

RESPON FISILOGI IKAN NILA (*Oreochromis niloticus*) AKIBAT PAPARAN TIMBAL NITRAT ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) DAN KADMIUM KLOORIDA (CdCl_2)

Nadyatul Ilma Indah Savira*, Kamalia Fikri, Aditya Kurniawan, Bevo Wahono

Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember
Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, Krajan Timur, Sumbersari, Kec. Sumbersari, Kabupaten
Jember, Jawa Timur 68121
e-mail: nadyatulilma@unej.ac.id

Abstrak

Logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd) merupakan polutan berbahaya yang dapat mengganggu fungsi fisiologis organisme akuatik, termasuk ikan nila (*Oreochromis niloticus*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respon fisiologis ikan nila terhadap paparan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dan CdCl_2 pada konsentrasi 1 ppm selama 3 jam. Penelitian ini merupakan penelitian laboratorium eksperimental dengan rancangan acak lengkap (RAL). Parameter yang diamati meliputi kecepatan respirasi, morfometrik saluran pencernaan, serta parameter hematologi seperti jumlah eritrosit, leukosit, dan kadar hemoglobin. Hasil menunjukkan bahwa paparan CdCl_2 memberikan efek toksik lebih kuat dibandingkan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, dengan penurunan signifikan pada jumlah eritrosit, kadar hemoglobin, dan kecepatan respirasi. Sementara itu, paparan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ juga menyebabkan penurunan hemoglobin dan eritrosit, serta perubahan warna organ pencernaan seperti empedu dan hati, namun efeknya tidak sebesar CdCl_2 . Kedua logam berat meningkatkan jumlah leukosit sebagai respons imun terhadap stres oksidatif. Hasil ini mengindikasikan bahwa logam berat, terutama Cd, dapat mengganggu sistem pernapasan, peredaran darah, dan fungsi pencernaan ikan nila.

Kata Kunci: ikan nila; logam berat; timbal; kadmium; hematologi

Abstract

Heavy metals such as lead (Pb) and cadmium (Cd) are hazardous pollutants that can disrupt the physiological functions of aquatic organisms, including Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). This study aimed to assess the physiological responses of tilapia exposed to 1 ppm of $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ and CdCl_2 for 3 hours. This study was an experimental laboratory study with a randomized design. Observed parameters included respiratory rate, digestive tract morphometry, and hematological variables such as erythrocyte and leukocyte counts, and hemoglobin levels. CdCl_2 exposure caused more severe toxicity, with significant reductions in erythrocytes, hemoglobin, and respiratory rate. $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ exposure also led to reduced hemoglobin and altered digestive organ coloration, though to a lesser extent. Both treatments elevated leukocyte levels, indicating immune response to oxidative stress. These findings suggest that heavy metals, especially cadmium, impair respiratory, circulatory, and digestive systems in Nile tilapia.

Keywords: Nile tilapia; heavy metals; lead; cadmium; hematology

1. PENDAHULUAN

Ikan sering digunakan untuk mengetahui dampak dari adanya polutan organik yang larut di dalam air (Aprilliyan & Rahayuningsih, 2020). Salah satu jenis hewan yang direkomendasikan oleh EPA (*Environmental Protection Agency*) sebagai hewan uji adalah ikan nila (*Oreochromis niloticus*) (Yulaipi et al., 2020). Masuknya pencemar ke lingkungan perairan berpotensi memberi paparan pada organisme perairan seperti ikan nila. Produk perikanan yang banyak diminati salah satunya adalah ikan nila, sehingga penting untuk memonitor pencemaran perairan melalui ikan nila. Ikan nila menjadi bioindikator perairan karena memiliki beberapa kelebihan yaitu mempunyai toleransi luas terhadap kualitas lingkungan (Agustina et al., 2019; Oktapiandi et al., 2019). Ikan dapat menunjukkan reaksi terhadap perubahan fisik air maupun terhadap adanya senyawa pencemar yang terlarut dalam batas konsentrasi tertentu, seperti timbal (Pb) yaitu jenis logam berat non esensial yang sulit untuk didegradasi secara alami dan bersifat akumulatif (Pradona & Partajaya, 2022).

