



BIOINDIKATOR

(Teori dan Aplikasi dalam Biomonitoring)



Husamah
Abdulkadir Rahardjanto



Husamah, S.Pd., M.Pd.
Dr. Abdulkadir Rahardjanto, M.Si.

BIOINDIKATOR

(Teori dan Aplikasi dalam Biomonitoring)



Penerbit Universitas Muhammadiyah Malang

BIOINDIKATOR

(Teori dan Aplikasi dalam Biomonitoring)

Hak Cipta ©Husamah, S.Pd., M.Pd., Dr. Abdulkadir Rahardjanto, M.Si.

Hak Terbit pada UMM Press

Penerbit Universitas Muhammadiyah Malang

Jl. Raya Tlogomas No. 246 Malang 65144

Telepon: 0877 0166 6388, (0341) 464318 Psw. 140

Fax. (0341) 460435

E-mail: ummpress@gmail.com

<http://ummpress.umm.ac.id>

Anggota APPTI (Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia)

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia)

Cetakan Pertama, Mei 2019

ISBN : 978-979-796-383-5

x; 188 hlm.; 16 x 23 cm

Setting Layout & Design Cover : Andi Firmansah

Cover Image : [depositphotos_106217288-stock-video-edible-](#)

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun, termasuk fotokopi, tanpa izin tertulis dari penerbit. Pengutipan harap menyebutkan sumbernya.

**Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014
tentang Hak Cipta**

- (1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

PRAKATA

Indonesia adalah salah satu negara berkembang dan terus melakukan akselerasi pembangunan dan pemenuhan kebutuhan hidup masyarakat. Pembangunan membutuhkan beragam sumberdaya dan mendayagunakan lingkungan untuk pemenuhan kebutuhannya. Hal ini didukung oleh potensi yang sangat luar biasa yang dimiliki Indonesia, berupa kondisi sumber daya alam (keanekaragaman hayati dan non hayati), kondisi geografis, serta kondisi demografis yang tidak dimiliki oleh bangsa lain. Sayangnya, bila melihat fakta kekinian, pembangunan dan kehidupan itu memberi dampak berupa pencemaran (air, udara, dan tanah), perubahan kondisi hutan dan topografi, serta dampak lainnya.

Ada bermacam-macam bahan pencemar. Ada yang berasal dari sumber-sumber alami dan ada yang berasal bahan sintetik. Ada yang bersifat yang mudah dirombak (*biodegradable*) dan ada yang sangat sulit bahkan tidak bisa dirombak (*rekalsitran/nonbiodegradable*). Ada juga yang bersifat racun bagi jasad hidup dengan bahan aktif tidak rusak dalam waktu lama (*persisten*). Banyak usaha telah dilakukan untuk mengatasi berbagai bahan pencemar perairan tersebut, mulai dari cara fisika, kimia, dan biologi. Namun cara biologi merupakan cara yang paling tepat, bila dilihat dari keuntungan atau kelebihannya. Dengan demikian, komponen biologi juga dapat berperan sebagai biomonitoring (Winarni, 2016).

Perubahan kondisi lingkungan dalam bentuknya berupa pencemaran dan degradasi lingkungan umumnya dapat dikaji menggunakan indikator fisika dan kimia. Dalam perkembangannya, berbagai pakar lingkungan menawarkan alternatif kajian yang juga tidak kalah penting, berupa monitoring kondisi lingkungan

menggunakan informasi aspek-aspek biologi (biomonitoring). Biomonitoring adalah kajian pemantauan status lingkungan berbasis makhluk hidup. Biomonitoring terhadap organisme yang terpapar racun bersifat dinamis, baik konteks tempat (ruang) maupun waktu. Hubungan organisme dengan lingkungannya yang terangkai menjadi sistem biologi tersebut mampu mengintegrasikan variable-variabel lingkungan dengan kehidupan (respon) organisme dalam waktu tertentu dan relatif lebih mudah diukur, sehingga memudahkan pendugaan dampak pencemaran terhadap organisme.

Penggunaan hewan dan tumbuhan sebagai indikator, kemudian lebih dikenal dengan istilah bioindikator juga perlu dikuasai oleh mahasiswa khususnya bagi mereka yang menempuh mata kuliah ekologi dan pengetahuan lingkungan. Kompetensi terkait bioindikator sangat penting dimiliki mahasiswa karena mereka nantinya akan menjadi guru (wajib mentransfer pengetahuan dan keterampilan mereka kepada siswa-siswanya di sekolah menengah) maupun menjadi peneliti biologi. Namun, sampai saat ini bahan ajar (buku) terkait tema tersebut belum banyak ditemui, masih langka, atau bahkan belum ada. Hal ini minimal sejauh pengalaman mengajar selama ini, yang tidak pernah menemukan buku dengan judul tersebut. Bila pun ada, biasanya tema bioindikator hanya dibahas sekilas di sub-sub bab buku lingkungan.

Buku berjudul *Bioindikator: Teori dan Aplikasi dalam Biomonitoring* ini ditulis untuk memperkaya pemahaman dan wawasan mahasiswa, khususnya mahasiswa S1 Pendidikan Biologi FKIP Universitas Muhammadiyah Malang. Buku ini difokuskan untuk mendukung pencapaian kemampuan akhir yang direncanakan dalam mata kuliah Ekologi khususnya Sub-CPMK L4: Menggunakan struktur dan fungsi makhluk hidup untuk monitoring kondisi lingkungan dan L14: Mendesain proposal proyek implementasi metode dan teknik dasar ekologi untuk mengumpulkan, mengolah, dan menganalisis data ekologi sebagai upaya memecahkan masalah ekologis/lingkungan hidup. Buku ini juga memperkaya Sub-CPMK L3: Memahami konsep habitat, mikrohabitat, dan relung ekologi. Dengan demikian, buku ini akan melengkapi buku ajar yang selama ini telah digunakan oleh mahasiswa (yang disusun oleh rekan sejawat lainnya). Namun, tidak menutup kemungkinan dalam perkembangannya, buku ini dapat dijadikan buku pengayaan oleh mahasiswa dari berbagai perguruan

tinggi, baik mahasiswa pendidikan biologi, biologi, pertanian, kehutanan, dan ilmu lingkungan. Meskipun sebagian besar mahasiswa telah memperoleh pembelajaran biologi umum, bisa jadi konsep dan aplikasi bioindikator merupakan hal baru bagi mereka.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada DPPM UMM yang berkenan menelaah dan memberikan masukan terhadap buku ini. Terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada Pimpinan Universitas Muhammadiyah Malang, Pimpinan FKIP, dan Pimpinan Prodi Pendidikan Biologi. Tak lupa pula terima kasih kami sampaikan kepada keluarga besar kami (orang tua, istri, anak), dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang tentu saja sumbangsinya sangat besar dalam penyusunan buku ini.

Buku ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang konstruktif dari para pembaca demi kebaikan penulisan modul ini dan kemajuan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Malang, Februari 2019

Husamah

Abdulkadir Rahardjanto

DAFTAR ISI

Prakata	v
Daftar Isi	vii
Bab I Konsep Biomonitoring	1
A. Pengantar	1
B. Jenis Biomonitoring	2
Soal Pengayaan Kompetensi	16
Bab II Konsep Bioindikator	17
A. Pengantar	17
B. Respon organisme terhadap pencemaran	19
C. Tipe Bioindikator	25
D. Kriteria Makhluk Hidup Sebagai Indikator Lingkungan	27
E. Kelebihan Bioindikator dibandingkan teknik lainnya 34	
F. Urgensi Mempelajari Bioindikator	37
Soal Pengayaan Kompetensi	40
Bab III Konsep Biomarker	41
A. Konsep Biomarker	41
B. Pengkategorian Biomarker	42
C. Paparan dan biotransformasi	43
D. Contoh biomarker yang dipelajari di laboratorium ..	45
E. Kriteria Biomarker	47
F. Matriks Biologi	48
G. Ekotoksikologi	49
Soal Pengayaan Kompetensi	54

Bab IV Bioindikator Kualitas Air	55
A. Pengantar	55
B. Plankton	58
C. Periphyton	65
D. Makroinvertebrata	86
E. Makrofita/Tumbuhan Air	94
F. Ikan	103
Soal Pengayaan Kompetensi	114
Bab V Bioindikator Kualitas Tanah	115
A. Pengantar	115
B. Hewan Tanah	117
C. Tumbuhan	123
Soal Pengayaan Kompetensi	125
Bab VI Bioindikator Kualitas Udara	127
A. Pengantar	127
B. Lichen	128
C. Bryophyta	133
D. Pteridophyta	138
E. Tumbuhan Tingkat Tinggi.....	149
Soal Pengayaan Kompetensi	145
Bab VII Bioindikator Kondisi Ekosistem Secara Umum	147
A. Pengantar	147
B. Arthropoda yang Digunakan Secara Frequent	148
C. Penggunaan Fungsi Ekosistem dan Beberapa Kelompok Taksonomi Jamak	152
D. Penggunaan Burung Sebagai Bioindikator	154
Soal Pengayaan Kompetensi	155
Daftar Pustaka	157
Indeks	175
Glosarium	179

BAB I

KONSEP BIOMONITORING

A. Pengantar

Lingkungan yang kita tempati tidak selamanya berada pada kondisi stabil dan seimbang. Sebagian ulah manusia telah mengubah fungsi lingkungan dari sebagaimana mestinya. Beberapa hewan maupun tumbuhan memiliki kepekaan tersendiri terhadap perubahan lingkungan tersebut. Penurunan keanekaragaman jenis ataupun penurunan populasi menjadi indikator telah terjadinya gangguan, pencemaran lingkungan, atau ketidakseimbangan lingkungan. Penggunaan hewan ataupun tumbuhan indikator untuk menilai kondisi lingkungan (biomonitoring) kini mulai banyak dilirik (minimal dalam tatanan didiskusikan).

Biomonitoring dapat diartikan sebagai suatu teknik penggunaan respon makhluk hidup (organisme) secara sistematis untuk mengevaluasi perubahan-perubahan kualitas lingkungan (Náray & Kudász, 2016). Biomonitoring menggunakan pengetahuan tentang ekosistem dengan berbagai dinamikanya untuk memantau berbagai langkah pengendalian lingkungan. Teknik ini diharapkan mampu menggambarkan tentang cocok atau tidaknya kondisi lingkungan dengan organisme tertentu. Keberadaan organisme tersebut mengindikasikan kondisi ekosistem dan kualitas lingkungan secara khusus atau spesifik (Komarawidjaja & Titiresmi, 2006).

Penggunaan indikator fisik dan kimia dalam monitoring terhadap toksikan di lingkungan bersifat amat dinamis (cenderung berubah) terhadap waktu dan tempat. Berbeda dengan organisme atau “sistem biologi” yang bisa mengintegrasikan hampir semua variabel lingkungan pada kurun waktu relatif lama dengan teknik pengukuran yang relatif lebih mudah, serta tentunya relatif murah. Biomonitoring dapat digunakan untuk memprediksi bahkan mengetahui dampak yang lebih luas akibat pencemaran udara, air, dan tanah sehingga menjadi landasan dalam pengembangan dan pengelolaan lingkungan.

Teknik biomonitoring relatif baru digunakan untuk mengevaluasi suatu dampak pencemaran lingkungan (Mukono, 2006; Winarni, 2016). Biomonitoring menggunakan prinsip pengukuran berulang pada penanda kimia/biokimia terkait paparan tertentu pada sampel biologi subjek yang diamati. Secara operasional, pengertian biomonitoring mengacu pada upaya kompilasi data hasil pengujian biologi di laboratorium maupun data lapang. Biomonitoring merupakan teknik yang relatif lebih cepat, murah, menggunakan alat sederhana, dan memungkinkan adanya keterlibatan masyarakat secara luas untuk memonitor kondisi lingkungan, sehingga respon dan langkah pengendalian dapat dilaksanakan dengan cepat (Tjokrokusumo, 2006).

B. Jenis Biomonitoring

Berdasarkan kategori minat komunitas pakar, biomonitoring dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. *Bioassessments study*

Bioassessments study mengkaji kehidupan suatu komunitas, termasuk fungsi dan struktur komunitas. Menurut Cobb dan Frydenborg (2018) *bioassessments* melibatkan *sampling* lapangan dari komunitas biologis untuk mengkarakterisasi struktur komunitas (yaitu keragaman dan toleransi terhadap polusi). Hal ini termasuk misalnya mengukur indikator kualitas air seperti oksigen terlarut, mengevaluasi kondisi habitat, dan menentukan kondisi komunitas serangga akuatik. Untuk menentukan kesehatan biologis pada perairan, maka dapat membandingkan karakteristiknya dengan karakteristik komunitas di seluruh gradien gangguan manusia. Sistem ini kemudian dievaluasi untuk menentukan apakah itu telah terkena dampak negatif oleh aktivitas manusia atau tidak.

Dalam konteks perairan/akuatik, menurut Ziglio *et al* (2006) *bioassessment* mengacu pada proses mengevaluasi integritas ekologi baik lingkungan darat maupun akuatik dengan mengukur karakteristik organisme atau kumpulan organisme yang menghuni lingkungan tersebut. Untuk lingkungan akuatik, *bioassessment* mengacu pada penilaian integritas ekologi dari badan air dengan mengukur atribut kumpulan organisme yang menghuni perairan. Dalam hubungannya dengan pengukuran biologis, *bioassessment* lingkungan akuatik biasanya termasuk pengukuran *instream* dan

habitat zona riparian. Kumpulan umum organisme air yang digunakan untuk *bioassessment*, yaitu ikan, makroinvertebrata, dan alga. Namun, karakteristik populasi spesies tunggal (sentinel), juga digunakan sebagai indikator biologis dari integritas ekologi.

Bioassessment berperan dalam restorasi dengan memungkinkan ahli biologi dan regulator (pengambil kebijakan) untuk mengidentifikasi sistem akuatik yang membutuhkan pemulihan, menentukan tujuan restorasi, mengukur atau memperkirakan respons terhadap perubahan, dan mengukur keberhasilan restorasi. *Bioassessment* dapat digunakan untuk memantau berbagai elemen restorasi, yang dengan jelas menunjukkan nilai dalam menerapkan teknik *bioassessment* dalam upaya restorasi lingkungan (Andrew, 2015).

2. *Toxicity bioassays*

Toxicity bioassays adalah melakukan kegiatan pengujian di laboratorium dan menganalisis dampak polutan terhadap bentuk-bentuk kehidupan (tumbuhan dan hewan). Tujuan pengujian toksisitas adalah untuk menentukan apakah suatu senyawa atau sampel air memiliki potensi untuk menjadi racun bagi organisme biologis dan, jika demikian, sejauh mana dampak? Toksisitas dapat dievaluasi di seluruh organisme (*in vivo*) atau menggunakan molekul atau sel (*in vitro*). Keuntungan utama pengujian toksisitas adalah mendeteksi senyawa beracun berdasarkan aktivitas biologis, dan karena itu tidak menuntut pengetahuan yang dalam tentang polutan untuk mengidentifikasi keberadaannya (tidak seperti analisis kimia). Setelah polutan yang terduga memberi pengaruh telah diidentifikasi, pendekatan pemodelan (*in silico*) dapat digunakan untuk memprediksi toksisitasnya berdasarkan sifat fisiko-kimia senyawa dan kemungkinan keberadaannya dan perjalanannya di lingkungan ((enHealth, 2012).

a. Penilaian toksisitas langsung (*Direct toxicity assessment*)

1) *In vivo bioassays*

Pengujian toksisitas secara konvensional bergantung pada penilaian toksisitas langsung pada organisme, misalnya alga, udang, bulu babi, ikan, tikus, dan lain-lain (Blaise & Féraud, 2005). Organisme yang terpapar bahan kimia dapat dimonitor untuk melihat adanya tanda dampak bagi kesehatan (yang cenderung merugikan). Hal ini dapat berupa dampak morfologi yang berat (seperti penurunan berat badan, lesi yang terlihat, dan kematian) atau penanda biokimia yang

lebih spesifik, ini merupakan salah satu penanda eksposur (indikator dosis internal, seperti metabolit dalam urin) dan/atau biomarker efek (indikator efek kesehatan, seperti aktivitas enzim). Durasi paparan tergantung pada jenis toksisitas yang terdeteksi atau dipantau, dari efek akut jangka pendek (96 jam atau kurang), sub-akut (beberapa hari), sub-kronis (beberapa minggu), hingga efek kronis (sebagian besar harapan hidup organisme).

Pengujian toksisitas *in vivo* umumnya dilihat sebagai prediktor yang paling relevan terhadap dampak bagi kesehatan manusia, meskipun ini tergantung pada spesies yang digunakan. Hal ini karena tes *in vivo* termasuk ukuran penyerapan, distribusi, metabolisme, dan ekskresi, yang semuanya dapat memodulasi toksisitas sampel. Namun, ada beberapa kelemahan dalam pengujian *in vivo*:

- (a) Ekstrapolasi Interspesies. Uji toksisitas *in vivo* dilakukan pada seluruh organisme dari spesies selain manusia, dan hasilnya kemudian diekstrapolasi pada prediksi kesehatan manusia. Semakin besar perbedaan spesies uji terhadap manusia, semakin luas ekstrapolasi ini. Sebagai contoh, herbisida yang mengganggu fotosintesis akan sangat beracun bagi alga, tetapi jauh lebih sedikit dampaknya bagi organisme non-fotosintetik seperti manusia. Demikian juga akan sulit untuk mengekstrapolasi efek udang pada manusia, karena perbedaan yang sangat signifikan dalam *toxicokinetics* (yaitu penyerapan, distribusi, metabolisme, dan ekskresi) antara kedua organisme tersebut. Bahkan spesies yang selama ini banyak digunakan untuk penilaian risiko kesehatan manusia seperti tikus, anjing atau monyet menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam hal metabolisme enzim dibandingkan dengan manusia (Martignoni *et al.*, 2006), yang dapat menghasilkan perbedaan signifikan dalam toksisitas antara spesies yang berbeda. Oleh karena itu, penting untuk memahami mekanisme toksisitas untuk secara bermakna mengekstrapolasi toksisitas *in vivo* terhadap potensi dampak bagi kesehatan manusia.
- (b) Sensitivitas. Secara umum, efek *in vivo* terdeteksi pada konsentrasi $\mu\text{g/L}$. Ketika tujuan pengujian toksisitas murni untuk mendeteksi racun, metode lain yang lebih sensitif seperti pengujian *in vitro* mungkin diperlukan.
- (c) Artefak dan faktor perancu. Ketika menguji sampel air secara keseluruhan, parameter fisikokimia seperti suhu, pH, kekeruhan, warna, dan bahan organik terlarut serta anorganik bisa saja dapat

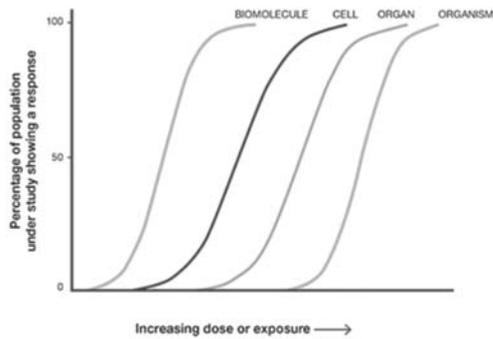
menyebabkan keracunan pada organisme uji, yang sebenarnya tidak akan terjadi di lingkungan alami (disebut dengan kondisi positif palsu).

- (d) Tuntutan etis. Ada kebutuhan etis untuk sedapat mungkin mengurangi, memperbaiki, dan mengganti metode *in vivo* dengan metode alternatif, seperti *in vitro* dan metode *in silico*.
- (e) Biaya/keuangan. Eksperimen *in vivo* dalam hal biaya mungkin lebih mahal. Pertimbangan atas biaya yang tinggi ataupun kemungkinan alternatif biaya rendah kadang-kadang diperlukan.

Meskipun adanya berbagai keterbatasan ini, uji *in vivo* umumnya digunakan untuk menilai risiko terhadap kesehatan manusia karena dapat memberikan indikasi yang dapat diandalkan tentang potensi keracunan pada populasi, khususnya ketika toksisitas itu bersifat baru.

2) *Bioassay in vitro* (metode bioanalitik)

Bioassay in vitro telah digunakan untuk penemuan obat oleh industri farmasi selama beberapa dekade. Dalam *bioassay in vitro*, molekul (misalnya enzim) atau seluruh sel yang terpapar bahan kimia yang menarik dan dimonitor untuk menemukan respon yang bersifat spesifik. Namun, untuk toksisitas yang diinduksi secara kimia, interaksi permulaan bahan kimia pada tingkat molekuler atau seluler adalah prasyarat yang diperlukan (tetapi tidak cukup) untuk melihat sifat toksisitas (Escher & Hermens, 2002). Hal ini karena keracunan terjadi di area terjadinya interaksi racun (yang dapat berupa senyawa induk atau metabolit) dan target biomolekul ("efek utama"). Organisme memiliki mekanisme pertahanan dan kemampuan detoksifikasi untuk mengatasi tingkat toksisitas primer tertentu. Ini berarti bahwa toksisitas *in vitro* mungkin terjadi secara signifikan pada dosis yang lebih rendah daripada efek *in vivo* (Gambar 1.1), tetapi juga berarti bahwa suatu zat dapat menjadi racun secara *in vitro*, tetapi tidak pada *in vivo*.



(Sumber: enHealth, 2012)

Gambar 1.1. Kontinum toksisitas: Untuk menginduksi efek toksisitas pada tingkat organisme umumnya membutuhkan dosis atau eksposur (paparan) yang lebih besar.

Berbagai efek toksik dapat dipantau secara *in vitro*, dari toksisitas basal (sitotoksitas) dan toksisitas reaktif (interaksi dengan protein atau DNA, yang kemudian dapat menyebabkan karsinogenisitas) yang berpotensi mempengaruhi semua sel, terhadap toksisitas spesifik yang mungkin hanya mempengaruhi sel-sel tertentu atau organ (misalnya efek endokrin, neurotoksisitas, imunotoksitas, toksisitas hati, dan lain-lain.). Biasanya, uji *in vitro* dilakukan pada jenis sel tertentu tergantung pada titik akhir yang diinginkan. Beberapa tes dapat lebih bervariasi daripada yang lain, dan prosedur jaminan kualitas/kontrol kualitas menyeluruh seperti penggunaan kontrol positif dan negatif secara konsisten, pemantauan kinerja pengujian dengan grafik kontrol, kuantifikasi batas deteksi, penentuan reproduktivitas dan kekokohan, penggunaan uji sampel, duplikasi intra dan inter-assay, dan adopsi praktik laboratorium yang baik membantu memastikan produksi data berkualitas tinggi yang andal. Setiap jenis bioassay memiliki kelebihan dan keterbatasan, dan tidak ada tes tunggal yang dapat memberikan penilaian lengkap tentang aktivitas biologis sampel. Oleh karena itu, bioassay diperlukan untuk menilai secara ketat potensi sampel untuk menimbulkan efek biologis pada organisme yang terpapar.

Uji *in vitro* umumnya merupakan tes jangka pendek (<1 minggu) yang memberikan pengukuran cepat potensi toksisitas dalam sampel. Metode-metode ini saat ini pada tahap-tahap perkembangan yang berbeda dan tidak semuanya saat ini cocok untuk dimasukkan dalam program pemantauan. Ada beberapa batasan penting untuk uji *in*

vitro yang perlu dibuat sangat jelas, yaitu:

- (a) Tidak ada penggabungan toksikokinetik. Toksikokinetik termasuk Absorpsi, Distribusi, Metabolisme, dan Ekskresi (ADME), yang semuanya dapat secara signifikan mempengaruhi toksisitas suatu zat. Sebagai contoh, jika suatu zat tidak diserap oleh saluran gastrointestinal, ia akan dikeluarkan tanpa berinteraksi dengan sel-sel di dalam tubuh dan dengan demikian tidak akan berbahaya bagi seluruh organisme, bahkan jika sebenarnya itu beracun bagi sel-sel. Atau jika senyawa tersebut cepat dimetabolisme menjadi bentuk yang kurang beracun oleh enzim hati, substansi akan secara signifikan kurang toksik secara *in vivo* daripada yang mungkin ditemukan pada uji *in vitro*. Sebaliknya, beberapa senyawa dapat dibioaktivasi oleh metabolisme, dan mereka mungkin lebih toksik secara *in vivo* daripada *in vitro*. Kehadiran hambatan distribusi dalam tubuh manusia (misalnya menghambat aliran darah ke otak, menghambat aliran darah ke testis, plasenta, dan lain-lain) juga dapat membatasi kemampuan senyawa yang diserap untuk mempengaruhi organ tertentu. Dan akhirnya, senyawa tersebut dapat dikeluarkan dengan cepat oleh ginjal manusia, sehingga paparannya jauh lebih singkat daripada yang akan terjadi secara *in vitro*.
- (b) Sensitivitas lebih tinggi tetapi relevansi lebih rendah. Sebagaimana dibahas di atas, uji *in vitro* mengukur efek utama, yang merupakan interaksi awal antara bahan kimia dan biomolekul. Di seluruh organisme, mekanisme pertahanan dan detoksifikasi dapat mengatasi sejumlah besar efek utama ini tanpa adanya konsekuensi bagi kesehatan secara signifikan. Hanya ketika mekanisme pertahanan tersebut diatasi, toksisitas terjadi secara *in vivo*. Ini berarti bahwa bioassay *in vitro* dapat mendeteksi racun pada dosis yang lebih rendah daripada bioassay *in vivo*, tetapi juga bahwa toksisitas *in vitro* ini tidak selalu berarti efek merugikan akan terjadi secara *in vivo*. Uji *in vitro* dikembangkan untuk tujuan skrining dan masih ada banyak perdebatan tentang kemampuannya untuk memprediksi efek pada seluruh organisme dan badan pengatur umumnya waspada menggunakan data bioassay *in vitro* untuk memprediksi efek kesehatan manusia (Nielsen *et al.*, 2008).

Adanya keterbatasan ini, bioassay *in vitro* tidak boleh digunakan untuk pengukuran adanya dampak. Namun, sangat cocok untuk

memantau kualitas air (penilaian eksposur), karena secara signifikan lebih cepat dan lebih murah daripada eksposur *in vivo*. Teknik ini juga memungkinkan pembuatan data toksikologi yang relatif cepat tanpa memerlukan eksperimen yang menggunakan banyak hewan yang secara etis dan finansial cenderung mahal (Balls *et al.*, 1995).

3) Epidemiologi

Jika pengujian toksisitas menggambarkan toksisitas yang terukur pada sumber air minum, penelitian epidemiologi terhadap populasi yang terpapar dapat dibenarkan untuk menentukan apakah potensi paparan terhadap kontaminan telah berdampak bagi kesehatan manusia. Meskipun epidemiologi adalah ukuran kesehatan manusia yang paling relevan (dibandingkan dengan pengujian toksisitas *in vivo* atau *in vitro*), merancang dan melakukan jenis penelitian untuk mendeteksi dampak air minum pada kesehatan manusia telah terbukti menantang. Hal ini karena kelompok penelitian populasi besar diperlukan untuk secara akurat mengukur apakah ada perbedaan yang nyata antara subjek yang terpapar dan tidak terpapar, dan banyak faktor risiko sosial, ekonomi, dan kesehatan lainnya serta faktor lingkungan dapat berkontribusi terhadap perbedaan antara kedua kelompok ini (seperti paparan kontaminan lingkungan dari sumber lain, perbedaan dalam pengawasan kesehatan antara populasi yang berbeda, dan lain-lain.). Juga dapat terjadi penundaan waktu yang signifikan antara inisiasi penelitian dan hasil akhir - terutama jika penelitian kohort longitudinal diperlukan selama bertahun-tahun untuk menunjukkan hasil kesehatan dengan periode laten. Studi epidemiologis tidak selalu tepat atau praktis, dan jika itu harus dilakukan, maka perlu kehati-hatian dalam merancang penelitian dari awal dan bergantung pada langkah-langkah hasil kesehatan yang jelas dan logis terkait dengan paparan racun (yang akan tergantung pada mekanisme tindakan, jika diketahui, dan bukti pada hewan coba).

4) Pendekatan *in silico* (*In silico approaches*)

Beberapa kekurangan *bioassay in vitro*, terutama kurangnya integrasi toksikokinetik, dapat diatasi dengan menggabungkannya dengan pemodelan komputer (*in silico*), yaitu menggunakan hubungan struktur-aktivitas atau *structure-activity relationships* (SAR). Di SAR, struktur kimia dan sifat fisiko-kimia lainnya dari zat tersebut (ketika diketahui) dapat digunakan untuk memprediksi toksikokinetiknya. Berdasarkan basis data toksisitas yang tersedia, ambang batas toksikologi yang diprediksi dapat ditetapkan untuk bahan kimia

(Kroes *et al.*, 2004), yang kemudian dapat digunakan untuk memperoleh nilai pedoman air minum sementara.

