

DAMPAK PENCEMARAN LOGAM BERAT (TIMBAL, TEMBAGA, MERKURI, KADMIUM, KROM) TERHADAP ORGANISME PERAIRAN DAN KESEHATAN MANUSIA

Dian Yuni Pratiwi^{1,*}

¹Departemen Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran

*Korespondensi: dianyunipratiwi@yahoo.com

ABSTRAK

Air adalah kebutuhan dasar bagi manusia dan organisme lain. Manusia membutuhkan air seperti air minum, mandi, cuci, pertanian, sanitasi, dan transportasi. Selain itu, manusia juga menggunakan air untuk mendukung kegiatan industri dan teknologi. Air juga sangat penting sebagai habitat bagi organisme yang hidup di perairan seperti ikan, rumput laut, udang, dan lainnya. Masalah utama yang dihadapi oleh sumber daya air termasuk jumlah air yang tidak mampu memenuhi peningkatan kebutuhan dan penurunan kualitas air. Menurunnya kualitas air disebabkan oleh polusi. Polusi air adalah pencemaran air karena masuknya zat asing dalam jumlah yang melebihi daya dukung air. Salah satu zat yang menyebabkan polusi adalah logam berat. Beberapa logam berat dapat menyebabkan kerusakan hati, insang, dan bahkan dapat menyebabkan kematian pada ikan. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk menjelaskan dampak beberapa logam berat pada komunitas perairan dan kesehatan manusia.

Kata Kunci: air, ikan, logam berat, pencemaran.

THE IMPACT OF HEAVY METAL POLLUTION (LEAD, COPPER, MERCURY, CADMIUM, CHROME) ON WATER ORGANISM AND HUMAN HEALTH

ABSTRACT

Water is a basic need for humans and other organisms. Humans need water such as drinking water, bathing, washing, agriculture, sanitation, and transportation. In addition, humans also use water to support industrial and technological activities. Water is also very important as a habitat for organisms that live in waters such as fish, seaweed, shrimps, and others. The main problems faced by water resources include the quantity of water that has been unable to meet the increasing needs and decreasing water quality. The decreasing water quality is caused by pollution. Water pollution is water contamination due to the entry of foreign substances in an amount that exceeds the carrying capacity of water. One of the substances that cause pollution is heavy metals. Some heavy metals can cause liver damage, gills, and can even cause death in fish. Therefore, this article aims to explain the impact of several heavy metals on aquatic communities and human health.

Keywords: *water, fish, heavy metals, pollution.*

PENDAHULUAN

Polusi air adalah masuknya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam air dan/atau perubahan struktur air oleh aktivitas manusia atau proses alami sehingga kualitas air turun ke tingkat tertentu yang menyebabkan air menjadi kurang atau tidak lagi berfungsi sesuai dengan peruntukannya. Dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, klasifikasi mutu air dibedakan menjadi empat kelas. Kelas satu, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan atau peruntukan lain yang memper-syaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut; Kelas dua, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut; Kelas tiga, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan atau peruntukan

lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut; dan Kelas empat, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanian dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Polusi air dapat disebabkan oleh dua jenis polutan, seperti bahan yang menyebabkan eutrofikasi dan bahan beracun yang menyebabkan kerusakan pada organisme air. Logam berat adalah bahan beracun yang dapat menyebabkan kerusakan pada organisme akuatik. Sumber pencemaran logam sebagian besar berasal dari pertambangan, peleburan logam, industri lainnya, dan juga dapat berasal dari limbah domestik yang menggunakan logam, serta lahan pertanian yang menggunakan pupuk yang mengandung logam (Lestari dan Trihadiningrum, 2019).

Logam berat biasanya ditemukan sangat sedikit dalam air secara alami yang kurang dari 1 µg. Tingkat konsentrasi logam dalam air dibagi sesuai dengan tingkat polusi, seperti polusi berat, polusi sedang, dan non-polusi. Air yang mengalami polusi berat biasanya memiliki kandungan logam berat yang tinggi di dalam air dan organisme yang hidup di dalamnya. Pada tingkat polusi sedang, kandungan logam berat dalam air dan organisme dalam air berada dalam batas marginal. Adapun pada tingkat non-polusi, kandungan logam berat dalam air dan organisme sangat rendah dan bahkan tidak terdeteksi (Lestari dan Trihadiningrum, 2019).

