

Ulasan: Performa Cat Antibiotika Terhadap Pertumbuhan Biofouling Penempel Struktur di Perairan Laut Indonesia

Performa of Antibiotika Paints on The Growth of Biofouling Attachment Structures in Indonesian Sea Waters

Meifina¹, Gadang Priyotomo*²

¹Biro Komunikasi Publik, Umum dan Kesekretariatan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Gedung Pusat Informasi 102, KST. BJ.Habibie, Setu Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

²Pusat Riset Metalurgi Badan Riset dan Inovasi Nasional Gedung Manajemen 720, KST. BJ.Habibie, Setu Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

*Korespondensi: gada001@brin.go.id

ABSTRAK

Indonesia memiliki iklim tropis, di mana perubahan musim relatif stabil setiap tahun untuk suhu permukaan dan salinitas tinggi di lingkungan laut. Pertumbuhan biofouling laut tropis terus berlanjut tanpa gangguan sepanjang tahun. Namun, aktivitas metabolisme biofouling sebagian besar memiliki efek yang merugikan pada berbagai infrastruktur terendam laut dimana aktifitas tersebut merusak integritas fisik struktur khususnya efek korosi dan tendensi boros bahan bakar kapal laut akibat biota penempel. Di Indonesia, salah satu cara untuk mengurangi aktivitas marine biofouling adalah untuk mengaplikasikan cat antifouling (AF), yang secara perlahan melepaskan senyawa aktif antifouling dalam cat AF ke dalam air laut. Investigasi performa cat antifouling telah dilakukan oleh Kelompok Riset Korosi Pusat Riset Metalurgi Badan Riset dan Inovasi Nasional 5 tahun terakhir dimana parameter fisik air laut dan zat aktif biosida cat antifouling berperan dalam memperpanjang umur pakai cat antifouling yang diaplikasikan pada struktur terpasang di perairan laut hingga 5 tahun. Peran ketebalan cat antifouling dan jenis cat antifouling juga berperan untuk menjaga umur pakai. Di Indonesia, Cat antifouling masih menggunakan biosida logam berat anorganik berbasis tembaga oksida (Cu_2O) sebagai zat antifouling di perairan laut sehingga diperlukan riset skala nasional lebih lanjut untuk menggantikan logam berat tembaga sebagai biosida utama

Kata kunci: Biofouling; Cat antifouling; Korosi; Laut tropis; Tembaga oksida

ABSTRACT

Indonesia has a tropical climate, where seasonal changes are relatively stable every year for surface temperatures and high salinity in the marine environment. The growth of tropical marine biofouling continues uninterrupted throughout the year. However, the metabolic activity of biofouling mostly has a detrimental effect on various submerged marine infrastructures where it damages the physical integrity of the structure, especially the corrosion effect and the tendency to waste marine fuel due to marine biota. In Indonesia, one way to reduce marine biofouling activity is to apply antifouling (AF) paint, which slowly releases antifouling active compounds in AF paint into seawater. Antifouling paint performance investigations have been carried out by the Corrosion Research Group, Metallurgical Research Center-The National Research and Innovation Agency for the last 5 years where the role of physical parameters of seawater and the biocidal active substance of antifouling paints plays a role in extending the service life of antifouling paints that are applied to installed structures in marine waters. The thickness of the antifouling paint and the type of antifouling paint also play a role in maintaining the service life. In Indonesia, antifouling paints still use inorganic heavy metal biocides based on copper oxide (Cu_2O)

as antifouling agents in marine waters, so further national-scale research is needed to replace copper heavy metals as the main biocide.

Keywords: Antifouling paint; Biofouling; Corrosion; Copper oxide; Tropical Sea;