Metode *in silico* sangat berguna tanpa adanya data toksikologi lainnya, tetapi didasarkan pada data dari bahan kimia lain dan dengan demikian harus dilihat dengan hati-hati dan tepat.

b. Bioassay Perilaku (*Behavioral bioassays*)

Behavioral bioassays mengukur perilaku organisme, secara kualitatif atau kuantitatif, untuk mendeteksi dan menganalisis beberapa stimulus eksternal atau sebagai indikator keadaan fisiologis atau psikologis internal. Artinya, *Behavioral bioassays* menggunakan perilaku dalam mengukur kemampuan hewan untuk mendeteksi rangsangan lingkungan secara fisiologis atau neurologis. Kepekaan perilaku suatu organisme dapat digunakan sebagai alat pendeteksi suatu zat (X) dalam sampel. Beberapa contoh *Behavioral bioassays* adalah (1) mendeteksi efek obat, mutasi genetik, dan rangsangan kimia pada perilaku berenang Ciliata seperti Tetrahymena dan Paramecium; (2) mendeteksi polutan menggunakan perilaku berenang ikan; (3) mendeteksi urea dalam darah menggunakan kinerja labirin tikus, atau (4) mendeteksi feromon seks dengan mengukur perilaku mengepakkan sayap pada ngengat (Brown & Bolivar, 2018). Berdasarkan hasil penelitian oleh beberapa ahli, dapat diambil ringkasan teknik penggunaan *Behavioral bioassays* dalam studi feromon serangga. *Behavioral bioassays* digunakan untuk mengukur perilaku yang ditimbulkan oleh hormon dan dapat memberikan informasi tentang konsentrasi atau potensi hormon (Wilkinson & Brown, 2015). *Behavioral bioassays* juga dapat digunakan untuk mendeteksi bahan kimia yang mengganggu endokrin. Dalam ilmu saraf, ada sejumlah jenis *Behavioral bioassays* untuk aksi obat, lesi otak dan gangguan neurologis (Brown & Bolivar, 2018).

Behavioral bioassays bermakna, yaitu (1) mengkaji efek subletal terhadap tumbuhan dan hewan uji, sebagai dasar upaya peringatan dini (*early warning system*), (2) Menggunakan tindakan perilaku untuk mendeteksi zat (X) dalam sampel. Perilaku dapat tidak terkondisi (spesies khas; etologis) ataupun terkondisi. Ada proses respon spesifik dan stimulus dalam *Behavioral bioassays*. (3) Menggunakan perilaku organisme, secara kuantitatif atau kualitatif, untuk menentukan kepekaannya terhadap stimulus eksternal, (4) Menggunakan perilaku binatang atau manusia untuk menentukan elemen efektif dari suatu sinyal lingkungan, (5) Menggunakan perilaku sebagai ukuran keadaan

fisiologis, saraf, mental internal, dan sebagai ukuran pikiran (Brown & Bolivar, 2013).

Menurut Brown dan Bolivar (2013), beberapa contoh pertanyaan-pertanyaan yang perlu mendapatkan jawaban dalam *Behavioral bioassays*.

1. Persepsi
 - a. Berapa tingkat polutan di udara atau air?
 - b. Apa sajakah fitur “kritis” dari stimulus pelepasan?
 - c. Apa komponen “kritis” dari “feromon”? (misalnya aroma ajakan kawin dari hewan).
2. Preferensi/pilihan
 - a. Adakah daya tarik/keengganan suatu stimulus?
3. Kognisi
 - a. Apa yang telah dipelajari?
 - b. Apa yang sudah diingat?
4. Motivasi
 - a. Apakah perempuan dalam estrus?
 - b. Apakah laki-laki lebih suka makan atau berhubungan seks?
5. Emosi
 - a. Apakah hewan ini gelisa /tertekan/takut?
6. Modifikasi saraf
 - a. Apa efek obat/hormon?
 - b. Apa efek lesi otak?

Menurut Brown dan Bolivar (2013) cara mengukur perilaku adalah dengan mengukur unit perilaku, yaitu unit dasar perilaku yang mudah diidentifikasi oleh pengamat. Unit perilaku memecah aliran berkelanjutan perilaku menjadi serangkaian unit diskrit yang terdefinisi dengan baik yang dapat diidentifikasi dan dikuantifikasi. Mendefinisikan unit perilaku ini adalah langkah awal yang sangat penting untuk melakukan eksperimen perilaku. Unit perilaku dapat berupa postur yang dapat diidentifikasi, tindakan motorik, vokalisasi, dan lain-lain. Kontribusi yang paling penting dari etolog untuk mempelajari perilaku mungkin adalah kesadaran bahwa perilaku, seperti fenomena biologis lainnya, dapat diidentifikasi, disistematisasi dan diklasifikasikan.

1. Cara melakukan *Behavioral bioassays*

Seperti tes kimia dan *bioassay*, *Behavioral bioassays* membutuhkan prosedur standar, sebuah “aparatur”, metode untuk mendeteksi keberadaan (X) dan mengukur jumlah (X) dalam sampel, dan metode untuk mengendalikan variabel pengganggu dan mendeteksi kesalahan. *Behavioral bioassays* dapat menjadi spesifik untuk perilaku tertentu. Merancang dan menggunakan *Behavioral bioassays* membutuhkan pertimbangan yang cermat. Perilaku yang ditunjukkan oleh spesies yang digunakan untuk pengujian harus ditetapkan dan dipecah menjadi unit perilaku untuk membuat perilaku dapat diukur secara obyektif. Ini melibatkan pertimbangan lengkap yang diperlukan untuk menjawab pertanyaan penelitian yang ditanyakan, dan secara kualitatif dan obyektif mendefinisikan perilaku yang diukur untuk membedakannya dari perilaku serupa yang mungkin ditunjukkan oleh spesies.

a) *Ethograms* dan *ethograms parsial*

Behavioral bioassays membutuhkan pengetahuan tentang repertoar (kumpulan) perilaku hewan yang akan dipelajari. Ethogram adalah kumpulan deskripsi komprehensif yang mewakili pola perilaku spesies tertentu. Hal ini diibaratkan katalog yang menggambarkan pola perilaku yang membentuk pengulangan perilaku spesies. Ketika etogram mencakup semua perilaku khas spesies itu dianggap sebagai etogram penuh. Misalnya, Eisenberg memberikan etogram penuh untuk *Peromyscus*. Banyak ethograms lainnya telah diterbitkan menggambarkan perilaku berbagai spesies, termasuk jerapah; zebrafish, dan felidae (Wilson *et al.*, 2008).

Etoqram parsial adalah deskripsi perilaku dalam kategori perilaku tertentu seperti perilaku induk/ibu, perilaku perawatan, perilaku seksual, atau perilaku agresif. Etogram parsial digunakan ketika pertanyaan penelitian yang ditanyakan hanya berkaitan dengan satu kategori perilaku. Sebnayal 45 unit perilaku untuk perilaku sosial pada tikus laboratorium. Brown dan McFarland (1979) mempelajari perilaku seksual tikus dengan mencatat perilaku yang berkaitan dengan pemasangan, ejakulasi, dan intromission. Brown *et al* (1999) membandingkan perilaku induk tikus C57BL/6J dan DBA/2J melalui analisis lima perilaku induk yang berbeda.

Walker dan Archer (1988) memberikan sebagian etogram untuk perilaku perawatan nyamuk, termasuk 12 perilaku berbeda yang dapat

dikelompokkan ke dalam lima urutan yang berbeda. Kalueff dan Tuohimaa (2005) meneliti enam komponen perilaku perawatan pada tikus. Perilaku reproduksi merpati diamati dan di katalog oleh Fabricius dan Jansson (1963), yang mengidentifikasi 19 perilaku berbeda yang terkait dengan perilaku reproduksi. Tinbergen (1952) menganalisis perilaku reproduksi ikan *stickleback*, dari pertahanan awal wilayahnya dan membangun sarang hingga penetasan telurnya. Demikian pula, Mertz dan Barlow (1966) mengidentifikasi empat perilaku reproduksi yang berbeda, dan lima pola motorik pada *flagfish*. Beberapa etogram memasukkan kategori perilaku yang lebih rinci dari yang lain, dan oleh karena itu merupakan ukuran perilaku yang lebih tepat.

b) Deskripsi kualitatif unit perilaku

Unit perilaku adalah perilaku yang dicatat dalam etogram. Unit-unit ini sebagai tindakan-tindakan otot terkoordinasi yang stereotip yang dapat diorganisasikan ke dalam urutan-urutan dan dapat diprediksikan oleh rangsangan internal atau eksternal. Mereka harus didefinisikan secara obyektif dan cukup spesifik sehingga pengamat yang berbeda dapat merekam perilaku dengan cara yang sama dan menunjukkan kesepakatan antar-pengamat tinggi dalam hasil. Unit perilaku memecah aliran perilaku berkelanjutan menjadi serangkaian unit rahasia yang terdefinisi dengan baik yang dapat diidentifikasi dan dikuantifikasi. Mendefinisikan unit perilaku ini adalah langkah awal yang sangat penting untuk melakukan eksperimen perilaku.

Terminologi dan konsep yang digunakan untuk menggambarkan perilaku telah menjadi topik perdebatan, dan telah berkembang sejak tahun 1950-an. Konsep pola tindakan tetap (*fixed action pattern/FAP*) adalah salah satu metode pertama yang diadopsi oleh peneliti perilaku untuk menggambarkan urutan. FAP umumnya digambarkan sebagai perilaku stereotip yang tidak dipelajari dan merupakan karakteristik spesies, meskipun ada banyak perspektif yang berbeda tentang bagaimana istilah ini harus didefinisikan. Beberapa contoh FAP adalah perilaku menggulung telur angsa Greylag; pola perilaku agresif dan seksual dari tiga ikan *stickleback spined*; perilaku melarikan diri dari siput laut *Tritonia diomedea*; dan "tampilan strut" dari belibis jantan.

Sementara konsep FAP telah berguna untuk memeriksa kontrol saraf penggerak dalam beberapa invertebrata. Analisis kuantitatif dari

urutan perilaku dalam FAP lainnya telah menunjukkan beberapa pola tindakan “tetap” menjadi sangat bervariasi dan dapat dimodifikasi. Seperti halnya untuk tampilan kepala “bob” pada kadal *Anolis aeneus* dan perilaku agresif pada jangkrik *Gryllus bimaculatus*). Definisi FAP yang tepat adalah dengan menganalisis penggunaannya dalam penelitian etologi dan menemukan banyak kriteria yang menentukan, tetapi tidak ada konsensus khusus mengenai kriteria mana yang definitif. Konsep tersebut mengimplikasikan tingkat stereotip yang tinggi dan sifat-sifat lain yang tidak ada ketika perilaku dianalisis secara kuantitatif. Istilah “pola tindakan modal” (*modal action pattern/ MAP*) diusulkan untuk digunakan dan didefinisikan sebagai pola spatio-temporal yang dapat dibedakan dari gerakan yang dapat dinamai dan ditandai secara statistik, tidak dapat dibagi lagi menjadi unit independen, dan yang didistribusikan secara luas pada seluruh pola perkawinan silang populasi. Pola tindakan modal ini sekarang disebut sebagai “unit perilaku”.

Meskipun ada kritik terhadap konsep FAP, hal itu telah berguna pada beberapa jenis penelitian, seperti memeriksa motivasi untuk mematok bulu pada ayam; mekanisme neurobiologis generator pola sentral dalam mengendalikan pola lokomotor; dan kontrol genetik dari urutan perilaku pada lalat buah. Penggunaan konsep FAP ini bergantung pada analisis kuantitatif urutan perilaku daripada hanya menggambarkannya secara kualitatif. Menggambarkan unit perilaku secara kualitatif membutuhkan definisi verbal yang obyektif dan memungkinkan adanya konsistensi pengukuran. Hal ini dapat dicapai dengan memberikan definisi yang jelas dan menyeluruh tentang perilaku yang sedang dipelajari.

c) Deskripsi kuantitatif unit perilaku

Setelah aliran perilaku dibagi menjadi unit perilaku yang terdefinisi dengan baik, unit-unit ini dapat diukur secara kuantitatif. Frekuensi unit perilaku pada sampel, rata-rata, dan durasi total unit perilaku dalam sampel dapat dihitung, atau interval antara penampilan perilaku tertentu dapat diukur. Ciri perilaku seksual tikus jantan melalui analisis unit perilaku, seperti durasi pemasangan, *inter-intromission-interval*, dan frekuensi ejakulasi yang menghasilkan kemampuan sepenuhnya dapat digunakan untuk menganalisis perubahan perilaku seksual setelah perampasan makanan. Adanya latensi untuk memulai perilaku tertentu juga dapat diukur.

Pendekatan ini digunakan oleh Lee dan Brown (2002) dalam membandingkan latensi tikus untuk mendekati *pups* dan menunjukkan perilaku induk sebelum dan sesudah lesi otak. Brown dan McFarland (1979) menggunakannya untuk mengukur latensi puncak, latensi intromission, dan latensi ejakulasi pada perilaku seksual tikus. Mengukur latensi pada *onset* suatu perilaku dapat memberikan wawasan eksperimen yang berharga tentang perubahan perilaku antara kondisi pengujian yang berbeda, yang secara nyata sebenarnya tidak akan diungkapkan oleh data jika yang diukur hanya kejadian atau frekuensi perilaku.

Pola temporal dari unit perilaku juga dapat dianalisis, yang dapat mengarah pada penemuan pola dalam urutan perilaku. Masalah pertama dalam analisis sekuens temporal adalah menentukan bagaimana membagi urutan perilaku. Analisis organisasi sekuensial unit perilaku telah digunakan untuk menentukan organisasi serangan musik pada burung dan untuk menentukan bahwa urutan catatan lagu menghasilkan banyak jenis panggilan berbeda dalam lagu *chick-a-dee* pada burung.

Beberapa peneliti membandingkan berbagai teknik yang berbeda dalam analisis kuantitatif urutan perilaku bernyanyi pada burung. Nilsen menganalisis urutan temporal perilaku agresif pada lalat buah. Walker dan Archer mengidentifikasi lima urutan perlindungan yang berbeda yang ditampilkan dalam perilaku nyamuk. Analisis sekuensial juga telah digunakan untuk menilai pola gerakan pada tikus *inbred* dan perlindungan pada tikus. Analisis sekuensial juga dapat digunakan untuk mendeteksi pola perilaku stereotip yang berulang. Mungkin ada kasus di mana pola perilaku berulang disimpan dalam urutan perilaku dan analisis pola-T telah dikembangkan untuk mendeteksi struktur temporal tersembunyi yang tertanam dalam urutan perilaku (Casarrubea *et al.*, 2015).

2. *Bioaccumulation study*

Bioaccumulation study, melakukan kajian dosis kontaminan yang diserap tumbuhan dan hewan uji dan dampaknya dalam rantai makanan (*food chain*). Bioakumulasi adalah masuknya bahan kimia dan terkonsentrasi dalam organisme melalui berbagai cara, yaitu kontak langsung, respirasi, dan konsumsi (Alexander, 1999). Bioakumulasi menunjukkan akumulasi dan pengayaan kontaminan pada organisme, bersifat relatif terhadap yang ada di lingkungan. Bioakumulasi merupakan hasil bersih dari semua proses pengambilan

dan kehilangan, seperti pengambilan pernapasan dan makanan, dan kehilangan oleh difusi pasif, metabolisme, transfer ke keturunan dan pertumbuhan. Dengan demikian, bioakumulasi terdiri dari proses biokonsentrasi dan biomagnifikasi yang lebih spesifik. Biokonsentrasi adalah proses pembagian langsung bahan kimia antara air dan organisme, yang mengarah ke konsentrasi tinggi pada yang terakhir. Selanjutnya, biomagnifikasi mengarah ke peningkatan konsentrasi kimia dengan posisi trofik yang lebih tinggi pada jaringan makanan (Borga, 2013).

Apabila diambil oleh organisme, tidak otomatis menghasilkan bioakumulasi yang bersifat kontaminan. Suatu organisme dapat memodifikasi campuran kontaminan yang diserap; beberapa bahan kimia dipertahankan, sedangkan yang lain yang lebih larut dalam air atau terdegradasi, dieliminasi dari tubuh, sehingga tidak ada akumulasi bersih. Dalam jaring makanan, hewan menunjukkan bioakumulasi yang sangat berbeda dari berbagai bahan kimia, baik dalam kadar maupun dalam komposisi yang relatif (Borga, 2013).

Bioakumulasi merupakan perhatian utama dalam lingkungan. Dengan demikian, pemantauan konsentrasi kimia dalam biota secara luas dan semakin digunakan untuk menilai status kimia dari ekosistem akuatik. Biota tidak dapat hanya mengambil tetapi juga mengumpulkan bahan kimia, pemantauan bahan kimia dalam organisme akuatik merupakan bagian penting dari berbagai program yang menilai status kimia dari badan air. Bahan kimia termasuk bahan kimia organik hidrofobik (*hydrophobic organic chemicals/HOCs*) dan logam diambil dari lingkungan akuatik baik melalui fase air atau makanan yang pada gilirannya dapat mengakibatkan toksisitas.

Selain itu, bahan kimia yang cenderung mem-partisi sedimen dapat diambil dengan kontak langsung dengan sedimen. Kuantifikasi bahan kimia dalam biota sering secara analitis menantang. Selain itu, bioakumulasi tergantung pada banyak abiotik (misalnya kualitas air spesifik situs seperti kekerasan atau pH) dan faktor biotik (misalnya lipid, usia atau jenis kelamin organisme) yang harus dipertimbangkan dalam penilaian bioakumulasi. Sebagai alternatif untuk mengukur bahan kimia dalam organisme, penggunaan perangkat pasif sampling yang mengumpulkan bahan kimia dalam fase referensi dibahas di tingkat internasional. Menilai bioakumulasi lebih lanjut diperlukan untuk otorisasi bahan kimia di banyak kerangka kerja legislatif nasional dan internasional (Scaffer *et al.*, 2015).

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

1. Biomonitoring melibatkan penggunaan organisme untuk menilai adanya pencemaran lingkungan, baik udara, tanah, maupun air. Teknik ini dapat dilakukan secara kualitatif atau kuantitatif. Dengan mengamati atau mengukur dampak lingkungan terhadap organisme, polusi dapat dianalisis atau disimpulkan. Uraikan dengan memberi contoh, teknik biomonitoring secara kualitatif dan secara kuantitatif di tanah.
2. Terlepas dari kelebihan atau keuntungan, biomonitoring masih memiliki kelemahan dan keterbatasan, yang paling signifikan adalah bahwa jumlah zat pencemar yang mungkin yang dapat dipantau secara biologis saat ini masih sedikit. Dalam kasus paparan akut, pemantauan biologis memberikan informasi yang berguna hanya untuk paparan zat yang cepat dimetabolisme, misalnya, pelarut aromatik. Jelaskan pendapat Anda terkait dengan hal tersebut dan berikan rekomendasi (berdasarkan teori yang telah dikaji) untuk meminimalisasi permasalahan.

BAB II

KONSEP BIOINDIKATOR

A. Pengantar

Banyak senyawa kimia yang berpotensi berbahaya, yang berasal dari aktivitas manusia-sebagaimana telah diuraikan di Bab I-secara terus-menerus dilepaskan ke lingkungan. Dalam konteks ini, banyak ilmuwan yang telah menunjukkan minat yang semakin besar dalam deteksi, pengetahuan, dan pengendalian agen lingkungan yang bertanggung jawab atas terjadinya permasalahan kesehatan manusia dan permasalahan keberlanjutan ekosistem. Pemantauan jenis dan jumlah zat polutan yang masuk ke lingkungan adalah pekerjaan yang melelahkan dan menyita energi besar, terutama karena sifatnya yang kompleks dan biaya besar dalam identifikasi bahan kimia. Meskipun sebenarnya banyak metode analitik yang dapat dilakukan, mengumpulkan sampel yang cukup dan pada waktu yang tepat terus menjadi kendala besar dalam upaya evaluasi adanya kerusakan lingkungan. Selain itu, penentuan zat terisolasi melalui analisis kimia tradisional memiliki aplikasi lingkungan yang terbatas, karena tidak dapat mendeteksi dampak pada organisme dan tidak menggambarkan interaksi yang mungkin antara zat (aditif, antagonis atau sinergis) serta ketersediaan hayati (Magalhães & Ferrão-Filho, 2008; Silva et al., 2003).

Para peneliti telah menyarankan perlunya penerapan teknik biologis untuk dalam pendekatan ekosistem. Faktor biologis dapat menunjukkan adanya keseimbangan atau ketidakseimbangan lingkungan yang lebih baik melalui indeks biotik, yang berasal dari pengamatan spesies-spesies bioindikator (Fontanetti et al., 2011). Bioindikator memiliki persyaratan khusus yang berkaitan dengan seperangkat variabel fisik atau kimia yang diketahui sedemikian rupa sehingga perubahan dalam kehadiran/ketidakhadiran, jumlah, morfologi, fisiologi, atau perilaku spesies tersebut menunjukkan bahwa variabel fisik atau kimia yang diberikan berada di luar batas toleransi. Sebagian besar, bioindikator dibatasi sebagai spesies yang

bereaksi terhadap efek antropogenik lingkungan, sedangkan bioindikator untuk perubahan dan kondisi lingkungan “alami” tidak banyak digunakan. Namun demikian, definisi umum dari indikator biologis adalah: “spesies atau kelompok spesies yang dapat mencerminkan keadaan lingkungan abiotik atau biotik, mewakili dampak perubahan lingkungan pada habitat, komunitas atau ekosistem, dan indikator keragaman taksa atau seluruh keragaman dalam suatu area” (Gerhardt, 2009; Magalhães & Ferrão-Filho, 2008).

Bioindikator adalah kelompok atau komunitas organisme yang saling berhubungan, yang keberadaannya atau perilakunya sangat erat berhubungan dengan kondisi lingkungan tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai satu petunjuk kualitas lingkungan atau uji kuantitatif (Setyono & Sutarto, 2008; Triadmodjo, 2008). Bioindikator menunjukkan sensitivitas dan/atau toleransi terhadap kondisi lingkungan sehingga memungkinkan untuk digunakan sebagai alat penilai kondisi lingkungan (Setiawan, 2008). Bioindikator adalah makhluk yang diamati penampakannya untuk dipakai sebagai petunjuk tentang keadaan kondisi lingkungan dan sumber daya pada habitatnya. Selain itu, bioindikator mampu mencerminkan kualitas suatu lingkungan atau dapat memberikan gambaran situasi ekologi (Juliantara, 2011). Bioindikator memandang bahwa kelompok organisme adalah saling terkait, dimana kehadiran, ketidakhadiran, dan/atau tingkah lakunya sangat erat terkait dengan status lingkungan tertentu sehingga dapat digunakan sebagai indikator (Winarni, 2016).

Suatu organisme yang dapat memberikan respon, indikasi, peringatan dini, representasi, refleksi, dan informasi kondisi atau perubahan suatu ekosistem disebut bioindikator (Weissman *et al.*, 2006). Bioindikator merupakan salah satu komponen penting dalam pengelolaan ekosistem. Dasar pemikiran akan adanya suatu organisme indikatif adalah adanya hubungan yang erat antara suatu organisme dengan parameter biotik dan abiotik dalam ekosistem (McGeoch *et al.*, 2002). Suatu organisme akan berkembang secara optimal pada kondisi lingkungan ideal. Komponen ekosistem yang tidak ideal berdampak pada perubahan mekanisme kehidupan organisme (Pribadi, 2009).

Bioindikator juga berarti organisme maupun anggota komunitas yang mampu memberikan informasi terkait kondisi lingkungan secara parsial, bagian kecil, atau keseluruhan. Bioindikator harus mampu

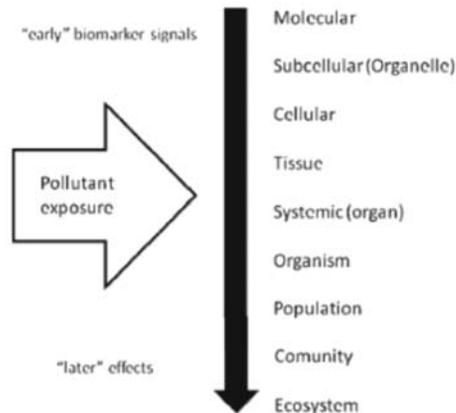
memberikan gambaran status lingkungan dan/atau kondisi biotik; mengindikasikan dampak perubahan habitat, perubahan komunitas atau pun ekosistem; atau menggambarkan keragaman kelompok takson, atau keragaman dalam suatu daerah yang diamati. Organisme dapat memonitor perubahan (biokimia, fisiologi, atau kebiasaan) yang mungkin mengindikasikan adanya masalah di ekosistemnya. Bioindikator dapat menunjukkan tentang kumpulan efek dari berbagai pencemar yang berbeda di ekosistem (Kripa *et al.*, 2013).

Di alam terdapat hewan, tumbuhan, dan mikroorganisme yang peka dan ada pula yang tahan terhadap kondisi lingkungan tertentu. Organisme yang peka akan mati karena pencemaran dan organisme yang tahan akan tetap hidup. Siput air dan *Planaria* merupakan contoh hewan yang peka pencemaran. Sungai yang mengandung siput air dan planaria menunjukkan sungai tersebut belum mengalami pencemaran. Sebaliknya, cacing merah (*Tubifex*) merupakan cacing yang tahan hidup dan bahkan berkembang baik di lingkungan yang kaya bahan organik, meskipun spesies hewan yang lain telah mati. Ini berarti keberadaan cacing tersebut dapat dijadikan indikator adanya pencemaran zat organik. Organisme yang dapat dijadikan petunjuk pencemaran dikenal sebagai indikator biologis.

Bioindikator terkadang lebih dapat dipercaya daripada indikator kimia. Pabrik yang membuang limbah ke sungai dapat mengatur pembuangan limbahnya ketika akan dikontrol oleh pihak yang berwenang. Pengukuran secara kimia pada limbah pabrik tersebut selalu menunjukkan tidak adanya pencemaran. Tetapi tidak demikian dengan makhluk hidup yang menghuni ekosistem air secara terus menerus. Di sungai itu terdapat hewan-hewan, mikroorganisme, bentos, mikroinvertebrata, ganggang, yang dapat dijadikan bioindikator.

B. Respon organisme terhadap pencemaran

Menurut Kuniyoshi dan Braga (2010) organisme dalam habitatnya secara konstan mendapat pengaruh oleh berbagai polutan. Polutan sangat mungkin berinteraksi dengan kehidupan organisme mendukung sesuatu yang abnormal dan hal itu mungkin dari tingkat molekuler sampai konsekuensi serius pada ekosistem. Hal ini seperti disajikan pada Gambar 2.1.



(Sumber: Kuniyoshi & Braga, 2010).

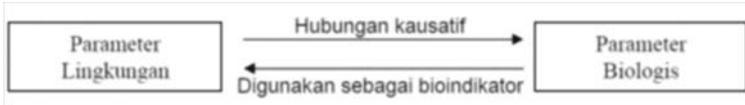
Gambar 2.1 Representasi skematik dampak polutan terhadap sistem biologi

Bioindikator dapat meliputi beberapa variasi skala dari aspek makro molekul, sel, organ, organisme, populasi, sampai biocoenosis (ekosistem), sehingga bentuk indikator meliputi: (1) reaksi biokimia dan fisiologis, (2) abnormalitas anatomi, morfologi, bioritme dan tingkah laku, (3) perubahan populasi hewan atau tumbuhan secara kronologis, (4) perubahan pada ekosistem maupun gabungan ekosistem, (5) perubahan pada struktur ataupun fungsi ekosistem, dan (6) perubahan bentuk lahan atau *landscape* (Setiawan, 2008).

Timbulnya variasi dalam suatu populasi tergantung pada sensitifitasnya terhadap fluktuasi perubahan lingkungan, yakni interaksi antar spesies yang ada. Setiap spesies akan menunjukkan efek yang berbeda dalam menanggapi suatu kompetisi, dan biodiversitas yang meningkat pada suatu komunitas akan sangat mendukung terwujudnya stabilitas komunitas tersebut (Setyono & Sutarto, 2008). Timbulnya variasi dalam suatu populasi tergantung pada sensitifitasnya terhadap fluktuasi perubahan lingkungan, yakni interaksi antar spesies yang ada. Setiap spesies akan menunjukkan efek yang berbeda dalam menanggapi suatu kompetisi dan biodiversitas yang meningkat pada suatu komunitas akan sangat mendukung terwujudnya stabilitas komunitas tersebut (Zulkifli & Setiawan, 2011).

