

Teknologi Biofouling dan Perlindungannya pada Pengecatan Kapal untuk Memperlambat Laju Korosi

Gilang Aji Ismail^{1*}, Hadi Prasutiyon²

^{1,2}Program Studi Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah

Korespondensi: gilangajiismail@gmail.com

Diterima: 4 September 2025; Direvisi: 26 Desember 2025; Disetujui: 30 November 2025

Abstrak

Biofouling merupakan fenomena pertumbuhan organisme laut seperti alga, bakteri, dan teritip pada permukaan lambung kapal yang menyebabkan peningkatan hambatan hidrodinamik, konsumsi bahan bakar, biaya operasional, hingga percepatan korosi struktur. Dalam industri perkapalan modern, kebutuhan akan solusi antifouling yang efektif dan ramah lingkungan menjadi semakin mendesak, terutama setelah pelarangan senyawa *tributyltin* (TBT) oleh *International Maritime Organization* (IMO). Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan menganalisis literatur ilmiah yang diterbitkan dalam rentang tahun 2009 hingga 2025. Penelusuran data dilakukan melalui basis data bereputasi meliputi MDPI, ACS Publications, SpringerLink, dan Google Scholar, kemudian dievaluasi menggunakan analisis isi kualitatif untuk memetakan evolusi teknologi dari cat konvensional berbasis silikon, *self-polishing coatings* (SPC) berbahan *biodegradable*, hingga pendekatan nanoteknologi dan prinsip biomimetik. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa nanomaterial seperti *zinc oxide* (ZnO), perak (Ag), serta struktur pelapis biomimetik menawarkan efektivitas tinggi dalam mencegah kolonisasi organisme laut dengan dampak lingkungan yang sangat rendah. Selain itu, tren pengembangan coating multifungsi yang menggabungkan sifat antifouling dan *anticorrosion* dinilai menjanjikan untuk efisiensi jangka panjang. Tantangan utama meliputi biaya produksi, ketahanan di lingkungan ekstrem, serta kebutuhan uji lapangan jangka panjang. Studi ini merekomendasikan arah riset lanjutan pada optimalisasi formulasi bahan nano-biokompatibel serta integrasi dengan sistem monitoring digital untuk mencegah fouling secara prediktif.

Kata kunci: Biofouling, antifouling coating, nanoteknologi, biomimetik, SPC, korosi kapal

Abstract

Biofouling is the phenomenon of marine organism growth, such as algae, bacteria, and barnacles, on a ship's hull surface, causing increased hydrodynamic drag, fuel consumption, operational costs, and accelerated structural corrosion. In the modern shipping industry, the need for effective and environmentally friendly antifouling solutions has become increasingly urgent, especially following the ban on tributyltin (TBT) compounds by the International Maritime Organization (IMO). This study employs a Systematic Literature Review (SLR) method by analyzing scientific literature published between 2009 and 2025. Data retrieval was conducted through reputable databases, including MDPI, ACS Publications, SpringerLink, and Google Scholar, followed by a qualitative content analysis to map the technological evolution from conventional silicone-based paints and biodegradable self-polishing coatings (SPC) to modern approaches based on nanotechnology and biomimetic principles. The review results indicate that nanomaterials such as zinc oxide (ZnO), silver (Ag), and biomimetic coating structures offer high effectiveness in preventing marine organism colonization with very low environmental impact. Furthermore, the trend of developing multifunctional coatings combining antifouling and anticorrosion properties is promising for long-term efficiency. Major challenges include production costs, durability in extreme environments, and the need for long-term field tests. This study recommends further research on optimizing

nano-biocompatible material formulations and integrating them with digital monitoring systems for predictive fouling prevention.