PENDAHULUAN

Secara umum air laut merupakan larutan kompleks organik, anorganik, dan komponen biologis dimana dapat mempengaruhi terhadap integritas struktur statis (tiang pancang dermaga, jembatan antar pulau dan lainnya), dan struktur dinamis (kapal laut). Proses korosi umumnya terjadi pada struktur paduan dan logam. Disisi lain, biofouling laut tampaknya menjadi salah satu isu terbesar ditemukan di permukaan struktur yang terpapar pada lingkungan dan didefinisikan juga sebagai salah satu akumulasi organisme hidup yang tidak diinginkan pada permukaan struktur statis dan dinamis dalam air laut (Diego *et al.*, 2004 ; Iswadi *et al.*, 2022). Lebih jauh lagi, kita belum menyadari bahwa selama ini proses metabolisme kehidupan biofouling ini menyebabkan dampak yang luar biasa khususnya kepada aktifitas kapal antara lain peningkatan hambatan gesekan pergerakan kapal laut, terjadinya peningkatan frekuensi operasi *docking* dan penurunan kualitas sistem perlindungan korosi khususnya pada lambung kapal. Sebagai tambahan, aktifitas biologis secara tidak langsung seiring dengan waktu bahwa struktur-struktur statis terendam air laut dapat membahayakan integritas kekuatan dan menimbulkan isu keselamatan jiwa manusia (Nuraini *et al.*, 2017a)

Salah satu pertanyaan besar tentang fenomena diatas yang berkenaan dengan hubungan antara aktifitas penempelan biofouling laut dan kerusakan struktur terendam khususnya kerusakan korosi dapat terjadi di negara Indonesia. Umumnya kerusakan struktur berbahan logam disebabkan oleh lingkungan tropis memiliki daya serangan korosi jauh lebih tinggi di berbagai logam dari paparan iklim sedang dan kutub. Korosi memberikan dampak terjadinya kelarutan logam (Priyotomo, 2022).

Negara Indonesia sebagai negara tropis dimana salah satu contoh riset yang dilakukan oleh Tim Periset Pusat Riset Metalurgi-BRIN melaporkan bahwa potensi kerusakan korosi destruktif struktur terendam berbahan logam baja

Di perairan air laut wilayah Jakarta dan Bali (Sundjono *et al.* 2017). Disisi lain, pengaruh parameter fisik air laut juga dipertimbangkan antara lain pH, garam terlarut, oksigen terlarut, suhu dan salinitas pada biofouling laut yang memberikan kontribusi dalam pertumbuhan saat penempelan di struktur laut (Diego *et al.*, 2004 ; Elviliana *et al.*, 2022). Namun, banyak para praktisi atau para pemilik struktur terendam khususnya para nelayan berasumsi bahwa adanya biota laut yang menempel akan melindungi kapalnya dari serangan korosi atau proses karat dikarenakan adanya air laut. Justru fenomena penempelan biota laut akan berdampak akan rapuhnya kapal yang terbuat dari logam baja dan aluminium. Sehingga peran metode perlindungan ekonomis dan simple dibutuhkan untuk selalu memproteksi struktur baik struktur statis dan struktur dinamis.

Tujuan kegiatan ulasan ini adalah memberikan cara pandang para pengguna, operator dan aplikator struktur terendam baik statis dan bergerak (kapal) akan ancaman biota penempel yang massif merusak integritas kekuatan struktur secara diam-diam dan tak terduga, bagaimana pentingnya cat antibiotika (*antifouling*) digunakan di struktur dan perkembangan lebih lanjut metode perlindungan tersebut di Indonesia berdasarkan hasil riset yang dilakukan oleh Tim periset dari Kelompok Riset Korosi, Pusat Riset Metalurgi, Badan Riset Inovasi Nasional.

METODE PENELITIAN

Pada metode tulisan literatur review ini terdapat uraian tentang cara yang digunakan melalui sumber data dan analisis data dari sumber-sumber 20 referensi terkait tulisan ini.

Sumber data atau referensi yang terkait tulisan ini merupakan penjelasan mengenai mengenai parameter-parameter terkait dengan Cat Antibiotika antara lain jenis cat antibiotika, parameter lingkungan yang terkait, jenis-jenis aditif biosida, jenis mekanisme inhibisi fouling penempel di struktur dan jenis aditif cat biota lainnya yang mempengaruhi kinerja jenis cat antibiotika. Sumber data-data lainnya juga memberikan relevansi terhadap Pertumbuhan Biofouling Penempel Struktur di Perairan Laut Indonesia. Referensi untuk memperoleh artikel relevan yang akan diulas terindeks google scholar, scopus dan lainnya.

