



KEMENTRIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN

CAT ANTIFOULING

UNTUK PENANGANAN KERUSAKAN

STRUKTUR JEMBATAN AKIBAT BIOTA PENEMPEL



KEMENTRIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN

Hadi Gunawan Sonjaya

CAT ANTIFOULING UNTUK PENANGKATAN KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN AKIBAT PENEMPEL



2016

Penyusun
Hadi Gunawan Sonjaya

**CAT ANTIFOULING
UNTUK PENANGANAN
KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN
AKIBAT BIOTA PENEMPEL**



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
www.pusjatan.pu.go.id

CAT ANTIFOULING UNTUK PENANGANAN KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN AKIBAT BIOTA PENEMPEL

Hadi Gunawan Sonjaya
Desember, 2016

Cetakan Ke-1 2016, 72 halaman

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Cover luar :

Foto atas: Jembatan Suramadu (pengamatan lapangan 21 Desember 2016)

No. ISBN : 978-602-264-159-9

Kode Kegiatan : LJ8 2432 051 001 103 H

Kode Publikasi :

Kata kunci : Korosifitas, Struktur Jembatan, Laut, Biota, Antifouling

Ketua Program Penelitian:

(Hadi Gunawan Sonjaya, Puslitbang Jalan dan Jembatan)

Ketua Sub Tim Teknis:

(Prof. (R). Ir. Lanneke Tristanto, Puslitbang Jalan dan Jembatan)

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2016 pada paket pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Cat Antifouling Untuk Penanganan Kerusakan Struktur Jembatan Akibat Biota Penempel.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Badan Penelitian dan Pengembangan

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan

info@pusjatan.pu.go.id

PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU-PERA dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIK SUB TIM TEKNIK

Tim Teknis

Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc.
Ir. Agus Bari Sailendra, MT
DR. Ir. Poernornosidhi, M.Sc
DR. Drs. Max Antameng, MA
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc
Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Prof.(R).DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc
Ir. GJW Fernandez
Ir. Joko Purnomo, MT
Ir. Soedarmanto Darmonegoro
Ir. Lanny Hidayat, M.Si
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc
DR. Ir. Doni J. Widiatono, M.Eng.Sc
Ir. Teuku Anshar
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc
Ir. Yayan Suryana, M.Sc
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc
Ir. Saktyanu, M.Sc
Ir. Herman Darmansyah
Ir. Rachmat Agus
DR. Ir. Hasroel, APU
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE. Ph.D
Kemas Ahmad Zamhari
Dr. Ir. Mochammad Amron, M.Sc

Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Herbudiman, ST., MT.
Abinhot Sihotang, ST., MT.
Ir. Samun Haris, MT.
Ir. Wawan

PRAKATA

Penyusunan naskah ilmiah ini bertujuan untuk menguraikan aspek-aspek yang harus dikaji dalam melakukan penanganan kerusakan struktur jembatan di lingkungan air laut akibat biota penempel.

Pada tahun anggaran 2016, telah dilakukan penelitian dan pengkajian tentang pengaruh biota laut terhadap laju kerusakan struktur jembatan, jenis dan karakteristik biota laut penempel serta uji coba penanganan dengan menggunakan lapis lindung cat yang mengandung biosida CuO (tembaga oksida) sebagai zat aktif anti biota yang selanjutnya disebut dengan lapis lindung cat *antifouling*.

Di dalam naskah ilmiah ini diterangkan secara umum tentang faktor-faktor utama yang dapat mempercepat laju penempelan biota pada permukaan struktur jembatan serta persyaratan minimum ketebalan lapis lindung cat *antifouling* yang akan diaplikasikan pada permukaan struktur jembatan.

Semoga dengan pembahasan dalam naskah ilmiah ini dapat lebih membuka wawasan pengetahuan yang diperlukan untuk pengembangan teknologi perencanaan dan pemeliharaan jembatan.

Bandung, Februari 2017

Penyusun,

Hadi Gunawan Sonjaya

Daftar Isi

	PRAKATA	iii
	DAFTAR ISI	iv
	DAFTAR GAMBAR	vi
	DAFTAR TABEL	viii
01	PENDAHULUAN	01
	A. Latar Belakang	01
	B. Tujuan dan Sasaran Penulisan Naskah Ilmiah	03
	C. Ruang Lingkup	04
	D. Sistematika Pembahasan Naskah Ilmiah	05
02	KOROSIFITAS STRUKTUR	08
	A. Umum	09
	B. Korosi pada Material Logam	09
	C. Korosi pada Beton	11
	D. Korosi Atmosferik	12
	E. Korosi pada Lingkungan Air Laut	25
03	KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN AKIBAT BIOTA LAUT	28
	A. Teori Dasar Biota Penempel	29
	B. Karakteristik Mikroorganisme	30
	C. Karakteristik Makroorganisme	34
	D. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Biota	37
	1. Letak Geografis	38
	2. Jarak Dari Pantai	38
	3. Kedalaman	38
	4. Temperatur dan Musim	40
	5. Kondisi Pasang Surut	40
	6. Kualitas Air	41
	a. Salinitas	41
	b. Cahaya	41
	c. Ketersediaan Nutrisi	42
	d. Lumpur	42
	e. Faktor Kimia	42
	f. Persaingan Antar Spesies	43
	g. Aktivitas Manusia	44
	E. Kerusakan Struktur Jembatan Akibat Biota Penempel	44

04	METODA PENANGANAN BIOTA PENEMPEL	48
	A. Pendahuluan	49
	B. Sistem Antifouling	49
	1. Penanganan Secara Kimia	50
	2. Penanganan Secara Mekanis	53
	3. Penanganan Secara Biologi	55
05	KAJIAN PENGGUNAAN CAT ANTIFOULING PADA TIANG PANCANG JEMBATAN	56
	A. Pengumpulan Data	57
	1. Pembuatan Contoh Uji	57
	2. Penempatan Contoh Uji	58
	3. Monitoring Contoh Uji	61
06	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	62
	A. Hasil Monitoring Kinerja Cat	63
	B. Identifikasi Sifat Fisik Lingkungan Laut	66
	C. Identifikasi Mikro-fouling	67
	D. Prototipe Formula <i>Antifouling</i> Tipe Statis	69
07	PENUTUP	72
	A. Kesimpulan	73
	B. Saran	74
	DAFTAR PUSTAKA	75

Daftar Gambar

3.1.	Tahapan Pembentukan Biota Penempel	30
3.2.	Konsep Model Struktur Biofilm	32
3.3.	Penempelan Biota Laut pada Tiang Pancang	34
3.4.	Penempelan Biota pada Kapal Laut	35
3.5.	Kerangan-Kerangan (<i>Mussela</i>)	36
3.6.	Teritip (<i>Ballanus Sp</i>)	37
3.7.	Pengamatan Pertama Kepadatan Teritip yang Menempel Pada Tiang Pancang	45
3.8.	Pengamatan Ke Dua Kepadatan Teritip yang Menempel Pada Tiang Pancang	45
3.9.	Perbedaan Visual Kondisi Beton yang Ditempeli Teritip Dengan yang Tidak Ditempeli Teritip	46
3.10.	Lapisan <i>Coating</i> HDPE yang Rusak Akibat Biota Laut	47
4.1.	Perlindungan Terhadap Biota Penempel Menggunakan <i>Cat Antifouling</i>	52
4.2.	Pengelupasan Biota Penempel Secara Mekanis (<i>Scrapping</i>)	54
4.3.	Pengelupasan Biota Penempel Secara Mekanis (<i>High Pressure Water Jetting</i>)	54
5.1.	Contoh Uji Penelitian Sesuai ASTM 3623-78	58
5.2.	Pemasangan Contoh Uji di Dermaga Muara Baru Jakarta	59
5.3.	Pemasangan Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Suramadu Jawa Timur	60
5.4.	Pemasangan Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Bali Mandara	60

6.1.	Hasil Monitoring Contoh Uji di Dermaga Muara Baru Jakarta	63
6.2.	Hasil Monitoring Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Suramadu Jawa Timur	64
6.3	Hasil Monitoring Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Bali Mandara	64
6.4	Kondisi Lapis Lindung Cat yang Mulai Mengembang Setelah Periode Perendaman 6 Bulan	65
6.5	Pengaruh Biosida Kloramfenikol Terhadap Pertumbuhan Bakteri	68
6.6	Pengaruh Minyak Atsiri dan <i>Amoksisilin</i> Terhadap Pertumbuhan Bakteri	68
6.7	Skema Pengujian Efektivitas Kinerja Cat Antifouling	70

Daftar Tabel

3.1.	Golongan Utama Mikroorganisme Laut Penempel	35
6.1.	Kondisi Fisik Lingkungan Air Laut	66
6.2.	Identifikasi Bakteri Penempel Berdasarkan Gen 16S RNA	67
6.3.	Prototipe Formula <i>Antifouling</i> Tipe Statis	70



BAB ———

01

| PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan suatu negara kepulauan terbesar di dunia yang terdiri dari 17.508 pulau dengan garis pantai sepanjang 81.000 km. Garis pantai tersebut merupakan terpanjang kedua di dunia setelah Kanada, (Dahuri et al., 1995; Dahuri, 1998). Sejumlah besar (lebih dari 10.000 buah) dari pulau-pulau tersebut merupakan pulau-pulau berukuran kecil yang tersebar dari Sabang hingga Merauke. Untuk memperlancar roda perekonomian, maka antara satu pulau dengan pulau lainnya, banyak dibangun prasarana transportasi berupa jembatan beton atau jembatan komposit antara bahan beton dan baja, serta banyak pula dibangun pelabuhan laut maupun dermaga yang saat ini banyak mengalami kerusakan, sehingga memerlukan suatu perbaikan dan perawatan yang rutin.

Peristiwa korosi atau degradasi komponen beton dan baja jembatan di lingkungan laut, selain disebabkan oleh faktor-faktor atmosferik dan sifat fisik maupun kimia air laut dapat pula disebabkan oleh penempelan biota laut. Beberapa biota yang hidup di laut ada yang mengembangkan cara hidupnya dengan menempel pada benda-benda yang terendam air laut baik untuk sementara maupun permanen misalnya pada perahu dan tiang dermaga atau berupa besi misalnya kapal, beton penyangga jembatan atau jalan, dalam istilah biologi dinamakan organisme *sessilis*.

Penempelan biota pada permukaan struktur yang terendam dalam lingkungan air laut berlangsung dalam waktu yang cepat, tahapan

pertama adalah penempelan bakteri yang menghasilkan lapisan lendir, selanjutnya lapisan ini akan ditutupi oleh hewan bersel satu (*protozoa*) dan tumbuh-tumbuhan bersel satu (*diatom*). Lapisan menjadi makin tebal dan biasanya akan diikuti oleh penempelan *hydroid* dan lumut atau *Bryozoa*. Kemudian jenis-jenis biota penempel yang lebih besar akan menetap pada substrat yang lebih tebal, biasanya adalah teritip, kerang hijau atau tiram (*Romimohtarto dan Juwana, 2001*).

Penempelan biota laut pada struktur seperti pada tiang pancang atau pilar jembatan yang berada di lingkungan laut dapat menyebabkan kerusakan pada struktur-struktur tersebut akibat korosi yang dipicu oleh kehadiran biota tersebut. Beton yang ditemplei teritip, akan menjadi lebih rapuh dibandingkan dengan beton yang tidak ditemplei, hal tersebut diakibatkan oleh terbentuknya lingkungan asam di sekitar beton akibat proses metabolisme teritip, seperti diketahui lingkungan asam akan berpengaruh terhadap lemahnya ikatan hidrolis semen dengan air sehingga menyebabkan beton menjadi rapuh. kondisi tersebut akan semakin diperparah oleh adanya difusivitas air laut dan abrasi beton yang diakibatkan oleh arus air laut, sehingga laju penetrasi ion-ion klorida ke dalam beton menjadi semakin cepat, yang apabila mencapai tulangan beton dapat menyebabkan terjadinya karat pada tulangan.

