifat antibakteri yang tinggi terhadap bakteri gram negatif dan gram positif, yaitu sebesar 94-100%. Selain itu, cryogels ini juga menunjukkan stabilitas mekanik yang baik dan dapat digunakan dalam aplikasi kedokteran seperti pengobatan luka. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan bahan antibakteri yang efektif dan ramah lingkungan.

Pengembangan cat antimikroba menggunakan mikrosfera CaCO_3 yang dihasilkan melalui biomineralisasi CO_2 yang dikontrol oleh mikroalga telah berhasil dilakukan oleh Sahoo, P.C., et.al., (2014). Metode yang digunakan adalah sintesis nanopartikel perak terkapsulasi pada mikrosfera CaCO_3 dengan menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai agen reduksi dan penstabil. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mikrosfera CaCO_3 dengan nanopartikel perak terbukti efektif dalam menghambat pertumbuhan bakteri, yaitu sebesar 97% untuk *Staphylococcus aureus* dan 94% untuk *Escherichia coli*. Selain itu, penelitian ini juga menemukan bahwa kandungan nanopartikel perak dalam mikrosfera CaCO_3 mempengaruhi aktivitas antimikroba, dengan aktivitas yang semakin tinggi seiring dengan peningkatan konsentrasi nanopartikel perak. Kesimpulannya, penelitian ini mengungkapkan potensi mikrosfera CaCO_3 dengan nanopartikel perak hasil biomineralisasi CO_2 yang dikontrol oleh

mikroalga sebagai bahan antimikroba dalam pembuatan cat, memberikan kontribusi penting dalam pengembangan bahan antimikroba yang efektif untuk melindungi permukaan dari pertumbuhan bakteri.

Dalam paper (Sun, W., et.al., 2019) penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peran beban *graphene* dalam mempengaruhi aktivitas promosi korosi dari lapisan nanokomposit *graphene/epoxy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban *graphene* memiliki pengaruh signifikan pada aktivitas promosi korosi, dimana semakin tinggi beban *graphene*, semakin tinggi tingkat korosi yang teramati. Sebagai contoh, lapisan nanokomposit dengan beban *graphene* sebesar 2% memiliki peningkatan tingkat korosi sebesar 30% dibandingkan dengan lapisan tanpa *graphene*. Analisis morfologi permukaan juga mengungkapkan adhesi yang lebih rendah dan keretakan pada lapisan nanokomposit dengan konsentrasi *graphene* yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penambahan *graphene* dalam jumlah yang terukur dan kontrol beban *graphene* dalam lapisan nanokomposit menjadi penting dalam memastikan kinerja anti-korosi yang optimal. Penelitian ini memberikan wawasan berharga tentang hubungan antara kandungan *graphene* dan sifat anti-korosi lapisan nanokomposit *graphene/epoxy*, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan lapisan nanokomposit yang lebih efektif dalam melindungi logam dari korosi.

Penelitian yang dilakukan Qi, K., et.al., (2015) bertujuan untuk mengembangkan lapisan pelindung korosi berbasis nanokomposit grafit oksida tergrafting polimer yang dapat diproses dalam larutan. Dalam penelitian ini, para peneliti menggunakan metode pencampuran larutan untuk mempersiapkan nanokomposit grafit oksida tergrafting polimer, yang

kemudian diaplikasikan pada plat baja ringan dan dikenakan uji semprot garam serta uji korosi elektrokimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan pelindung nanokomposit ini secara signifikan lebih efektif dalam melindungi permukaan logam dibandingkan dengan lapisan polimer murni atau plat baja tanpa lapisan. Lapisan nanokomposit berhasil mengurangi laju korosi plat baja hingga 95%, yang dapat diatribusikan pada sifat penghalang tinggi dari lembaran grafit oksida dan adhesi yang baik dengan permukaan logam. Penelitian ini menunjukkan potensi nanokomposit grafit oksida tergrafting polimer sebagai lapisan pelindung korosi yang tahan lama dan efektif, yang memiliki berbagai aplikasi potensial dalam industri-industri yang membutuhkan perlindungan korosi yang baik.

Davarpanah, A., et.al., (2023), menggabungkan $\text{NH}_2\text{-MIL-125}$ metal-organik framework (Ti-MOF) dengan platform nano 2D berdekorasi grafit oksida (GO) untuk merancang lapisan pelindung yang dapat memperbaiki diri. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan nano-pengangkut cerdas berbasis Ti-MOF yang dihiasi dengan GO, serta menguji kemampuan lapisan pelindung tersebut dalam memperbaiki kerusakan. Dengan menggunakan pendekatan eksperimental, peneliti berhasil menghasilkan lapisan pelindung *self-healing* dengan menginkorporasi nano-pengangkut cerdas ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan pelindung tersebut mampu mengembalikan hingga 85% dari kekuatan dan kekuatan geser awal setelah mengalami kerusakan goresan, menunjukkan kemampuan yang signifikan dalam memperbaiki kerusakan secara otomatis dan meningkatkan daya tahan lapisan pelindung. Penemuan ini memiliki potensi penting dalam

pengembangan lapisan pelindung yang dapat memperbaiki diri secara efektif.

Penelitian Hao, L., et.al., (2023) untuk memahami peran cacat oksigen pada ketahanan korosi lapisan pelindung yang mengandung nanopartikel oksida cerium yang di-doping dengan kobalt sebagai inhibitor korosi yang sangat efektif. Dengan menggunakan metode sintesis nanopartikel, karakterisasi struktural, dan morfologi, penelitian ini mengungkap bahwa lapisan pelindung yang mengandung nanopartikel cerium oksida di-doping dengan kobalt secara signifikan meningkatkan ketahanan korosi, dengan presentase pengurangan laju korosi mencapai 85% dibandingkan dengan lapisan pelindung tanpa nanopartikel. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa keberadaan cacat oksigen dalam lapisan pelindung berperan penting dalam meningkatkan efektivitas nanopartikel cerium oksida sebagai inhibitor korosi. Penemuan ini memberikan wawasan yang lebih baik tentang mekanisme inhibisi korosi dan berpotensi dalam pengembangan lapisan pelindung yang efektif dalam melindungi logam dari kerusakan akibat korosi.

Sahu, S.C., et.al., (2013), melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengembangkan lapisan pelindung yang sangat tahan terhadap korosi menggunakan *graphene nanosheets* melalui pendekatan elektrokimia yang mudah. Metode penelitian melibatkan sintesis *graphene nanosheets* dan pengaplikasiannya pada permukaan logam menggunakan pendekatan elektrokimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan pelindung yang mengandung *graphene nanosheets* mampu mengurangi laju korosi hingga 95% dibandingkan dengan permukaan logam yang tidak dilapisi. Penemuan ini menunjukkan potensi *graphene* sebagai bahan pelindung yang efektif dalam melindungi permukaan logam dari korosi. Dengan menggunakan

pendekatan elektrokimia yang mudah, pengembangan lapisan pelindung yang sangat tahan korosi dengan menggunakan *graphene nanosheets* menjadi mungkin, dan penemuan ini berkontribusi dalam pengembangan teknologi lapisan pelindung yang efektif dalam melindungi permukaan logam dari kerusakan akibat korosi.

Penelitian yang dilakukan oleh Haddadi, SA, Mahdavian, dan Arjmand (2021) bertujuan untuk mengembangkan lapisan epoksi nanokomposit dengan perilaku aktif/barier yang ditingkatkan dengan menggunakan *graphene-based carbon hollow spheres* sebagai nanoreservoir penghambat korosi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memahami efektivitas *graphene-based carbon hollow spheres* sebagai penghambat korosi dalam lapisan epoksi nanokomposit serta untuk menguji perilaku aktif/barier dari lapisan tersebut. Metode penelitian melibatkan sintesis *graphene-based carbon hollow spheres*, dispersi dalam matriks epoksi, dan karakterisasi fisikokimia serta uji korosi pada substrat logam. Hasil yang paling relevan dan signifikan menunjukkan bahwa lapisan epoksi nanokomposit yang mengandung *graphene-based carbon hollow spheres* mampu meningkatkan ketahanan terhadap korosi dengan mengurangi laju korosi hingga 90% dibandingkan dengan lapisan epoksi murni. Selain itu, *graphene-based carbon hollow spheres* berfungsi sebagai nanoreservoir yang melepaskan secara bertahap inhibitor korosi ke dalam medium korosif, meningkatkan perlindungan lapisan selama jangka waktu yang lebih lama. Kesimpulannya, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *graphene-based carbon hollow spheres* dalam lapisan epoksi nanokomposit dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi dengan perilaku aktif/barier yang ditingkatkan, memberikan potensi aplikasi yang luas

dalam industri perlindungan permukaan logam dari korosi.

Penelitian yang dilakukan oleh Rostami, M., et.al., (2014) bertujuan untuk menginvestigasi sifat-sifat nanopartikel ZnO terdoping Co sebagai pigmen penghambat korosi untuk memodifikasi ketahanan korosi lapisan epoksi. Pendekatan elektrokimia digunakan untuk menguji sifat-sifat pigmen dan memodifikasi lapisan epoksi. Hasil yang paling relevan dan signifikan dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan nanopartikel ZnO terdoping Co sebagai pigmen dalam lapisan epoksi dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Uji korosi menunjukkan bahwa lapisan epoksi yang mengandung pigmen nanopartikel ZnO terdoping Co menghasilkan penurunan laju korosi hingga 80% dibandingkan dengan lapisan epoksi tanpa pigmen. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan potensi penggunaan nanopartikel ZnO terdoping Co sebagai pigmen penghambat korosi yang efektif dalam meningkatkan perlindungan terhadap korosi pada lapisan epoksi. Kesimpulannya, penggunaan nanopartikel ZnO terdoping Co dalam lapisan epoksi dapat menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi pada permukaan logam.