Lebih jauh lagi, analisa hasil berisi uraian lengkap tentang metode menganalisa konsep yang diteliti pada tulisan ini melalui dua metode pendekatan. Metode eksposisi merupakan paparan data dan fakta lapangan yang ada sehingga pada akhirnya dapat dicari korelasi antara data-data tersebut disetiap literature yang tersaji khususnya cat antibiotika. Disisi lain, metode analitik juga dilakukan melalui proses analisis data tersaji dengan memberikan argumentasi turukur dan sistematis melalui kerangka berpikir logis dan menjadi suatu kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan cat antifouling (AF) pada struktur dinamis di Indonesia

Di Indonesia, hingga saat ini, metode perlindungan efektif, ekonomis dan memuaskan para pengguna struktur terendam perairan laut khususnya kapal masih menggunakan cat antifouling sebagai pelindung struktur lambung kapal. Umumnya lambung kapal yang terendam penuh dengan air laut saat berlayar dan bersandar merupakan bagian *bottom*. Bagian *bottom* kapal umumnya

riskikan terhadap penempelan aneka jenis biota baik mikro dan makroorganisme perairan laut saat kapal beroperasi. Cat antifouling sebagai lapisan wajib digunakan dikapal saat kondisi baru atau juga saat *docking* untuk proses perbaikan. Dari riset yang dilakukan oleh BRIN, di Indonesia, umumnya menggunakan cat berbahan resin *self polishing copolymer methyl methacrylate* dengan biosida tembaga oksida, dimana biosida berbahan logam ini dapat menghambat laju penempelan biota perairan laut skala mikro dan makro (Priyotomo *et al.*, 2022). Sebelum adanya imbuhan pigmen biosida tembaga oksida (Cu_2O) didalam sistem cat antibiotika, senyawa Tributyltin (TBT) merupakan senyawa organik mengandung logam timah (organotin). Nilai maksimum senyawa TBT tertera dalam keputusan menteri negara lingkungan hidup No. 51 Tahun 2004, tentang baku mutu Air Laut adalah 0,01 ppm. Disisi lain, pelarangan penggunaan TBT dalam cat antibiotika juga dilakukan oleh pelarangan juga dilanjutkan oleh dilakukan dikarenakan *International Maritime Organization* (IMO) tahun 2008. Aditif pigmen TBT akan terlarut dari cat antibiotika, masuk ke perairan, memengaruhi kehidupan laut dan merembes ke rantai makanan tempat ia terakumulasi dan akhirnya mencapai manusia melalui konsumsi ikan. Oleh karena, penggunaan aditif pigmen biosida tembaga oksida (Cu_2O) yang ditambahkan didalam cat antifouling secara masif digunakan baik secara global termasuk Indonesia hingga sekarang.

Ada 3 jenis cat antifouling (AF) secara komersial (Diego *et al.* 2004) antara lain :

1. Cat AF konvensional ; Binder tak terlarut (*chlorinated rubber* and *polyvinyl chloride* dan rosin), biosida tembaga oksida dengan kemampuan kelarutan cepat, waktu operasional singkat.
2. Cat AF ablatif ; Binder bisa terlarut (*vinyl chloride-vinyl acetate copolymer* dan *vinyl chloride-vinyl isobutyl ether copolymer* dan rosin), biosida tembaga oksida dimana

kecepatan kelarutan terkontrol dan waktu operasional sedang.

3. Cat AF *Self-polishing copolymer* (SPC); cat ini terdiri dari komponen acrylic copolymers, biosida tembaga oksida (Cu_2O) & *soluble booster biocides*. Air laut dapat menembus lapisan cat melalui proses hidrolisis dimana lapisan polimer mudah terlarut sehingga biosida akan terlepas. Proses lepas biosida secara simultan dengan kecepatan sama dimana waktu pakai sangat lama (3-5 tahun)

Di perairan Indonesia, Aplikasi cat antifouling (AF) dapat diaplikasikan ke dalam semua jenis material atau bahan lambung kapal, namun sebelumnya harus dilapis oleh primer paint (cat dasar). Jenis material lambung kapal yang sering ditemui di Indonesia antara lain bahan kayu, fiberglass, aluminium dan baja yang semuanya harus dilapis oleh cat baik sebagai fungsi protektif dan dekoratif. Semua jenis material tersebut dilapis oleh cat AF berbahan pigmen Cu_2O sebagai biosida utama biota laut. Pada lambung kapal yang terbuat dari aluminium dihindari pengaplikasian cat AF berbahan pigmen biosida Cu_2O dikarenakan terjadinya korosi galvanik. Korosi galvanik merupakan jenis korosi dimana dua logam berbeda menempel satu sama lain di dalam lingkungan perairan (Priyotomo et al. 2014). Secara global, senyawa tembaga dan turunannya diimbuhkan kedalam cat antibiotika tak terkecuali di Indonesia. Penambahan senyawa tembaga dapat menunjukkan kemampuan antibiotika terhadap organisme-organisme perairan laut antara lain spesies tritip (*barnacles*), tube worm dan mayoritas alga (Voulvoulis et al., 2002).