Logam berat dalam perairan merupakan salah satu unsur pencemar yang berbahaya. Logam berat memiliki sifat *non degradable* atau sulit untuk dihancurkan, terakumulasi ke lingkungan, terutama mengendap di bagian dasar perairan. Hal ini menyebabkan logam berat sebagai bahan pencemar yang berbahaya bagi organisme perairan, termasuk ikan (Koniyo, 2020). Logam berat dapat terakumulasi di dalam tubuh suatu organisme dan tetap tinggal dalam jangka waktu lama sebagai racun (Purwanto et al., 2020). Beberapa logam, seperti timbal dan kadmium, diklasifikasikan sebagai racun karena sangat berbahaya bahkan pada kadar minimum dan jika dikonsumsi dalam jangka waktu lama (Abdelwarith et al., 2020).

Timbal (Pb) merupakan salah satu logam berat beracun dan berbahaya dan banyak ditemukan sebagai pencemar. Adanya timbal yang masuk ke dalam ekosistem dapat menjadi sumber pencemaran dan dapat mempengaruhi biota perairan bahkan mematikan ikan dikarenakan toksisitasnya yang tinggi (Pradona & Partajaya, 2022). Timbal dalam tubuh dengan konsentrasi yang tinggi akan menghambat aktivitas enzim

dan dapat mengganggu pencernaan (Rahayu et al., 2017). Gejala khas keracunan timbal meliputi perubahan parameter darah dengan kerusakan akut pada sel darah merah dan putih yang menimbulkan efek berbahaya pada sistem saraf (Abdelwarith et al., 2020). Paparan timbal dapat menyebabkan perubahan fisiologis pada ikan nila. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa paparan timbal nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) mengakibatkan penurunan potensial membran yang signifikan hingga menyebabkan kematian sel telur ikan nila (Bobu, 2022).

Selain timbal, logam berat lain yang dapat mencemari lingkungan dan dapat mempengaruhi fisiologis ikan adalah Kadmium (Cd). Kadmium adalah suatu logam berat beracun yang tidak diperlukan oleh tubuh. Paparan kadmium bisa menyebabkan kerusakan pada berbagai sistem tubuh seperti sistem fisiologis, pernapasan, peredaran darah, jantung, reproduksi, saraf, ginjal, dan juga dapat berhubungan dengan osteoporosis (Saputri et al., 2023). Batas maksimum cemaran logam pada pangan dengan nilai kadmium (Cd) 100 ppb dibahas dalam SNI No. 7389 Tahun 2009 dan SK Dirjen POM Depkes RI No. 03725/B/SK/1989. Logam berat sulit terurai, tidak larut dengan baik dalam air, dapat berakhir di sedimen, dan dapat terakumulasi di dalam tubuh organisme perairan (Arisma et al., 2023). Penelitian Younis *et al* (2013) menunjukkan bahwa paparan kadmium klorida menyebabkan perubahan histologi pada hati dan usus ikan nila (Younis et al., 2013). Paparan kadmium menyebabkan penurunan aktivitas enzim pencernaan seperti tripsin, lipase, dan α -amilase secara signifikan pada ikan nila. Penurunan aktivitas enzim ini dapat mengganggu penyerapan nutrisi dan selanjutnya mempengaruhi pertumbuhan ikan nila (Zhang et al., 2024).

Ikan nila yang digunakan sebagai indikator pencemaran logam berat dapat dilihat melalui respon fisiologisnya seperti perubahan parameter darah, sistem pencernaan, dan sistem pernapasan (Sheethal et al., 2024; Vo et al., 2021a; Younis et al., 2013). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respon fisiologis ikan nila yang terpapar timbal nitrat dan kadmium klorida. Respon fisiologi yang diukur pada penelitian ini

meliputi jumlah sel eritrosit dan leukosit, kadar haemoglobin, kecepatan respirasi, serta morfometrik pencernaan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Zoologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember. Pengamatan fisiologis ikan nila dilakukan pada tanggal 03 Desember 2022.