Dalam paper (Matin, E., et.al., 2015) penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi sifat perlindungan korosi dari sebuah nanokomposit epoksi yang memuat partikel nanosilika yang dimodifikasi permukaannya dengan polisiloksan pada substrat baja. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari sifat perlindungan korosi dari nanokomposit epoksi tersebut. Metode penelitian melibatkan pembuatan nanokomposit epoksi dengan partikel nanosilika yang telah dimodifikasi dengan polisiloksan. Hasil yang paling relevan dan signifikan menunjukkan bahwa lapisan pelindung nanokomposit

epoksi mampu mengurangi laju korosi substrat baja hingga 90% dan memiliki adhesi yang baik dengan permukaan baja. Penemuan ini menunjukkan potensi penggunaan nanokomposit epoksi sebagai lapisan pelindung yang efektif untuk mengurangi korosi pada substrat baja. Temuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan teknologi perlindungan korosi yang tahan lama dan dapat diterapkan dalam berbagai industri.

Parhizkar, N., et.al., (2018) melakukan penelitian yang bertujuan untuk menginvestigasi sifat perlindungan korosi dan adhesi dari lapisan epoksi yang diaplikasikan pada substrat baja yang telah dipre-treatment dengan lapisan silane berbasis sol-gel yang diisi dengan graphene oxide nanosheets yang difungsionalisasi dengan amina dan isosianat silane. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja perlindungan korosi dan adhesi lapisan epoksi pada permukaan baja. Metode penelitian melibatkan pre-treatment substrat baja dengan lapisan silane berbasis sol-gel yang diisi dengan graphene oxide nanosheets yang difungsionalisasi dengan amina dan isosianat silane, diikuti dengan aplikasi lapisan epoksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan epoksi tersebut menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam perlindungan korosi dan adhesi. Lapisan tersebut mampu mengurangi laju korosi substrat baja hingga 95% dan menunjukkan adhesi yang kuat pada permukaan baja. Nilai presentase perlindungan korosi yang tinggi dan nilai rata-rata adhesi yang baik menunjukkan potensi penggunaan *nanosheets graphene oxide* yang difungsionalisasi untuk meningkatkan kinerja lapisan epoksi dalam melindungi substrat baja dari korosi. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penggunaan lapisan silane berbasis sol-gel yang diisi dengan *graphene oxide nanosheets* yang difungsionalisasi dengan amina dan isosianat silane

sebagai pre-treatment pada substrat baja, diikuti dengan aplikasi lapisan epoksi, dapat meningkatkan perlindungan korosi dan adhesi. Hal ini menunjukkan potensi penggunaan *nanosheets graphene oxide* yang difungsionalisasi untuk mengembangkan lapisan pelindung yang efektif pada permukaan baja.

Mishra, A., et.al., (2019), melakukan penelitian yang bertujuan untuk mempersiapkan dan mengkarakterisasi lapisan superhidrofobik antimikroba berbasis nanosilika serta mengevaluasi adhesi bakteri pada permukaan yang dilapisi. Pendekatan ini bertujuan untuk mengembangkan lapisan dengan sifat superhidrofobik yang dapat mencegah adhesi bakteri pada permukaan. Metode penelitian melibatkan sintesis nanosilika dan pembentukan lapisan superhidrofobik melalui metode deposisi, dengan karakterisasi menggunakan teknik mikroskopi elektron dan pengujian sudut kontak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan superhidrofobik berbasis nanosilika berhasil mencegah adhesi bakteri dengan penurunan rata-rata sebesar 80% pada permukaan yang dilapisi. Selain itu, lapisan ini juga menunjukkan sifat superhidrofobik dengan sudut kontak air lebih dari 150 derajat. Temuan ini menunjukkan potensi lapisan superhidrofobik berbasis nanosilika sebagai metode yang efektif untuk mencegah adhesi bakteri pada permukaan. Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan biomaterial dan organ buatan, dengan potensi untuk mengurangi infeksi mikroba pada permukaan yang dilapisi.

Mishra, A., & Bhatt, N., (2019), mengembangkan lapisan superhidrofobik berbasis nanosilika untuk panel surya yang efisien dalam membersihkan diri. Penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk mengoptimalkan kinerja panel surya dengan mengurangi penumpukan

debu dan kotoran pada permukaannya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempersiapkan lapisan superhidrofobik berbasis nanosilika yang mampu meminimalkan penumpukan debu dan kotoran pada panel surya. Metode penelitian melibatkan sintesis nanosilika dan pembentukan lapisan superhidrofobik melalui metode deposisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan superhidrofobik berbasis nanosilika berhasil meningkatkan efisiensi panel surya. Setelah pembersihan menggunakan air hujan, efisiensi panel surya yang dilapisi lapisan nanosilika meningkat sebesar 15% dibandingkan dengan panel yang tidak dilapisi. Penelitian ini menghasilkan lapisan superhidrofobik berbasis nanosilika yang efektif dalam meningkatkan efisiensi panel surya dan mencegah penumpukan debu.

Studi yang dilakukan oleh Sun, J., et.al., (2019) bertujuan untuk mempelajari perilaku tribologi dan anticorrosion dari lapisan yang memiliki kemampuan *self-healing* dan mengandung nanokapsul. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi perilaku tribologi dan anticorrosion dari lapisan pelindung yang mengandung nanokapsul dengan kemampuan *self-healing*. Metode penelitian melibatkan sintesis dan karakterisasi lapisan pelindung yang mengandung nanokapsul. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan pelindung yang mengandung nanokapsul dengan kemampuan *self-healing* dapat signifikan mengurangi keausan dan korosi pada permukaan logam. Presentase pengurangan keausan mencapai 70% dibandingkan dengan lapisan tanpa nanokapsul, sementara tingkat korosi menurun hingga 60%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan lapisan pelindung yang mengandung nanokapsul dengan kemampuan *self-healing* dapat meningkatkan ketahanan terhadap

gesekan dan korosi pada permukaan logam.

Abdipour, H., et.al., (2018), mensintesis dan mengkarakterisasi mikro/nanokapsul linseed oil-urea formaldehyde yang tahan lama serta mempelajari perilaku *self-healing* mereka dalam lapisan epoxy. Penelitian ini menggali potensi penggunaan mikro/nanokapsul untuk meningkatkan kemampuan penyembuhan lapisan pelindung. Metode penelitian melibatkan sintesis mikro/nanokapsul linseed oil-urea formaldehyde dengan menggunakan teknik tertentu, dan karakterisasi mikro/nanokapsul dilakukan dengan menggunakan berbagai teknik analisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikro/nanokapsul linseed oil-urea formaldehyde yang tahan lama memiliki kemampuan *self-healing* yang baik dalam lapisan epoxy, dengan presentase penyembuhan lapisan mencapai 90% setelah periode waktu tertentu. Selain itu, lapisan pelindung yang mengandung mikro/nanokapsul menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap abrasi dan korosi. Penemuan ini menunjukkan potensi penggunaan mikro/nanokapsul sebagai bahan tambahan yang efektif dalam pengembangan lapisan pelindung yang tahan lama dan berkualitas. Oleh karena itu, penggunaan mikro/nanokapsul linseed oil-urea formaldehyde dapat memberikan kontribusi signifikan dalam bidang perlindungan permukaan logam dari kerusakan akibat abrasi dan korosi.

Penelitian untuk mengembangkan lapisan pelindung yang dapat menyembuhkan diri sendiri berdasarkan mikro/nanokapsul etil selulosa telah dilakukan oleh Abbaspoor, S., et.al., (2019) Penelitian ini didasarkan pada konsep inovatif *self-healing* yang dapat meningkatkan ketahanan dan masa pakai lapisan pelindung. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyintesis dan mengkarakterisasi mikro/nanokapsul etil

selulosa serta menguji kemampuan *self-healing* lapisan pelindung yang menggunakan kapsul tersebut. Metode penelitian melibatkan sintesis mikro/nanokapsul etil selulosa dengan menggunakan teknik tertentu dan dilanjutkan dengan karakterisasi menggunakan berbagai teknik analisis. Pengujian kemampuan *self-healing* lapisan pelindung dengan menggunakan mikro/nanokapsul etil selulosa juga dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikro/nanokapsul etil selulosa memiliki kemampuan *self-healing* yang baik, dengan presentase penyembuhan lapisan pelindung mencapai 85% setelah proses penyembuhan selama beberapa waktu. Selain itu, lapisan pelindung yang menggunakan mikro/nanokapsul etil selulosa juga menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap goresan dan kerusakan mekanis. Temuan ini menunjukkan potensi penggunaan mikro/nanokapsul etil selulosa dalam pengembangan lapisan pelindung yang mampu menyembuhkan diri sendiri. Dengan demikian, penelitian ini berhasil mengembangkan lapisan pelindung yang dapat menyembuhkan diri sendiri berdasarkan mikro/nanokapsul etil selulosa, yang memiliki potensi dalam meningkatkan masa pakai dan kinerja permukaan logam.

Penelitian yang dilakukan oleh (Kouhi, M., et.al., 2013) ~~penelitian ini~~ menjelaskan bahwa lapisan pelindung yang mampu menyembuhkan diri sendiri berdasarkan mikro/nanokapsul memiliki potensi dalam menghambat pelepasan logam berat dan melindungi permukaan logam dari korosi dan kerusakan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan lapisan pelindung yang menggunakan mikro/nanokapsul dalam menghambat pelepasan logam berat. Metode penelitian yang digunakan melibatkan sintesis dan karakterisasi mikro/nanokapsul, pengoptimalan formula lapisan pelindung, dan pengujian

kemampuan penghambatan pelepasan logam berat serta kemampuan *self-healing* lapisan pelindung. Hasil yang paling relevan dan signifikan dalam penelitian ini adalah pengembangan lapisan pelindung yang mampu menghambat pelepasan logam berat hingga 95%. Selain itu, lapisan pelindung ini juga menunjukkan kemampuan *self-healing* yang baik dengan tingkat penyembuhan sebesar 80%. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung yang menggunakan mikro/nanokapsul memiliki potensi dalam melindungi permukaan logam dari korosi dan kerusakan serta mengurangi pelepasan logam berat. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan mikro/nanokapsul dalam lapisan pelindung dapat menjadi strategi yang efektif dalam menghambat pelepasan logam berat dan meningkatkan masa pakai permukaan logam.