Penempelan teritip juga dapat mengakibatkan kerusakan pada lapisan pelindung permukaan tiang pancang baja jembatan, senyawa asam yang dihasilkan dari metabolisme biota dan proses aktifitas biota yang

menancapkan dirinya ke dalam permukaan dalam usaha mempertahankan dirinya dari arus air laut akan merusak permukaan pelindung, sehingga lapisan tersebut rusak dengan dimulai oleh terbentuknya lubang-lubang kecil. Akibat terbentuknya lubang tersebut, air laut kemudian masuk dan memperlemah daya lekat lapis pelindung dari dalam, sehingga seiring dengan berjalannya waktu, lapisan pelindung akan rusak dan kemudian terlepas.

Salah satu cara penanggulangan yang paling banyak dilakukan saat ini adalah dengan menggunakan cat *antifouling* yaitu cat yang mengandung senyawa biosida yang biasanya terdiri dari senyawa *cupric oxide* (CuO) yang bersifat anti mikroba, cat jenis ini umumnya diaplikasikan pada kapal laut dan akan aktif apabila kapal laut tersebut bergerak (tipe dinamis), tipe *antifouling* dinamis, tidak akan bekerja secara efektif apabila diaplikasikan pada struktur bangunan bawah jembatan karena jembatan bersifat statis, sehingga perlu dicari formula cat *antifouling* yang dapat bekerja efektif pada struktur statis serta yang bersifat ramah lingkungan.

B. Tujuan dan Sasaran Penulisan Naskah Ilmiah

Tujuan dari penulisan naskah ilmiah ini adalah untuk menjelaskan tata cara pemeliharaan dan penanganan kerusakan jembatan dari kerusakan akibat pengaruh biota penempel dengan metoda perlindungan menggunakan cat *antifouling*.

Sasaran dari penulisan naskah ilmiah ini adalah sebagai berikut :

1. Menguraikan secara umum kondisi jembatan di Indonesia yang berada pada lingkungan laut atau pantai.
2. Menguraikan tentang jenis dan karakteristik biota penempel di wilayah perairan Indonesia, serta akibat yang ditimbulkannya terhadap struktur jembatan.
3. Menguraikan metode penanganan kerusakan struktur jembatan akibat biota penempel menggunakan lapis lindung cat *antifouling*.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penulisan naskah ilmiah ini adalah sebagai berikut:

1. Kajian jenis dan karakteristik biota laut penempel di perairan laut Jakarta Utara, Selat Surabaya-Madura, dan Pantai Benoa Bali.
2. Kajian penggunaan cat *antifouling* sebagai salah satu metoda penanganan kerusakan struktur jembatan akibat biota penempel.

D. Sistematika Pembahasan Naskah Ilmiah

- BAB I : Pendahuluan, berisikan latar belakang, tujuan penulisan naskah ilmiah, ruang lingkup, dan sistematika pembahasan naskah ilmiah.
- BAB II : Korosifitas struktur, berisikan tinjauan umum mengenai jenis-jenis korosi yang terjadi pada material baja dan beton, faktor-faktor yang mempengaruhinya, serta kondisi lingkungan penyebab korosi.
- BAB III : Kerusakan struktur jembatan akibat biota laut, berisikan tinjauan umum mengenai biota laut penempel baik mikro maupun makro organisme, jenis dan karakteristik, serta pengaruh yang ditimbulkannya terhadap kerusakan struktur yang berada di wilayah laut atau pantai.
- BAB IV : Metode penanganan biota penempel, berisikan gambaran umum mengenai sistem manajemen pencegahan dan penanganan struktur khususnya dari kerusakan akibat biota laut , jenis-jenis material anti biota serta penelitian-penelitian terkini tentang *antifouling*.
- BAB V : Kajian penggunaan cat *antifouling* pada tiang pancang jembatan, berisikan tentang proses kegiatan penelitian penggunaan lapis lindung cat yang mengandung *antifouling* komersial untuk digunakan sebagai metode perlindungan bagi struktur statis seperti tiang pancang jembatan.

BAB VI : Hasil penelitian dan pembahasan, berisikan data-data hasil kegiatan penelitian yang telah dilakukan beserta pembahasan-pembahasan hasil uji.

BAB VII: Penutup, berisikan kesimpulan-kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan hasil pembahasan data-data baik laboratorium maupun lapangan serta saran-saran yang diperlukan untuk penelitian lanjutan maupun perbaikan-perbaikan yang diperlukan.



BAB

02

| KOROSIFITAS STRUKTUR

BAB 02

KOROSIFITAS STRUKTUR

A. Umum

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan atau penurunan kualitas suatu material akibat bereaksi dengan lingkungannya, korosi dapat terjadi pada material logam mau pun material non logam (*Fontana G Mars, 1986*).

Korosi dapat terjadi secara cepat atau lambat bergantung pada jenis material dan kondisi lingkungan di sekitar material tersebut. Pada dasarnya seluruh lingkungan adalah korosif pada beberapa faktor, contohnya adalah angin, kelembaban, kandungan garam, polutan, dan lain-lain.

Secara umum, material anorganik lebih korosif daripada material organik, sebagai contoh korosi pada industri perminyakan akan lebih cepat terserang oleh korosi akibat serangan natrium klorida, sulfur, asam klorida dan air daripada korosi akibat serangan minyak, solar atau pun bensin.

B. Korosi pada Material Logam

Pada permukaan baja terdapat lapisan pasif baja yang tipis. Lapisan pasif ini berguna untuk melindungi baja dari korosi. Lapisan pasif baja akan bereaksi dengan larutan asam atau akan larut dalam kondisi asam. Ion-ion dari senyawa yang bersifat asam, seperti ion Cl^- dapat merusak lapisan pasif baja. Permukaan baja yang lapisan pasifnya rusak menjadi bersifat anodik.

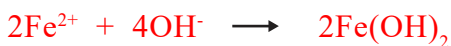
Persamaan reaksi anodik ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Elektron yang dilepaskan dari reaksi anodik menyebabkan gas O_2 dan air yang terdapat di atas permukaan baja yang masih tertutup oleh lapisan pasif bereaksi. Bagian baja ini menjadi bersifat katodik dari reaksi korosi baja tulangan dengan mekanisme sebagai berikut :



Kedua ion yang terbentuk pada anode dan katode bergabung membentuk senyawa hasil korosi. Persamaan reaksi tersebut dapat ditulis sebagai berikut:



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ sebagai bentuk awal senyawa produk korosi akan berada dipermukaan baja yang mengalami korosi, kemudian jika terdapat gas O_2 dengan konsentrasi tinggi, maka akan terbentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Jika pada waktu pembentukan senyawa $\text{Fe}(\text{OH})_3$ tersebut jumlah air tidak cukup sedangkan konsentrasi O_2 cukup maka akan terbentuk produk korosi yang berwarna merah (FeOOH), tetapi jika konsentrasi O_2 juga tidak cukup maka akan terbentuk produk korosi yang berwarna hitam (Fe_2O_3) atau yang berwarna hijau ($2\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Karena produk korosi tersebut adalah senyawa yang berpori maka proses proses korosi akan terus berlanjut asalkan terdapat konsentrasi Cl^{-} , O_2 dan H_2O yang cukup.

C. Korosi pada Beton

Beton merupakan komposit dari semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan campuran-campuran lainnya. Beton berfungsi seperti lapisan pelindung yang memberikan proteksi yang sangat baik pada baja tulangan. Selain itu, campuran semen portland dengan air akan menghasilkan kalsium silikat hidrat dan kalsium hidroksida yang bersifat basa dengan pH berkisar antara 13 -13,5. kondisi beton yang bersifat basa ini akan membuat baja tulangan dalam kondisi pasif dan tidak terkorosi.

Ketahanan terhadap korosi pada beton akan tetap terjaga selama beton dapat menahan masuknya udara dan air. Apabila selimut beton terlalu tipis atau berpori, maka kerusakan akibat korosi akan terjadi karena penetrasi air yang mengandung oksigen terlarut masuk melalui pori beton. Masuknya oksigen terlarut ini akan memicu terjadinya rangkaian sel elektrokimia yang menyebabkan terjadinya korosi.

Klorida terlarut merupakan penyebab utama terjadinya korosi dalam selimut beton. Ion klorida dapat berasal dari penetrasi air laut, atau dapat juga berasal dari air dan pasir yang digunakan dalam campuran beton. Adanya ion klorida yang bersifat agresif akan membentuk senyawa asam dan bereaksi dengan selaput pasif yang bersifat basa, sehingga selaput pasif akan rusak dan baja tulangan akan terkorosi. Korosi akibat penetrasi klorida umumnya terjadi secara setempat (*pitting corrosion*).

Gas karbondioksida juga dapat menyebabkan terjadinya korosi pada beton, namun dengan laju yang lebih lambat daripada korosi yang disebabkan oleh penetrasi klorida. Karbonasi pada beton terjadi akibat interaksi antara gas karbondioksida di atmosfer dengan senyawa hidroksida dalam pori beton yang lembab. Adanya proses karbonasi ini menyebabkan penurunan pH beton dan menyebabkan pergeseran potensial korosi baja tulangan menjadi aktif terkorosi. Hal-hal yang mempercepat penetrasi karbondioksida pada beton antara lain disebabkan oleh rendahnya kandungan semen dalam campuran beton, tingginya rasio air/semen, pengeringan beton yang kurang memadai, dan adanya retakan serta cacat pada permukaan beton. Proses karbonasi ini juga dapat meningkatkan porositas beton, sehingga tidak mampu lagi mencegah penetrasi ion klorida ke dalam beton.

D. Korosi Atmosferik

Korosi atmosferik adalah salah satu bentuk korosi yang telah lama dikenal, lingkungan atmosfer adalah suatu lingkungan dimana logam sangat sering terekspos. Korosi atmosferik merupakan suatu hasil interaksi antara suatu bahan, terutama logam dengan lingkungan atmosfer nya. Ketika berada di lingkungan atmosfer pada suhu ruang dan dengan kurangnya faktor kelembaban, kebanyakan logam secara langsung akan membentuk suatu lapisan film oksida padat, jika oksida tersebut dalam keadaan stabil, laju korosi akan berjalan sangat lambat.

Korosi atmosferik akan terjadi bila terdapat lapisan tipis suatu zat cair yang berada di atas oksida logam pada kondisi kelembaban *ambient*. Korosi atmosferik terdiri dari dua jenis, yaitu korosi atmosferik ”kabut (*damp*)” yang terbentuk dengan adanya uap air dan unsur-unsur polutan, dan korosi atmosferik ”basah (*wet*)” yang terjadi akibat air hujan atau air lainnya bersama-sama dengan polutan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju korosi dapat ditinjau dari logamnya dan korosifitas atmosfer sekitarnya. Faktor-faktor spesifik yang mempengaruhi korosifitas atmosfer adalah kelembaban nisbi (% RH), lamanya pembasahan (*time of wetness*) curah hujan, kadar debu, gas diudara. Disamping itu, temperatur dan kecepatan dan arah angin, pola aliran udara di atas permukaan logam menentukan laju transfer kontaminan pada permukaan logam tersebut.

1. Kandungan Debu

Atmosfer industri dan urban mengandung bermacam-macam polutan-polutan dari partikel debu yang tersuspensi seperti karbon (C), senyawa karbon. metal oksida, H_2SO_4 , $(NH_4)_2SO_4$, NaCl dan garam-garam lainnya. Sedangkan dalam atmosfer marine mengandung partikel-partikel garam NaCl dari percikan air laut. Partikel-partikel NaCl bisa terbawa oleh angin sampai jarak tertentu, tergantung dari besar dan arah anginnya.

Debu-debu tersebut berkombinasi dengan kelembaban sehingga dapat menginisiasi korosi melalui pembentukan sel galvanik/

differential aeration cell atau dikarenakan sifat higroskopiknya sehingga mampu membentuk elektrolit dipermukaan logam.

Udara yang bebas debu, kecenderungannya relatif kecil untuk menyebabkan korosi dibandingkan dengan udara yang tercemar oleh sejumlah besar polutan-polutan partikel debu, khususnya yang mudah larut dalam air atau partikel-partikel debu dimana H_2SO_4 teradsorpsi .

2. Gas-Gas di Atmosfer.

Disamping oksigen dan nitrogen, lingkungan atmosfer mengandung gas-gas lainnya. Pada umumnya atmosfer pedesaan pengaruhnya relatif kecil terhadap korosi , karena tidak tercemar oleh polutan-polutan agresif. Sedangkan atmosfer perkotaan, industri dan marine tercemar dengan polutan-polutan korosif seperti CO , SO_2 , H_2S , NO_x , $NaCl$ dan sebagainya.

