

EFEK POLUTAN TERHADAP FISILOGIS MAKROINVERTEBRATA SUNGAI : REVIEW

Effects of Pollutants on Physiological of River Macroinvertebrates: A Review

Miftahul Khair Kadim^{1,2*}, Diana Arfiati³

¹⁾ Program Pascasarjana Ilmu Perikanan dan Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya

²⁾ Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Negeri Gorontalo
*e-mail: miftahulkhairkadim@ung.ac.id

³⁾ Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya
e-mail: d-arfiati@ub.ac.id

Abstract

Contaminants sourced from numerous anthropogenic activities threaten a river ecosystem continuously. Anthropogenic modification alters water quality and affects aquatic biota life. Most of the pollution of the aquatic environment comes from chemical materials such as heavy metals, fertilizers, pesticides, and plastics. Heavy metals are the most dangerous pollutants as they are toxic, carcinogenic, biomagnifying, and bioaccumulative. Pollution affects the survival of aquatic biota, including macroinvertebrates. The sedentary nature of macrozoobenthos makes it to be contaminated with ease, which then affects its survival. Currently, the damaging impact of pollutants on the physiology of macrozoobenthos has been reported in several studies though it is still limited to the use of particular families. This review aims to inform the physiological impacts caused by pollutants on the macrozoobenthos community that lives along the river from upstream to downstream. Pollutants trigger disturbances in physiological functions, which are termed oxidative stress. Macrozoobenthos perform a series of mechanisms, including producing enzymes as the primary defense.

Keywords : Macrozoobenthos, physiological, pollutants, river

PENDAHULUAN

Sungai tidak hanya dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia, tetapi juga sebagai tempat pembuangan limbah yang dihasilkan dari aktivitas tersebut. Sungai memiliki kemampuan untuk memurnikan kembali dan memulihkan diri, jika limbah tersebut masih berada dalam ambang batas daya dukung sungai. Perkembangan pembangunan yang begitu pesat dan kemajuan teknologi di berbagai bidang, selain memberikan manfaat juga menghasilkan pencemaran. Aktivitas yang tidak disertai pertimbangan-pertimbangan lingkungan, akan menimbulkan resiko sangat besar bagi manusia.

Rusaknya kualitas perairan sungai disebabkan adanya aktivitas pencemaran (Dewi, 2012; Vaghela *et al.*, 2017). Pencemaran di sungai dapat terjadi karena adanya masukan limbah dari berbagai aktivitas antropogenik (Singer & Battin, 2007; Takao *et al.*, 2008; Sudarso *et al.*, 2013). Limbah domestik maupun industri masuk ke sungai tanpa adanya pengolahan, meskipun diolah namun kadar polutan masih melebihi baku mutu yang ditetapkan (Kadim *et al.*, 2013). Modifikasi antropogenik menyebabkan perubahan kualitas lingkungan air sungai (Islam *et al.*, 2015) yang juga mempengaruhi kehidupan biota di dalamnya (Dekov *et al.*, 1997; Kurz *et al.*, 2013; Fuoco & Giannarelli, 2019; Barbieri *et*

al., 2020). Pencemaran yang terjadi terus-menerus dapat memberikan dampak pada biota pada tataran molekuler, seluler bahkan dapat menyebabkan kematian sehingga mempengaruhi jumlah populasi.

Pengaruh polutan sangat kompleks dalam mekanisme maupun tingkatannya. Pencemaran zat organik, logam berat dan zat anorganik lainnya, mengubah kondisi lingkungan serta memiliki pengaruh beracun akut atau kronis pada berbagai komponen akuatik air. Sebagai contoh logam berat, menjadi polutan paling berbahaya jika telah mencemari perairan. Logam berat bersifat toksik, karsinogenik, biomagnifikasi dan bioakumulatif. Merkuri, Timbal dan Kadmium merupakan logam berat paling bersifat toksik dibanding logam berat lainnya dan sulit untuk didegradasi secara alami (Dewi *et al.*, 2015; Erasmus *et al.*, 2020). Logam berat di perairan dapat terakumulasi di jaringan tubuh biota air, jika konsentrasi toksik tercapai akan dapat merusak semua komponen biotik. Akumulasi bahan pencemar oleh organisme terjadi melalui rantai makanan pada trofik level berbeda (Doyi *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2020; Razak *et al.*, 2021).

Tingginya potensi pencemaran di sungai sudah seharusnya menjadi perhatian semua pihak mengingat dampak yang ditimbulkan pada akhirnya akan kembali ke manusia. Artikel ini disusun untuk menjelaskan dampak fisiologis yang ditimbulkan oleh polutan terhadap salah satu organisme akuatik, makrozoobentos. Berbagai penelitian telah mempublikasikan dampak aktivitas antropogenik terhadap makrozoobentos (seperti De Girolamo *et al.*, 2017; Rahayu *et al.*, 2015; Sudarso *et al.*, 2013). Sifat hidup makrozoobentos yang menetap menjadi sangat mudah terkontaminasi dan tentunya akan berpengaruh terhadap keberlangsungan hidupnya.