Pengembangan sistem bioindikator dapat dilihat sebagai hubungan timbal balik antara faktor lingkungan dengan parameter

biologis. Karakteristik parameter biologis tersebut diantaranya adalah komposisi jenis, gejala kerusakan suatu organisme, tubuh yang terkontaminasi polutan, induksi, dan penghambatan enzim. Efektif tidaknya suatu bioindikator yang digunakan ditentukan oleh keterkaitan antara faktor lingkungan dan parameter biologis. Interaksi antara kedua parameter ini ditunjukkan pada Gambar 2.2.



(Sumber: Setiawan, 2008)

Gambar 2.2. Skema hubungan antara faktor lingkungan dengan parameter biologi

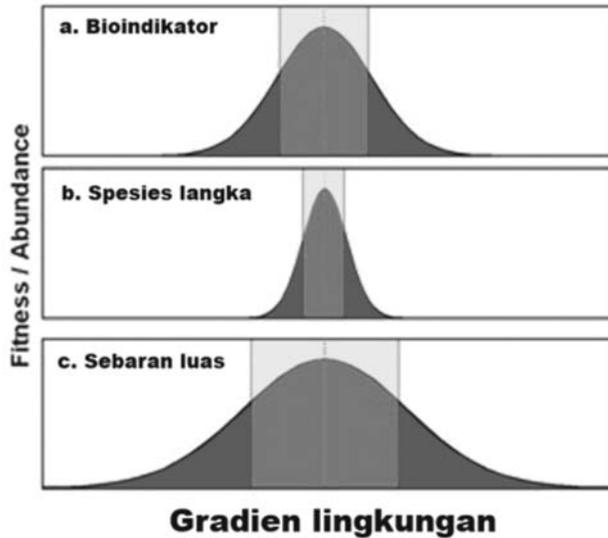
Faktor lingkungan berpengaruh terhadap parameter biologis dalam bentuk hubungan sebab-akibat (kausatif). Bila parameter biologis menjadi indikator maka harus dipandang kebalikan dari hubungan kausatif. Syarat untuk menetapkan atau memilih organisme sebagai bioindikator, yaitu: (1) Takson yang tinggi atau lebih tinggi, harus memilih takson dengan taksonomi jelas, diketahui secara terperinci, dan mudah untuk diidentifikasi; (2) Status biologi diketahui jelas, peka terhadap tekanan maupun perubahan lingkungan; (3) Organisme memiliki kelimpahan tinggi dan mudah disurvei/diamati; (4) Tersebar dalam ruang dan waktu; dan (5) Memiliki hubungan yang kuat dengan komunitas luas atau tidak memiliki hubungan kuat dengan komponen tekanan (Hordkinson & Jackson, 2005).

Menurut Holt and Miller (2010) bioindikator mencakup proses biologis, spesies, atau komunitas dan digunakan untuk menilai kualitas lingkungan dan bagaimana perubahannya dari waktu ke waktu. Perubahan lingkungan sering dikaitkan dengan gangguan antropogenik (misalnya, polusi, perubahan penggunaan lahan) atau pemicu alami (misalnya, kekeringan dan pembekuan akhir musim semi), meskipun penyebab stres antropogenik menjadi fokus utama penelitian bioindikator. Pengembangan secara luas dan penerapan bioindikator telah terjadi terutama sejak 1960-an. Selama bertahun-tahun, pakar telah memperluas repertoar bioindikator untuk membantu mempelajari semua jenis lingkungan (akuatik dan terestrial), menggunakan semua kelompok taksonomi utama.

Namun, tidak semua proses biologis, spesies, atau komunitas dapat berfungsi sebagai bioindikator yang tepat. Faktor fisik, kimia, dan biologis (misalnya substrat, cahaya, suhu, dan persaingan) umumnya bervariasi di lingkungan. Seiring waktu, populasi mengembangkan strategi untuk memaksimalkan pertumbuhan dan reproduksi (*fitness*) dalam rentang faktor lingkungan tertentu. Di luar lingkungan individu yang optimal, atau rentang toleransi, fisiologi dan/atau perilaku dapat terpengaruh secara negatif, mengurangi *fitness* secara keseluruhan. Spesies bioindikator secara efektif menunjukkan kondisi lingkungan karena toleransinya yang moderat terhadap variabilitas lingkungan (Gambar 2.3). Daya tahan/toleransi berkurang, kemudian dapat mengganggu dinamika populasi dan mengubah komunitas secara keseluruhan (Gambar 2.3). Sebaliknya, spesies-spesies langka dengan toleransi sempit sering terlalu sensitif terhadap perubahan lingkungan, atau terlalu jarang ditemui, untuk mencerminkan respon biotik secara umum. Demikian juga, spesies-spesies dengan toleransi yang sangat luas kurang sensitif terhadap perubahan lingkungan. Penggunaan bioindikator, tidak hanya terbatas pada satu spesies dengan toleransi lingkungan yang terbatas. Seluruh komunitas, mencakup berbagai toleransi lingkungan, dapat berfungsi sebagai bioindikator dan mewakili berbagai sumber data untuk menilai kondisi lingkungan dalam “biotic index” atau pendekatan “multimetric”.

Selanjutnya, proses biologis pada suatu organisme dapat digunakan sebagai bioindikator. Sebagai contoh, ikan trout liar yang menghuni aliran air dingin di bagian barat Amerika Serikat. Sebagian besar individu memiliki toleransi suhu antara 20-25°C; dengan demikian, sensitivitas suhu mereka dapat digunakan sebagai bioindikator suhu air. Pengembalaan ternak, pembakaran, dan penebangan adalah contoh gangguan yang berhubungan dengan manusia yang dapat meningkatkan suhu air di sungai-sungai ini dan dideteksi oleh ikan-ikan liar di berbagai skala biologis (Gambar 2.4). Respon langsung adanya perubahan suhu terjadi pada tingkat sel. Secara khusus, sintesis protein kejutan panas (*heat shock proteins/hsp*) meningkat untuk melindungi fungsi seluler yang vital dari stres akibat suhu. Kita dapat mengukur tingkat hsp untuk mengukur tekanan suhu pada ikan trout liar dan menilai bagaimana lingkungan telah berubah. Jika tekanan suhu tetap ada, maka perubahan fisiologis seperti itu biasanya dapat diatasi pada tingkat individu melalui

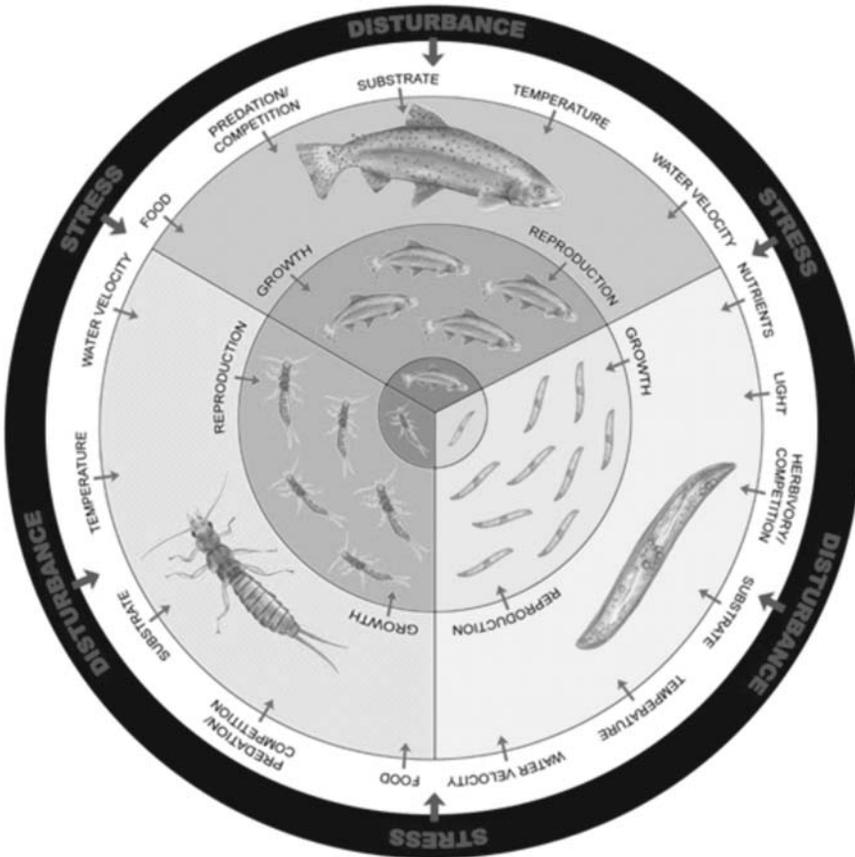
perubahan perilaku, pelambatan pertumbuhan, dan pengurangan laju perkembangan. Pada contoh yang paling ekstrim, perubahan suhu yang besar dan terus-menerus dapat mengurangi jumlah populasi dan bahkan mengarah pada terjadinya kepunahan lokal, sehingga menyebabkan pergeseran komposisi ke perikanan air hangat.



(Sumber: Holt & Miller, 2010)

Gambar 2.3. Perbandingan toleransi lingkungan terhadap (a) bioindikator, (b) spesies langka, dan (c) spesies yang ada di mana-mana/sebaran luas

Area merah pada Gambar 2.2 mewakili bagian dari gradien lingkungan (misalnya, ketersediaan cahaya dan kadar nitrogen) dimana individu, spesies, atau komunitas, memiliki *fitness* atau kelimpahan yang lebih besar dari nol. Garis putus-putus menunjukkan kinerja puncak sepanjang gradien lingkungan tertentu ini, sementara kotak kuning termasuk rentang atau toleransi optimal. Bioindikator memiliki toleransi yang moderat terhadap variabilitas lingkungan, dibandingkan dengan spesies langka dan di mana-mana. Toleransi ini memberi mereka kepekaan untuk menunjukkan perubahan lingkungan, namun ketahanan untuk menahan beberapa variabilitas dan mencerminkan respons biotik umum.



(Sumber: Holt & Miller, 2010)

Gambar 2.4. Diagram tingkat hierarkis suatu ekosistem yang merespons gangguan antropogenik atau tekanan alami

Lingkaran putih pada Gambar 2.4 merupakan variabel lingkungan mencakup faktor-faktor yang dapat diubah secara langsung oleh gangguan atau stres. Perubahan ini kemudian dapat mempengaruhi organisme individu, populasi, atau komunitas secara keseluruhan. Cincin berwarna terluar mewakili organisme individu (ikan trout, *Pteronarcys salmonfly*, dan *Phaedoactylum diatom*), cincin berwarna di tengah mewakili populasi organisme tersebut, dan cincin berwarna paling dalam mewakili komunitas dimana ketiga spesies hidup berdampingan. Gangguan dan stres dapat secara positif atau negatif mempengaruhi sumber daya energi (misalnya makanan dan cahaya), interaksi biotik (misalnya persaingan, predasi, dan herbivora), dan fisik (misalnya kecepatan air dan substrat tempat

organisme menempel serta bertelur), atau lingkungan kimia (misalnya nutrisi). Perubahan lingkungan ini dapat meningkatkan atau mengurangi pertumbuhan dan reproduksi organisme, akibatnya berdampak pada ukuran dan produktivitas populasi dan interaksi dengan spesies lain di masyarakat.

C. Tipe Bioindikator

Menurut Setiawan (2008) bioindikator dalam aplikasinya dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu indikator lingkungan, indikator ekologis dan indikator keanekaragaman hayati. Ketiga indikator tersebut diuraikan sebagai berikut:

1. Indikator lingkungan, merupakan organisme atau kelompok populasi yang peka akan adanya lingkungan rusak, tercemar atau mengalami perubahan kondisi. Indikator lingkungan dibagi lagi menjadi 5, yaitu sentinels, detektor, eksploiter, akumulator, dan bioassay organisme.
2. Indikator ekologis, merupakan takson atau kelompok yang peka akan adanya tekanan terhadap lingkungan, mengindikasikan dampak tekanan terhadap makhluk hidup dan respon diwakili oleh sampel takson di habitat itu.
3. Indikator keanekaragaman hayati, merupakan kelompok takson atau fungsional mengindikasikan beberapa ukuran keanekaragaman atau kekayaan jenis, kekayaan sifat, dan status endemisitas takson di atasnya pada habitat tertentu. Indikator biodiversitas dapat dibedakan menjadi 3 kelompok yaitu kelompok referensi, kelompok kunci dan kelompok *focal*.

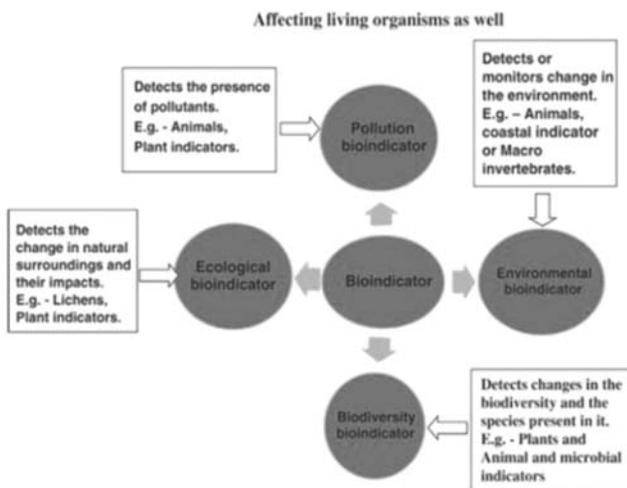
Berdasarkan fungsinya, menurut Setiawan (2008) bioindikator dapat dibedakan dalam tiga kelompok, yaitu:

1. Indikator (kehadiran dan absensinya menyimpulkan tentang permasalahan lingkungan, secara kuantitatif jarang).
2. Spesies uji (tanggapannya mengindikasikan tentang permasalahan yang luas, spesies uji umumnya memiliki standarisasi yang tinggi),
3. Monitor (menyediakan bukti akan adanya perubahan, kesimpulan kuantitatif biasanya mungkin melalui kalibrasi). Monitor terdiri dari monitor aktif yang tersedia dengan cepat di alam) dan monitor pasif (organisme monitor yang di introduksi).

Berdasarkan status makhluk hidupnya, bioindikator dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. **Fitoindikator.** Penerapan fitoindikator memiliki beberapa manfaat, yaitu (a) menunjukkan adanya paparan polutan, (b) memudahkan identifikasi racun, (c) menjadi indikator *early warning* (peringatan dini) rusaknya lingkungan, (d) menjadi *early indicator* (indikator dini) pemulihan lingkungan, dan (e) melengkapi data analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL).
2. Zooindikator
 - a. *Keystone species* dan *endangered species*
 - b. *Bioindication sensu lato* (secara luas)

Menurut Parmar *et al* (2016) berdasarkan pengaruh yang dapat dirasakan organisme, bioindikator dibagi menjadi empat seperti pada Gambar 2.5, dengan uraian sebagai berikut:



(Sumber: Parmar *et al.*, 2016)

Gambar 2.5 Tipe bioindikator

1. **Bioindikator Polusi.** Bioindikator polusi merupakan spesies yang diketahui sensitif terhadap polusi atau mampu mendeteksi adanya polutan.
2. **Bioindikator Lingkungan.** Bioindikator lingkungan merupakan spesies atau kelompok spesies yang merespon secara prediktif terhadap gangguan atau perubahan lingkungan (misalnya sentinel, detektor, penghisap, akumulator, dan organisme bioassay). Sistem indikator lingkungan adalah serangkaian indikator yang bertujuan untuk mendiagnosis keadaan lingkungan untuk pembuatan kebijakan lingkungan.

3. **Bioindikator Ekologi.** Bioindikator ekologi merupakan spesies yang diketahui sensitif terhadap fragmentasi habitat atau tekanan lainnya. Spesies ini mampu mendeteksi perubahan dalam lingkungan alami dan dampaknya. Tanggapan indikator mewakili komunitas.
4. **Bioindikator Keanekaragaman hayati.** Kekayaan spesies dari takson indikator digunakan sebagai indikator untuk kekayaan spesies suatu komunitas. Namun, definisi tersebut telah diperluas menjadi “parameter keanekaragaman hayati yang terukur”, termasuk misalnya kekayaan spesies, endemisme, parameter genetik, parameter khusus populasi, dan parameter lanskap.

Berbagai jenis bioindikator dapat dijelaskan dari perspektif berbeda. Menurut tujuan bioindikasi, tiga jenis bioindikator dijelaskan perbedaannya, yaitu:

1. **Indikator kepatuhan.** Indikator kepatuhan, misalnya atribut populasi ikan diukur pada tingkat populasi, komunitas atau ekosistem, dan difokuskan pada isu-isu seperti keberlanjutan populasi atau masyarakat secara keseluruhan.
2. **Indikator diagnostik.** Indikator diagnostik dan peringatan dini diukur pada tingkat individu atau suborganisme (biomarker).
3. **Indikator peringatan dini.** Indikator peringatan dini berfokus pada tanggapan cepat dan sensitif terhadap perubahan lingkungan. Akumulasi bioindikator (misalnya kerang, lumut) dibedakan dari efek toksik bioindikator, dengan efek yang dipelajari pada tingkat organisasi biologis yang berbeda.

D. Kriteria Makhluk Hidup Sebagai Indikator Lingkungan

Menurut Odum (1993), pedoman mengenai makhluk yang dapat digunakan sebagai bioindikator, yaitu:

1. Spesies *steno* (kisaran toleransinya sempit) lebih baik dipakai sebagai indikator dibandingkan dengan spesies yang euri (kisaran toleransinya luas).
2. Spesies yang dewasa lebih baik dipakai sebagai indikator dibandingkan dengan yang masih muda.
3. Sebelum mempercayai penampakan makhluk sebagai indikator ekologis, maka terlebih dahulu harus ada bukti yang cukup bahwa suatu faktor yang dipermasalahkan memang benar dapat membatasi.

4. Banyak hubungan diantara jenis, populasi, dan seluruh komunitas seringkali memberikan indikator yang lebih dapat dipercaya daripada satu jenis yang tunggal karena integrasi keadaan yang lebih baik dicerminkan oleh keseluruhan daripada oleh sebagian.

Juliantara (2011) menyatakan bahwa bioindikator yang dapat digunakan untuk memantau keadaan polusi di suatu tempat sebaiknya memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Organisme yang dijadikan sebagai bioindikator memiliki kisaran toleransi yang sempit terhadap perubahan lingkungan.
2. Organisme yang dijadikan sebagai bioindikator memiliki kebiasaan hidup menetap di suatu tempat atau pemencarannya terbatas.
3. Organisme yang dijadikan sebagai bioindikator mudah dilakukan pengambilan sampel dan merupakan organisme yang umum dijumpai di lokasi pengamatan.
4. Akumulasi dari polutan tidak mengakibatkan kematian pada organisme yang dijadikan sebagai bioindikator.
5. Organisme yang dijadikan sebagai bioindikator lebih disukai yang berumur panjang, sehingga dapat diperoleh individu contoh dari berbagai stadium atau dari berbagai tingkatan umur.

Selain itu, menurut Juliantara (2011) beberapa kriteria umum yang dapat digunakan untuk menggunakan suatu jenis organisme sebagai bioindikator adalah

1. Secara taksonomi telah stabil dan cukup diketahui.
2. Sejarah alamiahnya diketahui
3. Siap dan mudah disurvei dan dimanipulasi
4. Taksa yang lebih tinggi terdistribusi secara luas pada berbagai tipe habitat
5. Taksa yang lebih rendah spesialis dan sensitif terhadap perubahan habitat
6. Pola keanekaragaman menggambarkan atau terkait dengan taksa lainnya yang berkerabat atau tidak.
7. Memiliki potensi ekonomi yang penting.

Sementara itu, Holt dan Miller (2010) telah menjelaskan ciri-ciri bioindikator yang baik, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Ciri-ciri bioindikator yang baik

No	Ciri-ciri	Keterangan
1	Kemampuan indikator yang bagus	<ul style="list-style-type: none"> a) Berikan respon yang terukur (peka terhadap gangguan atau stres tetapi tidak mengalami mortalitas atau mengakumulasi polutan langsung dari lingkungan mereka) b) Tanggapan mencerminkan keseluruhan tanggapan populasi, komunitas, dan/atau ekosistem c) Tanggap secara proporsional dengan tingkat kontaminasi atau degradasi
2	Berlimpah dan umum	<ul style="list-style-type: none"> a) Kepadatan penduduk lokal yang memadai (spesies langka tidak optimal) b) Umum, termasuk distribusi dalam area pertanyaan c) Relatif stabil meskipun variabilitas iklim dan lingkungan sedang
3	Dipelajari dengan baik	<ul style="list-style-type: none"> a) Ekologi dan sejarah kehidupan dipahami dengan baik b) Didokumentasikan secara taksonomi dan stabil c) Mudah dan murah untuk disurvei
4	Secara ekonomi / komersial penting	<ul style="list-style-type: none"> a) Spesies yang sudah dipanen untuk tujuan lain b) Kepentingan publik atau kesadaran akan spesifikasi

(Sumber: Holt & Miller, 2010).

Sementara itu, Anderson (2009) memberikan kriteria bioindikator untuk mengevaluasi kondisi hutan (disajikan pada Tabel 2.2), yang juga dapat menjadi pertimbangan dalam monitoring berbagai ekosistem lainnya.

Tabel 2.2 Ringkasan kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi Bioindikator

No	Kriteria	Deskripsi Singkat
1	Merespon gangguan pada skala yang ada	Mampu merespon adanya gangguan sesuai dengan skala yang ditentukan
2	Mobilitas terbatas	Kemampuan untuk menyebar bersifat rendah
3	Sensitif terhadap fragmentasi/ membutuhkan kesinambungan	Mampu merespon adanya fragmentasi
4	Respon adanya Gangguan (Manusia dan Alam) diketahui	Ada dokumen tentang kajian yang menunjukkan respon terhadap gangguan
5	Variabilitas respon rendah	Fluktuasi populasi rendah, memiliki reliabilitas sebagai indikator

6	Pengetahuan tentang sejarah organisme secara alami, afiliasi habitat dan interaksi dengan organisme lain, serta peran dalam ekosistem	Studi yang ada cukup memberikan informasi yang diperlukan tentang kondisi ekologi dari organisme tersebut.
7	Taksonomi yang jelas	Taksonomi terdokumentasi dengan baik dan tersedia
8	Spesialis food-habitat	Membutuhkan sumberdaya yang spesifik untuk bisa hadir atau hidup di habitat tersebut
9	Kompatibilitas Internasional	Bersifat potensial untuk digunakan secara internasional
10	Persyaratan data rendah	Tidak memerlukan penelitian lapang pendahuluan
11	Keterampilan yang dibutuhkan rendah	Tidak memerlukan keahlian khusus
12	Biaya rendah	Koleksi data membutuhkan biaya yang rendah

(Sumber: Anderson, 2009).

1. Merespon gangguan pada skala yang ada

Sensitif terhadap gangguan pada skala tegakan adalah kriteria yang dikembangkan untuk memastikan gangguan tersebut ditunjukkan pada skala yang sesuai. Jika bioindikator dapat menanggapi gangguan yang mempengaruhi keseluruhan individu yang memenuhi persyaratan ini, maka semua indikator struktural memenuhi persyaratan ini karena mewakili tingkat atribut struktural.

2. Respon adanya Gangguan (Manusia dan Alam) diketahui

Respons suatu indikator terhadap gangguan, baik yang alami maupun manusia diketahui tidak dapat dideteksi atau diprediksi kecuali benar-benar diketahui. Persyaratan untuk ini adalah bahwa ada studi yang mengkuantifikasi respons bioindikator atau atribut struktural terhadap gangguan yang mempengaruhi populasi/komunitas.

3. Mobilitas Terbatas

Suatu organisme harus memiliki mobilitas yang bersifat terbatas sehingga sebagai bioindikator ia memiliki kemampuan terbatas untuk menghindari gangguan. Misalnya, jika tumbuhan di hutan menjadi sasaran penebangan, bioindikator yang digunakan harus memiliki kemampuan yang terbatas untuk meninggalkan hutan dan menghindari gangguan atau untuk menjelajah ke daerah-daerah baru.

4. Peka terhadap fragmentasi hutan/membutuhkan kesinambungan

Kepekaan terhadap fragmentasi hutan atau membutuhkan kontinuitas adalah kriteria khusus. Karena tujuannya adalah agar bioindikator mewakili pertumbuhan hutan. Hal ini membantu untuk menunjukkan kondisi hutan dari fragmentasi yang mempengaruhi struktur dan proses ekologis, misalnya siklus nutrisi. Hal tersebut terkait dengan organisme dimana kemampuan penyebarannya secara langsung menunjukkan gangguan secara spasial. Penting untuk memperhitungkan efek fragmentasi hutan karena efeknya mempengaruhi tegakan yang ada dan mempengaruhi respon terhadap iklim mikro, dan tingkat predasi.

5. Variabilitas respon rendah

Kriteria variabilitas rendah dalam respons menandakan jika bioindikator memiliki respon yang konsisten dalam studi di berbagai tipe hutan. Ini adalah ukuran yang baik bagaimana bioindikator dapat diandalkan untuk merespon dan menanggapi perubahan yang berbeda. Semua karakteristik didasarkan pada kelimpahan. Variabilitas alami dalam karakteristik struktural dari satu tipe hutan dapat disesuaikan menggunakan metode Spies dan Franklin berdasarkan kelimpahan, biomassa atau kepadatan, dan kriteria spesifik lokasi. Untuk bioindikator, ini dinilai berdasarkan fluktuasi tingkat populasi. Spesies yang sementara tidak dapat diprediksi atau memiliki fluktuasi populasi tinggi, akan menyulitkan dalam mendeteksi tanggapan variasi penyebab. Penelitian terhadap bryofita dan jamur tidak ada yang ditemukan sebagai penunjuk bahwa populasi mereka memiliki fluktuasi tinggi atau tidak dapat diprediksi untuk sementara sehingga mereka diberi skor 1. Kumbang saproxylic memiliki siklus hidup dan siklus populasi yang sangat bervariasi dan merespon perubahan cuaca. Selanjutnya, kemunculan dan puncak populasi bervariasi antara spesies, sehingga perlu untuk mengetahui siklus hidup spesies indikator yang digunakan dan sampel pada waktu yang sesuai dan musim yang tepat. Karena itu, kumbang saproxylic memiliki nilai nol dalam kriteria ini. Namun, beberapa studi menggunakan kumbang sebagai indikator gangguan antropogenik. Mereka menyarankan penggunaan indeks untuk membantu melihat respon terhadap gangguan. Mereka juga menyarankan bahwa keseluruhan respon mungkin masih dapat diidentifikasi. Lumut memiliki populasi yang

stabil, namun keandalannya sebagai indikator dipertanyakan. Karena mereka tidak dapat diandalkan sebagai bioindikator, maka memiliki nilai nol untuk kriteria ini.

6. Pengetahuan tentang sejarah organisme secara alami, afiliasi habitat dan interaksi dengan organisme lain, serta peran dalam ekosistem

Pengetahuan tentang sejarah alami organisme, afiliasi habitat, dan interaksi dengan organisme lain, dan peran dalam ekosistem adalah sangat penting. Suatu bioindikator dianggap memiliki informasi latar belakang yang memadai jika telah banyak artikel (ada yang mempersyaratkan lebih dari 30 artikel) telah dipublikasikan mengenai dengan organisme terkait. Hasil ini selanjutnya diverifikasi dengan literatur yang tersedia. Misalnya, ada sejumlah besar penelitian tentang penggunaan lumut sebagai bioindikator. Untuk bryofita ada sejumlah kecil hasil pencarian sehingga informasi kurang memberi informasi dasartentang bryofita sehingga mereka diberi nilai nol dalam kategori. Untuk jamur, pencarian tentang jamur menghasilkan 236 hasil, banyak dari publikasi ini memberikan sedikit informasi tentang sejarah alam, afiliasi habitat dan interaksi dengan organisme lain. Hanya sedikit informasi yang diketahui tentang dinamika populasi jamur. Lebih lanjut, kurangnya informasi yang disajikan tersebut mengindikasikan kurangnya pengetahuan tentang jamur (dalam hal ini jamur di kayu pada hutan). Karena itu jamur diberi nilai nol, meskipun hasil pencarian cukup tinggi.

7. Taksonomi yang jelas

Taksonomi yang jelas menentukan kejelasan dalam pengelompokan. Jika literatur yang dikaji menunjukkan bahwa taksonomi kelompok bioindikator itu tidak jelas maka ia akan diberi nilai nol dalam kategori.

8. Spesialis *food-habitat*

Individu yang generalis tidak akan cukup mewakili kondisi ekosistem dan mungkin ia dapat menghindari adanya gangguan. Spesies didefinisikan sebagai spesialis habitat jika mereka memerlukan atribut khusus di habitatnya. Misalnya, kumbang saproxylic adalah spesialis habitat karena membutuhkan jumlah kayu mati yang banyak.