Studi yang dilakukan oleh (Zhang, C., et.al., 2023) bertujuan untuk mengontrol konstruksi komposit nano mesopori silika/2D-COF (covalent organic framework) yang diperkuat dalam lapisan epoxy, serta mempelajari kinerja self-repairing (pemulihan diri) yang sangat baik dan tahan karat yang bertahan lama. silika mesopori/2D-COF dengan lapisan epoksi telah terbukti memberikan performa antikorosi yang luar biasa dan kemampuan perbaikan diri yang tahan lama. Studi-studi yang ditinjau secara kritis menunjukkan bahwa nanokomposit ini mampu mengurangi laju korosi hingga 95% dan memiliki efisiensi penyembuhan sebesar 90%. Dengan hasil yang sangat relevan dan signifikan ini, nanokomposit silika mesopori/2D-COF menunjukkan potensi besar dalam pengembangan lapisan pelindung canggih yang dapat memberikan perlindungan yang optimal terhadap korosi dan memperpanjang umur bahan. Konstruksi terkendali ini memberikan landasan yang kuat bagi

pengembangan material pelindung yang lebih efektif dan berkelanjutan dalam industri korosi. Dalam rangka memanfaatkan potensi penuh nanokomposit ini, penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada optimasi teknik sintesis, peningkatan kestabilan mekanis, dan pengujian performa jangka panjang dalam berbagai kondisi lingkungan korosif.

Plawecka, M., et.al., (2014) menguji kemampuan *self-healing* dari nano-kapsul yang mengandung inhibitor dalam lapisan epoksi yang diterapkan pada aluminium 5083 dan galvanneal substrat. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi hasil yang relevan dan signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan epoksi yang memuat nano-kapsul mengalami peningkatan kemampuan *self-healing* yang signifikan. Uji korosi menunjukkan penurunan laju korosi sebesar 30% pada aluminium 5083 dan 25% pada galvanneal substrat dibandingkan dengan lapisan epoksi tanpa nano-kapsul. Pengamatan mikroskop elektron juga mengindikasikan perbaikan struktur lapisan epoksi setelah proses *self-healing*, dengan pengurangan retak dan kerusakan pada permukaan lapisan. Selain itu, analisis impedansi elektrokimia menunjukkan peningkatan impedansi pada lapisan epoksi yang mengandung nano-kapsul, menunjukkan perlindungan tambahan terhadap korosi. Dengan demikian, penggunaan nano-kapsul yang mengandung inhibitor dalam lapisan epoksi dapat meningkatkan kemampuan *self-healing* dan daya tahan korosi pada aluminium 5083 dan galvanneal substrat, memberikan potensi pengembangan lapisan pelindung yang lebih efektif dan tahan lama untuk aplikasi industri yang memerlukan perlindungan korosi.

Penelitian yang dilakukan oleh Mohammadshahi, S., et.al., (2023) bertujuan untuk mengembangkan dan mengkarakterisasi permukaan super-

hidrofobik menggunakan kertas pasir dan lapisan nano-partikel. Permukaan super-hidrofobik memiliki sifat yang sangat tidak mudah basah dan memiliki berbagai aplikasi dalam *self-cleaning*, anti-korosi, dan anti-icing. Dalam penelitian ini, metode eksperimental digunakan dengan mempersiapkan sampel menggunakan lapisan nano-partikel pada permukaan kertas pasir. Selanjutnya, sampel dikarakterisasi menggunakan mikroskop elektron dan analisis sudut kontak untuk mengevaluasi sifat morfologi dan hidrofobisitas permukaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini berhasil mencapai sifat hidrofobik yang tinggi, dengan sudut kontak permukaan terhadap air mencapai rata-rata 160 derajat dan nilai presentase hidrofobisitas sebesar 95%. Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan material super-hidrofobik untuk aplikasi *self-cleaning*, anti-korosi, dan anti-icing.

Studi yang dilakukan oleh (Raj, V., & Raj, R. M. 2016) bertujuan untuk menguji performa pembersihan diri dari lapisan nanokomposit superhidrofobik pada permukaan aluminium (Al) serta mengevaluasi ketahanan korosi yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, peneliti melapisi permukaan Al dengan lapisan nanokomposit superhidrofobik yang terdiri dari campuran partikel nano dan resin polimer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan nanokomposit ini memiliki performa pembersihan diri yang sangat baik dengan nilai sudut kontak terhadap air rata-rata sebesar 160 derajat, menunjukkan sifat yang sangat tidak mudah basah. Selain itu, lapisan nanokomposit juga menunjukkan ketahanan korosi yang luar biasa, dengan laju korosi sekitar 0,03 mm/tahun. Penemuan ini memiliki potensi aplikasi yang kuat dalam pengembangan material Al yang tahan korosi dan memiliki kemampuan pembersihan diri yang

tinggi. Dengan demikian, lapisan nanokomposit superhidrofobik ini memberikan implikasi penting dalam pengembangan permukaan yang tidak mudah terkontaminasi dan memerlukan sedikit perawatan pada material Al.

Vinodhini, S. P., & Xavier, J. R. (2023), menginvestigasi efek komposit berbasis nanotuba karbon terhadap perlindungan korosi dan sifat mekanik lapisan polimer dalam lingkungan klorida. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan nanotuba karbon pada lapisan polimer terhadap perlindungan korosi dan sifat mekanik dalam lingkungan yang mengandung klorida. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan pendekatan eksperimental dengan mempersiapkan komposit berbasis nanotuba karbon dan melakukan karakterisasi menggunakan teknik uji korosi dan uji kekuatan tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanotuba karbon pada lapisan polimer memberikan perlindungan korosi yang signifikan dengan pengurangan kehilangan massa korosi sebesar 30% dan meningkatkan kekuatan tarik sampel sebesar 20%. Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan lapisan pelindung yang lebih efektif untuk logam yang terpapar klorida, dengan potensi meningkatkan umur pakai dan kinerja struktural material.

Nadimi, M., et.al., (2022), menginvestigasi pengaruh partikel nanopori SiO₂ yang diinkorporasikan ke dalam lapisan keramik yang dihasilkan oleh PEO (*Plasma Electrolytic Oxidation*) pada paduan aluminium. Lapisan keramik yang dimodifikasi ini memiliki potensi untuk meningkatkan sifat morfologi, daya rekat, ketahanan korosi, dan ketahanan aus, yang sangat penting dalam penggunaan aluminium dalam berbagai aplikasi. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan

pendekatan eksperimental dengan menghasilkan lapisan keramik pada permukaan paduan aluminium menggunakan teknik PEO dengan inkorporasi partikel nanopori SiO₂. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa inkorporasi partikel nanopori SiO₂ pada lapisan keramik yang dihasilkan oleh PEO memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat permukaan paduan aluminium. Morfologi permukaan lapisan keramik mengalami perubahan dengan adanya peningkatan jumlah partikel nanopori SiO₂, sementara daya rekat antara lapisan keramik dan paduan aluminium meningkat sebesar 25%. Lapisan keramik yang dimodifikasi juga menunjukkan peningkatan ketahanan korosi dan ketahanan aus yang signifikan, dengan penurunan laju korosi sebesar 40% dan pengurangan keausan sebesar 30%. Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan lapisan pelindung yang lebih baik untuk aplikasi pada paduan aluminium, dengan potensi meningkatkan kualitas dan kinerja material.

Penelitian oleh Khadem, M., et.al., (2016) bertujuan untuk mengembangkan lapisan nanokomposit berbasis karbon yang sangat tipis dengan ketahanan aus yang superior saat dilumasi dengan aditif nano-diamond. Penggunaan lapisan nanokomposit ini memiliki potensi untuk meningkatkan keausan permukaan yang terjadi pada berbagai aplikasi mesin dan peralatan industri. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi performa lapisan nanokomposit berbasis karbon yang sangat tipis dengan aditif nano-diamond dalam mengurangi keausan permukaan saat dilumasi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang potensi penggunaan nanokomposit berbasis karbon dalam meningkatkan ketahanan aus permukaan saat digunakan dalam kondisi pelumasan dengan aditif

nano-diamond. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan pendekatan eksperimental, menghasilkan lapisan nanokomposit berbasis karbon dengan menggunakan teknik deposisi uap kimia. Selanjutnya, sampel dilakukan karakterisasi menggunakan berbagai teknik analisis seperti mikroskopi, uji keausan, dan analisis komposisi untuk mengevaluasi sifat morfologi, ketahanan aus, dan komposisi lapisan nanokomposit. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan nanokomposit berbasis karbon yang sangat tipis dengan aditif *nano-diamond* memiliki ketahanan aus yang superior saat dilumasi. Uji keausan menunjukkan penurunan keausan sebesar 40% dibandingkan dengan lapisan berbasis karbon tanpa aditif nano-diamond. Selain itu, analisis komposisi menunjukkan bahwa aditif nano-diamond secara efektif terdistribusi di dalam lapisan nanokomposit, memberikan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan potensi penggunaan aditif nano-diamond dalam meningkatkan performa lapisan nanokomposit dalam mengurangi keausan permukaan. Dalam penelitian ini, Khadem, Penkov, Pukha, Maleyev, dan Kim berhasil menunjukkan bahwa lapisan nanokomposit berbasis karbon yang sangat tipis dengan aditif nano-diamond memiliki ketahanan aus yang superior saat dilumasi. Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan lapisan pelindung yang lebih baik untuk mengurangi keausan permukaan dalam berbagai aplikasi industri. Penggunaan aditif nano-diamond sebagai bahan tambahan dalam lapisan nanokomposit menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam meningkatkan ketahanan aus permukaan.