METODE PENELITIAN

Artikel ini merupakan hasil *review* dari beberapa artikel yang membahas polutan

pada makroinvertebrata. Artikel dikumpulkan dari Google Scholar, Scopus dan beberapa situs berbasis sains. Pencarian menggunakan kata kunci berikut: “stress” + “respons” + “physiological” + “macroinvertebrate” + “river” dan beberapa kata kunci yang terkait. Artikel yang mengevaluasi respon fisiologis seperti perilaku, aktivitas enzim, variabilitas genetik dan kelangsungan hidup juga dijadikan sebagai referensi. Terdapat tiga artikel utama yang menjadi pembahasan inti dalam *review* ini yaitu tulisan Lencioni *et al.* (2020), Sudarso & Yoga (2015) dan Freitas *et al.* (2012). *Review* membahas efek polutan organik maupun anorganik terhadap komunitas makrozoobentos yang hidup di bagian hulu, tengah maupun hilir sungai. Total 66 artikel dari tahun 1997-2021 menjadi referensi dalam *review* ini.

PEMBAHASAN

Efek Pencemaran Sungai Terhadap Makrozoobentos

Keberadaan aktifitas antropogenik di sekitar Daerah Aliran Sungai berpotensi menurunkan kondisi kualitas air dan secara tidak langsung akan berdampak pada kelulus hidupan biota akuatik tidak terkecuali makroinvertebrata atau makrozoobentos (Jojok Sudarso *et al.*, 2016). Polutan yang dihasilkan oleh aktivitas antropogenik diantaranya berasal dari polutan kimia seperti pupuk, pestisida, bahan plastik dan logam berat (Anggraini *et al.*, 2020; Schettino *et al.*, 2012; Valavanidis & Vlachogianni, 2010). Beberapa polutan tersebut memiliki sifat yang mudah berikatan dengan bahan partikulat hingga akhirnya terakumulasi di dasar sebagai sedimen (Baldwin & Howitt, 2007). Kehadiran polutan memicu terjadinya perubahan lingkungan yang dapat menyebabkan organisme akuatik mengalami kondisi stres secara fisiologis. Stres pada tingkatan molekuler dapat merusak struktur DNA/RNA (perubahan genetik), hingga menyebabkan kerusakan sel, perubahan

perilaku, reproduksi atau morfologi dimana efek terparahnya adalah kematian (Petitjean *et al.*, 2019).

Monitoring kualitas lingkungan dengan parameter biologi biasanya dilakukan menggunakan hewan, tanaman dan mikroorganisme (Rini, 2011). Salah satu tujuan monitoring ekologi sungai adalah untuk menjelaskan dan memprediksi distribusi organisme dan menilai pengaruh perubahan lingkungan (Kefford *et al.*, 2020). Mencapai tujuan ini terbukti sulit karena karakter sungai yang lanskap, dinamis dan multiskala (Frissell *et al.*, 2001).

Berbagai program pemantauan telah dilakukan menggunakan biota sungai untuk menyelidiki paparan kontaminan, seperti logam, pada beberapa dekade terakhir (Santos & Ferreira, 2020). Sejumlah penelitian berfokus pada distribusi dan akumulasi dalam organisme dan efek yang ditimbulkannya (Oliveira *et al.*, 2009). Penelitian lainnya berfokus pada mengenali respon stres biokimiawi untuk toleransi kontaminan logam yang penejelasaannya akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.

Respon Stres

Stres merupakan keadaan fisiologi yang dihasilkan oleh faktor lingkungan, mengganggu fungsi normal sedemikian rupa sehingga peluang untuk bertahan hidup berkurang. Pada saat stress, keseimbangan homeostatis terganggu yang dampak lanjutnya dapat bersifat akut, kronis atau keduanya (Barton, 2002). Kondisi stres memicu respon secara fisiologis yang terkoordinasi. Respon stres dilakukan oleh organisme akuatik sebagai kompensasi gangguan dalam upaya mengatasi ancaman. Respon stres adalah serangkaian mekanisme biokimia, fisiologis dan perilaku kompleks yang muncul akibat adanya pengaruh (perubahan) lingkungan. Respon ini berupa mekanisme homeostatis yang secara otomatis dilakukan organisme untuk mempertahankan keseimbangan tubuhnya meskipun terjadi perubahan kondisi lingkungan (Petitjean *et al.*, 2019). Larva

serangga telah mengembangkan strategi toleransi secara kimiawi untuk bertahan hidup (Lencioni *et al.*, 2020). Sebagai respon dari adanya stressor, makroinvertebrata memproduksi enzim-enzim pertahanan utama, seperti catelase (CAT) dan superoksida dismutase (SOD) (Freitas *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2019). Mekanisme tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

Efek Polutan dan Respon Fisiologis Makrozoobentos

Makrozoobentos merupakan organisme sentinel yang dominan di sungai dan terdistribusi luas mulai dari hulu hingga ke hilir (Hauer & Resh, 2017; Tantalus *et al.*, 2017). Sensitivitas makrozoobentos akibat pencemaran lingkungan berkaitan dengan sifat biologinya (Berger *et al.*, 2018; Gitarama *et al.*, 2016). Komunitas makroinvertebrata bentik mampu memberikan respon biokimia yang signifikan berbeda. Beberapa penanda biokimia yang diukur pada spesies bentik makroinvertebrata dapat mendeteksi efek subletal dan memberikan informasi penting tentang faktor lingkungan tambahan yang merusak komunitas bentik yang dilaporkan oleh Damásio *et al.* (2011).