9. Kompatibilitas internasional

Kompatibilitas internasional adalah bagaimana bioindikator dapat dibandingkan dengan indikator yang digunakan di tempat lain di dunia. Sebagai contoh adalah kompatibilitas internasional bioindikator dapat dinilai berdasarkan apakah komunitas atau kelompok taksonomi atau atribut struktural dapat digunakan pada hutan beriklim sedang dan tropis. Hal ini tidak mempertimbangkan apakah indikatornya masih berlaku di semua jenis hutan karena data pada skala ini tidak tersedia. Contohnya adalah untuk kumbang saproxylic tidak ada penelitian yang ditemukan yang secara langsung menyatakan keberhasilan penggunaan spesies saproxylic sebagai indikator di belahan bumi selatan. Namun, menurut Grove (2002) spesies saproxylic dapat digunakan sebagai indikator di daerah tropis Australia meskipun survei pada spesies saproxylic dan kelimpahan lebih rendah dari kumbang saproxylic dibandingkan dengan Eropa, di mana mereka digunakan sebagai bioindikator. Sebuah studi oleh Lachat *et al.* (2006) juga menunjukkan bahwa spesies saproxylic juga dapat digunakan di hutan tropis di Afrika sebagai spesies indikator.

10. Mudah ditemukan

Beberapa spesies mungkin sulit ditemukan dan dengan demikian memberikan tantangan dalam penggunaannya sebagai indikator. Meskipun spesies saproxylic dapat bersifat *cryptic*, pengambilan sampel di lapangan berdasarkan teknik perangkap alkohol memungkinkan mereka untuk dengan mudah dikumpulkan, sehingga diberi nilai 1. Jamur mendapat skor nol karena identifikasi jamur lebih rumit dan sukar untuk ditemukan dalam semua siklus hidupnya.

11. Persyaratan data rendah

Agar indikator yang akan digunakan layak maka harus memiliki persyaratan data rendah. Jika tidak ada penelitian sebelumnya terkait penggunaan indikator itu dianggap memiliki persyaratan data yang rendah. Spesies saproxylic tidak memenuhi persyaratan ini karena ada kekurangan inventarisasi spesies di luar Eropa. Penggunaan spesies jamur dan saproxylic untuk mempelajari fragmentasi perlu dilakukan. Dengan demikian, ini akan memerlukan survei keberadaan spesies dan pembentukan indeks sensitivitas terhadap fragmentasi. Dengan demikian, persyaratan data untuk kumbang saproxylic dan jamur adalah tidak rendah. Bryofita diberi nilai nol karena daftar spesies indikator bryofita tidak baik dilakukan di luar Eropa, dan

bahkan di Eropa daftar itu bersifat tidak pasti. Namun, semakin banyak penelitian yang mulai menggunakan lumut sebagai indikator pertumbuhan dan metode sedang dikembangkan untuk mengurangi biaya dan keterampilan yang diperlukan untuk menggunakan lumut sebagai indikator kualitas udara, yang mungkin membuatnya lebih mudah untuk menggunakan lumut sebagai indikator pertumbuhan. Karakteristik struktural tidak memenuhi kriteria ini karena penggunaan karakteristik struktural harus disesuaikan dengan setiap tipe atau lokasi.

12. Keterampilan yang dibutuhkan rendah

Indikator lebih praktis untuk digunakan jika persyaratan keterampilan yang dibutuhkan rendah. Ini memungkinkan keragaman penggunaan indikator. Kumbang saproxylic, lichen, bryofita, dan fungi semuanya mendapat skor nol karena membutuhkan orang yang sangat terlatih untuk mengidentifikasi spesies dalam kelompok-kelompok ini.

13. Biaya rendah

Jika penelitian menunjukkan bahwa biaya yang dibutuhkan dalam penggunaan spesies tertentu akan mahal, maka itu tidak memenuhi kriteria, dan pada beberapa penelitian diberi nilai nol.

E. Kelebihan Bioindikator dibandingkan teknik lainnya

1. Perbandingan dengan Teknik Umum

Menurut Holt dan Miller (2010) para ilmuwan secara tradisional melakukan tes kimia dan parameter fisik lingkungan yang diukur secara langsung (misalnya, suhu lingkungan, salinitas, nutrisi, polutan, cahaya yang tersedia dan tingkat gas), sedangkan penggunaan bioindikator menggunakan biota untuk menilai dampak kumulatif dari kedua polutan kimia. dan perubahan habitat dari waktu ke waktu. Konsekuensinya, penggunaan bioindikator secara fundamental berbeda dari ukuran klasik kualitas lingkungan dan menawarkan banyak keuntungan.

Pertama, bioindikator menambahkan komponen temporal yang sesuai dengan rentang kehidupan atau waktu tinggal suatu organisme dalam sistem tertentu, yang memungkinkan integrasi kondisi lingkungan saat ini, masa lalu, atau masa depan. Sebaliknya, banyak pengukuran kimia dan fisik hanya mencirikan kondisi pada

saat pengambilan sampel, meningkatkan kemungkinan hilangnya pulsa polutan sporadis. Selain itu, kontaminan dapat terjadi pada konsentrasi yang sangat rendah. Analisis yang membosankan dengan teknologi yang sangat sensitif, dengan biaya mahal, diperlukan untuk mendeteksi konsentrasi rendah seperti itu. Setelah diidentifikasi, para ilmuwan harus menghubungkan setiap potensi bahaya biologis dengan jumlah jejak kontaminan, ketika tautan semacam itu sebagian besar tidak diketahui. Sebagai alternatif, rentang toleransi bioindikator memberikan gambaran tingkat polutan yang bermakna secara biologis, tidak peduli seberapa kecil.

Manfaat lain dari penggunaan bioindikator adalah kemampuan mereka untuk menunjukkan efek biotik polutan secara tidak langsung ketika banyak pengukuran fisik atau kimia tidak bisa. Jelas, sebuah pipa yang menuangkan kotoran yang kaya fosfor ke danau akan berdampak buruk bagi ekosistem. Fosfor umumnya membatasi produksi primer dalam ekosistem air tawar; oleh karena itu, kami dapat memperkirakan bahwa konsentrasi fosfor yang tinggi akan meningkatkan pertumbuhan dan reproduksi beberapa spesies. Pengukuran kimia, bagaimanapun, mungkin tidak secara akurat mencerminkan pengurangan dalam keragaman spesies atau bagaimana pertumbuhan dan reproduksi spesies lain dapat menurun karena pengecualian kompetitif. Efek kontaminan tidak langsung sangat sulit diperoleh dari pengukuran kimia atau fisik dalam kasus bioakumulasi. Logam, di antara kontaminan lainnya, terakumulasi dalam organisme biologis, menyebabkan konsentrasi logam untuk memperkuat melalui jaring makanan. Dengan demikian, tingkat kontaminan pada tingkat trofik yang lebih tinggi mungkin kurang terwakili oleh pengukuran fisik atau kimia.

Terakhir, mengingat ribuan zat dan faktor untuk dipantau, para ilmuwan sekarang memahami bahwa biota itu sendiri adalah prediktor terbaik tentang bagaimana ekosistem merespons gangguan atau kehadiran seorang pemicu stres. Meskipun penggunaan seluruh komunitas (dan semua tanggapan spesies di dalamnya) bisa informatif, masalah dapat muncul terutama di habitat speciose. Hutan hujan tropis rata-rata dapat memuat sekitar 300 spesies pohon per hektar dan menghitung respons setiap spesies individu terhadap suatu gangguan jelas tidak realistis. Selanjutnya, sinyal bioindikasi yang jelas dapat dikaburkan oleh sejumlah besar respon spesies yang berbeda (misalnya, beberapa spesies dapat meningkat sementara yang

lain menurun). Dalam kasus ini, untuk mengintegrasikan semua efek langsung dan tidak langsung dari seorang ilmuwan gangguan fokus hanya pada subset dari biota atau spesies tunggal untuk menceritakan kisah. Pendekatan yang menyempit ini membuat pemantauan lebih relevan secara biologi dan hemat biaya. Selain itu, masalah umum dengan pengukuran kimia dan fisik adalah bahwa mereka menyederhanakan respon rumit yang melekat pada habitat spesies yang kaya ini. Bioindikator bergantung pada kerumitan rumit ekosistem dan menggunakan tanggapan yang representatif atau agregat untuk menyampaikan gambaran dinamis dari kondisi lingkungan.

2. Apa yang Membuat Bioindikator yang Baik?

Mempertimbangkan 1,7 juta spesies yang saat ini didokumentasikan di Bumi, bagaimana kita memilih hanya satu sebagai bioindikator? Jawabannya sederhana: Tidak ada spesies tunggal yang dapat secara memadai menunjukkan setiap jenis gangguan atau stres di semua lingkungan. Tergantung pada lingkungan spesifik, spesies yang ada, dan gangguan lokal, spesies bioindikator yang tepat atau kelompok spesies perlu dipilih. Para ahli ekologi telah menetapkan seperangkat kriteria yang luas yang harus ditunjukkan oleh spesies untuk dianggap sebagai bioindikator yang baik.

3. Manfaat dan Kerugian penggunaan Bioindikator

Banyak manfaat dari bioindikator telah mendorong mandat legislatif untuk penggunaannya di negara-negara di seluruh dunia dan inklusi mereka dalam beberapa perjanjian internasional. Namun, bioindikator bukan tanpa masalah. Seperti burung kenari di tambang batu bara, kami mengandalkan sensitivitas beberapa bioindikator untuk berfungsi sebagai sinyal peringatan dini. Dalam beberapa kasus, kita tidak dapat membedakan variabilitas alami dari perubahan karena dampak manusia, sehingga membatasi penerapan bioindikator di lingkungan heterogen. Dengan demikian, populasi spesies indikator dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor lain selain gangguan atau stres (misalnya, penyakit, parasitisme, persaingan, predasi), memperumit gambaran kita tentang mekanisme perubahan kausal. Kritik kedua terhadap penggunaan bioindikator adalah bahwa kemampuan indikator mereka bergantung pada skala. Misalnya, indikator vertebrata besar (misalnya, seekor ikan) mungkin gagal untuk

menunjukkan keanekaragaman hayati dari komunitas serangga lokal. Ketiga, spesies bioindikator selalu memiliki persyaratan habitat yang berbeda dari spesies lain di ekosistem mereka. Mengelola ekosistem sesuai dengan persyaratan habitat dari bioindikator tertentu dapat gagal melindungi spesies langka dengan persyaratan yang berbeda. Akhirnya, tujuan keseluruhan dari bioindikator adalah menggunakan satu spesies, atau sekelompok kecil spesies, untuk menilai kualitas lingkungan dan bagaimana hal itu berubah dari waktu ke waktu, tetapi ini dapat mewakili penyederhanaan yang berlebihan dari sistem yang kompleks.

Seperti semua alat manajemen, kita harus sadar akan kekurangannya. Namun, keterbatasan bioindikator jelas dibayangi oleh manfaatnya. Bioindikator dapat digunakan pada berbagai skala, dari seluler hingga tingkat ekosistem, untuk mengevaluasi kesehatan ekosistem tertentu. Mereka mengumpulkan informasi dari komponen biologis, fisik, dan kimia di dunia kita yang memanifestasikan diri sebagai perubahan dalam kebugaran individu, kepadatan penduduk, komposisi komunitas, dan proses ekosistem. Dari perspektif manajemen, bioindikator menginformasikan tindakan kita mengenai apa yang dan tidak berkelanjutan secara biologis. Tanpa lumut di tundra, kejam di sungai pegunungan, dan burung kenari di tambang batu bara, kita mungkin tidak mengenali dampak gangguan kita sebelum terlambat untuk melakukan apa pun untuk mencegahnya.

F. Urgensi Mempelajari Bioindikator

Program studi Pendidikan Biologi Fakultas keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Muhammadiyah Malang (FKIP-UMM) memberikan kewajiban kepada para mahasiswa untuk memiliki kompetensi di bidang/materi ekologi. Menurut Gargošová (2014) mata kuliah ekologi untuk memberikan informasi umum kepada mahasiswa tentang ekologi tumbuhan dan hewan. Struktur materi dalam perkuliahan ekologi contohnya adalah sebagai berikut: (1) Istilah dasar, ekosistem, organisme dalam ekosistem, (2) Organisme dan lingkungan, istilah (*biotop*, *ecotypes*, wilayah, habitat, niche, dan lain-lain), (3) Jenis organisme, aturan ekologis. (4) Faktor ekologi, abiotik dan biotik, intensitas faktor, bioindikator dan biomonitoring. (5) Biosfer, atmosfer, pedosfer-hubungan dengan organisme hidup. (6) Populasi, atribut utamanya, hubungan antara individu dari populasi tertentu. (7) Biocoenosis, synecology. (8) Hubungan antar populasi.

(9) Ekosistem, fungsi ekosistem, tahapan ekosistem pembangunan-klimaks, suksesi. (10) Siklus zat dalam ekosistem. (11) Biogeografi, manusia dan biosfer.

Tujuan utama mata kuliah ini adalah menguasai konsep dasar dan definisi di bidang ekologi, memperoleh pengetahuan tentang berfungsinya ekosistem dan tentang hubungan antara komponen dasar (produsen, konsumen, dekomposer-lingkungan benda mati) dan dampak kegiatan manusia pada ekosistem. Menguasai terminologi di bidang ekologi dan pengetahuan tentang fungsi ekosistem dan hubungan koherensi antara berbagai komponennya memungkinkan siswa untuk lebih memahami kontinuitas dalam mata pelajaran terkait lainnya seperti kimia lingkungan.

Khusus di Prodi Pendidikan Biologi FKIP UMM, yang mungkin saja terjadi pada prodi Pendidikan Biologi di perguruan tinggi lain, materi bioindikator dan biomonitoring cenderung hanya dipelajari secara sederhana dan tidak mendalam. Padahal, melihat tren penelitian mahasiswa di Indonesia cenderung banyak yang mengangkat tema bioindikator dan biomonitoring. Oleh karena itu, melalui buku ini, mahasiswa diharapkan (1) memperoleh pengetahuan tentang dasar tentang bioindikator dan biomonitoring dan juga tentang berbagai langkah dari proses penilaian risiko lingkungan; (2) mahasiswa mendapatkan pengetahuan tentang organisme uji dan indikator referensi mana yang dapat digunakan dalam proses bioindikator dan biomonitoring; (3) mahasiswa memperoleh kemampuan untuk mengidentifikasi dan menginterpretasikan efek beracun yang dipromosikan oleh kontaminan lingkungan dalam bioindikator yang digunakan dalam proses kualitas lingkungan biomonitoring.

Pemantauan dan analisis lingkungan dan pencemaran lingkungan memainkan peran penting dalam pengembangan dan penerapan strategi pengendalian polusi, dan dalam menentukan keefektifannya; dan juga dalam penyediaan informasi 'dasar' terhadap dampak lingkungan dari kegiatan tertentu yang diukur. Sementara saat ini, teknik kimia dan fisik masih banyak dan umum digunakan dalam analisis pencemaran lingkungan, penting pula untuk memahami bahwa ekologi dan biomonitoring memiliki peran penting, terutama dalam menentukan dampak biologis dan ekologi dari polutan. Menyadari, dan mampu melaksanakan, berbagai teknik untuk pemantauan tersebut dan menganalisis secara kompeten

informasi/data yang dihasilkan merupakan persyaratan yang diperlukan untuk analisis lingkungan hidup. Hal tersebut perlu dikuasai oleh mahasiswa atau orang-orang yang memiliki ketertarikan terhadap kajian ini.

Dengan mengkaji dan mendalami materi bioindikator dan biomonitoring, mahasiswa diharapkan memahami dan menggunakan konsep dasar bioindikasi: organisme indikator, biomarker, toleransi dan resistensi, sensitivitas organisme, pemantauan biologis. Mahasiswa diharapkan mengetahui dan menggunakan dalam praktek metode bioindikasi yang paling penting dalam menilai tingkat polusi udara, keadaan masyarakat hutan dan kualitas air dan tanah. Mahasiswa juga mampu mempelajari perubahan historis kondisi lingkungan berdasarkan analisis konsentrasi berbagai jenis biomarker dalam sedimen air. Selain itu, diharapkan mahasiswa juga mampu merencanakan dan melaksanakan tugas penelitian (mengumpulkan sampel, menganalisis konsentrasi biomarker spesifik, menguraikan hasil secara grafis dan statistik), dan menarik kesimpulan.

Kajian ini diharapkan membuat mahasiswa/pembaca (1) sadar akan berbagai teknik yang dapat diterapkan pada pemantauan dan analisis lingkungan dan pencemaran lingkungan; (2) memberikan pemahaman tentang sifat komplementer dari teknik analitik fisik/kimia dan metodologi biologis/ekologi untuk pemantauan polusi; (3) membiasakan siswa dengan berbagai metode studi lapangan yang sesuai untuk berbagai situasi ekologi; (4) memberikan pemahaman praktis tentang respon biologis dan ekologi organisme hidup terhadap tekanan lingkungan, dan (5) penggunaan organisme hidup sebagai indikator biologis atau monitor tekanan seperti itu termasuk polusi. Pada akhirnya, dengan mempelajari materi-materi dalam buku ini mahasiswa akan memahami dengan benar dasar-dasar bioindikasi, biomonitoring dan strategi bioindikasi dan biomonitoring yang berbeda. Mereka pun akan mampu menggunakan bioindikator dalam investigasi lingkungan (penelitian) dengan benar.

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

- a. Dalam implementasi bioindikator, beberapa metode berbasis bioteknologi menggunakan mikroorganisme untuk menguji kondisi lingkungan. Tidak seperti metode tradisional, metode berbasis bioteknologi tidak bergantung pada pengamatan saja tetapi ditetapkan untuk menciptakan reaksi spesifik yang menunjukkan adanya polutan spesifik atau kehadiran mikroorganisme yang tidak diinginkan. Jelaskan kelebihan dan kekurangan *traditional bioassay* dan *biotechnology-based bioassay* dalam implementasi bioindikator!
- b. Istilah bioindikator digunakan untuk organisme atau organisme yang dapat merespon adanya polutan dengan perubahan fungsi vital atau melalui mengakumulasi polutan. Informasi tentang efek biologis dapat melengkapi data polutan yang diperoleh melalui metode analisis teknis (fisika-kimia). Uraikan pendapat Anda mengenai alasan paling penting perlunya menggunakan bioindikator!

BAB III

KONSEP BIOMARKER

A. Konsep Biomarker

Biomarker adalah tanda-tanda terpapar, efek, atau kerentanan yang lebih awal tentang kemungkinan kondisi yang buruk. Biomonitoring ditujukan untuk perlindungan kesehatan, paparan, dan penilaian risiko. Secara sempit (*sensu stricto*), biomarker dapat didefinisikan sebagai respon biologis terhadap bahan kimia atau sekelompok agen kimia tetapi kehadiran agen atau metabolitnya di dalam tubuh tidak ditemukan (dosis internal).

Secara luas (*sensu lato*), biomarker adalah penggunaan semua jenis parameter indikatif dan terdiri dari suborganisme, spesies bioindikator, spesies biomonitor dan spesies sentinel serta indikator ekologi, misalnya keanekaragaman spesies. Biomarker menjadi dasar untuk biomonitoring dan bioindikator modern dalam mencoba membangun hubungan antar tingkat biologis indikatif yang berbeda.

Istilah biomarker telah didefinisikan sebagai variasi yang diinduksi secara xenobiotik dalam komponen seluler atau biokimia atau proses, struktur, atau fungsi yang dapat diukur dalam sistem biologis atau sampel. Biomarker awalnya dikembangkan dalam ilmu kedokteran dan kedokteran hewan dan telah ada penekanan yang meningkat pada penggunaan invertebrata dan terutama biomarker bivalvia untuk menilai polusi laut. Biomarker terjadi pada berbagai tingkat organisasi, dari subselular hingga organisme utuh dan ekosistem. Efek di tingkat molekuler terjadi paling awal, diikuti oleh tanggapan seluler (biokimia), jaringan/organ, dan seluruh tubuh. Tanggapan yang terjadi pada tingkat individu, populasi, dan ekosistem umumnya diterima untuk memiliki relevansi ekologi, cenderung kurang reversibel, dan lebih merugikan daripada efek pada tingkat yang lebih rendah. Bahkan, banyak perhatian diberikan untuk mengidentifikasi dan memahami

efek toksik yang dimulai pada tingkat sub-organisme (perubahan molekuler, biokimia atau fisiologis) dan menuju pengembangan biomarker pada tingkat ini untuk dimasukkan dalam program biomonitoring (Hamza-Chaffai, 2014).

B. Pengkategorian Biomarker

Menurut Ghosh *et al* (2015) serta Náray dan Kudász (2016), biomarker diklasifikasikan ke dalam tiga kategori tergantung pada penggunaannya atau konteks spesifik di mana uji tersebut digunakan.

1. Biomarker paparan (*Biomarker of exposure*)

Biomarker paparan (*Biomarker of exposure*) adalah substansi, atau metabolitnya, atau produk dari interaksi yang diukur dalam kompartemen atau cairan tubuh. Misalnya memimpin dalam darah mungkin secara adil mewakili paparan timbal balik baru-baru ini dari individu. Biomarker paparan merupakan produk integrasi antara xenobiotik dan beberapa target molekul atau sel yang diukur dalam kompartemen suatu organisme. Secara umum, biomarker paparan digunakan untuk memprediksi dosis yang diterima oleh individu, yang dapat dikaitkan dengan perubahan yang menghasilkan status penyakit.

2. Biomarker efek (*Biomarker of effect*)

Biomarker efek (*Biomarker of effect*) adalah perubahan terukur (biokimia, struktural, fungsional, perilaku, dan lain-lain) dalam suatu organisme yang dapat dikaitkan dengan gangguan kesehatan atau penyakit yang mapan atau potensial. Biomarker penyakit awal menunjukkan perubahan biokimia atau fungsional awal, mulai dari adaptasi alami hingga penyakit. Misalnya nilai seng protoporphyrin dalam darah meningkat ketika paparan timbal menyebabkan perubahan dalam produksi hemoglobin. *Biomarker genotoxicity* (penyimpangan kromosom, mikronuklei, uji Comet) digunakan untuk mengukur paparan bahan kimia genotoksik, biasanya pada tingkat kelompok. Mereka sensitif tetapi tidak spesifik indikator dan umumnya tidak memadai untuk tujuan penilaian risiko pekerjaan. Biomarker efek didefinisikan sebagai biokimia terukur, fisiologis, perilaku, atau perubahan lain dalam suatu organisme yang, menurut besarnya mereka, dapat diakui sebagai gangguan kesehatan atau penyakit yang mapan atau potensial.

3. Biomarker kerentanan (*Biomarker of susceptibility*)

Biomarker kerentanan (*Biomarker of susceptibility*) adalah penanda kemampuan untuk menanggapi tantangan paparan bahan kimia secara negatif. Gen dapat membuat individu tertentu lebih rentan terhadap racun seperti timbal (kelada *et al*, 2001). Contoh untuk biomarker kerentanan adalah jenis kode genetik untuk *6-aminolevulinic acid dehydratase* (ALAD), enzim yang terlibat dalam toksisitas timbal yang ada dalam dua bentuk. Faktor-faktor pengaruh-memodifikasi ini dapat melekat atau diperoleh. Biomarker kerentanan biasanya tidak digunakan dalam biomonitoring rutin.

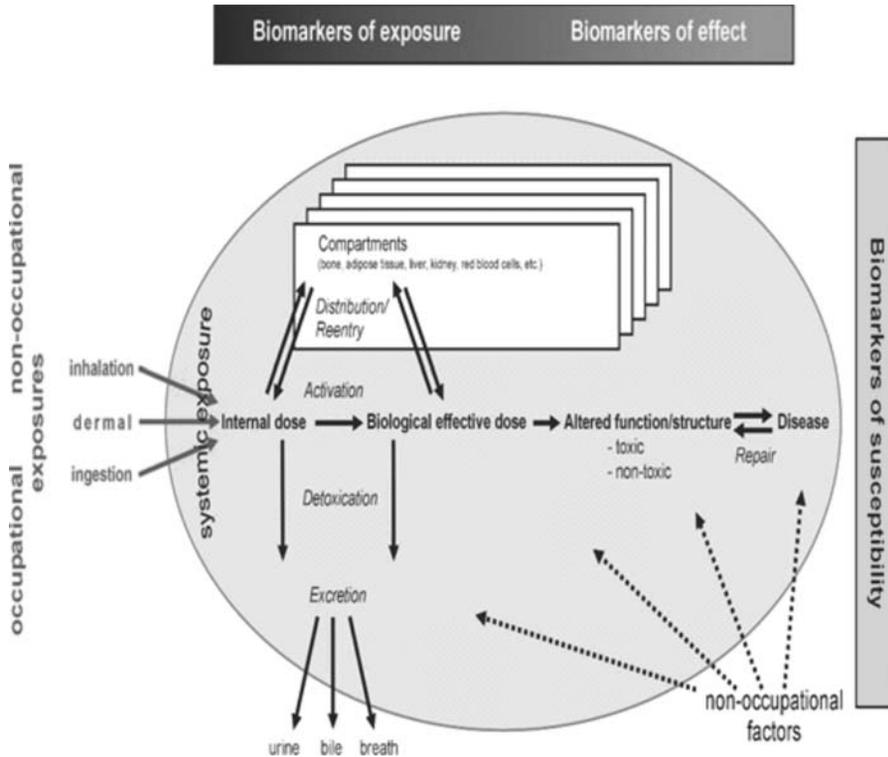
C. Paparan dan biotransformasi

Tiga jalur paparan utama adalah inhalasi (paru-paru), kulit (kulit) dan gastrointestinal (konsumsi). Pemantauan biologis menganggap paparan sistemik secara keseluruhan (dosis internal) dan efek (dosis efektif biologis) terlepas dari sumbernya. Biomarker mungkin juga mencerminkan keadaan seperti perubahan tekanan atmosfer, co-eksposur dan laju pernapasan (beban kerja misalnya berat), yang mungkin semua mengarah ke yang lebih tinggi (atau menurun) penyerapan zat.

Setelah memasuki tubuh, zat kimia (dan metabolitnya) dapat: didistribusikan di antara kompartemen tubuh; menjalani berbagai modifikasi (biotransformasi); menyebabkan perubahan dan penyakit fungsional; dikeluarkan atau disimpan. Semua jalur ini khusus untuk zat kimia yang bersangkutan dan mungkin spesifik untuk individu. Mereka mungkin dipengaruhi oleh pembaur non-okupasi internal atau eksternal (Gambar 3.1).

Biomarker dapat digunakan secara efektif jika latar belakang toksikologi mereka dipahami:

1. siklus kimia dan/atau metabolitnya di dalam tubuh (*toxicokinetics*);
2. mekanisme penyakit/efek buruk (*toxicodynamics*);
3. cara faktor individual mempromosikan bahan kimia untuk menyebabkan penyakit/efek buruk (kerentanan).



(Sumber: Náray & Kudász, 2016)

Gambar 3.1. Tinjauan tentang proses paparan dan biotransformasi dan kemungkinan biomonitoring

Dalam proses biotransformasi zat kimia eksternal diubah dalam tubuh (metabolisme). Aktivitas enzim adalah dasar-dasar kerentanan, termasuk mereka yang terlibat dalam penyerapan dan ekskresi. Varietas individu dalam fitur enzim dapat menghasilkan kecepatan dan jalur yang berbeda dalam metabolisme zat, memodifikasi kurva dosis-respons. Ada banyak pengubah dalam biotransformasi: jenis kelamin, usia, massa tubuh, ko-eksposur (tempat kerja, non-pekerjaan: misalnya diet, termasuk lemak, alkohol, obat-obatan, dan lain-lain). Dibandingkan dengan zat asli, produk degradasinya mungkin kurang atau lebih berbahaya (yang terakhir = aktivasi). Metabolit ini juga dapat digunakan sebagai biomarker (paparan atau efek).

Fitur toksikokinetik menjelaskan bahwa banyak zat (meskipun dapat diidentifikasi dalam proses metabolisme) tidak dapat digunakan untuk biomonitoring karena waktu paruh yang singkat dan/atau

hilang dari matriks yang dapat diakses, misalnya dari darah atau urin. Model-model matematis (seperti toksikanologi berbasis fisiologi) mensimulasikan proses-proses metabolik dalam tubuh manusia untuk memprediksi parameter-parameter paparan biologis yang mungkin dalam suatu skenario paparan tertentu.

Beberapa biomarker sangat spesifik untuk bahan kimia individual; biomarker tersebut termasuk penghambatan cholinesterase oleh organofosfat atau karbamat metallothioneines oleh logam jejak beracun dan *ethoxyresorufin-o-deethylase* (EROD) menanggapi bahan kimia organik, terutama PAH dan PCB. Biomarker lain juga divalidasi dengan baik, tetapi mereka memiliki aplikasi yang lebih luas dan cenderung untuk merespon kelas bahan kimia yang lebih luas. Contoh biomarker ini adalah induksi protein *Multiplexenobiotic Resistance* (MXR), Stres, pembentukan DNA adduct dan perubahan DNA lainnya, dan juga perubahan lisosom pada pencernaan mollusca. Tes ini diperlukan baik dalam kajian tambahan biomarker atau analisis residu kimia untuk menghubungkan agen penyebab dengan efek buruk yang timbul.