Level polutan-polutan yang menentukan intensitas efek korosifitas tergantung pada lokasinya, termasuk jarak dari pesisir pantai, jumlah / padatnya lalu lintas kendaraan, jenis dan banyaknya aktivitas industri disekitarnya.

Konstituen korosif yang sangat dominan di atmosfer industri dan urban adalah SO_2 , yang sebagian besar berasal dari gas buangan hasil pembakaran bahan bakar seperti minyak, *gasoline* dan batu bara. Gas SO_2 di udara dapat terabsorpsi oleh butiran air atau partikel-partikel debu yang lembab menghasilkan asam sulfat

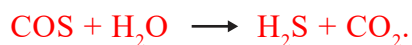
(H_2SO_4). Oleh karena itu, konsentrasi H_2SO_4 dalam lingkungan tersebut sangat tinggi sehingga dapat memperpendek umur pelayanan dari struktur logam.

Efeknya sangat signifikan khususnya terhadap logam-logam seng (Zn), cadmium (Cd), nikel (Ni) dan besi (Fe), tetapi pada logam-logam yang tahan terhadap H_2SO_4 seperti plumbum (Pb), aluminium (Al) dan stainless steel, efeknya kurang signifikan. Logam tembaga membentuk lapisan protektif *basic copper sulfate* yang lebih tahan dibandingkan dengan produk korosi yang terbentuk pada permukaan logam nikel atau *Coppernickel* (70% Cu – 30 % Ni).

Disamping itu, lingkungan *atmosfir* urban dan industri kadang-kadang tercemar oleh gas NO_x , yang mana dapat mempercepat korosi.

Pada umumnya gas CO_2 dan H_2S ada di udara dalam jumlah relatif kecil. Gas H_2S meskipun dalam jumlah yang sangat kecil dapat menyebabkan tarnis pada logam tembaga (Cu), tersusun oleh senyawa campuran Cu_2S , CuS serta Cu_2O .

Dalam adanya air, *carbonyl sulfide* (COS) terdekomposisi menjadi H_2S



3. Kelembaban Nisbi (*Relative Humidity % RH*).

Konsentrasi uap air di udara dinyatakan dengan kelembaban nisbi (% RH) atau titik embun (*dew point*). Kelembaban nisbi adalah perbandingan antara tekanan uap air sebenarnya pada temperatur ambien dengan tekanan uap jenuh dari air pada temperatur tertentu.

4. Adsorpsi Lapisan Air

Jumlah dan ketebalan lapisan air/elektrolit yang teradsorpsi pada permukaan logam tergantung pada kelembaban nisbi dari atmosfer, sifat-sifat fisik dan kimia dari produk korosi dan partikel-partikel debu.

Permukaan logam akan lebih mudah dibasahi melalui absorpsi air dari atmosfer atau kondensasi uap air, bilamana polutan non agresif seperti partikel-partikel padatan / debu dan garam-garam atau produk korosi bersifat higroskopis, derajat higroskopisnya tergantung sifat-sifat fisik dan kimia dari garam-garam, produk korosi dan partikel-partikel debu tersebut.

Absorpsi uap air, yang terjadi di atas kelembaban nisbi tertentu disebut sebagai kelembaban nisbi kritis (*critical relative humidity*). Kelembaban nisbi kritis bervariasi dari 70-85 % tergantung jenis dan kadar kontaminan-kontaminan atmosfer. Pada umumnya *Critical relative Humidity* untuk logam besi, tembaga, nikel dan seng diantara 50 – 70 %.

Jumlah dan ketebalan lapisan air pada permukaan logam yang terkorosi sangat berpengaruh terhadap laju/proses korosi selanjutnya. Korosi meningkat secara signifikan, bilamana kelembaban nisbi naik diatas harga dimana garam-garam mulai mengabsorpsi air dan melarutkan garam-garam tersebut.

Lapisan fasa air pada permukaan logam disamping di sebabkan oleh kelembabaan nisbi, juga bisa berasal dari presipitasi air hujan, kabut atau embun yang terbentuk melalui kondensasi uap air pada permukaan logam pada kondisi dingin.

5. Embun

Pengembunan terjadi bilamana temperatur permukaan logam di bawah temperatur atmosfer/*dew point* (titik embun). Pembentukan embun terjadi di luar ruangan pada malam hari, bilamana temperatur permukaan logam menurun melalui perpindahan temperatur dari permukaan logam ke udara atau terjadi pada pagi hari dimana temperatur udara meningkat dengan cepat daripada temperatur permukaan logam.

Embun merupakan salah satu penyebab utama terhadap korosi logam, khususnya bilamana struktur logam berada pada tempat tersembunyi, tidak secara langsung terekspos terhadap sinar matahari atau curah air hujan.

Jumlah air pada permukaan yang tertutup oleh embun sekitar 10 g/m², yang mana ini lebih besar dari pada permukaan yang

tertutup oleh lapisan adsorpsi. Periode pengembunan dianggap sangat korosif, karena efek pencucian terhadap deposit atau produk korosi sangat sedikit.

Salah satu faktor yang menyebabkan embun bersifat sangat korosif adalah kontaminan-kontaminan agresif dari atmosfer, yang terabsorpsi oleh embun tersebut dalam jumlah yang sangat besar. Harga pH bisa lebih tinggi dari pH 3 dalam lingkungan industri dan pantai yang sangat tercemar oleh polutan-polutan agresif, konsentrasinya bisa mencapai masing-masing 0.2 g/l sulfat dan 0.35 g/l Cl⁻. Dimana konsentrasi tersebut sekitar 100 kali lebih besar pada saat adanya curah hujan pada lokasi yang sama.

6. Curah Hujan

Adanya curah hujan menyebabkan lapisan air/elektrolit lebih tebal pada permukaan logam dibandingkan dengan pengembunan. Ketebalan lapisan air yang tertinggal pada permukaan logam setelah curah hujan sekitar 100 g/m².

Penguapan air hujan sangat berpengaruh terhadap laju korosi, dikarenakan lapisan air pada permukaan logam semakin tebal, sehingga polutan-polutan agresif seperti SO₄⁼ dan H⁺ jumlahnya meningkat. Semakin tinggi konsentrasi SO₄⁼ dan H⁺ yang terabsorpsi ke dalam lapisan air, laju korosi logam semakin meningkat secara signifikan. Air hujan juga dapat menghilangkan

polutan non agresif (seperti partikel-partikel padatan dan garam-garam atau produk korosi yang bersifat higroskopis) dari permukaan logam, yang terbentuk selama perioda sebelumnya pada kondisi kering.

Laju korosi meningkat dengan signifikan selama periode kering-basah, dibandingkan selama periode curah hujan. Dalam atmosfer yang tercemar oleh polutan-polutan senyawa sulfur, jumlah deposit kering dari polutan tersebut jauh lebih besar dibandingkan dengan deposit basah. Hal ini dikarenakan sebagian dari deposit senyawa sulfur pada permukaan logam tercuci oleh pengaruh curah hujan.

Pengaruh curah air hujan bervariasi, tergantung apakah air hujan tersebut dapat menghilangkan lapisan protektif, debu, garam-garam dan kontaminan-kontaminan agresif, yang ada pada permukaan logam.

Pengeksposan logam secara langsung terhadap air hujan dapat menghilangkan asam H_2SO_4 yang bersifat sangat korosif, sehingga akan menurunkan laju korosinya.

7. Lamanya Waktu Pembasahan (*Time of Wetness*).

Efek korosi secara keseluruhan selama perioda waktu pengekspasan ditentukan oleh lamanya waktu pembasahan permukaan logam dan komposisi elektrolit.

Semakin lama waktu pembasahan permukaan logam oleh lapisan air/elektrolit, semakin signifikan pengaruhnya terhadap korosi atmosferik. Lamanya pembasahan sangat bervariasi dengan kondisi cuaca setempat, yang mana ini tergantung kelembaban nisbi atmosfer, lamanya dan frekuensi hujan atau penyinaran langsung oleh sinar matahari, pengembunan (*dew*), pengkabutan (*fog*), temperatur udara dan permukaan logam serta arah dan kecepatan angin.

8. Kandungan Polutan-Polutan Dalam Lapisan Air.

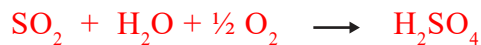
Lapisan air/elektrolit pada permukaan logam disamping dapat mengadsorpsi partikel padatan dan juga dapat mengabsorpsi dan melarutkan gas-gas dari udara. Sehingga lapisan air tersebut bisa mengandung bermacam-macam spesies deposit, ion-ion logam dari hasil proses korosi dan gas dari udara. Ditinjau dari kinetika dan termodinamika, komposisi elektrolit mempunyai peran yang sangat penting pada proses korosi.

9. Oksigen (O₂)

Oksigen dari udara mudah terabsorpsi oleh lapisan air/elektrolit, sehingga pada bagian luar dari lapisan tersebut di jenuhkan dengan oksigen. Oksigen mempunyai peranan sangat penting dalam proses korosifitas, dimana mekanisme reaksi korosi (peristiwa reduksi-oksidasi) tidak terjadi bila tidak ada unsur oksigen.

10. Sulfur Oksida (SO_x)

Jenis polutan di udara tergantung pada aktivitas di daerah tersebut. Di lingkungan industri, urban dan daerah-daerah yang banyak/padat dilalui oleh kendaraan bermotor pada umumnya jenis polutan yang dominan adalah gas SO₂, yang merupakan gas buangan hasil dari pembakaran bahan bakar yang mengandung unsur sulfur seperti minyak, gas alam, batu bara dan lain-lain. Komposisi kimia dan sifat fisik dari polutan SO₂ berubah selama transportasinya di udara. SO₂ dioksidasi pada partikel-partikel basah atau butiran air menjadi asam sulfat (H₂SO₄).



Lamanya SO₂ di udara umumnya ½ - 2 hari, yang mana ini bisa terbawa oleh angin sampai jarak ratusan kilometer. Asam sulfat sebagian dapat di netralisasi oleh amonia yang berasal dari dekomposisi biologis dari bahan-bahan/limbah organik, membentuk campuran partikel-partikel yang terdiri dari (NH₄)₂SO₄, NH₄HSO₄ dan (NH₄)₃H(SO₄)₂

Endapan senyawa sulfur yang terbentuk pada permukaan logam melalui proses sebagai berikut :

1. Adsorpsi gas SO₂ dan tumbukan partikel-partikel sulfat pada permukaan logam disebut *dry deposition*.
2. Pengambilan gas dan aerosol melalui presipitasi disebut *wet deposition*.

Jumlah endapan dari SO₂ sebanding dengan konsentrasinya di

udara dan laju endapannya berbeda-beda dengan perbedaan jenis logam (pada logam besi $[Fe] > seng [Zn] > tembaga [Cu] > aluminium [Al]$). SO_2 di absorpsi dalam jumlah relatif besar pada permukaan baja berkarat dalam kelembaban nisbi tinggi di banding dengan logam tembaga dan aluminium.

Laju *dry deposition* dari partikel-partikel sulfat sekitar satu orde lebih rendah dari SO_2 . Polutan sulfat yang di endapkan melalui *wet deposition* mempunyai umur di udara umumnya 3 - 5 hari.

Dalam daerah urban dan industri yang dekat dengan sumber emisi , konsentrasi sulfat umumnya lebih rendah di bandingkan dengan konsentrasi SO_2 .

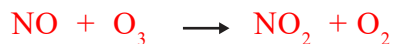
11. Nitrogen Oksida (NOx).

Emisi NOx sebagian besar berasal dari sisa gas buang hasil pembakaran bahan bakar minyak kendaraan bermotor dan generator.

Dalam proses produksi energi, NOx yang diemisikan dioksidasi secara berantai di udara menjadi NO_2 .



Pada jarak yang lebih jauh dari sumbernya dioksidasi oleh ozon (O_3)



Polutan NO_2 sebagian besar terjadi di dekat sumber emisinya. Rasio NO_2/NO di udara bervariasi dengan waktu dan jarak dari

sumbernya, umumnya diantara 10 dan 100.