2.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian ekperimental laboratorium dengan rancangan acak lengkap. Lima belas ekor ikan nila (*Oreochromis niloticus*) dibagi menjadi tiga kelompok perlakuan yaitu, kelompok control (K), kelompok dengan paparan timbal nitrat (PB), dan kelompok dengan paparan kadmium klorida (CD). Berat ikan nila yang digunakan ± 200 gram. Ikan nila diaklimasi selama 24 jam sebelum dipapar timbal ataupun kadmium. Paparan timbal nitrat dan kadmium klorida menggunakan konsentrasi 1 ppm selama 3 jam. Berikut adalah prosedur pengamatan fisiologis ikan nila:

2.3 Pengukuran kecepatan respirasi

Kecepatan respirasi diukur melalui jumlah gerakan operkulum pada setiap menitnya. Pengukuran jumlah gerakan operkulum dilakukan setelah diberikan paparan timbal/kadmium selama 3 jam pada kelompok PB dan CD.

2.4 Pengamatan morfometrik pencernaan

Ikan nila dimatikan dengan cara ditusuk bagian otaknya dengan jarum. Saluran pencernaan yang diamati meliputi: ukuran lambung, panjang usus halus dan usus besar, kondisi empedu dan hati.

2.5 Pengukuran parameter hematologi

Darah ikan nila diambil melalui pembuluh darah besar dekat jantung dengan menusuk dengan alat bedah sampai darah keluar. Parameter darah yang diamati adalah jumlah eritrosit, jumlah leukosit, dan kadar haemoglobin. Darah diambil menggunakan pipet eritrosit (untuk pengukuran jumlah eritrosit) dan darah diambil menggunakan pipet leukosit (untuk pengukuran jumlah leukosit). Darah dalam pipet ditambahkan larutan hayem (pengukuran eritrosit) dan ditambahkan larutan turk (pengukuran leukosit). Pipet dikocok selama kurang lebih tiga menit

dan ditetaskan ke hemositometer dan ditutup dengan kaca penutup.

Pengukuran kadar haemoglobin menggunakan metode sahli. Darah diambil dengan pipet sahli lalu dicampurkan dengan HCL 0,1N dalam tabung haemometer dan didiamkan dalam beberapa menit. Selanjutnya diencerkan dengan aquades dengan diaduk tiap tetesnya sampai warna campuran sama dengan warna tabung di kanan kiri. Kadar haemoglobin terbaca pada skala tabung haemometer yang sesuai dengan tinggi larutan campuran.

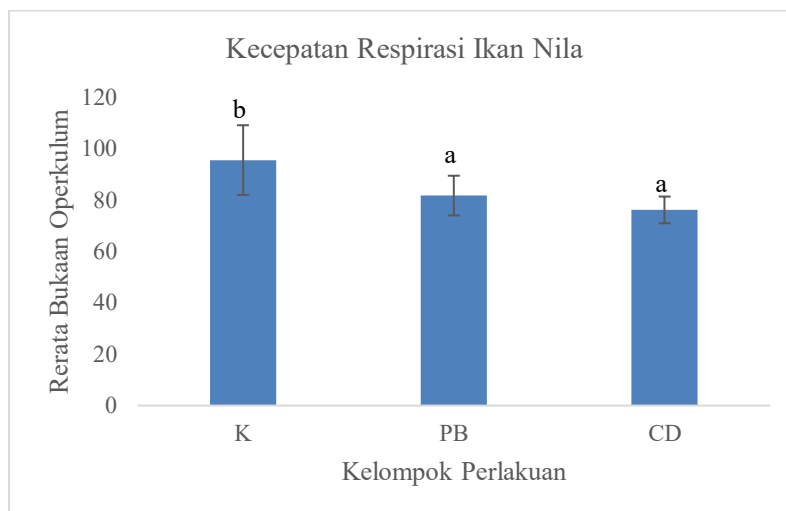
2.6 Analisis statistik

Hasil pengukuran parameter fisiologis dianalisis dengan *One Way ANOVA* dan dilanjutkan uji Duncan sebagai uji *post hoc* dengan $p = 0,05$. Analisis statistik menggunakan *SPSS For Windows* versi 23.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kecepatan respirasi

Kecepatan respirasi ikan nila diukur melalui rerata bukaan operkulum per menit. Hasil pengamatan terhadap rerata bukaan operkulum ikan nila menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kelompok kontrol dan kelompok yang terpapar logam berat. Kelompok kontrol memiliki rerata kecepatan respirasi sebesar $95,6 \pm 13,5$, sedangkan kelompok yang terpapar logam timbal (Pb) dan kadmium (Cd) menunjukkan penurunan rerata kecepatan respirasi masing-masing sebesar $81,8 \pm 7,7$ dan $76,2 \pm 5,2$. Hasil analisis uji *One Way ANOVA* menunjukkan bahwa penurunan kecepatan respirasi pada kelompok paparan logam berat berbeda secara signifikan dengan $p = 0,02$ ($p < 0,05$) dibandingkan dengan kelompok kontrol. Temuan ini mengindikasikan bahwa paparan logam berat dapat menghambat aktivitas respirasi ikan nila, yang ditunjukkan dengan menurunnya frekuensi bukaan operkulum. Data selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kecepatan respirasi ikan nila.