Perubahan lingkungan memicu perubahan kadar hormon stres seperti glukokortikoid (yang memproduksi kortisol) dan katekolamin, situasi ini menyebabkan terjadinya stress pada organisme akuatik (Feil & Fraga, 2012). Stres dapat mempengaruhi sistem pertahanan (seperti sistem antioksidan dan antibodi) dan metabolisme energi. Efek stres dapat berupa perubahan perilaku, reproduksi atau morfologi dan yang terparah adalah perubahan genetik (Petitjean *et al.*, 2019). Pola respon stres dapat bervariasi sesuai dengan spesies, sifat dan durasi paparan (Attard *et al.*, 2018; Balasch & Tort, 2019; Schulte, 2014). Organisme akuatik yang mengalami stres fisiologis akan membutuhkan oksigen dan konsumsi energi yang tinggi (Du *et al.*, 2018), kondisi ini secara umum akan meningkatkan

metabolisme terutama pembentukan asam amino sehingga mengganggu produk energi yang lain dan sistem pertahanan dari organisme tersebut (Gandar *et al.*, 2017).

Lencioni *et al.* (2020) melakukan penelitian untuk melihat efek toksisitas akut hingga genotoksistas yang terjadi pada beberapa spesies makrozoobentos di sungai yang terkontaminasi limbah *Pharmaceuticals dan personal care products* (PPCPs). Limbah ini diamati karena memiliki potensi bioakumulasi tinggi pada organisme akuatik. Penelitian dilakukan di hulu hingga hilir sungai Noce (Italia) pada dua musim berbeda, yaitu musim dingin dan panas. Toksisitas akut dan paparan genotoksistas (kerusakan DNA) dimulai setelah waktu akumulasi 24 jam, secara keseluruhan terdapat 6963 larva yang di uji mewakili 8 spesies terpilih yaitu *Diamesa cinerella*, *Perlodes intricatus*, *Dictyogenus alpinus*, *Baetis alpinus*, *Baetis rhodani*, *Rhyacophila occidentalis*, *Rhyacophila tristis* dan *Pseudodiamesa branickii*. Pada hasil uji toksisitas akut, limbah memberikan efek negatif yang signifikan pada kelangsungan hidup selama paparan 24-96 jam. Kerusakan DNA juga terdeteksi, *Diamesa cinerella* menjadi spesies dengan kerusakan paling banyak. Secara umum, kerusakan DNA meningkat dari hulu ke hilir dan musim panas menunjukkan kerusakan DNA lebih tinggi dibandingkan musim dingin. Metabolit reaktif dari ibuprofen (salah satu perlakuan dalam penelitian ini) tidak hanya mampu berinteraksi dengan DNA melalui ikatan valen tetapi juga dapat menempel pada protein yang bertanggung jawab atas sintesis dan perbaikan DNA. Beberapa spesies yang diuji dalam penelitian ini mengalami peningkatan toleransi terhadap konsentrasi zat beracun. Diketahui bahwa, polusi organik dapat mempengaruhi sensitivitas beberapa spesies kontaminan lainnya, hal ini terjadi karena adanya mekanisme perbaikan dan pembentukan antioksidan sebagai bentuk pertahanan akibat adanya kerusakan DNA.

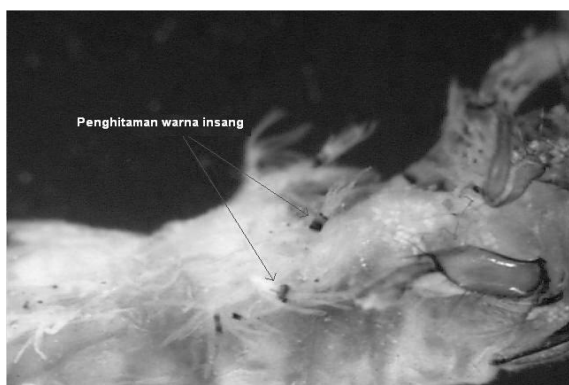
Organisme yang hidup di lingkungan dingin telah mengalami evolusi pada sistem

fisiologisnya (misalnya tingkat metabolisme yang lebih lambat, penyimpanan lipid yang lebih tinggi) sehingga berpengaruh besar pada sensitivitas atau toleransi terhadap kontaminan (Chapman, 2016). Populasi yang hidup di daerah paling tercemar umumnya terakumulasi kerusakan DNA yang tinggi, ini menunjukkan bahwa populasi tersebut mengalami lebih banyak stres. Meskipun spesies yang terkontaminasi mampu bertahan hidup, tetapi spesies tersebut terindikasi dalam keadaan stress secara fisiologis (Kolarević *et al.*, 2016; Lencioni *et al.*, 2018). Perubahan DNA yang terjadi akibat stres oksidatif pada organisme akuatik, seperti ikan, dapat menyebabkan gangguan pada sel gonadik sehingga mengurangi kualitas gamet dan keturunan (Santos *et al.*, 2017; Reichert and Stier, 2017).

Logam berat menjadi salah satu polutan yang berada di sedimen dalam jumlah yang tinggi. Jika terpapar ke organisme sungai dapat mengakibatkan gejala toksisitas (Ahamad *et al.*, 2020; Razak *et al.*, 2021). Sifat hidup yang relatif menetap di dasar perairan membuat sebagian besar makrozoobentos berpotensi untuk terpapar oleh logam berat. Paparan logam berat pada makrozoobentos dapat menyebabkan gangguan fisiologi, cacat morfologi, hingga perubahan struktur komunitas (Di Veroli *et al.*, 2014). Bioavailabilitas logam di sedimen dipengaruhi oleh ketersediaan agen pengikat diantaranya pH, sulfida, salinitas, bahan organik serta ukuran bahan partikulat penyusun sedimen (Castro *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2014). Sudarso, *et al.* (2016) melaporkan bahwa adanya kontaminasi logam Arsen di sedimen dapat mengakibatkan penurunan indeks keanekaragaman di ekosistem sungai.

