

MEKANISME TOKSISITAS LOGAM KADMIUM TERHADAP FITOPLANKTON : REVIEW

Mechanism of Toxicity of Cadmium Metals Against Phytoplankton : Review

Rega permana^{1*}, Aulia Andhikawati¹, Ferdian², Dionisius Wahyu²

¹)Program Studi Perikanan K Pangandaran, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, PSDKU
Universitas Padjajaran, Kabupaten Pangandaran, Indonesia

²)Program Studi Bioteknologi, Fakultas Ilmu Hayati, Universitas Surya, Tangerang, Indonesia

*korespondensi: rega.permana@unpad.ac.id

Diterima 1 April 2022; Disetujui 28 April 2022

ABSTRACT

Cadmium is a non-essential metal that has a toxic effect on organisms in the aquatic environment, including diatoms, which are organisms that have an important role in the aquatic environment. One aspect of the toxic effect of cadmium is the growth inhibition of phytoplankton. Phytoplankton are unicellular organisms that have an important role in aquatic ecosystems as primary producers. Exposure of the heavy metal cadmium to phytoplankton can have an impact on the balance of the food chain in aquatic ecosystems. This literature study will discuss the impact of exposure to heavy metal cadmium on phytoplankton and the mechanism of its toxicity. Exposure to cadmium has been shown to affect the physiology and morphology of phytoplankton by inhibiting cell growth, damaging chloroplasts and photosynthetic pigments such as chlorophyll (chlorosis).

Keywords: *cadmium, phytoplankton, toxicity*

ABSTRAK

Kadmium merupakan salah satu logam non-esensial yang memiliki pengaruh toksik bagi organisme di lingkungan akuatik, termasuk diatom yang merupakan salah satu organisme yang memiliki peran penting dalam lingkungan akuatik. Salah satu aspek dalam efek toksik kadmium adalah penghambatan pertumbuhan pada fitoplankton. Fitoplankton merupakan organisme unicellular yang memiliki peran penting dalam ekosistem perairan sebagai produsen primer. Paparan logam berat kadmium terhadap fitoplankton dapat berdampak terhadap keseimbangan rantai makanan di ekosistem akuatik. Studi literatur ini akan membahas mengenai dampak paparan logam berat kadmium terhadap fitoplankton serta mekanisme toksisitasnya. Paparan logam kadmium terbukti dapat mempengaruhi fisiologi dan morfologi fitoplankton dengan menghambat pertumbuhan sel, merusak kloroplas dan pigmen fotosintesis seperti klorofil (Klorosis).

Kata kunci: fitoplankton, kadmium, toksisitas

PENDAHULUAN

Pabrik ataupun industri yang membuang limbah cair baik sengaja maupun tidak ke perairan tanpa diolah terlebih dahulu menyebabkan bahan kimia yang terkandung pada limbah tersebut dapat mencemari lingkungan, khususnya logam berat. Sisa bahan atau limbah yang tidak diolah terlebih dahulu apabila dilepaskan ke dalam dapat

menurunkan kualitas perairan khususnya kekayaan biota. Kadmium kerap digunakan pada berbagai industri, diantaranya adalah pada proses pelapisan elektrik atau electroplating serta galvanisasi karena kadmium memiliki sifat nonkorosif. Kadmium juga dibutuhkan dalam proses industri tambang, pembuatan alloy, industri cat dan keramik, pembuatan plastik, stabilizer plastik, industri baterai sebagai katode,

bahan dalam fotografi, pembuatan tabung TV, pembuatan karet, industri sabun, kembang api, percetakan tekstil, dan pigmen untuk gelas dan juga dalam bidang kedokteran gigi (Hananingtyas, 2017).

