



IKAN GELODOK

sebagai Bioindikator
Pencemaran Logam Berat



Serial Fauna
Kalimantan

Heri Budi Santoso
Hidayaturrahmah
Eko Suhartono
Rizmi Yunita
Danang Biyatmoko

**IKAN GELODOK
SEBAGAI BIOINDIKATOR
PENCEMARAN LOGAM BERAT**

Serial Fauna Kalimantan

Heri Budi Santoso, Hidayaturrahmah
Eko Suhartono, Rizmi Yunita,
Danang Biyatmoko

**DIPERSEMBAHKAN UNTUK UPAYA PELESTARIAN
DAN PEMANFAATAN FAUNA KALIMANTAN**



Ikan Gelodok sebagai Bioindikator Pencemaran Logam Berat

© Heri Budi Santoso, Hidayaturrahmah, Eko Suhartono, Rizmi Yunita,
Danang Biyatmoko, 2021

Editor: Dodon Turianto Nugrahadi

Desain Cover: Heri Budi Santoso

122 halaman, 15.5 x 23 cm

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Perpustakaan Nasional Republik Indonesia

ISBN: 978-602-0950-75-4

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari penulis atau penerbit.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

All Rights Reserved

Cetakan Pertama: April 2021

Penerbit

Scripta Cendekia

Banjarbaru, Kalimantan Selatan

E: scriptacendekia@gmail.com

L: webscripta.wordpress.com

Pengantar

Buku ini hakikatnya ditujukan untuk mengekspresikan hasil penelitian hibah dan skripsi mahasiswa S1 Prodi Biologi FMIPA ULM di bawah bimbingan penulis serta hasil review artikel penulis dengan promotor pada saat penulis melanjutkan studi pada program S3 Ilmu Pertanian ULM. Buku ini bisa digunakan sebagai bahan bacaan dan referensi untuk mengajar dan meneliti bagi rekan sejawat dosen, guru, peneliti, khususnya di bidang Fauna Kalimantan, Sistem Ekologi Lingkungan Lahan Basah dan Ekotoksikologi Perairan. Mata kuliah Fauna Kalimantan merupakan mata kuliah khas dan unggulan Prodi Biologi FMIPA ULM dalam mendukung visi Universitas Lambung Mangkurat sebagai Pusat Unggulan Lahan Basah Nasional (2019-2023) dan pusat pengembangan lahan basah di Asia Pasifik pada tahun 2027.

Dengan selesainya penulisan buku ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak, antara lain Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI yang telah mendanai riset tentang Aspek Biologi Ikan Gelodok sebagai Fauna Lahan Basah dengan skema Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) mulai tahun 2016-2018, Rektor ULM yang telah mendanai riset tentang Potensi Ikan Gelodok sebagai Bioindikator Pencemaran Logam Berat di Estuari Sungai Barito pada tahun 2019, dan mahasiswa bimbingan untuk kelengkapan gambar-gambar keanekaragaman jenis dan habitat ikan gelodok sehingga buku ini dapat diselesaikan.

Semoga buku ini bermanfaat untuk para ilmuwan maupun mahasiswa yang tertarik untuk meneliti Fauna Kalimantan dalam upaya konservasi yaitu memanfaatkan dan melestarikannya. Sebetulnya ikan gelodok banyak mempunyai manfaat, tetapi informasi yang belum komprehensif menyebabkan potensi ikan ini belum optimal dimanfaatkan. Potensi ikan gelodok diantaranya dipercaya oleh penduduk setempat memiliki khasiat sebagai obat (asma), menjadi ikan hias di aquascape, dan di beberapa negara seperti India, Jepang, Vietnam dikonsumsi sebagai sumber protein, serta sebagai bioindikator untuk mengevaluasi dampak buruk kegiatan antropogenik pada ekosistem lahan basah pesisir. Harapan pada masa yang akan datang

selain sebagai spesies bioindikator dan organisme sentinel, karena keunikan biologisnya ikan gelodok berpotensi sebagai *flagship species* (spesies unggulan) yang terkenal sebagai alat promosi dalam upaya konservasi ekosistem rawa atau lahan basah pesisir di Indonesia. Untuk lebih sempurnanya buku ini, diharapkan ada saran-saran dari pembaca yang bersifat konstruktif.

Banjarbaru, Maret 2021

Penulis

KATA SAMBUTAN REKTOR UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT

Saya menyambut baik diterbitkannya buku *Ikan Gelodok sebagai Bioindikator Pencemaran Logam Berat*, karena buku ini akan memperkaya referensi pengetahuan tentang Fauna Lahan Basah dan Ekotoksikologi Perairan.

Kita ketahui bersama bahwa kawasan estuari diduga terancam degradasi akibat pengaruh buruk aktivitas antropogenik, sehingga diperlukan biomonitoring untuk upaya pencegahan dini. Salahsatunya adalah pemanfaatan spesies bioindikator dan respons biomarker sebagai alat biomonitoring untuk mengevaluasi pencemaran, khususnya pencemaran logam berat di ekosistem rawa pesisir. Program biomonitoring bertujuan untuk memantau kualitas lingkungan melalui penggunaan organisme hidup secara teratur dan sistematis atau responsnya yang secara alami terjadi di lingkungan sebagai indikator. Respons biomarker sebagai sinyal peringatan dini terjadinya kerusakan ekosistem yang didasarkan pada identifikasi dan kuantifikasi perubahan molekuler, biokimiawi, fisiologis, genetik dan seluler pada spesies bioindikator. Bioindikator penting digunakan sebagai alat yang mampu menentukan efek atau respons keseluruhan dari campuran polutan yang terjadi atau berinteraksi dalam sistem perairan yang kompleks. Spesies ikan banyak digunakan sebagai bioindikator pencemaran logam berat. Ikan gelodok (ikan timpakul dalam bahasa Banjar) yang merupakan fauna khas dan melimpah di kawasan estuari, termasuk di kawasan estuari/rawa pesisir di Kalimantan Selatan berpotensi sebagai bioindikator pencemaran logam berat di ekosistem lahan basah pesisir.

Penggunaan bioindikator dan biomarker meningkat dan meluas pada dekade terakhir sebagai alat biomonitoring lingkungan estuari. Biomarker adalah pengukuran dalam cairan tubuh, sel, atau jaringan yang dapat menunjukkan perubahan biokimia atau seluler yang dihasilkan dari adanya racun atau stres. Dalam konteks multi-stressor, kontaminan dapat mempengaruhi struktur dan fungsi sistem biologis sehingga menyebabkan respons berupa biomarker pada tingkat molekuler, biokimiawi, histologis, dan perilaku sebelum mempengaruhi pada tingkat komunitas. Biomarker dijadikan sebagai

alat deteksi dini terjadinya respons/efek biologis dan deteksi kualitas lingkungan akibat pengaruh paparan kontaminan dan stres.

Saya yakin inovasi model biomonitoring lingkungan yang efektif, efisien dan sejalan dengan prinsip konservasi akan terus berkembang sejalan dengan semakin beratnya tekanan pada lingkungan perairan. Oleh karena itu, diterbitkannya buku ini dapat menjadi sumbangan ilmu pengetahuan untuk perkembangan ekotoksikologi perairan. Selain itu, buku ini menjadi sumbangan nyata dalam mendukung visi Universitas Lambung Mangkurat sebagai Pusat Unggulan Lahan Basah Nasional (2019-2023) dan pusat pengembangan lahan basah di Asia Pasifik pada tahun 2027. Demikian kata sambutan saya, semoga buku Ikan Gelodok sebagai Bioindikator Pencemaran Logam Berat bermanfaat bagi masyarakat, peneliti lingkungan, dosen, dan mahasiswa yang tertarik dengan fauna lahan basah dan ekotoksikologi.



Prokono, 8 April 2021

Dr. H. Sutarto Hadi, M.Si, M.Sc

Daftar Isi

Pengantar	iii
Kata Sambutan Rektor Universitas Lambung Mangkurat	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	x
Bab 1 Pendahuluan	1
Bab 2 Bioekologi Ikan Gelodok	9
Taksonomi	9
Keaneekaragaman Spesies	11
Habitat	12
Pola Perilaku Harian	17
Perilaku Berinteraksi	20
Perilaku Berjemur dan Melembabkan Badan	21
Perilaku Makan	22
Perilaku Menjelajah	23
Respirasi dan Kinematika Gerak	24
Ekologi Makan	26
Profil Darah <i>Periophthalmodon schlosseri</i>	27
Eritrosit	28
Kadar Hemoglobin	29
Hematokrit	29
MCV (<i>Mean Corpuscular Volume</i>)	29
MCH (<i>Mean Cell Hemoglobin</i>)	30
MCHC (<i>Mean Cell Hemoglobin Concentration</i>)	30
Leukosit	30
Parasit yang menginfeksi <i>Periophthalmodon schlosseri</i>	31
Profil Protein <i>Periophthalmodon schlosseri</i>	34
Reproduksi	36
Bab 3 Stres Oksidatif pada Ikan	39
Bab 4 Produksi dan Eliminasi Senyawa Oksigen Reaktif pada Ikan	43
Produksi senyawa oksigen reaktif (ROS)	43
Eliminasi senyawa oksigen reaktif (ROS)	44
Bab 5 Analisis Penanda Stres Oksidatif pada Ikan	49
Deteksi Senyawa Oksigen Reaktif (ROS)	49

Perubahan lipid, protein, dan asam nukleat akibat induksi ROS	50
Bab 6 Logam Berat Penyebab Stres Oksidatif pada Ikan	55
Stres Oksidatif dan Sistem Pertahanan Antioksidan pada Ikan Akibat Logam Berat	56
Mekanisme Kerusakan Oksidatif yang Diinduksi Logam Berat	59
Beberapa Logam Berat Penyebab Stres Oksidatif pada Ikan	60
Besi (Fe)	60
Kadmium (Cd)	63
Merkuri (Hg)	66
Timbal (Pb)	69
Bab 7 Potensi Ikan Gelodok sebagai Alat Biomonitoring	
Pencemaran Logam Berat	71
Bioindikator dan biomarker sebagai alat biomonitoring	71
Ikan Gelodoks Alat Biomonitoring Potensial Pencemaran Logam Berat di Lahan Basah Pesisir	74
Daftar Pustaka	85
Tentang Penulis	107

Daftar Gambar

Gambar 1. Genus <i>Mudskippers (Gobiidae)</i> di dunia	10
Gambar 2. Keanekaragaman spesies ikan gelodok di lahan basah pesisir dan estuari sungai Barito Kalimantan Selatan	12
Gambar 3. Berbagai struktur sarang <i>Periophthalmodon schlosseri</i>	15
Gambar 4. Struktur sarang ikan gelodok.	15
Gambar 5. Sketsa bagian-bagian saluran sarang <i>Periophthalmus schlosseri</i>	15
Gambar 6. Habitat <i>Periophthalmodon schlosseri</i> di estuari sungai Barito	17
Gambar 7. Ikan gelodok berinteraksi	21
Gambar 8. Ikan gelodok berjemur di sekitar sarangnya	21
Gambar 9. Ikan gelodok sedang membalikkan badannya ke lumpur	21
Gambar 10. Ikan gelodok sedang masuk ke dalam sarangnya	22
Gambar 11. Ikan gelodok sedang mengintai kepiting	22
Gambar 12. Ikan gelodok sedang menelan kepiting	22
Gambar 13. Ikan gelodok membawa kepiting ke dalam sarang	23
Gambar 14. Ikan gelodok menangkap kepiting dengan meloncat	23
Gambar 15. Ikan gelodok menjelajah di lumpur dengan sirip dada	23
Gambar 16. Ikan gelodok berenang dengan menonjolkan kepalanya	24
Gambar 17. Morfologi cacing <i>Opecoeloides</i>	32
Gambar 18. Morfologi Bucephalidae	33
Gambar 19. Kista Metaserkaria: a. ventral sucker; b. dinding Kista; c. organ ekskretori (400x)	34
Gambar 20. Kista Metaserkaria	34
Gambar 21. Pola protein <i>P. schlosseri</i> (A). Profil protein (B).	36
Gambar 22. Jalur metabolisme oksigen organisme dalam pembentukan (ROS)	41
Gambar 23. Induksi oksidan yang menyebabkan perubahan dinamis kadar senyawa oksigen reaktif dalam organisme hidup	42
Gambar 24. Proses produksi, interkonversi, dan eliminasi ROS dan enzim antioksidan lini pertama dan kedua	45
Gambar 25. Keseimbangan antara produksi dan eliminasi ROS dan efek potensial ROS pada sistem biologis	47
Gambar 26. Biomarker stres oksidatif akibat induksi ROS	53
Gambar 27. Mekanisme stres oksidatif pada ikan yang terpapar logam berat	59

Daftar Tabel

Tabel 1. Deteksi dini dengan serangkaian biomarker terintegrasi pada pencemaran dengan kontaminan yang kompleks di perairan alami	52
Tabel 2. Ringkasan variasi respons biomarker pada ikan gelodok terhadap polusi logam berat	76

Bab 1

Pendahuluan

Polusi ekosistem perairan merupakan masalah serius yang terus berkembang secara global, khususnya pada negara yang sedang berkembang (Ben Ameur et al., 2012). Organisme perairan terus menerus terpapar oleh beberapa pemicu polusi lingkungan, antara lain senyawa organik dan anorganik dari aktivitas antropogenik (Adeogun et al., 2020), berupa pestisida, limbah pertanian, limbah industri, limbah domestik, dan logam berat (Kumar, et al., 2017; Kumar, et al., 2019; Paschoalini et al. 2019; Ziegler, et al, 2019). Di India, semua sungai besar, termasuk sungai Gangga (Paul, 2017) tercemar limbah pertanian, industri, dan domestik, demikian juga di Amerika Selatan, yaitu Brasil dan Argentina (Bertrand, et al., 2016), serta Nigeria (Adeogun et al., 2020). Pencemaran serupa diduga juga terjadi di Indonesia. Limbah tersebut mengandung berbagai macam polutan organik dan anorganik termasuk pelarut, minyak, lemak, plastik, plasticizer, fenol, logam berat, pestisida, dan padatan tersuspensi (Pandey et al., 2003). Polusi pada ekosistem perairan yang terus memburuk di negara-negara berkembang disebabkan oleh pembuangan polutan campuran bahan organik dan anorganik ke badan air yang sembarangan dan tidak terkontrol, pengawasan pelaksanaan undang-undang lingkungan hidup yang longgar dan rendahnya sanksi bagi pelanggar, serta penanganan limbah yang tidak memadai (Ghisi et al., 2017). Faktor antropogenik diduga sebagai penyebab utama terjadinya polusi pada ekosistem perairan, yaitu faktor perilaku yang tidak peduli konservasi lingkungan, kemajuan industri, dan produksi bahan kimia yang terus meningkat pesat.

Selama dekade terakhir, produksi global bahan kimia telah meningkat hingga 400 juta ton per tahun, dan timbul kekhawatiran dampak buruk dari polutan yang muncul pada ekosistem perairan. Dampak buruk pada lingkungan perairan terjadi karena terbatasnya data dan informasi tentang potensi bahayanya kepada lingkungan (Banaee & Taheri, 2019). Selain itu, ada kekhawatiran tentang dampak dari *emerging contaminants* atau kontaminan yang telah ada di lingkungan perairan tapi masih sedikit informasi untuk menetapkan potensi risiko bahan tersebut pada lingkungan. Bahan-bahan tersebut meliputi obat-obatan, kosmetik, produk perawatan pribadi dan

pestisida. Obat-obatan paling menonjol sebagai kontaminan utama pada lingkungan perairan (Pérez et al., 2018).

Diantara bahan kimia tersebut, polusi logam berat adalah bahaya lingkungan utama yang mempengaruhi kesehatan lingkungan air dan biota air, hal ini karena logam berat adalah logam yang beracun, persisten karena stabilitas kimianya, sulit terdegradasi, cenderung mengalami bioakumulasi, serta biomagnifikasi dalam organisme akuatik (Sia Su, et al, 2013; Georgieva et al., 2016; de Almeida Duarte, et al., 2017; Abdel Rahman, et al, 2019; Carvalho Neta et al., 2019; Adeogun et al., 2020).

Logam berat di perairan alami selain berasal dari aktivitas antropogenik juga berasal dari sumber alami. Sumber alami polusi logam berat antara lain dari deposisi atmosfer langsung, pelapukan geologis, disintegrasi tanah dan batuan, dan letusan gunung berapi (Authman, 2015; Andreu et al., 2016; Carvalho Neta et al., 2019). Logam berat dari dua sumber tadi berbentuk sebagai campuran lebih dari satu logam atau dalam kombinasi dengan polutan organik yang berinteraksi dengan organisme perairan. Dengan demikian, efek interaktif dari campuran kontaminan pada biota air termasuk ikan menjadi kajian yang menarik karena biota air, terutama ikan, pada umumnya terpapar oleh campuran kontaminan di lingkungan perairan (Georgieva et al., 2016).

Peningkatan jumlah logam berat yang dibuang ke lingkungan perairan telah menyebabkan berbagai efek buruk pada organisme akuatik, terutama pada ikan (Delmond et al., 2019). Ikan mudah terpengaruh oleh polutan logam berat dengan insangnya sebagai jalur masuk utama xenobiotik ke tubuhnya, sehingga terjadi perubahan struktur sel dan jaringan pada insangnya (da Silva Souza, et al., 2020). Ikan terpapar logam berat langsung dari air yang terkontaminasi melalui insang dan kulitnya, dan secara tidak langsung melalui rantai makanan, sehingga ikan cocok digunakan untuk penilaian kualitas lingkungan perairan dan berfungsi sebagai bioindikator pencemaran lingkungan perairan (Barbee et al., 2014).

Logam berat non esensial seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), dan merkuri (Hg) berbahaya bagi ikan bahkan pada konsentrasi sangat rendah telah dilaporkan sebagai polutan yang berbahaya dan dapat terakumulasi di sepanjang rantai makanan sehingga berisiko besar bagi kesehatan hewan dan manusia (Abiona et al., 2019). Logam berat esensial seperti Fe, Mn, Co, Ni, Zn, Cr, dan Cu, penting dalam membentuk kofaktor untuk banyak enzim, dan untuk aktivitas metabolisme hewan, tetapi bisa menjadi beracun jika konsentrasinya

tinggi (Javed and Usmani, 2017). Beberapa penelitian di dunia menunjukkan terjadinya pencemaran logam berat di wilayah perairan dengan dominasi Zn, Pb, Cd, Cu, dan Cr (Bertrand, et al., 2016).

Logam berat yang terakumulasi dalam jaringan ikan dapat menginduksi produksi senyawa oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species*/ROS) dan radikal bebas yang berakibat pada peningkatan stres oksidatif (Farombi, et al, 2007; Beg et al., 2015; Basirun et al., 2019; Gavrić et al., 2019). Mekanisme toksisitas logam berat pada ikan melalui stres oksidatif memicu timbulnya mekanisme pertahanan antioksidan seluler atau mengakibatkan kerusakan seluler oksidatif, seperti peroksidasi lipid, oksidasi protein, dan kerusakan DNA. Untuk meminimalkan efek negatif senyawa oksigen reaktif, ikan telah mengembangkan sistem pertahanan antioksidan yang efektif, meliputi antioksidan enzimatis seperti katalase (CAT), glutathione peroksidase (GPx), glutathione reduktase (GR), glukosa-6-fosfat dehidrogenase (G6PDH), dan glutathione S-transferase (GST), serta antioksidan non-enzimatis seperti glutathione tereduksi (GSH) (Livingstone, 2001; Ferreira et al., 2019; Sinha, et al, 2020). Sistem antioksidan seluler ini melindungi sel dari peroksidasi lipid, oksidasi protein, dan kerusakan DNA dengan mengeliminasi produksi ROS dan radikal bebas (Do, et al, 2019).

Paparan logam berat juga mengakibatkan perubahan struktur sel dan jaringan pada ikan. Penanda biologis atau bioindikator yang relevan untuk mendeteksi perubahan struktur tersebut adalah bioindikator histopatologi. Bioindikator histopatologi merupakan alat yang berguna untuk mengevaluasi tingkat polusi dan menganalisis respons yang terjadi karena efek sub letal dan kronis (Bernet et al., 1999; El-Ghamdi, et al., 2014). Organ yang cocok dalam pemeriksaan histologis untuk menentukan efek polusi logam berat adalah hati, insang, ginjal, dan lendir kulit (Bernet et al., 1999; Louiz, et al., 2018). Bioindikator histopatologis adalah alat yang sangat sensitif untuk mengidentifikasi perubahan struktural sel dan jaringan sebagai akibat buruk polutan logam berat pada perairan (Soliman, et al, 2019). Penelitian Abdel Rahman et al. (2019) menjelaskan bahwa ikan Nila yang sering terpapar dosis tinggi logam berat Al, Cd, Pb, Hg, dan Ni pada perairan alami yang tercemar mengakibatkan dampak buruk yaitu menunjukkan perilaku abnormal, memunculkan tanda tanda keracunan, dan menyebabkan kematian sebesar 63,33%. Tanda tanda klinis keracunan logam berat diantaranya sekresi lendir yang berlebihan, terjadi perdarahan, dan sisik yang terlepas. Dengan demikian polutan logam berat pada ikan merusak fungsi pernapasan, mengganggu homeostasis dan proses fisiologis pada ikan, bahkan menyebabkan kematian. Hasil penelitian membuktikan bahwa ikan

sebagai bioindikator yang sangat baik dan cocok untuk mengevaluasi kualitas perairan (Copat et al., 2019; Abd-Allah, et al, 2019), sehingga menjadi alat biomonitoring yang andal untuk mengestimasi tingkat polusi, menggambarkan karakteristik alami ekosistem perairan, dan relevan untuk mengevaluasi perubahan habitat (Corredor-Santamaría, et al, 2019).

Ikan gelodok (*Mudskippers*) berpotensi sebagai model yang sangat baik untuk evaluasi ekotoksikologis di lingkungan perairan karena (i) berada di puncak rantai makanan, (ii) terpapar langsung dengan berbagai macam polutan, (iii) organisme euryhaline yang mempunyai toleransi luas terhadap perubahan parameter kualitas air, (iv) dapat menyerap dan mengakumulasi polutan yang berbeda, (v) distribusinya luas, (vi) memiliki karakter morfologis dan ekologisnya yang khas; (vii) bioindikator yang baik untuk efek polutan logam berat jangka panjang (Nimet, et al., 2020). Ikan gelodok juga sebagai spesies kunci (*keystone species*) pada habitat mangrove, memainkan peranan penting pada ekologi benthik, pemangsa krustasea kecil, diatom, alga yang ada pada lumpur estuari dan lahan basah pesisir (Ansari et al., 2014).

Potensi ikan gelodok sebagai fauna khas rawa/lahan basah pesisir untuk bioindikator polusi logam berat belum banyak ditemukan informasinya di Indonesia. Potensi ikan gelodok telah banyak digunakan sebagai bioindikator pencemaran senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik di Teluk Persia (Ansari et al., 2014 ; Sinaei and Mashinchian, 2014;) dan sebagai bioindikator pencemaran logam berat di Semenanjung Malaysia (Ikram et al., 2010; Sabullah et al., 2015).

Ikan gelodok termasuk organisme penjaga (*sentinel organism*) karena memiliki kemampuan mengakumulasi logam berat dalam jaringannya sehingga cocok untuk mendeteksi efek polusi logam berat di badan air dan sedimen dan berpotensi digunakan untuk mengevaluasi efek ekologis polutan pada ekosistem estuari dan lahan basah pesisir. Syarat khusus sebagai organisme sentinel adalah distribusi geografis yang luas, sensitivitas yang tinggi terhadap polutan lingkungan dan menjadi spesies dominan di habitatnya (Shirani et al., 2012a; 2012b). Ikan gelodok memiliki keunikan biologis yang berbeda dari ikan pada umumnya yaitu mempunyai karakter morfologi dan ekologi yang khas, kehidupan unik seperti amfibi karena bisa bernapas dan beraktivitas di darat dan di air (Hidayaturrahmah et al., 2019).

Habitat ikan gelodok berada di perairan estuari dan pesisir yang merupakan bagian dari ekosistem lahan basah. Estuari dan pesisir merupakan kawasan yang sangat rentan, karena secara terus menerus

dipengaruhi oleh kontaminasi logam berat yang bersumber dari aktivitas antropogenik (Ferreira et al., 2019; Marques et al., 2019), maupun secara alami seperti sedimentasi dan banjir, sehingga estuari dikenal sebagai tipe habitat yang paling terdegradasi di bumi (Barbee et al., 2014; Zhang et al., 2019). Sedimen pada estuari sebagai tempat utama penyimpanan logam berat (Weber et al., 2013), karena ketika pergerakan air yang lambat mengakibatkan sedimen mengikat banyak jejak logam (*trace metals*) untuk diendapkan sebagai sedimen tersuspensi. Sedimen adalah tempat utama deposit logam berat dan berperan penting sebagai tempat untuk penyerapan logam berat oleh ikan. Sedimen yang mengalami gangguan dan jika terjadi mobilitas hewan di dalam atau di permukaan sedimen, maka dapat memobilisasi kembali logam-logam yang terikat sehingga logam tersebut berdifusi menjadi *interstitial pore waters* dan dilepaskan kembali ke dalam badan air, oleh karena itu sedimen menjadi sumber potensial dari logam berat.

Sedimentasi di estuari mempertahankan sejumlah besar logam yang teradsorpsi pada partikel sedimen dan diendapkan ke dasar. Limbah industri yang mengandung logam berat diendapkan dalam sedimen ketika memasuki estuari karena menurunnya kondisi lingkungan, rendahnya tingkat oksigen terlarut dan pH yang tinggi, sehingga dapat mengakibatkan terkonsentrasinya atau pengayaan logam di dalam sedimen. Logam berat seperti Cu, Ni, Pb, Zn menjadi relatif tidak bergerak dalam sedimen (Carvalho Neta et al., 2019). Menurut Dane and Şişman, (2017) logam berat seperti Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, dan Fe dominan dalam air dan sedimen, sedangkan menurut (Marques et al., 2019) logam berat yang sering mencemari estuari adalah Cu, Zn, Fe, Pb, Cd, Hg dan Ag.

Sedimen di estuari juga tercemar dengan polutan organik terhalogenasi, seperti dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), polychlorinated biphenyls (PCBs), polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), decabromodiphenyl ethane (DBDPE), dechlorane plus (DP), dan 1,2-bis(2,4,6-tribromophenoxy)ethane (BTBPE) (Zaiwang Zhang et al., 2019), sehingga deteksi, analisis konsentrasi dan distribusi polutan pada sedimen perlu dilakukan untuk evaluasi risiko yang ditimbulkan (Yujun Yi et al., 2011; 2017).

Strategi untuk mengevaluasi paparan dan efek polutan logam berat pada estuari dan lahan basah pesisir adalah dengan program biomonitoring. Program biomonitoring dilaksanakan dengan (i) mengukur konsentrasi logam berat dan karakter fisik lingkungan perairan, dan (ii) menganalisis respons biota terpilih seperti ikan gelodok yang rentan terhadap polusi logam berat. (Hanson, 2008; Sweidan, et al, 2015; de Oliveira et al., 2019). Biomonitoring adalah

penggunaan biomaterial atau organisme untuk menganalisis karakteristik biosfer tertentu (Decou, et al, 2019). Biomonitoring digunakan untuk memverifikasi paparan logam berat dan respons biologis biota (terutama ikan) secara komprehensif akibat kontaminan campuran yang kompleks pada perairan alami. Biomonitoring menyediakan alat yang andal untuk mengidentifikasi dampak polutan logam berat pada biota dan lingkungan, yaitu penggunaan bioindikator dan biomarker (Ghisi et al., 2017). Beberapa program biomonitoring menyebutkan pentingnya menggunakan hewan *sentinel* (penjaga lingkungan) (Shukla and Trivedi, 2018), dan spesies asli sebagai bioindikator (Ballesteros et al., 2017).

Program biomonitoring bertujuan untuk memantau kualitas lingkungan melalui penggunaan organisme hidup secara teratur dan sistematis atau responsnya yang secara alami terjadi di lingkungan sebagai indikator (Seriani et al., 2015). Respons biomarker sebagai sinyal peringatan dini terjadinya kerusakan ekosistem yang didasarkan pada identifikasi dan kuantifikasi perubahan molekuler, biokimiawi, fisiologis, genetik dan seluler pada spesies bioindikator (Ballesteros et al., 2017; Bertrand et al., 2018). Respons perubahan ini dikaji karena adanya bioavailabilitas dan bioakumulasi logam berat di dalam tubuh baik karena terpapar secara tunggal atau multi polutan (Calado et al., 2020). Penggunaan berbagai respons biomarker komplementer pada spesies bioindikator saat ini telah diterapkan secara luas dan telah divalidasi pada studi laboratorium dan lapangan sebagai alat biomonitoring lingkungan estuari dan laut (Beg et al., 2015).

Ikan gelodok sering digunakan sebagai bioindikator dalam biomonitoring kualitas perairan estuari, khususnya pada ekosistem lahan basah/rawa pesisir. Lahan basah pesisir merupakan rawa pasang-surut bagian dari ekosistem estuari. Ikan ini memiliki keunikan biologis yang berbeda dari ikan pada umumnya yaitu bersifat seperti amfibi karena bisa bernapas di darat dan di air serta memiliki toleransi yang luas terhadap stresor lingkungan, hidup secara bentik, dan memiliki ketahanan terhadap kontaminan organik dan anorganik. Selain itu, ikan ini terdistribusi luas, kelimpahan alaminya banyak, berada di puncak rantai makanan, dan bioindikator yang sesuai untuk efek toksik polutan jangka panjang (Hidayaturrahmah et al., 2019; Nimet et al., 2020). Ikan gelodok hidup di lumpur pada zona intertidal pesisir dan lantai hutan mangrove pada daerah tropis dan subtropis (Ghotbeddin and Roomiani, 2020), yang dikenal sebagai tipe habitat yang paling terdegradasi di muka bumi karena secara terus menerus terpapar oleh pencemaran logam berat yang bersumber dari aktivitas antropogenik (Ferreira et al., 2019; Marques et al., 2019), maupun secara

alami seperti sedimentasi dan banjir (Barbee et al., 2014; Zhang et al., 2019). Hal ini mengakibatkan ikan gelodok beresiko terpapar logam berat. Ikan ini dapat menyerap logam berat dalam berbagai cara pemaparan yaitu kontak, tertelan, minum dan terhirup. Logam berat mampu merangsang produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang berlebihan dalam sistem biologis, yang berdampak terjadinya kelainan pada proses metabolisme seluler sehingga mengakibatkan stres oksidatif (Basirun et al., 2019; Gavrić et al., 2019). Sistem pertahanan antioksidan yang terbentuk sebagai respons stres oksidatif digunakan sebagai biomarker dalam program biomonitoring untuk penilaian risiko kontaminan (van der Oost et al., 2003). Jika logam berat menyebabkan ketidakseimbangan dalam reaksi redoks seluler maka mengakibatkan kerusakan pada lipid, protein dan DNA serta terjadi efek karsinogenik dan immunosuppression (Gao et al., 2019; Lee et al., 2019; Sinha et al., 2020).

Upaya penelitian intensif akan dilakukan untuk mengembangkan biomarker pada ikan gelodok untuk biomonitoring polusi logam berat pada ekosistem rawa pesisir. Tujuan penulisan buku ini adalah untuk menyajikan informasi komprehensif tentang potensi ikan gelodok sebagai spesies bioindikator dengan mengkaji respons biomarker terhadap polutan logam berat untuk mengevaluasi polusi pada lingkungan rawa pesisir. Biomarker stres oksidatif, genotoksisitas dan imunotoksisitas berpotensi sebagai alat deteksi dini dalam program biomonitoring (Radwan et al., 2020). Teknik diagnostik biomarker saat ini telah dikembangkan dalam studi ekotoksikologi perairan karena handal, tepat, ramah lingkungan dan murah untuk identifikasi peringatan dini kontaminasi logam berat pada ikan.

Bab 2

Bioekologi Ikan Gelodok

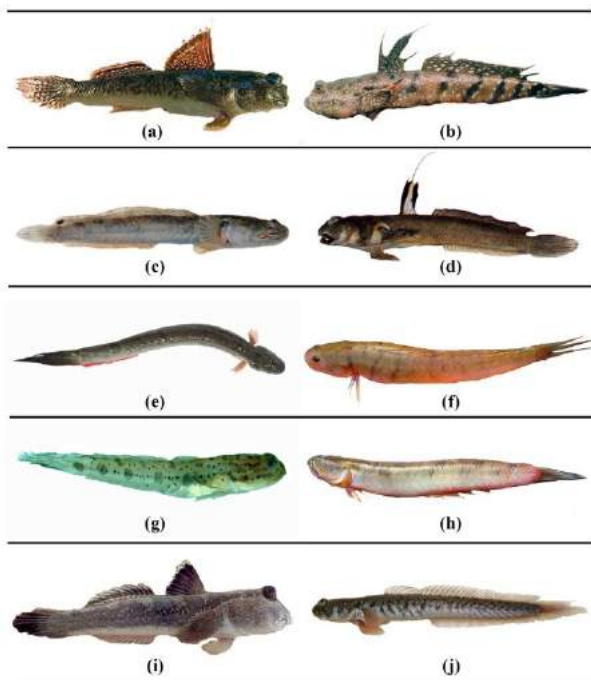
Ikan gelodok (*Mudskippers*) memiliki keunikan biologis khas yang berbeda dari ikan pada umumnya yaitu mempunyai karakter morfologi dan ekologi yang khas, kehidupan unik seperti amfibi karena bisa bernapas dan beraktivitas di darat dan di air. Ikan gelodok sering disebut “fish walking on land” atau “fishes out of water”. Ikan gelodok sebagai spesies yang berguna untuk menafsirkan perubahan dari air ke darat. Ada beberapa bukti tentang peralihan ikan ke tetrapoda, yang terjadi lebih dari 360 juta tahun yang lalu. Sampai saat ini sudah ditemukan 40 spesies yang diklasifikasikan dalam 10 genera. Habitat ikan gelodok sebagian besar mendiami hutan bakau dan dataran lumpur di wilayah Indo-Pasifik Barat, pantai barat tropis Afrika, dan garis pantai Samudra Hindia. Ikan gelodok dikenal sebagai ikan yang mahir membuat liang di rawa pesisir, estuari, dan zona intertidal sebagai sarang untuk tempat hidupnya. Ikan gelodok umumnya memakan alga, detritus, diatom, nematoda, polychaetes dan telur ikan, bersama dengan partikel lumpur dan pasir (Kumaraguru et al., 2020).

Pola distribusi, keanekaragaman spesies, pola perilaku, dan aktivitas pergerakan ikan gelodok telah dikaji oleh beberapa peneliti. Peneliti seperti Murdy telah mengkarakterisasi ciri-ciri morfologi ikan gelodok sehingga membuka jalan bagi klasifikasi taksonomi ikan gelodok. Penelitian tentang hubungan kekerabatan ikan gelodok dengan genera dan kelompok lain juga telah dilakukan. Pertumbuhan dan perkembangan, adaptasi pernapasan, peredaran darah, dan ekologi makan juga dikaji oleh banyak peneliti di dunia.