Aplikasi penting dari biomarker adalah kemampuan mereka untuk mengintegrasikan berbagai paparan kimia di suatu daerah dengan berbagai kontaminan kimia; tanggapan CYP A1 terhadap sedimen yang terkontaminasi dengan dioxin, *polychlorited biphenyl* (PCBs), atau *polinuclear aromatic hydrocarbons* (PAHs) dapat memberikan wawasan tentang status kontaminan di suatu tempat, bioavailabilitas mereka, dan risiko keseluruhan yang muncul. Demikian pula, kandungan *metallothionein* dan fungsi kekebalan dapat memberikan gambaran terhadap efek gabungan dari logam yang ditemukan di daerah yang terkontaminasi logam.

D. Contoh biomarker yang dipelajari di laboratorium

Berikut disajikan beberapa contoh biomarker yang dipelajari di laboratorium, yaitu *metallothioneins* (MTs), *malonedialdehyde* (MDA), *acetylcholinesterase* (AChE) glikogen dan stres pada test stress.

1. *Metallothioneins* (MTs)

Sebagian besar ilmuwan setuju bahwa mekanisme biokimia dan fisiologis memungkinkan spesies bivalvia/moluska untuk mengakumulasi dan mentolerir sejumlah besar logam berat berdasarkan pada penanganan logam mereka dengan *metallothioneins* (MTs). Ini adalah logam berat yang beracun, kaya sistein, dan bersifat

protein sitosolik. Tingkat konsentrasi MTs dapat berkorelasi dengan akumulasi fraksi ion logam beracun seperti tembaga atau kadmium dalam jaringan hewan. Selain itu, konsentrasi *metallothionein* dalam moluska juga dapat bervariasi karena dipengaruhi oleh polutan nonmetalik. Oleh karena itu, muncul gagasan bahwa MTs dapat digunakan sebagai penanda biologis untuk pencemaran lingkungan dengan mengukur konsentrasinya dalam tubuh moluska yang hidup di habitat yang terkontaminasi. Hasil penelitian di laboratorium yang telah dilakukan menunjukkan adanya *metallothioneins* di insang dan kelenjar pencernaan *Ruditapes decussatus* dan *Cerastoderma glaucumin*.

2. Malonedialdehyde (MDA)

Malonedialdehyde adalah produk peroksidasi lipid karena produksi oxyradicals yang berlebihan dalam sel, setelah paparan kontaminan atau stres karena kondisi alam. Peroksidasi lipid dianggap sebagai fitur penting dalam cedera seluler. Ini hasil dari reaksi radikal bebas dalam membran biologis, yang kaya asam lemak tak jenuh ganda. MDA telah digunakan secara luas untuk menilai efek merugikan dari berbagai polutan.

3. Glikogen

Glikogen adalah bahan bakar untuk berbagai proses metabolisme dan fisiologis. Glikogen telah terbukti memberikan respons yang cukup baik terhadap situasi kontaminasi kompleks dan difusi. Penurunan kadar glikogen yang terkait dengan perubahan pertumbuhan diamati pada kerang *Mytilus edulis* dan kima (*Mya arenaria*) setelah terpapar limbah cair kertas serta di bagian *mesocosms* di mana bivalvia terpapar dengan polimer dari minyak dan silikon.

4. *Acetylcholinesterase* (AChE)

Aktivitas *acetylcholinesterase* (AChE) adalah enzim yang penting untuk transmisi impuls saraf yang tepat. Pengurangan atau penghambatan aktivitas enzimatik ini telah digunakan untuk mendeteksi dan mengukur efek biologis organofosfor dan karbamat di perairan laut. Stres pada tes stres dianggap sebagai biomarker nonspesifik yang memungkinkan evaluasi status kesehatan umum bivalvia. Bagian-bagian kajian termasuk dalam hal ini adalah kondisi anoksia udara, mengevaluasi waktu bertahan hidup, dan mengukur waktu mematikan untuk 50% organisme atau *letal time* (LT50) sehingga memberikan informasi tentang status kesehatan.

Berdasarkan berbagai penelitian yang dilakukan Náray dan Kudász (2016), penilaian dari kedua variabel lingkungan dan biologi yang dapat mempengaruhi tanggapan biomarker harus diselidiki sebelum menggunakan dalam pemantauan polusi. Dalam hal ini, perlu kiranya untuk menggabungkan percobaan *in vivo* berdasarkan kontaminan murni dan limbah industri, *in vivo* dan transplantasi yang diajukan, dan pendekatan studi lapangan. Kombinasi dari pendekatan ini sangat membantu dalam mengidentifikasi biomarker yang paling dapat diandalkan dalam kaitannya dengan paparan polusi dan dengan mempertimbangkan beberapa faktor biotik (ukuran, usia, keadaan reproduksi).

Pendekatan ini harus bersifat multiparametrik, menggunakan biomarker yang berbeda dan saling melengkapi untuk mencerminkan efek dari kontaminan yang berbeda. Namun, kita juga perlu mempertimbangkan variasi yang terkait dengan faktor biotik dan abiotik. Bagaimanapun keadaan fisiologis suatu organisme dalam suatu ekosistem adalah hasil keseimbangan antara pengaruh faktor antropogenik, abiotik dan biotik.

Penggunaan biomarker yang diukur pada tingkat molekuler atau seluler telah diusulkan sebagai teknik 'peringatan dini' yang sensitif untuk pengukuran efek biologis dalam penilaian kualitas lingkungan. Biomarker yang dipilih harus menunjukkan bahwa organisme telah terpapar polutan (*biomarker of exposure*) dan/atau besarnya respon organisme terhadap polutan (*biomarker of effect*). Biomarker peringatan dini ini dapat digunakan dengan cara prediktif, memungkinkan untuk inisiasi strategi bioremediasi sebelum kerusakan lingkungan yang bersifat *irreversible* terjadi yang tentunya memungkinkan terjadinya dampak atau konsekuensi ekologis. Biomarker ini kemudian didefinisikan sebagai indikator jangka pendek dari efek biologis jangka panjang.

E. Kriteria Biomarker

Biomarker yang praktis dan berhasil harus memenuhi sejumlah kriteria, yaitu:

- a. Biomarker harus memberikan tanggapan yang cukup sensitif untuk mendeteksi tahap awal dari proses toksisitas dan harus mendahului efek pada organisasi biologis tingkat tinggi.
- b. Biomarker harus spesifik untuk kontaminan tertentu atau untuk kelas kontaminan tertentu.

- c. Biomarker harus merespon dengan cara bersifat tergantung pada level konsentrasi yang dapat mengubah tingkat kontaminan lingkungan.
- d. Identifikasi variabilitas *non-toxicological* yang diidentifikasi dalam variasi tertentu terkait dengan faktor-faktor biotik.

Dalam prakteknya, semua karakteristik ini tidak dipenuhi; kebanyakan biomarker memiliki spesifitas terbatas, karena berbagai polutan yang ada di lingkungan. Itulah sebabnya, sekelompok biomarker pada berbagai tingkat organisasi biologis diperlukan untuk dapat diterapkan secara efektif dalam program biomonitoring. Biomarker non-spesifik memberikan informasi yang dapat mengindikasikan gangguan lingkungan tetapi bukan agen penyebab. Untuk mengidentifikasi hubungan kausal, kimia analitik, dan biomarker khusus sangat diperlukan. Namun, faktor biaya menjadi hambatan dalam penggunaan rangkaian biomarker tertentu dan mengukur berbagai kontaminan dalam program pemantauan. Oleh karena itu, direkomendasikan bahwa efek polutan mungkin pada awalnya cukup dideteksi dengan penanda biologis yang relatif tidak spesifik, biasanya tergolong dalam hierarki tinggi (misalnya, biomarker perilaku dan fisiologis). Deteksi kelainan dengan menggunakan biomarker non-spesifik di lokasi yang diduga mungkin tercemar akan tepat dalam pengukuran hierarkis biokimia dan seluler yang lebih mahal, hierarkis yang lebih rendah (misalnya, aktivitas MFO, metallothioneins, penanda genotoksik, dan lesi jaringan) untuk mengidentifikasi kelas pencemar yang memberi paparan. Alasan lain yang kuat untuk menggunakan biomarker umum pada tahap awal pemantauan adalah bahwa organisme pasti akan terkena berbagai kontaminan di lingkungan yang memiliki potensi untuk bertindak secara antagonis atau sinergis. Biomarker spesifik dapat kehilangan efek kimia tertentu sedangkan biomarker nonspesifik akan merespon campuran kompleks kimia yang hadir di lingkungan.

F. Matriks Biologi

Biomonitoring tersedia dalam berbagai jenis media biologis (matrik): urin, darah, udara yang dihembuskan, air liur, keringat, air mani, faeces, dan beberapa jaringan. Matriks yang tepat tergantung pada jenis biomarker (paparan, efek, kerentanan) dan jenis kimia (senyawa induk atau metabolit, mudah menguap atau tidak mudah menguap, hidrofobik atau hidrofilik, tidak stabil atau persisten, dll.).

Sampel biologis terpenting yang digunakan dalam praktik sehari-hari adalah urine, darah, dan kadang-kadang udara yang dihembuskan.

Koleksi urin lebih mudah diterima oleh pekerja (mudah dan tidak invasif). Konsentrasinya dalam urin biasanya mencerminkan kadar plasma rata-rata zat sejak buang air kecil terakhir. Zat cepat diekskresikan (misalnya pelarut) terdeteksi pada sampel akhir-shift. Spesimen yang dikumpulkan waktunya mungkin lebih representatif. Dalam sampel tempat biomonitoring urin rutin disesuaikan untuk pengenceran (oleh kreatinin atau kepadatan relatif) adalah alternatif yang memadai. Urin sangat encer atau sangat pekat (kreatinin: $<0,3, > 3,0$ g / liter; kepadatan relatif: $<1,010, > 1,030$) tidak cocok untuk penyesuaian tersebut, sehingga spesimen baru harus dikumpulkan.

Sebagian besar substansi yang diserap dan metabolit aktif dapat ditemukan dalam darah, yang merupakan matriks biologis kedua yang paling umum digunakan dalam biomonitoring rutin. Tidak seperti urin, komposisi darah diatur dalam batas sempit (misalnya pH, konsentrasi zat alami), sehingga jarang perlu penyesuaian. Pengambilan sampel darah berguna untuk bahan kimia anorganik (misalnya logam) dan untuk bahan kimia organik yang termetabolisme buruk dan memiliki waktu paruh yang cukup panjang.

Analisis udara yang dihembuskan bersifat non-invasif dan paling tepat untuk memperkirakan paparan zat organik yang mudah menguap (misalnya pelarut), meskipun jauh lebih jarang digunakan. Rambut telah menjadi sampel biologis penting dalam toksikologi forensik, lingkungan dan klinis (merekonstruksi eksposur masa lalu), penggunaannya dalam biomonitoring kerja rutin tidak dianjurkan karena risiko kontaminasi tinggi.

G. Ekotoksikologi

1. Definisi Ekotoksikologi

Menurut Leah (2018) ekotoksikologi adalah disiplin yang relatif baru dan pertama kali didefinisikan oleh René Truhaut pada tahun 1969. Konsep ini mencoba untuk menggabungkan dua istilah yang sangat berbeda, yaitu ekologi: studi interaksi yang menentukan distribusi dan kelimpahan organisme dan toksikologi: mempelajari efek berbahaya dari zat pada organisme hidup, biasanya pada manusia. Dalam toksikologi, organisme menetapkan batas penyelidikan sedangkan Ekotoksikologi bertujuan untuk menilai dampak bahan

kimia tidak hanya pada individu tetapi juga pada populasi dan seluruh ekosistem.

Selama tahun-tahun awal, alat utama toksikologi lingkungan adalah deteksi residu beracun di lingkungan atau pada organisme individu dan pengujian toksisitas bahan kimia pada hewan selain manusia. Namun, lompatan yang sangat besar dalam pemahaman dari hewan percobaan ke lingkungan multivariat yang kompleks dan subjek dari ekotoksikologi dikembangkan dari kebutuhan untuk mengukur dan memprediksi dampak polutan pada populasi, komunitas dan seluruh ekosistem daripada pada individu. Ada perdebatan berkelanjutan tentang ruang lingkup dan definisi ekotoksikologi yang tepat.

Definisi paling sederhana yang ditemukan hingga saat ini adalah bahwa ekotoksikologi merupakan studi tentang efek berbahaya bahan kimia terhadap ekosistem". Definisi yang lebih lengkap mengenai Ekotoksikologi berasal dari Forbes dan Forbes (1994), yaitu bidang studi yang mengintegrasikan efek ekologi dan toksikologi polutan kimia pada populasi, komunitas dan ekosistem dengan nasib (transportasi, transformasi dan kerusakan) dari polutan-polutan tersebut di lingkungan" .

Dalam banyak studi toksikologi dan ekotoksikologi dan pengaturan eksperimental, peneliti terutama tertarik pada parameter tradisional seperti data toksisitas dan efek racun pada fungsi molekuler, seluler atau fisiologis individu, spesies atau populasi statistik. Jelas, bagaimanapun, bahwa pendekatan tersebut berfokus pada tingkat fenotip spesies hewan, sementara latar belakang genetik dan evolusi dari reaksi terhadap racun lingkungan mungkin tetap tak terkatankan. Dalam penilaian risiko ekotoksikologi, apalagi, kepekaan spesies terhadap polutan sering dianggap sebagai variabel acak dalam pendekatan statistik. Di luar statistik, bagaimanapun, sensitivitas racun dari setiap spesies mengasumsikan signifikansi biologis, terutama jika kita mempertimbangkan bahwa sifat-sifat sensitivitas telah berkembang dalam garis keturunan spesies dengan akar evolusi umum (Dalingier & Höckner, 2018).

Ekotoksikologi relatif berbeda dari ekologi stres, di mana ekologi stres mempengaruhi berbagai tekanan alami seperti penipisan oksigen pada individu atau efek suhu, populasi dan masyarakat; Namun parameter ini secara langsung berdampak pada toksisitas. Ada

pemisahan lebih lanjut antara toksikologi lingkungan dan ekotoksikologi, yang sering agak artifisial, dengan kecenderungan ekotoksikologi yang lebih terfokus pada tingkat komunitas dan ekosistem dan toksikologi lingkungan yang lebih terfokus pada tingkat organisme individu, termasuk manusia, atau sel. Salah satu misi inti dari ekotoksikologi adalah untuk memahami mekanisme dimana kontaminan mengganggu kinerja biologis normal (cara kerja mereka), dalam rangka mengembangkan langkah-langkah yang tepat untuk mencegah hasil buruk yang dihasilkan dari kontaminan lingkungan. Ada berbagai kemungkinan efek kontaminan yang dapat membahayakan kebugaran ekologi organisme atau populasi individual. Pada akhirnya, dampak kontaminan beracun atau campuran kontaminan bergantung pada kepekaan relatif dari suatu spesies, komunitas atau ekosistem, dan intensitas serta waktu paparan. Pestisida dan kontaminan dapat mempengaruhi lebih dari sekadar populasi hewan dan tumbuhan yang membentuk komunitas. Mereka dapat mempengaruhi proses dasar seperti siklus nutrisi atau pembentukan tanah. Misalnya, siklus nitrogen dapat terpengaruh jika pestisida berdampak pada komunitas bakteri dan jamur di tanah meskipun dinilai terlalu rendah untuk waktu yang lama, merupakan masalah utama dalam penelitian ekotoksikologi terapan. Ekotoksikologi menghadapi tantangan untuk memprediksi dan menilai efek dari peningkatan jumlah stres kimia pada spesies akuatik dan ekosistem. Dengan meningkatnya relevansi ekologis reproduktifitas, spesifisitas dan kesesuaian untuk standarisasi metode cenderung berkurang (Bhat, 2013).

Menurut Bhat (2013) studi ekotoksikologi adalah proses multiproses yang melibatkan:

1. Masuknya, distribusi dan nasib polutan dalam lingkungan;
2. Masuknya dan nasib polutan dalam organisme hidup (biota) dalam suatu ekosistem;
3. Efek berbahaya dari polutan kimia pada konstituen (biotik & abiotik) dari ekosistem (yang termasuk manusia).

Ada tiga tujuan utama dalam ekotoksikologi (Forbes & Forbes 1994):

1. memperoleh data untuk penilaian risiko dan manajemen lingkungan.

2. memenuhi persyaratan hukum untuk pengembangan dan pelepasan bahan kimia baru ke lingkungan.
3. mengembangkan prinsip-prinsip empiris atau teoritis untuk meningkatkan pengetahuan tentang perilaku dan efek bahan kimia dalam sistem kehidupan.

Untuk mencapai tujuan ini, bidang utama studi adalah: Distribusi polutan di lingkungan, masuknya mereka, gerakan, penyimpanan dan transformasi dalam lingkungan. Efek polutan pada organisme hidup. Pada tingkat individu, *toxicants* dapat mengganggu struktur dan fungsi biokimia, molekuler dan fisiologis yang pada gilirannya akan memiliki konsekuensi bagi struktur dan fungsi masyarakat dan ekosistem. Pada tingkat populasi dimungkinkan untuk mendeteksi perubahan dalam jumlah individu, dalam frekuensi gen (seperti pada resistensi serangga terhadap insektisida) atau perubahan fungsi ekosistem (misalnya nitrifikasi tanah) yang disebabkan oleh polusi.

Dimungkinkan menggunakan biomarker untuk menetapkan bahwa populasi alami telah terpapar polusi. Hal ini dapat memberikan panduan yang berharga untuk apakah populasi alami berisiko atau membutuhkan penyelidikan lebih lanjut. Untuk keperluan regulasi dan registrasi bahan kimia, toksisitas bahan kimia individual terutama diselidiki melalui *toxicity testing*, teknik utamanya adalah Uji Toksisitas Standar (*Standard Toxicity Test/STT*) yang biasanya menguji dosis atau konsentrasi zat kimia tertentu yang beracun bagi di bawah kontrol, kondisi laboratorium. Uji toksisitas terutama dilakukan dengan menggunakan hewan individu meskipun telah ada langkah menuju penggunaan sistem yang lebih kompleks yang dikenal sebagai mesocosms. Dalam beberapa situasi, khususnya dalam kasus pestisida, dimungkinkan untuk melakukan bidang pencobaan untuk menilai toksisitas. Data toksisitas digunakan untuk membuat penilaian hazard dan risk yang ditimbulkan oleh bahan kimia tertentu.

Nasib bahan kimia di lingkungan dan di dalam organisme Sebagai ahli ekotoksikologi, kami prihatin dengan pergerakan dan nasib bahan kimia beracun baik pada tingkat organisme maupun ekosistem secara keseluruhan. Masalah yang relevan adalah:

- a. sumber,
- b. transportasi,
- c. modifikasi
- d. nasib akhir dari polutan.

Pada tingkat organisme yang perlu kita perhatikan, yaitu:

- a. Serapan
- b. Ekskresi
- c. Situs aksi, metabolisme atau penyimpanan

Uji toksisitas dan pengaturan dan pelepasan bahan kimia beracun Karena ekotoksikologi sebagian besar muncul dari toksikologi dan kebutuhan untuk mengatur pengenalan bahan kimia beracun yang potensial ke lingkungan, pengujian toksisitas tetap penting bagi subjek saat ini. Sebagian besar pengujian toksisitas untuk polutan masih didasarkan pada pengujian pada organisme individu dalam situasi uji buatan. Tes ini murah, dapat diandalkan dan mudah dilakukan tetapi ada banyak perdebatan tentang relevansi banyak tes toksisitas standar untuk 'kehidupan nyata'. Awalnya pada hari-hari awal toksikologi lingkungan, konsep 'spesies paling sensitif' digunakan untuk menghubungkan hasil uji toksisitas dengan 'dunia nyata'. Spesies tertentu dalam komunitas tertentu dinilai sebagai 'paling sensitif' terhadap polutan. Logikanya adalah bahwa jika polutan tidak beracun terhadap spesies 'paling sensitif' maka itu akan aman bagi masyarakat lainnya.

Pada dasarnya, logika ini masih ada hingga sekarang - hasil tes pada spesies tunggal, dalam situasi buatan diekstrapolasi untuk memprediksi efek polutan pada seluruh komunitas atau ekosistem. Diasumsikan bahwa jika Anda memiliki cukup informasi tentang efek polutan pada bagian-bagian ekosistem, maka Anda dapat mengumpulkan efeknya secara keseluruhan. Namun demikian, beberapa pertanyaan tentang kegunaan ekstrapolasi dari sederhana, sangat buatan, tes toksisitas spesies tunggal untuk kompleks, multivariate ekosistem. Forbes dan Forbes (1994) berpendapat bahwa "memahami dan memprediksi konsekuensi dari efek pencemar yang diinduksi pada ekosistem mensyaratkan bahwa efek diperiksa pada tingkat bunga" yaitu populasi, komunitas atau ekosistem.

2. Metodologi pengujian

Berbagai tes ekotoksikologi dan biodegradasi diperlukan untuk industri kimia, agrokimia dan farmasi. Tes yang sering digunakan meliputi:

- a. Uji toksisitas bakteri
- b. Uji Pertumbuhan Alga dengan berbagai spesies

- c. Uji toksisitas akut dengan Lemna minor
- d. Tes Akut dan Reproduksi dalam Daphnia magna
- e. Uji toksisitas akut dengan copepoda laut Acartia tonsa
- f. Uji toksisitas larva embrio tiram
- g. Uji toksisitas akut dengan invertebrata laut Mysidopsis bahia
- h. Tes toksisitas cacing tanah
- i. Uji Toksisitas dengan organisme tinggal sedimen seperti Chironomus atau Lumbriculus
- j. Uji toksisitas akut dengan ikan air tawar dan ikan laut
- k. Bioakumulasi pada ikan
- l. Uji pertumbuhan ikan
- m. Tes siklus hidup awal dengan ikan

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

1. Spesies bioindikator digunakan dalam biomonitoring adanya paparan polutan. Untuk mengevaluasi bagaimana polutan ada secara spasial, maka spesies sessile adalah paling baik digunakan. Selain itu, kriteria spesies bioindikator yang baik adalah umum dan mudah diambil sampelnya, menyajikan beberapa respon terhadap racun (tanggapan secara biomarker) yang dapat diukur secara akurat. Uraikan keterkaitan antara bioindikator dengan biomarker! Apa perbedaan antara biomarker dan bioindikator dalam biomonitoring?
2. Bagaimana potensi spesies sentinel dalam implementasi biomarker? Uraikan bagaimana perannya dalam *environmental risk assessment*!

BAB IV

BIOINDIKATOR KUALITAS AIR

A. Pengantar

Sistem perairan mengandung sekitar 10% spesies fauna di bumi dan selama ini memberikan jasa lingkungan bagi kehidupan manusia. Namun, berbagai aktivitas manusia telah mempengaruhi sumber daya air secara struktural dan fungsional, sehingga mengurangi kemungkinan penggunaannya. Pertumbuhan populasi manusia dan industrialisasi telah menyebabkan polusi sebagian besar ekosistem perairan dan mengakibatkan penurunan kualitas air lingkungan (Naigaga *et al.*, 2011). Dengan demikian, ekosistem air tawar diakui sebagai yang paling terancam di seluruh dunia, dan oleh karena itu, organisme akuatik memerlukan perhatian untuk konservasi mereka (López-López & Sedeño-Díaz, 2015).

Tentu tidak mungkin untuk menguji dan memantau kualitas air di semua tempat setiap saat, tetapi ada cara untuk secara tidak langsung menyimpulkan kualitas air menggunakan bioindikator. Metode biologis telah terbukti sesuai untuk pengawasan ekosistem akuatik. Organisme indikator diperlukan untuk meningkatkan program penilaian pada dampak ekologis aktivitas antropogenik pada lingkungan akuatik (Naigaga *et al.*, 2011). Secara alamiah terdapat organisme, penanda kimia atau proses biologis yang perubahannya mengarah pada perubahan kondisi lingkungan.

Bioindikator dapat memberikan perkiraan waktu yang terintegrasi dengan kondisi lingkungan masa lalu. Skala waktu dapat bergantung pada indikator aktual yang dipilih. Oleh karena itu organisme berfungsi untuk mendeteksi perubahan dalam kualitas air bahkan ketika pengukuran kualitas air tidak tersedia atau terlalu bervariasi. Bioindikator juga dapat memberikan informasi tentang efek berbahaya kontaminan pada tingkat biokimia, molekuler dan seluler dan dapat bertindak sebagai sistem peringatan dini untuk efek skala besar.

Pemantauan perubahan biokimia, seluler atau genetik dalam jaringan ikan dengan menggunakan teknik baru yang sensitif misalnya dapat membantu mengidentifikasi apakah perubahan itu disebabkan oleh variasi alami atau efek yang disebabkan manusia. (Fabricius *et al.*, 2007; Gilmour *et al.*, 2006).

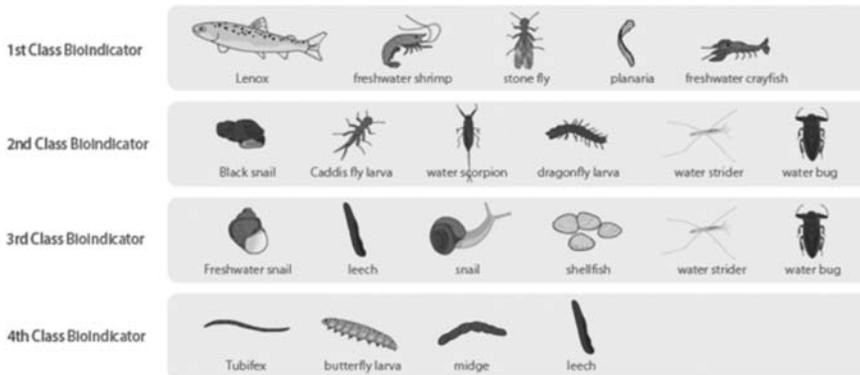
Bioindikator adalah ukuran langsung dari kesehatan fauna dan flora di perairan. Indikator biologi yang umum digunakan di air tawar meliputi berbagai ukuran makroinvertebrata atau keragaman ikan, pertumbuhan alga benthik (*benthic algal growth*) dan kebutuhan oksigen benthik (*benthic oxygen demand*). Untuk muara, indikator biologis kurang dikembangkan. Satu-satunya indikator biologis yang umum digunakan di muara adalah klorofil-a, yang merupakan ukuran kepadatan populasi fitoplankton. Untuk daerah pesisir, indikator seperti kondisi lamun atau kondisi terumbu karang tepi kadang-kadang digunakan. Dalam banyak ekosistem perairan, pengaruh utama pada kesehatan ekosistem akuatik dapat menjadi faktor selain kualitas air, termasuk degradasi habitat dan perubahan pola aliran alami. Oleh karena itu, penting untuk memasukkan indikator faktor-faktor ini dalam biomonitoring (Department of Environment and Science, 2018).

Biomonitoring air dilakukan dengan melihat keberadaan kelompok organisme indikator. Organisme tersebut, yaitu (1) Plankton; "kelompok mikroorganisme yang hidup melayang-layang di dalam air"; (2) Perifiton; "kelompok alga, cyanobacter, mikroba dan detritus yang hidup di dalam air"; (3) Mikroentos; "kelompok mikroorganisme yang hidup di dalam atau di permukaan air"; (4) Kelompok makroinvertebrata di dalam atau permukaan air; (5) Makrofit: kelompok tumbuhan air; dan (6) Nekton: ikan.

Kelompok ini digunakan untuk menduga kualitas air sebab mampu menggambarkan pengaruh perubahan kondisi fisik dan kimia di perairan dalam pada kurun waktu tertentu. Untuk mendapatkan informasi kualitas air yang lebih akurat, sebaiknya dilakukan penggabungan antara pemantauan kualitas air secara fisik-kimia dan biologi (Rahayu *et al.*, 2009).

Juliantara (2011) mengelompokkan spesies indikator dalam 5 kelompok, yaitu 1) "Sentinel", yaitu makhluk hidup sensitif sangat tinggi terhadap polutan (diintroduksi sebagai peringatan dini polusi). 2) "Detektor", yaitu makhluk hidup, penghuni asli habitat,

mengindikasikan perubahan terukur (tingkahlaku, mortalitas, dan morfologi) di lingkungan yang berubah. 3) "Eksploritor", yaitu makhluk hidup yang keberadaannya menunjukkan gangguan lingkungan, bahkan jumlahnya berlimpah (akibat tidak adanya kompetisi dengan makhluk hidup lain). 4) "Akumulator", yaitu makhluk hidup yang mengambil dan mengakumulasi bahan kimia dalam jumlah yang dapat diukur. 5) "Organisme *bioassay*", yaitu makhluk hidup terpilih, yang digunakan untuk mendeteksi adanya polutan di laboratorium, baik besaran konsentrasi maupun tingkat toksisitasnya.