Key words: Biofouling, antifouling coatings, nanotechnology, biomimetics, SPC, ship's corrosion

PENDAHULUAN

Fenomena yang dikenal sebagai biofouling adalah ketika organisme hidup seperti bakteri, alga, dan organisme laut lainnya menempel pada permukaan material yang terendam air. Ini dapat menyebabkan kerusakan dan penurunan kinerja pada berbagai struktur dan peralatan, terutama di lingkungan industri dan kelautan. Secara ekonomi, biofouling dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar kapal hingga 40% dan memicu biaya tambahan operasional tahunan jutaan dolar, khususnya untuk kapal niaga dan militer (Schultz, dkk., 2011). Untuk menjaga efisiensi dan umur pakai peralatan tersebut, pengendalian biofouling sangat penting. Untuk mencegah organisme tersebut berkembang biak pada permukaan kapal atau struktur bawah air, cat anti-fouling adalah metode perlindungan yang umum digunakan (Esnahati, dkk., 2016).

Industri perkapalan kontemporer menghadapi masalah biofouling, yang menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar, biaya operasional, dan korosi struktural yang lebih cepat karena kolonisasi mikroorganisme laut di permukaan lambung kapal (Liu, dkk., 2022). Organisme seperti teritip, alga, dan bakteri mengurangi efisiensi hidrodinamika selain merusak struktur material, mengganggu sistem kelistrikan, dan mengganggu sirkulasi pendingin kapal (Gizer, dkk., 2023).

Pengembangan material pelapis antifouling yang ramah lingkungan menjadi perhatian utama sejak International Maritime Organization (IMO) melarang senyawa *tributyltin* (TBT). Larangan ini secara resmi diberlakukan melalui *International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships* yang diadopsi oleh IMO pada tahun 2001 dan berlaku efektif pada tahun 2008 (International Maritime Organization., 2001). Cat berbasis silikon dan fluoropolimer dengan prinsip foul-release masih menjadi metode konvensional yang digunakan, tetapi hanya berfungsi dalam kondisi laut tertentu (Buskens, dkk., 2013). Meskipun permukaan tersebut dapat mengurangi daya lekat fouling, mereka tidak mencegah kolonisasi awal secara keseluruhan.

Nanoteknologi, alternatif yang menjanjikan untuk ilmu material, muncul sebagai langkah maju dan menjadi harapan besar dalam menyelesaikan berbagai permasalahan teknologi yang kompleks saat ini (Purwaningsih & Rahmanto., 2012). Penggunaan

nanopartikel seperti perak, tembaga, dan oksida zinc telah terbukti memiliki sifat antibakteri dan anti-biofilm yang kuat tanpa membahayakan ekosistem laut. Beberapa penelitian bahkan menunjukkan bahwa pelapis nano berbasis prinsip biomimetik dapat meniru bentuk kulit hiu atau daun teratai yang tidak disukai oleh mikroorganisme laut (Wu, dkk., 2021).

Menurut studi oleh (Abioye, dkk., 2019), kerugian akibat biofouling pada kapal perang dan kapal niaga dapat mencapai 30% peningkatan konsumsi bahan bakar dan memerlukan biaya tambahan hingga jutaan dolar per tahun. Selain itu, (Li, dkk., 2023) juga menegaskan bahwa tantangan ini tidak hanya berdampak ekonomi, tetapi juga menimbulkan konsekuensi lingkungan melalui emisi karbon dan akumulasi bahan berbahaya dalam rantai makanan laut.

Namun, kemanjuran antifouling bergantung pada kedua komposisi kimia dan ketahanan terhadap korosi. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah menghasilkan lapisan yang dapat memenuhi dua tujuan perlindungan: anticorrosion dan antifouling (Liang, Shi & Li., 2024). Teknologi self-healing atau pelepasan terkendali bahan aktif adalah metode yang sering digunakan untuk lapisan ini.

Sementara itu, *coating self-polishing* (SPC) generasi baru sedang dikembangkan untuk menggantikan logam berat dengan bahan biodegradable yang lebih aman dan dapat dikontrol tingkat pelapukannya. Selain itu, strategi ini sejalan dengan tujuan IMO untuk memastikan bahwa operasional kapal dapat dilakukan secara berkelanjutan.

Di samping itu, lebih banyak penelitian tentang tribokorosi dan bagaimana biofilm berinteraksi dengan permukaan logam telah meningkatkan pemahaman kita tentang kinerja pelapis antifouling yang bertahan lama (Abioye, dkk., 2019). Inovasi berkelanjutan di bidang teknik perkapalan, bioteknologi, dan ilmu bahan maju didorong oleh kebutuhan akan sistem antifouling yang efektif, berkelanjutan, dan sesuai dengan peraturan lingkungan.