Taksonomi

Ikan gelodok termasuk dalam famili Oxudercidae dan subfamili Oxudercinae. Menurut Kumaraguru et al. (2020) ikan gelodok diidentifikasi sebanyak 34 spesies dalam 10 genus. Kesepuluh genus adalah *Periophthalmus*, *Boleophthalmus*, *Scartelaos*, *Periophthal-modon*, *Pseudapocryptes*, *Apocryptodon*, *Oxuderces*, *Parapocryptes*, *Apocryptes* dan *Zappa*. Genus *Periophthalmus* mempunyai spesies terbanyak yaitu 12 spesies: *Periophthalmus argentilineatus*, *Periophthalmus harbarus*, *Periophthalmus chrysospilos*, *Periophthalmus gracilis*, *Periophthalmus kalolo*, *Periophthalmus malaccensis*, *Periophthalmus minutus*, *Periophthalmus*

modestus, *Periophthalmus novaeguineensis*, *Periophthalmus novemradiatus*, *Periophthalmus waltoni*, *Periophthalmus weberi*. Genus *Boleophthalmus* terdiri dari 5 spesies yaitu *Boleophthalmus hirdsongi*, *Boleophthalmus boddarti*, *Boleophthalmus caeruleomaculatus*, *Boleophthalmus dussumieri*, *Boleophthalmus pectinirostris*. Genus *Scartelaos* mempunyai 4 spesies yaitu *Scartelaos cantoris*, *Scartelaos gigas*, *Scartelaos histophorus*, *Scartelaos tenuis*. Genus *Periophthalmodon* mempunyai 3 spesies yaitu *Periophthalmodon freycineti*, *Periophthalmodon schlosseri*, *Periophthalmodon septemradiatus*. Genus *Pseudapocryptes* terdiri dari 2 spesies yaitu *Pseudapocryptes borneensis*, *Pseudapocryptes lanceolatus*. Genus *Apocryptodon* terdiri dari 2 spesies yaitu *Apocryptodon madurensis*, *Apocryptodon punctatus*. Genus *Oxuderces* terdiri dari 2 spesies yaitu *Oxuderces dentatus*, *Oxuderces wirzi*. Genus *Parapocryptes* terdiri dari 2 spesies yaitu *Parapocryptes rictuosus*, *Parapocryptes serperaster*. Genus *Apocryptes* terdiri dari 1 spesies yaitu *Apocryptes bato*, dan genus *Zappa* mempunyai 1 spesies yaitu *Zappa confluentus*. Klasifikasi Mudskippers (*Gobiidae*) berdasarkan genus yang telah diidentifikasi di dunia disajikan pada Gambar 1.



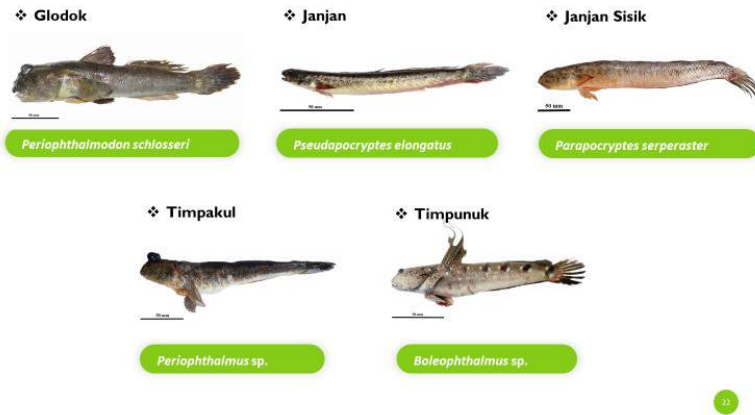
Gambar 1. Genus Mudskippers (*Gobiidae*) di dunia (Froese & Pauly, 2019)

Keterangan Gambar: (a) *Periophthalmus* (b) *Boleophthalmus* (c) *Oxuderces* (d) *Scartelaos* (e) *Pseudapocryptes* (f) *Apocryptes* (g) *Apocryptodon* (h) *Parapocryptes* (i) *Periophthalmodon* (j) *Zappa*

Keanekaragaman Spesies

Ikan gelodok terdistribusi luas mulai dari Afrika, Madagaskar, India, Asia Tenggara, Australia bagian utara, China Selatan, Jepang bagian selatan, Samoa, Kepulauan Tonga, Arab Saudi, Teluk Kuwait, Polinesia, dan Indonesia (Polgar 2012; Polgar and Lim 2015). Kekayaan spesies tertinggi di wilayah pesisir Asia Tenggara, Australia, dan Papua (Ansari et al., 2014). Menurut Kumaraguru et al. (2020) secara global telah teridentifikasi 34 spesies ikan gelodok yang beragam dan sembilan diantaranya ditemukan di pesisir India. Lima spesies ikan gelodok di pesisir Gujarat telah didokumentasikan. Ikan gelodok dilaporkan paling banyak ditemukan di pantai tenggara India selama musim pasca-monsun, dan habitat yang disukai adalah lumpur muara sungai/estuari dan kawasan hutan bakau. Delapan spesies ditemukan di Semenanjung Malaya dan 12 spesies ditemukan di Sumatera yang terdistribusi di sepanjang Selat Malaka. Penelitian sebelumnya, tercatat sembilan spesies ikan gelodok di Semenanjung Malaysia. Penelitian terbaru telah memperbarui jumlah total menjadi 17 di Semenanjung Malaysia. Sembilan belas spesies telah tercatat baru-baru ini di situs Ramsar, Johor, Malaysia. Beberapa spesies ikan gelodok juga ditemukan di Kabupaten Merauke, Papua, Indonesia yaitu *Boleophthalmus boddarti*, *B. pectinirostris*, *P. takita*, *P. argentilineatus*, *Scartelaos histophorus*, dan *Oxuderces dentatus*. *Periophthalmus waltoni* banyak ditemukan dan terdistribusi di sepanjang Teluk Persia meskipun terancam kepadatan populasinya. Populasi *Periophthalmus barbarus* yang melimpah ditemukan di sekitar tenggara Nigeria sehingga dieksploitasi berlebihan. Masyarakat tidak tertarik mengkonsumsi *Periophthalmus novemradiatus* karena laju pertumbuhannya meningkat pesat di sepanjang Muara Sungai Bakkhali, Bangladesh. Studi filogeografi *Periophthalmus* yang tersebar di sepanjang wilayah Indo-Pasifik membantu untuk memahami sejarah evolusinya. *Periophthalmus pilotus* yang merupakan spesies baru ikan gelodok telah teridentifikasi di Sumatera, Indonesia. Demikian juga, spesies baru *Parapocryptes serperaster* telah tercatat di Semenanjung Malaysia. *Periophthalmus walailakae* telah dilaporkan terdistribusi di tenggara India. Penelitian terbaru di perairan estuari dan perairan pesisir Indonesia telah teridentifikasi 24 spesies baru ikan gelodok. Penelitian Ramadhan (2019) telah mengidentifikasi 5 spesies ikan gelodok dari kawasan rawa pesisir dan perairan estuari sungai Barito Kalimantan Selatan, yaitu

Periophthalmodon schlosseri, *Pseudopocryptes elongatus*, *Parapocryptes serperaster*, *Periophthalmus sp.*, dan *Baleocephthalmus sp.* (Gambar 2).



Gambar 2. Keanekaragaman spesies ikan gelodok di lahan basah pesisir dan estuari sungai Barito Kalimantan Selatan

Habitat

Ikan gelodok hidup di daerah lahan basah riparian dengan dataran berlumpur. Ikan ini juga hidup pada daerah dengan tingkat salinitas rendah dan tempat yang kaya dengan invertebrata benthik. Banyak spesies ikan gelodok bisa hidup di garis pantai yang berbatu, dataran lumpur, hutan bakau, dan dataran pasir. Ikan gelodok senang beraktivitas dan melompat-lompat ke daratan, terutama di daerah berlumpur atau berair dangkal di sekitar hutan bakau di lingkungan estuari ketika air surut sehingga disebut *mudskipper*. Saat ini, lima genus seperti *Boleophthalmus*, *Periophthalmodon*, *Periophthalmus*, *Scartelaos* dan *Zappa* (*the slender mudskipper*) dengan 32 spesies beraktivitas sebagian besar terestrial pada lumpur zona intertidal pesisir, hutan bakau, delta sungai, dan garis pantai berlumpur di sepanjang Indo-Pacific sampai selatan Jepang dan sebelah barat pantai Atlantik (Dabruzzi et al., 2019). Aktivitas terestrial ikan gelodok tergantung pada masing-masing spesies. *Periophthalmus* dan *Periophthalmodon* adalah genus/marga yang paling banyak menghabiskan sebagian besar waktunya di luar air dan aktivitas terestrialnya bervariasi di antara spesies genus ini. Sebaliknya, *Scartelaos* banyak beraktivitas di perairan, sedangkan *Boleophthalmus* dalam aktivitasnya tidak terlalu bergantung pada air (Polgar and Lim, 2015; Lorente-Martínez et al., 2018). *Periophthalmodon schlosseri* yang sering disebut *the giant mudskipper* merupakan salah satu spesies ikan

gelodok terbesar yang hidup di negara tropis dan subtropis seperti Malaysia, Indonesia, Australia, India, dan Afrika (Looi et al., 2016).

Habitat alami ikan gelodok pada lumpur pasang surut yang terbentuk di muara sungai dan di lantai ekosistem hutan mangrove (Al-behbehani and Ebrahim, 2010; Perumal 2011; Shirani, et al. 2012b). Di Iran ikan gelodok bisa hidup di perairan tawar (Sharifian et al., 2018). Ikan gelodok termasuk organisme euryhaline. *Pseudapocryptes elongatus* mampu mentolerir salinitas, sehingga mampu bertahan hidup di laut terbuka, dan hutan bakau pesisir selama berbagai tahap pertumbuhannya. Habitat mikro ikan gelodok bergantung pada faktor lingkungan seperti tingkat salinitas, kondisi tanah atau air; suhu air dan udara; terang atau gelap; dan berbagai kombinasi di antaranya. *Periophthalmodon septemradiatus* merupakan spesies yang mampu menghuni dan berkembang biak dari lingkungan payau ke wilayah air tawar Sungai Mekong (Mai et al., 2019). *Boleophthalmus pectinirostris* telah menunjukkan preferensi perilaku dalam memilih habitat mikro mereka pada tahap awal remaja (Chen et al., 2015). Ikan gelodok menghuni habitat mikro berupa sarang yang berbeda dan memiliki konstruksi sarang yang berbeda tergantung pada spesiesnya. Ikan gelodok dalam memilih dan menyukai habitatnya tergantung pada interaksi dengan lingkungannya. Beberapa spesies seperti *Periophthalmodon septemradiatus* ditemukan mampu bertahan hidup pada habitat dengan salinitas rendah dan jauh dari laut, sedangkan *Boleophthalmus boddarti* menyukai habitat di dekat laut dengan salinitas tinggi.

Habitat alami ikan gelodok akan terjaga dengan reboisasi zona intertidal dengan menanam mangrove. Kegiatan ini layak untuk memperbaiki lingkungan pesisir dan memperkaya keanekaragaman hayati laut. Dengan reboisasi hutan mangrove juga melindungi garis pantai dari arus yang kuat dan mendukung akumulasi sedimen dan bahan organik di zona intertidal, sehingga akan meningkatkan kualitas lumpur dan meningkatkan kelangsungan hidup dan pertumbuhan fauna zona intertidal. Upaya mengontrol sampah, air limbah yang tidak diolah, dan polutan langsung ke perairan estuari pasti akan membantu melindungi ikan gelodok. Penegakan hukum dan undang-undang tentang perlindungan lingkungan perairan harus dipertimbangkan untuk melindungi kelestarian biodiversitas fauna di lingkungan estuari. Ancaman utama terhadap habitat ikan gelodok adalah erosi tanah, pertumbuhan makroalga yang tidak terkendali, alih lahan, kemarau yang panjang, aktivitas antropogenik yang merugikan, dan pembuangan limbah.

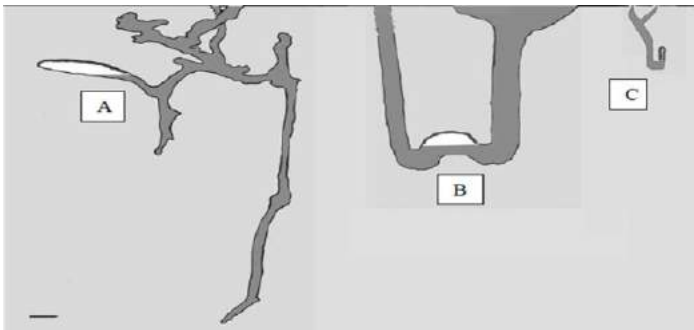
Pada umumnya ikan gelodok lebih menyukai area lumpur yang tebal agar bisa melakukan aktivitas menggali dengan mudah. Sarang yang dibangun oleh *Bolephthalmus boddarti* berbentuk liang dengan bukaan tunggal, sedangkan beberapa spesies ikan gelodok membuat sarang dengan bukaan tunggal dan ganda.

Penelitian struktur sarang *Periophthalmodon schlosseri* dilakukan oleh Hikmah (2017) di perairan estuari sungai Barito. Struktur sarang *Periophthalmodon schlosseri* memiliki gambaran bentuk dan saluran sarang seperti huruf U dengan bagian dasar agak menjorok kedalam apabila hanya terdapat satu saluran tambahan serta pada bagian permukaan sarang memiliki cekungan dan memiliki lubang saluran air pada bagian dinding saluran sarang. Tekstur tanah pada sarang *Periophthalmodon schlosseri* yaitu lempung liat berdebu yang termasuk kedalam kelas tekstur umum yaitu tanah berlempung. Struktur sarang *Periophthalmodon schlosseri* disajikan pada Gambar 3-5.



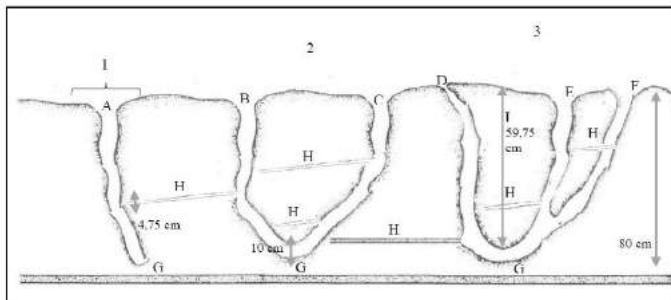


Gambar 3. Berbagai struktur sarang *Periophthalmodon shlosseri*



Gambar 4. Struktur sarang ikan gelodok.

Keterangan: A. Bentuk saluran sarang *Boleophthalmus pectinirostris*; B. Bentuk saluran sarang *Periophthalmodon schlosseri*; C. Bentuk saluran sarang *Periophthalmus modestus* (Ishimatsu & Graham, 2011).

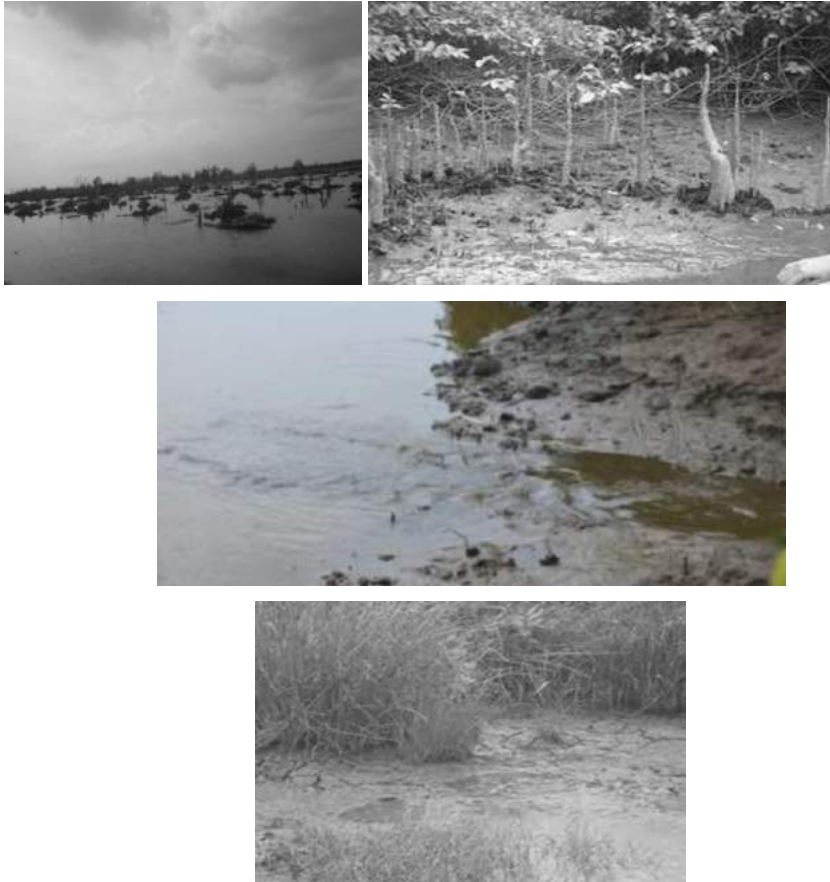


Gambar 5. Sketsa bagian-bagian saluran sarang *P. schlosseri*

Keterangan: 1. Sarang ke-1; 2. Sarang ke-2; 3. Sarang ke-3; A. Lubang sarang utama sarang ke- 1; B. Lubang sarang tambahan sarang ke- 2; C. Lubang sarang utama sarang ke- 2; D. Lubang sarang tambahan sarang ke-3; E. Lubang sarang utama sarang ke- 3; F. Lubang sarang tambahan 2 sarang ke-3; G. Bagian dasar (kedalaman 10 cm); H. Saluran air, diameter lubang 4,75 cm; I. Kedalaman dasar sarang sebelum dasar (59,75 cm) (© Hikmah, 2017)

Penelitian Hidayaturrahmah dan Muhamat (2013) di perairan estuari Sungai Barito dengan luas pengamatan 25 hektar menemukan beberapa tipe habitat *Periophthalmodon schlosseri*, yaitu tipe habitat dengan lahan masih alami dijumpai sebanyak 12 ekor, lahan yang sudah beralih fungsi menjadi tambak sebanyak 25 ekor. Pada tipe habitat dengan sinar matahari sampai lantai hutan mangrove dijumpai 30 ekor dengan lantai terdedah dan 5 ekor pada lantai tidak terdedah. Tipe habitat dengan vegetasi pohon hanya dijumpai sebanyak 3 ekor sedangkan pada vegetasi rumput sebanyak 34 ekor. Sedangkan pada waktu air laut pasang sulit dijumpai. Beberapa pohon mangrove yang dijumpai adalah *Avicenna sp*, *Xylocarpus granatum*, dan *Dolichandrone spathacea*. Beberapa jenis habitat *Periophthalmodon schlosseri* di kawasan estuari sungai Barito terdiri dari habitat yang masih alami dengan lantai penuh dengan akar nafas tumbuhan rawa, habitat yang sudah dialih fungsikan menjadi lahan tambak, dan habitat yang ternaungi vegetasi mangrove (Gambar 6).





Gambar 6. Habitat *Periophthalmodon schlosseri* di estuari sungai Barito

Pola Perilaku Harian

Ikan gelodok suka beraktivitas di lumpur yang partikelnya sangat lengket. Seringkali, mudskipper membentuk koloni dengan kepiting penggali (*Fiddler crabs-Caidae*) (Al-behbehani and Ebrahim, 2010). Ikan ini karnivora, memakan serangga dan kepiting kecil dan Diptera. Ikan dewasa menyukai aktivitas terestrial dan jarang menjelajah ke dalam air. Perilaku kawin dan telur yang dibuahi berada pada sarang yang berbentuk liang (Mai et al., 2019). Ikan gelodok dapat mencapai kepadatan > 4 ekor/m² di habitat intertidal (Polgar, 2012). Perilaku ikan gelodok sangat bergantung dengan kondisi ekosistem lahan basah pesisir dan lumpur pasang surut sehingga perilaku/aktivitasnya mungkin akan mengikuti nasib ekosistem yang rentan terancam terdegradasi akibat ulah antropogenik (Polgar, 2012).

Menurut Kumaraguru et al. (2020) kepadatan populasi ikan gelodok berbanding terbalik dengan laju pertumbuhan seiring dengan berkurangnya ketersediaan pangan akibat penambahan jumlah penduduk dan ancaman antropogenik. *Boleophthalmus pectinirostris* (Blue-spotted Mudskipper) ditemukan memiliki umur terpanjang yaitu tujuh tahun pada ikan jantan dan enam tahun pada ikan betina. Sebuah penelitian kehidupan terestrial *Periophthalmus sobrinus* menunjukkan kemampuan bertahan hidup di luar air selama satu setengah hari. Menariknya, ikan tidak mengalami gangguan pada metabolisme, denyut jantung dan konsentrasi asam laktat dalam darah selama ikan hidup di luar air. Sedangkan *Periophthalmus cantonensis* mampu bertahan selama dua setengah hari di luar air. Ikan gelodok yang kelaparan selama 9,5 hari tidak mempengaruhi ekskresi amonia tetapi mempengaruhi ekskresi urea.

Boleophthalmus dussumieri memiliki lubang keluar dari sarang dan masuk ke sarang yang berbeda untuk jantan dan betina. Ikan gelodok muda mampu menembus jauh ke dalam lumpur saat air pasang. Kadangkala ikan gelodok dewasa tidak membuat tumpukan tanah yang mengelilingi sarang karena konsistensi tanah antara pasir dan tanah liat. Laju pertumbuhan ikan gelodok terganggu karena terpapar polusi pada saat tahap embrio. Aquaporin (protein membran integral) berperan penting untuk menyesuaikan diri dengan gaya hidup terestrial. Pembentukan pori dan pemilihan substrat memiliki kontribusi yang besar untuk adaptasi terhadap gaya hidup amfibi. *Periophthalmodon schlosseri* merupakan spesies yang cocok untuk akuakultur dan banyak dikaji tentang pola perilakunya. *Boleophthalmus boddarti* membangun barikade dari lumpur pada sarangnya untuk membuat jarak teritorial, pembatasan wilayah jelajah dan mengurangi permusuhan dengan ikan gelodok lainnya. Hal ini terjadi jika kepadatan populasi pada wilayah tersebut sangat tinggi. Dataran lumpur sangat penting untuk kelangsungan hidup ikan gelodok tetapi pemanasan global merupakan ancaman serius karena dataran lumpur akan mengering dalam jangka panjang karena suhu tinggi. Musim bertelur *Scartelaos gigas* pada bulan Mei hingga Juli. Tingkat pertumbuhan dan perkembangan ikan gelodok tergantung pada makanan, suhu air, dan keberadaan lumpur.

Beberapa spesies ikan gelodok cenderung lebih nyaman dengan gaya hidup terestrial daripada gaya hidup akuatik. Salah satunya adalah *Periophthalmodon schlosseri*, yang memiliki struktur insang yang sangat mudah beradaptasi untuk menghirup udara, dan menghabiskan lebih sedikit waktu di habitat laut. *Boleophthalmus boddarti* membangun barikade lumpur pada sarangnya untuk

menghindari permusuhan dengan ikan gelodok lainnya dan sebagai sumber bahan makanan. Diatom adalah makanan yang paling disukai oleh ikan gelodok. Ikan gelodok lebih suka makan di sarangnya sebagai upaya untuk mencegah intervensi dari ikan lainnya. *Periophthalmus sobrinus* lebih suka hidup soliter dan jarang hidup dalam kelompok tertutup. Usia maksimum *Pseudapocryptes elongatus* dari Sundarbans, India adalah empat tahun lebih untuk kedua jenis kelamin. Indeks pertumbuhan ikan tersebut (Φ) adalah 4,394 (jantan) dan 4,503 (betina). Ikan ini memiliki sirip ekor yang lebih besar dibanding spesies ikan gelodok lainnya (Mahadevan et al., 2019).

Periophthalmus modestus memiliki perilaku agresif karena pengaruh hormon hipotalamus yaitu arginin-vasotodin (VT). Perilaku mencari makan *Periophthalmus waltoni* tidak dipengaruhi oleh faktor lingkungan karena mampu mencari mangsa di area yang sama dengan habitat mangsanya untuk jangka waktu yang lama. Laju pertumbuhan *Bolephthalmus boddarti* lebih cepat tinggi selama masa remaja, kemudian menurun pada tahun-tahun berikutnya karena energinya untuk pemijahan.

Menurut Takiyama et al. (2016) mekanisme adaptif spesies ikan gelodok untuk bisa beraktivitas dan mencari makan di darat/terrestrial adalah dengan meningkatkan penglihatan udara. *Periophthalmus modestus* mencari makan di lumpur pada saat air surut dengan menangkap *polychaetes* dan *krustasea*. Namun, selama air pasang ikan ini naik dan berdiam diri menempel pada kayu dan tidak aktif mencari makan. Kemampuan sensorik dan motorik *Periophthalmus modestus* beradaptasi dengan baik disesuaikan dengan gaya hidup terrestrial yaitu matanya dilengkapi dengan kornea tebal dan lensa pipih yang berfungsi untuk meningkatkan penglihatan saat beraktivitas di terrestrial. Ciri khas perilaku orientasi *Periophthalmus modestus* adalah membidik sasaran menggunakan daerah retina khusus dengan memutar mata dan mengangkat kepala sebelum melompat untuk menyerang target yang terletak di atas ketinggian matanya. Spesies yang lain yaitu *Periophthalmus argentilineatus* dapat beraktivitas di dataran lumpur saat air surut dan melompat menggunakan sirip dada dan sirip ekor. Ketika keluar/muncul dari air, ikan ini dapat mendeteksi keberadaan obyek dari jarak yang cukup jauh. Perilaku ini merupakan adaptasi mencari makan dan beraktivitas terrestrial dimana daya apung tidak relevan.

Dalam kondisi yang menguntungkan, ikan gelodok muncul selama pasang surut untuk mencari makan, menemukan pasangan, dan mempertahankan wilayah mereka. Beberapa spesies diketahui tetap muncul berjam-jam, atau bahkan berhari-hari menunggu air pasang kembali. Waktu emersi yang lama tersebut didukung oleh berbagai

adaptasi kunci yaitu (i) memperluas permukaan pertukaran respirasi; (ii) modifikasi biokimia serta fisiologis yang unik untuk menghindari toksisitas amonia (Ip and Chew, 2010); (iii) dan resistensi kulit yang signifikan terhadap kehilangan air penguapan. Pada umumnya perilaku ikan gelodok suka keluar masuk sarangnya yang diduga untuk menghindari predator. Namun, di musim panas ikan gelodok dapat mengalami peningkatan suhu tubuh yang membahayakan kelangsungan hidupnya, serta mengalami kekeringan/dehidrasi yang tinggi saat bergerak dari air ke udara. Meski begitu, studi lapangan telah melaporkan *Periophthalmus* dan *Boleophthalmus* mampu bertahan dan aktif pada suhu udara antara 38 °C - 40°C, yaitu suhu ekstrim yang bisa mematikan ikan pada umumnya. Kebanyakan ikan gelodok menghindari suhu rendah yang paling ekstrim dengan berdiam diri di sarangnya di mana suhu mungkin beberapa derajat lebih hangat daripada udara. Ikan ini akan muncul lagi ke udara setelah suhu udara naik. Beberapa spesies ikan gelodok telah diamati menghabiskan musim dingin di sarang mereka. Paparan suhu udara 1°C jarang mematikan ikan gelodok. Namun, pengecualian pada *Boleophthalmus pectinirostris* yang mampu bertahan di habitat lumpur pada suhu 0,8 °C. Rentang suhu untuk aktivitas perilaku dan kelangsungan hidup mudskipper adalah antara 11,4 °C - 37,0 °C. Ikan gelodok adalah ikan mirip amfibi yang khas dan memiliki berbagai strategi untuk mengurangi toksisitas amonia selama terpapar amonia lingkungan. Ikan gelodok bersifat euryhaline yaitu organisme yang dapat menahan perubahan salinitas secara cepat dan drastis. Spesies ini toleran terhadap perubahan salinitas dan suhu yang sangat luas. Ikan gelodok yang beraktivitas terestrial akan mengalami perubahan fisiologi mendadak pada sejumlah kondisi lingkungan, termasuk perubahan salinitas (Chen, et al., 2015; Sutton et al., 2018; Soltanian and Fereidouni, 2019).

Perilaku harian *Periophthalmodon schlosseri* diamati dengan metode pengamatan secara langsung oleh Seisaria (2017) di perairan estuari sungai Barito. Pengamatan dilakukan pada pukul 6.30 hingga pukul 18.00. Perilaku harian yang teramati sebagai berikut:

Perilaku Berinteraksi

Berdasarkan pengamatan, ikan gelodok berinteraksi bersama sesamanya dengan cara saling mengedipkan mata, menggerakkan sirip, dan saling berkejaran keluar masuk sarang. Perilaku berinteraksi dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Ikan gelodok berinteraksi

Perilaku Berjemur dan Melembabkan Badan

Saat matahari mulai terik atau sekitar pukul 10 sampai menjelang pukul 12 beberapa ikan gelodok terlihat berjemur disekitar sarang sambil sesekali melembabkan tubuhnya dengan cara membalikkan tubuhnya ke lumpur dan sesekali keluar masuk sarang. Perilaku ini dapat dilihat pada gambar 8, 9 dan 10.



Gambar 8. Ikan gelodok berjemur di sekitar sarangnya



Gambar 9. Ikan gelodok sedang membalikkan badannya ke lumpur



Gambar 10. Ikan gelodok sedang masuk ke dalam sarangnya

Perilaku Makan

Perilaku makan berhasil teramati saat menjelang sore hari. Ikan gelodok terlihat memangsa seekor kepiting dipinggir sungai kecil. Bahkan dilain waktu terlihat ikan gelodok meloncat untuk menangkap kepiting kecil yang juga berada di pinggir sungai. Beberapa ikan gelodok yang berada di sekitar pinggir sungai terlihat memakan sesuatu dari lumpur. Perilaku ini dapat dilihat pada gambar 11-14.



Gambar 11. Ikan gelodok sedang mengintai kepiting



Gambar 12. Ikan gelodok sedang menelan kepiting



Gambar 13. Ikan gelodok membawa keping ke dalam sarang



Gambar 14. Ikan gelodok menangkap keping dengan meloncat

Perilaku Menjelajah

Beberapa ikan gelodok berhasil teramati sedang menjelajah lingkungan sekitar dengan cara berenang dan berjalan di daratan dengan menggunakan sirip dada. Perilaku ini dapat dilihat pada gambar 15-16.



Gambar 15. Ikan gelodok menjelajah di lumpur dengan sirip dada



Gambar 16. Ikan gelodok berenang dengan menonjolkan kepalanya

Respirasi dan Kinematika Gerak

Respirasi ikan gelodok melalui kulit, lapisan mukosa mulut dan faring, serta insang. Kulit selalu basah untuk mengambil oksigen dengan difusi. Ruang insang diperbesar untuk mempertahankan kantong udara. Kantong udara berfungsi memasok oksigen untuk bernafas saat berada di darat dan saat di dalam sarang pada kondisi hipoksia.

Respirasi pada dua genus terestrial, *Periophthalmodon* dan *Periophthalmus*, telah diteliti. Dua genus ikan ini menghabiskan sebagian besar waktunya di luar air. Modifikasi pada struktur insang dan hipervaskularisasi jaringan epitel memfasilitasi pernafasan udara saat ikan berada di luar air. Ikan-ikan ini menggunakan udara secara langsung melalui kulit (respirasi kulit) dan dikenal sebagai ikan yang bernapas dengan udara (Looi et al., 2016). Pada lapisan epidermis kulitnya mempunyai banyak pembuluh kapiler yang memiliki struktur khas. Ikan gelodok membangun sarangnya pada zona litoral dan sebagian besar aktivitasnya berada di lumpur yang tidak ada oksigen. Saat air pasang, sarang tertutup oleh air dan ikan tetap berada di dalam sarang hingga 10 jam. Oleh karena itu ikan gelodok membangun fase udara di sarangnya, dengan berperilaku melakukan pengendapan udara. Perilaku pengendapan udara adalah pengambilan oksigen secara cepat dan berulang-ulang dari permukaan sarang oleh ruang bukal (bagian dari organ pernapasan), mengangkutnya ke dalam liang, melepaskannya, dan dengan cepat kembali ke permukaan dengan ruang bukal yang kempes. Namun, ikan gelodok masih sangat tergantung pada air sebagai sumber oksigen pada saat bereproduksi dan untuk kehidupan larva ikan. Respirasi yang dilakukan adalah dengan berguling-guling di lumpur yang basah, membenamkan diri di lubang kecil yang berisi air atau sering berpindah dari lumpur basah ke sarang yang dibangun. Selain berfungsi sebagai tempat respirasi, sarang juga digunakan sebagai tempat berlindung dari predator dan untuk bertelur. Kadar oksigen dalam fase udara pada sarang penting

untuk respirasi udara di dalam sarang. Kulit ikan gelodok dengan lendir kulitnya merupakan organ penting untuk respirasi dan sistem pertahanan non spesifik.

Ikan gelodok mempunyai toleransi terhadap amonia dengan mekanisme ekskresi ammonia melalui insang dan detoksifikasi ammonia melalui katabolisme asam amino ketika di darat. Ikan ini merupakan organisme euryhaline yaitu mempunyai kemampuan bertahan pada perubahan salinitas yang cepat dan drastis (You et al., 2018; Soltanian and Fereidouni, 2019). Osmoregulasi di perairan hypersalin dilakukan dengan akumulasi asam amino bebas dan ammonia di otot dan melalui aktivitas insang yang cepat. Evapotranspirasi pada ikan gelodok melalui kulit saat kondisi hiposmotik. Pada saat berada pada lingkungan yang panas dan lembab ikan gelodok bernafas dengan kulit. Termoregulasi dilakukan dengan menggali lubang yang dalam untuk menjaga suhu tubuh. Ikan gelodok tumbuh optimal pada suhu tubuh 14-35°C dan suhu udara 10-42°C (Chen et al., 2015).

Ikan ini senang melompat-lompat ke daratan, terutama di daerah berlumpur atau berair dangkal di sekitar hutan bakau di lingkungan estuari ketika air surut. Bentuk wajah ikan ini sangat khas, kedua matanya menonjol di atas kepala seperti mata katak, dan mempunyai sirip punggung yang terkembang menawan. Badannya bulat panjang seperti torpedo, sementara sirip ekornya membulat. Panjang tubuh bervariasi mulai dari beberapa sentimeter hingga mendekati 30 cm. Dengan mengukur cincin pertumbuhan tulang radial dada kedua, dapat memperkirakan usia dan pertumbuhan ikan gelodok (Nanami and Takegaki, 2005). Keahlian ikan ini antara lain menghabiskan 90% waktunya untuk tinggal di daratan, dapat memanjat akar-akar pohon bakau, mampu melompat jauh, dan mahir berjalan di atas lumpur. Keahlian tersebut didukung oleh adanya sirip dada yang berevolusi menjadi seperti kaki yang kuat, dan bisa digunakan untuk berjalan di lumpur. Pangkal sirip dadanya berotot kuat sehingga sirip ini dapat ditebuk dan berfungsi sebagai lengan untuk merayap, merangkak, dan melompat (Wicaksono et al., 2016). Menurut Wicaksono et al. (2020) *Periophthalmus variabilis* memiliki keunikan bisa memanjat pohon, bisa melompat di air, melintasi permukaan air dengan melompat-lompat, dan mampu mengubah arah saat berada pada permukaan air. Pergerakan terestrial ikan gelodok memiliki karakteristik yaitu gerakan bergelombang yang berkelanjutan, sedangkan pada saat berada di permukaan air memiliki gerakan lompatan sementara seperti balistik yang khas. Pergerakan terestrial dipengaruhi oleh ukuran ikan. Pada ikan berukuran sedang melakukan

lebih banyak lompatan ke arah air, dan lebih sedikit lompatan menjauh dari air, daripada spesies sejenisnya yang lebih kecil atau lebih besar (Magellan, 2016). Perlu kajian lebih lanjut tentang faktor-faktor lingkungan lainnya terhadap pergerakan ikan gelodok di terestrial. Kemampuan bertahan di daratan ini didukung oleh kemampuannya bernafas melalui kulit tubuhnya dan lapisan selaput lendir di mulut serta kerongkongannya (Ansari et al., 2014; Zacccone et al., 2017).