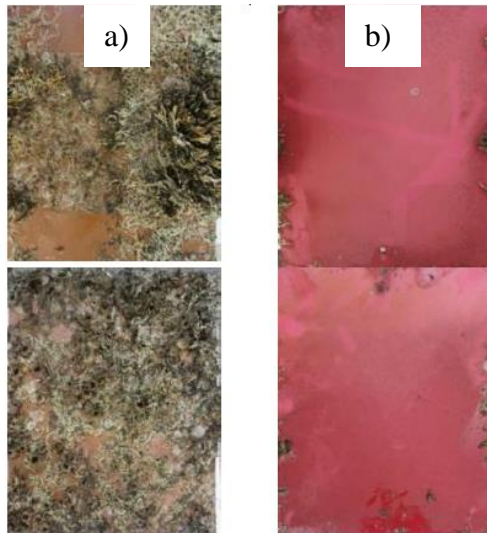
Hasil riset yang dilakukan oleh Tim riset Pusat Riset Metalurgi-BRIN telah menginvestigasi bagaimana pentingnya penggunaan cat antifouling (AF) di struktur terendam perairan laut. Gambar 1 memperlihatkan bahwa struktur perairan laut tanpa dan dengan pengecatan antibiotika. Struktur logam yang hanya diaplikasikan cat antikorosi saja, tidak

mampu menghambat pertumbuhan biota-biota laut. Struktur logam yang terlindungi oleh cat antifouling, mampu menghambat penempelan dan pertumbuhan biota laut hingga 3 bulan. Perendaman struktur logam tersebut dilakukan diperairan utara Jakarta dimana indikasi spesies penempel melimpah adalah *tube worm*. Penempelan biota terjadi jika ada hubungan simbiosis mutualisme dengan koloni atau biofilm bakteri yang telah menempel di permukaan logam tanpa perlindungan cat AF (Yebra et al., 2004). Miliaran bakteri simbiotik yang hidup di dalam tabung *tube worm* menghasilkan gula dari karbon dioksida, hidrogen sulfida, dan oksigen (Lagerström et al., 2018)

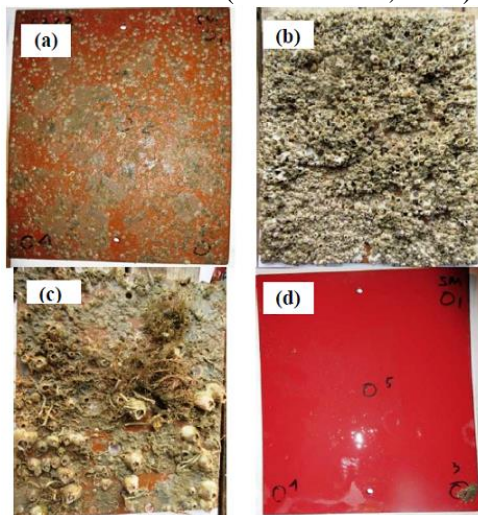
Investigasi performa cat antifouling (AF) juga dilakukan di selat madura yang dilakukan oleh tim periset BRIN (Priyotomo et al., 2022 ; Nuraini et al., 2017b). Gambar 2 memperlihatkan pelat bercat antifouling (d) menahan laju penempelan dan perkembangan biota laut hingga 3 bulan dibandingkan 3 pelat bercat antikorosi (a,b dan c). Dari riset BRIN, dominasi spesies biota laut penempel adalah jenis tritip (*barnacle*) dimana memiliki cangkang keras (Priyotomo et al., 2022). Cat antikorosi umumnya digunakan sebagai bagian sistem cat kapal di daerah bottom. Cat antikorosi sebagai cat dasar berbahan *resin epoxy* dengan tambahan senyawa seng, dimana logam yang memiliki potential reduksi negatif cenderung melindungi logam berpotential kurang negatif (Sundjono et al., 2017). Jika diperhatikan dari hasil riset di perairan pantai utara Jakarta (Muara Baru) dan perairan selat madura, adanya perbedaan spesies biota penempel dan keefektifan kinerja cat antifouling berlangsung hingga 3 bulan perendaman.

