

PENCEMARAN LAUT OLEH SENYAWA ORGANOTIN

Agus Sudaryanto^{*)}

Abstrak

Organotin compounds have attracted to focusing study due to their bioaccumulative potential and deleterious effects to the aquatic organisms. These compounds are ubiquitous contaminants in the environment and have been used commercially for many years and in a variety of diverse applications as polyvinyl chloride (PVC) stabilizers, industrial catalysts, wood preservatives and biocides. Direct exposure to organotin into aquatic environments generally through the usage of TBT in antifouling paints applied for boat, marine infrastructures and aquaculture net. Due to its persistency and biological effects at various organisms, many developed countries have banned and restricted the TBT usage for boating and aquaculture purposes. In this paper the aquatic ecotoxicology of organotin based on a multidisciplinary approach is reviewed.

Kata kunci: organotin, tributyltin, pencemaran, biogeokimia, daya racun, peraturan

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan aktivitas industri, berbagai tujuan untuk peningkatan hasil pertanian dan banyak aktivitas kegiatan manusia lainnya bersama-sama ditunjang oleh pertumbuhan jumlah penduduk menghasilkan peningkatan perdagangan bahan kimia di seluruh dunia. Salah satu bahan kimia yang menjadi perhatian pada dekade terakhir ini adalah senyawa organotin (OTs), khususnya tributyltin (TBT). Sebagai konsekuensinya pencemaran lingkungan oleh penggunaan senyawa ini akan meningkat di kemudian hari dan pada akhirnya dapat mempengaruhi kesehatan manusia.

Studi tentang monitoring pencemaran laut dan toksisitas oleh senyawa organotin, khususnya tributyltin (TBT) telah menjadi perhatian luas, khusus di banyak negara maju. Hal ini disebabkan, selain kemampuan bioakumulasinya juga oleh sifat daya racunnya yang sangat tinggi pada organisme perairan meskipun dalam konsentrasi yang sangat rendah. Tulisan ini mencoba untuk mereview pencemaran laut yang disebabkan oleh senyawa organotin.

2. PENGENALAN ORGANOTIN

Senyawa organometalik terdiri dari elemen logam (*mettaloid*) yang secara kovalen diikat secara langsung pada satu atau lebih

atom karbon. Sebanyak 1830 buah senyawa, baik kelompok utama maupun transisi logam diketahui diikat pada atom karbon. Selama 150 tahun berturut-turut ribuan senyawa telah disiapkan dan dipelajari, beberapa senyawa ini mempunyai aplikasi yang luas dalam industri dan pertanian.

Senyawa organotin adalah senyawa organometalik yang disusun oleh 1 atau lebih ikatan Sn-karbon (Sn-C). Senyawa ini umumnya original senyawa antropogenik kecuali methyltin yang mungkin dihasilkan melalui biometylasi di lingkungan⁽¹⁾. Senyawa organotin secara mayoritas mempunyai tin dalam kedudukan oksidasi +4.

Formulasi umum OTs adalah R_nSnX_{4-n} , dimana R adalah sebuah alkyl atau aryl group (seperti butyl, phenyl, octyl, metyl dsb.), X adalah spesies anionik (seperti Cl, O, OH, dsb.) dan n adalah 1 sampai 4. Secara umum, ikatan tin-karbon adalah lemah dan lebih polar daripada senyawa organik yang terbentuk dari karbon silikon atau germanium; kelompok organik yang melekat ke atom tin akan lebih mudah melepaskan diri. Akan tetapi, reaktivitas yang tinggi ini tidak mengakibatkan perubahan kestabilan senyawa organotin dibawah kondisi biasa.

Senyawa organotin pertama kali digambarkan pada tahun 1852 oleh Lowig, dan kemudian oleh Sir Edward Frankland, orang

^{*)} Penulis adalah pemerhati dan peneliti masalah lingkungan, saat ini bekerja pada Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

yang mempersiapkan *diethyltin diiodide* tahun 1853 dan *tetraethyltin* tahun 1859. Penggunaan biosida organotin berasal dari studi sistematik senyawa ini dari *Institute of Organic Chemistry T.N.O, Utrecht*, yang disponsori oleh *the International Tin Research Council*. Sampai sekarang, senyawa ini telah digunakan dalam berbagai macam aplikasi pemanfaatan, yaitu sebagai biosida untuk pertanian maupun industri, sebagai bahan aktif pada cat antifouling, stabilisasi panas dan cahaya pada plastik PVC, katalis pada *polyurethane foam* dan perlindungan permukaan gelas dari *etching* ^(1, 2).