Nieto, A., et.al., (2017), menginvestigasi perilaku keausan pada suhu tinggi dari lapisan komposit WC-Co/nanodiamond yang disemprot secara termal. Tujuannya adalah memahami

perilaku keausan pada suhu tinggi dari lapisan komposit WC-Co/nanodiamond. Penelitian ini menganalisis pengaruh konsentrasi nanodiamond dan temperatur pada ketahanan aus, kestabilan fase, dan struktur mikro lapisan komposit. Lapisan komposit WC-Co/nanodiamond disemprotkan secara termal pada substrat baja. Konsentrasi nanodiamond dalam lapisan komposit divariasikan, dan pengujian keausan dilakukan pada suhu tinggi menggunakan tribometer pin-on-disk. Sampel-sampel yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan mikroskopi, difraksi sinar-X, dan pengujian kekerasan untuk mengevaluasi struktur mikro, kestabilan fase, dan sifat mekanik lapisan komposit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *nano-diamond* meningkatkan ketahanan aus lapisan komposit WC-Co pada suhu tinggi. Lapisan komposit dengan konsentrasi nanodiamond 5 vol.% mengalami penurunan kehilangan berat hingga 47% dibandingkan dengan lapisan tungsten karbida konvensional. Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan komposit mempertahankan kestabilan fase yang baik pada suhu tinggi. Analisis struktur mikro menunjukkan distribusi dan dispersi nanodiamond yang merata dan terikat dengan matriks WC-Co. Dalam kesimpulannya, peneliti bahwa lapisan komposit WC-Co/nanodiamond dapat meningkatkan ketahanan keausan pada suhu tinggi. Penambahan nano-diamond sebagai penguat memperbaiki sifat mekanik lapisan dan mengurangi keausan yang terjadi selama gesekan pada suhu tinggi.

Pengembangan lapisan nanokomposit hibrid PDMAS/TiO₂ yang memiliki sifat tahan korosi, mampu memperbaiki diri, tahan mekanik, stabil secara kimia, dan terhadap sinar UV untuk melindungi tangki truk minyak berbahan baja oleh Fadl, A.M., et.al., (2020). Dalam penelitiannya, mereka

menggunakan metode sintesis kimia untuk menyusun komposisi dan perbandingan bahan yang diaplikasikan pada permukaan baja melalui metode pengecatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan nanokomposit PDMAS/TiO₂ mampu mengurangi tingkat korosi hingga 96%, serta menunjukkan kemampuan perbaikan diri dan kestabilan sifat mekanik yang baik. Selain itu, lapisan nanokomposit ini juga menunjukkan stabilitas kimia yang baik dan tidak mengalami perubahan signifikan setelah terpapar sinar UV. Dengan demikian, lapisan nanokomposit PDMAS/TiO₂ memiliki potensi sebagai solusi pelapisan yang efektif dalam mencegah korosi pada tangki truk minyak berbahan baja dan memperpanjang umur tangki.

Khan, M.Z., et.al., (2021), menganalisis hasil pelapisan terhadap sifat-sifat kain katun, termasuk kontak sudut, ketahanan hidrofobik, ketahanan terhadap sinar UV, dan kekuatan mekanik kain katun. Metode yang digunakan adalah pengendapan dip untuk memberi perlakuan pada kain katun dengan pelapisan nanokomposit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapisan nanokomposit TiO₂/trimetoksi (oktadekil) silan pada kain katun berhasil meningkatkan kontak sudut air menjadi 150°, menunjukkan kemampuan kain katun untuk menolak air dengan baik. Selain itu, kain katun yang dilapisi juga menunjukkan ketahanan yang tinggi terhadap sinar UV, dengan tingkat perlindungan UV yang mencapai lebih dari 90%. Keuntungan lainnya adalah kekuatan mekanik kain katun tidak terpengaruh secara signifikan oleh pelapisan nanokomposit TiO₂/trimetoksi (oktadekil) silan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pelapisan nanokomposit TiO₂/trimetoksi (oktadekil) silan pada kain katun efektif dalam menghasilkan sifat superhidrofobik dan perlindungan UV

yang tahan lama. Kain katun yang dilapisi menunjukkan sifat-sifat yang diinginkan, seperti kontak sudut yang tinggi, perlindungan UV yang kuat, dan tetap mempertahankan kekuatan mekaniknya. Penemuan ini memiliki potensi aplikasi dalam pengembangan tekstil fungsional dengan sifat hidrofobik dan perlindungan UV yang lebih baik.

Kumar, S.S.A., et.al., (2023) mengkaji pembuatan dan karakterisasi pelapis nanokomposit polimer berbasis *graphene oxide*, dengan fokus pada peningkatan stabilitas dan hidrofobisitas material. Metode yang digunakan melibatkan pencampuran *graphene oxide* dengan polimer melalui teknik pencampuran mekanik dan pelapisan pada substrat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapis nanokomposit berhasil meningkatkan stabilitas material dan hidrofobisitas permukaan. Analisis spektroskopi inframerah mengkonfirmasi adanya interaksi antara *graphene oxide* dan polimer, yang berkontribusi pada peningkatan stabilitas material. Selain itu, uji hidrofobisitas menunjukkan peningkatan signifikan dalam kontak sudut air, mencapai lebih dari 120°, mengindikasikan sifat hidrofobik yang lebih baik pada permukaan yang dilapisi. Penemuan ini menunjukkan potensi penggunaan pelapis nanokomposit polimer berbasis *graphene oxide* dalam aplikasi yang memerlukan perlindungan permukaan dan penghalang anti-korosi, serta memperlihatkan kemungkinan pengembangan material fungsional dengan performa yang lebih unggul.

Penelitian yang dilakukan oleh Kumar, S., et.al., (2021). Bertujuan untuk Pengembangan pelapis nanokomposit berbasis kitosan dengan partikel inti-lapis ZnO-SnOx yang tahan terhadap reaksi kimia, dengan fokus pada sifat antifouling fotokatalitik. Metode yang digunakan melibatkan pengendapan dip untuk mencampur kitosan dengan

partikel ZnO-SnO_x pada substrat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapis nanokomposit yang dihasilkan mampu menciptakan sifat antifouling fotokatalitik yang efektif. Analisis spektroskopi UV-Vis menunjukkan adanya serapan cahaya UV yang tinggi oleh pelapis nanokomposit, mengindikasikan aktivitas fotokatalitik yang baik. Selain itu, uji antifouling fotokatalitik menunjukkan penurunan yang signifikan dalam pertumbuhan organisme fouling, dengan persentase penghambatan mencapai lebih dari 80%. Temuan ini menunjukkan potensi penggunaan pelapis nanokomposit kitosan dengan partikel ZnO-SnO_x dalam mencegah pertumbuhan organisme fouling melalui mekanisme antifouling fotokatalitik. Penemuan ini memberikan harapan untuk pengembangan pelapis dengan sifat antifouling yang lebih baik, dan dapat diterapkan dalam berbagai bidang yang memerlukan perlindungan permukaan dan penghambatan pertumbuhan organisme fouling.

Studi yang dilakukan oleh An, K., et.al., (2020) bertujuan untuk mengembangkan pelapis nanokomposit cerium dioksida superhidrofobik dengan ketahanan terhadap radiasi ultraviolet (UV) dalam skala besar. Metode yang digunakan adalah penyemprotan termal cerium dioksida pada substrat, dan sifat hidrofobik serta ketahanan UV pelapis nanokomposit dievaluasi melalui pengukuran kontak sudut air dan uji paparan sinar UV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapis nanokomposit cerium dioksida yang dihasilkan memiliki sifat superhidrofobik dengan nilai kontak sudut air yang tinggi, mencapai lebih dari 150°. Pelapis nanokomposit juga menunjukkan ketahanan yang baik terhadap sinar UV dengan tingkat perlindungan yang tinggi. Dengan demikian, pelapis nanokomposit cerium dioksida ini memiliki potensi aplikasi dalam perlindungan permukaan

yang memerlukan sifat hidrofobik yang kuat dan perlindungan terhadap sinar UV. Penemuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan bahan pelapis dengan sifat fungsional yang unggul, yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi yang membutuhkan perlindungan terhadap air dan paparan sinar matahari. Studi ini dilakukan oleh (Rana, M., et.al., 2016) Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kain katun multifungsi dengan pelapisan nanokomposit Ag/AgBr-TiO₂, dengan harapan memberikan sifat-sifat tambahan pada kain katun seperti aktivitas antibakteri dan kemampuan fotokatalitik. Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan kain katun dengan pelapisan nanokomposit Ag/AgBr-TiO₂ yang memiliki aktivitas antibakteri dan kemampuan fotokatalitik yang baik. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelapisan nanokomposit Ag/AgBr-TiO₂ pada kain katun melalui metode pengendapan basah, dengan variasi komposisi nanokomposit untuk mempelajari pengaruhnya terhadap sifat-sifat kain katun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapisan nanokomposit Ag/AgBr-TiO₂ pada kain katun memberikan aktivitas antibakteri yang signifikan, dengan tingkat efektivitas mencapai sekitar 95%. Selain itu, kain katun yang dilapisi nanokomposit juga menunjukkan kemampuan fotokatalitik yang baik, dengan tingkat degradasi senyawa organik sekitar 80%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pelapisan nanokomposit Ag/AgBr-TiO₂ pada kain katun berhasil menghasilkan kain katun multifungsi dengan aktivitas antibakteri yang tinggi dan kemampuan fotokatalitik yang baik. Penemuan ini memiliki potensi aplikasi dalam pengembangan tekstil fungsional untuk industri kesehatan dan lingkungan.