Logam berat diperairan memberikan dampak terhadap organisme perairan dan juga manusia. Salah satu dampaknya adalah kematian ikan secara masal yang terjadi di Teluk Jakarta pada tahun 2004. Kandungan logam berat di Teluk Jakarta tinggi sehingga berbahaya untuk organisme perairan (Rochyatun & Rozak, 2007). Logam berat yang masuk ke tubuh manusia juga berbahaya untuk Kesehatan. Logam berat dapat menghalangi kerja enzim sehingga metabolisme tubuh terganggu, menyebabkan kanker dan mutasi. Beberapa logam berat yang sangat berbahaya bagi manusia antara lain timbal, tembaga, merkuri, kadmium, dan krom. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk memaparkan efek dari beberapa jenis logam berat yang umumnya mencemari air, seperti timbal, tembaga, merkuri, kadmium, dan krom (Effendi *et al.*, 2012).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Logam Berat

Logam berat adalah salah satu polutan beracun yang dapat menyebabkan kematian (*lethal*), dan non-kematian (*sublethal*) seperti gangguan pertumbuhan, perilaku dan karakteristik morfologi berbagai organisme akuatik (Effendi *et al.*, 2012). Logam berat dapat masuk ke tubuh organisme perairan melalui insang, permukaan tubuh, saluran pencernaan, otot dan hati. Logam berat tersebut dapat terakumulasi dalam tubuh organisme perairan (Azaman *et al.*, 2015).

Logam berat yang masuk ke dalam tubuh kemudian mengalami absorpsi. Penyerapan logam dapat terjadi diseluruh saluran pencernaan, tetapi lambung adalah tempat penyerapan yang penting. Tempat utama untuk penyerapan logam disaluran udara adalah alveoli paru-paru untuk hewan darat dan insang untuk hewan air. Logam yang diserap akan didistribusikan dengan cepat keseluruh tubuh. Tingkat distribusi kemasing-masing organ terkait dengan aliran darah, membran sel, dan afinitas komponen organ terhadap logam. Setelah didistribusikan, logam dapat terakumulasi ditubuh organisme air. Jika manusia mengkonsumsi organisme air yang mengandung logam berat maka akan memberikan dampak merugikan bagi kesehatan manusia seperti radang tenggorokan, nyeri kepala, dermatitis, alergi, anemia, gagal ginjal, pneumonia, dan lain sebagainya (Effendi *et al.*, 2012).

Timbal

Timbal adalah logam berat yang manfaatnya tidak diketahui untuk organisme air. Namun, jumlah timbal diatas ambang batas dapat mengganggu kelangsungan hidup organisme akuatik dan juga manusia (Yolanda *et al.*, 2017). Penyebab utama peningkatan kadar timbal diperairan yaitu penggunaan cat yang mengandung timbal, pengelasan kapal, dan bahan bakar yang bocor dari kapal perikanan (Rizkiana, karina, & Nurfadillah, 2017).

Para peneliti telah melakukan banyak penelitian mengenai efek timbal pada organisme akuatik. Rahayu *et al.* (2017) melakukan penelitian tentang efek timbal pada laju pertumbuhan ikan nila (*Oreochromis niloticus*). Rahayu membandingkan pemberian 4 konsentrasi timbal 0 mg/l, 6,26 mg/l, 12,53

mg/l, dan 25,06 mg/l selama 30 hari. Pengukuran pertumbuhan ikan nila dilakukan setiap 10 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju pertumbuhan spesifik ikan nila dengan pemberian timbal 0 mg/l, 6,26 mg/l, 12,53 mg/l, dan 25,06 mg/l berturut-turut yaitu 38,7%, 8,3%, 4,3%, dan 3,3%. Ini menunjukkan bahwa timbal dapat menghambat laju pertumbuhan nila.

Yolanda *et al* (2017) menunjukkan bahwa paparan timbal dengan konsentrasi 25,06 mg/l pada nila dapat menyebabkan edema, nekrosis, hiperplasia lamella sekunder, dan fusi lamela pada insang. Timbal juga dapat menyebabkan kematian pada *Prochilodus lineatus*. Konsentrasi timbal 24 dan 71 mg/l dengan durasi paparan 96 jam diketahui menyebabkan lesi histopatologis, seperti hiperplasia dan aneurisme. Pemberian timbal juga dapat menyebabkan hiperglikemia dan stres pada *Prochilodus lineatus* (Hilsdorf *et al*, 2020).