Selain itu juga, penggunaan nanoteknologi untuk melindungi biofouling sejalan dengan pertumbuhan revolusi industri 4.0, yang menekankan penggabungan teknologi fisik, digital, dan biologis, termasuk teknologi nano yang semakin berkembang. Perkembangan ini konsisten dengan prinsip Revolusi Industri 4.0 yang mengintegrasikan sistem fisik, digital, dan biologis, termasuk penerapan nano-bio interface dalam perlindungan kelautan (Qian, dkk., 2009). Untuk memastikan bahwa inovasi dapat dipertahankan dan dikembangkan secara berkelanjutan, paten diperlukan untuk melindunginya.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan pustaka sistematis (*systematic literature review*) dengan tujuan untuk merangkum, mengevaluasi, dan mensintesis perkembangan teknologi perlindungan antifouling terhadap biofouling dalam sistem perkapalan dan struktur laut. Pendekatan ini dipilih karena mampu menyajikan pemetaan ilmiah secara menyeluruh terkait evolusi dari cat antifouling konvensional hingga teknologi berbasis nanomaterial yang ramah lingkungan.

Pendekatan Penelusuran Literatur

Penelusuran literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci seperti “*biofouling*”, “*antifouling coatings*”, “*marine nanocoating*”, “*ship hull protection*”, dan “*self-polishing coatings*”. Literatur dicari melalui basis data ilmiah terkemuka seperti MDPI, ACS Publications, SpringerLink, Wiley, Frontiers, serta Google Scholar. Rentang waktu publikasi yang digunakan adalah antara 2009 hingga 2025 untuk menjamin keterkinian dan relevansi informasi.

Strategi ini serupa dengan pendekatan yang dilakukan oleh (Weber & Esmaeili., 2023) dalam studi tentang regulasi *antifouling coatings*, di mana literatur diklasifikasikan berdasarkan jenis cat, teknologi, serta pendekatan keberlanjutan. Selain itu, (Somya, dkk., 2024) menggunakan integrasi basis data paten dan artikel ilmiah terbaru untuk melacak tren antifouling berbasis *smart-coating* nano-biokompatibel.

Proses Seleksi dan Analisis Literatur

Proses seleksi artikel dilakukan secara bertahap. Artikel yang dimasukkan dalam analisis harus memenuhi beberapa kriteria inklusi, yakni:

- a. Merupakan publikasi ilmiah yang telah melewati proses peer-review;
- b. Membahas teknologi antifouling yang diterapkan pada kapal atau struktur laut; serta
- c. menyediakan data teknis seperti metode aplikasi, jenis material, atau performa *coating*. Sementara itu, artikel yang hanya bersifat deskriptif umum, membahas antifouling dalam konteks non-maritim (misalnya alat medis), atau tidak mengandung data ilmiah terverifikasi dikeluarkan dari proses analisis.

Dari hasil pencarian pada artikel-artikel kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa tema utama, yaitu: antifouling konvensional, nanoteknologi dalam antifouling, sistem pelapisan multifungsi (*antifouling* dan *anticorrosion*), *self-polishing coatings* (SPC) berbahan *biodegradable*, serta isu lingkungan dan regulasi.

Teknik Analisis Data

Analisis terhadap artikel yang terpilih dilakukan menggunakan pendekatan analisis isi kualitatif (*qualitative content analysis*). Proses ini mencakup identifikasi pola tematik, perbandingan efektivitas pendekatan, dan penarikan kesimpulan terhadap keunggulan dan keterbatasan masing-masing metode. Selain itu, penulis juga mengidentifikasi area-area yang masih menjadi celah (*research gap*) untuk menjadi dasar pengembangan riset lanjutan terkait antifouling.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Biofouling sebagai Ancaman Operasional di Industri Perkapalan

Biofouling merupakan salah satu permasalahan terbesar dalam industri perkapalan modern. Pertumbuhan organisme laut seperti teritip, alga, dan bakteri pada lambung kapal menyebabkan peningkatan drag hidrodinamik, konsumsi bahan bakar, dan emisi karbon (Gizer, dkk., 2023). Selain itu, biofouling mempercepat korosi dan merusak sistem pipa, sensor bawah air, serta katup pendingin mesin kapal. Permasalahan ini tidak hanya berdampak ekonomi, tetapi juga berimplikasi pada keberlanjutan lingkungan dan keselamatan pelayaran.