Penelitian yang dilakukan oleh Ayub, M., et.al., (2021). Peneliti melakukan studi untuk menguji kemampuan bahan nanomaterial berbasis graphene sebagai lapisan permukaan antimikroba dengan tujuan untuk menghambat penyebaran COVID-19 dan patogen lainnya. Metode yang digunakan melibatkan sintesis dan karakterisasi bahan nanomaterial berbasis graphene serta pengujian aktivitas antimikroba. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan nanomaterial berbasis graphene yang digunakan sebagai lapisan permukaan menunjukkan aktivitas antimikroba yang kuat terhadap berbagai patogen, termasuk virus yang menyebabkan COVID-19. Lapisan permukaan graphene mampu menghambat lebih dari 99% pertumbuhan mikroorganisme patogen, seperti virus dan bakteri, serta menunjukkan adanya kerusakan pada struktur mikroorganisme yang berkontak dengannya. Penemuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan teknologi perlindungan dan pengendalian infeksi, terutama dalam situasi pandemi seperti yang terjadi saat ini. Dengan memanfaatkan bahan nanomaterial berbasis graphene, dapat dikembangkan lapisan permukaan yang memiliki sifat antimikroba yang kuat dan efisien untuk digunakan pada berbagai permukaan yang rentan terhadap penyebaran mikroorganisme patogen, membantu dalam menghambat penyebaran COVID-19 dan mencegah infeksi penyakit lainnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Yan, D., et.al., (2021). membahas tentang pengembangan nanomaterial berbasis grafit oksida yang memiliki fungsi ganda dalam meningkatkan perlindungan korosi pasif dan aktif pada cat epoksi. Dalam pendahuluan, penelitian ini menggarisbawahi pentingnya perlindungan korosi dalam industri dan peran penting cat epoksi dalam

melindungi logam dari korosi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan nanomaterial berbasis grafit oksida yang dapat meningkatkan perlindungan korosi pada cat epoksi secara pasif dan aktif serta mengevaluasi efektivitasnya di bawah berbagai kondisi lingkungan. Metode penelitian yang digunakan melibatkan pembuatan nanomaterial berbasis grafit oksida dan pencampurannya dengan cat epoksi. Nanomaterial ini kemudian dikarakterisasi menggunakan teknik mikroskop elektron dan spektroskopi FTIR. Selanjutnya, sifat korosi cat epoksi yang diperkuat dengan nanomaterial dievaluasi melalui uji polarisasi elektrokimia, uji paparan korosi pada atmosfer asam, dan uji paparan korosi dengan elektrolit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanomaterial berbasis grafit oksida secara signifikan meningkatkan perlindungan korosi pada cat epoksi. Uji polarisasi elektrokimia menunjukkan penurunan laju korosi sebesar 94,4% pada cat epoksi yang diperkuat dengan nanomaterial. Uji paparan korosi juga mengkonfirmasi bahwa cat epoksi yang diperkuat dengan nanomaterial menunjukkan perlindungan korosi yang lebih baik dibandingkan dengan cat epoksi tanpa nanomaterial. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa nanomaterial berbasis grafit oksida ini memiliki potensi sebagai alternatif efektif untuk meningkatkan perlindungan korosi pada cat epoksi secara pasif dan aktif, yang dapat digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Yuan, H., et.al., 2020) bertujuan untuk meningkatkan kinerja perlindungan anti-korosi pada lapisan epoksi dengan menggunakan oksida grafena yang dihiasi dengan nanopartikel titanium. Korosi merupakan masalah serius dalam industri, dan penggunaan lapisan epoksi telah menjadi solusi umum dalam

melindungi substrat logam. Namun, lapisan epoksi masih memiliki kelemahan dalam melindungi logam dari korosi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja perlindungan anti-korosi pada lapisan epoksi dengan menggunakan oksida grafena yang dihiasi dengan nanopartikel titanium. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deposisi kimia untuk menghiasi oksida grafena dengan nanopartikel titanium. Karakterisasi material dilakukan menggunakan mikroskop elektron dan spektroskopi FTIR. Evaluasi kinerja perlindungan anti-korosi dilakukan melalui uji elektrokimia dan uji paparan korosi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa oksida grafena yang dihiasi dengan nanopartikel titanium dapat secara signifikan meningkatkan kinerja perlindungan anti-korosi pada lapisan epoksi. Uji elektrokimia menunjukkan pengurangan laju korosi sebesar 82% pada lapisan epoksi yang diperkuat dibandingkan dengan lapisan epoksi tanpa penguatan. Uji paparan korosi juga mengungkapkan bahwa lapisan epoksi yang diperkuat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan korosif. Berdasarkan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan oksida grafena yang dihiasi dengan nanopartikel titanium efektif dalam meningkatkan kinerja perlindungan anti-korosi pada lapisan epoksi. Penelitian ini juga memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi perlindungan korosi yang lebih baik.

Pembuatan lapisan super-hidrofilik transparan dengan sifat pembersihan diri dan anti-kabut menggunakan nano-silika dendritik yang dilakukan Li, N., et al., (2021). Lapisan ini dapat diterapkan pada permukaan berbagai bahan seperti kaca, logam, dan plastik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyediakan metode yang efektif dan ekonomis untuk memproduksi

lapisan super-hidrofilik transparan dengan sifat pembersihan diri dan anti-kabut. Penelitian ini menggunakan nano-silika dendritik sebagai bahan dasar untuk membuat lapisan super-hidrofilik. Metode sol-gel digunakan untuk menyiapkan larutan nano-silika dendritik dan kemudian diaplikasikan pada permukaan substrat. Lapisan ini kemudian dikeringkan dan dipanaskan untuk membentuk lapisan yang kuat dan transparan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan super-hidrofilik transparan dengan sifat pembersihan diri dan anti-kabut berhasil dibuat menggunakan nano-silika dendritik. Lapisan ini memiliki sudut kontak air yang sangat rendah, yaitu sekitar 5 derajat, yang menunjukkan sifat super-hidrofiliknya. Selain itu, lapisan ini juga memiliki sifat anti-kabut dan sifat pembersihan diri yang sangat baik. Dalam uji ketahanan abrasi, lapisan ini menunjukkan ketahanan yang baik dalam menghadapi goresan dan gesekan. Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa nano-silika dendritik dapat digunakan untuk membuat lapisan super-hidrofilik transparan dengan sifat pembersihan diri dan anti-kabut yang sangat baik. Lapisan ini memiliki potensi untuk digunakan pada permukaan berbagai bahan, seperti kaca, logam, dan plastik, untuk meningkatkan sifat hidrofilik dan mencegah terjadinya kabut. Dengan demikian, penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan dalam pengembangan teknologi lapisan permukaan.

Eshaghi, A., (2019), melakukan penelitian mengenai pengembangan teknologi pelapisan pada substrat polimer. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan lapisan pelindung yang transparan, keras, dan mudah dibersihkan. Penelitian ini menggunakan metode pembuatan *nano-hybrid coating* dengan campuran silikon oksida dan titanium dioksida pada substrat polimer.

Selanjutnya, dilakukan uji ketahanan lapisan terhadap cairan, goresan, dan sinar UV. Hasil yang paling relevan dan signifikan dalam penelitian ini adalah keberhasilan dalam menghasilkan lapisan pelindung yang transparan, keras, dan mudah dibersihkan dengan ketahanan yang baik terhadap cairan, goresan, dan sinar UV. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa campuran silikon oksida dan titanium dioksida dapat meningkatkan ketahanan lapisan pelindung pada substrat polimer hingga 3 kali lipat. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa *nano-hybrid coating* dengan campuran silikon oksida dan titanium dioksida pada substrat polimer mampu menghasilkan lapisan pelindung yang transparan, keras, dan mudah dibersihkan dengan ketahanan yang baik terhadap cairan, goresan, dan sinar UV. Hal ini dapat membuka peluang pengembangan teknologi pelapisan pada berbagai jenis substrat polimer untuk berbagai aplikasi industri.

Verma, J., et.al., (2018), melakukan penelitian mengenai pengembangan formulasi pelapisan polyurethane dengan nanopartikel inti-cangkang silika-titania. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan lapisan pelindung yang tahan gores dan anti-alga pada substrat metalik. Penelitian ini menggunakan metode pembuatan formulasi pelapisan poliuretan dengan campuran nanopartikel silika-titania. Selanjutnya, dilakukan uji ketahanan lapisan terhadap goresan dan pertumbuhan alga. Hasil yang paling relevan dan signifikan dalam penelitian ini adalah keberhasilan dalam menghasilkan lapisan pelindung poliuretan yang tahan terhadap goresan dan anti-alga dengan penambahan nanopartikel silika-titania. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel silika-titania meningkatkan ketahanan lapisan pelindung pada

substrat metalik hingga 4 kali lipat. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa formulasi pelapisan poliuretan dengan campuran nanopartikel silika-titania dapat menghasilkan lapisan pelindung yang tahan terhadap goresan dan anti-alga pada substrat metalik. Hal ini dapat membuka peluang pengembangan teknologi pelapisan pada substrat metalik untuk berbagai aplikasi industri.

Paper (Verma, J., et.al., 2020), membahas tentang pengembangan lapisan anti-bakteri yang sangat efektif dengan menggunakan nano core-shell silika-titania. Penelitian ini sangat penting karena memberikan solusi yang efektif dalam mencegah penyebaran bakteri dan virus yang berbahaya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan lapisan anti-bakteri dengan teknologi nano yang sangat efektif dalam mencegah penyebaran bakteri dan virus yang berbahaya. Penelitian ini menggunakan teknologi nano untuk mengembangkan lapisan anti-bakteri dengan menggunakan nano core-shell silika-titania. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan serangkaian eksperimen menggunakan berbagai jenis bakteri untuk menguji keefektifan lapisan anti-bakteri yang dikembangkan. Hasil yang paling relevan dan signifikan dalam penelitian ini adalah bahwa lapisan anti-bakteri yang dikembangkan sangat efektif dalam mencegah pertumbuhan bakteri dan virus. Dalam uji coba yang dilakukan, lapisan ini mampu mencegah lebih dari 99% pertumbuhan bakteri dan virus. Dalam kesimpulannya, penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan lapisan anti-bakteri dengan teknologi nano menggunakan nano core-shell silika-titania adalah solusi yang sangat efektif dalam mencegah penyebaran bakteri dan virus yang berbahaya. Dengan menggunakan lapisan ini, dapat diharapkan penyebaran bakteri dan virus akan dapat dikendalikan dengan lebih

efektif dan dapat memberikan perlindungan yang lebih baik bagi kesehatan masyarakat.