Nitrogen oksida dapat dioksidasi menjadi asam nitrat (HNO_3)



Laju oksidasinya sangat rendah, oleh karenanya kadar HNO_3 dan NO_3 sangat rendah di dekat sumber emisi. Pada jarak yang lebih jauh dari sumber emisi, *wet deposition* dari NO_3 lebih dominan dibandingkan dengan *dry deposition*, sebaliknya di dekat sumber emisi, *wet deposition* lebih rendah daripada *dry deposition*, karena kelarutan NO dan NO_2 dalam air relatif rendah.

12. Klorida (Cl)

Endapan klorida dalam jumlah besar pada permukaan logam terjadi di lingkungan atmosfer marine sebagai droplet atau kristal-kristal NaCl, yang terbentuk melalui evaporasi dari percikan air laut yang terbawa oleh angin dari laut.

Kadar klorida menurun, semakin jauh dari pantai. Laju endapan klorida disekitar pantai berkisar 5 - 1500 mg m² NaCl per hari.

Dalam lingkungan urban dan industri, laju endapan klorida, umumnya lebih rendah 10 % dibandingkan dengan SO_2 .

Sumber lain klorida adalah dari buangan sisa pembakaran batu bara dan *incinerator*. Pada umumnya batu bara mengandung kadar klorida antara 0.09 – 0.15 %. Pada pembakaran batu bara, sebagian besar klorida diemisikan sebagai gas HCl.

13. Karbon Dioksida. (CO₂).

Kadar CO₂ di udara antara 0.3 – 0.5 % volume, dan sedikit bervariasi kadarnya dari hari kehari, dikarenakan siklus dari sifat gas tersebut.

Pada kesetimbangan, persentasenya sebanding dengan konsentrasi dari orde 10⁻⁵ mole/l dalam lapisan air/elektrolit, bilamana harga pH di bawah 6.

14. Konsentrasi dari Jenis-Jenis Spesies yang Berbeda.

Konsentrasi dari bermacam-macam spesies dalam elektrolit pada permukaan logam sangat bervariasi tergantung dari parameter-parameter seperti laju endapan polutan, laju korosi dari jenis logam, interval curah hujan dan kondisi kering.

Konsentrasi dalam lapisan elektrolit akan rendah selama periode musim hujan, sebaliknya larutan akan terkonsentrasi oleh polutan selama periode musim kering.

Lapisan air dalam kontak dengan atmosfer yang sangat terpolusi oleh polutan SO₂, harga pHnya mula-mula bisa serendah sampai 2. Dikarenakan reaksinya dengan logam dan produk korosi, kemudian pH naik di atas 2.

E. Korosi pada Lingkungan Air Laut

Air laut mengandung ion-ion klorida yang dapat memberikan laju korosi maksimum, tetapi walaupun begitu laju korosi biasanya tidak akan terus menjadi bertambah karena air laut juga mengandung garam-garam Ca dan Mg yang membuat pH air laut cenderung bersifat basa. Derajat keasaman (pH) air laut berkisar antara 8 sampai dengan 8,3, tetapi dengan terbentuknya produk katodik OH^- , nilai pH di permukaan cenderung meningkat sehingga memicu terbentuknya CaCO_3 dan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ bersama-sama dengan $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Lapisan-lapisan yang terbentuk tersebut akan menghambat laju difusi oksigen sehingga laju korosi logam di dalam lingkungan air laut menjadi lebih lambat dibandingkan dengan laju korosi yang terjadi pada lingkungan air biasa.

Karena laju korosi dipengaruhi oleh keberadaan dan banyaknya oksigen, laju korosi yang paling cepat akan terjadi pada daerah pasang surut, dimana pada daerah ini akan selalu terbentuk lapisan tipis air dan ketersediaan oksigen dari udara yang cukup banyak serta produk korosi yang terjadi secara berulang-ulang dibersihkan oleh kondisi pasang-surut, akibatnya permukaan logam akan menjadi lebih cepat terkikis.

Korosi dalam lingkungan air laut juga dapat terjadi pada bahan-bahan yang dilindungi oleh lapisan pelindung organik, hal ini terjadi karena air, oksigen dan klorida akan berdifusi ke dalam lapisan pelindung tersebut, sehingga lama-kelamaan lapisan pelindung tersebut akan menjadi hancur.

Selain diakibatkan oleh unsur-unsur kimiawi, korosifitas di lingkungan air laut dapat juga disebabkan atau dipicu oleh unsur-unsur biologi seperti oleh bakteri (mikrobiologi) maupun oleh biota laut (makrobiologi), yang akan diuraikan pada bagian lain dalam naskah ini.



BAB ———

03

KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN AKIBAT BIOTA LAUT (*FOULING ORGANISM*)

BAB 03

KERUSAKAN STRUKTUR JEMBATAN AKIBAT BIOTA LAUT (*FOULING ORGANISM*)

A. Teori Dasar Biota Penempel

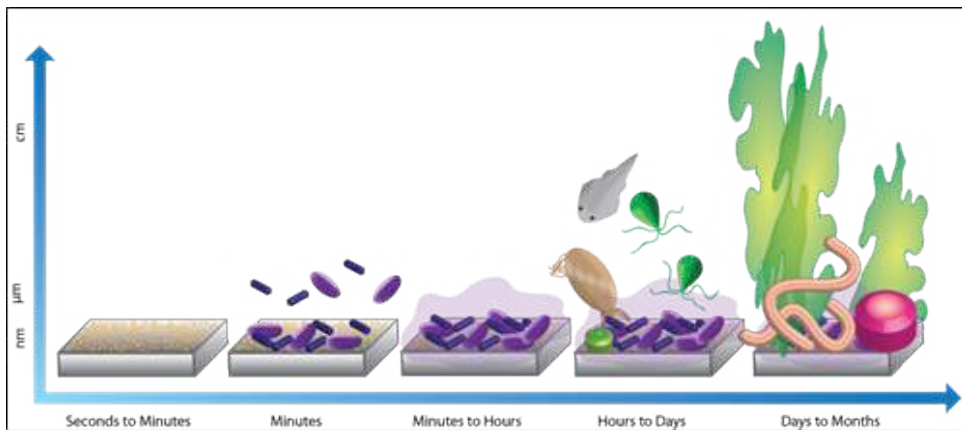
Ketika suatu struktur ditempatkan di dalam lingkungan air laut, dalam waktu yang relatif singkat struktur tersebut akan diselimuti suatu organisme yang disebut biota penempel (*fouling organism*). Pertumbuhan biota penempel merupakan suatu fenomena yang kompleks dan menarik untuk diteliti. Dalam lingkungan laut, lebih dari 400 organisme merupakan jenis biota penempel, berdasarkan ukurannya biota penempel dibagi dalam dua golongan yaitu mikroorganisme (disebut juga biofilm, *slime*, *micro-fouling*) dan makroorganisme (kerang-kerangan, alga, dan lain-lain) (M. Lehaitre, C. Compère, 2004).

Penempelan biota pada struktur secara umum terbagi ke dalam lima tahapan yaitu (Characklis, 1990; Rubio, 2002):

1. Tahap pertama: proses adsorpsi makromolekul organik dan anorganik sesaat setelah struktur tersebut terendam.
2. Tahap ke dua: pergerakan sel mikrobial ke permukaan struktur, dan bakteri mulai menempel pada permukaan.
3. Tahap ke tiga: bakteri menempel dengan kuat pada permukaan struktur, dan memproduksi ekstra seluler polimer, membentuk lapisan film mikrobial pada permukaan.
4. Tahap ke empat: mulai terbentuk koloni yang kompleks dan beragam di permukaan struktur dengan hadirnya spesies multiseluler seperti mikro alga, endapan lumpur, kotoran, dan lain-lain.

- Tahap ke lima: invertebrata laut yang berukuran lebih besar mulai menempel seperti teritip, keong, makro alga, dan lain-lain

Tahapan perkembangan biota penempel diilustrasikan seperti yang terlihat pada Gambar 3.1 berikut.



Sumber: M. Lehaitre, C. Compère, *Biofouling and Underwater Measurement*

Gambar 3.1. Tahapan Pertumbuhan Biota Penempel

B. Karakteristik Mikroorganisme

Mikroorganisme (*Biofilm/Microfouling*) berkembang dalam beberapa tahap, tahap pertama sesaat setelah suatu struktur terendam bersamaan dengan proses adsorpsi makro molekul organik (eksopolimer, protein, dan lain-lain) dan atau molekul anorganik (garam-garaman) yang terdapat pada lingkungan laut atau yang diproduksi oleh mikro organisme (Baier *et.al.* 1972; Compere *et.al.*, 2001). Penyerapan molekul-molekul tersebut membentuk suatu lapisan awal, dimana lapisan awal ini akan merubah sifat-sifat dari permukaan struktur

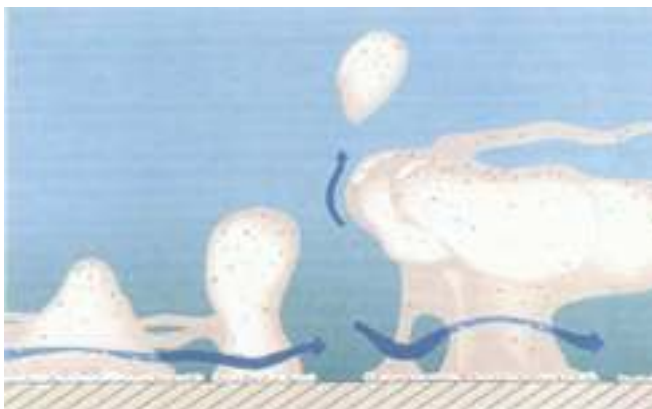
(tegangan permukaan, energi permukaan) yang memungkinkan terjadinya penempelan selanjutnya (*Fletcher et al.* 1985 ; *Zisman et al.* 1964). Penempelan bakteri sendiri terjadi dalam rentang waktu beberapa menit sampai beberapa jam setelah struktur terendam (*Marshall et.al*, 1971; *Powe et al*, 1983). Penempelan bakteri tersebut pada awalnya adalah sementara tetapi kemudian berubah menjadi permanen pada saat sekresi polimer ekstra selular menghasilkan jembatan polimer yang menghubungkan antara sel dengan permukaan struktur. Tahapan selanjutnya adalah sesuai dengan hukum alam, dimana ada produsen maka disitu ada pula konsumen, bakteri merupakan rantai makanan pertama dari golongan alga dan mahluk invertebrata kecil lainnya, dan memancing pula kehadiran konsumen tingkat ke dua seperti teritip, keong-keongan, kerang-kerangan dan lain sebagainya sehingga terbentuklah sebuah koloni biota yang menempel dan menetap pada permukaan suatu struktur yang terendam dalam lingkungan air laut dan seluruh tahapan yang terjadi berlangsung sangat cepat hanya dalam hitungan bulan. Mikroorganisme yang menempel hanya setebal kira-kira tiga nanometer di atas permukaan substrat dan mudah dibersihkan dengan cara pembilasan sederhana.

Secara umum ada dua teori yang menerangkan dan memprediksikan cara penempelan mikroorganisme pada permukaan substrat yaitu teori DVLO yang dikemukakan oleh Derjaguin, Verwey, Landau, dan Oberbek (*Derjaguin et.al*, 1941; *Verwey et.al*, 1941) serta teori berdasarkan proses termodinamika yang dikembangkan oleh Bos (*Bos et.al*, 1999).

Teori DVLO meliputi interaksi elektrostatik dan gaya Van Der Waals untuk menjelaskan proses penempelan sementara tanpa mempertimbangkan interaksi asam-basa. Termodinamika teori melakukan pendekatan terhadap interaksi elektrostatik dengan mempertimbangkan penempelan bakteri sebagai suatu equilibrium dan berdasarkan energi bebas untuk penempelan (*Pethica et.al*, 1980).

Penempelan mikroorganisme secara permanen meliputi interaksi energi yang tinggi, energi tersebut mencakup interaksi dipol-dipol, interaksi Debye, interaksi ion-dipol, ikatan hidrogen dan jembatan polimer. Struktur-struktur ekstra seluler seperti polisakarida atau protein memegang banyak peranan yang memungkinkan terjadinya penempelan permanen.

Salah satu konsep struktural dari satu spesies biofilm, telah diteliti oleh Costerton (*Costerton et.al*, 1995) seperti yang terlihat dalam Gambar 3.2.