(Sumber: Newman, 2016)

Gambar 4.1. Klasifikasi kelas air dan bioindikatornya

Gambar 4.1 memvisualisasikan hubungan kelas air dan bioindikator yang menjadi standar untuk evaluasi kualitas perairan air tawar, dengan keterangan sebagai berikut:

- 1) Air kelas satu adalah air bersifat bersih, tak berbau, dapat sebagai air minum pasca pemurnian sederhana. Bioindikator untuk air kelas satu, yaitu "ikan *lenox*, udang, *stone fly*, planaria, dan *freshwater crayfish*.
- 2) Air kelas dua adalah dapat sebagai air minum pasca proses tertentu, mandi, dan berenang. Bioindikator air kelas dua, yaitu keong hitam, *caddis fly larva*, kalajengking air, larva capung, anggang-anggang, dan kutu busuk air.
- 3) Air kelas tiga adalah air berlumpur berwarna coklat kekuning-kuningan. Bioindikator air kelas tiga yaitu, *freshwater snail*, lintah, keong, *shellfish*, anggang-anggang, dan kutu busuk air.

- 4) Air kelas empat adalah air yang tercemar serius dan jika berenang dapat menyebabkan gangguan/penyakit kulit. Bioindikator air kelas empat, yaitu *Tubifex*, larva kupu-kupu, *midge*, dan lintah.
- 5) Air kelas lima adalah air yang sangat tercemar sehingga tidak ada organisme yang dapat hidup.

B. Plankton

1. Pengertian

Plankton dapat digunakan sebagai indikator pencemaran air. Karena plankton sangat sensitif terhadap perubahan alam, mereka menjadi penanda terbaik kualitas air dan khususnya kondisi danau. Salah satu alasan mengapa plankton dipertimbangkan di danau adalah untuk memantau kualitas air danau ketika ada sentralisasi fosfor dan nitrogen yang tinggi; sentralisasi ini dapat diindikasikan oleh reproduksi plankton tertentu dengan laju yang meningkat. Ini adalah bukti kualitas air yang buruk yang dapat mempengaruhi organisme lain yang hidup di badan air. Selain menjadi indikator kesehatan, plankton juga merupakan makanan pokok bagi banyak organisme yang lebih besar di danau. Dengan demikian plankton adalah kunci bagi organisme laut, baik sebagai indikator kualitas air dan sebagai sumber makanan utama bagi banyak ikan.

Plankton juga memainkan peran penting dalam masalah organik pemburukan biologis; tetapi jika populasi plankton terlalu besar, ini menciptakan masalah lain dalam mengelola badan air. Ikan pada tahap kritis proses ekologi memainkan peran penting dengan merumput plankton. Dua peran yang dimainkan oleh ikan sangat penting karena mereka membantu dalam menjaga keseimbangan yang tepat dari plankton di kolam dan mengubah nutrisi yang tersedia di air limbah menjadi bentuk yang dikonsumsi oleh manusia. Selain itu, plankton tertentu seperti cyanobacteria menghasilkan racun yang berbahaya bagi pertumbuhan ikan. Dengan demikian, plankton dapat disebut berguna atau berbahaya, sehubungan dengan air limbah yang memberi makan ikan (Pradhan *et al.*, 2008).

Kondisi perairan dapat diketahui dengan melakukan kajian terhadap kelimpahan dan komposisi plankton, khususnya fitoplankton. Nilai koefisien saprobik fitoplankton menjadi ukuran kualitas perairan. Koefisien saprobik dapat diketahui dengan terlebih dahulu menghitung struktur komunitas.

2. Jenis Plankton

a. Fitoplankton

Fitoplankton juga dikenal sebagai mikroalga, mirip dengan tanaman terestrial karena mengandung klorofil dan membutuhkan cahaya matahari untuk hidup dan berkembang. Sebagian besar cahaya dan berenang di bagian atas laut, di mana cahaya meresap ke dalam air. Pengembangan dan fotosintesis terkait erat, masing-masing menjadi fungsi penggunaan cahaya dan suplemen makanan. Ganggang cukup peka terhadap kontaminasi, dan ini mungkin tercermin dalam tingkat populasi dan/atau laju atau fotosintesis. Hal ini memengaruhi perkembangan populasi atau fotosintesis, karena sebagian besar ganggang sama sensitifnya dengan kontaminasi seperti spesies lain. Ketika ada perubahan dalam keanekaragaman spesies fitoplankton, itu mungkin menunjukkan pencemaran ekosistem laut (Hosmani, 2014).

Fitoplankton telah digunakan untuk pengamatan yang berhasil terhadap kontaminasi air dan merupakan indikator yang berguna untuk kualitas air. Pada tahun 1975, Dugdale menggambarkan hubungan tingkat pertumbuhan populasi alga, fotosintesis, dan konsentrasi nutrisi dalam tubuh air. Kontaminasi dapat mempengaruhi hubungan antara laju pertumbuhan dan masing-masing variabel ini. Sebagai contoh, jika ada efluen industri yang diwarnai atau mengandung padatan tersuspensi cahaya dapat disaring atau diserap menyebabkan penurunan laju pertumbuhan. Macisaacand dan Dugdale pada tahun 1976 menunjukkan bahwa penurunan cahaya menyebabkan penurunan tingkat penyerapan amonia dan nitrat dalam fitoplankton laut.

Cahaya mendorong evolusi oksigen dari spesies air tawar *Chlamydomonas reinhardtii* peka terhadap kadmium, metil merkuri, dan timbal. Moore *et al.* menemukan bahwa senyawa organo-klorin menurunkan penggunaan bikarbonat oleh phytoplankton muara. Whitacre *et al* juga menghasilkan penelitian yang signifikan tentang efek dari banyak hidrokarbon terklorinasi pada fiksasi karbon oleh fitoplankton. Fitoplankton juga merupakan sumber penting perpindahan polutan dari air ke tingkat tropik atas dan bahkan ke manusia. Alga tidak dapat membusukkan pestisida dan dengan demikian merupakan rantai transfer ke herbivora ketika diberi makan. Pengumpulan zat dan asupan memainkan peran penting dalam

dinamika pencemaran fitoplankton. Jika cahaya terhambat, itu menghambat asupan amonia dan nitrat oleh fitoplankton air seperti yang ditunjukkan oleh Mac Isaac dan Dugdale, terutama ketika limbah padat atau padat tersuspensi industri terakumulasi di permukaan air yang menghasilkan pengurangan laju pertumbuhan, filtrasi, dan penyerapan cahaya (Parmar *et al.*, 2016).

Tabel 4.1. Jenis-jenis fitplankton dan indikasinya

No	Nama fitoplankton	Indikasi
1	Reen algae	Memfasilitasi pertumbuhan ikan
2	Mosses, liver worts	Polusi oleh akumulasi logam
3	Charophytes	Kualitas air
4	Selanastrum	Polusi air
5	Wolffiaglobose	Kontaminasi Kadmium
6	<i>Euglena gracilis</i>	Pencemaran organik di danau
7	<i>Chlorella vulgaris</i>	Membantu menghilangkan kontaminasi logam berat dari air dan tanah
8	Chlorococcales like <i>C. vulgaris</i> and <i>A. falcatus</i>	Indikator industri kertas dan limbah limbah

(Sumber: Parmar *et al.*, 2016).

b. Zooplankton

Zooplankton adalah hewan mikroskopis yang hidup di dekat permukaan tubuh air. Mereka adalah perenang yang buruk, sebaliknya mengandalkan arus dan arus sebagai mekanisme transportasi. Mereka memakan fitoplankton, bakterioplankton, atau detritus (yaitu salju laut). Zooplankton merupakan sumber makanan penting untuk ikan. Mereka juga memainkan peran penting sebagai Bioindikator dan membantu mengevaluasi tingkat pencemaran air. Di komunitas air tawar, bersama dengan ikan, mereka adalah suplemen makanan utama bagi banyak spesies laut lainnya. Mereka diasumsikan menjadi bagian penting dalam menunjukkan kualitas air, eutrofikasi, dan produksi tubuh air tawar. Untuk menentukan status badan air tawar, perlu untuk mengukur variasi musiman dan kehadiran zooplankton (Zannatul & Muktedir 2009).

Varietas yang berbeda dari spesies, keanekaragaman biomassa dan kekayaan kelompok zooplankton dapat dimanfaatkan untuk menentukan kekuatan sistem biologis. Potensi zooplankton sebagai spesies bioindikator sangat tinggi dengan alasan bahwa perkembangan dan pengangkutannya tunduk pada beberapa abiotik (misalnya suhu, rasa asin, stratifikasi, dan polutan) dan parameter

biotik (misalnya pembatasan makanan, predasi, dan persaingan) (Ramchandra *et al.* 2006).

Fermentasi mekanis membawa pada pengurangan jumlah spesies dan perubahan kekuatan spesies, yang keduanya dipengaruhi sebagai pH menurun dari 7,0 hingga 3,8. Jha dan Barat menyelesaikan penelitian tentang Danau Mirik, di Darjeeling, Himalaya, tentang zooplankton. Danau ini tercemar karena racun yang masuk ke danau dari sumber luar sehingga pH menurun di danau dan tingkat keasaman meningkat (Jha & Barat, 2003). Hal ini dikonfirmasi oleh penyelidikan parameter physiochemical dan plankton lainnya. Dalam kondisi ini, cladocerans (*Bosmina*, *Moina*, dan *Daphnia*) dan copepods (*Phyllodiaptomus* dan *cylops* copepoda paling luas) ditemukan. Pemeriksaan ini menganggap bahwa danau tidak dapat digunakan sebagai defisit untuk pasokan air minum dan organisme ini berfungsi sebagai bioindikator untuk fokus pada kesejahteraan tubuh samudera ini. Sebagaimana ditunjukkan oleh Siddiqi dan Chandrasekhar, *trichotria tetrat* dapat digunakan sebagai indikator kontaminasi seperti yang terlihat di danau yang kaya fosfor dan partikel logam berat lainnya. Spesies ini diperoleh di masa lalu dalam tangki yang terkontaminasi limbah (Zannatul & Muktadir, 2009)

Partikel fosfor dan logam serta alkanitas agregat tinggi, kekerasan, dan konduktivitas tinggi (130 ms m⁻¹) dari air danau membatasi komponen untuk pengembangan zooplankton (Ramchandra *et al.*, 2006). Zooplankton dapat hadir dalam berbagai variasi kondisi ekologis, tetapi oksigen yang terdisintegrasi, suhu, salinitas, pH, dan parameter fisikokimia lainnya membatasi unsur-unsur, sekitar tiga jenis *Brachionus* sp menunjukkan bahwa danau sedang mengalami eutrofikasi dan secara alami terkontaminasi. Ada variasi dalam populasi Copepoda, musiman di berbagai air (Parmar *et al.*, 2016).

Tabel 4.2 Jenis-jenis zooplankton dan indikasinya

No	Nama Zooplankton	Indikasi
1	Rotifers	Status trofik
2	Keratellatropica, Hexarthramira	Kekeruhan tinggi karena sedimen tersuspensi
3	<i>Brachionus calyciflorus</i>	Kondisi eutrofik dan pencemaran organik danau
4	Cladocerans group (<i>unspecified</i>)	Konsentrasi kontaminan rendah
5	Trichotriatetratis	Polusi yang disebabkan oleh akumulasi fosfor dan ion logam berat
6	Thermocyclops, argyrodiaptomus	Kondisi Eutrofik
7	<i>B. angularis</i> , Rotatoria	Kondisi Eutrofik
8	Leeches	Menunjukkan kontaminasi karena adanya PCB (<i>polychlorinated biphenyl</i>) di sungai
9	Leeches	Sensor-bioindikator kontaminasi sungai oleh PCB
10	Oyster (<i>Crassostrea gigas</i>), crabs (<i>Geotica depressa</i>)	Kehadiran timbal
11	<i>B. dolabrotus</i>	Kekeruhan tinggi karena sedimen tersuspensi
12	Copepods (<i>Cyclops & phylloidiptomus</i>)	Kesehatan laut
13	Cladocerans (<i>Moina, Daphnia, Bosmina</i>)	Kesehatan laut

Sumber: Parmar *et al.*, 2016

3. Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel fitoplankton mengikuti Badan Penelitian Perikanan Laut (BPPL, 1989) yaitu menggunakan jaring plankton ukuran 25 atau dapat pula menggunakan ukuran 250 msh. Sampel fitoplankton yang terjaring kemudian dimasukkan kedalam botol sampel dan diberi formalin 4%. Selanjutnya di lakukan analisis di laboratorium. Selain pengambilan sampel fitoplankton, juga dilakukan pengukuran kualitas air dengan menggunakan *waterchecker*.

4. Penentuan Status Lingkungan

Penentuan status lingkungan perairan dilakukan dengan terlebih dahulu menganalisis fitoplankton yang dilakukan melalui teknik berikut:

a. Menghitung Kelimpahan fitoplankton

Kelimpahan dihitung menggunakan gelas obyek *Sedwick Rafter*

Counting Cells (SRCC) dengan satuan individu per liter (ind/L), dengan rumus sebagai berikut:

$$N = n \times \frac{1}{A} \times \frac{B}{C}$$

Keterangan:

N : kelimpahan fitoplankton (ind/L)

n : jumlah fitoplankton yang tercacah

A : volume air contoh yang disaring (L)

B : volume air contoh yang tersaring (ml)

C : volume air pada SRC (ml)

b. Indeks Keanekaragaman

Indeks keanekaragaman dihitung menggunakan persamaan Shannon-Wiener.

$$H' = \sum_{t=1}^s Pi \ln Pi$$

Keterangan:

H' = indeks diversitas Sharon-Wiener

Pi = ni/N

ni = jumlah individu jenis ke I

N = jumlah total individu

S = jumlah genus

Adapun kriteria dalam persamaan Shannon-Wiener, yaitu $H' < 1$ = komunitas biota tidak stabil atau kualitas air tercemar berat, $1 < H' < 3$ = stabilitas komunitas biota sedang atau kualitas air tercemar sedang, dan $H' > 3$ = stabilitas komunitas biota dalam kondisi prima (stabil) atau kualitas air bersih.

c. Indeks Kemerataan

Indeks ini menunjukkan pola sebaran biota yaitu merata atau tidak. Jika nilai indeks relatif tinggi maka keberadaan setiap jenis biota di perairan dalam kondisi merata.

$$E = \frac{H}{H' maks}$$

Keterangan:

E : Indeks pemerataan

H' maks : $\ln s$ (s adalah jumlah genus)

H : Indeks keanekaragaman

Adapun kriteria dalam indeks pemerataan, yaitu $E = 0-0,5$ maka pemerataan antar spesies rendah, artinya kekayaan individu yang dimiliki masing-masing spesies sangat jauh berbeda. $E=0.6-1$ maka pemerataan antar spesies relatif seragam atau jumlah individu masing-masing spesies relatif sama.

d. Koefisien Saprobik

Sistem saprobik untuk melihat kelompok organisme yang dominan saja dan banyak digunakan untuk menentukan tingkat pencemaran dengan persamaan Dresscher dan Van Der mark sebagai berikut:

$$X = \frac{C + 3D - B - 3A}{A + B + C + D}$$

Dimana :

X : Koefisien Saprobik (-3 sampai dengan 3)

A : Kelompok organisme Cyanophyta

B : Kelompok organisme Dinophyta

C : Kelompok organisme Chlorophyta

D : Kelompok organisme Chrysophyta

Derajat pencemaran perairan berdasarkan koefisien saprobik, seperti disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hubungan antara koefisien saprobik dengan tingkat pencemaran perairan

Bahan pencemar	Tingkat pencemaran	Fase saprobik	Koefisien saprobik
Bahan organik	Sangat berat	Polisaprobik	(-3)-(-2)
		Poli/ α -mesosaprobik	(-2)-(-1,5)
	Cukup berat	α -meso/Polisaprobik	(-1,5)-(-1)
		α -mesosaprobik	(-1)-(-0,5)
Bahan organik dan anorganik	Sedang	α/β -mesosaprobik	(-0,5)-(0)
		β/α -mesosaprobik	(0)-(0,5)
	Ringan	β -mesosaprobik	(0,5)-(1,0)
		β -meso/Oligosaprobik	(1,0)-(1,5)
	Sangat ringan	Oligo/ β -mesosaprobik	(1,5)-(2)
		Oligosaprobik	(2)-(3)

Sumber: Marganof, 2008

C. Perifiton

1. Pengantar

Komunitas perifiton adalah lapisan berlendir yang melekat pada batuan dan substrat stabil lainnya yang terdiri dari aliran dasar (Gray, 2013). Perifiton adalah jenis agregat mikroba, biasanya terdiri dari alga, bakteri, dan mikro atau meso-organisme, serta materi organik yang masuk dan menyebar dalam air dan sedimen, khususnya pada permukaan sedimen, batuan, tanaman, dan partikel tersuspensi dalam ekosistem akuatik (Sun *et al.*, 2018). Perifiton ditemukan di dasar sungai dan perairan. Perifiton, mirip lapisan lendir di perairan. Kadang-kadang sulit untuk mendeteksi, warna perifiton yang terendam berupa objek berwarna coklat atau hijau. Istilah perifiton adalah pendeskripsi yang paling umum dalam ekologi aliran untuk komunitas ini. Namun, istilah lain juga digunakan, seperti *Aufwuchs* (umumnya digunakan di Eropa), deskripsi Jerman dari komunitas yang berarti "tumbuh", dan *phytobenthos*. Komunitas ini sebagian besar terdiri dari alga dan cyanobacteria (sebelumnya disebut ganggang hijau-biru) dan istilah ganggang benthik juga digunakan, terutama oleh ahli biologi alga (Biggs, 2000).

Penyebutan komunitas perifiton umumnya banyak digunakan. Ini menunjukkan kelompok tertentu dari taksa perifiton. Seringkali individu-individu dari kelompok-kelompok tersebut tidak akan terkait erat secara filogenetis tetapi telah mengembangkan sifat-sifat mandiri yang memungkinkan mereka untuk hidup berdampingan di habitat yang sama. Sebagai contoh, *Phormidium cyanobacterium* dapat hidup bersama komunitas yang didominasi oleh diatom (seperti *Cymbella*, *Gomphonema* dan *Synedra*).

Perifiton sangat penting untuk fungsi ekosistem tetapi dalam keadaan tertentu dapat berproliferasi, menyebabkan masalah pengelolaan sumber daya air seperti menurunkan nilai estetika, rekreasi, dan keanekaragaman hayati. Proliferasi juga bisa mencemari air, menjadi racun bagi hewan, dan menghambat intakes (Biggs, 2000). Selain itu, degradasi ekologis perairan dapat menyebabkan perubahan besar dalam komunitas perifiton, sehingga komposisi spesies perifiton secara rutin digunakan sebagai indikator polusi di sungai. Perifiton dapat mengakumulasi logam dari air ambien dan dari sedimen (Tang *et al.*, 2014).

Munculnya lapisan perifiton dapat sangat bervariasi dan memberikan banyak informasi dasar tentang kondisi dalam aliran. Selain itu, perifiton adalah komponen fundamental dari ekosistem sungai yang memurnikan air dengan penyerapan logam dan nutrisi, dan menyediakan komponen penting dari sumber makanan ke jaring-jaring makanan dalam perairan. Sejalan dengan itu, komunitas perifiton sangat responsif terhadap penurunan kualitas air, pergeseran dalam komunitas konsumen invertebrata dan terjadinya banjir dengan energi yang cukup untuk mengiris pertumbuhan alga. Penutupan perifiton yang lebat/tinggi dapat memiliki efek yang merugikan pada aliran keanekaragaman hayati, trout dan penggunaan rekreasi dalam perairan (Gray, 2013). Biggs & Kilroy (2000) mendefinisikan pertumbuhan gangguan perifiton dan memberikan ambang batas yang harus dihindari dalam persetujuan sumber daya dan rencana regional.

Perifiton beradaptasi dengan baik saat hidup di permukaan yang keras. Alga yang melekat tumbuh di bebatuan (*epilithic periphyton*) di zona eulittoral dapat memainkan peran penting secara estetika, dan manfaat lain dari garis pantai. Ini juga merupakan komponen penting dari jaring makanan di pantai, faktor yang mempengaruhi kondisi habitat bentik, dan potensi refugium untuk bakteri indikator fecal, patogen manusia, dan botulisme pada ikan dan unggas air. Kemampuan pertumbuhan perifiton yang cepat, dalam menanggapi input nutrisi, menawarkan potensi untuk menggunakan komunitas alga ini karena biaya yang relatif rendah, sensitif, indikator awal dari perbedaan lokal dalam pembebanan nutrisi di sepanjang muara sungai, sebelum konsentrasi polutan terdispersi dan diencerkan di perairan lepas pantai yang lebih dalam.

2. Desain dan teknik sampling versi National Institute of Water and Atmospheric Research, Selandia Baru

Kajian yang cukup lengkap dan mendalam, komprehensif, dan mudah diakses terkait perifiton dan metode pengamatannya telah disediakan oleh Biggs (2000) serta Biggs dan Kilroy (2004). Pembaca atau peneliti dapat mengkaji referensi tersebut lebih lanjut. Belajar dari pengalaman di Selandia Baru, dua morfologi paling umum dari perifiton yang mungkin ditemukan di perairan adalah diatom dan alga berfilamen yang dapat dengan mudah dibagi sesuai dengan warna dan ketebalan/panjang filamen masing-masing. Survei taksonomi

dimungkinkan, tetapi memerlukan sumber daya yang cukup, seperti peralatan laboratorium untuk analisis dan personel terlatih.

Dalam melakukan pengamatan dan penelitian perifiton ini, sebaiknya mempertimbangkan berbagai hal berikut.

a) Tujuan

Kesesuaian dan ketepatan program biomonitoring akan tergantung pada desain dan ukuran pengambilan sampel. Tujuan yang terdefinisi dengan baik sangat penting dalam merancang sistem sampling yang tepat. Menurut Biggs dan Kilroy (2000) beberapa hal utama yang harus dipertimbangkan, yaitu (1) Dimana tempat pengambilan sampel, (2) Berapa banyak sampel, (3) Variabel untuk mengukur, (4) Metode dan replikasi sampel, (5) Biaya penelitian, (6) Pendekatan untuk analisis data, dan (7) Milestone laporan dan format

Secara umum, desain penelitian pemantauan perifiton akan berfokus pada masalah yang tersebar luas atau intensif secara lokal. Pengambilan sampel secara spasial meliputi skala temporal/spasial yang luas dan banyak aliran dan sungai yang berbeda. Dengan demikian, mungkin ada kompromi dalam ukuran (terkait erat dengan biaya) dari data yang dikumpulkan. Sebaliknya, sebuah penelitian intensif lokal berusaha untuk mendeteksi pola di perifiton pada skala temporal pada daerah yang lebih kecil. Penelitian-penelitian ini sering membutuhkan data kuantitatif berukuran tinggi yang lebih banyak dan padat sumber daya untuk dikumpulkan. Survei persediaan atau sumber daya cenderung jatuh ke dalam kategori sebelumnya dan memerlukan protokol kualitatif yang cepat, sedangkan dampak proyek restorasi atau efek konsesi pada lahan publik, seperti penambangan, memerlukan prosedur kuantitatif yang intensif, dan mungkin dapat dirancang untuk mendeteksi kondisi tertentu. Keputusan pertama yang dibuat adalah skala yang sesuai dari penelitian dan skala di mana faktor-faktor yang berpengaruh mungkin ada.

(1) Di mana dan kapan harus mengambil sampel?

Sekali lagi jawaban atas pertanyaan ini sangat terkait dengan tujuan pemantauan. Contoh lokasi situs sangat ditentukan oleh kekuatan data yang menentang persyaratan dan anggaran yang tersedia. Persyaratan dasar adalah untuk situs yang terkena dampak/pemantauan dan setidaknya satu situs referensi (atau kontrol) yang dapat dibandingkan. Situs referensi (atau kontrol) dianggap tidak terpengaruh oleh dampak yang dipertimbangkan, apakah itu

merupakan pelepasan atau warisan dari 150 tahun pertanian. Desain umum adalah untuk membandingkan situs yang hulu (referensi) dan hilir (dampak) dari debit atau sumber dampak lainnya. Dalam contoh upstream-downstream, situs hulu kedua (atau ketiga) dapat ditambahkan untuk memperkirakan variasi antara situs referensi, sementara situs hilir lebih lanjut dapat ditambahkan untuk mengukur sejauh mana dampaknya.

Untuk menilai perbedaan kualitas air adalah penting bahwa semua situs secara fisik sama mungkin (tipe substrat, bayangan, aliran dan dimensi aliran) sehingga efek pembauran pada komunitas perifiton diminimalkan atau dihilangkan. Situs referensi terakhir sering dipilih pada aliran yang berdekatan, atau aliran yang tidak didekatkan, dan digunakan untuk menilai kondisi seluruh aliran studi relatif terhadap kondisi aliran regional dan komunitas. Atau, dalam penilaian skala besar pengayaan atau status dampak lainnya dari aliran, Anda akan ingin sampel sebanyak mungkin sungai di seluruh wilayah Anda. Jumlah dan lokasi situs yang diambil akan ditentukan oleh sumber daya yang tersedia.

Setelah lokasi dan nomor lokasi telah ditetapkan, penting untuk mempertimbangkan karakteristik habitat skala meso yang ingin disertakan. Ahli ekologi sungai cenderung mengkarakterisasi aliran dan sungai dengan jumlah aliran relatif, *riffle* atau *pool* yang terjadi di lokasi sampling. Ini merupakan pertimbangan penting ketika membandingkan komunitas biotik antara dua atau lebih situs. Dalam aliran *hardbottomed*, habitat *riffle* sering umum, habitat yang mudah dikenali dan biologis produktif yang dapat diambil sampelnya dengan aman bahkan di sungai yang lebih besar. Namun, dalam habitat *riffle stream* yang berarus lunak mungkin jarang atau tidak ada. Senapan didefinisikan sebagai area 'arung' cepat, biasanya dikaitkan dengan penyempitan dalam saluran dan di mana substrat berbatu atau kayu dapat muncul di atas permukaan. Sebaliknya, kolam adalah area air yang mengalir lambat atau berdiri, tidak termasuk 'arung', biasanya di dasar riffle. Ini adalah habitat terdalam di sungai. Pertengahan antara *pool* dan *riffles* dijalankan. Daerah-daerah ini dicirikan oleh aliran laminar dengan permukaan yang sebagian besar tidak putus. Kriteria yang paling penting adalah bahwa karakteristik habitat distandarisasikan di seluruh lokasi pengambilan sampel Anda. Biggs dan Kilroy (2000) menyatakan bahwa sampel perifiton paling sering dikumpulkan dari 'run' yang kurang rentan terhadap *scour*.

Seperti yang telah kita lihat, salah satu penentu utama penutup perifiton dan biomassa adalah aliran pendahuluan. Banjir, khususnya yang memobilisasi material tempat tidur, menjelajahi perifiton dari substrat dan beberapa minggu aliran stabil mungkin diperlukan untuk komunitas perifiton untuk mendapatkan kembali keanekaragaman biomassa dan taxa yang diamati sebelum banjir (Biggs, 2000). Dengan demikian, sampling hanya boleh terjadi setelah setidaknya 4 minggu aliran stabil telah berlalu sejak banjir bedmobilising terakhir, pada atau di luar lima kali rata-rata aliran selama seminggu sebelum banjir itu. Informasi ini idealnya dapat bersumber dari database dewan regional atau observasi anekdot dan catatan curah hujan (meskipun kurang diinginkan). Namun, ini mungkin tidak mungkin di sungai yang sangat rawan banjir atau selama tahun-tahun yang sangat basah, dalam hal ini pemeriksaan yang cermat terhadap hidrograf, bila tersedia, dan prediksi cuaca akan diperlukan untuk memastikan pengambilan sampel terjadi setelah periode yang relatif stabil. Paling tidak, pola pelepasan selama bulan sebelumnya harus dicatat atau dijelaskan di samping data pemantauan perifiton Anda.

(2) Seberapa sering sampel?