3. TRIBUTYL TIN (TBT) SEBAGAI KASUS KRONIK KONTAMINAN

Sejak 1970-an, TBT salah satu contoh representatif senyawa organotin digunakan sebagai biosida agresif cat antifouling pada hull kapal untuk mencegah pertumbuhan alga, barnakel dan organisme fouling lain. Senyawa TBT yang digunakan dalam cat antifouling mengandung sebuah atom tin (Sn) yang terikat secara kovalen dengan tiga butyl ($C_4H_9^-$) moeties dan berasosiasi dengan anion. Beberapa senyawa tri-organotin yang telah digunakan sebagai bahan dasar cat antifouling ⁽⁴⁾, yaitu :

- bis(tributyltin) oxide
- bis(tributyltin) sulfide
- tributyltin acetate
- tributyltin acrylate
- tributyltin fluoride
- tributyltin naphthenate
- tributyltin resinate
- tributyltin methacrylate/methylmethacrylate copolimer
- bis(tributyltin) adipate
- tri-clohexyltin hydroxide
- triphenyltin hydroxide

Beberapa senyawa di- dan mono-organotin juga digunakan sebagai bahan dasar cat antifouling, seperti :

- dibutyltin dilaurate
- dibutyltin isooctyl mercaptoacetate
- dibutyltin maleate
- dioctyltin isooctyl mercaptoacetate
- dioctyltin maleate
- mono-octyltin tris isooctyl mercaptoacetate

TBT dilepaskan dari cat antifouling dan masuk ke dalam lingkungan laut. TBT berakumulasi dengan sedimen, khususnya pada area dengan banyak aktivitas

perkapalan, seperti pelabuhan dan marina. Pengaruh daya racun TBT juga telah diamati pada area jalur perkapalan di laut terbuka. Triphenyltin (TPT) juga telah digunakan sebagai antifouling, tetapi penggunaan utamanya adalah sebagai fungisida pada pertanian, khususnya pada budidaya kentang. TPT juga menyebabkan pengaruh yang sama dengan TBT. Sementara itu produk degradasi dari TBT, mono-, dan dibutyltin digunakan secara luas sebagai bahan additive, umumnya dalam plastik PVC dan juga di beberapa produk lainnya. Meskipun daya racunnya lebih kecil dibanding dengan TBT, akan tetapi secara signifikan senyawa-senyawa ini masih tergolong bahan kimia berbahaya.

TBT bertanggung jawab pada gangguan sistem endokrin di sejumlah kerang laut yang mengakibatkan pada perkembangan karakteristik organ kelamin jantan pada siput laut betina. TBT juga menyebabkan gangguan sistem imun pada organisme dan shellfish membentuk perubahan formasi (*malformation*) cangkang setelah pelepasan TBT pada level yang begitu rendah di air.

4. BIOGEOKIMIA

4.1 Sumber Pencemaran

Pada tahun 1985, produksi tri-organotin yang digunakan untuk biosida berkisar antara 8-10000 ton per tahun, sementara untuk senyawa turunannya, seperti di- dan mono-organotin mencapai 27000 ton. Sementara itu 70% biosida tri-organotin khususnya TBT dan triphenyltin (TPT) digunakan sebagai agent aktif dalam cat antifouling.