Periophthalmodon schlosseri bisa memanjat dan melompat keluar dari air, bisa membalikkan tubuhnya untuk melontarkan dirinya 60 cm ke udara. Sirip dada berotot tebal bergerak ke bawah tubuh mirip seperti kaki, sehingga kuat untuk berjalan dan berayun saat berada di daerah pasang surut. Sirip perut dan sirip ekor untuk penyeimbang.

Ekologi Makan

Periophthalmodon schlosseri dalam memangsa kepiting dapat dilakukan dengan mudah karena mampu bergerak cepat di atas lumpur, dan memiliki kemampuan untuk menggali lumpur atau lubang untuk menangkap kepiting yang telah ditargetkan. Ikan gelodok tergolong ikan karnivora yang memakan kepiting (*Uca sp.*), medaka (*Oryzias sp.*), ikan kecil, cacing dan insekta. *Periophthalmodon schlosseri* memakan kepiting dan ikan kecil.

Mahardika (2017) meneliti ekologi makan *Periophthalmodon schlosseri* di Tanipah yang merupakan wilayah lahan basah pesisir di Muara Sungai Barito. Perilaku makan dimulai dengan tahapan memilih kepiting, mengintai kepiting, menyergap kepiting, mengunyah kepiting dan menelan kepiting. Berbeda dengan *Periophthalmus sobrimis* yang mencari makan pada saat siang hari maupun malam hari, *Periophthalmodon schlosseri* mencari mangsa pada jam 6 dan 9 pagi serta jam 10 siang pada saat air surut. Lokasi *Periophthalmodon schlosseri* mencari mangsa selama pengamatan di lapangan yaitu di depan pintu air dari empang warga (air mengalir) dan di pinggir sungai. Hal ini berdasarkan data di lapangan di depan pintu air dari empang warga dan di pinggir sungai pada saat air surut terdapat daerah yang landai sehingga memudahkan *Periophthalmodon schlosseri* berburu mangsa baik itu dalam hal mengintai dan menyergap kepiting yang berada di atas lumpur maupun di sisi tebing pinggiran sungai.

Ukuran panjang saluran pencernaan *Periophthalmodon schlosseri* adalah 12 cm. *Periophthalmodon schlosseri* memiliki esofagus berbentuk pipa dengan panjang rata-rata $2,16 \pm 0,23$ cm. Lambung berbentuk kantung sedehana yang besar dengan panjang rata-rata $2,68 \pm 0,33$ cm.

Usus berwarna kuning keputihan dengan panjang rata-rata $6,6 \pm 0,38$ cm. Berdasarkan hasil pengamatan terhadap saluran pencernaan pada bagian usus ditemukan potongan tubuh kepiting dengan panjang 5,7 cm. Usus *Periophthalmodon schlosseri* memiliki panjang rata-rata 6,6 cm sehingga mampu menampung potongan tubuh kepiting dengan panjang 5,7 cm.

Periophthalmodon schlosseri menyergap kepiting yang berada di sisi tebing pinggir sungai dengan cara melompat menggunakan kekuatan dorongan dari ekor. Ikan ini dapat menggigit, memotong dan mencabik-cabik tubuh kepiting menggunakan gigi runcing. *Periophthalmodon schlosseri* dapat menyembulkan ujung mulutnya untuk mengambil dan memasukkan potongan-potongan kepiting ke dalam mulut. Berdasarkan analisis isi saluran pencernaan, *Periophthalmodon schlosseri* termasuk karnivora karena memakan kepiting, ikan, insekta dan laba-laba. *Periophthalmodon schlosseri* betina menyukai ikan berukuran kecil seperti *Oryzias sp.*, sedangkan ikan jantan menyukai kepiting biola.

Pseudapocryptes dentatus merupakan spesies ikan gelodok yang mempunyai pola makan herbivora. Ikan ini memakan diatom (*Bacillariophyceae*), ganggang hijau dan ganggang biru-hijau. *Periophthalmus* memakan tumbuhan dan hewan terutama diatom, kepiting, sisik ikan, serangga, nematoda, polychaetes, telur ikan, alga, dan detritus yang telah tercampur dengan partikel lumpur dan pasir.

Profil Darah *Periophthalmodon schlosseri*

Darah merupakan salah satu komponen cairan yang sangat berperan dalam fisiologi, metabolisme, aktifitas tubuh dan daya tahan tubuh. Darah pada semua vertebrata mengandung plasma, eritrosit, beberapa jenis leukosit dan trombosit atau keping darah. Karakter sel darah mempunyai peranan penting dalam proses kehidupan agar nutrisi dan oksigen tersedia terus menerus dalam proses metabolisme diseluruh jaringan yang membutuhkan. Darah membawa substansi dari tempatnya dibentuk ke semua bagian tubuh dan menjaga tubuh agar dapat melakukan fungsinya dengan baik. Selain itu, darah juga membawa hormon serta membawa sisa hasil metabolisme dan bahan patogen.

Periophthalmodon schlosseri merupakan spesies ikan yang dapat hidup seperti amfibi dan mampu bertahan dalam kondisi hipoksia. Habitat ikan ini di wilayah berlumpur dengan sarang yang tergenang air pada tepian sungai. Penelitian Yudistira (2011) menunjukkan bahwa *Periophthalmodon schlosseri* memiliki modifikasi pada saluran pernapasan yang berbeda dengan ikan pada umumnya yaitu pada

bagian sel penyusun insang terdapat saluran pembuluh darah utama sebagai media transportasi darah dari dan menuju lamela sekunder untuk pertukaran gas. Modifikasi ini mempengaruhi karakteristik sel darah sebagai pengangkut oksigen di peredaran darah.

Profil darah sangat berperan dalam fisiologi metabolisme dan aktifitas tubuh hewan. Darah merupakan cairan tubuh yang mengalir ke dalam jantung melalui pembuluh darah. Darah merupakan alat pengangkut bermacam-macam substansi yaitu oksigen dan karbon dioksida, nutrisi, substansi yang berperan dalam ekskresi, hormon, selain itu mengatur keseimbangan cairan, mengatur keseimbangan asam-basa pH darah, mencegah pendarahan, alat pertahanan tubuh dan mengatur suhu tubuh.

Hasil penelitian Santoso et al. (2018) menunjukkan profil darah ikan gelodok (*Periophthalmodon schlosseri*) dari Estuari Sungai Barito mempunyai jumlah eritrosit sebanyak $3,36 \pm 0,1 \times 10^6$ sel/ μ L; kadar hemoglobin $12,38 \pm 0,56$ gr%; nilai hematokrit $41,53 \pm 0,60$ %; nilai MCV $123,78 \pm 3,94$ μ m³; nilai MCH $36,88 \pm 1,82$ pg/sel; nilai MCHC $29,80 \pm 1,18$ g/dL dan jumlah leukosit sebesar $222,62 \pm 5,09 \times 10^3$ sel/ μ L. Profil darah ikan *Periophthalmodon schlosseri* merupakan hasil adaptasi dari lingkungan dan cara hidupnya yang *air-breathing*.

Profil darah *Periophthalmodon schlosseri* dari Muara Sungai Barito merupakan hasil adaptasi dari lingkungan yang memiliki salinitas air payau, suhu perairan yang lebih dari ambang batas suhu biota budidaya, kadar pH normal muara sungai, kadar oksigen terlarut dalam air yang rendah (hipoksia) dan juga cara hidupnya yang seperti amfibi.

Hubungan profil darah *Periophthalmodon schlosseri* dengan kualitas lingkungan perairan

Eritrosit

Rerata jumlah eritrosit *Periophthalmodon schlosseri* pada penelitian ini adalah $3,36 \pm 0,1 \times 10^6$ sel/ μ L. Nilai ini masih berada dalam kisaran jumlah eritrosit pada ikan secara umum yaitu mencapai 4×10^6 sel/mm³. Perbedaan parameter hematologi pada ikan mencerminkan kondisi ekologi pada habitatnya dan sebagai adaptasi fisiologi pada cara hidup mereka. Jumlah eritrosit berbeda-beda sesuai dengan adaptasi kondisi lingkungan yang bervariasi. Jumlah eritrosit dipengaruhi oleh kondisi stress, kondisi lingkungan, dan kebutuhan oksigen. Peningkatan kadar salinitas air diikuti dengan adanya peningkatan yang signifikan pada jumlah eritrosit. Adanya produksi eritrosit dapat terjadi karena adanya degenerasi yang intensif dari

eritrosit tua yang tidak dapat beradaptasi terhadap perubahan konsentrasi ion di dalam tubuh ikan ketika berada dalam lingkungan dengan kadar salinitas yang tinggi.

Suhu yang tinggi dapat meningkatkan jumlah eritrosit. Hasil pengujian sampel air lingkungan tempat hidup *Periophthalmodon schlosseri* memiliki suhu berkisar antara 29 - 34°C yang melebihi ambang batas dari suhu normal pada biota budidaya. Tingginya suhu lingkungan yang diiringi dengan peningkatan jumlah eritrosit kemungkinan disebabkan dengan tingginya evaporasi oksigen dari air, sehingga meningkatnya eritrosit mengimbangi kekurangan oksigen.

Kadar oksigen yang rendah atau hipoksia pada lingkungan air tempat hidup *Periophthalmodon schlosseri* juga diduga memiliki pengaruh terhadap jumlah eritrosit. Keadaan hipoksia atau kurangnya kadar oksigen menyebabkan oksigen tidak dapat ditranspor dengan baik ke jaringan. Jumlah eritrosit yang cenderung tinggi menjadi pendukung dalam penyerapan oksigen yang lebih banyak untuk memenuhi kebutuhan oksigen jaringan dalam rangka mempertahankan hidupnya.

Kadar Hemoglobin

Kadar hemoglobin *Periophthalmodon schlosseri* dalam penelitian ini adalah $12,38 \pm 0,56$ gr%. Kadar hemoglobin dipengaruhi oleh jumlah eritrosit, semakin tinggi jumlah eritrosit dalam darah maka semakin tinggi pula kadar hemoglobin. Kadar hemoglobin pada ikan akuatik umumnya 5 - 10g%. Kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) yang rendah menstimulasi pembentukan sel-sel darah merah baru ke dalam darah dan menyebabkan peningkatan pada kadar hemoglobin, selain itu juga terjadi peningkatan pada jumlah eritrosit dan nilai hematokrit.

Hematokrit

Rataan nilai hematokrit darah *Periophthalmodon schlosseri* pada penelitian ini sebesar $41,53 \pm 0,60$ %. Nilai hematokrit menunjukkan perbandingan sel darah merah terhadap plasma. Nilai hematokrit pada *Periophthalmodon schlosseri* diduga meningkatkan potensi darah untuk membawa oksigen dan meningkatkan aktifitas aerobik pada tingkat sel.

MCV (Mean Corpuscular Volume)

Rataan MCV darah *Periophthalmodon schlosseri* sebesar $123,78 \pm 3,94$ μm^3 sedangkan MCV ikan akuatik pada umumnya yaitu berkisar antara 150 - 350 μm^3 . Hasil dari penelitian ini didapatkan MCV dari darah *Periophthalmodon schlosseri* berada di bawah kisaran MCV ikan akuatik pada umumnya,

MCV merupakan volume rata-rata eritrosit yang dipengaruhi oleh jumlah eritrosit dan nilai hematokrit. MCV akan tinggi apabila nilai hematokrit besar dengan jumlah eritrosit yang lebih sedikit. MCV akan rendah apabila nilai hematokrit kecil dengan jumlah eritrosit yang lebih banyak atau jika nilai hematokrit dan eritrosit yang sama-sama besar. Ikan dengan kebutuhan oksigen yang tinggi cenderung memiliki ukuran eritrosit yang kecil dengan MCV yang rendah dan jumlah eritrosit yang tinggi. Peningkatan salinitas air juga dapat menyebabkan penurunan volume eritrosit bersama dengan peningkatan terhadap produksi eritrosit.

Rendahnya nilai MCV dari *Periophthalmodon schlosseri* mengindikasikan kemungkinan ukuran dari eritrosit *Periophthalmodon schlosseri* yang merupakan ikan *air-breather* atau memiliki kemampuan bernafas di daratan, memiliki ukuran yang lebih kecil dari ukuran standar eritrosit ikan pada umumnya. Mengenai ukuran eritrosit dari *Periophthalmodon schlosseri* ini disarankan untuk diteliti lebih lanjut.

MCH (Mean Cell Hemoglobin)

MCH dipengaruhi oleh kadar hemoglobin dan jumlah eritrosit yang beredar dalam darah. MCH menyatakan banyaknya hemoglobin dalam satu sel eritrosit. Eritrosit dengan kadar hemoglobin yang tinggi akan memiliki nilai MCH yang tinggi pula. MCH dari darah *Periophthalmodon schlosseri* yang didapat dari penelitian ini adalah $36,88 \pm 1,82$ pg/sel. MCH dari *Periophthalmodon schlosseri* berada dalam kisaran rata-rata MCH ikan pada umumnya yaitu 30 -100 pg/sel.

MCHC (Mean Cell Hemoglobin Concentration)

MCHC menyatakan perbandingan konsentrasi hemoglobin dengan volume eritrosit dalam seluruh darah. MCHC *Periophthalmodon schlosseri* hasil penelitian ini adalah $29,80 \pm 1,18$ g/dL

Nilai MCH dan MCHC lebih tinggi pada ikan yang aktif daripada ikan yang kurang aktif. Nilai dari MCH dan MCHC dapat digunakan dalam pemeriksaan kesehatan. MCH dan MCHC yang lebih rendah dari nilai normal disebut dengan anemia hipokromik, MCH dan MCHC yang lebih tinggi dari nilai normal disebut dengan anemia hiperkromik.

Leukosit

Rataan jumlah leukosit pada *Periophthalmodon schlosseri* pada penelitian ini sebesar $222,62 \pm 5,09 \times 10^3$ sel/ μ L, sedangkan jumlah leukosit pada ikan umumnya berkisar antara 30.000 hingga 150.000 sel/ μ L. Hal ini dapat dikatakan bahwa jumlah leukosit dari

Periophthalmodon schlosseri lebih tinggi dari kisaran jumlah leukosit ikan pada umumnya.

Kenaikan salinitas dapat menyebabkan peningkatan patogen dari lingkungan untuk menghasilkan lingkungan osmotik yang lebih menguntungkan bagi patogen. Selain itu, lingkungan yang hipoksia menyebabkan ikan meningkatkan frekuensi naik ke permukaan dan melakukan pernafasan di udara (*air-breathing*). Perilaku *air-breathing* ini mengakibatkan infeksi dan menstimulasi respon kekebalan.

Leukosit memiliki peran penting dalam melawan infeksi dari mikroorganisme patogen melalui fagositosis bersama dengan makrofag. Hasil penelitian menunjukkan persentase limfosit pada ikan gelodok $62 + 4,1\%$ dan monosit $24,7 + 0,8\%$, serta neutrofil $0,5 + 0,1\%$ dan eosinofil $0,6 + 0,1\%$ dan tidak ditemukan basofil. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai limfosit mempunyai nilai yang paling tinggi dan lebih dominan dari sel leukosit lainnya.

Parasit yang menginfeksi *Periophthalmodon schlosseri*

Parasit merupakan organisme yang hidupnya merugikan inangnya. Parasit monogenea dan digenea merupakan parasit yang paling banyak menyerang pada ikan. Parasit monogenea pada umumnya merupakan ektoparasit dan digenea sebagai endoparasit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada ikan gelodok (*Periophthalmodon schlosseri*) ditemukan parasit digenea namun parasit monogenea tidak ditemukan. Parasit digenea yang ditemukan adalah dari genus *Opecoeloides* dan family Buchepalidae, kista metaserkaria dan parasit dari filum nematoda. Parasit monogenea tidak ditemukan dikarenakan kepadatan ikan yang rendah, perilaku ikan yang jarang berada di air, dan nutrisi yang tercukupi yang merupakan kebalikan dari faktor pendukung pertumbuhan monogenea. Infeksi parasit terjadi karena ikan memakan beberapa inang perantara digenea seperti siput dan ikan lain, selain itu kondisi perairan yang telah tercemar telur digenea memungkinkan siklus hidup digenea terus berlanjut pada ikan gelodok.

Parasit digenea genus *Opecoeloides* yang menginfeksi ikan gelodok di estuari sungai Barito merupakan cacing dewasa yang berasal dari usus dan lambung ikan (Hidayaturrahmah et al., 2019). *Opecoeloides* memiliki tubuh yang memanjang. Mulut disebut dengan *oral sucker* sangat dekat dengan anterior berbentuk lonjong dan dapat berbentuk seperti lingkaran jika membuka sempurna mulut dilengkapi dengan faring yang bentuknya mirip pengisap oral tetapi lebih lonjong, memiliki penghisap ventral (*ventral sucker*) yang besar berbentuk lingkaran dan berada dekat dengan posterior tubuh. Pengisap ventral

merupakan bagian tubuh yang paling besar dan terlihat dengan jelas, jika dilihat dari samping pengisap ventral lebih menonjol ke depan (*pedunculate*). Bagian posterior tubuh 2 kali panjang anterior. Bagian anterior memiliki bentuk membulat, sedangkan bagian posterior meruncing hingga ke bagian ujung. Panjang cacing ini 0,76 mm dengan lebar tubuh 0,21 mm. Morfologi cacing *Opecoeloides* seperti pada gambar 17.

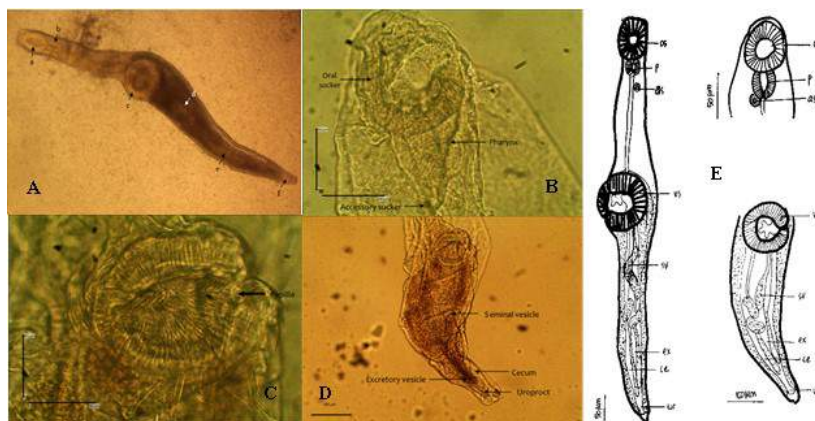


Figure 2. *Opecoeloides*; a. Oral sucker, b. Pharynx, c. Ventral Sucker/Acetabulum, d. Seminal Vesicle, e. Excretory vesicle, f. Uroproct (A), Anterior of *Opecoeloides* (B), Ventral sucker (C), Posterior of *Opecoeloides* (D), Morphology of *Opecoeloides*: Os (*oral sucker*); P (*Pharynx*); As (*Accessory sucker*); Vs (*Ventral sucker*); Sv (*Seminal vesicle*); Ex (*Excretory vesicle*); Ce (*Cecum*); Ur (*Uroproct*) (E)

Gambar 17. Morfologi cacing *Opecoeloides*

Sedangkan cacing famili Bucephalidae yang ditemukan pada ikan gelodok merupakan cacing dewasa yang ditemukan di usus dan lambung ikan. Bentuk tubuh memanjang atau elongate. Mulut terisolasi dan berada jauh dari anterior. pencernaan sederhana, pengisap ventral tidak ada. Famili Bucephalidae memiliki tubuh yang memanjang. Bucephalidae memiliki organ anterior yang hadir dalam bentuk penghisap atau *rynchus*. Mulut Bucephalidae terpisah jauh dari organ anterior. *Excretory vesicle* berbentuk tubular (pembuluh). Panjang tubuh cacing 0,69 mm, lebar 0,2 mm.

Morfologi Bucephalidae dapat dilihat pada gambar 18.

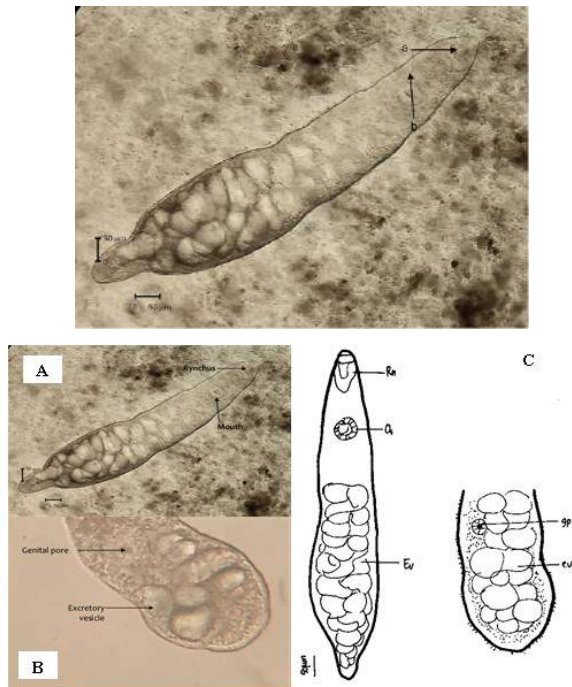
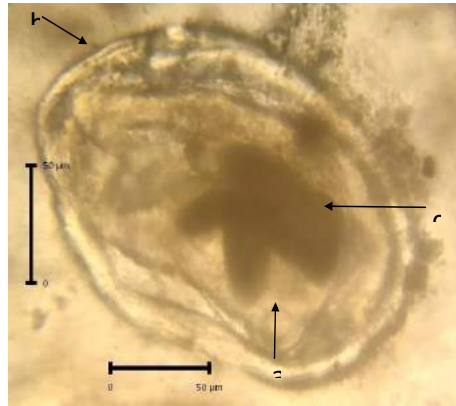


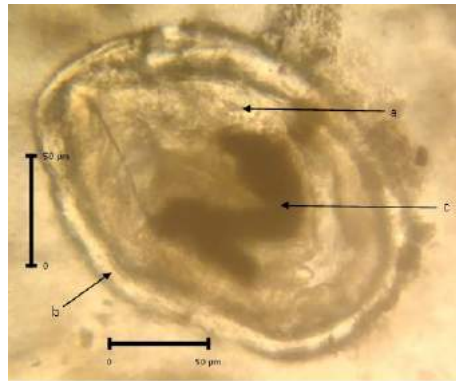
Figure 3. Bucephalidae (A), Posterior of Bucephalidae (B), Morphology of Bucephalidae: Rn(Rhynchus); Os(Oral sucker); Ev(Excretory vesicle); Gp(Genital pore) (C)

Gambar 18. Morfologi Bucephalidae

Metaserkaria yang ditemukan pada ikan gelodok di muara sungai Barito seperti kapsul dengan kista yang masih membungkus. Metaserkaria ditemukan pada insang, sisik, dan sirip ikan dengan ukuran 0,20-0,28 mm. metaserkaria dibungkus oleh dinding kista yang tebal, terdapat bagian tubuh dengan warna coklat yang lebih tebal, terlihat pengisap oral dan pengisap ventral, dimana *eyespot* tidak terlihat, dinding kista menjadi lebih tebal dan pengisap oral dan ventral menebal. Pigmen coklat masih tersebar dalam kelompok di bagian tubuh dan organ ekskretori, menjadi lebih gelap dan cacing lebih aktif. Metaserkaria yang ditemuka pada sirip memiliki dinding kista yang tipis dan *eyespot* yang jelas, metaserkaria dengan ciri ini memasuki usia 7 hari. Metaserkaria yang ditemukan pada insang terlihat kelompok pigmen coklat di sisi lateral tubuh, dengan kista lebih tebal dan pengisap bisa terlihat dengan jelas, metaserkaria dengan ciri ini memasuki usia 14 hari. Morfologi metaserkaria dapat dilihat pada gambar 19-20 dibawah ini.



Gambar 19. Kista Metaserkaria: a. ventral sucker; b. dinding Kista; c. organ ekskretori (400x)



Gambar 20. Kista Metaserkaria
a. oral sucker; b. dinding kista; c. organ ekskretori (400x)

Profil Protein *Periophthalmodon schlosseri*

Ikan gelodok (*Periophthalmodon schlosseri*, Pallas 1770) merupakan salah satu fauna penting yang berpotensi sebagai bioindikator pencemaran logam berat dalam kajian ekotoksikologi perairan estuari. Ikan ini rentan terhadap perubahan lingkungan akibat polutan logam berat, sehingga berpengaruh terhadap mekanisme fisiologisnya termasuk sintesis dan ekspresi protein. Oleh karena itu penting untuk mengidentifikasi profil protein otot ikan gelodok dan mengkaji potensi aplikasinya sebagai biomarker pencemaran logam berat di estuari sungai Barito. Protein total diisolasi dari otot ikan menggunakan buffer Tris EDTA kemudian diendapkan menggunakan garam amonium sulfat. Konsentrasi protein diukur dengan Bradford assay dan kemudian dipisahkan berdasarkan berat molekulnya

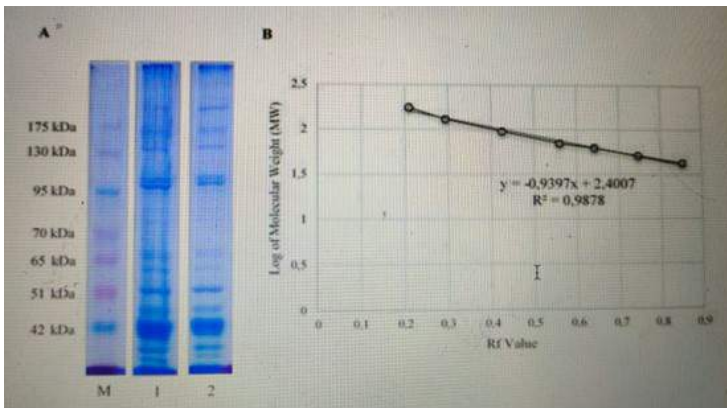
menggunakan metode *SDS-PAGE*. Hasil penelitian menunjukkan protein otot ikan gelodok dapat diendapkan pada kondisi optimum pada saturasi amonium sulfat 60-70% dengan konsentrasi protein 5.106 mg.mL⁻¹. Protein dipisahkan menjadi 20 pita untuk protein mentah dan protein endapan yang berat molekulnya berkisar antara 33 sampai 184 kDa. Studi lebih lanjut diperlukan untuk identifikasi protein berdasarkan urutan asam amino pita protein untuk penemuan dan validasi biomarker (Hidayaturrahmah et al., 2019).

Protein adalah komponen utama dalam otot. Otot ikan terdiri dari 18-23% protein atau terkadang lebih tergantung pada spesies dan waktu pemanenan. Protein ikan terdiri dari 20-30% protein sarcoplasmic, 66-77% protein myofibrillar dan 2-3% protein tidak larut jaringan ikat. Berdasarkan berat molekulnya, protein otot ikan lele dihipotesiskan sebagai tropomiosin, aktin dan protein C-. Otot ikan yang mengandung myosin light chain (15-25 kDa), troponin (30 kDa), tropomyosin (35 kDa), actin (42 kDa), gelsolin (90 kDa) and C-protein (140 kDa) yang penting untuk kontraksi otot. Protein lain yang dilaporkan pada otot adalah myofibril, aktinin, M-protein, protein filamen, protease dan kolagen. Protein otot memiliki peran penting dalam metabolisme ikan, terutama sebagai protein struktural, enzim, protein ribosom, protein transpor, protein pengikat DNA-RNA, faktor transkripsi, faktor translasi, pengikatan ion kalsium dan transduksi sinyal.

Pengembangan biomarker protein terbagi menjadi dua tahap yaitu tahap penemuan dan validasi. Tahapan penemuan biomarker meliputi tiga langkah: (i) identifikasi calon protein biomarker (identifikasi berdasarkan spektrometri massa, studi proteomik dan transkriptomik), (ii) pengembangan uji relatif (mengembangkan uji kuantifikasi relatif untuk protein yang diidentifikasi sebelumnya) dan (iii) pengujian biomarker (terapkan uji kuantifikasi relatif ke sampel yang mewakili normal dan terpapar dengan kelompok logam berat). Tahap validasi meliputi dua langkah; (i) pengembangan uji kuantitatif absolut (uji perbaikan menggunakan data sebelumnya dari pengujian biomarker dari ketinggian tahap penemuan biomarker ke kuantifikasi absolut berdasarkan metode yang mudah, andal, dan dapat direproduksi) dan (ii) pengujian biomarker (kuantifikasi relatif atau absolut protein target di ratusan sampel). Setelah biomarker divalidasi, dapat digunakan di lapangan untuk penilaian dan pemantauan kontaminasi logam berat. Namun biomarker protein juga dapat dikembangkan berdasarkan protein yang telah dilaporkan sebelumnya dalam literatur. Metode ini secara otomatis menghemat waktu dan

biaya untuk pengembangan biomarker, terutama untuk identifikasi protein menggunakan spektrometri massa.

Kesimpulannya, protein ikan gelodok berpotensi sebagai biomarker pencemaran logam berat di estuari sungai Barito karena ikan ini dapat menumpuk logam berat dalam jaringannya. Studi pendahuluan untuk pengembangan biomarker protein untuk pemantauan kontaminasi logam berat telah dilakukan, menghasilkan data profil protein otot ikan gelodok dan berhasil memisahkan 20 pita protein dengan berat molekul mulai dari 32 hingga 185 kDa (Gambar 21). Selain itu, diperlukan beberapa studi untuk penemuan dan validasi biomarker sebelum diterapkan di lapangan.



Gambar 21. Pola protein *P.schlosseri* (A). Profil protein (B).

Kesesuaian regresi linier antara log berat molekul dan nilai Rf protein ladder. Catatan: Tangga Protein M. (Tangga Protein Cromatein Prestained, Vivatis); 1. Profil protein yang tidak diendapkan, 2. Profil protein yang diendapkan dari *Periophthalmodon schlosseri*

Reproduksi

Ikan gelodok bersifat monomorfik yaitu jantan dan betina secara morfologi serupa. Pada saat musim kawin, jantan akan menarik betina. Ikan jantan selama proses reproduksi berperan menggali lumpur untuk membuat sarang, membuahi, memasok oksigen untuk perkembangan telur, merawat dan menjaga telur. Induknya menyimpan udara di ruang bertelur pada sarang untuk memelihara telur dan penetasan. Telur tersimpan di saluran-saluran dalam sarang. Spesies *Periophthalmodon septemradiatus* bertelur sepanjang tahun.

Dari ribuan telur, hanya beberapa larva yang mampu bertahan hidup dari serangan predator (kepiting). Larva selama 30-50 hari sebagai pelagis menetap di zone intertidal. Usia ikan gelodok bisa

mencapai 5 tahun. Larva berenang mengapung bersama sama dengan plankton, ikan kecil bersembunyi di lumpur yang lunak sampai dewasa, dan jika sudah dewasa akan membangun wilayah baru.

Studi biologi reproduksi ikan gelodok pada ekosistem lahan basah pesisir Indonesia masih jarang dilakukan sehingga perlu dilakukan penelitian tentang pertumbuhan, kematian, pola rekrutmen, indeks gonadosomatik, dan musim bertelur. Dengan mengetahui aspek biologi reproduksi maka konservasi ikan gelodok bisa dilakukan untuk kepentingan pemanfaatan dan pelestariannya.

Bab 3

Stres Oksidatif pada Ikan

Ekosistem perairan estuari dan pesisir menerima peningkatan jumlah polutan berupa bahan kimia dari kegiatan antropogenik seperti limbah pertanian, domestik dan industri. Polutan diserap oleh ikan dari air, sedimen, partikel tersuspensi, sehingga ikan cocok sebagai bioindikator yang sensitif untuk studi ekotoksikologi perairan. Studi tersebut antara lain meneliti efek polutan antropogenik pada induksi senyawa oksigen reaktif (ROS/*Reactive Oxygen Species*) yang mengakibatkan stres oksidatif sehingga memunculkan mekanisme sistem pertahanan antioksidan seluler, histopatologi, dan gangguan fisiologis sehingga menyebabkan penyakit (Lushchak, 2016).

Oksigen adalah akseptor elektron utama pada sistem biologis yang berperan penting dalam fungsi seluler. Namun, terlepas dari sifat menguntungkan, molekul oksigen berkontribusi pada pembentukan senyawa oksigen reaktif (ROS) yang beracun seperti superoksida, hidrogen peroksida, dan radikal hidroksil (Chowdhury et al., 2020). Kehadiran radikal bebas dan senyawa oksigen reaktif (ROS/*Reactive Oxygen Species*) yang berlebihan dalam sistem biologis adalah peristiwa yang tidak menyenangkan bagi kehidupan aerobik. Menurut Lesser (2006), ROS mempunyai dua peran ganda yaitu menyebabkan kerusakan oksidatif dan transduksi sinyal.

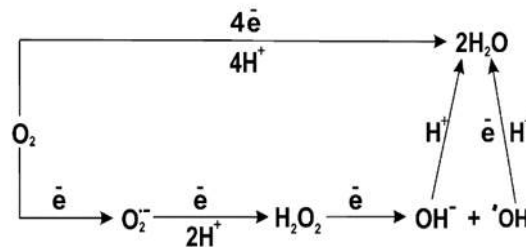
Senyawa oksigen reaktif yang berlebihan akan menginduksi kerusakan oksidatif sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan struktural pada lipid, protein dan asam nukleat di dalam kompartemen seluler. Peroksidasi lipid adalah contoh umum dari kerusakan oksidatif yang diinduksi ROS yaitu kerentanan asam lemak tak jenuh ganda terhadap serangan radikal bebas. Sel yang terpapar ROS berlebihan sangat rentan terhadap kerusakan DNA. ROS dapat mengaktifkan nuklease sehingga terjadi reaksi langsung radikal hidroksil dengan DNA yang menghasilkan perubahan struktur kimia DNA (Lushchak, 2016). Namun, kadar ROS yang stabil berperan penting dalam fungsi sistem kekebalan tubuh, mempertahankan keseimbangan redoks, dan mengaktifkan berbagai jalur pensinyalan/komunikasi seluler. Produksi ROS yang berlebihan dapat merusak lipid, protein, asam nukleat, membran dan organel sel sehingga mengaktifasi proses kematian sel atau apoptosis. Polisakarida seperti asam hialuronat dapat terdegradasi

oleh serangan stres oksidatif (Lushchak, 2011). ROS adalah salah satu penyebab terjadinya proses neurodegeneratif yaitu kematian sel saraf, cedera neuron motorik, dan cedera aksonal sehingga menyebabkan penyakit Alzheimer, Parkinson, dan Huntington pada mamalia (Chowdhury et al., 2020).