Keterangan: huruf abjad menunjukkan signifikansi berdasarkan uji Duncan ($p < 0,05$)

Selain pengamatan bukaan operkulum, peneliti juga mengamati tingkah laku ikan nila. Ikan nila pada kelompok kontrol menunjukkan aktivitas renang yang aktif, sedangkan pada kelompok perlakuan logam berat (paparan Pb dan Cd) menunjukkan aktivitas berenang yang lambat. Melemahnya aktivitas bergerak ikan disebabkan ikan sudah kehabisan energi karena berusaha untuk mendapatkan oksigen untuk respirasi. Kesulitan respirasi yang dialami ikan tersebut dikarenakan adanya gangguan pada saluran pernafasan akibat rusaknya insang. Hal ini dikarenakan bahwa dalam bahan pencemar yang bersifat racun dan terdapat di dalam air akan masuk ke dalam tubuh melalui insang sehingga ikan akan kesulitan untuk bernafas, berenang tidak menentu dan berusaha menghindari dari bahan pencemar tersebut (Purwanto et al., 2020). Logam berat timbal dan kadmium terakumulasi dengan konsentrasi tinggi pada jaringan di insang sehingga mengurangi konsumsi oksigen dan menurunkan kecepatan respirasi (Sheethal et al., 2024).

3.2 Morfometrik pencernaan

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 1., morfometrik saluran pencernaan ikan nila, tidak ditemukan perbedaan yang signifikan pada rerata panjang lambung dan usus halus antara kelompok kontrol dan kelompok yang terpapar logam berat Pb

maupun Cd. Namun, panjang usus besar pada kelompok yang terpapar Cd menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol ($p < 0,05$). Selain perubahan morfometrik, juga diamati perbedaan warna organ-organ pencernaan. Warna empedu pada ikan yang terpapar Pb dan Cd berubah menjadi hijau gelap, sementara warna hepar pada kelompok Pb menjadi merah gelap dan pada kelompok Cd tampak lebih pucat. Warna lambung juga berubah menjadi abu gelap pada kelompok Pb, berbeda dengan warna merah muda pada kelompok kontrol dan Cd. Selain itu, warna usus besar pada kelompok Pb tampak coklat kehitaman, sedangkan pada kelompok Cd berubah menjadi merah kehijauan.

Tabel 1. Hasil pengamatan morfometrik pencernaan ikan nila.

Morfometrik Pencernaan	Kelompok perlakuan		
	Kontrol (N=5)	PB (N=5)	CD (N=5)
Rerata panjang Lambung (cm)	2,8±0,8	3,4±0,7	2,94±0,4
Rerata panjang usus halus (cm)	122,8±17,9	125,2±32,9	100,3±6,9
Rerata panjang usus besar (cm)	7,8±3,5	12,4±6,8	21,4±2,1*
warna empedu	hijau	hijau gelap	hijau gelap
warna hepar	merah muda	merah gelap	merah muda pucat
warna lambung	merah muda	abu gelap	merah muda
warna usus besar	merah kehijauan	coklat kehitaman	merah kehijauan
Berat badan ikan (gram)	197,6±21,05	178,2±48,08	207,4±12,1

Keterangan: tanda (*) menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$)

Kontaminasi timbal (Pb) terhadap hati ikan memperlihatkan perubahan bentuk, di mana hepatosit akan mengalami degenerasi lemak. Degenerasi lemak terjadi karena adanya penumpukan lemak (lemak netral) dengan kerusakan inti sel dan menciutnya jaringan hepar (Panigoro et al., 2007). Selain hepar, paparan usus juga berubah karena paparan timbal. Pengamatan histologis pada hepar dan usus pada ikan nila yang terpapar Pb menunjukkan nekrosis dan degenerasi sel pada hepar dan usus (Maryam et al., 2023). Paparan kronik Pb juga mengakibatkan menurunnya aktivitas enzim pencernaan dan menurunkan *Gastro Somatic Index* (GaSI) (Akmal et al., 2021; Álvarez-

González et al., 2020). Hal ini terlihat jelas dari warna lambung abu gelap yang sangat berbeda dengan warna lambung kelompok kontrol.