Lebih jauh lagi, Investigasi performa cat antifouling berbahan aditif biosida senyawa tembaga juga dilakukan di perairan sekitar tol mandara Bali dimana dominasi spesies biota laut penempel berjenis tritip dan tidak adanya biota penempel di permukaan bahan baja terlapis cat antifouling yang terlihat pada

Gambar 3 (Priyotomo *et al.*, 2021). Keefektifan kinerja cat antifouling di tiga lokasi riset perairan (Pantai Utara Jakarta, selat Madura dan Bali) untuk melindungi dari terpelan biota laut.



Gambar 1. (a). Kondisi sampel pelat baja hanya di cat anti korosi ; (b). Kondisi sampel pelat baja di cat antifouling (AF) setelah terendam di perairan pantai Jakarta (Nuraini *et al.*, 2017)



Gambar 2. (a-c). Kondisi sampel pelat baja hanya di cat anti korosi ; (d). Kondisi sampel pelat baja di cat antifouling (AF) setelah terendam di perairan selat

Madura (Priyotomo *et al.*, 2022)



Gambar 3. (a). Kondisi sampel pelat baja hanya di cat anti korosi ; (b). Kondisi sampel pelat baja di cat antifouling (AF) setelah terendam di perairan tol mandara Bali (Priyotomo *et al.*, 2021)

Hubungan antara parameter lingkungan dengan performa cat antifouling di Indonesia

Performa cat antifouling sebagai komponen penting pada kapal laut lebih optimal berjalan untuk menghalangi penempelan biota laut (*biofouling*) di daerah dengan salinitas tinggi khususnya perairan laut, pantai dan muara. Oleh karena itu, di Indonesia, penggunaan cat antibiotika tidak diaplikasikan pada kapal-kapal yang beroperasi di perairan daratan antara lain sungai, danau, waduk. Ini dikarenakan adanya proses hidrolisis yang terjadi di matriks cat AF dimana reaksi kimia antara air laut dengan resin cat sehingga terdekomposisi menjadi senyawa yang larut dalam air (Priyotomo *et al.*, 2021 ; Priyotomo *et al.*, 2022).

Parameter kadar asam (pH) sekitar 8 dan suhu perairan di atas 20°C meningkatkan kemampuan biologis biota laut untuk berkembang biak (Breitburg *et al.* 2018). Tipikal pH air laut adalah cenderung basa karena terdapat mineral dasar terlarut dan penyangga (*buffer*) alami dari senyawa karbonat dan bikarbonat di perairan laut, tidak seperti perairan darat. Disisi lain, kadar salinitas perairan antara 32 ppt dan 35 ppt sangat cocok untuk perkembangan biota laut dimana berpotensi merusak kepada struktur terendam. Kinerja cat antifouling tergantung juga dengan kadar salinitas

yang tinggi karena proses pelepasan senyawa biosida juga berlangsung cepat (Suriani *et al.*, 2016), dimana ini juga terjadi beberapa riset BRIN air (Priyotomo *et al.*, 2021 ; Priyotomo *et al.*, 2022 ; Nuraini *et al.* 2017a ; Nuraini *et al.*, 2017b).

Tingkat pelepasan biosida selain proses reaksi kimia melalui hidrolisis juga melalui proses erosi (mekanik) permukaan cat AF, di mana faktor laju kapal atau aliran arus air laut dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan ini. Umumnya pada jenis Cat AF *Self-polishing copolymer* (SPC), proses pelepasan biosida diiringi dengan pelepasan *leached layer* cat sehingga permukaan cat selalu baru dan siap melindungi penempelan biota laut (Priyotomo *et al.*, 2021). Faktor kecepatan arus laut atau juga faktor kecepatan kapal laut merupakan salah satu dari faktor utama yang mempengaruhi performa cat AF. Peningkatan kecepatan arus laut atau kapal laut juga meningkatkan kinerja cat jenis AF-SPC, tapi tidak pada jenis cat konvensional dan ablatif karena tidak meninggalkan *leached layer*. Lapisan *leached layer* merupakan lapisan atas kosong tanpa aditif biosida bertekstur kasar dan berongga yang cenderung sebagai tempat penempelan protein, bakteri dan mikroorganisme. Umur pakai cat AF teridentifikasi dengan penurunan ketebalan cat AF yang tererosi melalui mekanisme aliran air laut (Kojima *et al.*, 2016)