Kadar ROS yang stabil adalah terjadinya keseimbangan antara produksi dan eliminasi ROS. Stres oksidatif adalah terganggunya keseimbangan dinamis antara produksi dan eliminasi ROS. Stres oksidatif adalah terjadinya peningkatan kadar ROS secara berlebihan sehingga mengakibatkan kerusakan oksidatif pada bagian penting seluler. Perubahan suhu, kadar oksigen terlarut, dan salinitas lingkungan dapat menginduksi produksi ROS yang berlebihan sehingga mengakibatkan stres, baik pada kondisi alami maupun buatan. Polutan juga dapat meningkatkan kadar ROS pada ikan, tetapi ikan memiliki sistem pertahanan antioksidan seluler untuk mengeliminasi ROS dan radikal bebas. Ion logam transisi, seperti tembaga, kromium, merkuri dan arsenik, serta pestisida (insektisida, herbisida, fungisida) bersama dengan limbah minyak juga menginduksi terjadinya stres oksidatif. Yin et al. (2018) menambahkan bahwa logam berat Pb juga bisa menginduksi produksi ROS yang berlebihan pada ikan sehingga mengakibatkan stres oksidatif. Peningkatan sintesis ROS seperti anion superoksida, hidrogen peroksida dan radikal hidroksil menyebabkan kerusakan sel. Reaksi antara ROS dengan protein, lipid, dan DNA mengakibatkan peningkatan kerentanan ikan terhadap kerusakan sel. Ikan mempunyai sistem pertahanan antioksidan aktif yang mengandung berbagai antioksidan enzimatis dan antioksidan non-enzimatis untuk mengeliminasi ROS yang berlebihan. Aktivitas superoxide dismutase (SOD) dan catalase (CAT) adalah dua enzim antioksidan yang lebih menonjol dalam mengeliminasi ROS.

Metabolisme radikal bebas dan ROS dalam sistem biologis telah menjadi pembahasan yang menarik selama setengah abad terakhir. Radikal bebas adalah atom, molekul, atau ion dengan elektron tidak berpasangan pada konfigurasi *shell* yang terbuka. Elektron yang tidak berpasangan ini biasanya sangat reaktif dalam reaksi kimia. Senyawa oksigen reaktif (ROS) adalah oksigen molekuler dan singlet, anion superoksida, hidrogen peroksida, radikal hidroksil, dan senyawa nitrogen reaktif. Hidrogen peroksida (H_2O_2) adalah senyawa oksigen reaktif tetapi bukan radikal bebas, sedangkan senyawa oksigen reaktif lainnya termasuk radikal bebas. Hidrogen peroksida memiliki aktivitas lebih tinggi daripada oksigen molekuler (Rahal et al., 2014).

Transformasi dan hubungan antara ROS yang berbeda disajikan pada gambar 22.



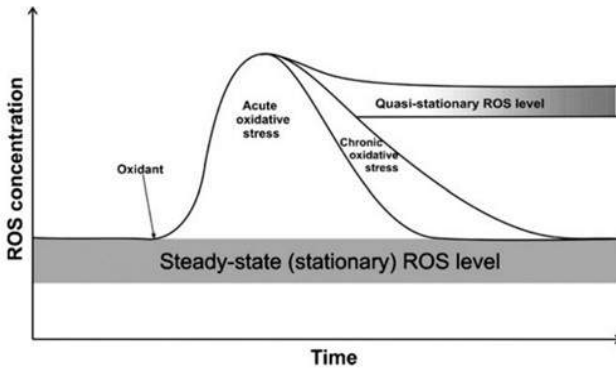
Gambar 22. Jalur metabolisme oksigen organisme dalam pembentukan ROS (Lushchak, 2011)

ROS adalah produk reduksi parsial oksigen molekuler. Molekul oksigen direduksi melalui mekanisme empat elektron oleh rantai transpor elektron di mitokondria sehingga menghasilkan air. Penambahan satu elektron tunggal pada O_2 menghasilkan anion superoksida ($O_2^{\cdot -}$) yang selanjutnya direduksi menjadi hidrogen peroksida, dan akhirnya menjadi radikal hidroksil ($\cdot OH$) dan anion hidroksil (OH^-). Mekanisme rantai transpor elektron selesai dengan pembentukan air setelah penambahan elektron dan proton pada $\cdot OH$.

ROS terus diproduksi dalam sistem biologis, baik sebagai produk samping metabolisme aerobik, atau sebagai produk dari sistem khusus yang dirancang untuk menghasilkan ROS. ROS dapat diikat atau didetoksifikasi oleh berbagai jenis antioksidan atau dapat berinteraksi dengan komponen seluler/ekstraseluler. ROS harus didetoksifikasi karena mempunyai kemampuan merusak yang tinggi. Aktivitas biologis ROS berada dibawah kontrol mekanisme seluler dan konsentrasi yang aman biasanya tidak melebihi $10^{-8}M$ (Lushchak, 2011).

Kadar ROS yang diproduksi sama dengan kadar ROS yang dieliminasi. Namun, dalam beberapa keadaan kadar ROS menjadi dinamis, yaitu kadar ROS mungkin berubah dari kondisi stabilnya. Perubahan kadar ROS mengakibatkan terganggunya status redoks sehingga disebut stres oksidatif atau stres reduktif. Stres oksidatif adalah situasi ketika kadar ROS meningkat sementara atau kronis dari kondisi stabilnya, sehingga mengganggu metabolisme seluler, mengacaukan regulasi sel dan merusak bagian penting seluler. Stres oksidatif adalah terjadinya produksi dan akumulasi senyawa hasil dari oksigen tereduksi seperti radikal superoksida, oksigen singlet, hidrogen peroksida, dan radikal hidroksil, yang dapat merusak lipid, protein,

dan DNA. Sedangkan "Reductive stress" adalah sebaliknya, yaitu konsentrasi ROS berkurang dari kondisi stabilnya. Terjadinya stres oksidatif secara skematis disajikan pada Gambar 23.



Gambar 23. Induksi oksidan yang menyebabkan perubahan dinamis kadar senyawa oksigen reaktif dalam organisme hidup (Lushchak, 2011)

Pada kondisi normal, kadar ROS berada dalam posisi stabil atau stasioner yaitu terjadi keseimbangan antara produksi ROS dan eliminasinya. Keadaan stres oksidatif telah meningkatkan kadar ROS dari posisi stabil, tetapi jika aktivitas antioksidan cukup tinggi dan efisien maka kadar ROS kembali ke posisi kestabilan awal. Peningkatan kadar ROS sementara ini disebut stres oksidatif akut. Namun, ketika aktivitas antioksidan tidak efisien dan aktifitasnya tidak cukup untuk mengeliminasi peningkatan produksi ROS dengan cepat, maka terjadi peningkatan kadar ROS dalam waktu yang lama. Kejadian ini disebut stres oksidatif kronis, tetapi jika aktivitas antioksidan mampu menurunkan kadar ROS dan menstabilkan kadar ROS ke posisi kestabilan/stasioner baru yang lebih tinggi dari kestabilan lama, maka kadar ROS berada pada posisi kuasi-stasioner.

Bab 4

Produksi dan Eliminasi Senyawa Oksigen Reaktif pada Ikan

Produksi senyawa oksigen reaktif (ROS)

Produksi ROS pada sistem biologis ada beberapa mekanisme. ROS pada umumnya diproduksi sebagai produk sampingan dari metabolisme oksigen. Lebih dari 90% oksigen digunakan oleh organisme melalui mekanisme empat elektron oleh rantai transpor elektron untuk menghasilkan energi. Metabolisme oksigen pada eukariota terjadi pada sistem mitokondria, sedangkan pada prokariota mekanisme rantai transpor elektron berlangsung pada membran plasmatik. ROS diproduksi dari sisa 10% oksigen yang dikonsumsi oleh organisme melalui skema satu elektron. Koenzim Q dan kompleks III diyakini sebagai tempat utama rantai transpor elektron mitokondria di mana elektron "melarikan diri" dan berinteraksi dengan molekul oksigen sehingga menghasilkan $O_2^{\cdot-}$. Rantai transpor elektron dari retikulum endoplasma adalah sumber ROS terpenting kedua. Katabolisme seluler dan bahan kimia asing oleh enzim sitokrom P450 melalui tahap reaksi redoks bertanggung jawab dalam produksi ROS pada retikulum endoplasma (Lushchak, 2011)

Sejumlah ROS diproduksi dalam sitosol dan peroksisom oleh enzim oksidase yang berbeda. Tryptophan dioxygenase, xanthine oxidase, dan sitokrom P450 reduktase memproduksi $O_2^{\cdot-}$, sementara itu enzim asam amino oksidase dan glukosa oksidase menghasilkan H_2O_2 . ROS diproduksi pada kloroplas, mitokondria, retikulum endoplasma, dan mikrobodi (peroksisom dan glioksisom).

Produksi ROS dengan mekanisme lainnya adalah dengan autooksidasi komponen seluler dan xenobiotik tertentu dengan bantuan oksigen/radiasi UV/peroksida/hidroperoksida. Katekolamin dan beberapa senyawa lain yang muncul secara alami dalam organisme dapat menjadi produsen ROS yang penting pada keadaan fisiologis tertentu, yang mengarah pada penyakit dan penuaan. Xenobiotik seperti logam berat, hidrokarbon aromatik, pestisida, bifenil poliklorinasi, dioksin dan banyak lainnya menimbulkan produksi ROS dan radikal bebas.

Sebagian besar organisme memiliki sistem yang spesifik untuk menghasilkan senyawa reaktif tertentu, seperti produksi ROS secara molekuler yang berasal dari oksidasi enzimatik NADPH oleh NADPH-oksidade. Sistem ini digunakan untuk mengontrol kadar ROS seluler. Produksi senyawa reaktif berikutnya adalah produksi nitrat oksida oleh NO-sintase. NO-sintase bertanggung jawab atas pembelahan asam amino arginin hingga pembentukan NO[•], yang selanjutnya dapat langsung berinteraksi dengan sel target. Sel juga menghasilkan oksida nitrit, atau nitrogen monoksida (NO[•]), sebuah molekul yang awalnya berperan dalam neurotransmisi, tetapi sekarang dikenal sebagai penginduksi stres oksidatif. NO-sintase menghasilkan NO[•], yang dapat bereaksi dengan O₂⁻ untuk membentuk anion peroksinitrit (ONOO⁻), yang berfungsi oksidator kuat. Karena kelarutan NO[•] mirip dengan H₂O, sehingga NO[•] mudah berdifusi melintasi membran biologis. Jadi, nitrit dapat menyebabkan stres oksidatif pada organisme dengan meningkatkan produksi senyawa oksigen reaktif (ROS) (Gao et al., 2020).

Menurut Chowdhury et al. (2020), ada dua sumber induksi ROS yaitu sumber endogen atau sumber eksogen. Sumber ROS endogen non enzimatik berupa reaksi Fenton dan Haber, sedangkan sumber endogen enzimatik yaitu monoamine oksidase, nicotinamide adenine dinucleotide fosfat hidrogen (NADPH) oksidase, xanthine oksidoreduktase, asam arakidonat, dan sitokrom p450 oksidase. Beberapa sumber endogen ROS lainnya adalah mitokondria (melalui rantai transpor elektron), retikulum endoplasma, peroksisom, lisosom, dan produksi ROS yang dimediasi reseptor. Sumber eksogen yang dapat menginduksi ROS adalah polusi lingkungan, toksikan, obat-obatan, patogen, dan bahan makanan (Rahal et al., 2014).

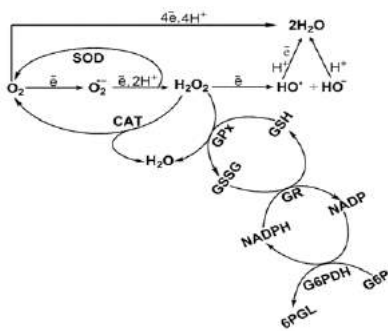
Eliminasi senyawa oksigen reaktif (ROS)

Eliminasi ROS pada sistem biologis dilakukan antioksidan. Sistem antioksidan pada ikan terdiri dari antioksidan massa molekul rendah dan antioksidan massa molekul tinggi. Antioksidan massa molekul rendah (masa molekul lebih kecil dari 1 kilodalton) adalah senyawa yang larut dalam air seperti glutathione tereduksi, asam askorbat (vitamin C), dan senyawa yang larut dalam lemak seperti karotenoid (termasuk β-karoten), retinol (vitamin A), α-tokoferol (vitamin E). Antioksidan ini berfungsi sebagai pemulung radikal bebas. Namun, untuk glutathione mempunyai fungsi lain yaitu sebagai kofaktor untuk enzim antioksidan seperti glutathione-dependent peroksidase, atau glutathione-S-transferase. Dua enzim tersebut merupakan enzim detoksifikasi fase kedua (Lushchak, 2011; Lushchak, 2016; Chowdhury et al., 2020).

Antioksidan massa molekul tinggi (masa molekul lebih dari 10 kilodalton) terdiri dari protein spesifik atau non-spesifik. Kelompok protein spesifik meliputi enzim antioksidan superoksida dismutase, katalase, glutathione peroksidase yang bergantung pada Se, DT-diaphorase, dan enzim yang berfungsi juga sebagai kofaktor, yaitu glutathione reduktase, glukosa-6-fosfat dehidrogenase. Antioksidan massa molekul tinggi non-spesifik seperti metallothioneins dan ferritin, yaitu protein yang mengikat ion logam transisi (terutama besi dan tembaga) guna mencegah kerusakan oksidatif akibat ROS.

Menurut Uluturhan et al. (2019) dan Chowdhury et al. (2020), untuk mengeliminasi ROS, maka organisme memiliki pertahanan antioksidan enzimatik dan non enzimatik. Antioksidan enzimatik seperti superoksida dismutase, katalase, glutathione peroksidase, glutathione reduktase, dan glutathione-S-transferase. Sedangkan antioksidan non enzimatik seperti Vitamin E, Vitamin C, β carotene, Vitamin A, Glutathione, Flavonoid, Thiol, Koenzim Q, dan asam urat.

Homeostasis ROS terjadi melalui produksi dan eliminasi. Organisme hidup memiliki sistem antioksidan bertingkat dan rumit yang memiliki kapasitas dan aktivitas mencegah produksi ROS, mengeliminasi ROS dan menghilangkan molekul yang dimodifikasi oleh ROS, atau meminimalkan efek negatifnya (Lushchak, 2016). Proses produksi, interkonversi, dan eliminasi ROS secara skematis disajikan pada gambar 24.

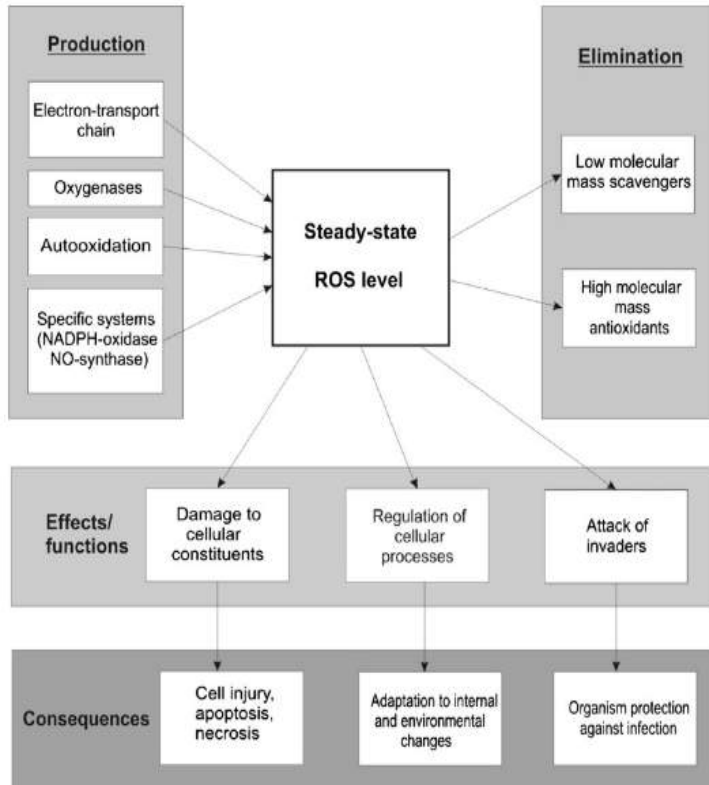


Gambar 24. Proses produksi, interkonversi, dan eliminasi ROS oleh enzim antioksidan lini pertama dan kedua (Lushchak, 2016)

Proses produksi, interkonversi, dan eliminasi ROS dijelaskan sebagai berikut: penambahan satu elektron kepada molekul oksigen membentuk radikal anion superoksida ($O_2^{\bullet-}$). Penambahan lebih lanjut satu elektron kepada $O_2^{\bullet-}$ membentuk hidrogen peroksida (H_2O_2).

Pengurangan satu elektron dari H_2O_2 membentuk radikal hidroksil (HO^\bullet) dan anion hidroksil. Akhirnya, penambahan satu elektron dan proton kepada HO^\bullet menghasilkan molekul air. $\text{O}_2^{\bullet-}$ dan HO^\bullet adalah radikal, sedangkan H_2O_2 bukan merupakan radikal. Transformasi $\text{O}_2^{\bullet-}$ dan H_2O_2 dipercepat oleh enzim antioksidan primer/lini pertama. Enzim antioksidan lini pertama dalam proses ini adalah superoksida dismutase (SOD) yang melakukan reaksi redoks dengan mendismutasi dua molekul $\text{O}_2^{\bullet-}$ untuk menghasilkan molekul oksigen dan hidrogen peroksida. Dengan mendismutasi superoxide, SOD mencegah pembebasan ion besi dan pembentukan ROS berbahaya seperti radikal hydroxyl (OH^\bullet). Berikutnya adalah reduksi satu elektron H_2O_2 yang ditransformasikan menjadi senyawa kurang berbahaya oleh beberapa enzim spesifik dan sekelompok besar enzim tidak spesifik. Enzim spesifik termasuk katalase mengkatalisis konversi H_2O_2 menjadi molekul oksigen dan air, sedangkan glutathione-peroksidase (GPx) menggunakan kofaktor glutathione untuk mengurangi H_2O_2 menjadi air. Kajian tentang sistem enzimatik spesifik yang dapat menghancurkan radikal hidroksil tidak ditemukan, karena diyakini pencegahan produksi HO^\bullet adalah cara terbaik untuk menghindari dampak bahayanya. Pemulihan glutathione teroksidasi (GSSG) ke bentuk tereduksi (GSH) dikatalisis oleh glutathione reductase (GR) menggunakan NADPH yang disediakan oleh reaksi dehidrogenase glukosa-6-fosfat (G6PDH) (Lushchak, 2016).

Kadar antioksidan yang stabil adalah terjadinya keseimbangan antara penyerapan/sintesis, transportasi, metabolisme, inaktivasi, dan ekskresi. Produksi antioksidan seperti tokoferol dan karoten diperoleh ikan dari makanan, demikian juga dengan glutathione, asam askorbat, dan antioksidan dengan massa molekul tinggi. Produksi antioksidan biasanya sesuai dengan kebutuhan organisme dan bergantung pada regulasi aktif sel. Sampai saat ini, banyak mekanisme peningkatan potensi aktivitas antioksidan untuk mengeliminasi ROS. Keseimbangan antara produksi dan eliminasi ROS, kaitannya dengan efek biologis potensial yang terjadi, serta konsekuensinya pada perubahan fungsi organisme disajikan pada gambar 25.



Gambar 25. Keseimbangan antara produksi dan eliminasi ROS dan efek potensial ROS pada sistem biologis (Lushchak, 2011)

Bab 5

Analisis Penanda Stres Oksidatif pada Ikan

Evaluasi atau uji penanda stres oksidatif perlu dilakukan dalam mengkaji stres oksidatif. Kadar ROS dapat dideteksi dengan metode langsung atau tidak langsung. Metode deteksi ROS langsung secara *in vivo* sangat berguna, tetapi sulit dilakukan karena alasan teknis karena konsentrasi ROS yang rendah dan tidak stabil. Metode tidak langsung lazim digunakan untuk mengevaluasi stres oksidatif, yaitu dengan mendeteksi/mengukur produk yang disintesis oleh bagian sel akibat induksi ROS atau senyawa khusus yang diperkenalkan. Oleh karena deteksi ROS yang tidak mudah, maka direkomendasikan tindakan pencegahan lebih diperhitungkan dalam menangani stres oksidatif (Lushchak, 2011).

Deteksi Senyawa Oksigen Reaktif (ROS)

Senyawa radikal bebas memiliki elektron tidak berpasangan yang dapat dideteksi dengan metode resonansi paramagnetik elektron (EPR). Teknik ini berhasil diterapkan untuk deteksi senyawa reaktif pada bakteri secara *in vivo*. Sangat sedikit riset tentang penggunaan teknik ini untuk deteksi kadar ROS pada organisme perairan. Teknik fluoresens adalah metode yang umum digunakan untuk deteksi tingkat ROS pada sel. Dalam hal ini, senyawa khusus dimasukkan ke dalam sel, karena terjadi stres oksidatif maka senyawa tersebut menjadi fluorofor. Intensitas fluoresensi seharusnya sebanding dengan kadar ROS. Diklorofluorescein adalah salah satu fluorofor yang biasa digunakan. Eter asetat diklorofluorescein adalah molekul yang tidak bermuatan sehingga mudah melintasi membran biologis. Senyawa eter asetat diklorofluorescein dioksidasi oleh esterase intraseluler menjadi ion yang bermuatan sehingga terkunci di dalam sel. Oksidasi diklorofluorescein menghasilkan pembentukan fluorofor. Deteksi ROS dengan metode diatas sering dilakukan pada suspensi sel atau uniseluler.

Stres oksidatif dievaluasi pada umumnya dengan mendeteksi penanda/*marker* yang terbentuk berupa produk modifikasi bagian seluler yang diinduksi oleh ROS, seperti lipid, protein, asam nukleat, dan antioksidan. Lipid, protein, asam nukleat, antioksidan massa

molekul rendah dan tinggi, serta aktivitas antioksidan yang dihasilkan karena induksi ROS adalah serangkaian parameter/indeks yang biasa digunakan untuk mengevaluasi stres oksidatif. Direkomendasikan menerapkan lebih dari satu parameter untuk mengevaluasi stres oksidatif (Aziz et al., 2020).

Perubahan lipid, protein, dan asam nukleat akibat induksi ROS

Oksidasi lipid adalah marker yang paling umum digunakan sebagai respons dari induksi ROS. Oksidasi lipid sering digunakan sebagai marker akibat induksi radikal bebas dan ROS, karena sel mengandung lipid dalam jumlah tinggi dengan residu asam lemak tak jenuh ganda sebagai substrat untuk oksidasi (Do et al., 2019). Lipid dioksidasi melalui pembentukan peroksida, maka proses pembentukannya disebut peroksidasi lipid. Produk peroksidasi lipid seringkali tidak stabil, oleh karena itu untuk menentukan tingkatannya dibagi menjadi produk primer, sekunder dan produk akhir. Produk primer meliputi senyawa berumur pendek dan bersifat radikal. Produk primer pada kondisi eksperimental diukur dengan metode resonansi paramagnetik elektron (EPR). Produk sekunder terdiri dari peroksida lipid, konjugat dienic, dan ketodienes, yang lebih andal diukur daripada produk primer. Sebagai contoh, Hermes-Lima menemukan metode besi/xilenol oranye untuk mengevaluasi tingkat peroksida lipid. Konjugat dienic sebagai respons stres oksidatif pada ikan mas berhasil diukur dengan metode tersebut diatas. Metode ini direkomendasikan sebagai metode yang andal, dapat direproduksi, tidak mahal, dan mudah dilakukan untuk mengevaluasi tekanan oksidatif pada organisme perairan.

Metode yang paling sering digunakan untuk mengukur peroksidasi lipid adalah pengukuran produk akhir, yaitu malonic dialdehyde (MDA), dan 4-hydroxynonenal. MDA secara luas digunakan sebagai indikator kerusakan oksidatif pada lipid membran sel oleh peroksidasi lipid, yang biasanya disertai dengan pengurangan kapasitas antioksidan (Dragun et al., 2017; Copat et al., 2019; Zafar & Khan, 2020). MDA menarik dan sering digunakan, karena diukur dengan asam tiobarbiturat (TBA). Namun, TBA bereaksi juga dengan banyak jenis senyawa yang berbeda, seperti aldehida, asam amino, dan karbohidrat, oleh karena itu, TBA tidak tepat untuk mengukur MDA. TBARS (*TBA-reactive substances*) atau zat-zat reaktif TBA yang lebih tepat untuk mengukur MDA. Metode relatif baru untuk mengukur produk akhir dari peroksidasi lipid akibat stres oksidatif pada ikan adalah metode HPLC dan metode imunologi. Metode HPLC-MS/MS (spektrometri massa-kromatografi cair kinerja tinggi) baru baru ini telah digunakan oleh Bulloch et al. (2020) untuk mendeteksi,

memisahkan, dan memvalidasi isoprostan (F2-isoPs) dalam lendir ikan. F2-isoprostanes (F2-isoPs) adalah biomarker peroksidasi lipid yang andal untuk stres oksidatif pada ikan secara *in vivo*. Produk akhir peroksidasi lipid adalah parameter dinamis, karena produk tersebut selanjutnya dikatabolisme atau berinteraksi dengan komponen seluler lainnya, misalnya dengan protein. Campuran lipid dengan protein ini dapat ditentukan dengan teknik imunologi, yang dapat diterapkan untuk mengevaluasi stres oksidatif pada ikan.

Modifikasi protein yang diinduksi ROS menjadi penanda stres oksidatif yang sering digunakan. Uji spektrofotometri telah digunakan untuk mengevaluasi efek radikal bebas pada ikan, yaitu mengukur kandungan kelompok karbonil protein dengan dinitrofenil hidrazin. Ada tiga hal yang harus dipertimbangkan dalam mengukur modifikasi protein yang diinduksi ROS. Pertama, protein selalu mengandung gugus karbonil dan oksidasi protein yang diinduksi ROS menambah gugus karbonil yang baru. Kedua, modifikasi protein adalah parameter dinamis karena protein dapat teroksidasi dan dapat dikatabolisme, sehingga kadarnya mengalami penurunan. Namun, dalam beberapa kasus protein teroksidasi berat dapat terakumulasi dalam sel sehingga bisa terdeteksi dan diukur. Ketiga, pada jangka waktu riset yang lama, kumpulan protein seluler dengan kandungan karbonil yang berbeda dapat berubah sehingga menyebabkan perubahan protein yang teroksidasi. Copat et al. (2019) menyatakan bahwa protein adalah target radikal bebas dan oksidasi protein didefinisikan sebagai modifikasi kovalen yang dapat diinduksi baik secara langsung oleh ROS atau secara tidak langsung melalui reaksi dengan produk sampingan dari stres oksidatif, yang mengarah pada perubahan residu asam amino tertentu untuk membentuk protein karbonil. Menurut Kovacik et al, (2019) protein karbonil sebagai produk dari oksidasi protein digunakan sebagai biomarker yang andal untuk kerusakan oksidatif. Protein karbonil dan MDA adalah biomarker yang sensitif untuk polusi air dengan kadar polutan yang rendah (Copat et al. 2019).

Asam nukleat atau DNA mengalami modifikasi akibat induksi ROS dan radikal bebas. DNA sangat penting bagi sel, sehingga sangat menarik untuk mengembangkan metode/teknik yang relevan guna mengevaluasi modifikasi DNA yang diinduksi oleh ROS. Metode HPLC dan teknik imunologi digunakan untuk mengukur pembentukan basa teroksidasi pada ikan, khususnya 8-oksoguanin (8-OG). Uji Comet dapat mendeteksi variasi kerusakan DNA dan digunakan sebagai biomarker genotoksitas pada ikan dan hewan air lainnya akibat toksikan (Ghisi et al., 2017).

Maulvault et al. (2019) menyatakan bahwa serangkaian biomarker terintegrasi berguna untuk mendeteksi ROS sebagai respons paparan kontaminan kompleks/campuran pada ikan di perairan alami. Biomarker biokimia (tabel) telah lazim digunakan dalam studi ekotoksikologis, karena dapat diandalkan dan efektif untuk menilai efek paparan xenobiotik. Menurut Vieira et al. (2019), serangkaian biomarker biokimia terintegrasi yang sering digunakan adalah: (i) enzim biotransformasi dengan mengukur EROD dan aktivitas GST; (ii) pertahanan antioksidan dengan mengukur aktivitas SOD, CAT, GPx, GR, dan kadar GSH tereduksi; (iii) kerusakan oksidatif dengan mengukur peroksidasi lipid. Deteksi dini dengan serangkaian biomarker terintegrasi pada pencemaran dengan kontaminan yang kompleks di perairan alami disajikan pada tabel 1.

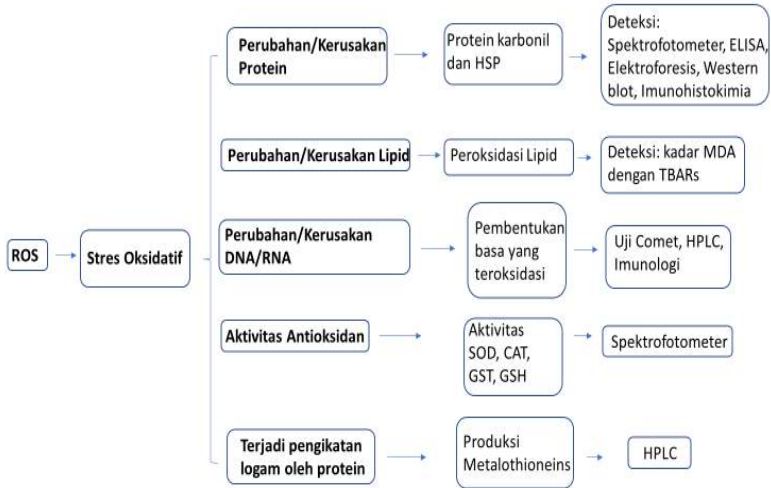
Tabel 1. Deteksi dini dengan serangkaian biomarker terintegrasi pada pencemaran dengan kontaminan yang kompleks di perairan alami

No	Respons dan Efek	Sistem Pertahanan Seluler	Deteksi
1	Pertahanan antioksidan	Aktivitas Katalase Aktivitas SOD Aktivitas GST	Uji aktivitas enzim dengan Spektrofotometer Uji aktivitas enzim dengan Spektrofotometer Uji aktivitas enzim dengan Spektrofotometer
2	Kerusakan sel	Peroksidasi Lipid	Kadar total Malondialdehyde (MDA) melalui tes asam thiobarbituric
3	Respons Stres	Kandungan HSP70	uji ELISA
4	Degradasi protein/Perbaikan DNA	Kandungan Ubiquitin	Uji ELISA
5	Gangguan reproduksi dan endokrin	Kandungan Vitellogenin VTG hati	Uji ELISA
6	Neurotoksisitas	Aktivitas Acetylcholinesterase (AChE)	Uji aktivitas enzim dengan Spektrofotometer

Sumber: (Maulvault et al., 2019)

Berikut adalah ringkasan analisis penanda biologi atau biomarker yang sering digunakan untuk mendeteksi perubahan pada lipid, protein dan asam nukleat akibat induksi ROS (Gambar 26).

Analisis penanda biologi/Biomarker stres oksidatif



Gambar 26. Biomarker stres oksidatif akibat induksi ROS

Riset biomarker stres oksidatif telah banyak dikaji, tetapi belum ada penanda atau biomarker yang ideal untuk stres oksidatif, karena ROS mempunyai karakter yang spesifik, sehingga beberapa parameter harus digunakan untuk mengevaluasi mekanisme stres oksidatif. Induksi stres oksidatif harus dievaluasi dalam dua langkah, yaitu: dinamika proses, dan efek konsentrasi. Dinamika ini penting karena parameter yang berbeda menunjukkan berbagai perubahan dari waktu ke waktu.

Bab 6

Logam Berat Penyebab Stres Oksidatif pada Ikan

Logam, terutama logam berat, adalah kontaminan penting pada lingkungan perairan di seluruh dunia. Polusi logam berat telah meningkat seiring dengan kemajuan teknologi. Limbah industri, pertambangan, pertanian, rumah tangga, dan lalu lintas motor adalah semua kegiatan antropogenik yang dianggap sebagai sumber utama polusi logam (Singh, et al, 2011; Jaishankar, et al, 2014). Logam berat diserap ikan melalui lima rute yaitu melalui: partikel, makanan atau non-makanan, insang, air, dan kulit, kemudian masuk ke dalam darah, dibawa ke hati untuk transformasi atau penyimpanan. Hati adalah organ utama akumulasi, biotransformasi, dan ekskresi polutan pada ikan (Weber et al., 2013). Logam juga terakumulasi dan bertahan di dalam air dan sedimen. Ikan menempati puncak rantai makanan, sehingga menjadi bioindikator yang cocok untuk kontaminasi logam (Nofal, et al., 2019). Logam berat adalah penginduksi stres oksidatif yang kuat, oleh karena itu penilaian kerusakan oksidatif dan sistem pertahanan antioksidan pada ikan dapat mencerminkan kontaminasi logam pada lingkungan perairan (Aziz et al, 2020).

Spesiasi/karakterisasi logam berat, kelarutan dan kompleksinya, merupakan faktor penting yang mempengaruhi toksisitas logam berat di lingkungan perairan. Kadar logam berat terlarut sangat tergantung pada pH air. Interaksi logam dapat mengubah efek toksiknya pada ikan, baik secara positif maupun negatif. Jalur paparan logam berat juga berperan dalam toksisitas logam. Ikan menyerap logam berat melalui insang, saluran pencernaan dan permukaan tubuh (lendir kulit) (Bulloch et al., 2020).

Berbagai ion logam berat berperan sebagai penginduksi stres oksidatif pada ikan, terutama logam Fe, Cu, Cr, Hg dan Pb serta metaloid (As, Se). Sebelum mengkaji produksi ROS karena induksi logam berat di perairan, dibahas sedikit tentang produksi ROS secara alami di lingkungan perairan laut.

Produksi oksigen reaktif dan ROS di perairan laut menurut Lesser (2006) berasal dari penyerapan radiasi matahari oleh bahan organik terlarut yang akhirnya menghasilkan fotokimiawi transien reaktif yang beragam. ROS mempengaruhi membran sel dan

menghambat fotosintesis sehingga mengganggu bakteri dan fitoplankton. Hidrogen peroksida memiliki masa hidup terpanjang di air laut, mempunyai konsentrasi stabil tertinggi ($10^{-7}M$), dan dengan mudah melewati membran biologis.