Dalam peninjauan yang dilakukan oleh (Liu, dkk., 2022) disebutkan bahwa biofouling dimulai dari tahap pembentukan film mikrobiologis (biofilm) diikuti oleh adhesi organisme tingkat tinggi seperti teritip dan alga. Faktor utama pemicu antara lain suhu permukaan, kekasaran permukaan, dan dinamika arus laut.

Teknologi Antifouling Konvensional: Antara Efektivitas dan Dampak Lingkungan

Pendekatan awal dalam mengatasi biofouling adalah melalui cat berbasis bahan aktif biocide seperti *tributyltin* (TBT), tembaga oksida, dan *booster biocides*. Meskipun efektif, senyawa ini terbukti memiliki dampak toksik terhadap organisme laut non-target sehingga dilarang oleh IMO (Buskens, dkk., 2013). Pengganti yang banyak digunakan adalah sistem *foul-release coatings* berbasis silikon dan fluoropolimer. Material ini bekerja dengan menciptakan permukaan licin agar organisme tidak dapat melekat kuat, namun memiliki keterbatasan pada kapal berkecepatan rendah dan perairan tropis (Wu, dkk., 2024).

(Ergin & Ergin., 2021) menyebutkan bahwa sistem *self-polishing copolymer* (SPC) mulai dikembangkan sejak 1970-an sebagai alternatif dari cat *tributyltin* (TBT), dengan efisiensi sedang namun tetap menghasilkan peluruhan aktif pada permukaan lambung kapal. Studi (Tsimnadi., 2023) bahkan membandingkan lima jenis cat

antifouling populer di Mediterania dan menunjukkan bahwa efisiensi SPC *biodegradable* cukup stabil hingga 36 bulan.

Tabel 1. Perbandingan Jenis Pelapis Antifouling Berdasarkan Efektivitas, Dampak Lingkungan, dan Umur Pakai

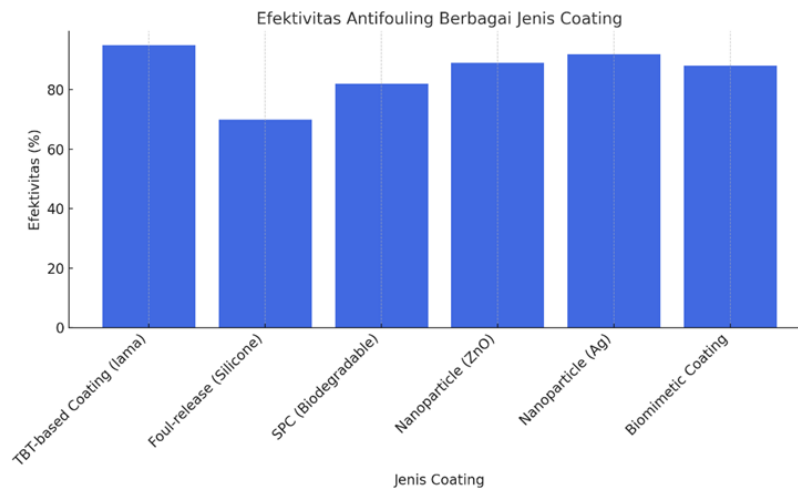
Jenis <i>Coating</i>	Efektivitas Antifouling (%)	Dampak Lingkungan	Umur Pakai (Tahun)	Biaya (Rp/m ²)
<i>Tributyltin (TBT)-Based Coating (Lama)</i>	95	Tinggi	3	245,000
<i>Foul-release (Silicone)</i>	70	Rendah	2.5	327,000
<i>SPC (Biodegradable)</i>	82	Rendah	4	408,000
<i>Nanoparticle (Zinc Oxide)</i>	89	Sangat Rendah	5	571,000
<i>Nanoparticle (Silver)</i>	92	Rendah		653,000
<i>Biomimetic Coating</i>	88	Sangat Rendah	4.5	816,000