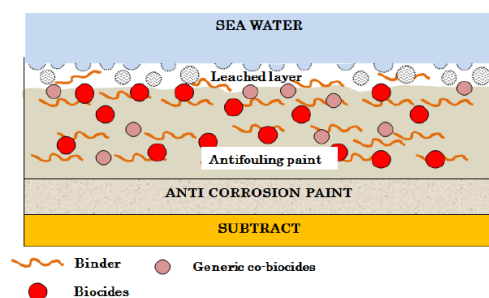
Parameter oksigen terlarut juga mempengaruhi kehidupan biota khususnya diperairan laut. Jumlah oksigen terlarut dalam air tergantung dari parameter suhu perairan, jumlah garam terlarut dalam air (salinitas), dan tekanan atmosfer. Nilai oksigen terlarut perairan laut menurun dengan meningkatnya suhu air dan sebaliknya dimana oksigen terlarut cenderung lebih rendah dengan peningkatan salinitas (Breitburg *et al.*, 2018). Umumnya kadar oksigen terlarut menurun seiring dengan peningkatan kedalaman di perairan. Konsentrasi DO tertinggi terjadi pada lapisan permukaan perairan akibat penetrasi sinar matahari

yang intens dan proses fotosintesis dalam mensuplai oksigen di badan perairan (Leidonald *et al.*, 2019). Peran variasi kedalaman perairan terhadap terhadap keanekaragaman dan densitasnya *biofouling* penempel dilakukan di tiga perairan (Muara Baru, Selat Madura dan dekat tol mandara Bali) hingga 3 meter dimana tidak ada perbedaan tiap kedalaman dan pengaruh terhadap performa cat antifouling (AF) (Priyotomo *et al.*, 2021; Priyotomo *et al.* 2022; Nuraini *et al.* 2017a; Nuraini *et al.*, 2017b). Ini dimungkinkan kondisi sampel uji dalam zona eufotik dimana sinar matahari masih dapat menembus secara masif ke dalam lautan (Rodríguez *et al.*, 2002)

Mekanisme cat antifouling yang diaplikasikan di Indonesia untuk mengurangi penempelan biota laut.

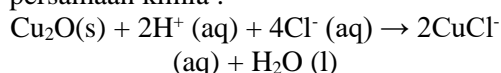
Mekanisme inhibisi penempelan biota laut oleh cat antifouling (AF) akan terus simultan jika eksistensi lapisannya terus terjaga saat operasional. Perkiraan umur pakai cat AF *Self-polishing copolymer* (SPC) yang sering digunakan di Indonesia dapat diperkirakan melalui perbandingan ketebalan awal dan akhir cat dengan metode interval pengukuran ketebalan berkala (Priyotomo *et al.*, 2022). Perihal indentifikasi umur pakai cat antifouling jenis SPC melalui metode ketebalan lapisan cat ini juga dilakukan oleh beberapa periset global (Lagerström *et al.*, 2018; Atlar *et al.*, 2003). Ini mengimplikasikan bahwa peran nilai ketebalan cat AF mempengaruhi umur pakai cat itu sendiri saat operasional. Peningkatan ketebalan cat AF memberikan dampak ketidakekonomisan secara langsung karena harga yang mahal. Di Indonesia, cat AF yang beredar saat ini umumnya dikategorikan sebagai *tin-free-polishing copolymer* (tin-free SPC) yang berbahan dasar polimer acrylate sebagai pengikat cat (binder). Laju pelepasan resin polimer acrylate yang mengandung biosida tembaga terkontrol sehingga cepat laju pengurangan ketebalan cat (Yebara *et al.*, 2004). Sebagai tambahan, umumnya komponen cat terdiri dari 3 bagian antara lain Binder, Pigment dan pelarut