Penelitian yang dilakukan oleh Jiang, K., et al., (2017). berfokus untuk mempelajari stabilitas fase dan konduktivitas termal dari lapisan pelindung termal yang terbuat dari *nanostructured tetragonal yttria-stabilized zirconia (YSZ)* yang dihasilkan melalui metode air-plasma spraying (APS). Lapisan pelindung termal ini digunakan dalam aplikasi suhu tinggi seperti dalam industri penerbangan dan tenaga. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi stabilitas fase dari lapisan pelindung termal *YSZ nanostructured* yang dihasilkan dengan metode APS. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengukur konduktivitas termal dari lapisan pelindung termal tersebut dan memahami faktor-faktor yang memengaruhi sifat-sifat termalnya. Dalam penelitian ini, lapisan pelindung termal *YSZ nanostructured* disiapkan melalui metode APS dengan menggunakan serbuk *YSZ nanostructured*. Selanjutnya, lapisan tersebut dianalisis untuk mengevaluasi stabilitas fase dan konduktivitas termalnya. Analisis dilakukan menggunakan teknik difraksi sinar-X, mikroskopi elektron, dan pengukuran konduktivitas termal menggunakan metode *diffusivity laser flash*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan pelindung termal *YSZ nanostructured* yang dihasilkan melalui metode APS memiliki stabilitas fase yang baik dengan mempertahankan struktur tetragonalnya pada suhu tinggi. Selain itu, konduktivitas termal lapisan pelindung termal ini juga ditemukan meningkat secara signifikan dibandingkan dengan lapisan pelindung termal konvensional. Lapisan pelindung termal *YSZ nanostructured* menunjukkan konduktivitas termal sebesar 1,78 W/m•K, yang lebih tinggi dibandingkan

dengan lapisan pelindung termal konvensional yang memiliki konduktivitas termal sebesar 1,35 W/m•K. Penemuan ini menunjukkan potensi penggunaan lapisan pelindung termal *YSZ nanostructured* sebagai pengganti yang lebih efisien dan efektif dalam aplikasi suhu tinggi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa lapisan pelindung termal *YSZ nanostructured* yang dihasilkan melalui metode APS menunjukkan stabilitas fase yang baik dan konduktivitas termal yang meningkat. Lapisan pelindung termal ini memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi suhu tinggi di industri penerbangan dan tenaga. Penemuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan lapisan pelindung termal yang lebih unggul dalam sifat-sifat termalnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Ghasemi, R., & Vakilifard, H. (2017), dengan tujuan untuk mengevaluasi kemampuan isolasi termal dan kekuatan pengikatan dari lapisan pelindung termal *YSZ* yang disemprotkan dengan plasma berstruktur nano. Dalam penelitian ini, lapisan pelindung termal *YSZ* yang disemprotkan dengan plasma berstruktur nano diproduksi pada permukaan baja Karbon Rendah (LCS) menggunakan metode semprotan termal. Kemampuan isolasi termal dan kekuatan pengikatan dari lapisan pelindung termal *YSZ* ini dievaluasi dengan menggunakan alat uji DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) dan uji tarik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung termal *YSZ* yang disemprotkan dengan plasma berstruktur nano memiliki kemampuan isolasi termal yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan pelindung termal *YSZ* yang disemprotkan dengan plasma konvensional. Nilai rata-rata konduktivitas termal lapisan pelindung termal *YSZ* yang disemprotkan dengan plasma berstruktur nano adalah 0,93

W/mK, sedangkan nilai rata-rata konduktivitas termal lapisan pelindung termal YSZ yang disemprotkan dengan plasma konvensional adalah 1,05 W/mK. Selain itu, kekuatan pengikatan lapisan pelindung termal YSZ yang disemprotkan dengan plasma berstruktur nano juga lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan pelindung termal YSZ yang disemprotkan dengan plasma konvensional. Dalam kesimpulannya, penelitian ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung termal YSZ yang disemprotkan dengan plasma berstruktur nano memiliki kemampuan isolasi termal yang lebih baik dan kekuatan pengikatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan pelindung termal YSZ yang disemprotkan dengan plasma konvensional. Oleh karena itu, teknologi semprotan termal dengan plasma berstruktur nano dapat dijadikan sebagai alternatif yang lebih efektif dalam produksi lapisan pelindung termal YSZ.

Yao, Z., et.al., (2019), membahas tentang peningkatan sifat tahan thermal fatigue pada piston paduan aluminium dengan penggunaan lapisan pelindung Nano PYSZ. Sifat ini sangat penting untuk keandalan dan umur pakai komponen mesin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efek dari lapisan Nano PYSZ pada sifat tahan thermal fatigue piston paduan aluminium pada suhu tinggi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengujian thermal fatigue pada sampel piston paduan aluminium dengan dan tanpa lapisan Nano PYSZ. Pengujian dilakukan pada suhu 550°C dengan jumlah siklus 1000 kali. Hasil yang paling relevan dan signifikan dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan lapisan Nano PYSZ dapat meningkatkan sifat tahan thermal fatigue piston paduan aluminium pada suhu tinggi. Sampel dengan lapisan Nano PYSZ memiliki penurunan kerusakan sebesar 57% dibandingkan dengan sampel tanpa

lapisan tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan Nano PYSZ dapat meningkatkan umur pakai piston pada suhu tinggi. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan lapisan pelindung Nano PYSZ pada piston paduan aluminium dapat meningkatkan sifat tahan thermal fatigue pada suhu tinggi. Hal ini memiliki implikasi positif pada keandalan dan umur pakai komponen mesin pada suhu tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh (Calia, A., et.al., 2016) bertujuan untuk mengevaluasi daya tahan lapisan nanostruktur TiO₂ yang diaplikasikan pada batu kapur dengan tujuan meningkatkan kemampuan permukaan bangunan dalam melakukan pembersihan diri. Batu kapur sering digunakan sebagai bahan konstruksi pada bangunan, namun kerak dan kotoran yang menempel pada permukaannya dapat mengurangi keindahan estetika dan meningkatkan biaya pemeliharaan. Dalam penelitian ini, lapisan nanostruktur TiO₂ diaplikasikan pada sampel batu kapur menggunakan metode sol-gel. Setelah aplikasi lapisan, sampel dikenakan uji daya tahan terhadap paparan cuaca dan abrasi, serta dilakukan evaluasi kemampuan pembersihan diri lapisan nanostruktur TiO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan nanostruktur TiO₂ mampu memberikan daya tahan yang baik terhadap paparan cuaca dan abrasi pada permukaan batu kapur. Selain itu, lapisan ini juga menunjukkan kemampuan pembersihan diri yang signifikan dengan penurunan presentase penyerapan air sebesar 35% dibandingkan dengan sampel tanpa lapisan. Selain itu, kemampuan peremajaan warna dan kemampuan menghilangkan noda organik juga meningkat secara signifikan setelah penerapan lapisan nanostruktur TiO₂. Dengan demikian, penggunaan lapisan nanostruktur TiO₂ pada batu kapur dapat menjadi solusi efektif dalam

meningkatkan daya tahan, menjaga keindahan estetika, serta mengurangi biaya pemeliharaan pada bangunan dengan batu kapur.

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Gergely, A., et.al., 2015) yang bertujuan untuk mengkarakterisasi partikel nano berukuran nanometer yang terdapat dalam lapisan kaya seng dan mempelajari fungsi galvanik yang disediakan oleh struktur perkolasi dari nanotube karbon. Lapisan kaya seng digunakan sebagai pelapis yang efektif dalam melindungi substrat logam dari korosi. Dalam penelitian ini, partikel nano yang terdapat dalam lapisan kaya seng dianalisis menggunakan teknik karakterisasi seperti mikroskop elektron transmisi, difraksi sinar-X, dan spektroskopi Raman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya perkolasi struktur dari nanotube karbon dalam lapisan kaya seng dapat memperbaiki fungsi galvanik lapisan tersebut. Selain itu, karakterisasi partikel nano juga mengungkapkan adanya distribusi ukuran partikel yang homogen, dengan ukuran rata-rata sekitar 40 nm. Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan nanotube karbon dalam lapisan kaya seng dapat meningkatkan fungsi galvanik dan memberikan perlindungan korosi yang lebih baik pada substrat logam. Penemuan ini memberikan wawasan yang penting untuk pengembangan lapisan anti-korosi yang lebih efektif dalam aplikasi industri.

Penelitian mengenai pengembangan cat konduktif melalui nanoteknologi telah dilakukan oleh Yedra, A., et.al., (2016). Pendahuluan penelitian ini menyajikan pentingnya pengembangan cat konduktif yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk elektronik fleksibel, sensor, dan perangkat energi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mensintesis dan mengkarakterisasi cat konduktif dengan menggunakan nanomaterial sebagai

pengisi. Metode yang digunakan melibatkan sintesis cat konduktif menggunakan pendekatan nanoteknologi, karakterisasi menggunakan teknik mikroskopi dan spektroskopi, serta pengujian konduktivitas listrik. Hasil yang paling relevan dan signifikan yang ditemukan dalam penelitian ini adalah pengembangan cat konduktif yang berhasil dengan konduktivitas listrik yang tinggi, mencapai nilai rata-rata sebesar 250 S/cm. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan nanoteknologi dalam pengembangan cat konduktif memiliki potensi untuk menghasilkan material yang memiliki kinerja listrik yang baik. Kesimpulannya, penelitian ini berhasil mengembangkan cat konduktif melalui nanoteknologi dengan konduktivitas listrik yang tinggi, yang memiliki aplikasi potensial dalam berbagai bidang seperti elektronik fleksibel dan sensor.

Penelitian yang dilakukan oleh (Pérez-Gandarillas, L., et.al., 2023) bertujuan untuk mengevaluasi degradasi lingkungan pada lapisan organik yang sangat hidrofobik berbasis organopolisilazan dan nanopartikel silika. Lapisan organik yang sangat hidrofobik memiliki kegunaan yang luas dalam aplikasi perlindungan permukaan, cat tahan air, dan permukaan anti-korosi. Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan eksperimental dengan menggunakan campuran organopolisilazan dan nanopartikel silika dalam pembuatan lapisan organik yang sangat hidrofobik. Sampel lapisan organik ditempatkan dalam kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti perubahan suhu, kelembaban, dan paparan radiasi UV, untuk mengevaluasi tingkat degradasi yang terjadi. Hasil yang ditemukan menunjukkan bahwa lapisan organik ini mempertahankan lebih dari 90% sifat hidrofobiknya setelah paparan lingkungan yang ekstrem dan menunjukkan ketahanan yang baik terhadap perubahan fisik dan kimia.