Kadmium banyak ditemukan dalam sedimen dasar dan partikel tersuspensi di perairan alami. Logam berat seperti kadmium dapat mengendap di dasar perairan dan memiliki waktu tinggal (residence time) hingga ribuan tahun. (Rangkuti, 2009). bioakumulasi dan biomagnifikasi dengan beberapa cara, yaitu melalui kulit, saluran pernapasan, dan saluran makanan (Rochyatun & Rozak, 2007). Kadmium digolongkan sebagai salah satu logam berat berprioritas tinggi menurut Environmental Protection Agency (EPA) Amerika Serikat. Kadmium merupakan senyawa logam berat dengan tingkat toksisitas paling tinggi kedua. Adapun urutan toksisitasnya pada organisme perairan adalah $Hg^{2+} > Cd^{2+} > Ag^{+} > Ni^{2+} > Pb^{2+} > As^{2+} > Cr^{2+} > Sn^{2+} > Zn^{2+}$ (Darmono, 1995; Ferdian et al., 2020). Kadmium memberikan efek berbahaya pada organisme akuatik dalam banyak cara yang memengaruhi sifat-sifat banyak molekul biologis, seperti memblokir dan mengurangi situs tiol pada protein. Selain itu, kadmium dapat diakumulasikan melalui rantai makanan, yang merupakan ancaman serius bagi kesehatan manusia (Suratno et al., 2015).

Biomagnifikasi logam berat diawali dengan paparan terhadap produsen primer yang berperan penting dalam rantai makanan biota laut. Diatom merupakan produsen primer dalam rantai makanan dan berperan sebagai makanan bagi larva krustasea dan ikan, semua fase hidup bivalvia, dan zooplankton (Liang et al., 2014). Pengurangan dalam produksi primer ini dapat memengaruhi jumlah makanan yang tersedia untuk organisme tingkat trofik di atasnya terutama herbivora air di ekosistem laut yang sama. Berkurangnya populasi alga dapat disebabkan oleh beberapa faktor termasuk penurunan kualitas air di lingkungan sekitarnya. Misalnya, meningkatnya kadar logam dalam air laut sehingga memengaruhi pertumbuhan diatom (Liang et al., 2014).

Aspek penting fitoplankton baik secara ekologis dan komersial membuat penelitian

tentang efek polutan logam berat pada berbagai diatom telah dilakukan dalam beberapa dekade terakhir. Uji toksisitas untuk mencari nilai IC_{50} logam berat terhadap pertumbuhan pada beberapa spesies fitoplankton juga sudah dilakukan, termasuk *C. gracilis*. Beberapa logam sangat penting bagi organisme hidup pada konsentrasi yang sangat rendah, tetapi pada konsentrasi tinggi sebagian besar bersifat toksik dan merugikan berbagai proses fisiologis dan biokimia fitoplankton (Suratno et al., 2015).

Tulisan ini akan mengkaji perkembangan riset toksisitas logam kadmium terhadap beberapa spesies plankton yang akan dibahas lebih lanjut dengan menggunakan studi literatur/pustaka untuk memberikan kebaruan (*update*) informasi mengenai dampak pencemaran logam kadmium di perairan. Aspek lain seperti penjelasan mengenai dampak dan mekanisme toksisitas logam kadmium yang menyebabkan efek mematikan (akut) maupun efek jangka panjang atau sub-akut terhadap plankton serta pengaruhnya terhadap komposisi biokimia fitoplankton akan dibahas secara komprehensif.

LOGAM KADMIUM

Logam berat yang paling umum berada sebagai residu dalam air limbah diantaranya adalah arsenik, kadmium, kromium, tembaga, timah, nikel, dan seng. Hampir seluruh logam berat dikategorikan sebagai polutan prioritas dan dapat menyebabkan risiko bagi kesehatan manusia maupun mengganggu keseimbangan lingkungan (Lambert et al., 2000). Logam berat dapat memasuki lingkungan dengan cara natural maupun secara antropogenik melalui aktivitas manusia. Logam berat dapat berasal dari erosi tanah, pelapukan alami kerak bumi, penambangan, limbah industri, limpasan perkotaan, pembuangan limbah, agen pengendalian serangga atau penyakit yang diterapkan pada tanaman, dan banyak lainnya (Morais et al., 2012).

Kadmium (Cd) merupakan salah satu logam berat yang memiliki berat molekular 112,4 gram/mol. Kadmium berbentuk solid dan berwarna silver. Titik didih kadmium sebesar 765°C (1409°F) dan titik leleh

sebesar 320.9°C (609.6°F) (Sigel *et al.*, 2013).