Pelepasan TBT dari cat antifouling ke perairan menghasilkan zat beracun ke dalam air dan karena itu menghasilkan pengaruh negatif terhadap lingkungan dan mengganggu kehidupan organisme. Cat antifouling dapat dikelompokkan menjadi 3 berdasarkan sistem pelepasan dari zat aktif secara biologi, yaitu :

- Tipe konvensional, matrik tidak terlarut (insoluble) dalam air laut dan molekul yang beracun bergerak menuju permukaan melalui pori-pori mikroskopik,
- Erodable, pelepasan zat beracun tetap tertinggal pada lapisan yang lebih dalam dari coating film dan difasilitasi melalui *partial dissolution* dari matrik,
- Self-polishing, matrik dan TBT secara kimia terikat ke dalam bentuk polimer, seperti TBT methacrylat, yang melepaskan TBT melalui reaksi dengan air laut, karena

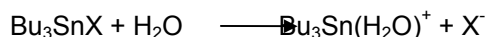
itu secara tetap memperbaharui permukaan coat. Sistem seperti ini mempunyai beberapa keuntungan laju pelepasan dalam waktu yang konstan dan lebih rendah, menjanjikan perlindungan yang lebih lama (5 tahun).

Oleh karena itu, kontrol biofouling merepresentasikan sumber utama pencemaran TBT ke dalam lingkungan laut. Telah diestimasi bahwa satu kapal boat dapat melepaskan (laju pelepasan) antara 1 dan 10 µg TBT/cm² dari hull per hari untuk menjamin proteksi antifouling. Untuk kapal boat ikan berukuran kecil, laju pelepasan berjumlah 0.2-2.0 g per hari dan kapal berukuran sedang dapat melepaskan 50-500 g per hari.

Sumber lain dari pencemaran laut oleh organotin dapat berasal dari penggunaannya untuk industri dan biosida lainnya. TBT dan senyawa turunannya, di- dan monobutyltin dapat juga terdeteksi pada urban efluen dengan jumlah yang signifikan, dimana terakumulasi didalam sludge dari peralatan penanganan limbah ⁽¹⁾.

4.2 Kimia Perairan TBT

Tingkah laku dari biosida tri-n-butyltin (Bu₃SnX), dimana X adalah anion (misalnya, oksida, sulfida, asetat, fluorida) dapat digambarkan melalui persamaan :



Telah umum diketahui bahwa daya racun TBT dianggap berasal dari kation (TBT⁺⁺) dan bukan berasal dari anion yang berasosiasi dengan biosida dalam senyawa yang netral.

Dalam formulasi cat *copolymer* laju pelepasan biosida ke air dapat dikontrol. *Copolymer* yang paling umum adalah *tributyltin methacrylate* (TBTM) atau *methylmethacrylate* (MMA). Oleh sebab lapisan cat antifouling adalah hidropobik, air laut hanya berinteraksi dengan *copolymer* dan hanya pada permukaan saja, reaksi hidrolisis memecah TBT dari kekuatan copolymer, dan melepaskannya ke air laut.

TBT sedikit terlarut dalam air, 1-10 mg/l untuk TBTO dan di bawah 20 mg/l untuk garam yang lebih larut (halida). Pada perairan alami, sejumlah kecil fraksi (5%) teradsorpsi ke dalam partikel tersuspensi. Koefisien partisi antara partikulat dan fase cair ($K_p = C_{\text{sed}}/C_{\text{water}}$) umumnya berkisar antara 1000-3000 (l/kg) tergantung sifat alami partikel.

Pada perairan, bentuk ionik TBT⁺ adalah dalam keadaan setimbang (equilibrium) daripada bentuk hidro- dan kloro-. Bentuk kation akan mendominasi ketika pH lebih rendah dari pKa 6.51. Di bawah kondisi pH dan salinitas normal dari lingkungan laut, TBT biasanya ditemukan dalam bentuk hidroksida TBTOH. Spesiasi kimia adalah signifikan dalam media aquatik karena TBT telah memperlihatkan *bioavailability*-nya seperti kemampuannya untuk berakumulasi dengan organisme hidup, dan meningkat ketika berada dalam bentuk TBTOH (pH>8). Sebaliknya, kehadiran zat organik terlarut adalah faktor pembatas (*limiting factor*).

TBT adalah senyawa hidropobik dengan koefisien partisi oktanol/air (log K_{ow}) bervariasi tergantung kondisi pH dan salinitas. Nilai koefisien partisi untuk TBTCI yang telah dipublikasikan dalam literatur berkisar antara 3.21-3.85 pada pH 5.8 dan 7.8.