Contoh kasus larva Trichoptera di Sungai Ciliwung dan Sungai Cikaniki, Indonesia, Sudarso & Yoga (2015) melaporkan adanya nekrosis pada insang *Cheumatopsyche* sp. akibat terpapar merkuri. Bentuk nekrosis yang tampak berupa adanya penghitaman pada bagian

insang (Gambar 1). Terdapat korelasi antara tingginya kontaminan logam dengan besarnya persentase nekrosis insang larva Trichoptera. Metilmerkuri di air dapat menyebabkan abnormalitas pada insang abdominal Tricoptera, akibatnya berpotensi kecacatan saat dewasa. Penghitaman pada insang menjadi sinyal gangguan fungsi pernafasan dan pengaturan ion metabolik. Chakona *et al.* (2009) melaporkan perubahan morfologi insang juga terjadi ketika larva terpapar Cr, Al, Cd, Zn dan air yang terklorinasi.



Gambar 1. Penghitaman pada insang *Cheumatopsyche* sp. akibat terpapar merkuri

Sumber : Sudarso & Yoga (2015)

Trichoptera memiliki insang trakea yang sangat peka dan afinitasnya terhadap kontaminasi logam tinggi sehingga dapat membentuk ikatan dengan nitrogen dan gugus sulfur. Ikatan kimia tersebut akan mempengaruhi fungsi normal metabolisme sel dan metaloenzim. Metaloenzim tersubstitusi logam, protein terdeformasi mengakibatkan penurunan kemampuan enzim katalik (Sinaie *et al.*, 2010). Efek lanjut akan mengakibatkan gangguan sistem biokimiawi yang berakibat pada terjadinya *anoxemia* atau terhambatnya ekskresi dan fungsi sirkulasi di insang karena perubahan struktur morfologi insang. Kerusakan sistem pernafasan mengakibatkan fosforilasi oksidatif dan menghambat sistem transportasi elektron pada penguraian makanan, hal ini mempengaruhi metabolisme dan pertumbuhan. Kondisi ini dapat menyebabkan kematian pada

makrozoobentos. Beberapa logam berat diketahui memberikan efek pada insang antara lain: Pb, Zn, Fe, Cu, Cd dan Hg (Chavan & Muley, 2014; Devlin, 2006).

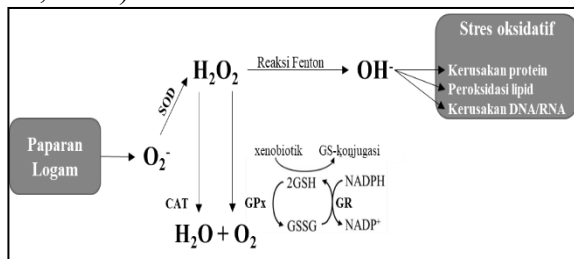
Beberapa penelitian telah mempelajari dan melaporkan efek paparan logam berat pada makrozoobentos. Ansaldo *et al.* (2009) melaporkan *Biomphalaria glabrata* yang terpapar Arsen (Ar) mengalami penurunan fekunditas serta memperpanjang waktu penetasan telur. Al-Shami *et al.* (2011) melaporkan adanya pencemaran logam (Mn, Cu, Zn, dan Ni) di sedimen menyebabkan terjadinya kecacatan pada bagian mulut larva Chironomidae. Larva Trichoptera mengalami penyimpangan pembentukan sarang seperti yang dilaporkan oleh Chakona *et al.* (2009) dan Skinner & Bennett (2007). Factor dan Chavez (2012) melaporkan toksisitas kronis dari Al, As, Cr dan Ni pada *Radix quadrasi* (fase embrio). Efek yang ditimbulkan dapat menyebabkan edema, penipisan cangkang, terhambatnya pertumbuhan hingga kecacatan bentuk.

Evaluasi respon stress biokimia telah dilakukan oleh Freitas *et al.* (2012) pada dua spesies makrozoobentos muara yaitu *Cerastoderma edule* (bivalve) dan *Neapolitana diopatra* (polychaeta) yang terkontaminasi logam berat. Logam berat mengakibatkan adanya kerusakan oksidatif (protein oksidasi dan lipid peroxidase) dan kerusakan DNA sehingga memicu terbentuknya enzim stress Catalase (CAT) dan Superoxide dismutase (SOD) sebagai pertahanan utama. Metallothioneins juga dibentuk sebagai mekanisme toleransi terhadap logam berat. Kedua spesies ini mampu mengakumulasi lebih banyak logam meski pada daerah kontaminasi rendah.

Effek beracun logam pada organisme akuatik disebabkan oleh bioakumulasi, mekanisme ekskresi, metabolisme, dan detoksifikasi yang terjadi karena adanya penyerapan logam di dalam tubuh (Eroglu *et al.*, 2015). Logam masuk ke dalam jaringan tubuh biasanya melalui: makanan, di saluran pencernaan; air, dalam insang; hati, detoksifikasi; dan usus kemudian beredar

keseluruh tubuh melalui sistem peredaran darah (Hernández *et al.*, 2019; Zhai *et al.*, 2017). Logam diekskresikan oleh ginjal dan insang serta akumulasi logam disimpan dalam jaringan (Kim & Kang, 2016). Timbal (Pb) merupakan salah satu logam beracun yang paling akumulatif karena sifatnya yang mudah mengikat oksigen dan atom sulfur dalam protein untuk membentuk ikatan kompleks yang stabil (Verstraeten *et al.*, 2008). Logam berat terakumulasi tinggi pada organ-organ yang aktif melakukan metabolisme (limfa, insang, usus) (Kim & Kang, 2015). Logam berat juga terakumulasi di jaringan otot namun dalam jumlah yang kecil.