Sumber: M. Lehaitre, C. Compère, *Biofouling and Underwater Measurement*

Gambar 3.2. Konsep Model Struktur Biofilem

Biofilm merupakan suatu struktur yang kompleks yang terdiri dari sel dan agregat atau mikrokoloni yang berada dalam suatu wilayah dengan tingkat polimerik hidrat yang tinggi (80 % - 90 % air) yang berpori dan bercelah dengan kandungan nutrisi yang tinggi, salah satu hal penting dari biofilm adalah keberagamannya (spasial dan temporal).

Ketebalan biofilm dapat bervariasi dari beberapa mikrometer sampai dengan beberapa centimeter bergantung pada komposisi media yang ditempelinya. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.1, ketebalan biofilm pada permukaan tidak homogen dimana kandungan oksigen terlarut disekitar biofilm pun berbeda-beda, ada yang aerobik (membutuhkan oksigen) dan ada pula yang anaerobik (tidak membutuhkan oksigen). Bakteri anaerobik menggunakan unsur sulfur dalam proses metabolismenya. Adanya mikroalga dapat menghasilkan proses fotosintetik yang menghasilkan oksigen, dengan kondisi oksigen yang berbeda maka nilai derajat keasaman (pH) di sekitar biofilm akan berbeda pula karena pada beberapa bakteri dalam proses metabolismenya memproduksi senyawa yang bersifat asam (*M. Lehaitre, C. Compere, 2004*). Mikroorganisme penempel juga dapat menyebabkan terjadinya proses korosi (Korosi akibat Mikroba/ Microbially Induced Corrosion (MIC)), sebagai contoh Sulfida yang dihasilkan oleh bakteri pereduksi sulfat (*Sulfate reducing bacteria*) dapat menyebabkan terjadinya korosi sumuran pada permukaan baja (*Chambers et.al, 2006*).

C. Karakteristik Makroorganisme

Makroorganisme (*Macrofouling*) menjadi perhatian serius untuk struktur-struktur yang berada di wilayah laut atau pantai dimana penempelan makroorganisme pada permukaan struktur dapat mempengaruhi berat mati struktur (Gambar 3.3) dan kecepatan laju hidrodinamik pada kapal laut (Gambar 3.4). Penelitian yang dilakukan oleh Walter (*Walters.et.al*, 1996) tentang pengaruh penempelan biota pada struktur tiang pancang jembatan, menyebutkan bahwa penempelan biota laut pada tiang pancang dapat menambah berat mati struktur tersebut sebesar 5 kilogram per meter persegi dan bergantung pada kondisi geografis wilayah serta tingkat kebersihan lingkungan laut atau pantai.



Sumber: *Walters.et.al*, 1996

Gambar 3.3. Penempelan Biota Laut pada Tiang Pancang



Sumber: <https://eramanath.wordpress.com/>, Diunduh pada 12 Februari 2017

Gambar 3.4. Penempelan Biota pada Kapal Laut

Makroorganisme terdiri dari bermacam jenis dari spesies tumbuhan serta hewan, dan secara umum diklasifikasikan ke dalam dua golongan besar “ lunak” dan “ keras”. Spesies keras mempunyai cangkang yang keras yang melindungi tubuhnya (teritip, keong, kerang), sedangkan spesies lunak tidak mempunyai cangkang pelindung (rumput laut, anemon, *bryozoa*, dan lain-lain). Tabel 3.1 berikut memperlihatkan makroorganisme utama yang terbagi dalam dua kategori sebagai berikut.

Tabel 3.1. Golongan Utama Makroorganisme Laut Penempel

Jenis Mikroorganisme	
Keras	Lunak
Teritip (<i>Barnacles Sp</i>)	Rumput laut (<i>Seaweed</i>)
Kerang (<i>Mussel</i>)	Hidroid (<i>Hydroida</i>)
Tiram (<i>Oyster</i>)	Karang lunak (<i>Soft Coral</i>)
Cacing tabung (<i>Tubeworm</i>)	Anemon (<i>Anemone</i>)

Sumber: M.Lehaitre, C. Compere, 2004

Jenis kerang-kerangan (Gambar 3.5) dan teritip (Gambar 3.6) merupakan golongan biota penempel terbanyak. Kerang-kerangan secara umum terdapat pada kedalaman 0-20 meter dan dapat membentuk suatu koloni dengan jumlah yang sangat banyak pada tahun pertama setelah suatu struktur terendam dalam lingkungan air laut sedangkan teritip ditemukan dalam daerah percikan (*splash zone*) sampai dengan kedalaman 20 meter. Makroorganisme lainnya seperti tiram, cacing tabung, alga, rumput laut, *hydroid* dan lainnya dapat menimbulkan efek penempelan serius, beberapa dari mereka bahkan dapat pula membentuk satu koloni yang berukuran sangat besar pada suatu lokasi.



Sumber: (<https://en.wikipedia.org/wiki/Mussel>, diunduh pada 12 Februari 2017)

Gambar 3.5. Kerang-kerangan (*Mussels*)



Sumber: (<https://en.wikipedia.org/wiki/Barnacles>, diunduh pada 12 Februari 2017)

Gambar 3.6. Teritip (*Barnacles Sp*)

D. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Biota Penempel

Pertumbuhan biota penempel pada suatu permukaan substrat dipengaruhi oleh banyak faktor, meliputi faktor-faktor fisika, kimia, dan biologi, antara lain:

1. Temperatur, konduktifitas, pH, kandungan oksigen terlarut, kandungan material *organic*, dan lain sebagainya;
2. Bahan dasar substrat, kekerasan, kekasaran permukaan, tegangan permukaan, hidrofobik/hidrofilik;
3. Kondisi hidrodinamik;
4. Lokasi, musim, kedalaman.

1. Letak Geografis

Berdasarkan literatur, pertumbuhan biota penempel di daerah tropis, subtropis dan daerah beriklim sedang, dijelaskan bahwa perkembangan biota penempel sangat tergantung pada kondisi geografisnya. Biota penempel umumnya lebih banyak ditemukan pada daerah tropis, hal tersebut mungkin disebabkan oleh proses perkebangbiakan yang sangat cepat dan temperatur air laut yang lebih hangat. Beberapa dari mereka juga dapat menyesuaikan diri untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

2. Jarak dari Pantai

Salah satu hal penting dari perkembangan biota penempel pada suatu struktur adalah jarak batas garis pantai terhadap lokasi struktur. Beberapa larva seperti teritip dan kerang membutuhkan waktu kurang lebih tiga minggu untuk berenang sebelum mencapai struktur dan menetap setelah mereka mencapai substrat yang cocok. Selama periode ini, mereka mungkin berbeda pola hidupnya dari tempat asal mereka.

3. Kedalaman

Parameter fisika-kimia air laut seperti salinitas, suhu, kandungan organik, dan penetrasi cahaya berhubungan erat dengan kedalaman dan perubahan ini sangat mempengaruhi jenis dan pertumbuhan *fouling*. Sebagai contoh, laju pertumbuhan biota

penempel umumnya lebih cepat dalam zona dekat ke pantai, lalu menurun seiring dengan penambahan kedalaman di setiap lokasi. Kepadatan bakteri yang diamati (P. Amran *et al.*, 2003) pada sampel kupon kaca setelah 14 bulan perendaman di kedalaman 2400 m adalah serupa dengan yang diamati pada sampel dengan perendaman selama 1-2 minggu di perairan dangkal pada suhu yang sama (sekitar 13-15 ° C). Hal ini dapat dijelaskan oleh kualitas buruk nutrisi di kedalaman ini. Bakteri yang diamati di laut dalam lebih kecil daripada yang diamati pada kedalaman dangkal dan mereka tampaknya menghasilkan lebih sedikit *exopolymers*.

Makroorganisme umumnya lebih berkembang dalam kisaran kedalaman 0-40 meter, zona kaya plankton dan dengan tingkat cahaya yang tinggi. Kebanyakan ganggang melakukan fotosintetik dan hanya dapat bertahan hidup di daerah ini yang memiliki cukup cahaya. Remis, kerang, *tubeworms*, *ascidians*, dan hidrozoa yang mengambil energi mereka dari nutrisi yang terdapat di dalam laut dan tidak membutuhkan cahaya, dapat menyebabkan *fouling* pada kedalaman yang besar. Dengan demikian, konsekuensi dari meningkatnya kedalaman biasanya adalah modifikasi dari spesies dominan dan pengurangan ketebalan penempelan. Pada kedalaman di bawah 150 m, parameter fisika-kimia air laut (nutrisi, salinitas, suhu) umumnya sama dalam laut, oleh karena itu, organisme yang sama sering diamati pada kedalaman tersebut.

4. Temperatur dan Musim

Temperatur dan musim memainkan peran penting dalam komposisi biota penempel. bakteri yang berkolonisasi pada permukaan yang terendam di daerah laut dalam mengalami fluktuasi musiman yang besar yang dipengaruhi oleh perubahan temperatur yang signifikan. Peningkatan tingkat pertumbuhan masyarakat adalah umumnya diamati dengan peningkatan suhu. Di wilayah perairan beriklim sedang atau dingin, sebagian besar pertumbuhan biota terjadi pada bulan April sampai September, meskipun di lokasi tropis pertumbuhan biota muncul sepanjang tahun. Beberapa spesies laut yang lunak juga mati kembali selama periode musim dingin dan bertahan dalam bentuk planktonik.

5. Kondisi Pasang Surut

Penempelan beberapa organisme sangat tergantung pada arus air (hembusan angin dan gelombang), yang membawa larva dari pantai ke lokasi substrat. Ganggang sangat dipengaruhi oleh tingkat kecepatan gelombang. Beberapa spesies sangat dipengaruhi oleh pergerakan air, misalnya *hydroid* merupakan spesies yang sangat peka terhadap pergerakan air (Riedl, 1971), arah koloni mereka agar tegak lurus dengan arah arus utama air laut yang memungkinkan mengandung oksigen dan pasokan makanan lebih besar. Morfologi *hydroid* juga bervariasi antara yang hidup di perairan dangkal dengan di perairan dalam akibat perbedaan arus air.

6. Kualitas Air

a. Salinitas

Total nilai salinitas air laut umumnya sekitar 35‰, dalam lingkungan air laut tertutup, umumnya bervariasi dari 40‰, jika penguapan lebih tinggi dari masuknya air tawar (contoh: Laut Merah) hingga 10‰ jika penguapan rendah (contoh: Laut Baltik). Dalam beberapa muara, salinitas mungkin lebih rendah dari 10‰, terutama untuk sungai dengan kondisi iklim ekstrim seperti musim tropis, ketika banyak dihasilkan air tawar. Oleh karena itu, faktor ini akan mempengaruhi biologi spesies sebagai fungsi dari lokasi. Beberapa organisme seperti cacing tabung cukup toleran terhadap perubahan tingkat salinitas yang besar (2‰ sampai dengan 40‰), temperatur dan perubahan konsentrasi oksigen.

b. Cahaya

Cahaya pada dasarnya mempengaruhi sistem vital. Ganggang menghindari cahaya yang terlalu kuat, sehingga mereka umumnya berkembang dalam rentang kedalaman 10 sampai dengan 20 m. Penetrasi cahaya di sekitar struktur dapat terganggu oleh kekeruhan air khususnya diakibatkan oleh keberadaan bahan organik, plankton atau polutan dari proses aktivitas manusia. Penyebaran alga dipengaruhi oleh kehadiran pigmen, hidrodinamika, nutrisi, dan sifat substrat.

c. Ketersediaan Nutrisi

Laju aliran air laut yang rendah, pada saat awal akan mendukung pembentukan biofilm di permukaan, tapi akan menghambat dalam tahap kedua pertumbuhannya. Laju aliran yang kuat dan gaya gesek yang kuat pada permukaan akan memperlambat penempelan bakteri tetapi akan memungkinkan pertumbuhan yang cepat dari biofilm karena kontribusi nutrisi yang signifikan. Struktur yang berada di daerah dekat pantai biasanya akan lebih mudah ditempeli oleh biota dikarenakan banyaknya nutrisi yang tersedia di daerah tersebut.

d. Lumpur

Kandungan lumpur dapat mengubah jenis dan komposisi biota penempel. Akumulasi lumpur dapat mencegah menempelnya banyak organisme (*Ghobashy et al.* 1980), sebagai contoh, beberapa spesies seperti *hydroid* *Tubularia* laring, akan sulit untuk menempel pada permukaan yang tertutup lumpur, organisme lain seperti cacing tabung atau *bryozoa* dapat menempel dan bertahan hidup dalam kondisi seperti itu.