4.3 Persistensi di Lingkungan Laut

Ikatan karbon-Sn menunjukkan keresistenan-nya di dalam molekul. Karena itu alkyltin dapat didegradasi berturut-turut melalui dealkylasi yang disebabkan oleh photolisis UV atau mikro-organisme.

Waktu paruh TBT di air laut bervariasi tergantung kondisi lingkungan seperti pH, suhu, turbidity dan cahaya, dimana secara umum telah diestimasi dari kisaran beberapa hari sampai beberapa minggu. Biodegradasi oleh mikro-organisme adalah mekanisme yang utama, disamping photolisis oleh cahaya ultra violet.

Oleh karena itu pengukuran waktu paruh di daerah bermusim 4 menunjukkan waktu yang berbeda. Penghitungan waktu paruh bervariasi dari 5.8 hari di musim panas pada kondisi *turbid water* sampai 127 hari di musim dingin dengan kondisi *non turbid* (Tabel 1).

Tabel 1. Waktu paruh TBT di air laut pada musim panas dan dingin pada kondisi turbid water dan non turbid water ⁽³⁾.

	Musim Panas	Musim Dingin
Waktu paruh (hari)	5.8-16.8	37.3-127.4
Biodegradasi (%)	86-20	90-37
Photolisis (%)	14-80	9-61
Evaporasi (%)	0.1-0.3	0.8-2.6

*Sumber Alzieu ⁽³⁾.

Pada sedimen, degradasi TBT adalah sangat lambat dimana waktu paruhnya diperkirakan sampai beberapa tahun. Studi

sedimen di pelabuhan Aucklan (New Zealand) menunjukkan waktu paruh TBT mendekati 1.3-4.4 tahun, sedangkan berdasarkan percobaan mesocosm diperkirakan melebihi 19 tahun. Lebih lanjut, kestabilan TBT yang tinggi di media sedimen telah dikonfirmasi melalui dideteksinya konsentrasi yang tinggi di kedalaman *core* sedimen pada beberapa lokasi di pelabuhan.

4.4 Level di Lingkungan Laut

Senyawa TBT dan degradasinya telah terakumulasi dalam semua media lingkungan seperti air, sedimen dan berbagai macam organisme termasuk mamalia. Konsentrasinya di lingkungan sangat bervariasi tergantung kedekatan sumber utama pencemaran, seperti pelabuhan dan marina. Pada tahun-tahun terakhir ini, level pencemaran telah mengalami penurunan oleh karena adanya peraturan yang diterapkan di beberapa negara maju seperti di Eropa, Amerika dan Australia. Sementara itu di kebanyakan negara Asia, Afrika dan Amerika Selatan yang masih belum menerapkan peraturan penggunaan dan produksi TBT, konsentrasinya di lingkungan masih sedikit diketahui. Karena itu informasi konsentrasi TBT di lingkungan lebih banyak berasal dari negara-negara maju.

Hasil pengukuran sebelum periode pelarangan TBT pada penggunaannya sebagai cat antifouling umumnya menunjukkan level berkisar antara 50-500 ng/l di Marina Amerika Utara dan Eropa. Beberapa kasus juga ditemukan pada kisaran 1 µg/l terutama pada daerah yang sangat terkontaminasi. Pada akhir tahun 1980-an konsentrasi yang tinggi dari TBT masih tercatat di perairan pelabuhan (10-1500 ng/l) dan pantai (<2-50 ng/l) di Eropa. Nilai yang paling tinggi (di atas 1 µg/l) ditemukan di Laut Mediterranean, di area utama pelabuhan dan pada daerah dekat pembuangan air pendingin yang dilindungi oleh cat antifouling berdasarkan TBT.