Ikan nila yang terpapar kadmium terlihat jelas perbedaan warna pada hepar yaitu lebih pucat. Toksisitas kadmium (Cd) pada ikan air tawar, khususnya ikan nila, secara signifikan dipengaruhi oleh tingkat salinitas. Konsentrasi ion Cd^{2+} meningkat pada salinitas rendah, sehingga meningkatkan toksisitas. Toksisitas ini menyebabkan kerusakan hepar dan sistem pencernaan, serta gangguan penyerapan nutrisi akibat akumulasi kadmium yang spesifik pada jaringan (Perera et al., 2015; Xue et al., 2023). Selain perubahan warna pada hepar, perubahan ukuran usus besar juga signifikan dibandingkan kelompok kontrol dan paparan Pb. Usus besar ikan nila yang dipapara ladmium lebih panjang karena menyebabkan peradangan dan stres oksidatif yang memicu pembengkakan (edema) serta regenerasi jaringan mukosa. Selain itu, gangguan pada motilitas usus juga dapat menyebabkan peregangan dan pemanjangan kolon sebagai respons awal terhadap toksisitas (Begum et al., 2024; Gupta et al., 2025).

3.3 Parameter hematologi

Hasil pengamatan parameter hematologi ikan nila dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil analisis parameter hematologi menunjukkan bahwa paparan logam berat Pb dan Cd memberikan pengaruh terhadap kondisi fisiologis darah ikan nila. Jumlah eritrosit mengalami penurunan berturut-turut dari kelompok kontrol ($3.412.000 \text{ sel/mm}^3$), ke kelompok Pb ($2.548.000 \text{ sel/mm}^3$), dan terendah pada kelompok Cd ($1.906.000 \text{ sel/mm}^3$). Meskipun penurunan ini tidak ada perbedaan signifikan antar kelompok perlakuan ($p > 0,05$), tetapi penurunan jumlah eritrosit ini mengindikasikan adanya gangguan dalam proses pembentukan sel darah merah. Hal ini kemungkinan akibat kerusakan jaringan hematopoietik atau stres oksidatif akibat paparan logam berat (Chatterjee & Saxena, 2015; Ghaffari, 2008).

Sebaliknya, jumlah leukosit meningkat signifikan pada kelompok Cd (40.060 sel/mm^3) dibandingkan dengan kelompok Pb (25.420 sel/mm^3), yang menunjukkan respons imun terhadap stres atau inflamasi. Peningkatan leukosit akibat paparan kadmium disebabkan oleh sistem kekebalan tubuh merespon adanya benda asing yang masuk ke dalam tubuh, sehingga jumlah leukosit meningkat untuk melawan benda asing tersebut. Respons imun yang terjadi dengan peningkatan leukosit menunjukkan adanya lingkungan yang toksik akibat logam berat,

sehingga sebagai respon kekebalan terhadap efek bahaya dari logam berat (Hassan et al., 2020; Vo et al., 2021b). Penurunan leukosit pada paparan timbal dikarenakan timbal dapat merusak dan membunuh sel imun (Sweet & Zelikoff, 2001). Hasil penelitian ini sama dengan penelitian (Kaya et al., 2013) yang juga menunjukkan penurunan leukosit akibat paparan timbal.

Tabel 2. Hasil pengamatan parameter hematologi ikan nila

Parameter Hematologi	Kelompok Perlakuan		
	K (N=5)	PB (N=5)	CD (N=5)
Rerata jumlah Eritrosit (sel/mm ³) x 10 ³	3.412 ±1.851	2.548±1.349	1.906±1.226
Rerata jumlah Leukosit (sel/mm ³) x 10 ³	33,26±9,43 ^{ab}	25,42±3,03 ^a	40,06±1,04 ^b
Rerata kadar Haemoglobin (g/dL)	8,6±2,08 ^b	6,8±1,46 ^{ab}	4,9±0,98 ^a

Keterangan: notasi huruf menunjukkan hasil uji *post hoc* ($p < 0,05$)