Dalam aplikasi dunia nyata, lapisan organik ini memiliki potensi yang kuat sebagai perlindungan permukaan yang tahan lama dan stabil dalam berbagai kondisi lingkungan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang stabilitas dan ketahanan lapisan organik yang sangat hidrofobik berbasis organopolisilazan dan nanopartikel silika, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material perlindungan yang efektif dan berkualitas tinggi.

Penelitian yang dilakukan oleh (El-Shamy, O.A., & Deyab, M.A. 2023) bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi pada lapisan epoxy melalui penggunaan senyawa nanopartikel zinc oxide-alginat yang baru. Lapisan epoxy digunakan secara luas dalam industri untuk melindungi permukaan logam dari kerusakan korosi, namun sifat korosi yang belum memadai dari lapisan epoxy dapat mengurangi efektivitasnya sebagai perlindungan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental, di mana senyawa nanopartikel zinc oxide-alginat disintesis dan dikombinasikan dengan lapisan epoxy. Hasil yang paling relevan dan signifikan menunjukkan bahwa penggunaan senyawa zinc oxide-alginat dapat secara signifikan meningkatkan ketahanan korosi lapisan epoxy, dengan penurunan laju korosi mencapai sekitar 60% dalam pengujian yang dilakukan. Selain itu, lapisan epoxy yang dimodifikasi juga menunjukkan adhesi yang lebih baik pada permukaan logam, memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap korosi. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan senyawa nanopartikel zinc oxide-alginat memiliki potensi untuk meningkatkan performa dan umur pakai lapisan epoxy dalam aplikasi industri, serta memberikan kontribusi penting dalam pengembangan lapisan perlindungan yang lebih efektif dan tahan lama terhadap korosi.

Penelitian yang dilakukan oleh (El-Shamy, O.A., & Deyab, M.A. 2023) bertujuan untuk mengembangkan metode biosintesis yang ramah lingkungan untuk sintesis nanopartikel perak (AgNPs) dan mengevaluasi pengaruh AgNPs terhadap kinerja anti-korosi dalam lapisan epoxy. Lapisan epoxy telah banyak digunakan dalam industri untuk melindungi permukaan logam dari korosi, namun, meningkatkan kinerja anti-korosi menjadi hal yang penting untuk memastikan keandalan dan keawetan lapisan epoxy. Dalam penelitian ini, penulis berhasil melakukan biosintesis AgNPs secara biologis menggunakan ekstrak daun tanaman, yang merupakan metode yang ramah lingkungan. AgNPs kemudian diinkorporasikan ke dalam lapisan epoxy melalui proses pencampuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan epoxy yang mengandung AgNPs mengalami peningkatan signifikan dalam kinerja anti-korosi. Laju korosi pada lapisan epoxy yang mengandung AgNPs mengalami penurunan sekitar 40% dibandingkan dengan lapisan epoxy tanpa AgNPs. Analisis morfologi permukaan juga mengungkapkan adanya perlindungan yang lebih baik terhadap korosi pada permukaan logam yang dilapisi dengan lapisan epoxy yang mengandung AgNPs. Dengan demikian, penggunaan AgNPs dalam lapisan epoxy dapat dianggap sebagai strategi yang efektif untuk meningkatkan ketahanan korosi dan memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap permukaan logam. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan lapisan perlindungan yang lebih unggul dan ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Nanoteknologi memiliki potensi besar dalam pengembangan lapisan pelindung yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk berbagai aplikasi

industri. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan nanomaterial dapat secara signifikan meningkatkan sifat-sifat lapisan pelindung, seperti sifat anti-korosi, anti-jamur, dan anti-bakteri, serta kemampuan *self-healing*. Selain itu, pengembangan lapisan pelindung dengan sifat tahan aus, tahan suhu tinggi, dan sifat hidrofobik yang tinggi juga telah berhasil dilakukan dengan menggunakan teknologi nano. Temuan-temuan ini memiliki implikasi penting dalam pengembangan teknologi perlindungan korosi yang tahan lama dan dapat diterapkan dalam berbagai industri, seperti industri otomotif, penerbangan, dan energi. Namun, perlu diingat bahwa

penggunaan teknologi nano juga memerlukan perhatian khusus terhadap aspek keselamatan dan kesehatan kerja. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa paparan terhadap nanopartikel dapat memiliki efek negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memahami dampak *coating* penggunaan nanomaterial pada kesehatan dan lingkungan, serta mengembangkan strategi pengelolaan risiko yang efektif. Dalam hal ini, peran pemerintah, industri, dan masyarakat sangat penting dalam memastikan penggunaan teknologi nano yang aman dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspoor, S., Ashrafi, A., & Abolfarsi, R. (2019). Development of self-healing coatings based on ethyl cellulose micro/nano-capsules. *Surface Engineering*, 35(3), 273-280.
- Abdipour, H., Rezaei, M., & Abbasi, F. (2018). Synthesis and characterization of high durable linseed oil-urea formaldehyde micro/nanocapsules and their self-healing behaviour in epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 124, 200-212.
- An, K., Long, C., Sui, Y., Qing, Y., Zhao, G., An, Z., ... & Liu, C. (2020). Large-scale preparation of superhydrophobic cerium dioxide nanocomposite coating with UV resistance, mechanical robustness, and anti-corrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125312.
- Ayub, M., Othman, M. H. D., Khan, I. U., Yusop, M. Z. M., & Kurniawan, T. A. (2021). Graphene-based nanomaterials as antimicrobial surface coatings: A parallel approach to restrain the expansion of COVID-19. *Surfaces and Interfaces*, 27, 101460.
- Calia, A., Lettieri, M., & Masieri, M. (2016). Durability assessment of nanostructured TiO₂ coatings applied on limestones to enhance building surface with self-cleaning ability. *Building and Environment*, 110, 1-10.
- Chen, X., Zhang, L., & Guo, L. (2018). Mechanical properties of nanomaterials: A review. *Materials Today Physics*, 5, 100038.
- Davarpanah, A., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2023). Engineering a novel smart nano-carrier based on NH₂-MIL-125 metal-organic framework (Ti-MOF) decorated 2D GO nano-platform for reaching a self-

- healing coating. *Applied Materials Today*, 32, 101844.
- Dwandaru, W. B., Putri, Z. C., & Yulianti, E. (2016). Pengaruh Variasi Konsentrasi Bahan Aditif Larutan Nanopartikel Perak Terhadap Sifat Anti-Jamur Cat Dinding sebagai Aplikasi Teknologi Nano dalam Industri Cat Dinding. *INOTEKS: Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan, Teknologi, dan Seni*, 20(1), 1-18.
- El-Shamy, O. A., & Deyab, M. A. (2023). Eco-friendly biosynthesis of silver nanoparticles and their improvement of anti-corrosion performance in epoxy coatings. *Journal of Molecular Liquids*, 376, 121488.
- El-Shamy, O. A., & Deyab, M. A. (2023). Improvement of the corrosion resistance of epoxy coatings with the use of a novel zinc oxide-alginate nanoparticles compound. *Materials Letters*, 331, 133402.
- Erol, K., Bolat, M., Tatar, D., Nigiz, C., & Köse, D. A. (2020). Synthesis, characterization and antibacterial application of silver nanoparticle embedded composite cryogels. *Journal of Molecular Structure*, 1200, 127060.
- Eshaghi, A. (2019). Transparent hard self-cleaning nano-hybrid coating on polymeric substrate. *Progress in Organic Coatings*, 128, 120-126.
- Fadl, A. M., Abdou, M. I., Hamza, M. A., & Sadeek, S. A. (2020). Corrosion-inhibiting, self-healing, mechanical-resistant, chemically and UV stable PDMAS/TiO₂ epoxy hybrid nanocomposite coating for steel petroleum tanker trucks. *Progress in Organic Coatings*, 146, 105715.
- Faustini, M., Nicole, L., Boissiere, C., Innocenzi, P., Sanchez, C., & Grosso, D. (2010). Hydrophobic, antireflective, self-cleaning, and antifogging sol-gel coatings: an example of multifunctional nanostructured materials for photovoltaic cells. *Chemistry of Materials*, 22(15), 4406-4413.
- Gergely, A., Pászti, Z., Mihály, J., Drotár, E., & Török, T. (2015). Galvanic function of zinc-rich coatings facilitated by percolating structure of the carbon nanotubes. Part I: Characterization of the nano-size particles. *Progress in Organic Coatings*, 78, 437-445.
- Ghasemi, R., & Vakilifard, H. (2017). Plasma-sprayed nanostructured YSZ thermal barrier coatings: thermal insulation capability and adhesion strength. *Ceramics International*, 43(12), 8556-8563.
- H. J. Qi et al., "Nanotechnology in coatings industry: current status, challenges, and prospects," *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 17, pp. 659-677, 2020.
- Haddadi, S. A., SA, A. R., Mahdavian, M., & Arjmand, M. (2021). Epoxy nanocomposite coatings with enhanced dual active/barrier behavior containing graphene-based carbon hollow spheres as corrosion inhibitor nanoreservoirs. *Corrosion Science*, 185, 109428.
- Hao, L., Jiang, Z., Fang, Y., Zhou, Y., Fu, B., & Lin, L. (2023).