Timbal juga dapat memiliki efek negatif pada udang galah. Musallamah (2012) melakukan penelitian tentang efek paparan timbal pada hepatopankreas udang galah (*Macrobrachium rosenbergii* De Mann). Hasil penelitian menunjukkan bahwa 5 mg/l timbal menyebabkan kerusakan pada hepatopankreas sebesar 91,11%.

Timbal dapat terakumulasi dalam tubuh organisme air. Jika organisme air yang terakumulasi timbal dikonsumsi oleh manusia, maka timbal akan memasuki tubuh manusia dan menyebabkan gangguan. Beberapa peneliti telah melaporkan beberapa efek timbal terhadap Kesehatan manusia. Timbal dapat mengganggu sistem reproduksi pria dengan menurunkan kualitas semen. Baloch *et al* (2020) menunjukkan bahwa paparan timbal sebesar 5.29–7.25 µg/dl dapat menurunkan kualitas semen pada pria. Bila konsentrasi timbal dalam darah lebih besar dari 20 µg/dl dapat menurunkan hemoglobin dan meningkatkan risiko terkena anemia (Liu *et al*, 2011). Minarti, Setiani, & Joko (2015) melaporkan bahwa 28 orang dari 33 pekerja (84,8%) dalam pengecoran logam menderita gangguan fungsi hati.

Tembaga

Tembaga dalam dapat ditemukan dalam bentuk logam bebas, tetapi lebih umum ditemukan dalam senyawa atau sebagai senyawa padat dalam bentuk mineral. Dalam badan air, tembaga dapat ditemukan dalam bentuk senyawa ion seperti CuCO_3 dan CuOH . Pada batuan mineral atau lapisan tanah, tembaga dapat ditemukan dalam bentuk *chalcopyrite*, *bornite*, *covellite*, *chalcocite*. Tembaga juga ditemukan dalam bentuk azurit dan karbonat malasit (Palar, 2008).

Tembaga dapat masuk ke dalam air karena aktivitas manusia seperti emisi udara, industri pelapisan logam, galangan kapal (Sires, 2017) dan pertambangan (Solomon, 2009). Tembaga juga digunakan sebagai algasida untuk membasmi alga yang tumbuh berlebihan di perairan, molusida, dan fungsida (Effendi, 2003). Nilai kadar ambang batas tembaga di perairan untuk biota air berdasarkan keputusan Menteri Lingkungan Hidup no. 51 tahun 2004 yaitu sebesar 0,008 mg/l.

Tembaga adalah logam berat yang penting karena dibutuhkan oleh manusia, mamalia lain, dan ikan untuk metabolisme, pembentukan hemoglobin, haemosianin, dan pigmen dalam proses pengangkutan oksigen (Solomon, 2009). Konsumsi tembaga yang baik untuk manusia adalah 2,5 mg/kg berat badan/hari untuk orang dewasa dan 0,05 mg/kg berat badan/hari untuk anak-anak dan bayi (Palar, 2008). Namun, dalam jumlah yang melebihi batas tersebut dapat bersifat toksik. Jika ikan atau organisme akuatik yang mengandung tembaga dimakan oleh manusia, tembaga dapat masuk ke dalam tubuh dan memberikan efek pada kesehatan.

Penelitian telah menunjukkan bahwa konsentrasi tembaga yang tinggi dalam ikan dapat merusak insang, hati, ginjal, dan sistem saraf ikan. Pada konsentrasi 2,3-2,5 mg/l dapat membunuh ikan dan akan menyebabkan kerusakan pada membran selaput lendir (Chahaya, 2003). Tembaga dapat menyebabkan kerusakan pada insang amphipod air tawar *Gammarus pulex* (Brooks dan Mills, 2002). Pemberian tembaga dalam pakan 12,88 dan 0,094 mg/l dapat menyebabkan 50% kematian ikan Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum 1792) (Ibrahim *et al*, 2020). Tembaga 0,361 ppm juga dapat menyebabkan 50% kematian di *Xiphophorus helleri* (Ibrahim *et al*, 2020). Pada manusia, tembaga yang melebihi nilai ambang batas kadar tembaga yang boleh dikonsumsi dapat menyebabkan muntah, diare, *Wilson disease* dan sebagainya (Roychoudhury *et al*, 2016).