Kadar hemoglobin juga menunjukkan penurunan dari kelompok kontrol (8,6 g/dL) ke kelompok Pb (6,8 g/dL) dan terendah pada kelompok Cd (4,9 g/dL), di mana perbedaan antara kontrol dan Cd signifikan. Adapun kadar normal hemoglobin pada ikan nila berkisar antara 5,05-8,33 g/dL (Safitri & Sumarti Suryaningsih, 2013). Penurunan hemoglobin memperkuat indikasi bahwa paparan Cd secara khusus berdampak negatif terhadap kemampuan darah dalam mengangkut oksigen. Temuan ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa Cd memiliki efek toksik yang lebih kuat dibandingkan Pb terhadap sistem hematologis ikan nila. Penurunan ini diakibatkan karena kadmium mengganggu sirkulasi eritrosit, menghambat jalur enzimatis pembentukan Hb, serta menyebabkan kerusakan pada insang yang berdampak pada pertukaran gas. Akumulasi Cd menurunkan aktivitas enzim karbonat anhidrase (CA) di insang, yang penting dalam regulasi asam-basa dan pembuangan CO₂, sehingga terjadi asidosis metabolik dan penurunan pO₂ (hipoksia). Kondisi ini mengurangi kemampuan darah mengikat dan mengangkut oksigen secara efisien, yang berujung pada menurunnya kadar Hb dan terjadinya anemia atau hemodilusi pada ikan (Soegianto et al., 2023).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Paparan kadmium klorida (CdCl₂) secara signifikan memengaruhi parameter fisiologi ikan nila (*Oreochromis niloticus*), terutama pada sistem respirasi,

morfometrik pencernaan, dan parameter hematologi. Penurunan jumlah eritrosit, kadar hemoglobin, dan kecepatan respirasi menunjukkan adanya gangguan fungsi transportasi oksigen akibat kerusakan insang dan gangguan metabolisme darah. Selain itu, perubahan warna dan panjang saluran pencernaan mengindikasikan adanya stres fisiologis dan akumulasi toksik Cd pada organ-organ vital. Hasil ini menunjukkan bahwa Cd bersifat lebih toksik dibandingkan timbal (Pb), terutama dalam memengaruhi sistem peredaran darah dan pernapasan ikan nila. Penelitian ini mendukung urgensi untuk menetapkan regulasi lingkungan yang lebih ketat terhadap pembuangan limbah industri atau domestic yang mengandung Pb dan Cd.

4.2 Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi efek jangka panjang paparan Cd terhadap sistem reproduksi dan regenerasi jaringan, serta potensi pemulihan fisiologis ikan setelah penghentian paparan. Selain itu, penggunaan bioindikator seperti ikan nila perlu terus dikembangkan sebagai alat monitoring pencemaran perairan secara efektif.

5. REFERENSI

- Abdelwarith, A. A., Younis, E.-S. M., Ahmed Elsayed, E., Abdel-Warith, A.-W. A., Younis, E.-S. M., Al-Asgah, N. A., & H Abd-Elkader, M. O. (2020). Effects of Sub-lethal Lead Nitrate and Copper Sulfate Concentrations on Hematological Parameters During Long-term Exposure in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). In *Journal of Scientific & Industrial Research* (Vol. 79). <https://www.researchgate.net/publication/346096681>
- Agustina, D. Y., Suprpto, D., Program, F., Manajemen, S., Perairan, S., Sumberdaya, D., Fakultas, A., Dan, P., Kelautan, I., Diponegoro, U., & Soedarto, J. (2019). Management Of Aquatic Resources Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) Di Sungai Tenggang, Semarang, Jawa Tengah. In *Journal Of Maquares* (Vol. 8, Issue 3). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/maquares>
- Akmal, Y., Devi, C. M. S., Muliari, M., Humairani, R., & Zulfahmi, I. (2021). Morfometrik Sistem Pencernaan Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) yang Dipapar Limbah Cair Kelapa Sawit. *JURNAL GALUNG TROPIKA*, 10(1), 68–81. <https://doi.org/10.31850/jgt.v10i1.736>
- Álvarez-González, C. A., Martínez-Sánchez, L., Peña-Marín, E. S., Guerrero-Zárate, R., Jesús-Ramírez, F., Morales-García, V., Uribe-López, M., & Núñez-Nogueira, G. (2020).