Akumulasi logam dalam jaringan mengakibatkan stress sebagai akibat adanya produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) (Lihat Gambar 2). ROS diproduksi sebagai konsekuensi stres oksidatif yang dialami oleh organisme akuatik karena munculnya hydrogen peroksida (H_2O_2), superoksida radikal (O_2^-) dan hidroksil radikal ($OH^\cdot$). Ketidakseimbangan antara radikal bebas dan detoksifikasi biologis (respon antioksidan), seperti SOD, CAT, GSH dan GST memicu terjadinya stres oksidatif. Kondisi ini mengakibatkan kerusakan oksidatif diantaranya kerusakan protein, peroksidasi lemak hingga kerusakan DNA/RNA (Lee *et al.*, 2019).



Gambar 2. Mekanisme stress oksidatif organisme akuatik yang terpapar logam

Sumber : Modifikasi dari Lee *et al.*, 2019

Ion logam berat dapat berikatan dengan gugus sulfidril kompleks di dalam enzim mitokondria, mengakibatkan fosforilasi serta menghalangi sintesis protein dalam proses metabolisme. Logam berat seperti Ar, Cd dan Pb mampu menghambat sistem

transport fosfat, sintesis ATP pada siklus asam sitrat sehingga menghentikan kerja enzim dehidrogenase piruvat. Kondisi ini menjadikan piruvat dalam hemolymph akan meningkat, sehingga menyebabkan kerusakan sel secara bertahap. Pada Skala yang lebih luas, efek toksisitas dapat bersifat akut dan mematikan bagi organisme akuatik jika terkontaminasi terus menerus. Kondisi kelimpahan dan jumlah taksa terganggu, terjadi penurunan populasi yang pada akhirnya mempengaruhi indeks keanekaragamannya (Ansaldo *et al.*, 2009).

KESIMPULAN

Pemaparan di atas menjadi bukti bahwa adanya aktivitas antropogenik dapat memberikan ancaman pencemaran yang berpotensi mengganggu kehidupan organisme di sungai terutama makrozoobentos. Berbagai penelitian telah membuktikan adanya efek kontaminasi polutan di sungai yang dapat mempengaruhi makrozoobentos secara fisiologis, seperti nekrosis pada insang hingga kerusakan DNA. Sensitivitas dan respon terhadap berbagai kontaminan serta sifat hidup dari komunitas makrozoobentos sangat potensial untuk digunakan sebagai alat monitoring polutan khususnya di sungai.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahamad, A., Madhav, S., Singh, A. K., Kumar, A., & Singh, P. (2020). *Types of water pollutants: conventional and emerging* (pp. 21-41). Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_3
- Al-Shami, S. A., Che Salmah, M. R., Abu Hassan, A., & Siti Azizah, M. N. (2011). Fluctuating asymmetry of *Chironomus* spp. (Diptera: Chironomidae) larvae in association with water quality and metal pollution in Permatang Rawa River in the Juru River Basin, Penang, Malaysia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 216(1-4), 203-

216. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0528-4>
- Ansaldò, M., Nahabedian, D. E., Di Fonzo, C., & Wider, E. A. (2009). Effect of cadmium, lead and arsenic on the oviposition, hatching and embryonic survival of *Biomphalaria glabrata*. *Science of the Total Environment*, 407(6), 1923-1928. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.001>
- Attard, C. R. M., Brauer, C. J., Sandoval-Castillo, J., Faulks, L. K., Unmack, P. J., Gilligan, D. M., & Beheregaray, L. B. (2018). Ecological disturbance influences adaptive divergence despite high gene flow in golden perch (*Macquaria ambigua*): Implications for management and resilience to climate change. *Molecular Ecology*, 27(1), 196-215. <https://doi.org/10.1111/mec.14438>
- Balasch, J. C., & Tort, L. (2019). Netting the stress responses in fish. In *Frontiers in Endocrinology*, 10, 62. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00062>
- Baldwin, D. S., & Howitt, J. A. (2007). Baseline assessment of metals and hydrocarbons in the sediments of Lake Mulwala, Australia. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 12(3), 167-174. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2007.00331.x>
- Barbieri, M. V., Peris, A., Postigo, C., Moya-Garcés, A., Monllor-Alcaraz, L. S., Rambla-Alegre, M., Eljarrat, E., & López de Alda, M. (2020). Evaluation of the occurrence and fate of pesticides in a typical Mediterranean delta ecosystem (Ebro River Delta) and risk assessment for aquatic organisms. *Environmental Pollution*, 274, 115813. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115813>
- Barton, B. A. (2002). Stress in Fishes: A diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids. *Integrative and Comparative Biology*, 42(3), 517-525. <https://doi.org/10.1093/icb/42.3.517>
- Berger, E., Haase, P., Schäfer, R. B., & Sundermann, A. (2018). Towards stressor-specific macroinvertebrate indices: Which traits and taxonomic groups are associated with vulnerable and tolerant taxa? *Science of the Total Environment*, 619-620, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.022>
- Castro, R., Pereira, S., Lima, A., Corticeiro, S., Válega, M., Pereira, E., Duarte, A., & Figueira, E. (2009). Accumulation, distribution and cellular partitioning of mercury in several halophytes of a contaminated salt marsh. *Chemosphere*, 76(10), 1348-1355. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.06.033>
- Chakona, A., Phiri, C., & Day, J. A. (2009). Potential for Trichoptera communities as biological indicators of morphological degradation in riverine systems. *Hydrobiologia*, 621(1), 155-167. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9638-z>
- Chapman, P. M. (2016). Toxicity delayed in cold freshwaters? In *Journal of Great Lakes Research*, 42(2), 286-289. International Association of Great Lakes Research. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.03.018>
- Chavan, V. R., & Muley, D. V. (2014). Effect of heavy metals on liver and gill of fish *Cirrhinus mrigala*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(5), 277-288.
- Damásio, J., Fernández-Sanjuan, M., Sánchez-Avila, J., Lacorte, S., Prat, N., Rieradevall, M., Soares, A. M. V. M., & Barata, C. (2011). Multi-biochemical responses of benthic macroinvertebrate species as a complementary tool to diagnose the cause of community impairment in polluted rivers. *Water Research*, 45(12), 3599-3613. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.0>