Dari tabel 1 dapat dianalisis bahwa Coating berbasis *tributyltin* (TBT) memang memiliki efektivitas tertinggi (95%), namun dampak lingkungannya tinggi dan umur pakai tergolong rendah, *Nanocoatings (Zinc Oxide* dan *Silver)* serta biomimetic coatings memiliki efektivitas tinggi (>88%), umur pakai panjang, dan sangat rendah dampak lingkungan, sedangkan SPC Biodegradable menjadi opsi menarik dengan keseimbangan harga, efektivitas, dan keamanan lingkungan, dan biaya dapat menjadi *trade-off* penting karena semakin tinggi teknologi (*nano/biomimetic*), semakin tinggi pula biaya per meter persegi.

Pendekatan Nanoteknologi dalam Antifouling: Solusi Modern Yang Ramah Lingkungan

Perkembangan material maju memunculkan pendekatan baru berbasis nanoteknologi. Penggunaan nanopartikel seperti perak, tembaga, zinc oxide , dan silica terbukti memiliki efek anti-bakteri, anti-adhesi, dan fotokatalitik yang sangat baik (Sinha, dkk., 2023; Kumar, dkk., 2021). Studi oleh (Dobretsov, dkk., 2013) menunjukkan bahwa nanopartikel perak dapat secara signifikan menghambat pembentukan biofilm awal oleh

mikroorganisme laut melalui mekanisme interferensi quorum sensing. Beberapa produk bahkan mengadopsi konsep biomimetik, meniru struktur permukaan daun teratai atau kulit hiu untuk menciptakan ketahanan alami terhadap fouling. Material ini menunjukkan efektivitas tinggi dengan toksisitas rendah serta stabilitas dalam jangka panjang di lingkungan laut.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Jenis Pelapis Antifouling Berdasarkan Efektivitas, Dampak Lingkungan, dan Umur Pakai

Berdasarkan penelitian oleh (Sinha, dkk., 2023) dan (Kumar, dkk., 2021), nanopartikel seperti zinc oxide dan silver bekerja melalui mekanisme fotokatalitik dan gangguan sinyal quorum sensing, yang mencegah pembentukan biofilm dan adhesi mikroorganisme laut. Efektivitas zinc oxide mencapai >90% dalam lingkungan laut buatan selama 4 minggu uji coba.

Dalam kajian oleh (Gu, dkk., 2020), pendekatan pengembangan antifouling diarahkan pada ekstrak alami laut seperti brominated furanones dari alga merah dan senyawa peptida laut yang dapat menghambat komunikasi mikroba (*quorum sensing*). Strategi ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mampu menggantikan biocide sintetis melalui mekanisme penghambatan biofilm tanpa efek toksik jangka panjang. Selain itu, mereka menekankan pentingnya integrasi material biodegradable dalam pelapis berbasis nanoteknologi sebagai masa depan *coating antifouling*.

Sistem Pelapisan Multifungsi: Antifouling dan Anti-Korosi Sekaligus

(Liang, Shi, & Li., 2024) menyoroti bahwa pelapisan modern tidak cukup hanya antifouling, tetapi harus tahan terhadap korosi akibat air laut dan elektrolit. Oleh karena

itu, dikembangkan *coating* multifungsi yang menggabungkan properti anticorrosion dan antifouling dalam satu sistem, sering kali berbasis komposit nanomaterial dan epoxy-hybrid. Keunggulan pendekatan ini adalah efisiensi dalam perawatan kapal serta perlindungan struktural jangka panjang tanpa perlu pelapisan berlapis-lapis.

Menurut (Thomas, dkk., 2024), integrasi bahan anticorrosion seperti zinc-aluminium alloy dan graphene oxide dalam *coating* antifouling memberikan perlindungan ganda yang efektif. Uji laboratorium menunjukkan resistensi terhadap korosi elektrokimia hingga 99,1% dan efisiensi antifouling sebesar 94% dalam lingkungan laut tropis.