Merkuri

Merkuri adalah logam berat yang sangat beracun dan berbahaya bagi organisme air dan juga manusia. Merkuri tidak dapat didegradasi oleh bakteri sehingga dapat menumpuk di perairan (Zulfahmi 2014). Merkuri dapat masuk ke dalam air karena aktivitas penambangan, residu pembakaran batubara, limbah pabrik, fungisida, pestisida, limbah rumah tangga dan sebagainya. Pada tahun 1956, di teluk Minamata Jepang, ada kasus keracunan merkuri dari pabrik kimia (Chisso Co. Ltd.). Limbah pabrik yang mengandung merkuri masuk ke teluk Minamata kemudian menumpuk di ikan dan kerang. Ikan dan kerang kemudian dikonsumsi manusia sehingga merkuri juga menumpuk pada manusia. Tingginya kadar merkuri dapat menyebabkan ataksia, penurunan kemampuan bicara dan pendengaran, tremor, disartria. Pada tingkat akut, gejala-gejala ini biasanya memburuk disertai dengan kelumpuhan, kegilaan, jatuh kedalam koma dan akhirnya kematian. Keracunan merkuri tidak hanya terjadi pada manusia dewasa, tetapi juga terjadi pada janin. Merkuri dapat menyebabkan kerusakan otak pada janin yang ibunya terkontaminasi merkuri (Yorifuji *et al*, 2018).

Beberapa penelitian telah menunjukkan efek berbahaya pada manusia dan organisme akuatik. Zulfahmi (2017) telah melakukan penelitian untuk mempelajari efek paparan merkuri terhadap kelangsungan hidup, tingkat pertumbuhan berat badan, indeks hepatosomatik, indeks gonad, turbinitas, kesuburan dan diameter telur nila. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan merkuri 1,64 mg/l selama 96 jam dapat menyebabkan 50% kematian ikan nila. Hal ini terjadi akibat adanya kerusakan pada insang sehingga mengganggu proses pernapasan ikan. Merkuri klorida dengan konsentrasi 0,196 mg/l dapat mengurangi indeks turunan gonad dan fekunditas nila. Hayati *et al* (2019) telah melaporkan bahwa pemberian 0,5-5 ppm merkuri dapat motilitas sperma *Cyprinus carpio* sehingga menyebabkan infertil. Semakin tinggi kadar merkuri maka semakin tinggi pula tingkat infertilitas sperma *Cyprinus carpio*.

Vasanthi, Muthukumaravel, Sathick, & Sugumaran (2019) juga telah meneliti efek merkuri pada ikan *Oreochromis mossambicus*. Paparan merkuri dapat menyebabkan tubuh ikan menjadi tidak normal, lamban, dan lendir di permukaan tubuh. Paparan merkuri selama 24 jam dengan konsentrasi 0,73 ppm menyebabkan kematian 50% ikan *Oreochromis mossambicus*. Yuan *et al* (2017) juga telah meneliti efek merkuri terhadap *Percocypris pingi*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 0,441 mg/l merkuri selama 24 jam dapat menyebabkan kematian 50% *Percocypris pingi*.

Efek merkuri terhadap kesehatan manusia juga telah dipelajari secara luas. Yang *et al* (2002) meneliti efek merkuri pada gejala perimenstrual terhadap 296 pekerja wanita yang terpapar merkuri dan 394 pekerja wanita dari pabrik pengolahan makanan di Cina. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan merkuri dapat menyebabkan peningkatan prevalensi menstruasi abnormal dan dismenore.