Lubang hidrotermal juga menghasilkan ROS. Lubang hidrotermal adalah lubang di dasar laut tempat mengalirnya air panas yang kaya mineral. Kelimpahan hidrogen sulfida (H_2S) dan O_2 di dekat lubang hidrotermal menyebabkan oksidasi H_2S sehingga memproduksi ROS. Dengan metode resonansi paramagnetik elektron terdeteksi bahwa oksidasi sulfida menghasilkan O_2^- . Konsentrasi tinggi O_2^- di dekat lubang oleh dismutasi O_2^- dijadikan sebagai sumber produksi H_2O_2 sehingga mengakibatkan stres oksidatif pada fauna yang hidup di dekat lubang hidrotermal. Cacing (*Riftia pachyptila*), kerang (*Calyptogena magnifica*), dan bakteri yang bersimbiosis dengan kedua fauna tersebut mengekspresikan marker SOD dan menunjukkan aktivitas peroksidase. Hal ini menandakan bahwa fauna tersebut mengalami stres oksidatif akibat ROS yang diproduksi di sekitar lubang hidrotermal.

Ikan sering mengalami stres, yang biasanya disertai dengan stres oksidatif. Dapat diasumsikan bahwa stres oksidatif mungkin bertanggung jawab atas adaptasi organisme terhadap berbagai pemicu stres lingkungan. Kondisi lingkungan seperti perubahan suhu, kadar oksigen terlarut dan salinitas dapat menyebabkan stres oksidatif pada ikan dalam kondisi alami maupun buatan. Peran ion logam transisi, seperti tembaga, kromium, merkuri, arsenik, dan pestisida (insektisida, herbisida, fungisida) bersama dengan produk minyak juga menginduksi stres oksidatif pada ikan.

Stres oksidatif dan sistem pertahanan antioksidan pada ikan akibat logam berat

Logam berat adalah induktor penting stres oksidatif pada organisme perairan, melalui produksi ROS dengan dua mekanisme. Logam aktif redoks menghasilkan ROS melalui siklus redoks, sementara logam tanpa redoks berpotensi merusak pertahanan antioksidan, terutama antioksidan dan enzim yang mengandung tiol (Sevcikova, et al., 2011; Rani & Singh, 2019). Produksi ROS selain diinduksi oleh ion logam transisi, pestisida, dan polutan minyak bumi, ROS juga diproduksi secara endogen oleh sumber seluler selama metabolisme sel normal. Respirasi mitokondria adalah sumber ROS endogen utama. Peningkatan produksi ROS dapat mengakibatkan oksidasi protein dan lipid, perubahan ekspresi gen, serta perubahan status redoks sel.

Mekanisme pertahanan antioksidan pada ikan terdiri dari antioksidan enzimatis (antioksidan dengan berat molekul tinggi) dan antioksidan non-enzimatis (antioksidan dengan berat molekul rendah). Superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx), dan glutathione-s-transferase (GST) adalah enzim antioksidan utama sebagai indikator penting dari stres oksidatif (Telahigue et al., 2019; Kovacic et al., 2019; Kuang et al., 2020). Glutathione tereduksi (GSH) dan glutathione disulfida teroksidasi (GSSG) berperan penting dalam pertahanan antioksidan non-enzimatis. Glutathione sebagai antioksidan endogen merupakan bagian integral dari pertahanan terhadap stres oksidatif, dan berfungsi mencegah oksidasi protein yang larut dalam air (Kovacic et al., 2019). Sistem pertahanan seluler yang lain adalah protein pengikat logam seperti ferritin, ceruloplasmin, dan metallothioneins (MTs). MTs berfungsi khusus dalam detoksifikasi logam beracun, dan berperan dalam metabolisme dan homeostasis logam esensial.

Sitokrom P450 (CYP450/CYP1A), glutathione-S-transferase (GST), dan glutathione peroxidase (GPx) adalah antioksidan enzimatis yang populer. Enzim sitokrom P450 berperan dalam biotransformasi racun lingkungan dan karsinogen, termasuk logam berat dan banyak digunakan dalam studi ekotoksikologis (Weber et al., 2020). Reaksi seluler tubuh setelah terpapar polutan beracun ada 2 (dua), yaitu reaksi fase I meliputi oksidasi, hidrolisis, dan reduksi, dan reaksi fase II (reaksi mengikat). Enzim CYP450 adalah enzim metabolisme xenobiotik fase I yang paling penting; selanjutnya, GST dan GPx terlibat dalam reaksi fase II. Kedua reaksi tersebut bekerja secara harmonis untuk mencapai transformasi biologis dan mengurangi toksisitas (Kuang et al., 2020).

Metallothioneins adalah protein dengan berat molekul rendah kaya akan residu sistein yang dapat mengikat berbagai logam, termasuk merkuri, perak, tembaga, kadmium, timah, seng, dan kobalt, dengan berbagai afinitas. Metallothioneins berfungsi mengendalikan konsentrasi ion bebas dari logam tersebut di atas; regulasi homeostatis dari logam intraseluler; menetralkan pengaruh berbahaya dari paparan racun logam tersebut di atas, seperti kadmium dan merkuri; dan memainkan peran penting dalam detoksifikasi logam pada semua organisme. Metallothioneins adalah pemulung radikal hidroksil yang efisien dan berkontribusi dalam memberikan perlindungan atau meminimalkan efek terhadap cedera oksidatif (Beg et al., 2015). Metallothioneins terlibat dalam regulasi logam esensial tembaga dan seng dan dalam detoksifikasi logam non-esensial (Bertrand et al., 2015). Seng berfungsi sebagai aktivator faktor transkripsi yang diatur logam, sehingga terjadi ekspresi gen metallothioneins. Bisa disimpulkan

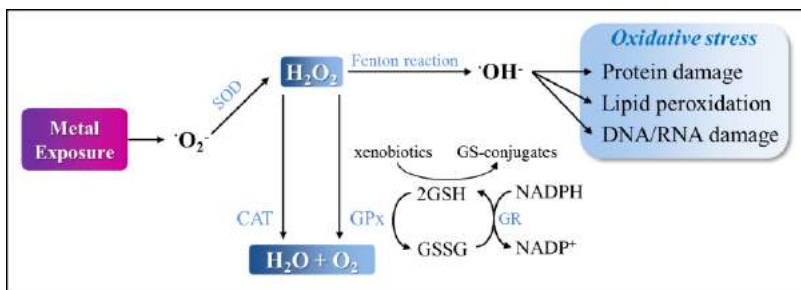
bahwa metallothioneins berperan penting dalam detoksifikasi, metabolisme, dan homeostasis logam berat intraseluler (Hernández et al., 2014; Abd El-Atti et al., 2019) sehingga dapat menjadi biomarker yang andal untuk kontaminasi logam berat di lingkungan perairan (Kim et al., 2017; Kovacik et al., 2019; Weber et al., 2020).

Efek toksik logam berat pada ikan terutama disebabkan oleh mekanisme bioakumulasi, ekskresi, metabolisme, dan detoksifikasi yang disebabkan oleh penyerapan logam berat (Jaishankar et al., 2014). Ikan terpapar logam berat melalui makanan di saluran pencernaan dan kontak dengan air di insang dan kulit, sedangkan hati mendetoksifikasi dan melepaskan logam berat ke dalam usus (Lee et al., 2019). Paparan logam berat mengakibatkan akumulasi logam di dalam jaringan ikan sehingga menghasilkan ROS, seperti hidrogen peroksida, radikal superoksida, dan radikal hidroksil, yang akhirnya menginduksi stres oksidatif (Zafar and Khan, 2020). Hidrogen peroksida dikonversi menjadi radikal hidroksil melalui reaksi Fenton, yang menginduksi stres oksidatif dan menyebabkan kerusakan protein, peroksidasi lipid, dan kerusakan DNA/RNA (Lee et al., 2019).

Stres oksidatif terjadi karena ketidakseimbangan antara produksi radikal bebas dan sistem detoksifikasi biologis, yaitu respons antioksidan, seperti SOD, CAT, GSH, dan GST (Nofal, et al., 2019), oleh karena itu, respons antioksidan menjadi indikator yang andal dan sensitif untuk mengevaluasi stres oksidatif pada ikan yang terpapar logam. Paparan logam berat menghasilkan radikal anion superoksida, oleh enzim superoksida dismutase (SOD) anion superoksida diuraikan menjadi hidrogen peroksida. Menurut (Kim and Kang, 2017) terjadi peningkatan aktivitas enzim antioksidan SOD pada ikan yang terpapar timbal. Hidrogen peroksida terurai menjadi air dan oksigen oleh katalase (CAT) dan glutathione peroksidase (GPx). Selama proses dekomposisi GPx, glutathione tereduksi (GSH) dikonversi menjadi GSH disulfide (GSSG). GSH berfungsi mengeliminasi ROS atau sebagai kofaktor dalam detoksifikasi metabolik. Paparan timbal pada ikan mengoksidasi GSH menjadi GSSG, dan rasio GSH/GSSG adalah indikator yang andal dari stres oksidatif. Kadar GSH pada ikan yang terpapar timbal turun karena pengikatan timbal oleh tiol kelompok gugus (-SH), sehingga berpengaruh pada aktivitas antioksidan GSH. Namun, aktivitas GSH dapat ditingkatkan kembali karena aktivasi stres oksidatif oleh paparan timbal. Tiol berfungsi sebagai antioksidan dalam sel atau merupakan konstituen dalam sejumlah protein dan enzim, seperti GSH (Lee et al., 2019).

Glutathione S-transferase (GST) berfungsi dalam detoksifikasi logam berat. GST memiliki peran utama dalam mengkatalisasi

konjugasi xenobiotik untuk mengeluarkannya dari sistem seluler (Nofal, et al., 2019). Zat reaktif asam tiobarbiturat (TBARS) digunakan sebagai ukuran peroksidasi lipid. Peroksidasi lipid menyebabkan stres oksidatif dan menyebabkan hilangnya fungsi seluler (Kim et al., 2017). TBARS dengan malondialdehyde (MDA) adalah indikator sensitif untuk mendeteksi peroksida lipid sebagai produk dari peroksidasi lipid membran (Do et al., 2019). Peroksidasi lipid pada ikan terjadi selama stres oksidatif oleh logam berat, dan kadar TBARS menunjukkan tingkat peroksidasi lipid. ROS yang diproduksi akan menginduksi peningkatan TBARS, menyebabkan stres oksidatif, dan kerusakan pada insang, usus, otak, dan otot ikan. Secara khusus, karena ikan mengandung sejumlah besar asam lemak tak jenuh tinggi (HUFA), TBARS dapat bermanfaat sebagai biomarker untuk stres oksidatif khususnya pada ikan karena ikan mengandung banyak asam lemak tidak jenuh tinggi (HUFA: *highly unsaturated fatty acids*). TBARS bermanfaat sebagai biomarker untuk stres oksidatif (Copat et al., 2019). Menurut (Lee et al., 2019) paparan timbal mengakibatkan efek toksik pada ikan dengan menginduksi stres oksidatif dan produksi ROS, serta memunculkan respons antioksidan seperti SOD, CAT, GSH, GST dan TBARS. Antioksidan tersebut adalah indikator utama stres oksidatif pada ikan yang terpapar timbal. Mekanisme stres oksidatif pada ikan yang terpapar logam berat ditunjukkan pada Gambar 27.



Gambar 27. Mekanisme stres oksidatif pada ikan yang terpapar logam berat (Lee et al., 2019)

Mekanisme kerusakan oksidatif yang diinduksi logam berat

Mekanisme kerusakan oksidatif akibat induksi logam berat ada 3 (tiga) cara yaitu. Pertama, logam aktif redoks seperti besi, tembaga, kromium, dan vanadium menghasilkan ROS melalui siklus redoks. Kedua, logam non aktif redoks, seperti merkuri, nikel, timah, dan kadmium, yang merusak pertahanan antioksidan, (terutama enzim antioksidan dan antioksidan yang mengandung tiol). Ketiga, produksi radikal bebas dengan reaksi Fenton, yaitu Fe^{2+} dioksidasi oleh hidrogen

peroksida menjadi Fe^{3+} , radikal hidroksil, dan anion hidroksil. Radikal superoksida dapat mereduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} . Tembaga, kromium, vanadium, titanium, kobalt, dan kompleksnya juga dapat mengalami reaksi Fenton.

Logam juga dapat menginduksi stres oksidatif melalui aktivasi faktor transkripsi peka-redoks seperti AP-1, p53, dan NF- κ B. Faktor-faktor transkripsi ini mengontrol ekspresi gen pelindung yang memperbaiki DNA, dan mempengaruhi apoptosis, diferensiasi sel, dan pertumbuhan sel (Sevcikova et al., 2011).

Beberapa logam berat penyebab stres oksidatif pada ikan

Ikan di perairan alami terus terpapar berbagai jenis kontaminan, sehingga sebagai model yang sangat baik untuk mengevaluasi status kesehatan ekosistem perairan (Dane and Şişman, 2020; Paschoalini et al., 2019). Logam berat masuk ke lingkungan perairan secara alami dan/atau antropogenik. Pelepasan logam ke lingkungan perairan oleh aktivitas antropogenik jauh lebih tinggi daripada proses alami (AnvariFar et al., 2018).

Manifestasi efek toksik dan bioakumulasi logam berat pada ikan antara lain mengakibatkan stres oksidatif, perubahan proses fisiologis dan kimia, lesi struktural, gangguan fungsional, gangguan biokimiawi, genotoksisitas, histopatologi, dan perubahan faktor kondisi (indeks hepatosomatik) (Javed and Usmani, 2017). Dalam buku ini diuraikan 4 (empat) logam berat yang terlibat dalam stres oksidatif pada ikan, yaitu besi, kadmium, merkuri, dan timbal.

Besi (Fe)

Besi adalah logam transisi paling melimpah di kerak bumi. Besi merupakan elemen penting yang diperlukan untuk banyak fungsi fisiologis, dan nutrisi yang paling penting bagi makhluk hidup karena merupakan kofaktor bagi banyak protein dan enzim penting (Jaishankar et al., 2014). Zat besi adalah mineral penting untuk semua hewan, termasuk ikan, karena peran vitalnya sebagai konstituen fungsional protein, yaitu berperan dalam berbagai proses biologis seperti transportasi oksigen, sintesis DNA dan produksi energi (Zafar and Khan, 2020). Zat besi pada sistem biologis mempunyai dua bentuk utama yaitu, besi yang tidak larut dalam air (Fe^{3+}) dan zat besi yang larut dalam air (Fe^{2+}) (Singh, et al, 2019).

Zat besi yang larut dalam air (Fe^{2+}) berikatan dengan protein pembawa oksigen seperti hemoglobin dan mioglobin, serta enzim yang mengandung besi seperti sitokrom oksidase, sedangkan zat besi yang tidak larut dalam air berfungsi untuk mengangkut protein, transferin,

dan protein penyimpan zat besi, feritin, dan hemosiderin (Singh, et al, 2019). Zat besi Fe^{2+} beracun bagi ikan karena terikat di permukaan insang dan dioksidasi menjadi zat besi yang tidak larut (Fe^{3+}), sehingga menutupi permukaan insang dan menginduksi kerusakan sel, yang akhirnya mengakibatkan disfungsi pernapasan. Penyerapan besi yang berlebihan bisa menjadi racun, yang akhirnya berkaitan dengan kemampuannya untuk mengkatalisasi produksi ROS melalui reaksi Fenton (Lee et al., 2019; Singh et al, 2019). Selain itu, besi menginduksi stres oksidatif dengan menghasilkan ROS melalui reaksi redoks. Produksi ROS dapat merusak biomolekul, sel, jaringan (histopatologi), dan seluruh organisme (penyakit degeneratif) melalui mekanisme stres oksidatif. Zat besi juga dapat memperkuat toksisitas bahan kimia lain seperti paraquat atau 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine (Sevcikova et al., 2011).

Xenobiotik melepaskan ikatan zat besi yang memungkinkan menghasilkan radikal bebas. Berbagai zat yang mampu menghasilkan radikal superoksida dapat menginduksi potensi oksidatif zat besi, karena metabolisme zat besi dan superoksida saling berhubungan. Peningkatan produksi anion superoksida meningkatkan pelepasan besi bebas. Efek buruk zat besi yang berlebihan menyebabkan kerusakan DNA, peroksidasi lipid, dan oksidasi protein Jaishankar et al., 2014; Singh et al., 2019).

Efek buruk berupa patofisiologi akibat kelebihan paparan zat besi pada spesies ikan budidaya *Labeo rohita* telah diteliti secara in vivo oleh Singh et al., (2019). Paparan tiga konsentrasi uji sub-lethal zat besi (*ferrous*): 1/16, 1/8 dan 1/4 dari LC_{50} yaitu 8,25, 16,51 dan 33,01 mgL^{-1} , masing-masing diujikan secara in vivo. Sel-sel darah dan sampel jaringan spesimen kontrol dan terpapar diambil pada interval 24, 48, 72, dan 96 jam untuk mengevaluasi perubahan hematologis, stres oksidatif dan parameter histologis. Paparan zat besi yang berlebihan mengakibatkan perubahan signifikan jumlah eritrosit, leukosit, dan hemoglobin. Mekanisme pertahanan anti-oksidatif pada ikan yang terpapar besi berlebihan terungkap melalui peningkatan secara signifikan peroksidasi lipid dan penurunan secara signifikan kadar enzim antioksidan, seperti superoksida dismutase dan katalase. Pemeriksaan histologis insang dan hati menunjukkan cedera jaringan yang parah dan terjadi perubahan histologis. Kerusakan histopatologi meningkat sejalan dengan kenaikan konsentrasi dan waktu paparan. Pewarnaan Perl's mengungkapkan akumulasi kelebihan zat besi pada hati ikan yang terpapar. Perubahan patofisiologis yang diamati dalam penelitian ini memberikan wawasan paling komprehensif dari stres oksidatif akibat kelebihan zat besi pada ikan *Labeo rohita*.

Penelitian Zafar and Khan (2020) tentang diet zat besi pada ikan *Heteropneustes fossilis* menunjukkan bahwa peningkatan diet zat besi dari kadar 6,9 menjadi 86,6 mg kg⁻¹ secara signifikan meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi konversi (kenaikan berat badan absolut, rasio konversi pakan, tingkat pertumbuhan spesifik, efisiensi retensi protein). Aktivitas hepatic superoksida dismutase (SOD) dan katalase (CAT) juga meningkat, sementara kandungan malondialdehyde (MDA) menurun. Namun, diet zat besi pada kadar 146,9 mg kg⁻¹ menyebabkan stres oksidatif melalui reaksi Fenton, yang menghasilkan radikal bebas hidroksil setelah bereaksi dengan hidrogen peroksida. Diet zat besi yang berlebihan mengakibatkan akumulasi zat besi, meningkatkan peroksidasi lipid, dan mengurangi kapasitas antioksidan berupa penurunan aktivitas SOD dan katalase.

Menurut hasil penelitian Sayadi et al. (2020) yang mengevaluasi toksisitas akut dan kronis nanopartikel besi oksida dibandingkan dengan garam besi pada ikan *blackfish* (*Capoeta fusca*) dengan konsentrasi sub letal, ternyata Fe (NO₃)₃ lebih toksik daripada FeCl₃, FeSO₄, dan Fe₃O₄. Paparan Fe (NO₃)₃ mengakibatkan histopatologis pada insang dan usus ikan *blackfish*. Histopatologis pada insang berupa aneurisme, hiperplasia, edema, fusi lamellae, sinekia lamelar, dan nekrosis, sedangkan pada usus terjadi peningkatan jumlah sel goblet, jumlah sel darah, dan jumlah limfosit. Bioakumulasi zat besi oleh ikan *blackfish* berkurang dalam urutan insang > usus > hati > ginjal.

Kaloyianni et al. (2020) meneliti efek toksisitas nanopartikel magnetit (Fe₃O₄) pada hewan model darat (*Cornu aspersum*) dan air ikan zebra (*Danio rerio*) dan ikan mas prusia (*Carassius gibelio*). Hasil penelitian menunjukkan terjadi efek oksidatif, proteolitik, genotoksik, dan apoptosis, serta terjadi peningkatan biomarker biokimia. Biomarker biokimia yang dievaluasi adalah protein karbonil dan kadar MDA. Peningkatan biomarker biokimia tersebut sebagai tanda telah terjadi peroksidasi lipid setelah hewan terpapar nanopartikel magnetit selama 8 hari. Terjadi perbedaan respons yang nyata antarspesies dan antar jaringan akibat toksisitas nanopartikel magnetit sehingga menunjukkan respons toksisitas umum pada jaringan di tiga hewan yang diteliti. Pendekatan multi-biomarker ini dapat diandalkan untuk biomonitoring ekosistem darat dan perairan terhadap nanopartikel magnetit. Selain itu, hasil penelitian ini berkontribusi pada desain studi untuk produksi dan pemanfaatan nanopartikel secara rasional.

Konsentrasi normal besi terlarut di perairan laut dalam 0,6 nM atau 33,5 × 10⁻⁹ mg / L. Pada perairan air tawar, konsentrasi terendah yang bisa terdeteksi 5 µg/L - ICP, sedangkan dalam air tanah

konsentrasi besi terlarut sangat tinggi yaitu 20 mg/L (Jaishankar et al., 2014).

Kadmium (Cd)

Kadmium adalah logam non-esensial dengan fungsi biologis belum diketahui. Kadmium adalah produk sampingan dari produksi seng yang dapat mengkontaminasi manusia atau hewan di tempat kerja atau di lingkungan (Jaishankar et al., 2014). Sumber kadmium di lingkungan perairan berasal dari aktivitas industri (Sevcikova et al., 2011). Kadmium dapat mencemari air sebagai hasil dari penggunaan pupuk dan pestisida dan menunjukkan efisiensi akumulasi yang tinggi dalam organisme akuatik (Abdel Rahman et al., 2019). Kadmium tidak menghasilkan ROS secara langsung, tetapi dapat mengubah kadar GSH dan mempengaruhi status tiol sel, dan mendorong ekspresi metallothioneins (MTs) dalam hati (Rani & Singh, 2019). Perubahan GSH dan MTs dapat menyebabkan peroksidasi lipid membran sel (Sevcikova et al., 2011).

Kadmium memasuki rantai transpor elektron di mitokondria, sehingga menyebabkan akumulasi semiubiquinon yang tidak stabil, menyumbangkan elektron, dan memproduksi radikal superoksida (Sevcikova et al., 2011). Kadmium juga mempengaruhi enzim antioksidan, terutama SOD dan CAT, mampu menggantikan tembaga dan besi pada berbagai protein, membebaskan logam besi dan tembaga untuk kemudian berpartisipasi dalam reaksi Fenton (Rani & Singh, 2019). Aktivitas katalase yang berkurang setelah paparan kadmium telah dilaporkan oleh (Roméo, et al., 2000) pada ginjal ikan kakap putih (*Dicentrarchus labrax*). Penurunan aktivitas ini dijelaskan oleh penulis sebagai pengikatan langsung kadmium dengan katalase. Kadmium menginduksi stres oksidatif dengan mengubah aktivitas katalase dan SOD secara *in vitro* dan *in vivo*. Studi ini untuk memperjelas mekanisme stres oksidatif dan respons biomakromolekul yang disebabkan oleh paparan logam berat (J. Wang et al., 2015).

Kadmium adalah logam berat non-esensial sangat toksik yang pengaruhnya merugikan pada sistem enzimatik sel dan menginduksi stres oksidatif (Jaishankar et al., 2014). Kadmium dapat merusak sistem pertahanan antioksidan ikan (Adeogun et al., 2020). Abdel Rahman et al. (2019) menambahkan bahwa kadmium mengakibatkan perdarahan bawah kulit, sekresi mukus berlebihan, dan terlepasnya sisik pada ikan Nila yang terpapar dosis tinggi kadmium. Kadmium diserap langsung oleh ikan dari air dan terakumulasi dalam jaringan hati, usus, insang, dan menyebabkan perubahan patologis (Abd- Allah et al., 2019).

Kadmium terakumulasi dalam jaringan dan hanya sebagian kecil yang diekskresikan. Kadmium memiliki waktu paruh yang sangat panjang (>10 tahun pada mamalia terestrial) dan didetoksifikasi dalam keadaan terikat pada metallothioneins (MTs). Penyerapan kadmium tidak dikendalikan oleh homeostasis aktif, sehingga keberadaan logam ini dalam jaringan dapat mengindikasikan paparan jangka pendek dan jangka panjang. Penguraian logam dalam jaringan tergantung pada durasi paparan dan konsentrasi. Hati adalah organ tempat kadmium disimpan dalam jangka pendek, tetapi jika paparan kronis, kadmium dipindahkan dari hati ke ginjal untuk diserap dan diakumulasi. Komplek kadmium-metallothioneins diduga mengurangi toksisitas kadmium agar tidak berbahaya (Jakimska, et al., 2011).

Hasil penelitian Shekh et al, (2019) menerangkan bahwa metallothioneins, stres oksidatif, peroksidasi lipid, dan HSP70 (*heat shock protein*) digunakan sebagai biomarker toksisitas kadmium pada ikan *rainbow trout*/salmon pelangi (*Oncorhynchus mykiss*) dan ikan sturgeon (*Acipenser transmontanus*). Penelitian ini membandingkan toksisitas kadmium pada berbagai tahapan kehidupan dua spesies ikan yang berbeda secara evolusi. Akumulasi kadmium di dalam organ insang dan kulit lebih tinggi pada ikan sturgeon dibandingkan dengan ikan trout. Kadmium mengakibatkan peroksidasi lipid yang lebih tinggi pada ikan trout dibandingkan dengan ikan sturgeon, sedangkan respons HSP70 dan MTs juga lebih tinggi pada ikan trout. Berdasarkan hasil biomarker stres oksidatif, sensitivitas ikan trout lebih tinggi terhadap kadmium. Peningkatan ekspresi HSP70 dan metallothionein terdeteksi sebagai respons terhadap paparan logam berat (Osman et al, 2019; Shekh et al., 2019).

Kadmium adalah logam berat beracun yang bersifat bioakumulatif, telah terbukti menyebabkan kerusakan permanen pada sistem kekebalan ikan Mas. Kadmium membahayakan kesehatan ikan dan organisme perairan lainnya, salahsatunya adalah efek imunotoksitas kadmium pada neutrofil ikan mas (Jiixin et al., 2020). Paparan kadmium mengaktifkan jalur enzim sitokrom P450s (CYPs) untuk memproduksi ROS dalam neutrofil ikan mas. Paparan kadmium menginduksi terjadinya apoptosis, peradangan, dan immunosupresi melalui aktivasi enzim sitokrom P450s (CYPs) dan disfungsi antioksidan pada neutrofil ikan mas (Jiixin et al., 2020). Menurut Caimi et al (2020) enzim sitokrom P450s berperan pada fase I dengan menghasilkan konjugat. Konjugat selanjutnya bereaksi dengan konstituen endogen polar pada fase II yang menghasilkan konjugat yang larut dalam air sehingga mudah diekskresikan. Reaksi-reaksi ini dikatalisis oleh enzim glutathione S-transferase (GST). Paparan

kadmium juga mempengaruhi performa pertumbuhan, metabolisme energi, dan ekspresi neuropeptida ikan Mas Prussian (*Carassius auratus gibelio*) (Cai et al., 2020).

Pada ikan zebra (*Danio rerio*), paparan nanopartikel kadmium sulfida dan ion kadmium mengakibatkan bioakumulasi, efek seluler dan molekuler (Lacave et al., 2020). Dengan autometallografi terdeteksi biokumulasi kadmium lebih tinggi pada organ usus daripada di hati, dan mengakibatkan histopatologis, seperti peradangan pada insang dan vakuolisasi di hati. Hasil analisis X-ray membuktikan adanya nanopartikel kadmium sulfida pada kedua organ tersebut. Analisis transkriptome hepar mengungkapkan terdapat mRNA yang diekspresikan dari gen "respons imun" atau "pengikatan aktin" setelah terpapar ion kadmium. Paparan nanopartikel kadmium sulfat mempengaruhi jalur yang terlibat dalam respons imun dan stres oksidatif, sedangkan paparan kadmium ionik mempengaruhi jalur yang terlibat dalam kerusakan dan perbaikan DNA serta metabolisme energi. Kerusakan oksidatif protein pada hati terdeteksi setelah terpapar dengan ion kadmium, sedangkan ketidakstabilan membran lisosom hepatosit terdeteksi setelah terpapar nanopartikel kadmium sulfat. Menurut Lacave et al (2020), meskipun kadmium ionik mempunyai efek yang lebih kuat daripada nanopartikel kadmium sulfida, disimpulkan kedua bentuk kadmium mengakibatkan kematian dan toksisitas subletal pada ikan zebra.

Kadmium adalah polutan lingkungan penting yang menyebabkan toksisitas permanen pada ikan. Ziwei Zhang et al. (2017) telah melakukan penelitian profil transkriptomi pada ginjal ikan Mas (*Cyprinus carpio L.*) untuk memahami mekanisme paparan kadmium pada respons imun dan stres oksidatif. Hasil penelitian melaporkan terdapat 308 gen yang diekspresikan berbeda, yaitu 101 gen diregulasi untuk naik ekspresinya, sedangkan 207 gen turun ekspresinya. Gen yang diidentifikasi dicocokkan dengan basis data pada *Gene Ontology* (GO) and *Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes* (KEGG). Gen yang menyandi mekanisme sistem antioksidan dan fungsi kekebalan diidentifikasi dan divalidasi dengan *quantitative real-time RT-PCR*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paparan kadmium menginduksi stres oksidatif dan menekan sistem kekebalan (*immunosuppression*) pada ginjal ikan Mas. Penelitian ini memberikan wawasan baru untuk mengungkap efek biologis kadmium pada ikan Mas.

Yuan et al. (2017) menyatakan bahwa efek negatif dari paparan kadmium kronis pada pertumbuhan, struktur histologi, ultrastruktur, antioksidan, dan respons imun bawaan di hati ikan zebra dapat dicegah oleh radiasi dioda pemancar cahaya biru (*light emitting diodes/LEDs*),

sehingga LEDs dapat melindungi ikan terhadap toksisitas kadmium. Mekanisme perlindungan LEDs terhadap paparan kadmium diduga melalui penurunan regulasi tingkat mRNA NF- κ B dan Nrf2. Aktivasi gen NF- κ B akibat paparan kadmium akan menginduksi imunotoksitas, sedangkan aktivasi gen Nrf2 akan menginduksi stres oksidatif.

Mekanisme proteksi terhadap paparan kadmium pada ikan, selain dengan cara fisik (radiasi LEDs), juga bisa secara mikrobiologis. Penelitian Wang et al. (2020) menyatakan bahwa diet *Bacillus cereus* dosis 10^8 cfu/g secara signifikan mengurangi akumulasi kadmium, memperbaiki mikrobiota usus, dan mengurangi stres oksidatif pada ikan *Carassius auratus gibelio*. Temuan ini menyiratkan bahwa suplemen diet *Bacillus cereus* secara efektif melindungi *C.gibelio* dari toksisitas kadmium.

Kadmium adalah kontaminan lingkungan yang sangat berbahaya, dapat menyebabkan toksisitas pada sistem reproduksi. Liu et al. (2020) melakukan penelitian efek mitigatif seng pada toksisitas reproduksi kepiting air tawar jantan *Sinopotamon henanense* yang terpapar kadmium sub kronis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seng yang dikombinasikan dengan paparan kadmium secara signifikan mengurangi toksisitas kadmium pada sistem reproduksi. Hal ini dibuktikan dengan peningkatan berat testis, perbaikan kembali struktur histologis testis, peningkatan aktivitas SOD, pemulihan aktivitas CAT dan GPx, dan penurunan kadar MDA di testis. Studi ini menunjukkan bahwa seng adalah elemen trans penting yang dapat melindungi organisme dari efek berbahaya kadmium. Aplikasi seng dapat mengurangi toksisitas kadmium pada sistem reproduksi dengan mekanisme menekan stres oksidatif dan meningkatkan status antioksidan.

Merkuri (Hg)

Merkuri adalah logam yang terbentuk secara alami dari emisi geologis, merupakan cairan perak-putih, tidak berbau, dan menjadi gas tidak berwarna dan tidak berbau ketika dipanaskan. Rute utama merkuri melalui makanan yang terkontaminasi (Abdel Rahman et al., 2019). Merkuri sangat beracun, bioakumulatif dan biomagnifikasi pada seluruh rantai makanan. Kehadirannya mempengaruhi lingkungan laut sehingga penelitian banyak diarahkan pada distribusi merkuri di lingkungan air. Sumber utama pencemaran merkuri dari kegiatan antropogenik seperti limbah pertanian, pembuangan air limbah perkotaan, penambangan, pembakaran bahan bakar fosil, dan

pembuangan air limbah industri (Jaishankar et al., 2014; Cappello et al., 2016; Rani & Singh, 2019; Bittarello et al., 2019).

Merkuri mempunyai 3 (tiga) bentuk yaitu elemen logam, garam anorganik dan senyawa organik, yang masing-masing memiliki toksisitas dan ketersediaan hayati yang berbeda. Merkuri hadir secara luas dalam ekosistem perairan seperti danau, sungai dan lautan. Merkuri di lingkungan dan perairan ditemukan dalam bentuk organik yaitu metilmerkuri, diproduksi sebagai hasil metilasi bentuk anorganik oleh mikroorganisme di tanah, sedimen, dan air. (Lushchak, 2011; Jaishankar et al., 2014).

Merkuri terdapat sebagai kation dengan status oksidasi +1 (*mercurous*) dan +2 (*mercuric*) (Lushchak, 2011; 2016). Konjugat merkuri dari sistein dan glutathione adalah senyawa yang dapat diangkut ke lokasi pengangkut anion organik. Afinitas merkuri yang tinggi terhadap gugus tiol glutathione akan menghabiskan kumpulan antioksidan GSH intraseluler dan secara langsung atau tidak langsung menyebabkan stres oksidatif dalam sel dan jaringan (Lushchak, 2011; Lushchak, 2016; Rani & Singh, 2019). Metilmerkuri lebih beracun bagi ikan daripada bentuk anorganik. Menurut Bittarello et al. (2019), metilmerkuri: memiliki afinitas tinggi dengan kelompok sulfhidril dan hidroksil protein; larut dalam lemak; melewati membran sel dengan difusi, diserap dan diakumulasi di dalam tubuh.

Merkuri terakumulasi dalam jaringan tubuh organisme yang membentuk ekosistem perairan, dan terakumulasi pada seluruh organisme yang terlibat dalam rantai makanan pada ekosistem tersebut, sehingga predator puncak memiliki kadar merkuri tertinggi karena biomagnifikasi (Vieira et al., 2015). Menurut Vieira et al. (2015), > 75% merkuri yang terakumulasi dalam jaringan ikan ditemukan dalam bentuk metil merkuri. Metil merkuri lebih mudah diserap oleh ikan dari air dan makanan yang tercemar daripada merkuri anorganik. Metilasi dilakukan oleh bakteri anaerob (bakteri pereduksi sulfat, bakteri pereduksi besi dan bakteri penghasil metana) yang distimulasi oleh sejumlah besar karbon organik pada tanaman dan tanah yang tergenang (Zeng et al., 2016). Merkuri dapat berikatan dengan metalloprotein. Proses pengikatan ini akan menonaktifkan enzim dan mengubah aktivitas sel yang mengakibatkan hilangnya sensitivitas kulit dan koordinasi otot, mengakibatkan ketulian dan kematian (Vieira et al., 2015). Paparan merkuri pada ikan zebra (*Danio rerio*) mempengaruhi otak, otot, hati, sistem kekebalan dan sistem reproduksi, menginduksi stres oksidatif, degenerasi struktur sel, dan mengganggu metabolisme energi, serta homeostasis kalsium (Macirella et al., 2016).