e. Faktor Kimia

Banyak faktor seperti parameter fisika-kimia air laut, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya antara lain salinitas, temperatur, musim, dan bahan organik dalam air laut dapat mempengaruhi perkembangan biota penempel. Selain hal-hal

tersebut, beberapa larva biota ternyata memproduksi suatu senyawa kimia yang dapat mengusir atau membunuh biota dewasa atau organisme pemangsa. Fusetani (*Fusetani*, 1997) telah mengidentifikasi beberapa senyawa yang menginduksi penempelan larva. Baru-baru ini, beberapa artikel melaporkan pentingnya peran biofilm pada penyelesaian masalah penempelan biota laut. Strathmann dan Branscomb (*Strathmann et al.* 1979) mengusulkan untuk mengidentifikasi fungsi senyawa kimia yang dikeluarkan oleh beberapa jenis larva atau mikroorganisme untuk digunakan sebagai salah satu metode pencegahan penempelan makroorganisme.

f. Persaingan Antar Spesies

Beberapa jenis biota penempel merupakan sumber makanan bagi jenis penempel lain, pada saat musim panas, hidrozoa akan tumbuh dengan sangat cepat dan akan mati ketika masuk musim dingin. Pada rentang waktu musim dingin tersebut, beberapa spesies biota akan hidup di atas lapisan hidrozoa sebagai makanan mereka sehingga saat musim panas kembali, hidrozoa tersebut akan mengalami kesulitan untuk menempel dan tumbuh pada lokasi tersebut dikarenakan ruang tumbuhnya telah terisi oleh pemangsa mereka.

g. Aktifitas Manusia

Beberapa organisme penempel mungkin dapat berpindah tempat akibat terbawa oleh kapal laut. Perubahan parameter lingkungan serta tingkat pencemaran yang tinggi akibat aktivitas manusia dapat menyebabkan terjadinya perubahan siklus hidup biota penempel.

E. Kerusakan Struktur Jembatan Akibat Biota Penempel

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, penempelan biota laut pada struktur seperti pada tiang pancang atau pilar jembatan yang berada di lingkungan laut dapat menyebabkan kerusakan pada struktur-struktur tersebut akibat korosi yang dipicu oleh kehadiran biota tersebut. Laju pertumbuhan teritip yang menempel pada tiang pancang sangatlah tinggi, contohnya seperti yang terlihat pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8 yang memperlihatkan penempelan teritip pada salah satu tiang pancang pancang beton sebuah jembatan yang berlokasi di laut Bali, dimana dalam waktu kurang lebih 5 (lima) bulan, telah terjadi peningkatan jumlah penempelan teritip pada tiang pancang yang cukup signifikan.



Sumber: Pengamatan lapangan laut Bali, Februari 2012

Gambar 3.7. Pengamatan Pertama Kepadatan Teritip yang Menempel Pada Tiang Pancang



Sumber: Pengamatan lapangan laut Bali, Juni 2012

Gambar 3.8. Pengamatan Kedua Kepadatan Teritip yang Menempel Pada Tiang Pancang

Beton yang ditemplei teritip, akan menjadi lebih rapuh dibandingkan dengan beton yang tidak ditemplei, hal tersebut diakibatkan oleh terbentuknya lingkungan asam di sekitar beton akibat proses metabolisme teritip, seperti diketahui lingkungan asam akan berpengaruh terhadap lemahnya ikatan hidrolis semen dengan air sehingga menyebabkan beton menjadi rapuh. Salah satu contohnya adalah kondisi beton yang diamati pada salah satu kepala tiang pancang di perairan Selat Madura dalam Gambar 3.9 berikut.



Sumber: Pengamatan lapangan jembatan daerah Selat Madura, Oktober 2014

Gambar 3.9. Perbedaan Visual Kondisi Beton yang Ditemplei Teritip Dengan yang Tidak Ditemplei Teritip

Pada gambar 3.9 di atas, terlihat kondisi beton yang secara visual menjadi lebih berpori dan lebih rapuh akibat adanya teritip yang menempel pada permukaan beton, kondisi tersebut akan semakin diperparah oleh adanya penetrasi air laut dan abrasi beton yang diakibatkan oleh arus air laut, sehingga laju penetrasi ion-ion klorida

ke dalam beton menjadi semakin cepat, yang apabila mencapai tulangan beton dapat menyebabkan terjadinya karat pada tulangan. Penempelan teritip juga dapat mengakibatkan kerusakan pada lapisan pelindung permukaan tiang pancang baja jembatan, baik yang berupa *coating* ataupun *painting*. Gambar 3.10 di bawah ini adalah satu contoh kerusakan lapisan pelindung tiang pancang oleh penempelan teritip.



Sumber: Pengamatan lapangan jembatan daerah Selat Madura, Oktober 2014

Gambar 3.10. Lapisan Coating HDPE yang Rusak Akibat Biota Laut

Senyawa asam yang dihasilkan dari metabolisme biota dan proses aktivitas biota yang menancapkan dirinya ke dalam permukaan dalam usaha mempertahankan dirinya dari arus air laut akan merusak permukaan pelindung, sehingga lapisan tersebut rusak dengan dimulai oleh terbentuknya lubang-lubang kecil. Dengan adanya lubang tersebut, air laut kemudian masuk dan memperlemah daya lekat lapis pelindung dari dalam, sehingga seiring dengan berjalannya waktu, lapisan pelindung akan terlepas dan kemudian pecah.



BAB ———

04

METODA PENANGANAN BIOTA PENEMPEL

BAB 04

METODA PENANGANAN BIOTA PENEMPEL

A. Pendahuluan

Kalimat kunci dari sebuah manajemen penanganan adalah “ mencegah lebih baik dari pada memperbaiki”, dengan kata lain, pencegahan adalah yang paling efektif dari segi biaya dan lebih menjaga lingkungan daripada memperbaiki kerusakan struktur yang terjadi akibat pengaruh biota penempel. Pencegahan khususnya sangat penting untuk struktur-struktur yang akan ditempatkan di lingkungan air laut mengingat sulitnya mendeteksi potensi kerusakan yang terjadi serta sulitnya melakukan penanganan struktur yang telah terendam dalam air laut. Metode-metode pencegahan yang dapat dilakukan diantaranya adalah:

1. Pencegahan penempelan biota laut;
2. Pencegahan pertumbuhan biota laut penempel;
3. Pembersihan biota penempel yang telah terjadi.

Sampai dengan saat ini, telah banyak dihasilkan metode-metode atau produk-produk yang digunakan dalam rangka mengatasi permasalahan kerusakan yang diakibatkan oleh biota penempel baik dengan cara mekanis, kimia maupun biologi.

B. Sistem *Antifouling*

Sistem *antifouling* didefinisikan pada *International Convention on the Control of Harmful Antifouling Systems on Ship* (AFS) sebagai “Pelapisan, pengecatan, perawatan permukaan, atau peralatan yang digunakan untuk mengontrol atau mencegah penempelan organisme

laut yang tidak diinginkan”. Prakteknya, beberapa metode pelapisan (*coating*) tidak hanya berfungsi untuk mencegah penempelan biota tetapi juga untuk mencegah terjadinya korosi akibat air laut dan fluktuasi temperatur (*Chambers et.al.,2006*). *Antifouling* terbagi dalam dua kategori, yaitu:

1. *Antifouling* yang mengandung biosida atau bahan aktif tak beracun yang secara perlahan terlarut ke dalam air laut, menghalangi penempelan organisme laut pada permukaan, dan
2. *Antifouling* yang mencegah serangan organisme laut, biasanya dari jenis lapisan logam.

Cara-cara penanggulangan penempelan biota laut, terbagi dalam tiga jenis metode yang secara umum digunakan hingga saat ini, yaitu:

1. Cara kimia, melalui penggunaan senyawa-senyawa kimia sebagai biosida yang umumnya bersifat racun bagi biota;
2. Cara mekanis, melalui penggunaan peralatan mekanis untuk membersihkan biota laut penempel;
3. Cara biologi, melalui penggunaan hasil metabolisme, ekstrak biota laut, atau bahkan pemanfaatan biota laut itu sendiri dalam siklus rantai makanan.

1. Penanganan Secara Kimia

Cat *antifouling* (Gambar 4.1) pertama kali dipatenkan pada tahun 1625, yang mengandung tembaga dan logam berat, pada tahun-tahun setelahnya, timbal, arsenik, merkuri dan derivatnya

sering digunakan sebagai biosida dalam cat *antifouling* tapi kemudian penggunaan bahan-bahan tersebut dilarang karena menimbulkan masalah pencemaran lingkungan. Walaupun begitu, penggunaan tembaga sebagai *booster* biosida tetap masih digunakan sampai saat ini dengan persyaratan kandungan maksimum tertentu (Thomas et.al, 2005).

Tributyltin (TBT) pertama kali digunakan sebagai biosida *self polishing copolymer* pada tahun 1976, dan kemudian secara luas dipergunakan sebagai zat aktif *antifouling* karena sangat beracun walaupun dalam konsentrasi yang rendah dan efektif membunuh biota laut penempel. Tingkat bahaya racun dari senyawa ini, ternyata diketahui berpengaruh juga terhadap kehidupan dan perkembangan biota laut lainnya selain biota penempel sehingga mengganggu kesetimbangan ekosistem laut (Ten Hallers-Tjabbes et.al., 2003), sehingga pada tahun 2003 IMO *Antifouling Convention* melarang secara global penggunaan zat aktif TBT sebagai *antifouling*. Saat ini masih banyak industri cat yang menggunakan biosida tembaga oksida (CuO) dan *booster* seng oksida (ZnO) sebagai kandungan aktif cat *antifouling* dengan pembatasan minimum kandungan sebesar 800 ppm atau sesuai dengan kebijakan lingkungan masing-masing wilayah.



Sumber: <http://www.coating.co.uk/antifouling-paints/>, diunduh Januari 2017

Gambar 4.1. Perlindungan Terhadap Biota Penempel Menggunakan Cat Antifouling

Pengembangan bahan aktif bebas biosida yang lebih ramah lingkungan hingga saat ini masih terus dikaji dan dikembangkan misalnya dengan menggunakan *silicon* atau teflon yang menghasilkan suatu permukaan yang sangat halus dan licin sehingga menyulitkan biota untuk menempel pada permukaannya. Material ini bekerja efektif dengan metoda hidrodinamik yaitu bekerja pada kondisi dinamis, contohnya pada saat digunakan untuk perlindungan pada lambung kapal laut atau baling-baling, saat bergerak maka biota laut yang telah menempel

akan terlepas dengan sendirinya akibat licinnya permukaan substrat. Oleh karena sifatnya tersebut, material *silicon* dan teflon tidak akan efektif jika digunakan sebagai lapisan pelindung pada struktur-struktur yang statis (*Chambers et.al., 2006*).

2. Penanganan Secara Mekanis

Cara sederhana untuk menanggulangi biota laut yang menempel pada permukaan substrat yaitu dengan cara pembersihan menggunakan peralatan mekanis, misalnya pengelupasan (Gambar 4.2) atau penyemprotan permukaan dengan menggunakan air bertekanan tinggi (Gambar 4.3) (*Granhag et al., 2004*). Cara ini biasanya digunakan untuk membersihkan lambung kapal atau baling-baling serta peralatan lain yang dapat diangkat ke permukaan. Struktur-struktur atau peralatan yang secara permanen selalu terendam dalam air laut dan tidak dapat diangkat ke permukaan seperti tiang pancang jembatan akan sangat sulit untuk dibersihkan menggunakan cara mekanis ini.



Sumber: <https://eramanath.wordpress.com/>, diunduh Januari 2017

Gambar 4.2. Pengelupasan Biota Penempel Secara Mekanis (*Scrapping*)



Sumber: <https://i.ytimg.com/vi/e2VedBuVtLQ/maxresdefault.jpg>, diunduh Januari 2017

Gambar 4.3. Pengelupasan Biota Penempel Secara Mekanis (*High Pressure Water Jetting*)

3. Penanganan Secara Biologi

Mungkin tidak ada cara yang lebih efektif untuk melawan alam daripada dengan alam itu sendiri. Kelemahan dari cara kimia yang beracun serta merusak ekosistem laut dan cara mekanis yang membutuhkan peralatan khusus dan kesulitan aplikasi bagi struktur statis di dalam air, menjadi salah satu pertimbangan para peneliti untuk menemukan sumber daya alam yang dapat digunakan sebagai *antifouling* yang ramah lingkungan.