Penelitian oleh (Wang, dkk., 2023) menunjukkan bahwa sistem *coating* berbasis *epoxy-nanocomposite* mampu menyediakan perlindungan ganda terhadap korosi galvanik dan pertumbuhan biofilm. Ini diperkuat oleh (Maan, dkk., 2020) yang menunjukkan hasil uji 180 hari di lingkungan air laut dengan salinitas tinggi dan stabilitas lebih dari 92% efektivitas antikorosi.

Coating Biomimetik dan Sol-Gel

(Papadopoulos & Vourna., 2024) mengembangkan pendekatan pelapisan antifouling berbasis konduktif-polimer nano dengan bahan dasar PEDOT dan graphene. *Coating* ini tidak hanya non-toksik, tetapi juga menunjukkan aktivitas antibiofilm yang signifikan karena medan listrik mikro yang dihasilkan di permukaan.

Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa struktur permukaan seperti kulit hiu dan daun teratai telah menginspirasi desain pelapis biomimetik. Misalnya, (Subbaiyan, dkk., 2023) mengembangkan pelapis berbasis ekstrak alami dari spons laut dengan struktur *nano-ridges* yang menghambat penempelan organisme. (Ielo, dkk., 2021) juga menambahkan bahwa pelapis *sol-gel hybrid* memberikan permukaan licin sekaligus mendukung pelepasan mikroaktif bahan antifouling.

Teknologi Self-Polishing Coatings (SPC): Inovasi untuk Efektivitas Jangka Panjang

SPC adalah salah satu pendekatan yang menarik perhatian karena kemampuannya untuk mengelupas lapisan secara bertahap saat kapal bergerak, sehingga memperbarui permukaan aktif antifouling. (Nwuzor, dkk., 2021) menunjukkan bahwa generasi baru SPC mulai menggantikan senyawa logam berat dengan senyawa biodegradable berbasis polimer dan nanopartikel aktif. Hal ini menjawab tuntutan efektivitas tinggi sekaligus mengurangi dampak ekologis.

Tantangan dan Isu Lingkungan

Meskipun banyak teknologi antifouling telah dikembangkan, beberapa tantangan tetap ada. Di antaranya adalah biodegradabilitas bahan antifouling, akumulasi mikro-nanopartikel dalam rantai makanan laut, serta penurunan efektivitas lapisan pada kondisi ekstrem laut (Abioye, dkk., 2019). Selain itu, aspek regulasi dan standar sertifikasi *coating* dari IMO dan badan klasifikasi kapal juga perlu diperhitungkan dalam pengembangan teknologi baru.

Review oleh (Laftah & Rahman., 2025) menunjukkan bahwa fenolik-polimer dan silikon hibrid kini menjadi fokus pengembangan antifouling berbasis polimer ramah lingkungan. Material ini dapat mengontrol difusi air laut dan meminimalkan pengendapan mikroorganisme tanpa pelepasan toksin ke lingkungan.

Studi oleh (Weber & Esmaeili., 2023) menunjukkan bahwa meskipun SPC biodegradable lebih aman dari *tributyltin* (TBT), beberapa kandungannya tetap menunjukkan potensi bioakumulasi dalam jangka panjang. Di sisi lain, (Aslam, dkk., 2024) menekankan pentingnya transisi ke pelapis berbasis silikon dan nanopartikel karbon non-logam sebagai bagian dari standar IMO 2023 tentang emisi dan pelapisan berkelanjutan.

Sintesis dan Arah Riset Selanjutnya

Pendekatan berbasis nanoteknologi dan biomimetik merupakan tren dominan yang menunjukkan kinerja tinggi dan ramah lingkungan. Namun, masih diperlukan uji coba lapangan jangka panjang pada berbagai jenis kapal dan kondisi perairan tropis untuk memvalidasi efektivitas dan keamanan material tersebut. Penelitian juga perlu diarahkan pada komersialisasi produk antifouling nano, analisis siklus hidup material, serta pengembangan sistem digital monitoring untuk mendeteksi dini fouling pada permukaan kapal.

KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan pustaka sistematis yang telah dilakukan, penelitian ini menyimpulkan bahwa teknologi perlindungan lambung kapal telah mengalami evolusi fundamental dari ketergantungan pada biosida berbahaya menuju pendekatan material maju yang berkelanjutan. Transisi industri dari cat konvensional berbasis *tributyltin* (TBT) ke teknologi ramah lingkungan membuktikan bahwa perlindungan maritim modern tidak lagi hanya berfokus pada efektivitas pencegahan penempelan organisme, tetapi juga pada kelestarian ekosistem laut.

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa pendekatan nanoteknologi, khususnya penggunaan nanopartikel oksida logam dan perak, serta desain pelapis biomimetik, merupakan solusi yang paling menjanjikan saat ini. Teknologi ini terbukti mampu menawarkan efisiensi tinggi dalam menghambat kolonisasi biofouling dengan tingkat toksisitas yang sangat rendah. Selain itu, tren pengembangan *Self-Polishing Coatings* (SPC) berbahan biodegradable dan pelapis multifungsi yang mengintegrasikan sifat antifouling dengan antikorosi menjadi strategi kunci dalam meningkatkan efisiensi bahan bakar dan memperpanjang umur struktur kapal.

Meskipun demikian, tantangan terkait biaya produksi material nano dan ketahanan lapisan di lingkungan laut ekstrem masih menjadi hambatan utama untuk aplikasi skala luas. Oleh karena itu, arah riset dan pengembangan selanjutnya direkomendasikan untuk berfokus pada optimalisasi formulasi komposit nano yang ekonomis, serta integrasi teknologi pelapis dengan sistem pemantauan digital untuk memungkinkan strategi perawatan kapal yang lebih prediktif dan efisien. Studi ini diharapkan dapat menjadi referensi strategis dalam pemilihan dan pengembangan material pelapis kapal di masa depan.

REFERENSI

- Abioye, O. P., Loto, C. A., & Fayomi, O. S. I. (2019). Evaluation of anti-biofouling progresses in marine application. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 5, 1-8.
- Aslam, J., Parray, H. A., & Aslam, A. (2024). Biomimetic surface coatings for marine antifouling applications. In *Smart Biomimetic Coatings* (pp. 101-128). *Woodhead Publishing*.
- Buskens, P., Wouters, M., Rentrop, C., & Vroon, Z. (2013). A brief review of environmentally benign antifouling and foul-release coatings for marine applications. *Journal of Coatings Technology and Research*, 10, 29-36.
- Dobretsov, S., Abed, R. M., & Teplitski, M. (2013). Mini-review: Inhibition of biofouling by marine microorganisms. *Biofouling*, 29(4), 423–441.
- Ergin, A., & Ergin, M. F. (2021). The role of antifouling coating in the marine industry. *Research & Reviews in Engineering*, 53.
- Esnahati, E., Susanto, H., & Syafrudin, S. (2016). Pengaruh Penambahan Nano-tio₂ sebagai Agen Anti-bakterial dalam Pembuatan Membran Selulosa Asetat–Kitosan terhadap Biofouling yang Disebabkan oleh Bakteri Gram Negatif dan Positif. Disertasi. Universitas Diponegoro.
- Gizer, G., Önal, U., Ram, M., & ŞAHİNER, N. (2023). Biofouling and mitigation methods: A review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(2).
- Gu, Y., Yu, L., Mou, J., Wu, D., Xu, M., Zhou, P., & Ren, Y. (2020). Research strategies to develop environmentally friendly marine antifouling coatings. *Marine Drugs*, 18(7), 371.