Kadmium tergolong logam yang relatif langka namun sering digunakan untuk berbagai kepentingan. Pada kondisi murni, kadmium berwarna silver dengan sedikit warna biru. (Cobb, 2008). Kadmium yang murni tidak dapat ditemukan di alam. Cara mendapatkan kadmium murni hanya dengan menggabungkan dengan komponen elemen lain. Komponen tersebut merupakan substansi yang terbentuk ketika dua atau lebih elemen digabungkan dalam reaksi kimia. Kadmium hanya dapat dipurifikasi oleh manusia. Logam ini tidak memiliki bau dan rasa namun sangat beracun (Cobb, 2008).

Sumber utama pencemaran kadmium dari aktivitas antropogenik manusia adalah aktivitas pertambangan, industri metalurgi dan lumpur limbah. Pada kegiatan pertambangan biasanya kadmium ditemukan dalam bijih mineral seperti sulfida green ockite atau xanthochroite, karbonat otative, dan cadmium oxide. Mineral-mineral ini terbentuk berasosiasi dengan bijih sfalerit dan oksidanya, atau dapat juga diperoleh dari debu sisa pengolahan lumpur elektrolit.

Peningkatan konsentrasi logam berat di perairan sebagian besar disebabkan oleh pembuangan limbah industri yang berasal dari wilayah darat. Pada saat musim hujan, kadmium yang terdapat di daratan terbawa ke laut melalui aliran sungai. Kadmium dapat berada di perairan dalam berbagai fase yaitu terlarut, mengendap maupun membentuk butiran halus. Kadmium yang terlarut, karena massa jenisnya yang tinggi, akan mengendap ke dasar perairan meskipun butuh waktu yang cukup lama (Morais, Costa, & Pereira, 2012). Kelarutan kadmium dalam air sangat dipengaruhi dengan keasamannya, kadmium yang diikat atau diendapkan dapat larut ketika ada suatu peningkatan keasaman.

Jika jumlah kadmium yang masuk ke dalam sel suatu organisme sangat banyak, maka sel tersebut tidak dapat menetralkan kadmium dan dapat mengakibatkan melambatnya laju pertumbuhan dan perkembangan, deformasi bentuk sel atau organel sel dan menurunkan fungsi organel sel. Kadmium yang terdapat pada diatom dapat memengaruhi proses metabolisme, seperti gangguan pada pigmen fotosintesis

sehingga pertumbuhan diatom terhambat (Puspasari, 2006).

Berdasarkan penelitian oleh Sarjono (2009), konsentrasi kadmium pada Perairan Kamal Muara sebesar 0,006 mg/L pada air dan 0,439 mg/L pada sedimen. Sedangkan Rochyatun dan Rozak (2007) melakukan penelitian pada Teluk Jakarta dan kandungan kadmium yang terdapat pada berkisar antara 0,08-0,42 mg/L pada air dan 0,001-0,44 pada sedimen. Menurut Peraturan Pemerintah 82 tahun 2001, baku mutu kadmium pada perairan adalah 0,01 mg/L. Jika mengacu pada peraturan tersebut, maka kandungan kadmium pada Perairan Kamal Muara masih tergolong rendah pada air namun cukup tinggi pada sedimen, sedangkan konsentrasi kadmium pada perairan di Teluk Jakarta termasuk cukup tinggi pada air dan sedimen.

Jika pencemaran kadmium dibandingkan dengan beberapa daerah lain di luar provinsi Jakarta, terdapat beberapa daerah yang memiliki kandungan kadmium lebih tinggi dibandingkan perairan di Jakarta seperti 0,0091 mg/L pada Sungai Musi (Emilia, *et al.*, 2013), 0,015 mg/L pada Perairan Kwanyar (Nugraha, 2009), dan 0,0093 mg/L pada Sungai Pangkajene (Maddusa & Asrifuddin, 2016). Namun terdapat juga beberapa daerah yang memiliki kandungan kadmium yang hampir setara dengan perairan di Jakarta seperti Sungai Citarum (Happy *et al.*, 2012) dan Sungai Bayuasin (Barus, 2017) yang memiliki kandungan kadmium 0,003-0,01 mg/L dan 0,002-0,062 mg/L. Sedangkan pada perairan Socah kandungan kadmium sangat rendah dengan nilai 0-0,0001 (Nugraha, 2009) yang menandakan masih ada perairan yang tidak terlalu tercemar di perairan Indonesia.