Beberapa jenis bahan *antifouling* alami yang dapat menghambat pertumbuhan organisme penempel telah berhasil diisolasi dari organisme laut seperti bakteri (*Holmstrom et al.*, 1996), ganggang laut (*Abarzua et al.*, 1999, *de Nys et al.*, 1996, *Eng-Wilmot et al.*, 1979, *Gross et al.*, 1991, *Hellio et al.*, 2002, *Ishida* 2000, *Murakami et al.*, 1991, *Wu et al.*, 1998), spongia (*Mokashe et al.*, 1994, *Thakur* 2001), coelenterata (*Davis et al.*, 1989, *Targett et al.*, 1983, *Targett* 1988), holothurians (*Mokashe et al.*, 1994) dan ascidian (*Thakur* 2001).

Makro dan mikro organisme yang berasal dari laut, diantaranya sebagian besar alga, lamun, sponge, bakteri laut, ekinodermata, bentik invertebrata dan karang diketahui mempunyai kemampuan untuk menghasilkan bahan aktif yang dapat berperan sebagai *antifouling* alami. *Antifouling* alami dapat mencegah pertumbuhan bakteri pembentuk biofilm dan pertumbuhan larva pembentuk *fouling* dengan suatu mekanisme non-toksik (*Irma Shita Arlyza*, 2007).

BAB ———

05

KAJIAN PENGGUNAAN CAT ANTIFOULING PADA TIANG PANCANG JEMBATAN

BAB 05

KAJIAN PENGGUNAAN CAT ANTIFOULING PADA TIANG PANCANG JEMBATAN

A. Pengumpulan Data

Tahapan pengumpulan data dilakukan baik di laboratorium maupun di lapangan. Proses yang dilakukan meliputi:

- a) Pengumpulan data sekunder berdasarkan studi literatur, diskusi teknis serta survey instansional.
- b) Pengumpulan data primer meliputi pengambilan data lapangan dan data hasil pengujian laboratorium.

Untuk pengambilan data lapangan dilakukan melalui pengamatan terhadap contoh-contoh uji yang ditempatkan di lokasi-lokasi kegiatan, pengujian kondisi lingkungan atmosferik dan kondisi air laut, dan pengujian lanjutan di laboratorium.

1. Pembuatan Contoh Uji

Contoh uji yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini adalah cat yang mengandung bahan *antifouling* (AF), cat anti korosi tanpa *antifouling* (AC), serta contoh tanpa perlindungan (blanko), metode uji dan ukuran contoh uji sesuai dengan yang disyaratkan dalam ASTM 3623-78 " *Standard Test Method for Testing Antifouling Panels In Shallow Submergence*" seperti yang terlihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Contoh Uji Penelitian Sesuai ASTM 3623-78

Cat *antifouling* yang diaplikasikan adalah cat yang mengandung biosida aktif tembaga oksida (CuO) dan *booster* seng oksida (ZnO) serta titanium oksida (TiO) yang masing-masing memiliki ukuran partikel dalam skala mikrometer, ketebalan lapisan cat kering yang diaplikasikan dengan cara *airless spray* adalah berkisar antara $350\text{ }\mu\text{m}$ sampai dengan $700\text{ }\mu\text{m}$. Cat jenis ini banyak digunakan secara komersial untuk digunakan sebagai material perlindungan anti korosi dan anti biota pada kapal laut.

2. Penempatan Contoh Uji

Contoh uji kemudian ditempatkan di tiga wilayah yang berbeda yaitu: dermaga Muara Baru Jakarta, Jembatan Tol Suramadu Jawa

Timur dan Jembatan Tol Bali Mandara seperti yang terlihat pada gambar 5.2, gambar 5.3 dan gambar 5.4. Ketiga wilayah tersebut dipilih dengan pertimbangan tingkat pencemaran dan kondisi lingkungan, dimana Muara Baru Jakarta mewakili pantai dengan pencemaran berat, Suramadu mewakili pantai dengan pencemaran sedang, serta Mandara Bali mewakili pantai dengan tingkat pencemaran rendah. Selain itu dilakukan juga pengukuran-pengukuran kondisi lingkungan air laut, pemetaan pola kerusakan akibat biota penempel serta identifikasi jenis-jenis biota penempel.

Contoh uji ditempatkan pada beberapa variasi kedalaman, yaitu: pada kedalaman 0-1 meter, kedalaman 1-2 meter, dan kedalaman 2-3 meter di bawah muka air laut.



Gambar 5.2. Pemasangan Contoh Uji di Dermaga Muara Baru Jakarta



Gambar 5.3. Pemasangan Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Suramadu Jawa Timur



Gambar 5.4. Pemasangan Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Bali Mandara

3. Monitoring Contoh Uji

Monitoring contoh uji dilakukan setiap interval waktu satu bulan selama periode waktu satu tahun untuk melihat tingkat penempelan biota serta efektivitas cat *antifouling* komersial, selain itu dilakukan juga pengukuran langsung di lapangan terhadap kondisi lingkungan atmosferik dan sifat fisika-kimia air laut.

Secara garis besar pengamatan-pengamatan yang dilakukan selama jangka waktu penelitian adalah sebagai berikut:

- a) Pengamatan efektivitas kinerja cat *antifouling*;
- b) Pengamatan sifat fisika-kimia air laut;
- c) Pengamatan jenis-jenis biota penempel dominan masing-masing wilayah penelitian.



BAB ———

06

| HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

BAB 06

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

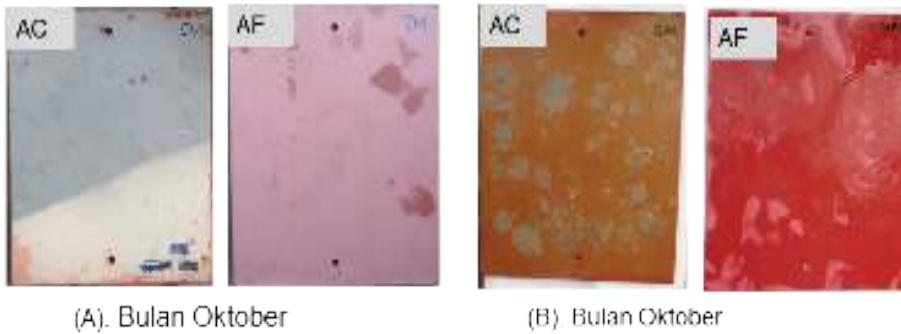
A. Hasil Monitoring Kinerja Cat

Hasil pengamatan kinerja cat *antifouling* dan cat anti korosi dapat dilihat pada gambar 6.1, gambar 6.2 dan gambar 6.3 berikut.



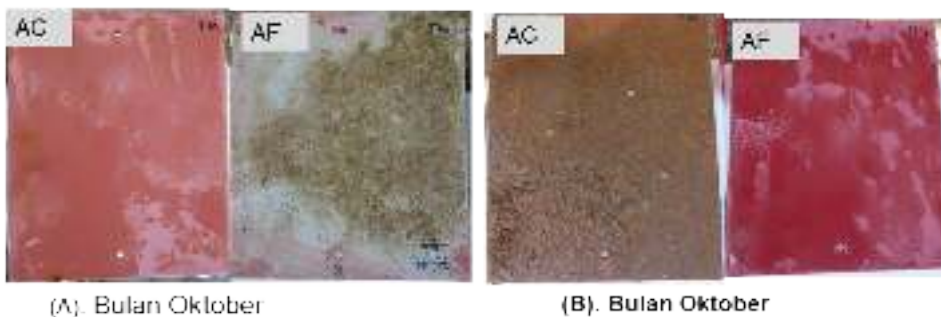
Gambar 6.1. Hasil Monitoring Contoh Uji di Dermaga Muara Baru Jakarta

Berdasarkan gambar 6.1 di atas, pada periode pengamatan 1 sampai dengan 6 bulan setelah perendaman contoh uji terlihat bahwa contoh uji yang tidak mengandung *antifouling* sudah penuh ditempli oleh biota laut dari jenis alga dan rumput laut serta sejumlah kecil kerang-kerangan, sedangkan contoh uji yang mengandung cat *antifouling* terlihat tidak ditempli oleh biota laut, hal tersebut berlaku untuk contoh-contoh uji yang ditempatkan pada masing-masing kedalaman.



Gambar 6.2. Hasil Monitoring Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Suramadu Jawa Timur

Hasil pengamatan contoh uji di wilayah Tol Suramadu, setelah periode perendaman selama 6 bulan seperti terlihat pada gambar 6.2 di atas memperlihatkan, bahwa baik contoh uji yang mengandung cat *antifouling* dan yang tidak, kedua-duanya sudah mulai ditempeli oleh biota dari jenis mikrobiologi, terlihat dari titik-titik gram mikroba yang menempel pada contoh uji tanpa kehadiran makroorganisme.



Gambar 6.3. Hasil Monitoring Contoh Uji pada Tiang Pancang Jembatan Tol Bali Mandara

Begitu juga hasil monitoring contoh uji di wilayah Tol Bali Mandara seperti terlihat pada gambar 6.3, juga terlihat adanya penempelan mikrobiologi laut pada kedua jenis contoh uji cat. Hasil-hasil pengamatan tersebut menjelaskan bahwa jenis dan karakter biota penempel pada masing-masing wilayah kegiatan berbeda-beda, sehingga tipe *antifouling* yang efektif di suatu tempat ternyata belum tentu efektif juga ditempat lainnya.

Dari keseluruhan contoh uji yang ditempatkan di wilayah-wilayah penelitian, contoh uji dengan ketebalan lapisan pelindung cat *antifouling* di bawah 400 mikrometer relatif lebih cepat mengalami kerusakan sehingga kinerjanya menjadi tidak efektif lagi, gambar 6.4 berikut memperlihatkan kondisi visual cat dengan ketebalan di bawah 400 mikrometer setelah 6 bulan perendaman.



Gambar 6.4. Kondisi Lapis Lindung Cat yang Sudah Mulai Menggembung Setelah Periode Perendaman 6 Bulan

Sebaliknya untuk cat dengan ketebalan di atas 400 mikrometer relatif masih dapat bertahan dan menunjukkan kinerja yang baik sebagai *antifouling* meskipun setelah melalui masa 12 bulan perendaman.

B. Identifikasi Sifat Fisik Lingkungan Laut

Identifikasi sifat fisik lingkungan dilakukan untuk mencari korelasi antara laju pertumbuhan mikro-*fouling* dengan kondisi lingkungannya. Tabel 6.1 memperlihatkan kondisi fisik lingkungan air laut di wilayah-wilayah studi.

Tabel 6.1. Kondisi Fisik Lingkungan Air Laut

Lokasi	Kedalaman (m)	Temperatur (°C)	pH	Salinitas (%)	DO (mg/L)
Muara Baru	0-1	29.8	7.79	33	33.5
	1-2	29.5	7.90	33	32
	2-3	29.8	7.91	33	32
Suramadu	0-1	29.8	8.4	33	5.44
	1-2	28.8	8.5	33	5.20
	2-3	28.8	8.5	33	5.50
Mandara	0-1	28	8.3	28.9	5.19
	1-2	27.9	8.4	28.7	5.08
	2-3	27.9	8.4	28.6	5.05

Nilai DO (*Dissolved Oxygen*) air laut Muara Baru Jakarta seperti terlihat pada tabel 6.1 di atas, menunjukkan nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan nilai DO air laut Suramadu dan Mandara, hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat pencemaran air laut Muara Baru lebih tinggi daripada wilayah-wilayah lainnya.