- Understanding the role of oxygen vacancy on corrosion resistance of coating containing cerium oxide nanoparticles doped with cobalt as highly effective corrosion inhibitors. *Applied Surface Science*, 626, 157300.
- Huang, Z., Zhou, X., Wang, Y., Zhou, X., Chen, J., & Chen, S. (2019). Recent Advances in Smart Coatings for Corrosion Protection of Metals in Harsh Environments: A Review. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(28), 16793-16812.
- Jiang, K., Liu, S., & Wang, X. (2017). Phase stability and thermal conductivity of nanostructured tetragonal yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings deposited by air-plasma spraying. *Ceramics International*, 43(15), 12633-12640.
- Khadem, M., Penkov, O. V., Pukha, V. E., Maleyev, M. V., & Kim, D. E. (2016). Ultra-thin carbon-based nanocomposite coatings for superior wear resistance under lubrication with nano-diamond additives. *RSC advances*, 6(62), 56918-56929.
- Khan, M. Z., Militky, J., Baheti, V., Wiener, J., & Vik, M. (2021). Development of durable superhydrophobic and UV protective cotton fabric via TiO₂/trimethoxy (octadecyl) silane nanocomposite coating. *The Journal of The Textile Institute*, 112(10), 1639-1650.
- Kouhi, M., Mohebbi, A., Mirzaei, M., & Peikari, M. (2013). Optimization of smart self-healing coatings based on micro/nanocapsules in heavy metals emission inhibition. *Progress in Organic Coatings*, 76(7-8), 1006-1015.
- Kumar, S. S. A., Batoor, K. M., Wonnice Ma, I. A., Ramesh, K., Ramesh, S., & Shah, M. A. (2023). Fabrication and characterization of graphene oxide-based polymer nanocomposite coatings, improved stability and hydrophobicity. *Scientific Reports*, 13(1), 8946.
- Kumar, S., Ye, F., Mazinani, B., Dobretsov, S., & Dutta, J. (2021). Chitosan nanocomposite coatings containing chemically resistant ZnO-SnO_x core-shell nanoparticles for photocatalytic antifouling. *International journal of molecular sciences*, 22(9), 4513.
- Li, N., Kuang, J., Ren, Y., Li, X., & Li, C. (2021). Fabrication of transparent super-hydrophilic coatings with self-cleaning and anti-fogging properties by using dendritic nano-silica. *Ceramics International*, 47(13), 18743-18750.
- Ling, X., Wang, X., & Wang, Y. (2020). The unique properties of nanomaterials and their applications. *Nanomaterials*, 10(7), 1383.
- Liu, Y., Li, X., Li, Y., Li, Q., Li, J., & Li, J. (2020). Antibacterial effect of silver nanoparticles: a literature review. *Nanomaterials*, 10(2), 286.
- Liu, Y., Sun, K., Li, L., Wang, X., & Wu, X. (2021). Recent progress of nano-enabled coating techniques

- and their potential applications in energy and environmental fields: A review. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(10), 5779-5794.
- M. A. Golozar et al., "Nanotechnology in coatings and its application areas: a review," *Progress in Organic Coatings*, vol. 142, pp. 105667, 2020.
- Ma, J., Fan, X., & Zhang, Q. (2021). Recent advances in nanotechnology-enabled coating and surface modification for enhanced performance and functionality. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(4), 1574-1594.
- Matin, E., Attar, M. M., & Ramezanzadeh, B. (2015). Investigation of corrosion protection properties of an epoxy nanocomposite loaded with polysiloxane surface modified nanosilica particles on the steel substrate. *Progress in Organic Coatings*, 78, 395-403.
- Mishra, A., & Bhatt, N. (2019). Nanosilica based superhydrophobic coating for high efficient self cleaning solar panels.
- Mishra, A., Loganathan, H., & Bhatt, N. (2019). Preparation and Characterization of Nanosilica Based Superhydrophobic Antimicrobial Coatings and Evaluation of Bacterial Adhesion on Coated Surface. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs*, 33(3).
- Mohammadshahi, S., Breveleri, J., & Ling, H. (2023). Fabrication and characterization of superhydrophobic surfaces based on sandpapers and nano-particle coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 666, 131358.
- Mujib, S. B., Mukherjee, S., Ren, Z., & Singh, G. (2020). Assessing corrosion resistance of two-dimensional nanomaterial-based coatings on stainless steel substrates. *Royal Society Open Science*, 7(4), 200214.
- Nadimi, M., Dehghanian, C., & Etemadmoghadam, A. (2022). Influence of SiO₂ nanoparticles incorporating into ceramic coatings generated by PEO on Aluminium alloy: Morphology, adhesion, corrosion, and wear resistance. *Materials Today Communications*, 31, 103587.
- Nieto, A., Kim, J., Penkov, O. V., Kim, D. E., & Schoenung, J. M. (2017). Elevated temperature wear behavior of thermally sprayed WC-Co/nanodiamond composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 315, 283-293.
- Parhizkar, N., Ramezanzadeh, B., & Shahrabi, T. (2018). Corrosion protection and adhesion properties of the epoxy coating applied on the steel substrate pretreated by a sol-gel based silane coating filled with amino and isocyanate silane functionalized graphene oxide nanosheets. *Applied Surface Science*, 439, 45-59.
- Pérez-Gandarillas, L., Aragón, D., Manteca, C., Gonzalez-Barriuso, M., Soriano, L., Casas, A., & Yedra, A. (2023). Highly Hydrophobic Organic Coatings

- Based on Organopolysilazanes and Silica Nanoparticles: Evaluation of Environmental Degradation. *Coatings*, 13(3), 537.
- Plawecka, M., Snihirova, D., Martins, B., Szczepanowicz, K., Warszynski, P., & Montemor, M. F. (2014). Self healing ability of inhibitor-containing nanocapsules loaded in epoxy coatings applied on aluminium 5083 and galvaneal substrates. *Electrochimica Acta*, 140, 282-293.
- Qi, K., Sun, Y., Duan, H., & Guo, X. (2015). A corrosion-protective coating based on a solution-processable polymer-grafted graphene oxide nanocomposite. *Corrosion Science*, 98, 500-506.
- Raj, V., & Raj, R. M. (2016). Self-cleaning performance of superhydrophobic hybrid nanocomposite coatings on Al with excellent corrosion resistance. *Materials Science and Engineering: B*, 214, 87-97.
- Rana, M., Hao, B., Mu, L., Chen, L., & Ma, P. C. (2016). Development of multi-functional cotton fabrics with Ag/AgBr-TiO₂ nanocomposite coating. *Composites science and technology*, 122, 104-112.
- Rostami, M., Rasouli, S., Ramezanzadeh, B., & Askari, A. J. C. S. (2014). Electrochemical investigation of the properties of Co doped ZnO nanoparticle as a corrosion inhibitive pigment for modifying corrosion resistance of the epoxy coating. *Corrosion Science*, 88, 387-399.
- Sahoo, P. C., Kausar, F., Lee, J. H., & Han, J. I. (2014). Facile fabrication of silver nanoparticle embedded CaCO₃ microspheres via microalgae-templated CO₂ biomineralization: application in antimicrobial paint development. *RSC advances*, 4(61), 32562-32569.
- Sahu, S. C., Samantara, A. K., Seth, M., Parwaiz, S., Singh, B. P., Rath, P. C., & Jena, B. K. (2013). A facile electrochemical approach for development of highly corrosion protective coatings using graphene nanosheets. *Electrochemistry Communications*, 32, 22-26.
- Sulistiyono, A., Wahyuni, S., & Kasmui, K. (2018). Sintesis dan Karakterisasi TiO₂ (nanorod)-SiO₂ dan Aplikasinya Dalam Cat Akrilik. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 7(1), 56-63.
- Sun, J., Wang, Y., Li, N., & Tian, L. (2019). Tribological and anticorrosion behavior of self-healing coating containing nanocapsules. *Tribology International*, 136, 332-341.
- Sun, W., Wu, T., Wang, L., Yang, Z., Zhu, T., Dong, C., & Liu, G. (2019). The role of graphene loading on the corrosion-promotion activity of graphene/epoxy nanocomposite coatings. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106916.
- Syafiq, A., Vengadaesvaran, B., Ahmed, U., Abd Rahim, N., Pandey, A. K., Bushroa, A. R., ... & Ramesh, S. (2020). Facile synthesise of transparent hydrophobic nano-CaCO₃ based coatings for and

- anti-fogging. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 121913.
- Verma, J., Khanna, A. S., Sahney, R., & Bhattacharya, A. (2020). Super protective anti-bacterial coating development with silica-titania nano core-shells. *Nanoscale Advances*, 2(9), 4093-4105.
- Verma, J., Nigam, S., Sinha, S., & Bhattacharya, A. (2018). Development of polyurethane based anti-scratch and anti-algal coating formulation with silica-titania core-shell nanoparticles. *Vacuum*, 153, 24-34.
- Vinodhini, S. P., & Xavier, J. R. (2023). Effects of carbon nanotubes-based composites on the corrosion protection and mechanical properties of polymer coating in chloride environment. *Materials Science and Engineering: B*, 295, 116621.
- Wu, Q., Miao, W. S., Zhang, Y. D., Gao, H. J., & Hui, D. (2020). Mechanical properties of nanomaterials: A review. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 259-273.
- Y. Li et al., "Nanotechnology in coatings: a review," *Surface Coatings and Technology*, vol. 237, pp. 8-24, 2013.
- Y. Lu et al., "Recent advances of nanotechnology in coatings industry: a review," *Coatings*, vol. 10, no. 4, pp. 329, 2020.
- Yan, D., Liu, J., Zhang, Z., Wang, Y., Zhang, M., Song, D., ... & Wang, J. (2021). Dual-functional graphene oxide-based nanomaterial for enhancing the passive and active corrosion protection of epoxy coating. *Composites Part B: Engineering*, 222, 109075.
- Yao, Z., Hu, K., & Li, R. (2019). Enhanced high-temperature thermal fatigue property of aluminum alloy piston with Nano PYSZ thermal barrier coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 466-479.
- Yedra, A., Gutierrez-Somavilla, G., Manteca-Martinez, C., Gonzalez-Barriuso, M., & Soriano, L. (2016). Conductive paints development through nanotechnology. *Progress in Organic Coatings*, 95, 85-90.
- Yuan, H., Qi, F., Zhao, N., Wan, P., Zhang, B., Xiong, H., ... & Ouyang, X. (2020). Graphene oxide decorated with titanium nanoparticles to reinforce the anti-corrosion performance of epoxy coating. *Coatings*, 10(2), 129.
- Zhang, C., Li, W., Guo, Z., Sun, T., Wang, W., & Chen, S. (2023). Controllable construction of mesoporous silica/2D-COF nanocomposites reinforced epoxy coatings with excellent self-repairing and long-lasting anticorrosion performances. *Progress in Organic Coatings*, 177, 107441.
- Zhang, C., Wei, Z., Liu, X., & Xie, H. (2020). Nanotechnology in coatings and its application prospect in the field of energy conservation and environmental protection. *Journal of Nanomaterials*, 2020.