Merkuri dikenal sebagai logam berbahaya dan toksisitasnya merupakan penyebab umum keracunan logam berat akut. Metilmerkuri adalah senyawa neurotoksik yang mengakibatkan kerusakan mikrotubulus, kerusakan mitokondria, peroksidasi lipid dan akumulasi molekul neurotoksik seperti serotonin, aspartat, dan glutamat (Jaishankar et al., 2014). Kim et al. (2020) menyatakan bahwa Survei Pemeriksaan Kesehatan dan Gizi Nasional Korea dari tahun 2008 s.d. 2013 terjadi hubungan antara kadar merkuri di dalam darah dengan tingkat depresi pada wanita di Korea Selatan terkait dengan pola konsumsi ikan. Wanita yang mengkonsumsi ikan dengan asupan rendah sekalipun mempunyai kadar merkuri darah lebih tinggi dan berisiko depresi. Hewan yang terpapar merkuri menunjukkan perubahan neurologis dan perilaku yang merugikan. Otak menjadi organ target utama toksisitas merkuri selain merusak organ-organ yang lain. Toksisitas merkuri menyebabkan tidak berfungsinya saraf, ginjal, dan otot, karena toksisitas merkuri menyebabkan gangguan pada potensial membran dan homeostasis kalsium intraseluler. Merkuri juga dapat berikatan dengan tiol yang tersedia bebas karena konstanta stabilitasnya yang tinggi. Waheed et al. (2020) menambahkan bahwa stres termal (suhu 34°C selama 42 hari) mempercepat toksisitas merkuri klorida pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*) melalui regulasi bioakumulasi merkuri dan ekspresi mRNA HSP70.

Stres oksidatif telah digambarkan sebagai jalur utama untuk memulai toksisitas merkuri pada ikan, baik studi lapangan maupun laboratorium (Cappello et al., 2016). Paparan merkuri menyebabkan efek buruk pada ikan *Plagioscion squamosissimus* dan ikan *Colossoma macropomum* melalui disfungsi seluler yang melibatkan inaktivasi enzim, perubahan konformasi protein, yang akibatnya terjadi gangguan berbagai proses metabolisme. Protein yang berikatan dengan merkuri terdeteksi dengan spektrofotometer ESI-MS/MS. Kajian metaloproteomik dan mekanisme toksisitasnya layak dijadikan biomarker paparan merkuri pada ikan di perairan alami (Bittarello et al., 2019).

Kandungan merkuri dan timbal pada ikan menimbulkan masalah yang serius pada kesehatan masyarakat. Hasil riset Ahmad & Suleiman (2019) menyatakan bahwa konsumsi ikan yang mengandung merkuri dan timbal memicu sindrom kardiometabolik (*cardio metabolic syndrome/CMS*), yaitu obesitas, dislipidemia, diabetes, resistensi insulin, aterosklerosis, dan hipertensi. Biomarker sindrom kardiometabolik bisa menjadi penanda efek toksisitas merkuri dan timbal. Gomes et al. (2020) meneliti: terjadinya dinamika metil merkuri di badan air dan sedimen sungai Amazon; kadar metil merkuri pada ikan *Mylossoma aureum* dan *Cichla monoculus* dan buaya *Melanosuchus*

niger dan *Caiman crocodilus*; serta menilai faktor risiko konsumsi ikan yang terpapar metil merkuri pada masyarakat lokal. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi metil merkuri tinggi di dalam badan air dan sedimen saat musim hujan. Kadar metil merkuri juga tinggi pada ikan dan buaya, yang selanjutnya berdasarkan data konsentrasi metil merkuri pada jaringan ikan, data berat badan, dan pola konsumsi ikan oleh masyarakat lokal, maka potensi risiko terpapar metil merkuri ditetapkan. Hasil riset diatas memberikan penjelasan bahwa bioakumulasi dan biomagnifikasi metil merkuri pada predator puncak dalam rantai makanan memberikan dampak kesehatan masyarakat terkait dengan tingginya pola konsumsi ikan.

Timbal (Pb)

Timbal adalah logam berwarna perak cerah, pada atmosfer yang kering berwarna sedikit kebiru-biruan. Cat, kosmetik, obat-obatan manusia, suplemen makanan, dan bahan bakar berbasis minyak bumi adalah sumber polusi timbal (Jaishankar et al., 2014). Timbal terakumulasi dalam ikan setelah terpapar air yang terkontaminasi daripada melalui paparan makanan (Abdel Rahman et al., 2019). Timbal menyebabkan toksisitas pada sel dengan mengikuti mekanisme stres oksidatif dan mekanisme ion. Paparan timbal mengakibatkan kadar ROS meningkat dan kadar antioksidan menurun. Timbal merupakan induktor stres oksidatif yang kuat, menyebabkan gangguan keseimbangan antioksidan melalui kerusakan oksidatif pada biomolekul (Lee et al., 2019). Mekanisme ionik toksisitas timbal terjadi karena ion timbal mampu menggantikan kation bivalen seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} dan kation monovalen seperti Na^{+} , yang akhirnya mengganggu metabolisme biologis sel. Mekanisme ionik toksisitas timbal menyebabkan perubahan signifikan dalam berbagai proses biologis seperti adhesi sel, komunikasi intra dan inter seluler, pelipatan protein, maturasi, apoptosis, transportasi ionik, regulasi enzim, dan pelepasan neurotransmitter. Timbal dalam konsentrasi picomolar dapat menggantikan kalsium, mempengaruhi protein kinase C yang mengatur eksitasi saraf dan penyimpanan memori (Jaishankar et al., 2014).

Akumulasi timbal dalam sedimen sangat berpengaruh pada organisme perairan. Timbal bukan logam transisi dan tidak dapat dengan mudah mengalami perubahan valensi. Timbal dapat: menginduksi kerusakan oksidatif melalui efek langsung pada membran sel; meningkatkan oksidasi otomatis hemoglobin karena interaksi antara timbal dan hemoglobin; mengoksidasi otomatis asam δ -aminolevulinic; berinteraksi dengan GR, atau melalui pembentukan

kompleks dengan selenium, sehingga mengurangi aktivitas GPx (Sevcikova et al., 2011; Rani & Singh, 2019).

Timbal adalah logam berat yang lazim meracuni lingkungan, menyebabkan kelainan perilaku, gangguan fungsi kognitif, dan menekan kekebalan pada hewan percobaan walau pada tingkat paparan yang rendah (Kim et al., 2017). Kontaminasi timbal pada sistem perairan terjadi oleh aktivitas antropogenik dan sumber alami. Paparan timbal mempengaruhi reproduksi, pertumbuhan, dan perilaku ikan. Timbal merupakan agen neurotoksik, menyebabkan kerusakan jaringan saraf sehingga berdampak buruk pada sistem saraf pusat, oleh karena itu, enzim asetilkolinesterase (AChE) banyak digunakan untuk diagnosis dan evaluasi risiko ekotoksikologis toksisitas timbal pada biota perairan (Kim et al., 2017).

Menurut Yin et al. (2018), timbal digunakan di seluruh dunia untuk aplikasi industri dan merupakan salah satu logam paling beracun jika terjadi pencemaran timbal di lingkungan udara, air, dan tanah. Timbal dapat terakumulasi pada ikan yang terkontaminasi melalui air atau makanan. Akumulasi Pb menyebabkan produksi berlebih senyawa oksigen reaktif (ROS) sehingga menghasilkan stres oksidatif. Stres oksidatif menyebabkan peningkatan sintesis ROS (anion superoksida, hidrogen peroksida dan radikal hidroksil) pada ikan. Senyawa kimia ini mampu menyebabkan kerusakan pada host terkait (Kim et al., 2017). Stres oksidatif juga dapat meningkatkan kerentanan host terhadap kerusakan dengan terjadinya reaksi ROS dengan biomolekul protein, lipid, dan DNA. Organisme mengandung sistem pertahanan antioksidan aktif yang terdiri dari berbagai antioksidan enzimatis dan antioksidan non-enzimatis untuk menangkal produksi ROS. Superoksida dismutase (SOD) dan katalase (CAT) adalah enzim antioksidan yang lebih menonjol untuk menangkal ROS. Dengan demikian, Kim et al. (2017) merekomendasikan penggunaan enzim antioksidan ini untuk mempelajari dampak paparan timbal pada ikan. Selain menginduksi stres oksidatif, timbal juga dapat menginduksi sintesis sitokin inflamasi dan mediator imun yang keduanya dapat menimbulkan reaksi berbahaya dalam tubuh (Yin et al., 2018). Javed, et al. (2016) menyatakan bahwa insang dan hati ikan sangat penting untuk mengetahui aktivitas antioksidan, dan jaringan ini telah disarankan sebagai bioindikator stres oksidatif yang baik setelah paparan logam berat.

Bab 7

Potensi Ikan Gelodok sebagai Alat Biomonitoring Pencemaran Logam Berat

Bioindikator dan biomarker sebagai alat biomonitoring

Bioindikator adalah spesies, komunitas, dan proses biologis yang dijadikan sebagai alat berharga untuk menilai kualitas lingkungan, dan perubahan bioindikator tersebut seiring dengan waktu sebagai akibat perubahan kualitas lingkungan (Copat et al., 2019). Bioindikator penting digunakan sebagai alat yang mampu menentukan efek atau respons keseluruhan dari campuran polutan yang terjadi atau berinteraksi dalam sistem perairan yang kompleks (Ballesteros et al., 2017; Bertrand, et al., 2018). Alga, makrofit, zooplankton, serangga, gastropoda, moluska, ikan, dan amfibi banyak digunakan sebagai bioindikator pencemaran logam berat (Zhou, et al, 2008; Decou et al., 2019).

Penggunaan bioindikator dan biomarker meningkat dan meluas pada dekade terakhir sebagai alat biomonitoring lingkungan laut dan estuari (Beg et al., 2015). Biomarker adalah pengukuran dalam cairan tubuh, sel, atau jaringan yang dapat menunjukkan perubahan biokimia atau seluler yang dihasilkan dari adanya racun atau stres (Calado et al., 2020). Dalam konteks *multi-stressor*, kontaminan dapat mempengaruhi struktur dan fungsi sistem biologis sehingga menyebabkan respons berupa biomarker pada tingkat molekuler, biokimiawi, histologis, dan perilaku sebelum mempengaruhi pada tingkat komunitas (Ballesteros et al., 2017; Basirun et al., 2019). Biomarker dijadikan sebagai alat deteksi dini terjadinya respons/efek biologis dan deteksi kualitas lingkungan akibat pengaruh paparan kontaminan dan stres.

Program biomonitoring bertujuan untuk memantau kualitas lingkungan melalui penggunaan organisme hidup secara teratur dan sistematis atau responsnya yang secara alami terjadi di lingkungan sebagai indikator (de Oliveira et al., 2019; Decou et al., 2019). Respons biomarker sebagai sinyal peringatan dini terjadinya kerusakan ekosistem yang didasarkan pada identifikasi dan kuantifikasi perubahan molekuler, biokimiawi, fisiologis, genetik dan seluler pada spesies bioindikator (Ballesteros et al., 2017; Bertrand et al., 2018).

Respons perubahan ini dikaji karena adanya bioavailabilitas dan bioakumulasi logam berat di dalam tubuh baik karena terpapar secara tunggal atau multi polutan (Calado et al., 2020). Penggunaan berbagai respons biomarker komplementer pada spesies bioindikator saat ini telah diterapkan secara luas dan telah divalidasi pada studi laboratorium dan lapangan sebagai alat biomonitoring lingkungan estuari dan laut (Beg et al., 2015).

Keberhasilan program biomonitoring pencemaran logam berat pada perairan salahsatunya tergantung pada pemilihan spesies hewan bioindikator yang tepat dan sesuai/cocok. Bioindikator yang tepat dan cocok memiliki karakter sebagai berikut: (i) memiliki kelimpahan tinggi; (ii) mudah ditangani, mudah dipelihara di laboratorium, mudah didapat, dan mudah diidentifikasi/memiliki ukuran yang mudah diamati; (iii) dapat mengakumulasi berbagai kadar polutan tanpa efek fatal, sehingga cocok untuk evaluasi ekotoksikologis; (iv) cara hidup sesil (hewan yang melekat atau menempel pada benda-benda mati atau pada hewan hidup), sehingga mewakili polusi lokal; (v) populasinya cukup banyak dan terdistribusi luas, sehingga mudah untuk pengulangan dan perbandingan; (vi) siklus hidup panjang, sehingga bisa dilakukan perbandingan antara berbagai umur; (vii) memiliki sel, jaringan dan organ target yang cocok untuk penelitian lebih lanjut di tingkat sel dan molekuler; (viii) mudah beradaptasi dan toleran pada berbagai kondisi; (ix) menempati posisi penting dalam rantai makanan; (x) memiliki respons cepat terhadap paparan awal berbagai xenobiotik. Bioindikator yang ideal tentu sulit ditemukan, sehingga penentuan calon spesies bioindikator dengan beberapa karakter sudah bisa diaplikasikan sesuai dengan tujuan program biomonitoring (Zhou et al., 2008; Bertrand, et al., 2016; Javed et al., 2017; Nimet et al., 2020). Spesies ikan cukup memenuhi karakter tersebut. Oleh karena itu, ikan cocok menjadi model yang andal digunakan sebagai alat biomonitoring polutan logam berat pada estuari. Respons ikan sangat sensitif dan cepat untuk menilai kualitas lingkungan perairan sehingga dapat berfungsi sebagai bioindikator pencemaran lingkungan (Farombi et al., 2007; Rautenberg et al., 2015; Kim et al., 2017; Rajeshkumar and Li, 2018; Salgado et al., 2019; Sinha et al., 2020; Adeogun et al., 2020).

Biomarker telah digunakan secara luas dalam program biomonitoring dan studi ilmiah untuk mengevaluasi kualitas air dan kesehatan organisme perairan. Biomarker digunakan sebagai alat untuk mengevaluasi efek sublethal pada organisme perairan pada tingkat biologis yang berbeda (Calado et al., 2020), sehingga dapat mencegah efek buruk pada ekosistem perairan dan memberikan informasi untuk program konservasi pada lingkungan yang

terkontaminasi. Menurut beberapa ahli, ada beberapa jenis biomarker yaitu biokimia (pengukuran aktivitas enzim); kimia (kuantifikasi senyawa) (Salgado et al., 2019); genotoksik (pengukuran kerusakan DNA); morfologis (histopatologi); osmoregulatori (pengaturan ion) (Calado et al., 2020). Penerapan respons biomarker pada studi ekotoksikologi perairan di dunia telah dilaporkan, misalnya penggunaan respons biomarker akibat efek logam berat pada kawasan konservasi laut; respons biomarker akibat paparan pestisida di sungai yang dipengaruhi oleh kegiatan pertanian (Vieira et al., 2017); analisis biomarker stres oksidatif dan aktivitas enzim antioksidan sebagai penentu kesehatan ikan setelah terpapar kontaminan logam berat (Santana et al., 2018); dan respons biomarker akibat kontaminan campuran dalam reservoir pasokan air di lingkungan pesisir (Calado et al., 2020); analisis histopatologis, integritas DNA dan status enzim antioksidan seluler dalam jaringan ikan; analisis molekuler dan DNA untuk mendeteksi kerusakan DNA serta perubahan gen dan kromosom akibat polutan genotoksik (Ben Ameur et al., 2012; Etteieb, et al, 2019).

Biomarker stres oksidatif sering digunakan untuk menganalisis respons akibat paparan toksikan logam berat, karena mekanisme toksisitasnya melalui induksi stres oksidatif. Stres oksidatif adalah ketidakseimbangan antara produksi senyawa oksigen reaktif (ROS) dan sistem detoksifikasi biologis, yaitu respons antioksidan, seperti SOD, CAT, GSH, dan GST (Nofal, et al., 2019), oleh karena itu respons antioksidan dan kerusakan oksidatif menjadi indikator yang andal dan sensitif untuk mengevaluasi stres oksidatif pada ikan yang terpapar logam berat (Lee et al., 2019). Kerusakan oksidatif yang terjadi akibat induksi ROS yaitu peroksidasi lipid, oksidasi protein, kerusakan DNA, dan penghambatan enzim.

Keunggulan biomarker sebagai alat biomonitoring adalah menghasilkan indikator yang sensitif walau pada konsentrasi polutan logam berat yang rendah (Lionetto, et al., 2019), jika dibandingkan dengan analisis fisika kimia air. Analisis fisika kimia sampel badan air dapat memberikan gambaran tentang terjadinya polutan, menentukan keberadaan dan kandungan polutan logam berat dalam air secara langsung, dan menentukan kuantifikasinya secara rinci di lingkungan, tetapi tidak bisa memberikan informasi tentang bioavailabilitasnya atau mekanisme toksisitasnya pada biota perairan (Sweidan et al., 2015). Analisis kimia perairan biasanya mahal dan beberapa bahan kimia kontaminan yang muncul serta metabolitnya (misalnya nanometal) belum bisa dianalisis (Bertrand et al., 2018), oleh karena itu, aplikasi biomarker berupa respons biokimia, fisiologis dan histopatologis dikembangkan untuk mengevaluasi paparan dan respons dampak

polutan logam berat pada lingkungan estuari dan lahan basah pesisir (Bertrand, et al., 2016).

Ballesteros et al, (2017) merekomendasikan penggunaan serangkaian biomarker komplementer untuk studi paparan logam berat pada perairan estuari dan lahan basah pesisir yang menerima berbagai sumber kontaminasi. Dane & Şişman (2020) menambahkan bahwa biomarker biokimia, molekuler, dan histopatologis lazim digunakan untuk menilai efek kontaminan logam berat pada lingkungan perairan. Serangkaian biomarker tersebut digunakan untuk melengkapi evaluasi analisis fisika kimia air dan sedimen, sehingga program biomonitoring dalam mendeteksi dampak polusi pada lingkungan perairan berjalan efektif.

Ikan gelodok sebagai alat biomonitoring potensial pencemaran logam berat di lahan basah pesisir

Polusi logam berat pada perairan estuari mengakibatkan gangguan biologis pada organisme, yang dapat diidentifikasi dan diukur toksisitasnya dengan uji biologis spesifik pada ikan gelodok sebagai bioindikator yang cocok. Deteksi dini respons biomarker pada bioindikator yang cocok berperan penting dalam keberhasilan biomonitoring sebelum efek polutan logam berat berdampak buruk kepada seluruh populasi atau komunitas (Georgieva et al., 2016; de Almeida Duarte et al. 2017; Bouzahouane et al. 2018). Metode biomonitoring lebih efektif dan efisien dibandingkan dengan monitoring kualitas air secara kimia. Analisis kimia perairan memang memberikan informasi langsung tentang identitas, keberadaan, dan jumlah kandungan zat kimia beracun pada biota air, badan air, dan sedimen. Namun, tidak bisa memberikan informasi tentang ketersediaan hayati dan mekanisme efek toksisitasnya pada biota perairan (Seriani et al., 2015; Sweidan et al., 2015) serta tidak bisa mengevaluasi efeknya langsung kepada organisme, populasi, dan komunitas (Montenegro et al., 2020). Kekurangan dari monitoring tersebut dapat disempurnakan dengan strategi metode biomonitoring.

Ikan gelodok sering digunakan sebagai bioindikator dalam biomonitoring kualitas perairan estuari, khususnya pada ekosistem rawa pesisir. Rawa pesisir merupakan rawa pasang-surut bagian dari ekosistem estuari. Ikan ini memiliki keunikan biologis yang berbeda dari ikan pada umumnya yaitu bersifat seperti amfibi karena bisa bernapas di darat dan di air serta memiliki toleransi yang luas terhadap stresor lingkungan, hidup secara bentik, dan memiliki ketahanan terhadap kontaminan organik dan anorganik. Selain itu, ikan ini terdistribusi luas, kelimpahan alaminya banyak, berada di puncak

rantai makanan, dan bioindikator yang sesuai untuk efek toksik polutan jangka panjang (Hidayaturrahmah et al., 2019; Nimet et al., 2020). Mudskippers hidup di lumpur pada zona intertidal pesisir dan lantai hutan mangrove pada daerah tropis dan subtropis (Ghotbeddin & Roomiani, 2020), yang dikenal sebagai tipe habitat yang paling terdegradasi di muka bumi karena secara terus menerus terpapar oleh pencemaran logam berat yang bersumber dari aktivitas antropogenik (Ferreira et al., 2019; Marques et al., 2019), maupun secara alami seperti sedimentasi dan banjir (Barbee et al., 2014; Zhang et al., 2019). Hal ini mengakibatkan mudskippers beresiko terpapar logam berat. Ikan ini dapat menyerap logam berat dalam berbagai cara pemaparan yaitu kontak, tertelan, minum dan terhirup (Barbee et al., 2014). Logam berat mampu merangsang produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang berlebihan dalam sistem biologis, yang berdampak terjadinya kelainan pada proses metabolisme seluler sehingga mengakibatkan stres oksidatif (Basirun et al., 2019; Gavrić et al., 2019). Sistem pertahanan antioksidan yang terbentuk sebagai respons stres oksidatif digunakan sebagai biomarker dalam program biomonitoring untuk penilaian risiko kontaminan (van der Oost et al., 2003). Jika logam berat menyebabkan ketidakseimbangan dalam reaksi redoks seluler maka mengakibatkan kerusakan pada lipid, protein dan DNA serta terjadi efek karsinogenik dan immunosuppression (Gao et al., 2019; Lee et al., 2019; Sinha et al., 2020).

Upaya penelitian intensif terus dilakukan untuk mengembangkan biomarker pada ikan gelodok untuk biomonitoring polusi logam berat pada ekosistem rawa pesisir. Tujuan penulisan buku ini adalah untuk menyajikan informasi komprehensif tentang potensi ikan gelodok sebagai spesies bioindikator dengan mengkaji respons biomarker terhadap polutan logam berat untuk mengevaluasi polusi pada lingkungan rawa pesisir. Biomarker stres oksidatif, genotoksisitas dan imunotoksisitas berpotensi sebagai alat deteksi dini dalam program biomonitoring (Radwan et al., 2020). Teknik diagnostik biomarker saat ini telah dikembangkan dalam ekotoksikologi lingkungan karena handal, tepat, ramah lingkungan dan murah untuk identifikasi peringatan dini kontaminasi logam berat pada ikan.

Ikan gelodok berpotensi digunakan sebagai bioindikator pencemaran dalam ekosistem rawa pesisir sejak tahun 1980 an sampai sekarang, karena mempunyai karakter morfologi dan ekologi yang khas, terdistribusi luas, fauna khas dan asli mangrove, kehidupan unik seperti amfibi, dapat mengakumulasi polutan yang berbeda, terpapar langsung dengan berbagai polutan, dan organisme euryhaline (Ansari et al., 2014; Bertrand et al., 2018). Ikan ini termasuk *sentinel organism*

(organisme penjaga) yang cocok untuk mendeteksi efek polusi di badan air dan sedimen. Syarat sebagai sentinel organism harus memiliki beberapa karakteristik khusus seperti distribusi geografis yang luas, sensitivitas yang tinggi terhadap polutan lingkungan dan menjadi spesies dominan di habitatnya (Shirani, et al., 2012a; 2012b). Penelitian potensi mudskippers sebagai spesies bioindikator pencemaran logam berat dan polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) di beberapa negara pada awalnya dimulai dengan kajian bioakumulasi logam berat pada berbagai jaringan tubuhnya, berkembang menjadi kajian tentang respons perilaku dan respons biomarker (Tabel 2).

Tabel 2. Ringkasan variasi respons biomarker pada ikan gelodok terhadap polusi logam berat

Species ikan gelodok	Logam berat	Rute paparan	Organ	Respons	Referensi
<i>Zosterisessor ophiocephalus</i> grass goby	Hg & Se	Situs tambang dan industri	Jaringan lunak	Bioakumulasi	(Acquavita & Bettoso, 2018)
<i>Gobius boddarti</i>	Fe, Cu, Zn, Cd and Pb	Situs yang tercemar	Jaringan lunak	Bioakumulasi	(Ahmed et al. 2011)
<i>Periophthalmodon schlosseri</i> giant mudskipper	Cu, Zn, Pb, Cd and Ni	Situs yang tercemar	Sisik, otot, tulang, insang, operkulum, usus, hati, kartilago	Bioakumulasi	(Buhari & Ismail, 2016)
<i>Periophthalmus waltoni</i>	Zn, Cu, Cd and Fe	Situs yang tercemar	Otot, insang, hati	Bioakumulasi	(Bu-Olayan & Thomas, 2008)
<i>Periophthalmus dips</i>	Logam berat	Situs yang tercemar	Hati, otak, otot	Enzim ATPase yang bergantung pada ion di hati, otak, dan jaringan otot	(Chhaya et al., 1997)

Species ikan gelodok	Logam berat	Rute paparan	Organ	Respons	Referensi
<i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	Stres panas	Eksperimen	Hati, insang, testis	<i>Heat shock protein 90 (HSP90)</i> dan <i>Stip1</i> diekspresikan dengan kuat di testis. <i>HSP90AB</i> dan <i>Stip1</i> ditemukan di dalam spermatosit, spermatid, dan spermatozoa.	(Du et al., 2019)
<i>Periophthalmus koelreuteri</i>	Cu, Zn, Pb	Situs yang tercemar	Otot, insang, hati	Bioakumulasi	(Eboh et al. 2006)
<i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	Cd	Eksperimen	Testis	Morfologi abnormal dan ekspresi mRNA MT di testis; Lokalisasi MT di sitoplasma sel germinal	(Han et al., 2015)
<i>Periophthalmodon schlosseri</i>	Logam berat	Situs yang tercemar	Otot	Data profil protein: 20 pita protein dengan berat molekul mulai dari 32 hingga 185 kDa	(Hidayaturrahman et al., 2019)
<i>Periophthalmodon schlosseri</i>	Zn, Cu, Cd, and Pb	Situs yang tercemar	Sisik, otot, tulang, insang, hati	Bioakumulasi	(Ikram et al., 2010)
<i>Neogobius melanostomus (the Round Goby)</i>	Pb, Cd, Cu	Situs yang tercemar	Gonad, hati	Peningkatan aktivitas enzim antioksidan dan tingkat protein serum teroksidasi. Penurunan ukuran dan berat gonad & hati	(Kovyrshina & Rudneva, 2018)
<i>Neogobius melanostomus</i>	Logam berat	Situs yang tercemar	Darah	Aktivitas enzim antioksidan (CAT, SOD, PER, GR, NADP, GT) dan kandungan protein teroksidasi dalam darah	(Kovyrshina & Rudneva, 2016)

Species ikan gelodok	Logam berat	Rute paparan	Organ	Respons	Referensi
<i>Periophthalmus argentilineatus</i>	Al, Zn, Fe, Pb, Cd, Cu, Co, Cr, Sn, Ni	Situs yang tercemar	Otot	Bioakumulasi	(Kruitwagen et al. 2008)
<i>Periophthalmus modestus</i>	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	Situs yang tercemar	Otot	Bioakumulasi	(Q. Liu et al., 2019)
<i>Periophthalmodon schlosseri</i>	Hg, MeHg, Se	Situs yang tercemar	Otot, hati, insang, usus	Bioakumulasi	(Looi et al., 2016)
<i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	Pb	Eksperimen	Insang, hati	Aktivitas enzim antioksidan (SOD, CAT, GPX, GSH), kandungan malondialdehid (MDA), ekspresi gen SOD, GST, HSP-70 dan HSP-90 pada insang dan hati	(Jing et al., 2017)
<i>Gobius niger</i>	Logam berat	Situs yang tercemar	Gonad, hati, otot	Respons dari rangkaian biomarker biokimia: konsentrasi protein total, aktivitas ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD), aktivitas Glutathione S-transferase (GST), konsentrasi glutathione total (GSHtot), pembentukan TBARS	(Louiz et al., 2016)
<i>Periophthalmus sp</i>	Cr, Ni, Cu, Pb, Ag, Cd	Situs yang tercemar	Otot	Bioakumulasi	(Moslen & Miebaka, 2016)

Species ikan gelodok	Logam berat	Rute paparan	Organ	Respons	Referensi
<i>Boleophthalmus boddarti</i>	Zn, Mn, Cu, Fe, Co, Ni, Cd, Cr, Pb, Sr	Situs yang tercemar	Otot	Bioakumulasi	(Patel et al., 1985)
<i>Periophthalmodon schlosseri</i>	Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn	Eksperimen	Otak	Penghambatan aktivitas asetilkolinesterase	(Sabullah et al., 2015)
<i>Periophthalmus waltoni</i>	Pb, Zn, Ni, V	Situs yang tercemar	Darah	Kadar enzim plasma (alkaline phosphatase dan alanine aminotransferase) lebih tinggi pada ikan dari lokasi yang tercemar.	(Sarhadizadeh, et al., 2014)
<i>Pseudapocryptes lanceolatus</i>	Fe, Cu, Ag	Situs yang tercemar	Organ indra penciuman	Bioakumulasi & gangguan neurodegeneratif pada neuron reseptor sensorik penciuman bersilia (olfactory sensory receptor neuron)	(Sarkar & De, 2016)

Sumber: Santoso et al. (2020)

Penggunaan biomarker telah mendapat perhatian besar pada akhir-akhir ini sebagai parameter sensitif untuk memperkirakan paparan atau efek yang ditimbulkan oleh polusi logam berat. Biomarker yang ditemukan dan diklaim berhasil dalam program biomonitoring rutin harus dapat diterapkan di laboratorium dan kondisi lapangan. Beberapa biomarker telah dikaji untuk mendeteksi dan memahami efek buruk dari polutan logam berat seperti biomarker stres oksidatif, genotoksisitas, dan imunotoksisitas. Biomarker tersebut berperan sebagai alat diagnostik untuk memantau dampak polusi. Biomarker ini dapat memberikan informasi tentang deteksi dini dan kuantifikasi dampak-dampak polutan selama manifestasi awal sehingga dapat melakukan upaya preventif dan/atau restoratif secepatnya pada ekosistem yang terkena dampak. Kajian tentang respons biomarker stres oksidatif pada ikan gelodok lebih berkembang dibandingkan

respons imunotoksisitas dan genotoksisitas, sehingga membuka peluang untuk melakukan penelitian pada masa yang akan datang.

Kajian ikan gelodok sebagai bioindikator polusi logam berat belum banyak dilakukan di wilayah rawa pesisir Indonesia, tetapi telah banyak dilakukan di Semenanjung Malaysia dan Teluk Persia. Ikan gelodok digunakan sebagai biomonitoring pencemaran logam berat di Semenanjung Malaysia dengan uji penghambatan asetilkolinesterase (Sabullah et al., 2015), sedangkan di Teluk Persia sebagai bioindikator pencemaran senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (Ansari et al., 2014; Sinaei & Mashinchian., 2014). Ikram et al. (2010) menambahkan bahwa ikan gelodok berpotensi sebagai organisme biomonitoring yang potensial untuk bioavailabilitas logam berat Cd dan Pb yang mengkontaminasi lumpur pantai zona intertidal Semenanjung Malaysia. Ikan gelodok berpotensi sebagai bioindikator dalam studi ekotoksikologi di lingkungan estuari karena memiliki karakter morfologis dan ekologis yang khas seperti terpapar langsung dengan berbagai polutan, distribusinya luas, organisme euryhaline, toleransi terhadap perubahan parameter kualitas air, menyerap dan mengakumulasi polutan yang berbeda.

Penelitian Jing et al. (2017) menyatakan bahwa ikan gelodok yang terpapar dengan logam berat Pb mengakibatkan produksi senyawa oksigen reaktif (ROS) yang berlebihan sehingga menyebabkan stres oksidatif. Stres oksidatif diyakini sebagai jalur utama untuk memulai toksisitas logam berat pada ikan. Stres oksidatif adalah ketidakseimbangan antara produksi ROS dan respons antioksidan seluler, seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), glutathione peroksidase (GPx), glutathione (GSH), dan glutathione s-transferase (GST), oleh karena itu respons antioksidan dan kerusakan oksidatif menjadi biomarker yang andal dan sensitif untuk mengevaluasi stres oksidatif pada ikan yang terpapar logam berat (Beg et al., 2015; Lee et al., 2019; Adeogun et al., 2020). Untuk meminimalkan efek negatif ROS, ikan membentuk sistem pertahanan antioksidan yang efektif, meliputi antioksidan enzimatis seperti CAT, GPx, glutathione reduktase (GR), glukosa-6-fosfat dehydrogenase (G6PDH), dan GST, serta antioksidan non-enzimatis seperti GSH dan metalothioneins (Livingstone, 2001; Ferreira et al., 2019; Sinha et al., 2020). Sistem antioksidan ini melindungi sel dari peroksidasi lipid, oksidasi protein, dan kerusakan DNA/RNA dengan mengeliminasi produksi ROS dan radikal bebas (Do et al., 2019).

Thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) digunakan untuk mengukur peroksidasi lipid (Ponton et al., 2016). Peroksidasi lipid menyebabkan stres oksidatif dan menyebabkan terganggunya

fungsi sel (Li et al., 2010; Kim et al., 2017). Lee et al. (2019) melaporkan bahwa Pb mempengaruhi mekanisme peroksidasi lipid (LPO) pada hewan dan manusia. Selain itu, peningkatan TBARS karena terpapar Pb mengakibatkan stres oksidatif pada ikan. Stres oksidatif oleh toksisitas Pb menyebabkan peroksidasi lipid (LPO) pada membran biologis. TBARS dengan MDA adalah indikator sensitif untuk mendeteksi peroksida lipid sebagai produk dari peroksidasi lipid membran (Do et al., 2019). Lee et al. (2019) menyarankan agar peroksidasi lipid dan kadar TBARS pada ikan yang mengalami stres oksidatif karena terpapar logam berat dan toksikan lingkungan lainnya digunakan untuk menunjukkan tingkat peroksidasi lipid. Produksi ROS yang berlebihan karena toksisitas logam berat akan menginduksi peningkatan TBARS dan menyebabkan stres oksidatif pada insang, usus, otak dan otot ikan sehingga mengakibatkan kerusakan sel (Kaya and Akbulut, 2015). TBARS berpotensi sebagai biomarker stres oksidatif pada ikan karena ikan mengandung banyak asam lemak tidak jenuh tinggi (HUFA: highly unsaturated fatty acids) (Copat et al., 2019). Pernyataan ini sejalan dengan hasil penelitian Louiz et al. (2016) yang menggunakan kadar GST dan TBARS sebagai biomarker stres oksidatif pada *Gobius niger* (Gobiidae) yang terpapar logam berat pada laguna Bizerta, Tunisia. Jadi paparan Pb mengakibatkan efek toksik pada ikan dengan menginduksi stres oksidatif dan produksi ROS, serta respons antioksidan seperti SOD, CAT, GSH, GST dan TBARS. Respons munculnya antioksidan dan TBARS merupakan biomarker utama stres oksidatif pada ikan yang terpapar Pb (Lee et al., 2019).