- Effects on the Growth and Digestive Enzyme Activity in Nile Tilapia Fry (*Oreochromis niloticus*) by Lead Exposure. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(9).
<https://doi.org/10.1007/s11270-020-04810-9>
- Aprilliyani, E. P., & Rahayuningsih, M. (2020). Keanekaragaman spesies ikan sebagai bioindikator kualitas perairan di sungai Kaligarang Kota Semarang. *Life Science*, 9(1), 1–10.
- Arisma, D. A., Purnaini, R., & Saziati, D. O. (2023). Identifikasi Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) di Sungai Kapuas Kecil. In *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah* (Vol. 11, Issue 1).
- Begum, S. A., Hasnath, M., & Abdul Aziz, K. (2024). Cadmium Chloride Induced Histopathological Alterations in the Selected Organs of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.). *Bangladesh Journal of Zoology*, 52(2), 237–251.
<https://doi.org/10.3329/bjz.v52i2.77285>
- Bobu, F. R. (2022). Respon Potensial Membran Sel Telur Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) Akibat Terkontaminasi Timbal (Pb). *EduFisika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1).
- Chatterjee, S., & Saxena, R. K. (2015). Preferential elimination of older erythrocytes in circulation and depressed bone marrow erythropoietic activity contribute to cadmium induced anemia in mice. *PLoS ONE*, 10(7).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132697>
- Ghaffari, S. (2008). Oxidative stress in the regulation of normal and neoplastic hematopoiesis. In *Antioxidants and Redox Signaling* (Vol. 10, Issue 11, pp. 1923–1940).
<https://doi.org/10.1089/ars.2008.2142>
- Gupta, S. K., Gupta, R., Nage, S., Kumar, N., Kumari, R., Gupta, A., Foyosal, M. J., Sarkar, B., & Krishnani, K. K. (2025). Heavy metal accumulation and biomarker responses of Nile tilapia from a coal void reservoir cage aquaculture system. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100631>
- Hassan, E., El-Sayed, G., Hassan, A., & Abd Elsalam, S. (2020). Effect of pollution with lead, copper, cadmium on gene expression pattern of liver GST and serum lysozymes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Mansoura Veterinary Medical Journal*, 21(3), 53–60.
<https://doi.org/10.35943/mvmj.2020.310>
- Kaya, H., Akbulut, M., Çelik, E. Ş., & Yilmaz, S. (2013). Impacts of sublethal lead exposure on the hemato-immunological parameters in tilapia (*Oreochromis mossambicus*). *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95(9), 1554–1564.
<https://doi.org/10.1080/02772248.2014.895363>
- Koniyo, Y. (2020). Analisis Kualitas Air Pada Lokasi Budidaya Ikan Air Tawar Di Kecamatan Suwawa Tengah. *Jurnal Technopreneur (JTech)*, 8(1), 52–58.
<https://doi.org/10.30869/jtech.v8i1.527>