- 4.006
- De Girolamo, A. M., Balestrini, R., D'Ambrosio, E., Pappagallo, G., Soana, E., & Lo Porto, A. (2017). Antropogenic input of nitrogen and riverine export from a Mediterranean catchment. The Celone, a temporary river case study. *Agricultural Water Management*, 187, 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.025>
- Dekov, V. M., Komy, Z., Araújo, F., Van Put, A., & Van Grieken, R. (1997). Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse). *Science of the Total Environment*, 201(3), 195-210. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)84057-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)84057-0)
- Devlin, E. W. (2006). Acute toxicity, uptake and histopathology of aqueous methyl mercury to fathead minnow embryos. *Ecotoxicology*, 15(1), 97-110. <https://doi.org/10.1007/s10646-005-0051-3>
- Dewi, N. K. (2012). *Biomarker Pada Ikan Sebagai Alat Monitoring Pencemaran Logam Berat Kadmium, Timbal dan Merkuri di Perairan Kaligarang Semarang*. http://eprints.undip.ac.id/36855/1/ISI%3DBAB_1-6_dan_DAFTAR_PUSTAKA.pdf
- Dewi, N. K., Purwanto, & Sunoko, H. R. (2015). Metallothionein in The Fish Liver as Biomarker of Cadmium (Cd) Pollution in Kaligarang River Semarang. *Journal of People and Environment*, 21(3), 304-309. <https://doi.org/10.22146/jml.18557>
- Di Veroli, A., Santoro, F., Pallottini, M., Selvaggi, R., Scardazza, F., Cappelletti, D., & Goretti, E. (2014). Deformities of chironomid larvae and heavy metal pollution: From laboratory to field studies. *Chemosphere*, 112, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.053>
- Doyi, I., Essumang, D., Gbeddy, G., Dampare, S., Kumassah, E., & Saka, D. (2018). Spatial distribution, accumulation and human health risk assessment of heavy metals in soil and groundwater of the Tano Basin, Ghana. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 540-546. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.015>
- Du, S. N. N., McCallum, E. S., Vaseghi-Shanjani, M., Choi, J. A., Warriner, T. R., Balshine, S., & Scott, G. R. (2018). Metabolic Costs of Exposure to Wastewater Effluent Lead to Compensatory Adjustments in Respiratory Physiology in Bluegill Sunfish. *Environmental Science and Technology*, 52(2), 801-811. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03745>
- Eroglu, A., Dogan, Z., Kanak, E. G., Atli, G., & Canli, M. (2015). Effects of heavy metals (Cd, Cu, Cr, Pb, Zn) on fish glutathione metabolism. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(5), 3229-3237. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2972-y>
- Factor, C. J. B., & de Chavez, E. R. C. (2012). Toxicity of arsenic, aluminum, chromium and nickel to the embryos of the freshwater snail, *Radix quadrasi* von Möellendorf 1898. *Philippine Journal of Science*, 141(2), 207-216.
- Feil, R., & Fraga, M. F. (2012). Epigenetics and the environment: Emerging patterns and implications. In *Nature Reviews Genetics*, 13(2) 97-109. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nrg3142>
- Freitas, R., Costa, E., Velez, C., Santos, J., Lima, A., Oliveira, C., Maria Rodrigues, A., Quintino, V., & Figueira, E. (2012). Looking for suitable biomarkers in benthic macroinvertebrates inhabiting coastal areas with low metal contamination: Comparison between the bivalve *Cerastoderma edule* and the Polychaete *Diopatra neapolitana*. *Ecotoxicology*