Paparan logam berat pada perairan estuari selain mengakibatkan stres oksidatif juga mengakibatkan genotoksisitas pada ikan. Asal nukleat atau DNA akan mengalami modifikasi akibat induksi ROS yang berlebihan. Oleh karena DNA sangat penting bagi sel, sehingga dikembangkan metode yang relevan guna mengevaluasi modifikasi DNA yang diinduksi oleh ROS. Metode HPLC dan teknik imunologi digunakan untuk mengukur pembentukan basa teroksidasi pada ikan, khususnya 8-oksoguanin (8-OG). Sedangkan uji Comet digunakan untuk mendeteksi variasi kerusakan DNA dan digunakan sebagai biomarker genotoksisitas pada ikan yang terpapar logam berat (Lushchak, 2011; Ben Ameur et al., 2012; Ghisi et al., 2017). Namun, penelitian tentang biomarker genotoksisitas akibat paparan logam berat pada ikan gelodok belum ditemukan informasinya, sehingga perlu dilakukan penelitian untuk kepentingan biomonitoring.

Paparan logam berat pada perairan estuari juga mengakibatkan gangguan pada respons imun ikan. Sebagai contoh, selain Pb telah mengakibatkan perubahan fungsi kekebalan pada ikan, Pb juga telah

mengakibatkan gangguan fisiologis, biokimia, dan neurologis (Paul, et al., 2014). Dunier (1996) mengemukakan bahwa paparan Pb pada ikan menginduksi penurunan aktivitas hematopoietik di limpa, aktivitas fagositik dan penurunan produksi antibodi. Adeyemo et al. (2010) telah melaporkan bahwa stimulasi sistem kekebalan dan kerusakan jaringan pada ikan yang terpapar Pb dapat menyebabkan peningkatan limfosit. Namun, paparan jangka panjang menyebabkan penurunan limfosit dan sel darah putih karena cedera pada sistem kekebalan. Sel darah putih dan jumlah limfosit pada ikan yang terpapar Pb mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh sekresi kortisol sebagai respons stres akibat terpapar Pb, sehingga memperpendek umur limfosit atau meningkatkan apoptosisnya. Paparan logam berat secara signifikan menurunkan titer antibodi ikan. Lee et al. (2019) melaporkan bahwa paparan Pb memengaruhi respons imun untuk faktor-faktor seperti imunoglobulin plasma M (Ig M) dan aktivitas lisozim. Pb diketahui mempengaruhi respon imun dengan mengontrol ekspresi sitokin (Yin et al., 2018). Sitokin termasuk interleukin (ILs) dan tumor necrosis factor (TNF) adalah protein yang mengatur sinyal pada berbagai sel sehingga menyebabkan respon imun dan berperan penting dalam mengatur mekanisme imun. Interleukin 10 (IL-10) terlibat dalam respon imun inflamasi seluler dan tumor necrosis factor- α (TNF- α) terlibat dalam inflamasi, apoptosis dan respon imun (Dai et al., 2018). Ekspresi mRNA IL-10 dan TNF- α meningkat pada ikan crucian carp yang terpapar Pb sehingga mengakibatkan kerusakan serius pada aktivitas sistem kekebalan ikan (Dai et al., 2018).

Logam berat seperti Pb juga mempengaruhi respon imun dengan menginduksi aktivitas mitogen-activated protein kinase (MAPKs). MAPK berperan dalam mentransfer berbagai sinyal ke nukleus, seperti respons stres dan apoptosis. MAPK terdiri dari tiga sub-komponen yaitu extracellular signal-regulated kinases (ERKs), c-Jun amino-terminal kinases (JNKs) and the p38-subfamily (p38). ERK menginduksi proliferasi dan diferensiasi sel; JNK mengatur kelangsungan hidup sel dan apoptosis; p38 terlibat dalam inflamasi dan apoptosis (Cao et al., 2014). Selain itu, Pb juga merangsang ekspresi HSP70 pada ikan (Yin et al., 2018). HSP70 memiliki fungsi penting sebagai pendamping dalam transportasi intraseluler, dan produksi antigen spesifik tumor dengan mengaktifkan fungsi kekebalan sel T dan sel NK. Selain itu, HSP70 menginduksi sekresi sitokin seperti ILs dan TNFs (Radons and Multhoff, 2005).

Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa logam berat seperti Pb berdampak negatif pada respon imun seperti limfosit, leukosit, inflamasi dan apoptosis pada ikan. Pb tidak hanya

menghambat aktivitas berbagai biomolekul tetapi juga bertindak sebagai imunotoksitas dengan mengganggu transduksi sinyal intraseluler. Oleh karena itu, perubahan respon imun ikan telah digunakan sebagai indikator penting untuk menentukan efek toksik dari paparan logam berat (Lee et al., 2019). Namun penelitian tentang respons biomarker imunotoksitas akibat paparan logam berat pada ikan gelodok belum ditemukan informasinya, padahal ikan ini berpotensi sebagai organisme penjaga (*sentinel organism*) dan sebagai bioindikator pemantauan efek logam berat dalam program biomonitoring ekosistem rawa pesisir.

Daftar Pustaka

- Abd- Allah, M. M., Ramadan, A. A., Said, N. M., Ibrahim, I. H., & Abdelkarim, E. A. (2019). Effects of Cadmium Chloride and Glyphosate on Antioxidants as Biochemical Biomarkers in Nile Tilapia. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 10(1), 1-6.
- Abd El-Atti, M., Desouky, M. M. A., Mohamadien, A., & Said, R. M. (2019). Effects of titanium dioxide nanoparticles on red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*: Bioaccumulation, oxidative stress and histopathological biomarkers. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(1), 11-18.
- Abdel Rahman, A. N., ElHady, M., Hassanin, M. E., & Mohamed, A. A. R. (2019). Alleviative effects of dietary Indian lotus leaves on heavy metals-induced hepato-renal toxicity, oxidative stress, and histopathological alterations in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 509, 198-208.
- Abiona, O. O., Anifowose, A. J., Awojide, S. H., Adebisi, O. C., Adesina, B. T., & Ipinmoroti, M. O. (2019). Histopathological biomarking changes in the internal organs of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and catfish (*Clarias gariepinus*) exposed to heavy metals contamination from Dandaru pond, Ibadan, Nigeria. *Journal of Taibah University for Science*, 13(1), 903-911.
- Acquavita, A., & Bettoso, N. (2018). Mercury and selenium in the grass goby *Zosterisessor ophiocephalus* (Pisces: Gobiidae) from a mercury contaminated Mediterranean lagoon. *Marine Pollution Bulletin*, 135(April), 75-82.
- Adeogun, A. O., Ibor, O. R., Omiwole, R., Chukwuka, A. V., Adewale, A. H., Kumuyi, O., & Arukwe, A. (2020). Sex-differences in physiological and oxidative stress responses and heavy metals burden in the black jaw tilapia, *Sarotherodon melanotheron* from a tropical freshwater dam (Nigeria). *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 229(November 2019), 108676.
- Adeyemo, O., Adedeji, O., & Ofor, C. (2010). Blood lead level as biomarker of environmental lead pollution in feral and cultured African catfish (*Clarias gariepinus*). *Nigerian Veterinary Journal*, 31(2), 139-147.
- Ahmad, M. N., & Suleiman, N. K. (2019). Fish and Cardiometabolic

Concerns: A Link through Lead and Mercury. *American International Journal of Contemporary Research*, 9(4).

- Ahmed, K., Mehedi, Y., Haque, R., & Mondol, P. (2011). Heavy metal concentrations in some macrobenthic fauna of the Sundarbans mangrove forest, south west coast of Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 177(1–4), 505–514.
- Al-behbehani, B. E., & Ebrahim, H. M. A. (2010). Environmental Studies on the Mudskippers in the intertidal zone of Kuwait Bay. *Nature and Science*, 8(5), 79–89.
- Andreu, V., Gimeno-García, E., Pascual, J. A., Vazquez-Roig, P., & Picó, Y. (2016). Presence of pharmaceuticals and heavy metals in the waters of a Mediterranean coastal wetland: Potential interactions and the influence of the environment. *Science of the Total Environment*, 540, 278–286.
- Ansari, A. A., Trivedi, S., Saggi, S., & Rehman, H. (2014). Mudskipper: A biological indicator for environmental monitoring and assessment of coastal waters. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 2(6), 22–33. Retrieved from www.entomoljournal.com
- AnvariFar, H., Amirkolaie, A. K., Jalali, A. M., Miandare, H. K., Sayed, A. E. D. H., Üçüncü, S., Romano, N. (2018). Environmental pollution and toxic substances: Cellular apoptosis as a key parameter in a sensible model like fish. *Aquatic Toxicology*, 204, 144–159.
- Authman, M. M. (2015). Use of Fish as Bio-indicator of the Effects of Heavy Metals Pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000328>
- Aziz, N., Butt, A., & Elsheikha, H. M. (2020). Antioxidant enzymes as biomarkers of Cu and Pb exposure in the ground spiders *Lycosa terrestris* and *Pardosa birmanica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190(December 2019), 110054.
- Ballesteros, M. L., Rivetti, N. G., Morillo, D. O., Bertrand, L., Amé, M. V., & Bistoni, M. A. (2017). Multi-biomarker responses in fish (*Jenynsia multidentata*) to assess the impact of pollution in rivers with mixtures of environmental contaminants. *Science of the Total Environment*, 595, 711–722.
- Banaee, M., & Taheri, S. (2019). Metal bioaccumulation, oxidative stress, and biochemical alterations in the freshwater snail (*Galba truncatula*) exposed to municipal sewage. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 7(1), 8–17.

- Barbee, N. C., Ganio, K., & Swearer, S. E. (2014). Integrating multiple bioassays to detect and assess impacts of sublethal exposure to metal mixtures in an estuarine fish. *Aquatic Toxicology*, 152, 244–255.
- Basirun, A. A., Ahmad, S. A., Yasid, N. A., Sabullah, M. K., Daud, H. M., Sha'arani, S., Shukor, M. Y. (2019). Toxicological effects and behavioural and biochemical responses of *Oreochromis mossambicus* gills and its cholinesterase to copper: a biomarker application. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 887–898.
- Beg, M. U., Al-Jandal, N., Al-Subiai, S., Karam, Q., Husain, S., Butt, S. A., Al-Husaini, M. (2015). Metallothionein, oxidative stress and trace metals in gills and liver of demersal and pelagic fish species from Kuwait's marine area. *Marine Pollution Bulletin*, 100(2), 662–672.
- Ben Ameer, W., de Lapuente, J., El Megdiche, Y., Barhoumi, B., Trabelsi, S., Camps, L., Borràs, M. (2012). Oxidative stress, genotoxicity and histopathology biomarker responses in mullet (*Mugil cephalus*) and sea bass (*Dicentrarchus labrax*) liver from Bizerte Lagoon (Tunisia). *Marine Pollution Bulletin*, 64(2), 241–251.
- Bernet, D., Schmidt, H., Meier, W., Burkhardt-Holm, P., Wahli, T., Kueng, C., Cáceres-Vélez, P. R. (1999). Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution. *Journal of Fish Diseases*, 22, 25–34.
- Bertrand, L., Asis, R., Monferrán, M. V., & Amé, M. V. (2016). Bioaccumulation and biochemical response in South American native species exposed to zinc: Boosted regression trees as novel tool for biomarkers selection. *Ecological Indicators*, 67, 769–778.
- Bertrand, L., Monferrán, M. V., Métais, I., Mouneyrac, C., & Amé, M. V. (2015). MTs in *Palaemonetes argentinus* as potential biomarkers of zinc contamination in freshwaters. *Ecological Indicators*, 48, 533–541.
- Bertrand, L., Monferrán, M. V., Mouneyrac, C., & Amé, M. V. (2018). Native crustacean species as a bioindicator of freshwater ecosystem pollution: A multivariate and integrative study of multi-biomarker response in active river monitoring. *Chemosphere*, 206, 265–277.

- Bertrand, L., Monferrán, M. V., Mouneyrac, C., Bonansea, R. I., Asis, R., & Amé, M. V. (2016). Sensitive biomarker responses of the shrimp *Palaemonetes argentinus* exposed to chlorpyrifos at environmental concentrations: Roles of alpha-tocopherol and metallothioneins. *Aquatic Toxicology*, 179, 72–81.
- Bittarello, A. C., Vieira, J. C. S., Braga, C. P., de Paula Araújo, W. L., da Cunha Bataglioli, I., da Silva, J. M., de Magalhães Padilha, P. (2019). Characterization of molecular biomarkers of mercury exposure to muscle tissue of *Plagioscion squamosissimus* and *Colossoma macropomum* from the Amazon region. *Food Chemistry*, 276(March 2018), 247–254.
- Bouzahouane, H., Barour, C., Sleimi, N., & Ouali, K. (2018). Multi-biomarkers approach to the assessment of the southeastern Mediterranean Sea health status: Preliminary study on *Stramonita haemastoma* used as a bioindicator for metal contamination. *Chemosphere*, 207, 725–741.
- Bu-Olayan, A. H., & Thomas, B. V. (2008). Trace metals toxicity and bioaccumulation in Mudskipper *Periophthalmus waltoni* Koumans 1941 (Gobiidae: Perciformes). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 8(2), 215–218.
- Buhari, T. R., & Ismail, A. (2016). Correlations between Geo-Chemical Speciation of Heavy Metals (Cu, Zn, Pb, Cd and Ni) in Surface Sediments and Their Concentrations in Giant Mudskipper (*Periophthalmodon schlosseri*) Collected from the West Coast of Peninsular Malaysia. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04(01), 28–36.
- Bulloch, P., Schur, S., Muthumuni, D., Xia, Z., Johnson, W., Chu, M., Tomy, G. T. (2020). F2-isoprostanes in Fish mucus: A new, non-invasive method for analyzing a biomarker of oxidative stress. *Chemosphere*, 239, 124797.
- Cai, Y., Yin, Y., Li, Y., Guan, L., Zhang, P., Qin, Y., Li, Y. (2020). Cadmium exposure affects growth performance, energy metabolism, and neuropeptide expression in *Carassius auratus gibelio*. *Fish Physiology and Biochemistry*, 46(1), 187–197.
- Caimi, C., Gasco, L., Biasato, I., Malfatto, V., Varello, K., Prearo, M., Gai, F. (2020). Could Dietary Black Soldier Fly Meal Inclusion Affect the Liver and Intestinal Histological Traits and the Oxidative Stress Biomarkers of Siberian Sturgeon (*Acipenser baerii*) Juveniles?. *Animals*, 10(155), 1–16.

- Calado, S. L. de M., Santos, G. S., Vicentini, M., Bozza, D. C., Prodocimo, V., Magalhães, V. F. de, Silva de Assis, H. C. (2020). Multiple biomarkers response in a Neotropical fish exposed to paralytic shellfish toxins (PSTs). *Chemosphere*, 238.
- Cao, J., Chen, J., Wang, J., Klerks, P., & Xie, L. (2014). Effects of sodium fluoride on MAPKs signaling pathway in the gills of a freshwater teleost, *Cyprinus carpio*. *Aquatic Toxicology*, 152, 164–172.
- Cappello, T., Brandão, F., Guilherme, S., Santos, M. A., Maisano, M., Mauceri, A., Pereira, P. (2016). Insights into the mechanisms underlying mercury-induced oxidative stress in gills of wild fish (*Liza aurata*) combining 1H NMR metabolomics and conventional biochemical assays. *Science of the Total Environment*, 548–549, 13–24.
- Carvalho Neta, R. N. F., Mota Andrade, T. de S. de O., de Oliveira, S. R. S., Torres Junior, A. R., da Silva Cardoso, W., Santos, D. M. S., Brito, N. M. (2019). Biochemical and morphological responses in *Ucides cordatus* (Crustacea, Decapoda) as indicators of contamination status in mangroves and port areas from northern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16), 15884–15893.
- Chen, W., Hong, W., Chen, S., Wang, Q., & Zhang, Q. (2015). Population genetic structure and demographic history of the mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris* on the northwestern pacific coast. *Environmental Biology of Fishes*, 98(3), 845–856.
- Chhaya, J., Thaker, J., Mittal, R., Nuzhat, S., Mansuri, A. P., & Kundu, R. (1997). Influence of textile dyeing and printing industry effluent on ATPases in liver, brain, and muscle of mudskipper, *Periophthalmus dips*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 58(5), 793–800.
- Chowdhury, S., Saikia, S. K., & Bengal, W. (2020). Oxidative Stress in Fish : A Review. *Journal Of Scientific Research*, 12(1), 145–160.
- Copat, C., Rizzo, M., Zuccaro, A., Grasso, A., Zuccarello, P., Fiore, M., Ferrante, M. (2019). Metals / Metalloids and Oxidative Status Markers in Saltwater Fish from the Ionic Coast of Sicily , Mediterranean Sea. *International Journal of Environmental Research*, (0123456789).

- Corredor-Santamaría, W., Torres-Tabares, A., & Velasco-Santamaría, Y. M. (2019). Biochemical and histological alterations in *Aequidens metae* (Pisces, Cichlidae) and *Astyanax gr. bimaculatus* (Pisces, Characidae) as indicators of river pollution. *Science of The Total Environment*, 692, 1234–1241.
- da Silva Souza, T., Lacerda, D., Aguiar, L. L., Martins, M. N. C., & Augusto de Oliveira David, J. (2020). Toxic potential of sewage sludge: Histopathological effects on soil and aquatic bioindicators. *Ecological Indicators*, 111(August 2019).
- Dabruzzi, T. F., Fangué, N. A., Kadir, N. N., & Bennett, W. A. (2019). Thermal niche adaptations of common mudskipper (*Periophthalmus kalolo*) and barred mudskipper (*Periophthalmus argentilineatus*) in air and water. *Journal of Thermal Biology*, 81, 170–177.
- Dai, J., Zhang, L., Du, X., Zhang, P., Li, W., Guo, X., & Li, Y. (2018). Effect of lead on antioxidant ability and immune responses of crucian carp. *Biological Trace Element Research*, 186(2), 546–553.
- Dane, H., & Şişman, T. (2017). A histopathological study on the freshwater fish species chub (*Squalius cephalus*) in the Karasu River, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 41, 1–11.
- Dane, H., & Şişman, T. (2020). A morpho-histopathological study in the digestive tract of three fish species influenced with heavy metal pollution. *Chemosphere*, 242.
- de Almeida Duarte, L. F., de Souza, C. A., Pereira, C. D. S., & Pinheiro, M. A. A. (2017). Metal toxicity assessment by sentinel species of mangroves: In situ case study integrating chemical and biomarkers analyses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 367–376.
- de Oliveira, F. G., Lirola, J. R., Salgado, L. D., de Marchi, G. H., Mela, M., Padial, A. A., Silva de Assis, H. C. (2019). Toxicological effects of anthropogenic activities in *Geophagus brasiliensis* from a coastal river of southern Brazil: A biomarker approach. *Science of the Total Environment*, 667, 371–383.
- Decou, R., Bigot, S., Hourdin, P., Delmail, D., & Labrousse, P. (2019). Comparative in vitro/in situ approaches to three biomarker responses of *Myriophyllum alterniflorum* exposed to metal stress. *Chemosphere*, 222, 29–37.

- Delmond, K. A., Vicari, T., Guiloski, I. C., Dagostim, A. C., Voigt, C. L., Silva de Assis, H. C., Cestari, M. M. (2019). Antioxidant imbalance and genotoxicity detected in fish induced by titanium dioxide nanoparticles (NpTiO₂) and inorganic lead (PbII). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 67(September 2018), 42–52.
- Do, J. W., Saravanan, M., Nam, S. E., Lim, H. J., & Rhee, J. S. (2019). Waterborne manganese modulates immunity, biochemical, and antioxidant parameters in the blood of red seabream and black rockfish. *Fish and Shellfish Immunology*, 88, 546–555.
- Dragun, Z., Filipović Marijić, V., Krasnići, N., Ramani, S., Valić, D., Rebok, K., Erk, M. (2017). Malondialdehyde concentrations in the intestine and gills of Vardar chub (*Squalius vardarensis* Karaman) as indicator of lipid peroxidation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20), 16917–16926.
- Du, C., Han, Y. L., Hou, C. C., & Zhu, J. Q. (2019). Expression pattern of heat shock protein 90AB (HSP90AB) and stress-inducible protein 1 (Stip1) during spermatogenesis of mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part - B: Biochemistry and Molecular Biology*, 231, 42–51.
- Dunier, M. (1996). Water pollution and immunosuppression of freshwater fish. *Italian Journal of Zoology*, 63(4), 303–309.
- Eboh, L., Mepba, H. D., & Ekpo, M. B. (2006). Heavy metal contaminants and processing effects on the composition, storage stability and fatty acid profiles of five common commercially available fish species in Oron Local Government, Nigeria. *Food Chemistry*, 97(3), 490–497.
- EI-Ghamdi, F. A., El-Kasheif, M. A., Gaber, H. S., & Ibrahim, S. A. (2014). Histopathological Alterations in Fish Organs as Potential and Direct Biomarkers of Pollution. *Catrina: The International Journal of Environmental Sciences*, 9, 25–31.
- Etteieb, S., Tarhouni, J., & Isoda, H. (2019). Cellular stress response biomarkers for toxicity potential assessment of treated wastewater complex mixtures. *Water and Environment Journal*, 33(1), 4–13.
- Farombi, E. O., Adelowo, O. A., & Ajimoko, Y. R. (2007). Biomarkers of oxidative stress and heavy metal levels as indicators of environmental pollution in African cat fish (*Clarias gariepinus*) from Nigeria Ogun River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4(2), 158–165.

- Ferreira, C. P., Lima, D., Paiva, R., Vilke, J. M., Mattos, J. J., Almeida, E. A., Lüchmann, K. H. (2019). Metal bioaccumulation, oxidative stress and antioxidant responses in oysters *Crassostrea gasar* transplanted to an estuary in southern Brazil. *Science of the Total Environment*, 685, 332–344.
- Gao, X. Q., Fei, F., Huo, H. H., Huang, B., Meng, X. S., Zhang, T., & Liu, B. L. (2020). Effect of acute exposure to nitrite on physiological parameters, oxidative stress, and apoptosis in *Takifugu rubripes*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188(August 2019), 109878.
- Gao, Y., Kang, L., Zhang, Y., Feng, J., & Zhu, L. (2019). Toxicokinetic and toxicodynamic (TK-TD) modeling to study oxidative stress-dependent toxicity of heavy metals in zebrafish. *Chemosphere*, 220, 774–782.
- Gavrić, J., Despotović, S., Prokić, M., Gavrilović, B., Radovanović, T., Anđelković, M., Saičić, Z. (2019). Do different diets affect oxidative stress biomarkers and metal bioaccumulation in two snake species? *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 223(May), 26–34.
- Georgieva, E., Yancheva, V., Velcheva, I., Iliev, I., Vasileva, T., Bivolarski, V., Stoyanova, S. (2016). Histological and biochemical changes in liver of common carp (*Cyprinus carpio* L.) under metal exposure. *North-Western Journal of Zoology*, 12(2), 261–270.
- Ghisi, N. C., Oliveira, E. C., Guiloski, I. C., de Lima, S. B., Silva de Assis, H. C., Longhi, S. J., & Prioli, A. J. (2017). Multivariate and integrative approach to analyze multiple biomarkers in ecotoxicology: A field study in Neotropical region. *Science of the Total Environment*, 609, 1208–1218.
- Ghotbeddin, N. N., & Roomiani, L. (2020). Identification and the First Record of Marine bacteria Mudskippers *Boleophthalmus dussumieri* (Valenciennes , 1837) by 16S rRNA on the Northern Intertidal areas of Persian Gulf , Iran. *Reserach Square*, 1–20.
- Gomes, D. F., Moreira, R. A., Sanches, N. A. O., do Vale, C. A., Daam, M. A., Gorni, G. R., & Bastos, W. R. (2020). Dynamics of (total and methyl) mercury in sediment, fish, and crocodiles in an Amazonian Lake and risk assessment of fish consumption to the local population. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2).

- Han, Y. L., Sheng, Z., Liu, G. Di, Long, L. L., Wang, Y. F., Yang, W. X., & Zhu, J. Q. (2015). Cloning, characterization and cadmium inducibility of metallothionein in the testes of the mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 1-8.
- Hanson, N. 2008. Does Fish Health Matter? The Utility of Biomarkers in Fish for Environmental Assessment. Doctoral Thesis In *Applied Environmental Pollution*. Department of Plant and Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Gothenburg, Göteborg, Sweden.
- Hernández, A. F., Gil, F., & Tsatsakis, A. M. (2014). Biomarkers of chemical mixture toxicity. *Biomarkers in Toxicology*, 655-669.
- Hidayaturrehman, Mabrur, **Santoso, H. B.**, Sasmita, R., Rahmy, U. S. A., & Badruzsaufari. (2019). Short communication: Protein profiles of giant mudskipper and its potential use as biomarker candidate for heavy metal contamination in Barito Estuary, Indonesia. *Biodiversitas*, 20(3), 745-753.
- Hidayaturrehman, **Santoso, H.B.**, Nurapriana, D., Badruzsaufari, Muhamat. (2019). Digenea parasites in giant mudskipper (*Periophthalmodon schlosseri*) in Kuala Lupak Village, South Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* (20):12.
- Hidayaturrehman, & Muhamat. (2013). Habitat Ikan Timpakul (*Periophthalmodon schlosseri*) di Muara Sungai Barito. *Enviro Scientiae*, 9, 35-44.
- Hikmah, S. (2017). Struktur Sarang Ikan Timpakul (*Periophthalmodon Schlosseri*) Di Desa Tanipah Muara Sungai Barito Kalimantan Selatan. Skripsi (Tidak dipublikasikan). FMIPA ULM, Banjarbaru.
- Ikram, M. M., Ismail, A., Yap, C. K., & Nor Azwady, A. A. (2010). Levels of heavy metals (Zn, Cu, Cd, and Pb) in mudskippers (*Periophthalmodon schlosseri*) and sediments collected from intertidal areas at Morib and Remis, Peninsular Malaysia. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 92(8), 1471-1486.
- Ip, Y. K., & Chew, S. F. (2010). Ammonia production, excretion, toxicity, and defense in fish: A review. *Frontiers in Physiology*, 1 Oct(October), 1-20.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72.

- Jakimska, A., Konieczka, P., Skóra, K., & Namieśnik, J. (2011). Bioaccumulation of Metals in Tissues of Marine Animals, Part I: the Role and Impact of Heavy Metals on Organisms. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 20, No. 5, 1117–1125.
- Javed, M., Ahmad, I., Usmani, N., & Ahmad, M. (2016). Studies on biomarkers of oxidative stress and associated genotoxicity and histopathology in *Channa punctatus* from heavy metal polluted canal. *Chemosphere*, 151, 210–219.
- Javed, M., Ahmad, M. I., Usmani, N., & Ahmad, M. (2017). Multiple biomarker responses (serum biochemistry, oxidative stress, genotoxicity and histopathology) in *Channa punctatus* exposed to heavy metal loaded waste water. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11.
- Javed, M., & Usmani, N. (2017). An Overview of the Adverse Effects of Heavy Metal Contamination on Fish Health. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 1–15.
- Jiaxin, S., Shengchen, W., Yirong, C., Shuting, W., & Shu, L. (2020). Cadmium exposure induces apoptosis, inflammation and immunosuppression through CYPs activation and antioxidant dysfunction in common carp neutrophils. *Fish and Shellfish Immunology*, 99, 284–290.
- Jing, D., Li, M., Zhang, Y., Yuan, L., Wang, R., & Gong, Y. (2017). Differential Induction of Enzymes and Genes Involved in Oxidative Stress in Gill and Liver Tissues of Mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris* Exposed to Lead. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 17, 1387–1395.
- Kaloyianni, M., Dimitriadi, A., Ovezik, M., Stamkopoulou, D., Feidantsis, K., Kastrinaki, G., Bobori, D. (2020). Magnetite nanoparticles effects on adverse responses of aquatic and terrestrial animal models. *Journal of Hazardous Materials*, 383(August 2019), 121204.
- Kaya, H., & Akbulut, M. (2015). Effects of waterborne lead exposure in Mozambique Tilapia: Oxidative stress, osmoregulatory responses, and tissue accumulation. *Journal of Aquatic Animal Health*, 27(2), 77–87.
- Kim, J. H., Oh, C. W., & Kang, J. C. (2017). Antioxidant responses, neurotoxicity, and metallothionein gene expression in Juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegelii* under dietary lead exposure. *Journal of Aquatic Animal Health*, 29(2), 112–119.

- Kim, K. W., Sreeja, S. R., Kwon, M., Yu, Y. L., & Kim, M. K. (2020). Association of blood mercury level with the risk of depression according to fish intake level in the general Korean population: Findings from the Korean national health and nutrition examination survey (KNHANES) 2008–2013. *Nutrients*, 12(1), 1–13.
- Kovacik, A., Tvrda, E., Miskeje, M., Arvay, J., Tomka, M., Zbynovska, K., Massanyi, P. (2019). Trace Metals in the Freshwater Fish *Cyprinus carpio*: Effect to Serum Biochemistry and Oxidative Status Markers. *Biological Trace Element Research*, 188(2), 494–507.
- Kovyrshina, T. B., & Rudneva, I. I. (2016). The effects of coastal water pollution of the Black Sea on the blood biomarkers of the round goby *Neogobius melanostomus* Pallas, 1811 (Perciformes: Gobiidae). *Russian Journal of Marine Biology*, 42(1), 58–64.
- Kovyrshina, T. B., & Rudneva, I. I. (2018). The Response of Blood Biomarkers of the Round Goby *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) (Perciformes: Gobiidae) to Chronic Coastal Pollution in the Sea of Azov. *Russian Journal of Marine Biology*, 44(4), 328–333.
- Kruitwagen, G., Pratap, H. B., Covaci, A., & Wendelaar Bonga, S. E. (2008). Status of pollution in mangrove ecosystems along the coast of Tanzania. *Marine Pollution Bulletin*, 56(5), 1022–1031.
- Kuang, S., Le, Q., Hu, J., Wang, Y., Yu, N., Cao, X., Yan, X. (2020). Effects of p-nitrophenol on enzyme activity, histology, and gene expression in *Larimichthys crocea*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 228.
- Kumar, N., Krishnani, K. K., Meena, K. K., Gupta, S. K., & Singh, N. P. (2017). Oxidative and cellular metabolic stress of *Oreochromis mossambicus* as biomarkers indicators of trace element contaminants. *Chemosphere*, 171, 265–274.
- Kumar, N., Krishnani, K. K., & Singh, N. P. (2019). Oxidative and Cellular Metabolic Stress of Fish: An Appealing Tool for Biomonitoring of Metal Contamination in the Kolkata Wetland, a Ramsar Site. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(3), 469–482.
- Kumaraguru, A., Mary, R. C., & Saisaraswathi, V. (2020). A review about fish walking on land. *Journal of Threatened Taxa*, 12(17), 17276–17286.

- Lacave, J. M., Bilbao, E., Gilliland, D., Mura, F., Dini, L., Cajaraville, M. P., & Orbea, A. (2020). Bioaccumulation, cellular and molecular effects in adult zebrafish after exposure to cadmium sulphide nanoparticles and to ionic cadmium. *Chemosphere*, 238.
- Lee, J. W., Choi, H., Hwang, U. K., Kang, J. C., Kang, Y. J., Kim, K. II, & Kim, J. H. (2019). Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 101–108.
- Lesser, M. P. (2006). Oxidative Stress In Marine Environments: Biochemistry and Physiological Ecology. *Annual Review of Physiology*, 68(1), 253–278.
- Li, Z. H., Zlabek, V., Velisek, J., Grabic, R., Machova, J., & Randak, T. (2010). Modulation of antioxidant defence system in brain of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after chronic carbamazepine treatment. *Comparative Biochemistry and Physiology - C Toxicology and Pharmacology*, 151(1), 137–141.
- Lionetto, M. G., Caricato, R., & Giordano, M. E. (2019). Pollution Biomarkers in Environmental and Human Biomonitoring. *The Open Biomarkers Journal*, 9(1), 1–9.
- Liu, J., Wang, E., Jing, W., Dahms, H., Murugan, K., & Wang, L. (2020). Mitigative effects of zinc on cadmium-induced reproductive toxicity in the male freshwater crab *Sinopotamon henanense*. *Environmental Science and Pollution Research*
- Liu, Q., Xu, X., Zeng, J., Shi, X., Liao, Y., Du, P., Shou, L. (2019). Heavy metal concentrations in commercial marine organisms from Xiangshan Bay, China, and the potential health risks. *Marine Pollution Bulletin*, 141(36), 215–226.
- Livingstone, D. R. (2001). Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 42(8), 656–666.
- Looi, L. J., Aris, A. Z., Haris, H., Yusoff, F. M., & Hashim, Z. (2016). The levels of mercury, methylmercury and selenium and the selenium health benefit value in grey-eel catfish (*Plotosus canius*) and giant mudskipper (*Periophthalmodon schlosseri*) from the Strait of Malacca. *Chemosphere*, 152, 265–273.

- Louiz, I., Ben Hassine, O. K., Palluel, O., Ben-Attia, M., & Aït-Aïssa, S. (2016). Spatial and temporal variation of biochemical biomarkers in *Gobius niger* (Gobiidae) from a southern Mediterranean lagoon (Bizerta lagoon, Tunisia): Influence of biotic and abiotic factors. *Marine Pollution Bulletin*, 107(1), 305–314.
- Louiz, I., Palluel, O., Ben-Attia, M., Aït-Aïssa, S., & Hassine, O. K. Ben. (2018). Liver histopathology and biochemical biomarkers in *Gobius niger* and *Zosterisessor ophiocephalus* from polluted and non-polluted Tunisian lagoons (Southern Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 128(September 2017), 248–258.
- Lushchak, V. I. (2011). Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology*.
<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.10.006>
- Lushchak, V. I. (2016). Contaminant-induced oxidative stress in fish: a mechanistic approach. *Fish Physiology and Biochemistry*, 42(2), 711–747.
- Mahardika, M. (2017). Perilaku Makan Ikan Timpakul (*Periophthalmodon schlosseri*) Di Tanipah Muara Sungai Barito Kalimantan Selatan. Skripsi (Tidak dipublikasikan). FMIPA ULM, Banjarbaru.
- Macirella, R., Guardia, A., Pellegrino, D., Bernabò, I., Tronci, V., Ebbesson, L. O. E., Brunelli, E. (2016). Effects of two sublethal concentrations of mercury chloride on the morphology and metallothionein activity in the liver of zebrafish (*Danio rerio*). *International Journal of Molecular Sciences*, 17(3).
- Magellan, K. (2016). Amphibious adaptations in a newly recognized amphibious fish: Terrestrial locomotion and the influences of body size and temperature. *Austral Ecology*. © 2016 Ecological Society of Australia doi:10.1111/aec.12332
- Mahadevan, G., Pouladi, M., Stara, A., & Faggio, C. (2019). Nutritional evaluation of elongate mudskipper *Pseudapocryptes elongatus* (Cuvier, 1816) from Diamond Harbor, West Bengal, India. *Natural Product Research*, 0(0), 1–7.
- Mai, H. Van, Tran, L. X., Dinh, Q. M., Tran, D. D., Murata, M., Sagara, H., Ishimatsu, A. (2019). Land Invasion by the Mudskipper, *Periophthalmodon septemradiatus*, in Fresh and Saline Waters of the Mekong River. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11.