MEKANISME PAPARAN LOGAM KADMIUM TERHADAP FITOPLANKTON

Penghambatan pertumbuhan pada fitoplankton bergantung pada jumlah ion logam berat yang terikat pada permukaan sel, jumlah ion logam berat intraseluler dan karakteristik kimia alami dari ion logam tersebut. Pada umumnya, kerusakan membran sel adalah hal utama yang terjadi dari gangguan logam berat (Veerapandiyam *et al.*, 2014).

Logam berat kadmium dapat menghambat pertumbuhan sel dengan dua cara yaitu, penyerapan pasif dan penyerapan aktif (Veerapandiyan *et al.*, 2014). Penyerapan pasif terjadi karena interaksi logam berat dengan dinding sel ketika penyerapan aktif berlangsung melalui transpor logam berat melewati membran sel ke dalam sitoplasma. Pada tingkat seluler, penyerapan pasif diawali dengan adanya interaksi logam berat dan dinding sel yang pada umumnya mengandung enzim ekstraseluler untuk penyerapan unsur penting yang dibutuhkan oleh sel. Penyerapan ini terjadi saat konsentrasi logam berat ekstraseluler lebih besar dibandingkan konsentrasi intraseluler, sedangkan penyerapan aktif memerlukan energi dari sel untuk menyerap ion logam berat dari luar sel. Ion logam berat ini kemudian akan mengganti kofaktor penting enzim dan merusak organel sel (Veerapandiyan *et al.*, 2014).

Ion logam berat dapat masuk ke dalam membrane sel jika logam berat tersebut memiliki sifat lipofilik atau dapat larut dalam lemak/lipid. Karakteristik ini penting karena membran sel disusun oleh lapisan lemak atau lipid bilayer dan bersifat impermeable terhadap logam berat seperti kadmium dan seng (Purbonegoro, 2008). Hal ini menyebabkan logam berat dapat berinteraksi dengan komponen sel seperti DNA dan protein nukleat. Interaksi ini akan merusak DNA dengan cara menyebabkan apoptosis dalam siklus sel. Menurut Hindarti dan Larasati (2019), kadmium dapat mempengaruhi transduksi sinyal dan menutup kanal protein. Pada konsentrasi rendah, kadmium akan mengikat protein dan mengurangi kemampuan DNA repair serta mengaktifasi degradasi protein (Hindarti dan Larasati, 2019).

DAMPAK FISILOGIS PAPARAN LOGAM KADMIUM TERHADAP FITOPLANKTON

Konsentrasi kadmium yang meningkat pada fitoplankton dapat memengaruhi proses metabolisme sel, terutama pada kloroplas sehingga pertumbuhan sel terhambat dan fotosintesis terganggu (Puspasari, 2006). Kadmium dapat menghambat biosintesis asam aminolevulinat dan protochlorophyllide

reductase sehingga pigmen klorofil berkurang (Purbonegoro, 2008). Selain itu, kadmium juga dapat mempengaruhi pigmen karotenoid yang berperan sebagai antioksidan (Shen *et al.*, 2018). Jika karotenoid tidak dapat menghambat ROS (reactive oxygen species), maka pertumbuhan fitoplankton akan terganggu dan kandungan karotenoid dapat berkurang. Kandungan karotenoid yang berkurang juga berdampak pada fungsinya sebagai photoprotection, yaitu melindungi fitoplankton dari paparan sinar berlebihan sehingga merusak pigmen fotosintesis (Torregrosa-Crespo *et al.*, 2018).

(Torregrosa-Crespo, et al., 2018).