- Ielo, I., Giacobello, F., Castellano, A., Sfameni, S., Rando, G., & Plutino, M. R. (2021). Development of antibacterial and antifouling innovative and eco-sustainable sol-gel based materials: From marine areas protection to healthcare applications. *Gels*, 8(1), 26.
- IMO. (2001). International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships. *International Maritime Organization*.
- Kumar, A., Ahmed, A. J., Bazaka, O., Ivanova, E. P., Levchenko, I., Bazaka, K., & Jacob, M. V. (2021). Functional nanomaterials, synergisms, and biomimicry for environmentally benign marine antifouling technology. *Materials Horizons*, 8(12), 3201-3238.
- Kumar, S., Ye, F., Dobretsov, S., & Dutta, J. (2021). Nanocoating is a new way for biofouling prevention. *Frontiers in Nanotechnology*, 3, 771098.
- Laftah, W. A., & Rahman, W. A. W. A. (2025). Polymers for anti-fouling applications: a review. *Environmental Science: Advances*.
- Li, L., Hong, H., Cao, J., & Yang, Y. (2023). Progress in marine antifouling coatings: Current status and prospects. *Coatings*, 13(11), 1893.
- Liang, H., Shi, X., & Li, Y. (2024). Technologies in Marine Antifouling and Anti-Corrosion Coatings: A Comprehensive Review. *Coatings*, 14(12), 1487.
- Liu, Z., Zheng, X., Zhang, H., Li, W., Jiang, R., & Zhou, X. (2022). Review on formation of biofouling in the marine environment and functionalization of new marine antifouling coatings. *Journal of Materials Science*, 57(39), 18221-18242.
- Maan, A. M., Hofman, A. H., de Vos, W. M., & Kamperman, M. (2020). Recent developments and practical feasibility of polymer-based antifouling coatings. *Advanced functional materials*, 30(32), 2000936.
- Nwuzor, I. C., Idumah, C. I., Nwanonyi, S. C., & Ezeani, O. E. (2021). Emerging trends in self-polishing anti-fouling coatings for marine environment. *Safety in Extreme Environments*, 3(1), 9-25.
- Papadopoulos, N., & Vourna, P. (2024). Eco-friendly approaches of modern antifouling coating fabrication. *Materials Open Research*, 3(4), 4.
- Purwaningsih, E., & Rahmanto, D. (2012). PERLINDUNGAN HUKUM TERHADAP PRODUK NANOTEKNOLOGI MELALUI HUKUM PATEN. ADIL: *Jurnal Hukum*, 3(1), 166-184.
- Qian, P. Y., Xu, Y., & Fusetani, N. (2009). Natural products as antifouling compounds: recent progress and future perspectives. *Biofouling*, 26(2), 223-234.
- Schultz, M. P., Bendick, J. A., Holm, E. R., & Hertel, W. M. (2011). Economic impact of biofouling on a naval surface ship. *Biofouling*, 27(1), 87-98.
- Sinha, S., Kumar, R., Anand, J., Gupta, R., Gupta, A., Pant, K., ... & Gupta, P. K. (2023). Nanotechnology-based solutions for antibiofouling applications: An overview. *ACS Applied Nano Materials*, 6(14), 12828-12848.
- Somya, A., Varshney, A., Thakur, A., Kumar, A., KS, S., & Kumari, P. (2024). Anti-Fouling Nano-Hybrid/Composite Smart Coatings with Specific Reference to Marine Applications. In *Nano-Hybrid Smart Coatings: Advancements in Industrial Efficiency and Corrosion Resistance* (pp. 205-226). American Chemical Society.

- Subbaiyan, R., Ganesan, A., & Varadharajan, V. (2023). Bioprospecting and exploration of the natural antifouling approaches against marine foulers. *J. Pure Appl. Microbiol*, 17, 1374-1390.
- Thomas, P., Sahoo, B. N., Thomas, P. J., & Greve, M. M. (2024). Recent advances in emerging integrated anticorrosion and antifouling nanomaterial-based coating solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-27.
- Tsimnadi, M. D. (2023). A comparative study of the effectiveness of antifouling paints for the protection of ship hulls from biofouling. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
- Wang, A., De Silva, K., Jones, M., Robinson, P., Larribe, G., & Gao, W. (2023). Anticorrosive coating systems for marine propellers. *Progress in Organic Coatings*, 183, 107768.
- Wu, S., Wu, S., Xing, S., Wang, T., Hou, J., Zhao, Y., & Li, W. (2024). Research Progress of Marine Anti-Fouling Coatings. *Coatings*, 14(9), 1227.
- Weber, F., & Esmaeili, N. (2023). Marine biofouling and the role of biocidal coatings in balancing environmental impacts. *Biofouling*, 39(6), 661-681.