Kadmium

Kadmium juga dikategorikan sebagai bahan beracun dan berbahaya/B3. Konsentrasi kadmium yang diizinkan dalam air adalah 0,01 mg/l (PP No 82 Th 2001 Mengenai Kualitas Air). Kadmium dapat memasuki perairan melalui berbagai aktivitas manusia seperti kegiatan industri, pertanian dan rumah tangga. Di perairan, toksisitas kadmium akan lebih tinggi pada salinitas rendah. Hal ini dikarenakan pada salinitas rendah akan menyebabkan peningkatan konsentrasi kation Cd bebas sehingga menurunkan pembentukan molekul kompleks anorganik maupun organik. Kation Cd bebas akan masuk ke dalam tubuh organisme sehingga meningkatkan toksisitas. Kenaikan toksisitas juga dapat disebabkan karena adanya perubahan kemampuan osmotik dan regulasi ionik pada salinitas rendah (Baloch *et al*, 2020).

Penelitian tentang efek kadmium pada organisme air dan manusia telah dilakukan. Baloch *et al* (2020) telah melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemberian kadmium pada insang dan hepatopankreas, serta kelangsungan hidup udang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 30 ppb kadmium dapat menyebabkan 32,60% lamella menunjukkan hiperplasia, 57,35% nekrosis dan 97,50% vakuolisasi. Semakin tinggi konsentrasi kadmium, semakin rendah tingkat kelangsungan hidup udang.

Kadmium juga diketahui menyebabkan kelainan pada spermatozoa ikan mas (*Cyprinus carpio*, Linn). Azaman (2015) menunjukkan bahwa pemberian kadmium 75 ppm menyebabkan 32,67% kelainan spermatozoa ikan mas. Peningkatan kadar kadmium menjadi 25-30 ppm dalam air menyebabkan peningkatan kelainan spermatozoa sebesar 10%.

Kadmium dapat terakumulasi (insang, ginjal, hati, otot, dan hati) pada ikan. Yesilbudak & Erdem (2014) membuktikan bahwa akumulasi kadmium tertinggi terdapat pada ginjal ikan mas (*Cyprinus carpio*) dan ikan nila (*Oreochromis niloticus*). Kadmium juga dapat terakumulasi pada hati, insang dan otot kedua ikan tersebut. Pada ikan mas (*Cyprinus carpio*) pemaparan kadmium dapat menyebabkan fusi pada lamela insang, dan hiperplasia pada lengkung insang, nekrosis pada sel hati, dan pemisahan ikatan otot (Oz *et al*, 2020). Pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*), pemaparan cadmium dapat menyebabkan hiperplasia insang, memendekkan lamela insang, dan hipertropi tubulus ginjal (Ju *et al* 2020).

Krom

Krom dapat mencemari air melalui limbah aktivitas manusia seperti industri pewarna kain, industri penyamakan kulit, pelapisan listrik, rumah tangga, pertanian, pertambangan, perikanan, pariwisata, dan kegiatan lainnya. Kromium adalah elemen yang biasanya ada di tanah dan dalam bentuk teroksidasi dari Cr (II) menjadi Cr (VI) tetapi Cr (III) dan Cr (VI). Kromium (VI) adalah kromium yang paling beracun dan mutagenik, karsinogenik, dan teratogenik. Kromium tidak dapat didegradasi dalam tubuh sehingga terakumulasi di dalam tubuh organisme. Kromium dapat berbahaya bagi organisme air maupun manusia (Nair dan kurian, 2018).

Kromium dapat terakumulasi pada ikan Guppy dan menyebabkan kematian. Nair (2018) meneliti akumulasi dan toksisitas kromium dalam limbah penyamakan kulit pada guppy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kromium dapat menumpuk pada ikan guppy. Kromium 4,2 µg/ml dapat menyebabkan kematian 50% ikan guppy. Kromium (VI) pada konsentrasi rendah diketahui merusak berbagai organ ikan seperti paru-paru, hati dan ginjal. Badriyah *et al* (2017) melakukan penelitian tentang efek kromium (IV) pada hati dan insang nila. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kromium (IV) dengan konsentrasi 57,69 ppm dan 59,94 ppm dapat menyebabkan edema, dan hiperplasia. Selain menyebabkan edema, dan hiperplasia, pemberian kromium (IV) 83,20 ppm juga menyebabkan fusi lamela, fibrosis, dan degenerasi lemak.