Ketika ion logam berat sudah berada dalam membran sel, enzim-enzim dan organel sel yang berada dalam sitoplasma menjadi tujuan utama ion tersebut. Organel yang paling sensitif terhadap logam berat adalah kloroplas. Kloroplas merupakan organel yang berperan sebagai situs pada proses fotosintesis, yang berfungsi untuk menerima air serta karbon dioksida dan dikonversi menjadi karbohidrat serta oksigen dengan bantuan cahaya matahari (Jensen & Leister, 2014).

Ion logam berat yang masuk ke dalam kloroplas akan mempengaruhi membran tilakoid yang merupakan bagian dari kloroplas yang berfungsi untuk menyerap sinar matahari. Aktivitas enzim galaktolipase dapat meningkat saat logam Kadmium memasuki sel. Peningkatan aktivitas enzim ini apabila terjadi secara berlebihan akan memicu hidrolisis molekul lipid, seperti monogalaktolipid yang merupakan penyusun membran tilakoid, sehingga mengakibatkan membran tilakoid tersebut terdegradasi.

Kloroplas yang terpapar oleh logam berat dapat rusak sehingga proses fotosintesis terganggu. Kloroplas tidak dapat menerima sinar matahari dengan baik sehingga tidak dapat mengkonversi air dan karbon dioksida. Jika proses fotosintesis terganggu, maka fitoplankton tidak dapat menerima makanan dan kadar oksigen yang diproduksi menjadi berkurang. Kurangnya kadar oksigen terlarut (dissolved oxygen) membuat pertumbuhan fitoplankton terhambat (Purbonegoro, 2008).

Pada konsentrasi kadmium yang tinggi, morfologi dinding sel dapat berubah dan

seta menghilang. Selain itu, konsentrasi yang tinggi menyebabkan produksi klorofil berkurang sehingga warna klorofil tidak dapat terlihat dengan jelas pada mikroskop. Perubahan morfologis dinding sel dapat terjadi karena proses bioabsorpsi kadmium pada dinding sel diatom. Dinding sel adalah penghalang sel pertama dalam absorpsi logam berat sehingga merupakan mekanisme defensif yang membuat diatom mentoleransi logam dalam mediana.

Kadmium yang masuk dengan melewati dinding sel akan merusak formasi dinding sel tersebut sehingga bentuknya menjadi lebih bulat dan tidak berbentuk segi empat (Puspitasari, 2018). Beragam spesies mikroalga telah diteliti memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap logam kadmium. Berikut adalah data dari beberapa penelitian tentang pengaruh kadmium pada spesies mikroalga dan diatom. Data yang ditampilkan adalah nilai IC_{50} yang didapatkan dari setiap penelitian berdasarkan tabel perbandingan antar spesies fitoplankton (Tabel 1).

Tabel 1. Perbandingan IC_{50} antar Spesies

Spesies	IC_{50} Kadmium (mg/L)	Referensi
<i>C. gracilis</i>	1,3	(Suratno et al., 2015)
<i>Nitzschia</i> sp.	0,159	(Hindarti & Larasati, 2019)
<i>Skeletonema costatum</i>	0,224	(Nassiri et al., 1997)
<i>Planothidium lanceolatum</i>	0,25	(Sbihi et al., 2012)
<i>P. subcapitata</i>	0,60	(Rodgher et al., 2012)
<i>Tetraselmis</i> sp.	3,18	(Manimaran & Ashok, 2013)
<i>Isochrysis</i> sp.	0,49	(Suratno et al., 2015)
<i>Thalassiosira</i> sp.	0,32	(Wahyu, 2020)
<i>C. gracilis</i>	1,62	(Ferdian, 2020)

Turunnya konsentrasi klorofil-a yang disebabkan oleh paparan kadmium juga dapat terjadi melalui proses klorosis. Klorosis adalah proses terurainya klorofil akibat dari pengaruh dari eksternal sel yang bersifat ekstrim. Klorosis dapat terjadi

melalui mekanisme restriksi langsung terhadap aktivitas enzim yang berperan penting dalam sintesis klorofil yaitu, 5-asam aminolevulinat dehidratase. Enzim ini membantu sintesis klorofil melalui penggantian logam besi (Fe) dan magnesium (Mg). Terhambatnya enzim tersebut menyebabkan sintesis klorofil tidak terjadi dengan optimal dan jumlah produksi klorofil menurun (Purbonegoro, 2008).