(solvent). Pada kasus cat AF ini, komponen utamanya antara lain binder (resin), pigment (biosida, kobiosida, booster biosida) dan pelarut (xylene). Pembentukan lapisan tipis (leached out layer) cat AF terjadi bersamaan dengan terlepasnya partikel biosida tembaga (Cu_2O) dimana laju pelepasan awal lebih tinggi dan selanjutnya menjadi stabil (Laidlaw *et al.*, 1952). Tipikal dari cat jenis SPC adalah saat pertama kali terendam di perairan laut, proses leaching out (pelarutan) terjadi dengan larutnya partikel biosida tembaga pada daerah antarmuka antara lapisan cat dan air (Kojima *et al.*, 2016). Tidak adanya biosida terlarut yang meninggalkan pori-pori pada matriks cat didefinisikan sebagai *leached layer* yang diilustrasikan pada Gambar 4. Penambahan aditif untuk menghambat penempelan biota laut tidak hanya satu jenis biosida saja, namun dibantu oleh aditif lainnya antara lain kobiosida (ZnO) dan booster biosida (CuPt). Senyawa ZnO ditambahkan untuk meningkatkan kinerja cat dengan menghambat pertumbuhan oalga dan biofilm bakteri di permukaan cat.



Gambar 4. Skema lapisan cat antifouling yang terekspos di perairan laut Indonesia (Priyotomo *et al.*, 2021)

Selanjutnya mekanisme pelarutan biosida tembaga ke dalam air laut dengan persamaan kimia :



Salinitas yang tinggi disebabkan oleh adanya konsentrasi ion klorida yang tinggi yang meningkatkan laju disolusi Cu_2O . Ketika tembaga oksida bersentuhan dengan air laut, menghasilkan kompleks

terhidrasi $\text{Cu}(\text{I})$ klorida yang kemudian dengan cepat teroksidasi menjadi Cu^{2+} sebagai ion biosida. Ini juga salah satu alasan kenapa cat AF tidak bisa diaplikasikan ke perairan darat dikarenakan kadar salinitas yang rendah. Kadar salinitas yang rendah dalam perairan darat menjadikan fungsi cat antifouling tidak berfungsi jika diaplikasikan di lambung kapal. Lebih jauh lagi, mekanisme pengendalian laju pelepasan biosida dan kobiosida terdiri dari reaksi kimia dan difusi dimana pelarutan aditif cat larut air laut, reaksi pengikat dan proses pemolesan cat terjadi secara bersamaan. Mekanisme tersebut dapat mempengaruhi konsistensi lapisan tipis cat jenis SPC yang *ter-leached out*. Ini mengindikasikan bahwa tidak adanya biosida dan co-biosida dalam matriks akrilat meninggalkan pori-pori kecil dalam matriks tersebut. Sifat kebasahan bahan binder cat berubah dari hidrofobik menjadi hidrofilik. Sifat hidrofilik lapisan terluar cat AF ini dapat mempermudah proses pengikisan *leached layer* melalui mekanisme friksi antara lain arus laut atau pergerakan kapal laut.