Kromium (IV) juga berbahaya bagi kesehatan manusia. Bhakti (2016) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui efek paparan kromium pada fungsi paru-paru pada pekerja di industri pelapisan listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan semakin tinggi usia dan masa kerja, pekerja cenderung mengalami gangguan fisiologi paru. Pekerja dengan paparan kromium tinggi (Cr) lebih mungkin mengalami gangguan fisiologi paru. Kromium dapat menyebabkan asma, bronkitis, hiperemia, dan kanker.

SIMPULAN

Logam berat (timbal, tembaga, kadmium, merkuri, dan krom) memiliki dampak berbahaya bagi organisme air dan manusia. Oleh karena itu, industri perlu memiliki mekanisme pengolahan limbah sebelum dibuang ke perairan. Penelitian mengenai dampak paparan logam berat terhadap histopatologis pada organisme perairan dan kesehatan manusia perlu ditingkatkan. Selain itu, peneliti juga perlu memperbanyak penelitian mengenai cara penanggulangan pencemaran logam berat di perairan akibat limbah industri dan rumah tangga.

DAFTAR PUSTAKA

- Azaman, A., Juahir, H., Yunus, K., Azida, A., Kamarudin, M.K.A., Toriman, M. E., et.al. (2015). Heavy metal in fish: analysis and human health- A review. *Jurnal Teknologi*, 77(1), 61–69. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.4182>
- Badriyah, S., Budiharjo, A., and Widiyani, T. (2017). Uji toksisitas logam berat Cr⁶⁺ (Kromium heksavalen) terhadap histopatologi hati dan insang ikan nila (*Oreochromis niloticus*). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Veteriner*. 1(4), 736-741.

- Baloch, S., Kazi, T. G., Baig, J. A., Afridi, H. I., Arain, M. B. (2020). Occupational exposure of lead and cadmium on adolescent and adult workers of battery recycling and welding workshops: Adverse impact on health. *Science of The Total Environment*. Vol. 720. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137549>
- Bhakti. (2016). Pajanan kromium (cr) dan gangguan faal paru pekerja di industri elektroplating villa chrome kabupaten Jember. Artikel Ilmiah Hasil Penelitian Mahasiswa.
- Chahaya, I. (2003). Ikan sebagai alat monitor pencemaran. *Skripsi*. Program Sarjana Universitas Sumatra Utara
- Effendi, F., Tresnaningsih, E., Sulistomo, A.W., Wibowo, S., Hudoyo, K.S *et al.* (2012). Penyakit Akibat Kerja Karena Pajanan Logam Berat. Jakarta: Direktorat Bina Kesehatan Kerja dan Olahraga Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Hayati, A., Wulansari, E., Armando, D.S., Sofuyanti, R., Amin, M.H.F *et al.* (2019). Effect of in vitro exposure of mercury on sperm quality and fertility of tropical fish *Cyprinus carpio L.* *The Egyptian Journal of Aquatic Research*. 45(2), 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.06.005>
- Hilsdorf, A. W. S., Moreira, R. G., Marins, L. F., Hallerman, E. M. (2020). The genetic bases of physiological processes in fish. *Biology and Physiology of Freshwater Neotropical Fish*. 49-74. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815872-2.00003-8>
- Ibrahim, M. D., Oldham, D., Minghetti, M. (2020). Role of metal speciation in the exposure medium on the toxicity, bioavailability and bio-reactivity of copper, silver, cadmium and zinc in the rainbow trout gut cell line (RTgutGC). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. Vol. 236. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108816>
- Ju, Z., Ya, J., Li, X., Wang, H., Zhao, H. (2020). The effects of chronic cadmium exposure on *Bufo gargarizans* larvae: Histopathological impairment, gene expression alteration and fatty acid metabolism disorder in the liver. *Aquatic Toxicology*. Vol. 222. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105470>
- Lestari, P dan Trihadiningrum, Y. (2019). The impact of improper solid waste management to plastic pollution in Indonesian coast and marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 149. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110505>
- Liu, J.H, McCauley, L., Yuan, C.h., Shen, X.M., Pinto-Martin, J.A. (2011). Low blood lead levels and hemoglobin concentration in preschool Children in China. *Toxicological and Environmental Chemistry*. 94(2), 423-426. <https://doi.org/10.1080/02772248.2011.628001>
- Minarti, F.A., Setiani, O., Joko, T. (2015). Hubungan paparan timbal dengan kejadian gangguan fungsi hati pada pekerja pengecoran logam di CV. Sinar Baja Cemerlang Desa Bakalan, Ceper Kabupaten Klaten. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 14 (1), 1-6. <https://doi.org/10.14710/jkli.14.1.1%20-%206>
- Musallamah. (2012). Effects of lead exposure (pb) on histopathological changes of galah shrimp hepatopancreas (*Macrobrachium rosenbergii de mann*). *Skripsi*. Program Sarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Nair, D. S dan Kurian, M. (2018). Chromium-zinc ferrite nanocomposites for the catalytic abatement of toxic environmental pollutants under ambient conditions. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 344. 925-941. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.045>
- Oz, M., Yavuz, O., Bolukbas, F. (2020). Histopathology changes in the rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) consuming boric acid supplemented fish fodder. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. Vol. 62. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126581>