PENGARUH PAPARAN LOGAM KADMIUM TERHADAP KOMPOSISI BIOKIMIA FITOPLANKTON

Fitoplankton merupakan kelompok organisme yang juga sering dimanfaatkan sebagai biomassa dalam berbagai aplikasi seperti bioenergy, pakan ikan dan ternak dan produk kesehatan. Paparan logam kadmium pada fitoplankton dilaporkan dapat merubah komposisi biokimia yang berdampak pada aplikasinya lebih lanjut. Celekli et al., (2013) mengamati jumlah biomassa fitoplankton jenis *Scenedesmus* sp. menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi paparan logam kadmium. Pola yang serupa juga terjadi terhadap konsentrasi pigmen klorofil-a, klorofil-b dan karoten yang semakin menurun saat konsentrasi paparan meningkat. Hal yang serupa juga terjadi saat pengamatan paparan polutan pada jenis fitoplankton lain seperti *Chlorella vulgaris*, *C. pyrenoidosa*, *S. quadricauda*, *S. obliquus* dan *Calothrix brevissima* (Habib et al., 2011; Zhang et al., 2012; Kovacic et al. 2010; Rai et al. 2013; Xu et al., 2013). Paparan polutan seperti logam kadmium mengganggu proses biosintesis pigmen, sehingga komposisinya dalam sel ikut berkurang. Pigmen pada fitoplankton ini merupakan sumber antioksidan yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi.

Paparan logam kadmium juga menyebabkan berubahnya komposisi kimia sel yaitu meningkatnya konsentrasi proline dan malondialdehyde (MDA). Konsentrasi proline meningkat karena disebabkan paparan logam berat yang menginduksi produksi proline sebagai bentuk pertahanan. Hal ini telah diamati pada beberapa spesies seperti *S. quadricauda* dan *Spirulina platensis* (Celekli et al., 2013; Choudhary et

al., 2007). Sementara itu komposisi MDA dalam sel meningkat akibat terjadinya kerusakan membrane melalui peroksidasi lemak yang menghasilkan MDA sebagai produk. Peningkatan kadar MDA diamati pada beberapa spesies yang dipaparkan logam berat seperti *S. quadricauda* dan *Calothrix brevissima* (Celekli et al., 2013; Habib et al., 2011). Perubahan komposisi biokimia pada sel fitoplankton ini akan berpengaruh terhadap aplikasinya.

KESIMPULAN

Logam berat cadmium memiliki dampak terhadap metabolisme fitoplankton baik yang bersifat lethal maupun sub-lethal. Berbagai penelitian terbaru menunjukkan adanya perubahan tingkat sensitivitas fitoplankton terhadap logam kadmium. Dampak fisiologis yang dapat diamati akibat paparan logam kadmium antara lain adalah gangguan fotosintesis dan pertumbuhan sel, serta kerusakan klorofil (klorosis). Kerusakan morfologi juga diamati pada paparan logam kadmium konsentrasi tinggi. Paparan kadmium juga menyebabkan perubahan komposisi biokimia sel fitoplankton seperti penurunan kadar pigmen dan meningkatnya kadar proline dan MDA. Penelitian lebih lanjut masih dibutuhkan untuk dapat melihat efek paparan logam kadmium pada fitoplankton.