- Maryam, S., Naz, H., Ahmed, T., Omran, A., Alanazi, Y. F., Usman, M., UmarIjaz, M., Shah, S. Q. A., Qazi, A. A., Ali, B., Ali, H., Alasmari, A., & Heidary, K. (2023). Determination of histological and genotoxic parameters of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* exposed to lead (Pb). *Cellular and Molecular Biology*, 69(4), 7–15. <https://doi.org/10.14715/cmb/2023.69.4.2>
- Oktapiandi, Sutrisno, J., & Sunarto. (2019). Analisis Pertumbuhan Ikan Nila yang Dibudidayakan pada Air Musta'mal. *Jurnal Bioeksperimen*, 5(1), 16–20. <https://doi.org/10.23917/bioeksperimen.v5i1.2795>
- Panigoro, N., Astuti, I., Salfira, P. D. C., & Wakita, K. (2007). *Teknik Dasar Histologi dan Atlas Dasar-dasar Histopatologi Ikan*. Direktorat Jenderal Perikanan Budidaya. Departemen kelautan dan Perikanan dan Japan International Cooperation Agency. (JICA).
- Perera, P. A. C. T., Kodithu, S., V. Sundara, T., & Edirisingh, U. (2015). Bioaccumulation of Cadmium in Freshwater Fish: An Environmental Perspective. *Insight Ecology*, 4(1), 1–12. <https://doi.org/10.5567/ecology-ik.2015.1.12>
- Pradona, S., & Partajaya. (2022). *Akumulasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Daging Ikan di Tanjung Mas Semarang*. <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/LifeSci>
- Purwanto, A. I., Prihatmo, G., & Pakpahan, S. (2020). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) dan Ikan Bawal (*Colossoma macropomum*) di Sungai Winongo, Yogyakarta Heavy Metal Lead on *Oreochromis niloticus* and *Colossoma macropomum* in Winongo River, Yogyakarta. 1(2), 70–78.
- Rahayu, N. I., Rosmanidar, Hanfiah, 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.
- Safitri, D., & Sumarti Suryaningsih, dan. (2013). Jurnal Medika Veterinaria Hemoglobin Levels of Tilapia Fish (*Oreochromis niloticus*) Treated by Heat Stress and Supplemented with Willow (*Salix tetrasperma* Roxb) Leaves Powder Supplementation. *Jurnal Medika Veterinaria*, 7(1), 39–41.
- Saputri, A., Khairuddin, K., & Yamin, M. (2023). Analysis of Cadmium (Cd) Heavy Metal Content in Mosambique Tilapia Fish (*Oreochromis mossambicus*) Derived from Rawa Taliwang Lake to Enrich Ecotoxicology Lecture Material in 2022. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(2), 390–397. <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i2.4845>
- Sheethal, K. U. , Nadoor, P., Somashekara, S. R., Suryawanshi, U. A., Amogha, K. R., Telvekar, P. A., Shelke, S. T., & Pathan, J. G. K. (2024). Physiological Changes in Nickel-exposed Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* during Exposure and Recovery Periods. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 333–340. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62048>

- Soegianto, A., Yulianto, B., Payus, C. M., Affandi, M., Mukholladun, W., Indriyasari, K. N., Marchellina, A., & Rahmatin, N. M. (2023). *Sublethal effects of cadmium on the osmoregulatory and acid-base parameters of tilapia (Oreochromis niloticus) at various times*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1539214/v3>
- Sweet, L. I., & Zelikoff, J. T. (2001). *Toxicology And Immunotoxicology Of Mercury: A Comparative Review In Fish And Humans*.
- Vo, V. T., Le, T. M. L., Duong, T. Q. A., Mai, N. A. T., & Thuong, H. N. T. (2021a). Assessment of lead toxicity in red tilapia *Oreochromis* sp. through hematological parameters. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2022(1), 1–8. <https://doi.org/10.35495/AJAB.2021.01.016>
- Vo, V. T., Le, T. M. L., Duong, T. Q. A., Mai, N. A. T., & Thuong, H. N. T. (2021b). Assessment of lead toxicity in red tilapia *Oreochromis* sp. through hematological parameters. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2022(1), 1–8. <https://doi.org/10.35495/AJAB.2021.01.016>
- Xue, Y., Huang, J., Wang, J. Q., & Li, F. Y. (2023). Tissue-Specific Accumulation And Depuration Of Cadmium In Tilapia: Role Of Salinity And Cadmium Concentration. *Applied Ecology and Environmental Research*, 21(5), 4177–4194. https://doi.org/10.15666/aeer/2105_41774194
- Younis, E., Abdelmoez Abdelwarith, A., Ebaid, H., Mohamed Younis, E.-S., Abdel-Moez Abdel-Warith, A.-W., Abdualla Al-Asghar, N., & Mubarak, M. (2013). Histological Changes in the Liver and Intestine of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, Exposed to Sublethal Concentrations of Cadmium. In *Article in Pakistan Journal of Zoology* (Vol. 45, Issue 3). <https://www.researchgate.net/publication/259568941>
- Yulaipi, S., Aunurohim, Luqman, A., Hidayati, D., & Soegianto, A. (2020). *Oreochromis mossambicus* accumulates lead without showing growth inhibition. *Cology, Environment and Conservation*, 26 (November Suppl. Issue), 36–40.
- Zhang, Q., Xie, Y., Qin, R., Huang, E., Zhang, Z., Zhou, J., Liu, D., Meng, L., Liu, Y., & Tong, T. (2024). Effects of cadmium on the growth, muscle composition, digestion, gene expression of antioxidant and lipid metabolism in juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1443484>