Frekuensi *sampling* juga dapat menjadi pertimbangan tergantung pada tujuan pemantauan. Komunitas perifiton sangat bergantung pada tekanan aliran, nutrisi, cahaya dan tekanan invertebrata. Jika fokus penelitian adalah pada proliferasi gangguan, kesempatan sampling harus sesuai dengan kondisi yang mempromosikan biomassa tinggi; sering periode aliran rendah di musim panas yang tinggi. Namun, jika potensi masalah yang sedang dinilai adalah dampak dari regulasi aliran sepanjang tahun (misalnya terkait dengan bendungan hidro-listrik), maka sampling sepanjang tahun akan diperlukan. Interaksi antara perifiton dan spesies yang terancam punah seperti *blue duck* (whio) mungkin memerlukan pengambilan sampel pada waktu setahun terkait dengan tahap siklus hidup yang penting, seperti musim kawin. Deteksi keterkaitan antara pergeseran biomassa dan variabel lingkungan membutuhkan beberapa sampel perifiton selama lintasan perkembangan mekar. Sebaliknya, hubungan skala besar antara aliran, nutrisi dan pertumbuhan perifiton dapat digambarkan menggunakan sampling satu tempat dari beberapa situs.

3) Seberapa luas/besar sampel?

Metode pengukuran variabel respons, perifiton, ditentukan oleh tujuan kajian dan sumber daya yang tersedia. Selain data perifiton, penting untuk mengumpulkan informasi lingkungan dan habitat untuk membuktikan bahwa lokasi pengambilan sampel sesuai dan dapat menggambarkan penyebab di balik pola apa pun yang mungkin diidentifikasi. Penilaian habitat bersama koleksi perifiton merupakan bagian integral dari setiap program pemantauan. Perubahan struktur fisik habitat merupakan salah satu faktor utama dari kegiatan manusia yang menyebabkan menurunnya sumber daya air; fitur topografi dan sekitarnya adalah penentu utama komunitas akuatik. Baik kualitas dan kuantitas habitat yang tersedia mempengaruhi struktur dan komposisi komunitas perifiton. Efek dari fitur-fitur seperti pada hasil penilaian biologis dapat diminimalkan dengan sampling habitat serupa di semua situs yang dibandingkan. Namun, ketika semua situs tidak dapat dibandingkan secara fisik, karakterisasi habitat sangat penting untuk interpretasi yang tepat dari hasil survei. Beberapa penelitian telah menyediakan panduan dan prosedur yang komprehensif untuk penilaian habitat di sungai dan sungai Selandia Baru yang dapat diapakai.

Penentu utama pertumbuhan biomassa perifiton adalah periode akrual dan nutrisi; informasi ini sangat penting untuk studi apa pun. Selain itu, penilaian keragaman taksonomi perifiton juga akan mendapat manfaat dari pengukuran kimia air selain nutrisi, seperti konsentrasi silika atau kalsium. Rancang rezim pengambilan sampel Anda sesuai dengan tujuan Anda dan selalu berkonsultasi dengan ahli ekologi air tawar yang berpengalaman selama tahap desain.

b. Metode dan replikasi sampel

Pilihan metode pemantauan akan ditentukan oleh tujuan studi dan sumber daya yang tersedia. Protokol yang disediakan di sini didasarkan pada Biggs dan Kilroy (2000) dan menggambarkan metode untuk pengkajian kualitatif yang cepat dari masyarakat dan pengambilan sampel kuantitatif yang lebih intensif.

Ketika sensitivitas yang lebih besar untuk mendeteksi perubahan atau perbedaan dalam biomassa perifiton diperlukan, mis. efek dari debit tertentu atau perubahan ke rezim aliran, protokol kuantitatif harus digunakan. Keduanya melibatkan pengumpulan perifiton dari replika bebatuan, tetapi berbeda dalam cara pengumpulannya. Metode tertentu melibatkan pengambilan sampel seluruh batu yang

memberikan data pada seluruh komunitas, pada permukaan atas dan bawah batu. Secara umum, akan ada sedikit perbedaan di antara komunitas sampel di substrat kerikil halus, tetapi heterogenitas akan meningkat dengan ukuran substrat. Biggs dan Kilroy menyarankan metode ini paling tepat untuk survei luas dari biomassa pengayaan atau perifiton. Data dinyatakan dalam bentuk luas permukaan sedimen yang terpapar. Metode lain melibatkan mengumpulkan perifiton hanya dari permukaan atas batu yang mengurangi efek variasi spasial dalam kecepatan air, ketersediaan cahaya atau penggembalaan invertebrata terkait dengan bagian bawah batu. Metode ini biasanya digunakan untuk menilai efek pencemaran, dan data dinyatakan dalam bentuk luas permukaan bidang (luas datar sebenarnya, dibandingkan dengan luas permukaan substrat) dari dasar aliran.

Replikasi sampel di dalam lokasi merupakan pertimbangan penting, tetapi mungkin harus disesuaikan di lapangan. Selama pengambilan sampel RAM, merupakan praktik standar untuk mengumpulkan data pada 10 titik di sepanjang setiap 10 transek; Namun, jumlah titik dalam setiap transek dapat dikurangi menjadi 5 jika penutup perifiton terbukti sangat homogen. Selama sampling kuantitatif adalah praktik standar untuk mengumpulkan 10 sampel sepanjang transek tunggal karena meningkatnya biaya pemrosesan sampel (Biggs & Kilroy, 2000). Selalu sadar akan tingkat variabilitas yang terlihat di dalam dan di antara situs Anda. Ketika variasi tinggi, tingkatkan replikasi Anda, tetapi perhatikan bahwa yang terbaik adalah mereplikasi sama di setiap situs.

c. Biaya Penelitian

Masalah keuangan dan sumber daya adalah salah satu kendala utama untuk setiap program sampling. Serta biaya tetap perencanaan, desain penelitian, interpretasi dan hasil penulisan, unit dasar biaya adalah harga perkiraan setiap sampel atau situs. Biaya ini harus mencakup waktu staf yang diperlukan untuk mengumpulkan setiap sampel tambahan di lapangan, waktu tempuh tambahan yang diperlukan untuk mengunjungi lebih banyak situs, dan biaya analisis laboratorium dan peralatan sekali pakai yang diperlukan. Setelah biaya sampel dan perkiraan anggaran diketahui, adalah mungkin untuk menghitung berapa banyak sampel yang dapat dikumpulkan dan mengeksplorasi pilihan untuk meningkatkan baik replikasi (mengumpulkan lebih banyak sampel atau mengunjungi lebih banyak

situs) atau resolusi (mengumpulkan tingkat detail yang lebih baik dalam setiap sampel atau situs).

d. Pendekatan untuk analisis data

Konsultasikan dengan ahli biometris atau ahli ekologi yang berpengalaman tentang analisis data selama tahap desain dan analisis studi Anda. Keterampilan statistik yang diperlukan harus diidentifikasi selama perencanaan proyek dan saran atau pelatihan yang sesuai yang dicari pada penggunaannya.

Kadang-kadang mungkin perlu mengontrak orang dengan keterampilan yang diperlukan untuk melakukan analisis yang lebih kompleks. Namun, analisis dasar dapat dengan mudah dilakukan menggunakan Excel dan R. Langkah pertama adalah dengan hati-hati memeriksa data Anda. Hitung metrik sederhana yang menyaring komunitas menjadi komponen yang mudah dipahami, mis. biomassa per satuan luas, morphotype atau kekayaan taksonomi atau skor indikator kesehatan aliran, dan plot hasil dalam bentuk grafik. Metode analisis yang digunakan akan ditentukan oleh tujuan penelitian. Apakah Anda membandingkan antara kelompok perawatan atau mencari tren di komunitas yang diatur sepanjang gradien spatio-temporal? Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk mencari perbedaan antara 'perawatan'. Perawatan mungkin sampel yang dikumpulkan sebelum atau setelah perubahan pada rezim aliran, atau ke atas dan ke bawah dari debit atau beberapa manipulasi eksperimental. ANOVA membuat berbagai asumsi tentang sifat data yang harus dipenuhi agar hasilnya valid. Korelasi dan analisis regresi linier digunakan untuk menguji signifikansi statistik dari respon tambahan sepanjang gradien lingkungan; misalnya, membandingkan biomassa perifiton dari 20 aliran dengan berbagai tingkat pengayaan nutrisi.

e. Pelaporan

Tahap akhir dari setiap penelitian adalah laporannya; studi yang tidak dilaporkan mungkin juga tidak terjadi. Penulisan ilmiah cenderung memiliki format yang sangat standar meskipun ini dapat diubah untuk audiens yang spesifik. Tergantung pada tujuan pemantauan, mungkin perlu untuk membuat laporan tertulis formal dan presentasi yang kurang formal untuk mengkomunikasikan temuan ke khalayak yang lebih luas dari para pemangku kepentingan dan anggota masyarakat. Persyaratan pelaporan mendasar adalah untuk menyatakan tujuan pemantauan, menjelaskan bagaimana

Anda menangani tujuan-tujuan ini dan menyajikan temuan Anda dalam konteks tujuan tersebut. Laporan juga dapat mencakup evaluasi ulang program pemantauan (tujuan, desain, metode lapangan, dan lain-lain), dan rekomendasi untuk perbaikan.

3. Pendekatan Berbasis Standar Laboratorium versi U.S. Environmental Protection Agency

a. Prosedur Pengambilan Sampel Lapangan

1) Substrat Alami (Multihabitat)

Sampel perifiton harus dikumpulkan selama periode aliran yang stabil. Aliran tinggi dapat menjelajahi dasar aliran dan menyapu perifiton di hilir. Rekolonisasi substrat akan lebih cepat apabila banjir kecil dan aliran kaya nutrisi. Pengambilan sampel sebaiknya ditunda setidaknya tiga minggu setelah aliran arus tinggi (banjir) untuk memungkinkan rekolonisasi dan suksesi komunitas perifiton maksimal. Namun, pemulihan setelah debit air tinggi bisa lebih cepat bahkan 7 hari jika aliran memang tidak terlalu deras.

Dua pendekatan sampling dijelaskan untuk pengambilan sampel substrat alami. Pengambilan sampel multihabitat paling baik, mencirikan ganggang bentik di jangkauan, tetapi hasilnya mungkin tidak sensitif terhadap perubahan kualitas air yang tenang karena variabilitas habitat di antara jangkauan. Komposisi spesies dari habitat tunggal harus mencerminkan perbedaan kualitas air di antara aliran lebih tepat daripada sampling multihabitat, tetapi dampak pada habitat lain mungkin terlewatkan.

Panjang aliran sampel tergantung pada tujuan proyek, anggaran, dan hasil yang diharapkan. Pengambilan sampel multihabitat harus dilakukan pada skala jangkauan (30-40 aliran lebar) untuk memastikan sampling keragaman habitat yang terjadi di sungai. Idealnya, pengambilan sampel habitat tunggal juga harus dilakukan pada skala jangkauan. Panjang gelombang yang lebih pendek mungkin dapat diambil sampelnya untuk sampel habitat tunggal daripada sampel multihabitat karena habitat tunggal yang dipilih biasanya lebih banyak/umum dalam penelitian.

Prosedur berikut digunakan untuk sampling multihabitat yang diadaptasi dari prosedur Kentucky dan Montana, Amerika Serikat. Prosedur ini direkomendasikan ketika penilaian laboratorium terhadap komposisi spesies alga akan dilakukan.

- (a) Tetapkan jangkauan sampling multihabitat sesuai dengan prosedur makroinvertebrata. Dalam banyak kasus, jangkauan yang diperlukan untuk pengambilan sampel perifiton akan menjadi ukuran yang sama dengan jangkauan yang diperlukan untuk makroinvertebrata atau pengambilan sampel ikan sehingga banyak habitat alga yang dapat diambil sampelnya secara praktis.
- (b) Sebelum pengambilan sampel, lengkapi lembar observasi yang tersedia, misalnya lembar data fisika-kimia dan lembar data pengamatan perifiton. Perkiraan visual atau penilaian berbasis transek kuantitatif dapat digunakan untuk menentukan persentase cakupan dari masing-masing jenis substrat dan perkiraan kelimpahan relatif dari makrofita, alga filamen makroskopis, diatom, akumulasi alga mikroskopik lainnya (perifiton), dan biota lainnya.
- (c) Kumpulkan alga dari semua substrat dan habitat yang tersedia. Tujuannya adalah untuk mengumpulkan sampel komposit tunggal yang mewakili kumpulan perifiton yang ada di daerah pengamatan. Sampling semua substrat dan habitat (misalnya mewakili kategori *riffles*, *run*, *shallow pools*, dan *nearshore areas*) secara kasar sebanding dengan cakupan area mereka dalam daerah pengamatan.
- (d) Tempatkan semua sampel ke dalam wadah kecil dan anti pecah. Sampel komposit berukuran empat ons (sekitar 125 ml) sudah cukup mewakili. Tambahkan larutan Lugol sejumlah yang disarankan, fiksatif "M3", larutan buffer formalin 4%, glutaraldehid 2%, atau pengawet lainnya.
- (e) Tempatkan label permanen di luar wadah sampel, memuat informasi berikut: nama badan air (jenis aliran), lokasi, nomor stasiun, tanggal, nama pengumpul, dan jenis pengawet. Catat informasi ini dan informasi ekologi yang relevan di dalam buku catatan lapangan atau pada lembar data lapangan perifiton. Letakkan label lain dengan informasi yang sama di dalam wadah sampel (Hati-hati, larutan Lugol dan pengawet berbasis yodium lainnya akan mengubah kertas label kertas menjadi hitam).
- (f) Setelah pengambilan sampel, periksa ulang informasi yang telah ditempel pada semua label dan formulir untuk keakuratan dan kelengkapan.
- (g) Periksa semua alat, pastikan tidak ada noda dan residu. Gosok sampai bersih dan bilas dengan air suling sebelum mengambil contoh sampel berikutnya dan sebelum membuangnya.

- (h) Pengangkutan sampel kembali ke laboratorium dalam kota pendingin (simpan dingin dan gelap) dan simpan sampel yang diawetkan dalam tempat gelap sebelum diproses. Pastikan untuk menyimpan sampel dengan aman sehingga transportasi dan pemindahan tidak memungkinkan sampel bocor. Saat diawetkan, periksa pengawet setiap beberapa minggu dan isi kembali seperlunya sampai kegiatan identifikasi sampel selesai.
- (i) Catat semua sampel secara lengkap, minimal catat kode identifikasi sampel, tanggal, nama aliran, lokasi pengambilan sampel, nama pengumpul, metode pengambilan sampel, dan area sampel (jika ditentukan).

Adapun ringkasan teknik pengumpulan sampel untuk perifiton dari berbagai tipe aliran dan substrat yang dapat diaplikasikan oleh peneliti, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Ringkasan teknik pengumpulan sampel perifiton

Tipe Substrat	Teknik Koleksi
Substrat yang dapat dilepas/diambil (keras/padat): kerikil, batu besar, dan kayu yang melapuk	Ambil/angkat substrat yang representatif dari air; sikat atau gosok daerah yang terdapat alga dan bilas ke dalam botol sampel.
Substrat yang dapat dilepas (lunak): lumut, makroalga, tanaman vaskular, massa akar	Tempatkan sebagian dari tanaman dalam wadah sampel dengan air. Kocok dengan kuat dan gosok dengan lembut untuk melepaskan alga. Ambil dan buang substrak dari wadah penampung sampel.
Substrat besar (tidak dapat dilepas): batu-batu, batuan dasar, batang kayu, pohon, akar	Tempatkan pipa PVC dengan <i>neoprene collar</i> di salah satu ujungnya pada substrat sehingga ujungnya tertutup substrat. Tangkap alga di pipa dengan sikat gigi, sikat kuku, atau pengerik. Kumpulkan alga dari pipa dengan pipet.

Tipe Substrat	Teknik Koleksi
Sedimen: pasir, lumpur, bahan organik halus, tanah liat	Balikkan cawan (telungkupkan) di atas sedimen. Tangkap sedimen dalam cawan petri dengan memasukkan spatula di bawah wadah. Ambil sedimen dari aliran dan bilas ke dalam wadah sampling. Sampel alga dari habitat pengendapan juga dapat dikumpulkan dengan sendok, forceps, atau pipet.

(Sumber : EPA)

2) Substrat Alami (Habitat Tunggal)

Variabilitas perbedaan habitat di perairan dapat dikurangi dengan mengumpulkan perifiton dengan kombinasi substrat/habitat tunggal yang mencirikan jangkauan penelitian. Untuk perbandingan hasil, kombinasi substrat/habitat yang sama harus diambil sampelnya di semua aliran yang menjadi acuan dan uji. Sampling habitat tunggal harus digunakan ketika biomassa perifiton akan dinilai.

- (a) Tentukan jangkauan sampling. Area sampel untuk pengambilan sampel habitat tunggal bisa lebih kecil dari area yang digunakan untuk sampling multihabitat.
- (b) Sebelum pengambilan sampel, lengkapi lembar fisika-kimia dan lembar data perifiton. Selesaikan penilaian habitat seperti dalam sampling multihabitat sehingga kepentingan relatif dari sampel habitat dapat dikarakterisasi.
- (c) Kombinasi substrat/habitat yang direkomendasikan adalah berbentuk *cobble* dengan kecepatan arus 10-50 cm/detik. Sampel dari habitat ini biasanya lebih mudah untuk dianalisis daripada dari habitat beraliran lambat karena mengandung lebih sedikit lumpur. Habitat ini umumnya di banyak ditemukan. Dalam aliran gradien rendah di mana *riffles* jarang, alga pada endapan dapat dikumpulkan. Pasir yang bergerak tidak direkomendasikan sebagai substrat yang ditargetkan karena komposisi jenis pada pasir terbatas sebab ukurannya yang kecil dan sifat substrat yang tidak stabil. Fitoplankton harus dipertimbangkan sebagai alternatif perifiton dalam aliran gradien rendah.

- (d) Kumpulkan beberapa sampel dari kombinasi substrat/habitat yang sama dan komposit mereka ke dalam satu wadah. Tiga atau lebih sampel harus dikumpulkan dari setiap jangkauan atau aliran yang dipelajari.
 - (e) Sampel area harus selalu ditentukan jika biomassa (misalnya, klorofil) per satuan luas harus diukur.
 - (f) Syarat penyimpanan, transportasi, proses, dan pencatatan sampel relatif sama seperti pada langkah pada multihabitat.
- b. Prosedur Pengambilan Sampel Lapangan: Substrat Buatan

Sebagian besar kelompok peneliti lebih memilih sampel substrat alami bila memungkinkan untuk mengurangi waktu lapangan dan meningkatkan penerapan informasi ekologis. Namun, perifiton juga dapat diambil sampelnya dengan mengumpulkan dari substrat buatan yang ditempatkan di habitat akuatik dan ditempatkan dalam jangka waktu tertentu. Prosedur ini sangat berguna di sungai-sungai yang tidak dapat dilalui, sungai-sungai tanpa daerah *riffle*, lahan basah, atau zona litoral habitat lentik. Substrat alami dan buatan berguna dalam memantau dan menilai kondisi air, dan memiliki keuntungan dan kerugian yang sesuai. Meskipun kaca *microslides* lebih disukai, berbagai substrat buatan telah sukses digunakan (implementatif).

- 1) Microslides harus benar-benar dibersihkan sebelum ditempatkan di periphytometers. Bilas slide dengan aseton dan bersihkan dengan Kimwipes®.
- 2) Tempatkan periphytometers permukaan (mengambang) atau benthik (bawah) yang dilengkapi dengan slide kaca, batang kaca, ubin tanah liat, pelat plexiglass atau substrat serupa di daerah penelitian. Biarkan 2 hingga 4 minggu untuk menangkap dan kolonisasi perifiton.
- 3) Ulangan minimal 3 periphytometers di setiap tempat untuk memperhitungkan variabilitas spasial. Jumlah total harus bergantung pada desain penelitian dan hipotesis yang diuji. Sampel dapat dikumpulkan atau dianalisis secara individual.
- 4) Pasang periphytometers ke alat (*rebars*) yang ditumbukkan ke dasar aliran atau ke struktur stabil lainnya. Periphytometers harus tersembunyi untuk meminimalkan gangguan atau vandalisme (upaya perusakan). Hindari saluran utama aliran yang bisa dilalui banyak orang dan wilayah rekreatif. Setiap periphytometer dan perisainya harus diarahkan ke daerah hulu.

- 5) Jika banjir atau kejadian pencucian terjadi selama inkubasi, biarkan badan air untuk menyeimbangkan dan mengatur ulang periphytometers dengan microslide yang bersih.
 - 6) Setelah masa inkubasi (2-4 minggu), kumpulkan substrat. Kumpulkan alga menggunakan spatula karet, sikat gigi, dan pisau cukur. Anda dapat mengetahui kapan semua alga telah dihilangkan dari substrat oleh perubahan dari tekstur halus ke tekstur berlendir atau kasar (bahkan ketika tidak ada alga yang terlihat).
 - 7) Penyimpanan, transportasi, proses, dan pencatatan sampel relatif sama seperti pada langkah pada multihabitat dan habitat tunggal.
 - 8) Salah satu keuntungan menggunakan substrat buatan adalah bahwa kontainer atau alat penampung (mis., Tas whirl-pack atau stoples sampel) dapat dibeli yang akan menahan substrat sehingga substrat tidak perlu diproses di lapangan. Substrat yang berbeda dapat ditujukan untuk analisis mikroskopis dan uji klorofil. Kemudian alga dan substrat dapat ditempatkan dalam wadah sampel dan diawetkan untuk kemudian diproses dan analisis mikroskopis atau ditempatkan dalam pendingin (*ice box*) untuk kemudian analisis klorofil. Pemrosesan sampel laboratorium lebih disukai; jadi jika perjalanan dan waktu kurang dari 12 jam, tidak perlu membagi sampel sebelum kembali ke lab.
- c. Menilai Kelimpahan Relatif dari Alga (Non-Diatom)

Metode yang diringkas di sini adalah versi modifikasi dari yang digunakan oleh Kentucky (*Kentucky DEP 1993*), Florida (*Florida DEP 1996*), dan Montana (*Bahls 1993*). Untuk detail lebih lanjut atau metode alternatif, lihat *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water* atau Metode Standar untuk Pemeriksaan Air dan Air Limbah (APHA 1995). Banyak ganggang yang mudah diidentifikasi untuk tingkat spesies oleh personel terlatih yang memiliki perpustakaan literatur yang baik tentang taksonomi alga. Semua alga tidak dapat diidentifikasi untuk spesies karena: bentuk pertumbuhan beberapa spesies alga secara morfologis tidak dapat dibedakan dengan mikroskop cahaya (misalnya, zoospora dari banyak ganggang hijau); spesies belum dijelaskan sebelumnya; atau spesies tersebut tidak ada dalam literatur laboratorium. Konsistensi dalam identifikasi dalam laboratorium dan program sangat penting, karena sebagian besar bioassessment didasarkan pada kontras antara referensi dan situs uji.

Keakuratan identifikasi menjadi yang paling penting ketika menggunakan informasi *autecological* dari penelitian lain. Teknik jaminan kualitas dirancang untuk memastikan “konsistensi internal” dan juga meningkatkan perbandingan dengan informasi dalam penilaian alga lainnya dan program pemantauan.

d. Menilai Kelimpahan Relatif dari Alga (Non-Diatom)

- 1) Homogenkan sampel alga dengan homogenizer atau blender jaringan. Dengan seksama campurkan sampel dan pipet yang dihomogenisasi ke dalam sel penghitung Palmer. Suspensi alga yang dihasilkan antara 10 dan 20 sel di lapangan merupakan ukuran kepadatan bahan yang baik untuk menghitung dan mengidentifikasi sel. Jika kepadatan rendah maka menghitung lambat. Encerkan sampel jika sel tumpang tindih sehingga terlalu banyak untuk dihitung.
- 2) Isi bagian atas dengan informasi yang cukup dari label sampel dan sumber lain untuk mengidentifikasi sampel secara unik.
- 3) Identifikasi dan hitung 300 “unit sel” alga ke tingkat taksonomi terendah pada pembesaran 400X dengan menggunakan referensi. Membedakan sel-sel alga coenocytic (misalnya, *Vaucheria*) dan alga biru-hijau kecil berfilamen adalah masalah dalam jumlah sel. “Unit sel” dapat didefinisikan untuk alga ini sebagai bagian dari thallus atau filamen berukuran 10mm. Untuk diatom, hanya menghitung diatom hidup dan tidak mengidentifikasi ke tingkat taksonomi yang lebih rendah jika jumlah diatom yang dibersihkan harus dilakukan.
- 4) Catat jumlah sel atau unit sel yang diamati untuk setiap takson pada sebuah *benchsheet*. Buat catatan taksonomi dan gambar pada lembar contoh penting.

e. Relatif Kelimpahan dan Kekayaan Taxa Diatom

- 1) Subsampel setidaknya 5-10 mL dari konsentrasi sampel yang diawetkan sambil menggoyangkan sampel (atau menggunakan pengaduk magnet). Oksidasi (bersih) sampel untuk analisis diatom perlu dihitung. Letakkan diatom di Naphrax® atau media indeks bias tinggi lainnya untuk membuat slide permanen. Label slide dengan informasi yang sama seperti pada label kontainer sampel.
- 2) Isi bagian atas dengan informasi yang cukup dari label sampel untuk mengidentifikasi sampel secara unik.

- 3) Identifikasi dan hitung katup diatom ke tingkat taksonomi terendah, yang seharusnya adalah spesies dan mungkin tingkat variasi, direndam minyak pada pembesaran 1000X mengacu pada referensi. Minimal, hitung 600 katup (300 sel) dan setidaknya hingga 10 katup dari 10 spesies telah diamati. Berhati-hatilah dalam membedakan dan menghitung kedua katup dari *frustules* yang utuh. Sebanyak 10 katup dari 10 aturan spesies merupakan perkiraan yang relatif tepat dari kelimpahan relatif taksa dominan ketika ada satu atau dua taksa sangat dominan. Sebanyak 600 katup dipilih untuk menyesuaikan dengan metode standar yang digunakan. Catat jumlah katup yang diamati untuk setiap takson pada lembaran. Buat catatan dan gambar taksonomis pada lembar data dan catat koordinat-koordinat dari spesimen penting.
- f. Menghitung Kelimpahan Relatif Spesies dan Kekayaan Taxa
- 1) Kelimpahan relatif alga ditentukan dengan membagi jumlah sel (unit sel) untuk setiap takson dengan jumlah total sel yang dihitung (misalnya, 300). Masukkan informasi ini pada rumus atau perhitungan di lembaran yang tersedia.
 - 2) Kelimpahan relatif diatom harus dikoreksi untuk jumlah diatom hidup yang diamati dalam hitungan semua alga. Oleh karena itu, tentukan kelimpahan relatif spesies diatom dalam alga dengan membagi jumlah katup yang dihitung untuk setiap spesies dengan jumlah total katup yang dihitung (misalnya, 600); kemudian kalikan kelimpahan relatif dari setiap taksonomi diatom dalam hitungan dengan kelimpahan relatif diatom hidup dalam hitungan semua alga. Masukkan informasi ini pada rumus atau perhitungan di lembaran yang tersedia.
 - 3) Beberapa analisis lebih senang memperlakukan komposisi spesies diatom dan alga secara terpisah. Dalam hal ini, tentukan kelimpahan relatif spesies diatom dalam kumpulan alga dengan membagi jumlah katup yang dihitung untuk setiap spesies dengan jumlah total katup yang dihitung (misalnya, 600). Total kekayaan taxa dapat diperkirakan dengan menambahkan jumlah taxa alga dan taxa diatom.
- g. Metrik Berdasarkan Komposisi Spesies
- Pembuatan metrik perifiton penting dilakukan untuk menggambarkan kondisi lingkungan berdasarkan keadaan spesies yang diamati. Di Amerika dan Eropa, banyak metrik perifiton yang

dibuat berdasarkan kondisi di beberapa negara bagian dan program penilaian lingkungan di seluruh AS dan Eropa. Masing-masing metrik tersebut harus diuji untuk melihat bagaimana tanggapan perubahan manusia dari aliran di wilayah di mana mereka digunakan. Dalam banyak kasus, diatom dan metrik alga telah ditentukan secara terpisah karena perubahan cyanobacteria kecil yang berlimpah (alga hijau-biru) dapat secara numerik mengalahkan metrik berdasarkan kelimpahan relatif dan karena alga hijau bersel besar (misalnya, *Cladophora*) mungkin tidak memiliki berat yang sesuai. Namun, upaya harus dilakukan untuk mengintegrasikan diatom dan alga lunak sebanyak mungkin dalam metrik, terutama dalam kasus seperti spesies dan kekayaan generik ketika variabilitas besar dalam kelimpahan relatif tidak menjadi masalah.

Kebanyakan metrik dapat dihitung berdasarkan data kehadiran/ketiadaan atau pada kelimpahan relatif taksa. Sebagai contoh, persentase Diatom Toleran Polusi dapat dihitung sebagai jumlah kelimpahan relatif taxa toleran polusi dalam kumpulan atau sebagai jumlah spesies yang toleran terhadap polusi dalam kumpulan. Persentase kemiripan komunitas dapat dihitung, yang menghitung secara kuantitatif persentase organisme dalam dua kelompok yang sama. Atau, dapat dihitung sebagai persentase spesies yang sama dengan membuat semua kelimpahan relatif lebih besar dari 0 sampai 1. Metrik juga dapat dihitung dengan data kehadiran/ketiadaan sebagai pengganti kelimpahan relatif spesies, yaitu “% taxa sensitif, % takik motil, % acidobiontic, % alkalibiontic, % halobiontic, % saprobiontic, % eutrofik, indeks autecological sederhana, dan perubahan dalam kondisi ekologi yang disimpulkan”.