DAFTAR PUSTAKA

- Barus, B. S. (2017). Analisis Kandungan Logam Berat Kadmium dan Merkuri pada Air dan Sedimen di Perairan Muara Sungai Banyuasin. *Maspari*. 69-76.
- Celekli, A., Kapi, M., & Bozkurt, H. (2013). Effect of cadmium on biomass, pigmentation, malondialdehyde, and proline of *Scenedesmus quadricauda* var. *longispina*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 91(5): 571-576.
- Choudhary, M., Jetley, U. K., Khan, M. A., Zutshi, S., & Fatma, T. (2007). Effect of heavy metal stress on proline, malondialdehyde, and superoxide dismutase activity in the cyanobacterium *Spirulina platensis*-S5. *Ecotoxicology and environmental safety*. 66(2): 204-209.
- Cobb, A. (2008). *Cadmium*. New York: Marshall Cavendish Corporation.
- Darmono. (1995). *Logam dalam Sistem Biologi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Emilia, I., Suheryanto, & Hanafiah, Z. (2013). Distribusi Logam Kadmium dalam Air dan Sedimen di Sungai Musi Kota Palembang. *Junal Penelitian Sains*.
- Ferdian, F., Hindarti, D., & Permana, R. (2020). Cadmium effects on growth and photosynthetic pigment content of *Chaetoceros gracilis*. *World Scientific News*. 145: 245-255.
- Habib, K., Kumar, S., Manikar, N., Zutshi, S., & Fatma, T. (2011). Biochemical effect of carbaryl on oxidative stress, antioxidant enzymes and osmolytes of cyanobacterium *Calothrix brevissima*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 87(6): 615-620.
- Hananingtyas, I. (2017). Studi Pencemaran Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada Ikan Tongkol (*Euthynnus* sp.) di Pantai Utara Jawa. *BIOTROPIC The Journal of Tropical Biology*. 41-50.
- Happy, A. R., Masyamsir, & Dhahiyat, Y. (2012). Distribusi Kandungan Logam Berat Pb dan Cd pada Kolom Air dan Sedimen Daerah Aliran Sungai Citarum Hulu. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 175-182
- Hindarti, D., & Larasati, A. W. (2019). Copper and Cadmium Toxicity on Growth, Chlorophyll-a and Carotenoid Content of Phytoplankton *Nitzschia* sp. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*.
- Jensen, P. E., & Leister, D. (2014). *Chloroplast Evolution, Structure and Functions*. F1000 Prime Reports.
- Kováčik, J., Klejdus, B., Hedbavny, J., & Bačkor, M. (2010). Effect of copper and salicylic acid on phenolic metabolites and free amino acids in *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae). *Plant Science*, 178(3), 307-311.
- Lambert, M., Leven, B. A., & Green, R. M. (2000). New methods of cleaning up heavy metal in soils and water.