- Marques, D. da S., Costa, P. G., Souza, G. M., Cardozo, J. G., Barcarolli, I. F., & Bianchini, A. (2019). Selection of biochemical and physiological parameters in the croaker *Micropogonias furnieri* as biomarkers of chemical contamination in estuaries using a generalized additive model (GAM). *Science of the Total Environment*, 647, 1456–1467.
- Maulvault, A. L., Camacho, C., Barbosa, V., Alves, R., Anacleto, P., Pousão-Ferreira, P., Diniz, M. S. (2019). Living in a multi-stressors environment: an integrated biomarker approach to assess the ecotoxicological response of meagre (*Argyrosomus regius*) to venlafaxine, warming and acidification. *Environmental Research*, 7–25.
- Montenegro, D., Astudillo-García, C., Hickey, T., & Lear, G. (2020). A non-invasive method to monitor marine pollution from bacterial DNA present in fish skin mucus. *Environmental Pollution*, 263, 114438.
- Moslen, M., & Miebaka, C. A. (2016). Temporal variation of heavy metal concentrations in *Periophthalmus* sp. Obtained from Azuabie Creek in the upper Bonny Estuary, Nigeria. *Current Studies In Comparative Education, Science And Technology*, Volume 3, Number 2, 2016, Pp. 136-147
- Nanami, A., & Takegaki, T. (2005). Age and growth of the mudskipper *Boleophthalmus pectinirostris* in Ariake Bay, Kyushu, Japan. *Fisheries Research*, 74(1–3), 24–34.
- Nimet, J., Neves, M. P., Viana, N. P., de Arruda Amorim, J. P., & Delariva, R. L. (2020). Histopathological alterations in gills of a fish (*Astyanax bifasciatus*) in neotropical streams: negative effects of riparian forest reduction and presence of pesticides. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1).
- Nofal, M. I., Zaki, V. H., & Ahmed, N. A. S. (2019). Effects of heavy metal pollution on *Nile tilapia* in Manzala farm: Oxidative stress biomarkers and histopathological findings. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7(5), 315–328.
- Osman, A. G. M., Wuertz, S., & Mohammed-Geba, K. (2019). Lead-induced heat shock protein (HSP70) and metallothionein (MT) gene expression in the embryos of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Scientific African*, 3, e00056.

- Pandey, S., Parvez, S., Sayeed, I., Haque, R., Bin-Hafeez, B., & Raisuddin, S. (2003). Biomarkers of oxidative stress: A comparative study of river Yamuna fish *Wallago attu* (Bl. & Schn.). *Science of the Total Environment*, 309(1-3), 105-115.
- Paschoalini, A. L., Savassi, L. A., Arantes, F. P., Rizzo, E., & Bazzoli, N. (2019). Heavy metals accumulation and endocrine disruption in *Prochilodus argenteus* from a polluted neotropical river. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169(September 2018), 539-550.
- Patel, B., Bangera, V. S., Patel, S., & Balani, M. C. (1985). Heavy metals in the Bombay harbour area. *Marine Pollution Bulletin*, 16(1), 22-28.
- Paul, D. (2017). Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*, 15(2), 278-286.
- Paul, N., Chakraborty, S., & Sengupta, M. (2014). Lead toxicity on non-specific immune mechanisms of freshwater fish *Channa punctatus*. *Aquatic Toxicology*, 152, 105-112.
- Pérez, M. R., Rossi, A. S., Bacchetta, C., Elorriaga, Y., Carriquiriborde, P., & Cazenave, J. (2018). In situ evaluation of the toxicological impact of a wastewater effluent on the fish *Prochilodus lineatus*: biochemical and histological assessment. *Ecological Indicators*, 84(April 2017), 345-353.
- Perumal, P. (2011). Habitat loss and population reduction of mudskippers (family: gobiidae) from tamil nadu, s.e. coast of india. *Marine Biodiversity: Present Status and Prospects*, (June), 37-49.
- Polgar, G. (2012). Ecology and evolution of mudskippers and oxudercine gobies (Gobiidae: Oxudercinae): Perspectives and possible research directions. *Mangrove and Coastal Environment of Selangor, Malaysia*, 117-137.
- Polgar, G., & Lim, R. (2015). Mudskippers: human use, ecotoxicology and biomonitoring of mangrove and other soft bottom intertidal ecosystems.
- Ponton, D. E., Caron, A., Hare, L., & Campbell, P. G. C. (2016). Hepatic oxidative stress and metal subcellular partitioning are affected by selenium exposure in wild yellow perch (*Perca flavescens*). *Environmental Pollution*, 214, 608-617.

- Radons, J., & Multhoff, G. (2005). Immunostimulatory functions of membrane-bound and exported heat shock protein 70. *Exercise Immunology Review*, 11(May 2014), 17–33.
- Radwan, M. A., El-Gendy, K. S., & Gad, A. F. (2020). Biomarker responses in terrestrial gastropods exposed to pollutants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 257, 127218.
- Rahal, A., Kumar, A., Singh, V., Yadav, B., Tiwari, R., Chakraborty, S., & Dhama, K. (2014). Oxidative stress, prooxidants, and antioxidants: The interplay. *BioMed Research International*, 2014.
- Rajeshkumar, S., & Li, X. (2018). Bioaccumulation of heavy metals in fish species from the Meiliang Bay, Taihu Lake, China. *Toxicology Reports*, 5(September 2017), 288–295.
- Ramadhan, A. (2019). Identifikasi Ikan Timpakul Asal Muara Sungai Barito Kalimantan Selatan Berdasarkan Sequen DNA gen COI. Skripsi (Tidak dipublikasikan). FMIPA ULM, Banjarbaru.
- Rani, B., & Singh, R. (2019). A Review on Metals Induced Oxidative Stress in Fish. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(07), 264–278.
- Rautenberg, G. E., Amé, M. V., Monferrán, M. V., Bonansea, R. I., & Hued, A. C. (2015). A multi-level approach using *Gambusia affinis* as a bioindicator of environmental pollution in the middle-lower basin of Suquía River. *Ecological Indicators*, 48, 706–720.
- Roméo, M., Bennani, N., Gnassia-Barelli, M., Lafaurie, M., & Girard, J. P. (2000). Cadmium and copper display different responses towards oxidative stress in the kidney of the sea bass *Dicentrarchus labrax*. *Aquatic Toxicology*, 48(2–3), 185–194.
- Sabullah, M. K., Sulaiman, M. R., Shukor, M. S., Yusof, M. T., Johari, W. L. W., Shukor, M. Y., & Syahir, A. (2015). Heavy metals biomonitoring via inhibitive assay of acetylcholinesterase from *Periophthalmodon schlosseri*. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 26(2), 151–158.
- Salgado, L. D., Marques, A. E. M. L., Kramer, R. D., Oliveira, F. G. de, Moretto, S. L., Lima, B. A. de, Silva de Assis, H. C. (2019). Integrated assessment of sediment contaminant levels and biological responses in sentinel fish species *Atherinella brasiliensis* from a sub-tropical estuary in south Atlantic. *Chemosphere*, (2019), 15–27.

- Santoso, H.B.,** Suhartono, E., Yunita, R., Biyatmoko, D. (2020). Mudskipper Fish as a Bio-indicator for Heavy Metals Pollution in a Coastal Wetland. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*. Vol. 24(7): 1073 - 1095.
- Santoso, H.B.,** Hidayaturrahmah, Muhamat. (2018). Leukocytes description of Mudskipper (*Periophthalmodon schlosseri*) of Barito River Estuary, Desa Tanipah, Kalimantan Selatan. *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry* (7): 1.
- Santana, M. S., Sandrini-Neto, L., Filipak Neto, F., Oliveira Ribeiro, C. A., Di Domenico, M., & Prodocimo, M. M. (2018). Biomarker responses in fish exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 242, 449-461.
- Sarhadzadeh, N., Afkhami, M., Ehsanpour, M., & Bastami, K. D. (2014). Heavy metal pollution monitoring in the northern coast of Hormuz Strait (Persian Gulf): Plasma enzyme variations in *Periophthalmus waltoni*. *Comparative Clinical Pathology*, 23(4), 1063-1067.
- Sarkar, S. K., & De, S. K. (2016). Electron microscope based X-ray microanalysis on bioaccumulation of heavy metals and neural degeneration in mudskipper (*Pseudapocryptes lanceolatus*). *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 4(4), 211.
- Sayadi, M. H., Mansouri, B., Shahri, E., Tyler, C. R., Shekari, H., & Kharkan, J. (2020). Exposure effects of iron oxide nanoparticles and iron salts in blackfish (*Capoeta fusca*): Acute toxicity, bioaccumulation, depuration, and tissue histopathology. *Chemosphere*, 247, 125900.
- Seisaria, G. (2017). Perilaku Harian Ikan Timpakul (*Periophthalmodon Schlosseri*) Di Lingkungan Pasang Surut Desa Tanipah Muara Sungai Barito Kalimantan Selatan. Skripsi (Tidak dipublikasikan). FMIPA ULM, Banjarbaru.
- Seriani, R., Abessa, D. M. S., Moreira, L. B., Cabrera, J. P. G., Sanches, J. Q., Silva, C. L. S., Ranzani-Paiva, M. J. T. (2015). In vitro mucus transportability, cytogenotoxicity, and hematological changes as non-destructive physiological biomarkers in fish chronically exposed to metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 162-168.

- Sevcikova, M., Modra, H., Slaninova, A., & Svobodová, Z. (2011). Metals as a cause of oxidative stress in fish: a review. *Veterinarni Medicina*, 56(11), 537–546.
- Sharifian, S., Taherizadeh, M. R., Salarpouri, A., & Dehghani, M. (2018). Population Dynamic of the Mudskipper *Periophthalmus waltoni* Koumans, 1941 from the Bay of Hormozgan Province, Persian Gulf. *Russian Journal of Marine Biology*, 44(2), 149–158.
- Shekh, K., Tang, S., Kodzhahinchev, V., Niyogi, S., & Hecker, M. (2019). Species and life-stage specific differences in cadmium accumulation and cadmium induced oxidative stress, metallothionein and heat shock protein responses in white sturgeon and rainbow trout. *Science of the Total Environment*, 673, 318–326.
- Shirani, M., Mirvaghefi, A., Farahmand, H., & Abdollahi, M. (2012a). Biomarker responses in mudskipper (*Periophthalmus waltoni*) from the coastal areas of the Persian Gulf with oil pollution. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 34(3), 705–713.
- Shirani, M., Mirvaghefi, A., Farahmand, H., & Abdollahi, M. (2012b). EROD & GST Responses in Liver of Mudskipper *Periophthalmus waltoni* at Oil Polluted Areas. *International Conference on Ecological, Environmental and Biological Sciences*, 2011(June 2011), 2011–2013.
- Shukla, A., & Trivedi, S. P. (2018). Anionic Surfactant, Linear Alkyl Benzene Sulphonate Induced Oxidative Stress and Hepatic Impairments in Fish *Channa punctatus*. *Proceedings of the Zoological Society*, 71(4), 382–389.
- Sia Su, G. L., Ramos, G. B., & Sia Su, M. L. L. (2013). Bioaccumulation and histopathological alteration of total lead in selected fishes from Manila Bay, Philippines. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 353–355.
- Sinaei, M., & Mashinchian, A. (2014). Polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal sea water, the surface sediment and mudskipper *Boleophthalmus dussumieri* from coastal areas of the Persian Gulf: Source investigation, composition pattern and spatial distribution. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 1–11.
- Singh, M., Barman, A. S., Devi, A. L., Devi, A. G., & Pandey, P. K. (2019). Iron mediated hematological, oxidative and histological alterations in freshwater fish *Labeo rohita*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170(September 2018), 87–97.

- Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., & Gupta, R. (2011). Heavy metals and living systems: An overview. *Indian Journal of Pharmacology*, 43(3), 246–253.
- Sinha, A. K., Romano, N., Shrivastava, J., Monico, J., & Bishop, W. M. (2020). Oxidative stress, histopathological alterations and antioxidant capacity in different tissues of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) exposed to a newly developed sodium carbonate peroxyhydrate granular algaecide formulated with hydrogen peroxide. *Aquatic Toxicology*, 218(September 2019), 105348.
- Soliman, H. A. M., Hamed, M., Lee, J. S., & Sayed, A. E. D. H. (2019). Protective effects of a novel pyrazolecarboxamide derivative against lead nitrate induced oxidative stress and DNA damage in *Clarias gariepinus*. *Environmental Pollution*, 247, 678–684.
- Soltanian, S., & Fereidouni, M. S. (2019). Haematological, blood biochemical and immunological responses to gradual acclimation to low salinity water in walton's mudskipper *Periophthalmus waltoni* koumans, 1941 (Perciformes: Gobiidae). *Bulgarian Journal of Veterinary Medicine*, 22(1), 13–25.
- Sutton, A. O., Turko, A. J., McLaughlin, R. L., & Wright, P. A. (2018). Behavioral and Physiological Responses of an Amphibious, Euryhaline Mangrove Fish to Acute Salinity Exposure. *Copeia*, 106(2), 305–311.
- Sweidan, A. H., El-Bendary, N., Hegazy, O. M., Hassanien, A. E., & Snasel, V. (2015). Water Pollution Detection System Based on Fish Gills as a Biomarker. *Procedia Computer Science*, 65, 601–611.
- Takiyama, T., Hamasaki, S., & Yoshida, M. (2016). Comparison of the Visual Capabilities of an Amphibious and an Aquatic Goby That Inhabit Tidal Mudflats. *Brain, Behavior and Evolution*, 87(1), 39–50.
- Telahigue, K., Rabeh, I., Hajji, T., Trabelsi, W., Bejaoui, S., Chouba, L., Soudani, N. (2019). Effects of acute mercury exposure on fatty acid composition and oxidative stress biomarkers in *Holothuria forskali* body wall. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169(November 2018), 516–522.
- Uluturhan, E., Darılmaz, E., Kontas, A., Bilgin, M., Alyuruk, H., Altay, O., & Sevgi, S. (2019). Seasonal variations of multi-biomarker responses to metals and pesticides pollution in *M. galloprovincialis* and *T. decussatus* from Homa Lagoon, Eastern Aegean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 141(November 2018), 176–186.

- Van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. E. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13(2), 57–149.
- Vieira, C. E. D., Costa, P. G., Cabrera, L. C., Primel, E. G., Fillmann, G., Bianchini, A., & Bueno dos Reis Martinez, C. (2017). A comparative approach using biomarkers in feral and caged Neotropical fish: Implications for biomonitoring freshwater ecosystems in agricultural areas. *Science of the Total Environment*, 586, 598–609.
- Vieira, C. E. D., Costa, P. G., Caldas, S. S., Tesser, M. E., Risso, W. E., Escarrone, A. L. V., dos Reis Martinez, C. B. (2019). An integrated approach in subtropical agro-ecosystems: Active biomonitoring, environmental contaminants, bioaccumulation, and multiple biomarkers in fish. *Science of the Total Environment*, 666, 508–524.
- Vieira, J. C. S., Cavecci, B., Queiroz, J. V., Braga, C. P., Padilha, C. C. F., Leite, A. L., Padilha, P. M. (2015). Determination of the Mercury Fraction Linked to Protein of Muscle and Liver Tissue of Tucunaré (*Cichla spp.*) from the Amazon Region of Brazil. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(4), 422–430.
- Waheed, R., El Asely, A. M., Bakery, H., El-Shawarby, R., Abu-Salem, M., Abdel-Aleem, N., Abdeen, A. (2020). Thermal stress accelerates mercury chloride toxicity in *Oreochromis niloticus* via up-regulation of mercury bioaccumulation and HSP70 mRNA expression. In *Science of the Total Environment* (Vol. 718).
- Wang, J., Zhang, H., Zhang, T., Zhang, R., Liu, R., & Chen, Y. (2015). Molecular mechanism on cadmium-induced activity changes of catalase and superoxide dismutase. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 59–67.
- Wang, N., Jiang, M., Zhang, P., Shu, H., Li, Y., Guo, Z., & Li, Y. (2020). Amelioration of Cd-induced bioaccumulation, oxidative stress and intestinal microbiota by *Bacillus cereus* in *Carassius auratus gibelio*. *Chemosphere*, 245.
- Weber, A. A., Sales, C. F., de Souza Faria, F., Melo, R. M. C., Bazzoli, N., & Rizzo, E. (2020). Effects of metal contamination on liver in two fish species from a highly impacted neotropical river: A case study of the Fundão dam, Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190(October 2019).

- Weber, P., Behr, E. R., Knorr, C. D. L., Vendruscolo, D. S., Flores, E. M. M., Dressler, V. L., & Baldisserotto, B. (2013). Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river. *Microchemical Journal*, *106*, 61–66.
- Wicaksono, A., Hidayat, S., Damayanti, Y., Jin, D. S. M., Sintya, E., Retnoaji, B., & Alam, P. (2016). The significance of pelvic fin flexibility for tree climbing fish. *Zoology*, *119*(6), 511–517.
- Wicaksono, A., Hidayat, S., Retnoaji, B., & Alam, P. (2020). The water-hopping kinematics of the tree-climbing fish, *Periophthalmus variabilis*. *Zoology*, *139*, 125750.
- Yi, Y., Tang, C., Yi, T., Yang, Z., & Zhang, S. (2017). Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *145*(January), 295–302.
- Yi, Y., Yang, Z., & Zhang, S. (2011). Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environmental Pollution*, *159*(10), 2575–2585.
- Yin, Y., Zhang, P., Yue, X., Du, X., Li, W., Yin, Y., Li, Y. (2018). Effect of sub-chronic exposure to lead (Pb) and *Bacillus subtilis* on *Carassius auratus gibelio*: Bioaccumulation, antioxidant responses and immune responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *161*(June), 755–762.
- You, X., Chen, J., Bian, C., Yi, Y., Ruan, Z., Li, J., Shi, Q. (2018). Transcriptomic evidence of adaptive tolerance to high environmental ammonia in mudskippers. *Genomics*, *110*(6), 404–413.
- Yuan, S. S., Lv, Z. M., Zhu, A. Y., Zheng, J. L., & Wu, C. W. (2017). Negative effect of chronic cadmium exposure on growth, histology, ultrastructure, antioxidant and innate immune responses in the liver of zebrafish: Preventive role of blue light emitting diodes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *139*(January), 18–26.
- Yudistira, D., Nurliani, A., **Santoso, H.B.** (2012). Histological Structure of Gills of Giant Mudskipper (*Periophthalmodon schlosseri*). *Jurnal Sain dan Veteriner* (30): 2.

- Zaccone, G., Lauriano, E. R., Kuciel, M., Capillo, G., Pergolizzi, S., Alesci, A., Icardo, J. M. (2017). Identification and distribution of neuronal nitric oxide synthase and neurochemical markers in the neuroepithelial cells of the gill and the skin in the giant mudskipper, *Periophthalmodon schlosseri*. *Zoology*, 125, 41–52.
- Zafar, N., & Khan, M. A. (2020). Effects of dietary iron on growth, haematology, oxidative stress and hepatic ascorbic acid concentration of stinging catfish *Heteropneustes fossilis*. *Aquaculture*, 516(May), 734642.
- Zeng, L., Zheng, J. L., Wang, Y. H., Xu, M. Y., Zhu, A. Y., & Wu, C. W. (2016). The role of Nrf2/Keap1 signaling in inorganic mercury induced oxidative stress in the liver of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 345–352.
- Zhang, Zaiwang, Pei, N., Sun, Y., Li, J., Li, X., Yu, S., Mai, B. (2019). Halogenated organic pollutants in sediments and organisms from mangrove wetlands of the Jiulong River Estuary, South China. *Environmental Research*, 145–152.
- Zhang, Ziwei, Zheng, Z., Cai, J., Liu, Q., Yang, J., Gong, Y., Xu, S. (2017). Effect of cadmium on oxidative stress and immune function of common carp (*Cyprinus carpio* L.) by transcriptome analysis. *Aquatic Toxicology*, 192, 171–177.
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606(2), 135–150.
- Ziegler, P., Sree, K. S., & Appenroth, K. J. (2019). Duckweed biomarkers for identifying toxic water contaminants? *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15), 14797–14822.

Tentang Penulis



Heri Budi Santoso lahir di Pati Jawa Tengah pada tanggal 11 September 1969. Penulis menyelesaikan SDN, SMPN, SMAN di Pati. Selepas SMA, penulis melanjutkan kuliah di Jurusan Zoologi Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) Purwokerto. Usai meraih gelar sarjana biologi pada tahun 1992, penulis sebagai penerima beasiswa tunjangan ikatan dinas (TID) ditugaskan sebagai dosen pada tahun 1994 di Fakultas Kedokteran Universitas Lambung Mangkurat (ULM) Banjarbaru Kalimantan Selatan. Pada tahun 1998 penulis lulus Magister Biologi dengan bidang minat Struktur dan Perkembangan Hewan dari UGM Yogyakarta. Pada tahun 2000 penulis dipindah tugaskan sebagai dosen di Prodi Biologi FMIPA ULM Banjarbaru sampai sekarang dengan mengampu mata kuliah Struktur dan Perkembangan Hewan, Sains dan Teknologi Hewan, Mikroteknik serta Fauna Kalimantan. Mulai tahun akademik 2019, penulis melanjutkan studi S3 Ilmu Pertanian di ULM dengan minat Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Dalam sepuluh tahun terakhir, penulis melakukan fokus riset tentang potensi ikan gelodok dan sudah menghasilkan beberapa artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi.

Berbagai jabatan pernah diemban oleh penulis, yaitu sebagai Koordinator Pendidikan (Kordik) pada Bagian Biologi Kedokteran Fakultas Kedokteran ULM (1999-2000), Ketua Program Studi Biologi FMIPA ULM (2000-2002), Wakil Dekan bidang Akademik FMIPA ULM (2002-2010), dan Dekan FMIPA ULM (2010-2018).

Penulis pernah mengikuti training manajemen perguruan tinggi yaitu *Short Course on University Management, Research and Commercialisation Delivered* selama dua minggu di New Castle University Australia (2015). Pada tahun 2016 mengikuti training *Learning Program on Strategic Leadership and Governance for Academic and Administrative Leaders* di SEAMEO INNOTECH, Diliman, Quezon City, Philippines. Pada tahun 2018, Penulis menginisiasi kerjasama 3 institusi dalam upaya konservasi bekantan fauna endemik Kalimantan, yaitu kerjasama riset antara FMIPA ULM-Yayasan Sahabat Bekantan Indonesia-Fakultas Kedokteran Hewan UGM, saat itu seremonial penandatanganan naskah kerjasama dihadiri oleh Gubernur Kalimantan Selatan, Rektor ULM dan Kepala BKSDA Kalsel.



Hidayaturrahmah, lahir di Karang Intan Kec. Martapura Kalimantan Selatan pada 14 Desember 1981. Anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis menyelesaikan SDN, MTSN, MAN di Martapura. Selepas menempuh sekolah di Madrasah Aliyah Negeri Martapura, penulis melanjutkan kuliah di Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lambung Mangkurat (ULM) Banjarbaru Kalimantan Selatan.

Usai meraih gelar sarjana Biologi pada tahun 2004, penulis langsung diterima menjadi staf pengajar honorer di Fakultas MIPA ULM dan lulus menjadi CPNS dosen pada tahun 2006. Pada tahun 2009 penulis melanjutkan pendidikan pascasarjana di bidang Fisiologi hewan (Ilmu Faal dan khasiat obat) di Fakultas Kedokteran Hewan (FKH) IPB dan lulus menjadi Magister Sains pada tahun 2011. Penulis sampai sekarang aktif mengajar pada matakuliah Fisiologi Hewan, Fauna Kalimantan, Struktur Perkembangan hewan, Sains dan Teknologi Hewan, Etnobiologi pada bidang kajian etnozooologi, Biosistemik Hewan, Biologi Umum dan Mikroteknik.

Mulai tahun 2016-2018, penulis telah mendapatkan hibah RISTEKDIKTI berupa riset yang berjudul Eksplorasi Ikan Timpakul/ikan Gelodok (*Periathalmodon schlosseri*) (satwa Eksotik Kalimantan Selatan) Sebagai Bioindikator Mangrove Muara Sungai Barito dan Karakteristik Anfiskogen (Anatomi, Fisiologi, Ekologi dan Genetika) Ikan Gelodok (*Perithalmodon schlosseri*) Di desa Tangkisung Peiaihari Kalimantan Selatan. Selain Riset tentang ikan gelodok, penulis juga mendapatkan hibah untuk melaksanakan Pengabdian masyarakat berjudul Potensi dan Kandungan Nutrisi Ikan Timpakul /Ikan Gelodok untuk meningkatkan Pengetahuan dan Ketahanan Pangan Masyarakat Kualatambangan dan pengabdian masyarakat dengan judul : Pembuatan alat Bantu ajar Biologi Ikan Timpakul/Ikan Gelodok dan Ekosistem mangrove bagi anak sekolah dasar di desa Pagatan Besar Kabupaten Tanah Laut. Beberapa riset telah menghasilkan beberapa artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi.



Eko Suhartono adalah dosen di Departemen Biokimia dan Biomolekuler Fakultas Kedokteran ULM sejak Agustus 1993. Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 7 September 1968 dan menamatkan kuliah di Jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tanggal 7 September 1991. Kemudian Februari 1999, tamat dari Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta jurusan S2 Kimia dengan bidang minat Kimia Fisika. Pada tahun 2004, meraih predikat dosen berprestasi tingkat ULM. Selanjutnya, pada tahun 2015 menyelesaikan Program Doktor di Universitas Brawijaya Malang dan dinyatakan sebagai lulusan terbaik dengan predikat Cumlaude.

Matakuliah yang diampu pada program S1 antara lain Kimia, Biokimia, Toksikologi Lingkungan dan Industri, serta Metodologi Penelitian, sedangkan pada program magister S2, antara lain Biostatistik, Toksikologi Industri dan Lingkungan, Pencemaran Lingkungan, dan lain-lain. Selain mengampu matakuliah, penulis aktif membimbing skripsi, thesis, dan disertasi.

Penulis aktif meneliti, menulis buku serta publikasi pada jurnal nasional terakreditasi dan internasional bereputasi. Hingga saat ini, penulis telah menerbitkan 7 buku referensi, publikasi 55 artikel pada jurnal terindeks scopus/WoS dengan H index 6, sedangkan pada Google Scholar tercatat 221 artikel dengan H index 17. Selain itu, penulis juga memiliki 6 HAKI, yakni 5 hak cipta dan 1 paten. Penulis pernah menjadi dosen tamu di Shangji University Korea Selatan pada tahun 2008, di Unsyiah Aceh pada tahun 2018, dan di UPR Palangkaraya 2017-sekarang. Penulis juga aktif mengikuti kegiatan ilmiah di berbagai negara di Asia Tenggara, Korea, Jepang, Dubai, Kanada, dan Belanda.

Dari aspek manajemen, penulis pernah menjabat sebagai Kalab Kimia-Biokimia FK-ULM (1999-2004), Pembantu Dekan Bidang Kemahasiswaan FK-ULM (2004-2012); Ketua Tim Evaluasi Kinerja Akademik Dikti (2016-sekarang); Ketua Pengelola Jurnal dan HAKI FK-ULM (2016-sekarang); Ketua Lemdik Telkom School Banjarbaru (2019-sekarang). Selain itu, penulis juga pernah menjadi Manajer Quality Control PT. Maspion Tevlon Surabaya (1992-1993); Manajer Laboratorium PT. Bumi Kencana Mitra Surabaya (1997-1998); Ketua Penyusunan Studi Kelayakan RSUD Pelita Insani Martapura (2010-2011); Wakil Direktur RSIA Mutiara Bunda (2010-2016), Ketua Pengelola Jurnal Fakultas Kedokteran AIPKI wilayah 4 (2017-sekarang)



Rizmi Yunita lahir di Banjarmasin pada tanggal 05 Juni 1965, anak pertama dari 4 bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan SDN Kebun Bunga Banjarmasin. SMPN 2 Seroja Banjarmasin, SMAN 2 Banjarmasin, menyelesaikan kuliah S1 di Fakultas Perikanan dan Kelautan ULM tahun 1989. Tahun 1991 diterima sebagai dosen di Fakultas Perikanan dan Kelautan ULM dan melanjutkan kuliah program magister di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan

Alam Institut Teknologi Bandung (FMIPA-ITB) pada bidang khusus ekologi/Biologi masuk tahun 1996 dan selesai studi S2 tahun 1998. Tahun 2010 melanjutkan studi pada Program Doktor Ilmu Lingkungan di Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya dengan minat Pengelolaan Sumber Daya Air dan Lingkungan, menyelesaikan studi tahun 2014 memperoleh penghargaan Prestasi Akademik Wisudawan Terbaik 1 Program Doktor (S3) Ilmu Pertanian UB dengan predikat pujian (cumlaude).

Penulis sampai sekarang aktif sebagai pengajar pada mata kuliah S1 yaitu Iktiologi, Avertebrata air, Biologi Perikanan, Pengkajian Stok Ikan, Dinamika Populasi Ikan, Ekotoksikologi Perairan, Tumbuhan Air, Manajemen Ekosistem Waduk. Penulis aktif mengajar pada program Magister Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan dengan mengampu mata kuliah Pengelolaan Sumberdaya Perairan, Inventarisasi Sumberdaya Alam dan Pemetaan Lingkungan, Bioremediasi Tanah dan Air Tercemar, Rehabilitasi Lahan Bermasalah. Penulis aktif mengajar pada Program Studi Doktor (S3) Ilmu Pertanian ULM dengan mata kuliah Bioekologi Perairan Tawar dan Pesisir, Sistem Ekologi Lahan Basah, Sumberdaya Lahan Basah dan Kerawannya, selain sebagai pengajar penulis aktif membimbing skripsi, tesis dan disertasi.

Penulis aktif meneliti dan publikasi jurnal secara nasional dan internasional. Kerjasama penelitian di berbagai instansi pemerintah daerah yang berkaitan dengan lingkungan dilakukan di wilayah Kalimantan Selatan. Jabatan profesional diluar Institusi penulis aktif pada Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Banjar sebagai Tim Ahli Bidang Lingkungan Hidup ditunjuk dengan SK. Bupati Kabupaten Banjar sebagai Tenaga Ahli Bidang Biota Perairan mulai tahun 2016 sampai sekarang.

Pengalaman manajemen dilingkungan ULM, penulis pernah ditunjuk sebagai Sekretaris Program Studi Manajemen Sumberdaya

Perairan, Ketua Laboratorium Iktiologi (2009 – 2022) pada S1. Pada program magister (S2) dipercayakan sebagai Kabid. Keuangan dan Administrasi Prodi. Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Program Pascasarjana ULM serta Ketua Unit Penjaminan Mutu (UPM) Program Pascasarjana ULM. Pada program Doktor (S3) dipercayakan sebagai sekretaris Program Studi Doktor (S3) Ilmu Pertanian ULM (2017-sekarang).



Danang Biyatmoko lahir di Madiun, Jawa Timur pada tanggal 7 Mei 1968 sebagai anak ke 4 dari 5 bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan SD, SMP dan SMA di Kab. Bondowoso Jawa Timur. Pendidikan S1 ditempuh di Fakultas Peternakan IPB Bogor (1991), S2 (1997) dan S3 (2002) di Prodi Ilmu Ternak Pascasarjana IPB Bogor. Pernah bekerja sebagai Supervisor pada

Breeding Farm Bromo PT Anputraco, Ltd Surabaya (1991-1992), dan sebagai Technical Service (TS) di PT Japfa Comfeed Indonesia, Cirebon Jawa Barat (1992-1993). Sejak tahun 1993 penulis bekerja sebagai dosen di Prodi Peternakan Faperta ULM Banjarmasin. Pengalaman profesional antara lain sebagai konsultan kegiatan RRMC (Perbibitan ayam buras) SPL OECF Jepang (1999-2000), Tenaga Ahli (TA) program IASTP (Indonesian Specialist Training Project) Australia, konsultan itik Dinas Peternakan Prov. KalSel (2016), Tenaga Ahli Badan Ketahanan Provinsi (BKP) Kalimantan Selatan (2011 – 2015 dan 2017).

Berbagai jabatan pernah diemban oleh penulis, yaitu sebagai Kabid Akademik S2 Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan ULM (2011-2015), Wadep I Bidang Akademik Fakultas Pertanian ULM (2015 –2016/PAW) dan (2016-2020), Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ULM (2019 – sekarang).

Mata kuliah yang diampu pada program S1 antara antara lain IPT Itik Alabio, Produksi Ternak Unggas, Teknologi Penetasan Telur, sedangkan pada program Pasacasarjana (S2,S3), antara lain Fisiologi Hewan (S2 Pendidikan Biologi ULM), Kebijakan Lingkungan dan Pembangunan Lahan Basah, Pengelolaan Limbah dan Bioremediasi Lahan Tercemar (S2 PSDAL ULM), Metode Penelitian Non Parametrik (S2 Ilmu Komunikasi UNISKA MAB), Produksi ternak Tropis (S2 Peternakan UNISKA MAB), Metodologi Penelitian (S3 Ilmu Pertanian ULM). Selain mengampu matakuliah, penulis aktif membimbing skripsi, thesis, dan disertasi.

Penulis aktif menulis dimana sudah menerbitkan 5 buku teks dan 1 buku ajar, serta mendapatkan 2 granted Paten dan 3 hak cipta. Penulis juga aktif mengikuti kegiatan ilmiah dan meraih penyaji terbaik I bidang pengabdian masyarakat dari DRPM Dikti/Kemenristek tahun 2007, dan sebagai penyaji terbaik I bidang penelitian DRPM Dikti/Kemenristek tahun 2014.



Potensi ikan gelodok sebagai bioindikator pencemaran logam berat pada ekosistem rawa pesisir dimulai sejak tahun 1980 an sampai sekarang. Ikan ini cocok sebagai spesies bioindikator karena mempunyai karakter morfologi dan ekologi yang khas, terdistribusi luas, fauna khas dan asli mangrove, kehidupan unik seperti amfibi, dapat mengakumulasi polutan yang berbeda, terpapar langsung dengan berbagai polutan, dan organisme euryhaline. Ikan ini termasuk sentinel organism (organisme penjaga) yang cocok untuk mendeteksi efek polusi logam berat di badan air dan sedimen. Syarat sebagai sentinel organism harus memiliki beberapa karakteristik khusus seperti distribusi geografis yang luas, sensitivitas yang tinggi terhadap polutan lingkungan dan menjadi spesies dominan di habitatnya. Penelitian potensi ikan gelodok sebagai spesies bioindikator pencemaran logam berat dan polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) di Indonesia masih belum berkembang. Di beberapa negara, penelitian ikan gelodok sebagai bioindikator pada awalnya dimulai dengan kajian bioakumulasi logam berat pada berbagai jaringan tubuhnya, berkembang menjadi kajian tentang respons perilaku dan respons biomarker.

Saat ini, riset inovasi model biomonitoring lingkungan yang efektif, efisien dan sejalan dengan prinsip konservasi terus berkembang sejalan dengan semakin beratnya tekanan pada lingkungan perairan, khususnya pada kawasan perairan pesisir dan estuari. Oleh karena itu, diterbitkannya buku ini dapat menjadi sumbangan ilmu pengetahuan untuk perkembangan ekotoksikologi perairan. Selain itu, buku ini menjadi sumbangan nyata dalam mendukung visi Universitas Lambung Mangkurat sebagai Pusat Unggulan Lahan Basah Nasional (2019-2023) dan pusat pengembangan lahan basah di Asia Pasifik pada tahun 2027.



ISBN 978-602-0950-75-4