Di sepanjang pantai Kanal Inggris dan Atlantik, maksimum konsentrasi di perairan marina jarang melebihi 100 ng/l (rata-rata 42 dan 22 ng/l). Sementara itu di sepanjang pantai Mediterranean maksimum konsentrasi tidak lebih dari 200 ng/l (rata-rata 42 ng/l). Pada tahun 1992, Maksimum konsentrasi 17 ng/l dilaporkan di perairan estuari dan lebih dari 100 ng/l di pelabuhan dan shipyard sepanjang pantai Inggris dan Welsh. Di negara-negara yang belum menerapkan peraturan, konsentrasi yang tinggi tercatat di perairan pelabuhan seperti; Bahrain (14.7 µg/l)

⁽⁴⁾, Hong Kong (1 µg/l) ⁽⁵⁾. Tributyltin juga terdeteksi di perairan terbuka dekat jalur pelayaran pada konsentrasi sekitar 12 ng/l di Selat Malaka ⁽⁶⁾. Oleh karena stabilitas yang tinggi dari TBT yang terabsorpsi di sedimen, kadang-kadang pencemaran ditemukan mencapai level yang sangat tinggi, sehingga merefleksikan kemampuan sedimen menyimpan TBT pada jangka waktu yang sangat lama.

Pada daerah pelabuhan, rata-rata konsentrasi TBT di sedimen umumnya berkisar antara 1 dan 2 mg/kg berat kering. Sebagai contoh, monitoring perairan pantai Amerika memperlihatkan bahwa kontaminasi rata-rata mendekati 54 µg/kg berat basah, sementara hampir 10 kali lebih rendah (5.3 µg/kg) tercatat di lapisan permukaan sedimen dari perairan laut 25 km dari Pelabuhan Vancouver (Kanada) pada kedalaman 377 m.

Sebagai tambahan, konsentrasi melewati 1 mg/kg berat kering ditemukan sampai subsit di sedimen dari teluk Arcachon (Perancis) 8 tahun setelah pelarangan TBT. Sedimen di pelabuhan karena itu merupakan sebuah *reservoir* kontaminasi dan bertanggung jawab untuk mentransfer ke kolom perairan baik melalui mekanisme resuspensi maupun operasi dredging dan sludge dumping di laut.

Hal yang sama dengan data di air dan sedimen, sebegini besar data kontaminasi TBT di organisme laut diperoleh setelah 1990. Pada sampel oyster yang dikoleksi sepanjang pantai Essex (Inggris), ditemukan kontaminasi yang tinggi di spesies *Crassostrea gigas* (3500-8600 µg/kg di jaringan tissue) dan flat oyster *Ostrea edulis* (<230-1990 µg/kg berat kering). Monitoring sepanjang pantai Amerika antara 1988 dan 1990 menunjukkan kontaminasi senyawa TBT pada spesies kerang dan oyster, dengan derajad yang sama sepanjang pantai barat (10-4000 µg/kg berat kering) dan pantai Timur (10-5000 µg/kg berat kering).

Hasil monitoring pencemaran senyawa ini di negara-negara Asia, seperti India, Malaysia, Kamboja, Vietnam, Philipina, Hong Kong dan Indonesia pada akhir tahun 1990-an juga menunjukkan konsentrasi yang relatif tinggi pada area yang dekat dengan aktivitas perkapalan. Maksimum konsentrasi mendekati 1000 ng/g berat basah ditemukan di kerang hijau dari Malaysia ⁽⁷⁾.

Penyebaran TBT juga tercatat tergantung organ pada spesies tertentu. Dari analisis organotin di oyster *Saccostrea commercialis*, konsentrasi TBT di setiap organ sebagai berikut : *mantel* > *foot* > *branchiale* > *labial*

palpi > *viscera* > *adductor* > *muscle*. Level yang sangat tinggi dilaporkan pada gastropod yang diperoleh dari estuari (0.3-1.6 mg/kg berat kering) dan daerah pelabuhan (0.9-2 mg/kg berat kering di Inggris).

Pada ikan, konsentrasi yang signifikan telah ditemukan pada ikan salmon yang di budidayakan dalam jaring yang dilapisi TBT. Konsentrasi 5 mg/kg TBT ditemukan pada *herring Clupea harengus* di teluk Vancouver. TBT juga terdeteksi pada berbagai mamalia laut dengan maksimum konsentras 770 ng/g berat basah⁽⁸⁾.