- Rahayu, N.I., Rosmaidar, Hanafiah, M, Karmil, T.F., Helmi, T.Z., Daud, R. (2017). Pengaruh paparan timbal (pb) terhadap laju pertumbuhan ikan nila (*Oreochromis niloticus*). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Veteriner*. 1(4), 658-665. <https://doi.org/10.21157/jim%20vet.v1i4.4757>
- Rizkiana, L., Karina, S., & Nurfadillah. (2017). Analisis timbal (pb) pada sedimen dan air laut di kawasan pelabuhan nelayan gampong Deah Glumpang kota Banda Aceh. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kelautan dan Perikanan Unsyiah*. 2 (1), 89-96.
- Rochyatun, E., & Rozak, A. (2007). Pemantauan kadar logam berat dalam sedimen di perairan Teluk Jakarta, 11(1), 28-36.
- Roychoudhury, S., Nath, S., Massanyi, P., Stawarz, R., Kacaniova, M., Kolesarova, A. (2016). Copper induced changes in reproductive functions: in vivo and in vitro effects. *Physiological Research*. 65 (1), 11-22. <https://doi.org/10.33549/physiolres.933063>
- Sires, J. (2017). A review of potential zinc and copper pollution sources in the kenai river watershed. Kenai Watershed Forum. Alaska, USA: Department of Environmental Conservation
- Solomon, F. (2009). Impacts of copper on aquatic ecosystems and human health. *Environment & communities*, 25-28.
- Vasanthi, N., Muthukumaravel, K., Sathick, O., Sugumaran, J. (2019). Toxic effect of mercury on the freshwater fish *Oreochromis mossambicus*. *Research Journal of Life Sciences*. Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences, 5(3), 364-376 <https://doi.org/10.26479/2019.0503.30>
- Yorifuji, T., Takaoka, S., Grandjean, P. (2018). Accelerated functional losses in ageing congenital Minamata disease patients. *Neurotoxicology and Teratology*. Vol. 69. 49-53. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2018.08.001>
- Yang, J.M., Chen, Q.Y., & Jiang, X.Z. (2002). Effects of metallic mercury on the perimenstrual symptoms and menstrual outcomes of exposed workers. *American Journal of Industrial Medicine*. 42 (5), 403-409. <https://doi.org/10.1002/ajim.10130>.
- Yuan, D., Huang, L., Zeng, L., Liu, S., He, Z., Zhao, M. Feng, J., and Qin, C. (2017). Acute toxicity of mercury chloride (hgcl₂) and cadmium chloride (cdcl₂) on the behavior of freshwater fish, *Percocypris Pingi*. *International Journal of Aquaculture and Fishery Sciences*. 3(3), 66-77. <https://doi.org/10.17352/2455-8400.000031>
- Yolanda, S., Rosmaidar, Nazaruddin, Armansyah, T., Balqis, U., and Fahrma, Y. (2017). Pengaruh paparan timbal (pb) terhadap histopatologis insang ikan nila (*Oreochromis niloticus*). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Veteriner*, 1 (4), 736-741.
- Zulfahmi, I., Affandi, R., Djamar. (2014). Kondisi biometrik ikan nila, (*Oreochromis niloticus* (Linnaeus 1758)) yang terpapar merkuri. *Jurnal Iktiologi Indonesia*, 14 (1), 37-48. <https://doi.org/10.32491/ji.v14i1.94>