- and *Environmental Safety*, 75(1), 109-118.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.08.019>
- Frissell, C. A., Poff, N. L., & Jensen, M. E. (2001). Assessment of Biotic Patterns in Freshwater Ecosystems. In *A Guidebook for Integrated Ecological Assessments* (pp. 390-403). Springer New York.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8620-7_27
- Fuoco, R., & Giannarelli, S. (2019). Integrity of aquatic ecosystems: An overview of a message from the South Pole on the level of persistent organic pollutants (POPs). In *Microchemical Journal*, 148, 230-239. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.04.076>
- Gandar, A., Laffaille, P., Canlet, C., Tremblay-Franco, M., Gautier, R., Perrault, A., Gress, L., Mormède, P., Tapie, N., Budzinski, H., & Jean, S. (2017). Adaptive response under multiple stress exposure in fish: From the molecular to individual level. *Chemosphere*, 188, 60-72.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.089>
- Gitarama, A. M., Krisanti, M., & Agungpriyono, D. R. (2016). Macrozoobenthic Communities and Accumulation of Chromium in Cimanuk Lama River, West Java. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 21(1), 48-55.
<https://doi.org/10.18343/jipi.21.1.48>
- Hauer, F. R., & Resh, V. H. (2017). Macroinvertebrates. In *Methods in Stream Ecology: Third Edition*, 1, 297-319. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416558-8.00015-9>
- Hernández, F., Bakker, J., Bijlsma, L., de Boer, J., Botero-Coy, A. M., Bruinen de Bruin, Y., Fischer, S., Hollender, J., Kasprzyk-Hordern, B., Lamoree, M., López, F. J., Laak, T. L. te., van Leerdam, J. A., Sancho, J. V., Schymanski, E. L., de Voogt, P., & Hogendoorn, E. A. (2019). The role of analytical chemistry in exposure science: Focus on the aquatic environment. In *Chemosphere*, 222, 564-583). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.118>
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, 282-291.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016>
- Kadim, M. K., Sudaryanti, S., & Yuli, E. H. (2013). Pencemaran residu pestisida di Sungai Umbulrejo Kecamatan Dampit Kabupaten Malang (Pollution of Pesticide Residues in The Umbulrejo River District Dampit, Malang). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 20(3), 262-268.
<https://doi.org/10.22146/jml.18493>
- Kefford, B. J., Botwe, P. K., Brooks, A. J., Kunz, S., Marchant, R., Maxwell, S., Metzeling, L., Schäfer, R. B., & Thompson, R. M. (2020). An integrated database of stream macroinvertebrate traits for Australia: concept and application. In *Ecological Indicators*, 114, 106280. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106280>
- Kim, J. H., & Kang, J. C. (2015). The lead accumulation and hematological findings in juvenile rock fish *Sebastes schlegelii* exposed to the dietary lead (II) concentrations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 33-39.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.009>
- Kim, J. H., & Kang, J. C. (2016). The chromium accumulation and its physiological effects in juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii*, exposed to different levels of dietary chromium (Cr6+) concentrations. *Environmental*

- Toxicology and Pharmacology*, 41, 152-158.
<https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.12.001>
- Kolarević, S., Aborgiba, M., Kračun-Kolarević, M., Kostić, J., Simonović, P., Simić, V., Milošković, A., Reischer, G., Farnleitner, A., Gačić, Z., Milačić, R., Zuliani, T., Vidmar, J., Pergal, M., Piria, M., Paunović, M., & Vuković-Gačić, B. (2016). Evaluation of genotoxic pressure along the Sava River. *PLOS ONE*, 11(9), e0162450. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162450>
- Kumar, S., Prasad, S., Yadav, K. K., Shrivastava, M., Gupta, N., Nagar, S., Bach, Q. V., Kamyab, H., Khan, S. A., Yadav, S., & Malav, L. C. (2019). Hazardous heavy metals contamination of vegetables and food chain: Role of sustainable remediation approaches - A review. In *Environmental Research* 179, 108792. Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108792>
- Kurz, M. J., de Montety, V., Martin, J. B., Cohen, M. J., & Foster, C. R. (2013). Controls on diel metal cycles in a biologically productive carbonate-dominated river. *Chemical Geology*, 358, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.08.042>
- Lee, J. W., Choi, H., Hwang, U. K., Kang, J. C., Kang, Y. J., Kim, K. Il, & Kim, J. H. (2019). Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review. In *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 101-108). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.010>
- Lencioni, V., Bellamoli, F., Bernabò, P., Miari, F., & Scotti, A. (2018). Response of *Diamesa* spp. (Diptera: Chironomidae) from Alpine streams to newly emergent contaminants and pesticides. *Journal of Limnology*, 77(1), 131-140. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2018.1802>
- Lencioni, V., Bellamoli, F., & Paoli, F. (2020). Multi-level effects of emerging contaminants on macroinvertebrates in Alpine streams: From DNA to the ecosystem. *Ecological Indicators*, 117, 106660. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106660>
- Oliveira, M., Maria, V. L., Ahmad, I., Serafim, A., Bebianno, M. J., Pacheco, M., & Santos, M. A. (2009). Contamination assessment of a coastal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal) using defence and damage biochemical indicators in gill of *Liza aurata* - An integrated biomarker approach. *Environmental Pollution*, 157(3), 959-967. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.019>
- Petitjean, Q., Jean, S., Gandar, A., Côte, J., Laffaille, P., & Jacquin, L. (2019). Stress responses in fish: From molecular to evolutionary processes. In *Science of the Total Environment*, 684, 371-380). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.357>
- Rahayu, D. M., Pratama Yoga, G., Effendi, H., & Wardiatno, Y. (2015). Penggunaan makrozoobentos sebagai indikator status perairan hulu Sungai Cisadane, Bogor (The Use of Macrozoobenthos as Indicator of Up-Stream Segment of Cisadane River, Bogor). In *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, 20(1). <https://journal.ipb.ac.id/index.php/JIPI/article/view/9277>
- Razak, M. R., Aris, A. Z., Zakaria, N. A. C., Wee, S. Y., & Ismail, N. A. H. (2021). Accumulation and risk assessment of heavy metals employing species sensitivity distributions in Linggi River, Negeri Sembilan, Malaysia.