KESIMPULAN

Di Indonesia, salah satu cara untuk mengurangi aktivitas marine biofouling adalah untuk mengaplikasikan cat antifouling (AF), yang secara perlahan melepaskan senyawa aktif antifouling dalam cat AF ke dalam air laut. Investigasi performa cat antifouling telah dilakukan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional dimana peran parameter fisik air laut dan zat aktif biosida cat antifouling berperan dalam memperpanjang umur pakai cat antifouling yang diaplikasikan di struktur terpasang di perairan laut. Peran ketebalan cat antifouling dan jenis cat antifouling juga berperan untuk menjaga umur pakai. Di Indonesia, Cat antifouling masih menggunakan biosida logam berat inorganik berbasis tembaga oksida (Cu_2O) sebagai zat antifouling di perairan laut sehingga diperlukan riset skala nasional lebih lanjut untuk menggantikan logam berat tembaga sebagai biosida utama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada tim periset Kelompok Riset Korosi dan teknologi Mitigasi, Pusat Riset Metalurgi, Badan Riset Inovasi Nasional atas dukungan dan kerjasamanya dalam membantu penulisan makalah ulasan singkat (*short review*) di jurnal ini. Dukungan dalam bentuk pemikiran, penyediaan bahan-bahan referensi, diskusi teknis dan pengalaman di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlar, M., Callow, M. (2003). The development of foul-release coatings for seagoing vessels. *Journal of Marine Design and Operations* 4, 11-23.
- Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F.P., Conley, D.J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D. and Isensee, K. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 359 (6371).
- Diego, Y., Kiil, S., Johansen, K.D. (2004). Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings*, 50, 75-104.
- Elviliana, E., Suhartini, S., Hidayat, N., & Oechsner, H. (2022). A mini-review on anaerobic digestion of Indonesian macroalgae biomass: present scenario and future scope. *Advances in Food Science, Sustainable Agriculture and Agroindustrial Engineering*, 5(2). <https://doi.org/10.21776/ub.afssae.2022.005.02.5>
- Iswadi, A., Porter, J. S., Bell, M. C., Garniati, L., Harris, R. E., & Priyotomo, G. (2022). Establishing an Agenda for Biofouling Research for the Development of the Marine Renewable Energy Industry in Indonesia. *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 10, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/jmse10030384>
- Kojima, R., Miyata, O., Shibata, T., Senda, T. (2016). Leaching Phenomena of Antifouling Agents from Ships` Hull Paints. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 6, 269-278
- Laidlaw, F.B. (1952). The history of the prevention of fouling. *Marine Fouling and Its Prevention* 580, 211-22.
- Lagerström, M., Lindgren, J.F., Holmqvist, A., Dahlström, M. and Ytreberg, E. (2018). In situ release rates of cu and zn from commercial antifouling paints at different salinities. *Marine Pollution Bulletin* 127, 289-296.
- Leidonald, R., Muhtadi, A., Lesmana, I., Harahap, Z. and Rahmadya, A. (2019). Profiles of temperature, salinity, dissolved oxygen, and ph in tidal lakes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing* 260 (1)
- Nuraini, L., Prifiharni, S, Priyotomo, G., Sundjono. (2017a). The corrosivity and performance evaluation of antifouling paint exposed in seawater Muara Baru Port, Jakarta. *J Phys Conf Ser*, 817, 012068.
- Nuraini, L., Prifiharni, S., Priyotomo, G., Sundjono, Gunawan, H. (2017b). Evaluation of anticorrosion and antifouling paint performance after exposure under seawater Surabaya-Madura (Suramadu) bridge. *AIP Conf Proc* 1823, 020101-1-020101-7.
- Priyotomo, G. (2022). The behavior of metal release on 430 stainless steel cookware in citric acid solution by cyclic method. *AIP Conference Proceedings*, 2561. <https://doi.org/10.1063/5.0113749>
- Priyotomo, G., Putrayasa Astawa, I.N.G. (2014). The Effect of Fe-Enrich Phase on The Pitting Corrosion Resistance of Al Alloy in Various Neutral Sodium Chloride Solutions.

- International Journal of Science and Engineering* 7(2), 143-149.
- Priyotomo, G., Nuraini, L., H. Gunawan, H., Triwardono, J., Sundjono, Prifiharni, S. (2021). A Preliminary Field Study of Antifouling Paint Performance After Short Exposure in Mandara Bali, Indonesia. *International Journal of Engineering TRANSACTIONS A: Basics* 34(04),976-986.
- Priyotomo, G., Prifiharni, S., Nuraini, L., Royani, A., Sundjono, Gunawan, H. (2022). The Performance of Antifouling Paint for Prolonged Exposure in Madura Strait, East Java Province, Indonesia. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology* 12(2), 732-737.
- Rodríguez, J.J.S., Hernández, F.J.S., and González-González, J.E. (2002). XRD and SEM studies of the layer of corrosion products for carbo steel in various different environments in the province of Las Palmas (The Canary Islands, Spain), *Corrosion Science* 44 (11), 2425–2438.
- Sundjono, Priyotomo, G., Nuraini, L. (2017). The Selection of Magnesium alloys as Sacrificial Anode for the Cathodic Protection of Underground Steel Structure. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 51(2),78-82.
- Sundjono, Priyotomo, G., Nuraini L, Prifiharni S. (2017). Corrosion behavior of mild steel in seawater from northern coast of java and southern coast of bali, Indonesia. *J Eng Technol Sci* 49(6), 770-784.
- Voulvoulis, N., Scrimshaw, M.D., Lester, J.N. (2002). Comparative environmental assessment of biocides used in antifouling paints. *Chemosphere* 47(7), 789-795.
- Yeber, D.M., Kiil, S., Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings* 50(2),75-104.