5. EFEK BIOLOGI

5.1 Bioakumulasi

Sifat lipofilik alami menyebabkan TBT melalui group alkyl cenderung terakumulasi secara biologi ke dalam organisme hidup. Faktor biokonsentrasi (BCF = *bioconcentration factor*) yang dihitung dari koefisien partisi oktanol/air (K_{ow}) berkisar antara 100 dan 500 pada ikan, dan bervariasi di antara grup spesies (1-30000). Adanya proses biokonsentrasi yang lebih tinggi melalui jalur makanan di kepiting, menunjukkan kemungkinan adanya mekanisme biomagnifikasi melalui rantai makanan. Kemudian krustasea, ikan dan mamalia mampu mentransformasi secara enzimatik TBT dan menguraikannya ke dalam hidroksibutyldibutyltin, di- dan monobutyltin. Akan tetapi masuknya pencemaran TBT pada konsentrasi yang tinggi pada area yang terkontaminasi dapat menyebabkan gangguan mekanisme detoksifikasi TBT dan kontaminan poliaromatik. Juga ketidakhadiran cytochrome P 450 tertentu dapat menghalangi kemampuannya untuk menguraikan TBT sehingga terakumulasi dalam jaringan tubuh seperti pada moluska⁽⁹⁾.

5.2 Daya Racun

Pada konsentrasi mikro mol, trialkyltin dapat menyebabkan gangguan formasi membran mitokondria. Sensitivitas dari berbagai group organisme tergantung sifat alami dari radikal alkyl. Turunan methyl dan ethyl sangat berbahaya untuk mamalia dan insek, sementara radikal propyl dan butyl memberikan sifat bakterisida dan fungisidanya ke tin. Derajat daya racun alkyltin menurun menurut jumlah radikal alkyl : tri-Sn>di-Sn>mono-Sn>SnO₂. Organisme moluska, bivalva dan gastropoda adalah spesies yang

paling sensitif terhadap pencemaran TBT. Beberapa derajat toksisitas pada organisme ini adalah⁽³⁾:

- < 1 ng/l menyebabkan penampakan karakter sex jantan di banyak gastropod betina yang dikenal sebagai fenomena imposex. Gibbs dkk. (22) menggambarkan 6 stadia perubahan pada *dogwhelk Nucella lapillus*, bermula dari pembentukan vas deferens dan berakhir dengan penutupan oviduck, sehingga menuju kepada proses kemandulan. Imposex telah dilaporkan terjadi pada lebih dari 27 spesies meliputi 49 genus, dan ini mencerminkan sebagai bioindikator pencemaran oleh TBT.
- Konsentrasi > 1 ng/l membatasi pembentukan devisi pada sel phytoplankton (diatom) dan reproduksi zooplankton (mikro krustacea dan kopepoda).
- Konsentrasi > 2 ng/l bertanggung jawab pada anomali kalsifikasi cangkang oyster *Crassostrea gigas*.
- Konsentrasi > 20 ng/l menyebabkan gangguan reproduksi moluska bivalva, Pertumbuhan larva *C. gigas* dapat terganggu pada konsentrasi TBT mencapai 50 ng/l (kematian larva total setelah 10 hari).
- Konsentrasi antara 1-10 µg/l mempengaruhi reproduksi pada ikan.
- Konsentrasi 1-1000 µg/l menghasilkan gangguan tingkah laku ikan.
- Konsentrasi <500 µg/l menghasilkan gangguan exuviasi krustacea.

6. RESIKO TERHADAP KESEHATAN MANUSIA

Kontak langsung TBT menyebabkan iritasi pada mata dan kulit, dan secara potensial dapat menuju ke dermatitis. Akan tetapi belum ada kasus keracunan makanan oleh TBT yang pernah dilaporkan. Berbagai studi yang dilakukan pada ikan di Amerika dan Jepang memungkinkan manusia mengakumulasi TBT. Karena itu sebagai upaya pencegahan terhadap kesehatan manusia, WHO⁽¹⁰⁾ berdasarkan uji imun pada tikus telah menentukan batas toleransi intake harian TBT atau TDI (*Toleransi Daily Intake*) sebesar 0.25 µg TBT/kg berat badan.