- Environmental science and technology briefs for citizens, 1-3.
- Liang, Y., Sun, M., Tian, C., Cao, C., & Li, Z. (2014). Effects of salinity stress on the growth and chlorophyll fluorescence of *Phaeodactylum tricornutum* and *Chaetoceros gracilis* (Bacillariophyceae). *Botanica Marina*, 469-476.
- Maddusa, S. S., & Asrifuddin, A. (2016). Studi Kandungan Kadmium pada Biota, Sedimen, dan Air pada Sungai Pangkajene Kecamatan Bungoro Kabupaten Pangkep. *Jurnal Paradigma Sehat*, 70-78.
- Manimaran, K., Karthikeyan, P., Ashokkumar, S., Ashok Prabu, V., & Sampathkumar, P. (2012). Effect of Copper on Growth and Enzyme Activities of Marine Diatom, *Odontella mobiliensis*. *Bull Environ Contam Toxicol*, 30 - 37.
- Morais, S., Costa, F. G., & Pereira, M. L. (2012). Heavy Metals and Human Health . *Environmental Health – Emerging Issues and Practice* , 227-246.
- Nassiri, Y., Mansot, J. L., Wery, J., Ginsburger-Vogel, T., & Amiard, J. C. (1997). Ultrastructural and Electron Energy Loss Spectroscopy Studies of Sequestration Mechanisms of Cd and Cu in the Marine Diatom *Skeletonema Costatum*. *Arch. Environmental Contamination Toxicology*, 147 - 155.
- Nugraha, W. A. (2009). Kandungan Logam Berat pada Air dan Sedimen di Perairan Socah dan Kwanyar Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Kelautan*, 158-165.
- Purbonegoro, T. (2008). Pengaruh Logam Berat Kadmium (Cd) terhadap Metabolisme dan Fotosintesis di Laut. *Oseana*, 25-31.
- Puspasari, R. (2006). Logam dalam Ekosistem Perairan. *Bawal Widya Riset Perikanan Tangkap*, 43-75.
- Puspasari, R. (2006). Logam dalam Ekosistem Perairan. *Bawal Widya Riset Perikanan Tangkap*, 43-75.
- Rai, U. N., Singh, N. K., Upadhyay, A. K., & Verma, S. (2013). Chromate tolerance and accumulation in *Chlorella vulgaris* L.: role of antioxidant enzymes and biochemical changes in detoxification of metals. *Bioresource technology*, 136, 604-609.
- Rangkuti, A. M. (2009). Analisis Kandungan Logam Berat Hg, Cd, dan Pb Pada Air dan Sedimen di Perairan Pulau Panggang-Pramuka Kepulauan Seribu, Jakarta. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Rochyatun, E., & Rozak, A. (2007). Pemantauan Kadar Logam Berat dalam Sedimen di Perairan Teluk Jakarta. *Makara, Sains*, Vol. 11, No. 1, 28-36.
- Rodgher, S., Espindola, E. L., Simões, F. C., & Tonietto, A. E. (2012). Cadmium and Chromium Toxicity to *Pseudokirchneriella subcapitata* and *Microcystis aeruginosa*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 161 - 169.
- Sarjono, A. (2009). Analisis Kandungan Logam Berat Cd, Pb, dan Hg pada Air dan Sedimen di Perairan Kamal Muara, Jakarta Utara. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Sbihi, K., Cherifi, O., El Gharmali, A., Oudra, B., & Aziz, F. (2012). Accumulation and Toxicological Effects of Cadmium, Copper and Zinc on the Growth and Photosynthesis of the Freshwater Diatom *Planothidium lanceolatum* (Brébisson) Lange-Bertalot: A Laboratory Study. *J. Mater. Environmental Science*, 497 – 506.
- Shen, Y., Li, J., Gu, R., Yue, L., Wang, H., Zhan, X., & Xing, B. (2018). Carotenoid and Superoxide Dismutase are The Most Effective Antioxidants Participating in ROS Scavenging in Phenanthrene Accumulated Wheat Leaf. *Chemosphere*, 513-525.
- Sigel, A., Sigel, H., & Sigel, R. K. (2013). *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*. Dordrecht: Springer.
- Suratno, Puspitasari, R., Purbonegoro, T., & Mansur, D. (2015). Copper and Cadmium Toxicity to Marine Phytoplankton, *Chaetoceros gracilis* and *Isochrysis* sp. *Indones. J. Chem.*, 172-178.
- Torregrosa-Crespo, J., Montero, Z., Fuentes, J. L., García-Galbis, M. R., Garbayo, I., Vílchez, C., & Martínez-Espinosa, R. M. (2018). Exploring the Valuable Carotenoids for the Large-Scale

- Production by Marine Microorganisms.
Marine Drugs.
- Veerapandiyan, N., Lenin, T.,
Sampathkumar, P., Sundaram, A. A.,
& Sangeetha, S. P. (2014). *Journal of
Science Inventions Today*, 725 – 736.
- Wahyu, D., Hindarti, D., & Permana, R.
(2020). Cadmium toxicity towards
marine diatom *Thalassiosira* sp. and its
alteration on chlorophyll-a and
carotenoid content. *World News of
Natural Sciences*, 31.
- Xu, D., Li, C., Chen, H., & Shao, B. (2013).
Cellular response of freshwater green
algae to perfluorooctanoic acid toxicity.
*Ecotoxicology and environmental
safety*, 88, 103-107.
- Zhang, W., Zhang, M., Lin, K., Sun, W.,
Xiong, B., Guo, M., ... & Fu, R. (2012).
Eco-toxicological effect of
Carbamazepine on *Scenedesmus
obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa*.
*Environmental toxicology and
pharmacology*, 33(2), 344-352.