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111905. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111905>
- Rimbi Anggraini, R., Risjani, Y., & Yanuhar, U. (2020). Plastic litter as pollutant in the aquatic environment: A mini-review. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 12(1), 167. <https://doi.org/10.20473/jipk.v12i1.17963>
- Rini, D. S. (2011). Panduan penilaian kesehatan sungai melalui pemeriksaan habitat sungai dan biotilik. In *ecoton*. <http://ecoton.or.id/wp-content/uploads/2020/04/BUKU-PANDUAN-BIOTILIK-BY-ECOTON-1.pdf>
- Santos, J. M., & Ferreira, M. T. (2020). Use of aquatic biota to detect ecological changes in freshwater: Current status and future directions. *Water*, 12(6), 1611. <https://doi.org/10.3390/w12061611>
- Schettino, T., Caricato, R., Calisi, A., Giordano, M. E., & Lionetto, M. G. (2012). Biomarker approach in marine monitoring and assessment: New insights and perspectives. *Open Environmental Sciences*, 6(1), 20-27. <https://doi.org/10.2174/1876325101206010020>
- Schulte, P. M. (2014). What is environmental stress? Insights from fish living in a variable environment. In *Journal of Experimental Biology*, 217(1), 23-34. Company of Biologists Ltd. <https://doi.org/10.1242/jeb.089722>
- Sinaie, M., Bastami, K. D., Ghorbanpour, M., Najafzadeh, H., Shekari, M., & Haghparast, S. (2010). Metallothionein biosynthesis as a detoxification mechanism in mercury exposure in fish, spotted scat (*Scatophagus argus*). *Fish Physiology and Biochemistry*, 36(4), 1235-1242. <https://doi.org/10.1007/s10695-010-9403-x>
- Singer, G. A., & Battin, T. J. (2007). Anthropogenic subsidies alter stream consumer-resource stoichiometry, biodiversity, and food chains. *Ecological Applications*. <https://doi.org/10.1890/06-0229>
- Skinner, K. M., & Bennett, J. D. (2007). Altered gill morphology in benthic macroinvertebrates from mercury enriched streams in the Neversink Reservoir Watershed, New York. *Ecotoxicology*, 16(3), 311-316. <https://doi.org/10.1007/s10646-006-0130-0>
- Sudarso, J., Wardiatno, Y., Setiyanto, D. D., & Anggraitoningsih, W. (2013). Pengaruh aktivitas antropogenik di Sungai Ciliwung terhadap komunitas larva trichoptera. *J. Manusia Dan Lingkungan*, 20(1), 68-83.
- Sudarso, Jojok, Suryono, T., & Yoga, G. P. (2016). Effect of Heavy Metals Contamination in sediments on the macrozoobenthos community in some small lakes and reservoirs. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 23(1), 20. <https://doi.org/10.22146/jml.18769>
- Sudarso, Jojok, & Yoga, G. P. (2015). Keterkaitan nekrosis insang larva trichoptera *Cheumatopsyche* sp. dengan kontaminan logam merkuri: studi kasus di Sungai Ciliwung dan Cikaniki. *Jurnal Ecolab*, 9(2), 93-103. <https://doi.org/10.20886/jklh.2015.9.2.93-103>
- Takao, A., Kawaguchi, Y., Minagawa, T., Kayaba, Y., & Morimoto, Y. (2008). The relationships between benthic macroinvertebrates and biotic and abiotic environmental characteristics downstream of the Yahagi dam, central Japan, and the state change caused by inflow from a tributary. *River Research and Applications*, 24(5), 580-597. <https://doi.org/10.1002/rra.1135>
- Tantalu, L., Sudaryanti, S., & Mulyanto, M. (2017). Ordinasi Sungai Biru Desa Tulungrejo Kecamatan Bumiaji Kota Batu berdasarkan makrozoobenthos. *BUANA SAINS*, 17(1), 1-8. <https://doi.org/10.33366/bs.v17i1.572>
- Vaghela, K. B., Shukla, D. P., Mishra, A. Y.,

- & Jain, N. K. (2017). Impact of pollution on aquatic fauna of river ecosystem: a review. *Article in International Journal of Current Advanced Research*, 6(10), 6518-6524. <https://doi.org/10.24327/ijcar.2017.6524.0957>
- Valavanidis, A., & Vlachogianni, T. (2010). *Integrated Biomarkers in Aquatic Organisms as a Tool for Biomonitoring Environmental Pollution and Improved Ecological Risk Assessment*. https://www.researchgate.net/publication/236623090_Integrated_Biomarkers_in_Aquatic_Organisms_as_a_Tool_for_Biomonitoring_Environmental_Pollution_and_Improved_Ecological_Risk_Assessment
- Verstraeten, S. V., Aimo, L., & Oteiza, P. I. (2008). Aluminium and lead: Molecular mechanisms of brain toxicity. In *Archives of Toxicology*, 82 (11), 789-802. Springer. <https://doi.org/10.1007/s00204-008-0345-3>
- Yu, B., Wang, X., Dong, K. F., Xiao, G., & Ma, D. (2020). Heavy metal concentrations in aquatic organisms (fishes, shrimp and crabs) and health risk assessment in China. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111505. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111505>
- Zhai, Q., Wang, H., Tian, F., Zhao, J., Zhang, H., & Chen, W. (2017). Dietary *Lactobacillus plantarum* supplementation decreases tissue lead accumulation and alleviates lead toxicity in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Research*, 48(9), 5094-5103. <https://doi.org/10.1111/are.13326>
- Zhang, C., Yu, Z. gang, Zeng, G. ming, Jiang, M., Yang, Z. zhu, Cui, F., Zhu, M. ying, Shen, L. qing, & Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. In *Environment International*, 73, 270-281. Elsevier Ltd.
- <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.010>