7. PERATURAN DAN PENGARUHNYA KE LEVEL KONTAMINAN

Perhatian luas terhadap pencemaran senyawa TBT dan pengaruhnya terhadap organisme berlanjut pada penerapan peraturan dibanyak negara yang membatasi penggunaannya pada boat ukuran besar > 25 m^(1, 11). Pelarangan pertama kali dilakukan di Perancis pada tahun 1982 untuk kapal berukuran <25 m. Kemudian di Inggris dilakukan pelarangan total untuk semua kapal kecil (<25 m) dan jaring net pada budidaya ikan, standar lingkungan juga diterapkan yaitu 20 ng/l untuk air tawar dan 2 ng/l untuk air laut. Setelah itu di akhir tahun 1980-an negara-negara maju seperti Amerika, Kanada, Jepang, Switzerland, Jerman, Australia, Irlandia, Norwegia juga telah menerapkan peraturan dan pelarangan penggunaan produksi TBT dan penentuan standar laju pelepasan TBT tidak boleh melebihi 4 µg/cm²/hari untuk kapal-kapal besar. Monitoring program di Amerika, Eropa dan Jepang setelah penerapan peraturan menunjukkan jumlah TBT di air, sedimen dan jaringan tubuh bivalva telah mengalami kecenderungan penurunan dari sebelumnya.

Meskipun penurunan pencemaran TBT telah ditunjukkan di beberapa bagian di negara yang telah menerapkan peraturan, akan tetapi global pencemaran senyawa ini masih terus berlanjut terutama di negara-negara yang belum menerapkan peraturan, seperti di banyak negara Asia, Afrika dan Amerika Selatan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Fent K. Ecotoxicology of organotin compounds. *Critical Review and Toxicology*. 1996, 26, 1-117.
2. Blunden, S. J. and C. J. Evans. Organotin compounds *dalam* : *The Hand Book of Environmental Chemistry*, O. Hutgiuger (editor), Vol. 3, Part E, Anthropogenic compounds. Springer-Verlag. Heidelberg. 1990, 1-44.
3. Alzieu, C. Tributyltin: case study of a chronic contaminant in the coastal environment. *Ocean & Coastal Management*, Elseiver. 1998, 40, 23-36.
4. Hassan, M. A., Juma, H. A. Assessment of tributyltin in the marine environment of Bahrain. *Marine Pollution Bulletin*. 1992, 24, 408.
5. Ma, S.W.Y., S.H.K. Chui, S.R. Wild and F.H.F. Chung. Tributyltin (TBT) contamination of the marine environment of Hong Kong *dalam* : *2nd International Conference on Marine Pollution and Ecotoxicology*. Departement of Biology

and Chemistry City University of Hong Kong. 1998.

6. Hashimoto, S., M. Watanabe, Y. Noda, T. Hayashi, Y. Kurita, Y. Takasu and A. OTsuki. Concentration and distribution of butyltin compounds in a heavy tanker route in the strait of Malacca and in Tokyo Bay. *Marine Environmental Research*. 1998, 45, 169-177.
7. Sudaryanto, A. Contamination by butyltin compounds in mussels, fishes and sediments from coastal waters of Asian developing countries. Master Thesis, Ehime University, Japan. 2001.
7. Iwata H., Tanabe S., Mizuno T. and Tatsukawa R. Detection of butyltins compound residues in the blubber of marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*. 1994, 28, 607-612.
9. Morcillo, Y. and C. Porte. Monitoring of organotin compounds and their effects in marine molluscs. *Trends in Analytical Chemistry*. 1998, 17, 109-116.
10. WHO. Tributyltin compounds. Environmental Health Criteria. Genewa. 1990, vol. 116.
11. Cham, M. A. A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits. *The Science of the Total Environment*. 2000. 258, 21-71.

Riwayat Penulis

Agus Sudaryanto, lahir di Sragen 21 Januari 1969. Lulus S1 dari Program Studi Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan IPB, 1993 dan Lulus S2 dari *Department Life Environmental Conservation* bidang studi *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, Ehime University, Japan, 2001. Mulai bekerja di Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi sejak 1 Maret 1994.