C. Identifikasi Mikro-fouling

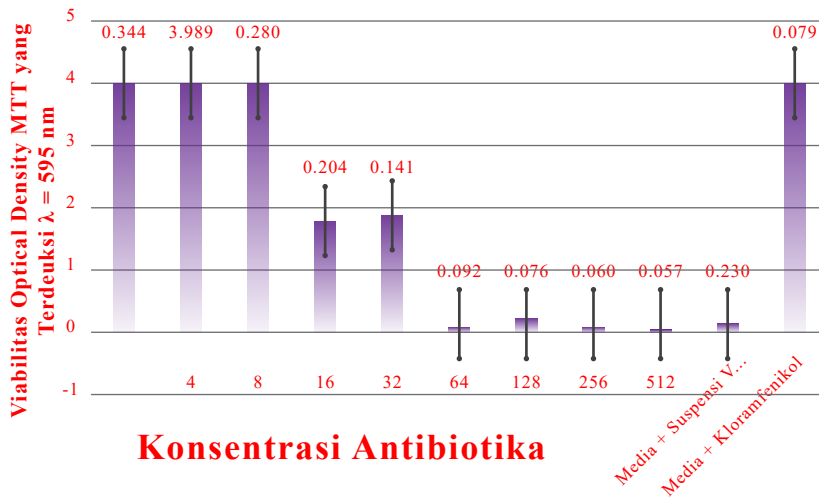
Contoh uji setelah perendaman dalam air laut kemudian di bawa ke laboratorium mikrobiologi untuk mengidentifikasi jenis-jenis bakteri apa saja yang menempel pada contoh uji tersebut. Hasil isolasi bakteri dari contoh-contoh uji ditunjukkan pada tabel 6.2 berikut.

Tabel 6.2. Kondisi Fisik Lingkungan Air Laut

Lokasi Contoh	Kedalaman Isolat	Berpotensi Fouling
Muara Baru	30	5
Selat Madura	108	3
Teluk Benoa	8	2

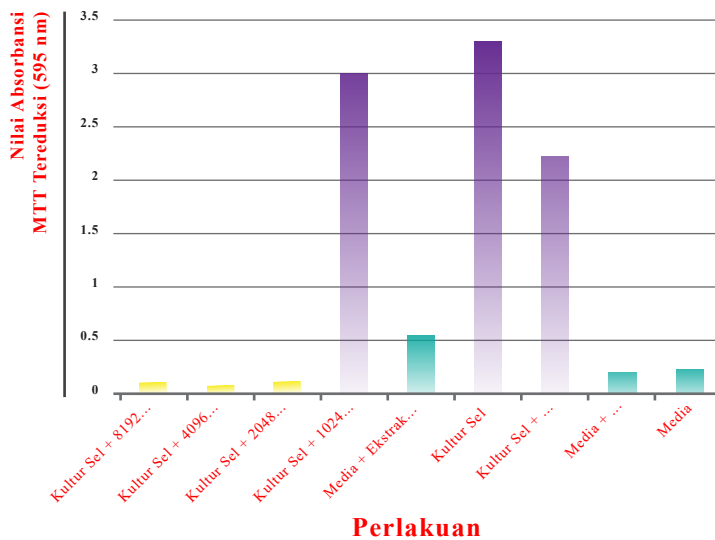
Berdasarkan hasil identifikasi jenis bakteri, diperoleh dua golongan besar bakteri yang berpotensi untuk menjadi penempel pada contoh uji yaitu *Vibrio alginolyticus* dan *Vibrio natriegens*.

Berdasarkan identifikasi awal terhadap jenis bakteri penempel, selanjutnya dilakukan percobaan pencegahan penempelan dengan mencari biosida-biosida yang mampu mencegah atau menghambat penempelan bakteri, diantaranya dengan menggunakan senyawa kloramfinekol, minyak atsiri dan *amoxicillin* seperti yang ditunjukkan dalam gambar 6.5 dan gambar 6.6 berikut.



Gambar 6.5. Pengaruh Biosida Kloramfenikol Terhadap Pertumbuhan Bakteri

Berdasarkan gambar 6.5 di atas, konsentrasi 64 $\mu\text{g/ml}$ senyawa kloramfenikol teridentifikasi mampu menghambat pertumbuhan bakteri.



Gambar 6.6. Pengaruh Minyak Atsiri dan *Amoxicillin* Terhadap Pertumbuhan Bakteri

Berdasarkan hasil percobaan seperti ditunjukkan pada gambar 6.6 di atas dengan menggunakan minyak atsiri dan senyawa *amoxicillin* sebagai biosida, minyak atsiri dengan konsentrasi 2048 µg/ml mampu menghambat pertumbuhan bakteri penempel sedangkan senyawa amoksisilin 512 µg/ml tidak mampu menghambat pertumbuhan.

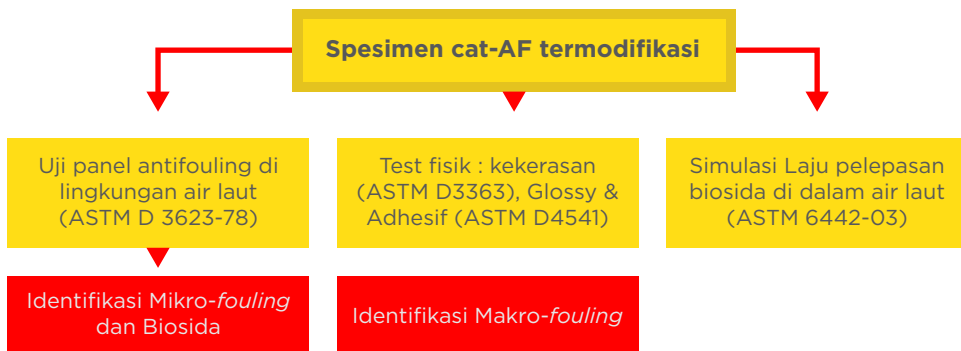
D. Prototype Formula *Antifouling* Tipe Statis

Contoh *antifouling* komersial yang diaplikasikan pada kegiatan ini, merupakan *antifouling* yang biasanya diaplikasikan pada kapal laut. Jenis *antifouling* ini akan aktif bekerja ketika kapal dalam keadaan dinamis atau bergerak, sedangkan apabila kapal dalam posisi diam maka *antifouling* menjadi tidak aktif dan permukaan kapal yang terendam dalam air laut akan mulai ditemplei oleh mikro / makro-fouling. Ukuran partikel *antifouling* komersial berada pada ukuran mikrometer sehingga periode efektivitasnya menjadi singkat yaitu sekitar 1 hingga 2 tahun. Berdasarkan pertimbangan-pertimbangan tersebut, maka dilakukan percobaan untuk membuat satu formula *antifouling* yang dapat bekerja pada struktur-struktur statis seperti struktur pilar atau tiang pancang jembatan yang terendam dalam air dan mempunyai periode efektivitas yang lebih lama minimal sekitar 5 tahun sesuai dengan periode waktu pemeliharaan rutin struktur jembatan. Biosida aktif yang digunakan dalam *prototype* yang akan dibuat menggunakan biosida organo logam dengan ukuran partikel di bawah 100 nanometer. Rancangan formula yang akan dibuat dijelaskan dalam tabel 6.3 berikut.

Tabel 6.3. Prototipe Formula *Antifouling* Tipe Statis

Bahan	Rencana Komposisi (% massa)
Biosida (nanoparticle)	5~20
Additif	10~30
Resin (Copolymer of vinyl klorida dan vinyl isobutely eter MP25)	20~30
Rosin	3~5
Pelarut dan additives lainnya	20~40
Pigmen dan Filler	5~10

Setelah dibuat campuran cat *antifouling*, cat tersebut selanjutnya dilakukan pengujian-pengujian efektivitas kinerjanya seperti yang ditunjukkan dalam gambar 6.7 berikut.

**Gambar 6.7.** Skema Pengujian Efektivitas Kinerja Cat *Antifouling*

Pengujian kinerja dilakukan baik di laboratorium maupun di lapangan, ketebalan masing-masing lapisan cat akan berbeda-beda tergantung pada tingkat agresivitas lingkungan serta jenis mikroorganisme dominan yang berada pada masing-masing wilayah.



BAB

07

| **PENUTUP**

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kegiatan yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Laju penempelan biota pada struktur bangunan bawah jembatan di wilayah pantai, rata-rata berlangsung cepat terutama pada wilayah dengan tingkat oksigen terlarut tinggi;
2. Jenis dan karakter biota penempel pada wilayah-wilayah kegiatan, berbeda satu sama lainnya;
3. Jenis biota penempel dominan yang teridentifikasi di masing – masing wilayah studi adalah dari jenis alga, teritif, dan kerang-kerangan;
4. Hasil percobaan awal identifikasi biosida alami, diperoleh bahwa senyawa kloramfenikol dengan konsentrasi 64 µl/ml dan senyawa minyak atsiri dengan konsentrasi 2048 µg/ml mampu menghambat pertumbuhan bakteri penempel untuk golongan *vibrio algae*.
5. Cat *antifouling* komersial tipe dinamis yang diaplikasikan pada struktur statis dengan ukuran partikel biosida skala mikrometer, tidak cukup efektif dalam melindungi struktur dari pengaruh biota laut penempel, dimana pada periode 6 bulan penempatan contoh uji, sudah mulai ditemplei oleh biota laut.

B. Saran

Adapun saran-saran yang diberikan untuk perbaikan ke depan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pemetaan secara menyeluruh terhadap jenis dan karakteristik biota laut yang berpotensi menempel pada struktur di seluruh Indonesia, sehingga jenis dan tipe *antifouling* yang diaplikasikan sesuai dengan jenis dan karakteristik biota laut di masing-masing wilayah.
2. Perlu dilakukan penelitian secara lebih mendalam untuk mengidentifikasi senyawa-senyawa biosida alami potensial dan sesuai dengan jenis masing-masing biota penempel.
3. Ukuran partikel biosida dalam skala nanometer diharapkan mampu memperpanjang waktu *leaching out* (waktu pemaparan bahan aktif) lapis lindung cat *antifouling*.
4. Uji efektivitas kinerja *antifouling* membutuhkan waktu yang cukup lama sesuai dengan umur rencana perlindungannya, sehingga perlu selalu dilakukan monitoring selama periode umur rencananya, agar efektivitas kinerjanya dapat diketahui secara aktual.

Daftar Pustaka

- Barnes, R. D. 1974. *Invertebrate Zoologi*. Third Edition. W.B. Saunders Co, London. 870 pp.
- Barnes, H and H. T. Powell. 1953. *The Growth of Balanus balanoides (L) and Balanus crenatus Brug. Under Varying Condition of Submersion*. Journal of The Biology. Association of The United Kingdom 32 (1-3) : 107 -127.
- Compère, C., Bellon-Fontaine, M.N., Bertrand ,P., Costa, D., Marcus, P., Poleunis ,C., Pradier, C-M., Rondot, B. and Walls, M.G. (2001). *Kinetics of conditioning layer formation on stainless steel immersed in seawater Biofouling*, 17(2): 129-145.
- Darsono, P. 1979. *Catatan Tentang Sifat dan Daur Hidup Teritip (Barnacle)*. Pewarta Oseana V (3) : 16 – 19.
- Darsono, P. dan Hutomo, M. 1983. *Komunitas Biota Penempel di Perairan Suralaya, Selat Malaka*. Jurnal Oseanologi di Indonesia 16 : 29 – 41
- Ermaitis. 1984. *Beberapa Catatan tentang Marga Teritip (Balanus spp)*. Pewarta Oseana IX (3): 96-101 hal.
- Fontana G Mars, 1986. *Corrosion Engineering*. 3rd Edition. McGraw-Hill International Editions. New York.
- George, J. D. and George, J. J. 1974. *Marine Life : An Illustrated Encyclopedia of Invertebrate in The Sea*. Jhon Wiley and Sons. New York. 288 pp.
- Mc Connaughey, B. H. and Zottoli, R. 1983. *Pengantar Biologi Laut*. Diterjemahkan oleh H. Z. B. Tafal. The C. V. Mosby Co. London. 410 hal.

Nawy, EG., "*Reinforced Concrete*", Prentice-hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.

Nontji, D. A. (2007). *Laut Nusantara*. Jakarta: Penerbit Djambatan
Laporan Akhir Pendampingan Teknis Penanganan Jembatan (2015).
Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan. Puslitbang Jalan dan
Jembatan. Balitbang. Kementerian PU-PERA

Lynn Jackson. (2008). *Marine Biofouling: An Assesment of Risk and
Management Initiatives*. UNEP Regional Seas Programme. 68 pp.

ASTM D 3623-78(a) (2012), "*Standard Test Method for Testing
Antifouling Panels In Shallow Submergence*".

ISO 12944-5 (2007), "*Paints and Varnishes- Corrosion Protection On
Steel Structures By Protective Paint Systems*".