Meskipun kita mungkin menemukan bahwa metrik berdasarkan kelimpahan relatif spesies lebih sensitif terhadap perubahan lingkungan, metrik berdasarkan data kehadiran/ketiadaan mungkin lebih tepat ketika mengembangkan metrik dengan sampel multihabitat dan sampling proporsional pada habitat yang sangat sulit.

Metrik dibagi menjadi dua kelompok yang dapat membantu dalam mengembangkan Indeks Integritas Biotik (*Integrity Biotics Index/IBI*). Metrik dalam grup pertama memiliki kekurangan dalam diagnostik daripada kelompok metrik kedua. Metrik dalam kelompok pertama (spesies dan kekayaan generik, keragaman Shannon, dan lainnya) umumnya mencirikan integritas biotik (keseimbangan flora dan fauna di alam) tanpa secara khusus mendiagnosis kondisi ekologis dan

penyebab kerusakan. Kelompok metrik kedua secara khusus mendiagnosis penyebab gangguan integritas biotik. Metrik dari kedua kelompok dapat dimasukkan dalam IBI untuk membuat IBI yang hierarkis. Atau, IBI dapat dibangun dari hanya metrik integritas biotik sehingga kesimpulan integritas biotik dan diagnosis kerusakan bersifat independen.

Informasi autekologi tentang jumlah spesies alga dan genera telah dilaporkan dalam literatur. Mengikuti perkembangan indeks saprobik oleh Kolkwitz dan Marsson, beberapa sistem kategori klasifikasi (misalnya, spektrum halobian, spektrum pH) dikembangkan untuk menggambarkan preferensi ekologis dan toleransi spesies. Saat ini informasi ekologi dan toleransi spesies untuk kondisi lingkungan tertentu telah dikuantifikasi dengan menggunakan pendekatan regresi rata-rata tertimbang. Beberapa metrik yang mungkin berguna berdasarkan referensi dapat diuraikan sebagai berikut.

1) Metrik Integritas Biotik (*Metrics of Biotic Integrity*)

Kekayaan spesies adalah perkiraan jumlah spesies alga (diatom, alga lunak, atau keduanya) dalam sampel. Kekayaan spesies tinggi diasumsikan mengindikasikan integritas biotik yang tinggi karena banyak spesies yang beradaptasi dengan kondisi yang ada di habitat. Kekayaan spesies diperkirakan menurun dengan meningkatnya polusi karena banyak spesies yang stres. Namun, banyak habitat mungkin secara alami tertekan oleh nutrisi rendah, cahaya rendah, atau faktor lainnya. Sedikit peningkatan dalam pengayaan nutrisi dapat meningkatkan kekayaan spesies di headwater dan secara alami tidak produktif, aliran nutrisi yang buruk.

Jumlah Total Genera (Kekayaan umum) harus tertinggi di situs referensi dan terendah di situs yang terkena dampak di mana genera sensitif menjadi stres. Jumlah genera (diatom, alga lunak, atau keduanya) dapat memberikan ukuran keragaman yang lebih kuat daripada kekayaan spesies, karena banyak spesies yang terkait erat berada dalam beberapa genera dan dapat meningkatkan perkiraan kekayaan secara artifisial.

Jumlah Total Divisi diwakili oleh semua taksa harus tertinggi di situs dengan kualitas air yang baik dan integritas biotik yang tinggi. Shannon Diversity (untuk diatom). Indeks Shannon adalah fungsi dari kedua jumlah spesies dalam sampel dan distribusi individu di antara spesies tersebut. Karena kekayaan dan pemerataan spesies dapat

bervariasi secara independen dan kompleks dengan polusi air. Perubahan dalam keragaman spesies, dan bukan nilai keragaman, dapat menjadi indikator yang berguna untuk perubahan kualitas air. Keanekaragaman spesies, meskipun ada kontroversi di sekitarnya, secara historis telah digunakan dengan sukses sebagai indikator pencemaran organik (limbah). Beberapa peneliti menggunakan keanekaragaman Shannon karena kepekaannya terhadap perubahan kualitas air. Dalam kondisi tertentu, nilai keanekaragaman Shannon mungkin meremehkan kualitas air misalnya, ketika jumlah total taksa kurang dari 10. Penilaian untuk sampel kekayaan rendah dapat ditingkatkan dengan membandingkan kumpulan Keragaman Shannon dengan nilai Keberagaman Maksimum Shannon.

2) *Percentage Community Similarity (PCS)* dari Diatom

Percentage Community Similarity (PCS) digunakan untuk membandingkan komunitas copepoda planktonik. Itu dipilih untuk digunakan dalam bioassessment alga karena menunjukkan kesamaan komunitas berdasarkan kelimpahan relatif, dan dengan demikian, memberikan lebih banyak bobot untuk taksa dominan daripada yang jarang. Persen kesamaan dapat digunakan untuk membandingkan situs kontrol dan tes, atau komunitas rata-rata dari kelompok kontrol atau situs referensi dengan situs uji. Persentase nilai kesamaan komunitas berkisar dari 0 (tidak ada kesamaan) hingga 100%.

3) *Tolerance Index* untuk Diatom

Pollution Tolerance Index (PTI) untuk alga menyerupai indeks biotik Hilsenhoff untuk makroinvertebrata. Ahli membedakan tiga kategori diatom sesuai dengan toleransi mereka terhadap peningkatan polusi, dengan spesies diberi nilai 1 untuk taxa yang paling toleran (misalnya, *Nitzschia palea* atau *Gomphonema parvulum*) menjadi 3 untuk spesies yang relatif sensitif. Toleransi relatif untuk taksa dapat ditemukan dalam banyak referensi yang tercantum. Dengan demikian, PTI bervariasi dari 1 untuk paling tercemar sampai 3 untuk air yang paling tidak tercemar ketika menggunakan persamaan berikut. Dalam beberapa kasus, rentang nilai untuk toleransi telah ditingkatkan, sehingga menghasilkan peningkatan yang sesuai dalam kisaran nilai PTI.

4) Persentase Diatom Sensitif

Metrik persentase diatom yang sensitif adalah jumlah dari kelimpahan relatif dari semua spesies yang tidak bertoleransi. Metrik

ini sangat penting dalam aliran pesanan yang lebih kecil di mana produktivitas primer mungkin rendah secara alami, menyebabkan banyak metrik lain mengabaikan kualitas air. Dalam aplikasi, dikenal Persentase *Achnanthes minutissima*. Spesies ini adalah diatom kosmopolit yang memiliki amplitudo ekologis sangat luas. Ini adalah diatom dan seringkali spesies pertama yang merintis situs yang baru-baru ini digali, kadang-kadang dengan mengesampingkan semua alga lainnya. *A. minutissima* juga sering dominan dalam aliran yang terkena aliran asam tambang dan bahan kimia lainnya. Persentase kelimpahan *A. minutissima* telah ditemukan berbanding lurus dengan waktu sejak aliran terakhir atau masa terjadinya polusi beracun. Untuk dapat digunakan dalam bioassessment, kuartil dari metrik ini telah digunakan untuk menetapkan kriteria penilaian, misalnya, 0-25% = tidak ada gangguan, 25-50% = gangguan kecil, 50-75% = gangguan sedang, dan 75-100% = gangguan berat. Aliran yang mengalami gangguan minimum misalnya dapat berisi hingga 50% *A. Minutissima*.

Persense diatom hidup diusulkan oleh Hill sebagai metrik untuk menunjukkan kesehatan komunitas diatom. Diatom hidup rendah persen dapat disebabkan oleh sedimentasi berat dan/atau komunitas alga relatif lama dengan biomassa alga tinggi pada substrat.

5) Metrik Diagnostik yang Menentukan Kondisi Ekologis

Preferensi ekologis banyak diatom dan ganggang lainnya telah dicatat dalam literatur. Menggunakan kelimpahan relatif spesies alga dalam sampel dan preferensi mereka untuk kondisi habitat tertentu, metrik dapat dihitung untuk menunjukkan stres lingkungan di habitat. Metrik ini dapat lebih spesifik menyimpulkan stresor lingkungan daripada indeks toleransi polusi umum. *Percentage Aberrant Diatom* adalah persen dari diatom dalam sampel yang memiliki anomali dalam pola striae atau bentuk frustule (misalnya, sel panjang yang dibengkokkan atau sel dengan lekukan). Metrik ini telah berkorelasi positif dengan kontaminasi logam berat di sungai.

Percentage Diatom Motile adalah indeks siltasi, dinyatakan sebagai kelimpahan relatif Navicula + Nitzschia + Surirella. Tiga genera mampu merangkak ke permukaan jika tertutup oleh endapan lumpur; kelimpahan mereka dianggap mencerminkan jumlah dan frekuensi pendangkalan. Kelimpahan relatif dari Gyrosigma, Cylindrotheca, dan diatom motil lainnya juga dapat ditambahkan ke metrik ini.

Metrik Diagnostik Sederhana dapat menyimpulkan stressor lingkungan berdasarkan autecology spesies individu di habitat. Sebagai contoh, jika drainase tambang asam merusak kondisi aliran, maka kita akan berharap untuk menemukan lebih banyak taxa taksonik dalam sampel. Hitung metrik diagnostik sederhana sebagai jumlah dari kelimpahan relatif persen (kisaran 0-100%) dari spesies yang memiliki optima lingkungan dalam kondisi lingkungan yang ekstrim. Misalnya: “%acidobiontic + %acidophilic, %alkalibiontic + %alkaliphilic, %halophilic, %mesosaprobic + %oligosaprobic + %saprophilic, dan %eutrofik”.

6) Kondisi Ekologis Tersirat dengan *Simple Autecological Index* (SAI)

Preferensi ekologi untuk diatom umumnya dicatat dalam literatur. Dengan menggunakan kategori ekologi standar yang dikompilasi oleh ahli, preferensi ekologi untuk spesies diatom yang berbeda dapat dicirikan sepanjang gradien lingkungan (stressor). Misalnya, preferensi pH untuk banyak taksa diketahui. Preferensi ini (i) dapat digolongkan dari 1-5 (misalnya, *acidobiontic*, *acidophilic*, *indifferent*, *alkaliphilic*, *alkalibiontic*, Tabel 6-2) dan dapat digunakan dalam persamaan berikut untuk menyimpulkan kondisi lingkungan (EC) dan efek pada kelompok perfiton.

Kondisi Ekologis Tersirat dengan Indeks Rata-Rata Tertimbang didasarkan pada optima ekologis khusus (i) untuk alga, yang dilaporkan lebih sering dan lebih sering dalam publikasi terbaru. Perhatian harus dilakukan, karena kita tidak tahu bagaimana transferable optima ini di antara daerah dan habitat. Dengan menggunakan persamaan berikut, kondisi ekologis (*Ecologyc Condition/EC*) di habitat dapat disimpulkan lebih akurat dengan menggunakan kondisi lingkungan yang optimal (i) dan kelimpahan relatif (i) untuk taksa di habitat daripada jika hanya kategorisasi ekologis yang digunakan (seperti di atas untuk SAI). Kondisi lingkungan yang optimal adalah kondisi di mana kelimpahan relatif tertinggi dari takson diamati. Ini dapat ditentukan dari literatur atau dari survei sebelumnya mengenai taksa dan kondisi lingkungan di wilayah studi.

D. Makroinvertebrata

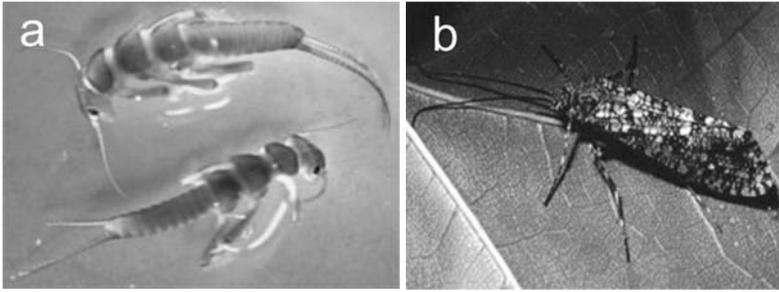
1. Makroinvertebrata secara umum

Makroinvertebrata merupakan “kelompok hewan tidak bertulang belakang yang dapat dilihat dengan mata telanjang”.

Makroinvertebrata air dapat memberikan gambaran mengenai kondisi fisik, kimia, dan biologi suatu perairan, sehingga dapat dipakai sebagai indikator kualitas air sungai. Sifat-sifat makroinvertebrata air, yaitu (1) Sensitif terhadap perubahan kualitas air, sehingga berpengaruh terhadap komposisi dan kelimpahannya; (2) Ditemukan hampir di semua perairan; (3) Terdiri atas banyak jenis serta merespon berbeda pada gangguan yang berbeda pula; (4) Bergerak secara terbatas; (5) Mengakumulasi racun pada tubuhnya; (6) Mudah dikumpulkan dan diidentifikasi paling tidak sampai tingkat family. Pengambilan contoh mudah dilakukan, karena memerlukan peralatan sederhana, murah, dan tidak berpengaruh terhadap makhluk hidup lainnya.

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam penggunaan makroinvertebrata, yaitu (1) Kehadirannya sangat dipengaruhi musim, sehingga pengambilan sampel harus dilakukan setiap musim; (2) Makroinvertebrata hanya merespon pengaruh perubahan kondisi lingkungan tertentu; (3) Kondisi fisik dan kimia perairan seperti kecepatan aliran air, substrat dasar sungai, keberadaan pusaran dan genangan air, lebar sungai, kemiringan, tutupan vegetasi pada tebing sungai, kandungan unsur hara dan konsentrasi oksigen terlarut dapat mempengaruhi keberadaan makroinvertebrata. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan pengambilan sampel pada lokasi terpolusi dan belum terpolusi dengan kondisi fisik yang seragam.

Makroinvertebrata air terdiri dari: "larva Plecoptera (*stonefly*), Larva Trichoptera (kutu air), larva Ephemeroptera (kumbang perahu), Platyhelminthes (cacing pipih), larva Odonata (capung), Crustaceae (udang-udangan), Mollusca (siput dan kerang), larva Hemiptera (kepik), Coleoptera (kumbang air), Hirudinea (lintah), Oligochaeta (cacing), dan larva Diptera (nyamuk, lalat)". Selain itu, teripang (Holothuroidea) secara ekologis sebagai indikator terjadinya pencemaran pada air laut dan juga dapat memberikan gambaran tentang kondisi terumbu karang (Husamah, 2008). Adapun morfologi contoh, seperti pada Gambar 4.4.



(Sumber: Juliantara, 2011)

**Gambar 4.4. (a). Plecoptera (*stonefly*) dan
(b). Larva Trichoptera (*kutu air*)**

Menurut Juliantara (2011), makroinvertebrata cenderung berumur panjang dan kontak tetap pada sedimen sungai, sehingga ia sensitif terhadap kontaminasi dan toksisitas pada sedimen. Makroinvertebrata dapat memenuhi tujuan pemantauan kualitas air yang hakiki, yaitu (1) memberikan petunjuk terjadinya penurunan kualitas air, (2) mengukur efektivitas tindakan penanggulangan pencemaran, (3) menunjukkan kecenderungan untuk memprediksi perubahan-perubahan di masa mendatang.

a. Prosedur Biomonitoring Menggunakan Makroinvertebrata

Menurut ECOTON (2013) Prosedur pemeriksaan makroinvertebrata diuraikan sebagai berikut:

- 1) Parameter: keragaman famili, keragaman EPT, Persentase kelimpahan EPT, serta Indeks Pencemaran.
- 2) Tentukan lokasi, hindari bagian curam, berarus sangat deras, dan berbatu besar karena membahayakan.
- 3) Pengambilan sampel dimulai dari titik 1 (paling hilir) selama 1 menit, kemudian lanjutkan ke titik 2 dan 3 ke arah hulu sungai. Lakukan pengambilan sampel dengan kombinasi teknik *kicking* dan *jabbing*.
- 4) Teknik *kicking* dilakukan di sungai dangkal, caranya: “masuk ke dalam sungai meletakkan jaring di depan dengan mulut jaring menghadap arah hulu atau datangnya aliran air, kemudian mengaduk-aduk substrat di depan jaring selama 1 menit atau 5 meter dengan menggerakkan kaki memutar untuk merangsang hewan yang bersembunyi di dasar sungai agar keluar dan terhanyut masuk ke dalam jarring”.

- 5) Teknik *jabbing* dilakukan di tepi sungai dangkal, caranya: “meletakkan jaring di permukaan dasar sungai, kemudian bergerak maju ke arah hulu atau sumber datangnya air sambil menyapukan jaring hingga menyentuh permukaan dasar sungai sepanjang 5 meter, terutama di bawah tanaman air”.
- 6) Tuangkan sampel dari kantong jaring ke dalam nampan plastik dan siramkan sedikit air untuk membersihkan sisa sampel dalam jaring dan memudahkan pengambilan makroinvertebrata dari substrat dalam sampel. Lakukan sortasi. Usahakan untuk mengambil seluruh hewan indikator dalam sampel, terutama yang berukuran kecil dan kelompok serangga Ephemeroptera, Plecoptera dan Trichoptera (EPT).
- 7) Jumlah hewan minimal yang diambil dari sungai yang dipantau adalah 100 ekor hewan. Jika dalam 3 kali pengambilan sampel jumlah hewan yang didapatkan kurang dari 100 ekor, maka perlu dilakukan pengambilan sampel tambahan dan catat total jumlah pengambilan sampel yang dilakukan.
- 8) Lakukan identifikasi makroinvertebrata, hitung jumlah individu, masukkan ke tabl.
- 9) Penilaian kualitas air sungai dengan bioindikator dilakukan dengan menghitung 4 parameter, yaitu keragaman jenis famili, keragaman jenis EPT, persentase kelimpahan EPT dan Indeks, yang diberikan skor penilaian berdasarkan kriteria penilaian untuk 4 kategori kualitas air (Tabel 4.5).
- 10) Rerata hasil penghitungan mengindikasikan kondisi kualitas air sungai yang diperiksa dengan mengikuti ketentuan dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.5. Pemeriksaan Bioindikator

No.	Nama Famili	Skor	Jumlah Individu	$t_i \times n_i$	Keterangan
EPT					
Sub total EPT					

Non EPT				
Sub total Non-EPT				
JUMLAH		N =	X =	
Persentase Kelimpahan EPT (n EPT/N)				
Indeks (X/N)				

Sumber: Ecoton, 2013)

Tabel 4.6. Penilaian kualitas air sungai dengan bioindikator

Parameter	Skor				Skor Penilaian
	4	3	2	1	
Keragaman jenis famili	>13	10-13	7-9	<7	
Keragaman jenis EPT	>7	3-7	1-2	0	
% Kelimpahan EPT	>40%	>15-40%	>0-15%	0%	
Indeks	3,3-4,0	2,6-3,2	1,8-2,5	1,0-1,7	
Total Skor					
Skor rata-rata (Total Skor/4)					
Kriteria Kualitas Air	Tidak tercemar	Tercemar ringan	Tercemar sedang	Tercemar berat	
Skor Rata-Rata	3,3-4,0	2,6-3,2	1,8-2,5	1,0-1,7	

Sumber: Ecoton, 2013)

2. Makrobentos

Banyak pula penelitian yang hanya memfokuskan pengamatan pada makrozoobentos. Bentos adalah hewan yang sebagian besar siklus hidupnya di substrat dasar perairan (bagian permukaan = epifauna; di dalam sedimen dasar = infauna) (Wibisono & Muntalif, 2013). Kelompok makrozoobentos ini bahkan yang paling banyak dikaji.

Makrozoobentos amat peka terhadap perubahan lingkungan perairan yang ditempatinya sehingga akan berpengaruh terhadap komposisi dan kelimpahannya, karena itu hewan ini sering dijadikan sebagai indikator ekologi di suatu perairan dikarenakan cara hidup, ukuran tubuh, dan perbedaan kisaran toleransi diantara spesies di dalam lingkungan perairan. Makrozoobentos terdapat di seluruh badan sungai mulai dari hulu sampai ke hilir. Dengan keberadaan

makrozoobentos yang hidupnya menetap dengan waktu yang relatif lama, maka makrozoobentos ini dapat digunakan untuk menduga status suatu perairan. Penggunaan makrozoobentos sebagai penduga kualitas air dapat digunakan untuk kepentingan pendugaan pencemaran baik yang berasal dari *point source pollution* maupun *diffuse source pollution* (Juliantara, 2011).

Mempelajari keanekaragaman makrozoobentos adalah salah satu cara paling efektif dan murah untuk memperkirakan kualitas ekologis perairan. Sebagai contoh, pengukuran sifat fisik dan kimia air juga dapat digunakan untuk memperkirakan kualitasnya, tetapi pengukuran tersebut tidak dapat secara tepat menggambarkan keadaan aktual perairan. Oleh karena itu perlu untuk menggabungkan evaluasi fisik, kimia, dan biologis bersama dengan metode pemantauan lainnya untuk memberikan gambaran yang komprehensif tentang kualitas air lingkungan. Pemantauan biologis menggunakan makroinvertebrata telah ditemukan akurat dan menguntungkan dibandingkan dengan menggunakan organisme lain karena makroinvertebrata sangat sensitif terhadap polutan organik, didistribusikan secara luas, dan mudah serta ekonomis untuk sampel.

Menurut Sinaga (2009) berdasar tingkat toleransi pada pencemaran, bentos digolongkan dalam:

- a. Jenis tahan bahan pencemar, misalnya cacing *Tubifex*, *Masculinum sp.* dan *Psidium sp.*
 - b. Jenis lebih bersih, misalnya siput senang arus, Bryozoa, Crustacea, serta serangga perairan.
 - c. Jenis hanya senang bersih, misalnya siput Vivinatidae dan Amnicolidae, serta beberapa jenis serangga (dalam fase larva dan nimfa).
1. Teknik Penangkapan dan Identifikasi

Pengambilan atau penangkapan sampel bentos dapat menggunakan *surber net* berukuran 25x25 cm yang dilengkapi tabung penampung. *Surber net* diletakkan di dasar perairan ± 5 menit berlawanan aliran air. Bebatuan atau material yang menempel di substrat harus diangkat/disisihkan agar bentor tidak bersembunyi. Bebatuan atau material juga perlu disikat pada bak penampung untuk menangkap bentos yang menempel. Bentos yang terkumpul di *surber net* dipindahkan ke bak penampung, lalu dimasukkan ke dalam tabung/plastik berisi alkohol 70% serta ditetesi larutan formalin, klip plastic

dilabel berdasarkan titik stasiun, dan kemudian diidentifikasi. Rerata siklus hidup bentos mulai dari fase telur sampai menetas adalah 30 hari. Oleh sebab itu pengambilan contoh bentos dapat diulangi beberapa kali pada tiap stasiun, per 1-2 minggu sebanyak lima kali (Suwigyo *et al.*, 2005).

Sampel bentos yang telah didapatkan selanjutnya dapat diamati di laboratorium. Sampel dibersihkan terlebih dahulu agar lumpur, sampah, batu, dan sedimen tidak mengganggu identifikasi. Pembersihan dapat dilakukan dengan cara membilas dengan air bersih dan diayak (ukuran mata ayakan 0,5 mm). Setelah melakukan pembersihan, maka selanjutnya dilakukan penyortiran menggunakan mikroskop stereo. Bentos yang ditemukan lalu diidentifikasi dengan merujuk berbagai literatur.

2. Penentuan Status Lingkungan dengan *Family Biotic Index*

Status kondisi lingkungan perairan menggunakan bentos dapat diketahui dengan mencocokkan data yang diperoleh dengan indeks biologi. Salah satu indeks biologi yang sering digunakan adalah "*Family Biotic Index (FBI)*". *FBI* adalah indeks biotik yang dapat memberikan penilaian status perairan dengan cara mengalikan nilai kelimpahan organisme indikator pada setiap pengamatan dengan skor yang telah ditentukan. Skor untuk bentos paling toleran adalah 10 sedangkan skor bentos paling intoleran adalah 1. Rumus *FBI* dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$FBI = \frac{ni \times T}{N}$$

Keterangan:

ni adalah "Jumlah individu spesies ke - •"

T adalah "nilai toleransi dari masing-masing famili/genus"

N adalah "jumlah total individu yang ditemukan dalam sampel"

Nilai *FBI* akan memberikan penilaian kondisi suatu perairan atau menentukan besarnya tingkat gangguan pada ekosistem perairan berdasarkan indeks bentos yang ada di lokasi pengamatan. Derajat pencemaran perairan berdasarkan *FBI*, seperti ditunjukkan Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Derajat pencemaran perairan berdasarkan Family Biotic Index (FBI)

Klasifikasi	Nilai Indeks FBI
Tidak tercemar	0,00-3,75
Tercemar ringan	3,76-4,25
Tercemar sedang	4,26-5,00
Tercemar kritis	5,01-5,75
Tercemar berat	5,76-6,50
Tercemar sangat berat	6,51-7,25
Tercemar ekstrim	7,26-10,00

(Sumber: Hilsenholf, 1988)

3. Penentuan Status Lingkungan dengan *Biological Monitoring Working Party-Average Score Per Taxon*

Indeks biotik merupakan nilai dalam bentuk skoring yang dibuat atas dasar tingkat toleransi organisme atau kelompok organisme terhadap cemaran. Indeks tersebut juga memperhitungkan keragaman organisme dengan mempertimbangkan kelompok-kelompok tertentu dalam kaitannya dengan tingkat pencemaran (Trihadiningrum, 2003). Nilai indeks dari suatu lokasi dapat diketahui dengan menghitung nilai skoring dari semua kelompok hewan yang ada dalam sampel.

Salah satu metode yang digunakan yaitu *Biological Monitoring Working Party-Average Score Per Taxon* (BMWP-ASPT) yang dikembangkan di Inggris (Wardhana, 1999). Sistem tersebut mengelompokkan atau membagi biota bentik menjadi 10 tingkatan berdasarkan kemampuannya dalam merespon cemaran di habitatnya. Pada Tabel 4.8 diperlihatkan satu contoh nilai indeks biotik BMWP-ASPT yang disederhanakan berdasarkan contoh umum dari kelompok biota bentik perairan sungai di daerah tropik.

Tabel 4.8 Nilai skoring indeks biotik metode BMWP-ASPT

Kelompok Organisme	Skor
Crustaceae (udang galah), Ephemeroptera (larva lalat sehari penggali), Plecoptera (larva lalat batu)	10
Gastropoda (limpet air tawar), Odonata (kini-kini)	8
Trichoptera (larva pita-pita berumah)	7
Bivalvia (kijing), Crustaceae (udang air tawar); Ephemeroptera (larva lalat sehari perenang), Odonata (larva sibar-sibar)	6
Diptera (larva lalat hitam), Coleoptera (kalajengking air, kumbang air), Trichoptera (larva pita-pita tak berumah), Hemiptera (kepik perenang punggung, ulir-ulir.)	5

Kelompok Organisme	Skor
Platyhelminthes (cacing pipih), Arachnida (tugau air)	4
Hirudinea (lintah), Gastropoda (siput), Bivalvia (kerang), Gamaridae (kutu babi air), Syrphidae (belatung ekor tikus)	3
Chironomidae (larva nyamuk)	2
Oligochaeta (cacing)	1

(Sumber: Juliantara, 2011; Wardhana, 1999)

Berdasarkan Tabel 4.8 nilai indeks biotik dapat diperoleh dengan cara merata-ratakan seluruh jumlah nilai skoring dari masing-masing kelompok biota yang diperoleh di perairan air tawar. Nilai indeks akan berkisar antara 0-10 dan sangat bervariasi bergantung pada musim. Semakin tinggi nilai yang diperoleh akan semakin rendah tingkat cemaran yang ada. Nilai indeks hanya dapat digunakan untuk perairan sungai dan tidak dapat dibandingkan dengan tipe perairan lain. Trihadiningrum (1995) berhasil menyusun klasifikasi makroinvertebrata berdasarkan beban cemaran, dimana kualitas air sungai dapat dibagi menjadi 6 kelas tingkat cemaran (Tabel 4.9).

Tabel 4.9. Makroinvertebrata indikator untuk menilai kualitas air

Tingkat Cemaran	Makrozoobentos Indikator
1) Tidak tercemar	Trichoptera (Sericosmatidae, Lepidosmatidae, Glossosomatidae); Planaria
2) Tercemar ringan	Plecoptera (Perlidae, Peleodidae); Ephemeroptera (Leptophlebiidae, Pseudocloeon, Ecdyonuridae, Caebidae); Trichoptera (Hydropschydae, Psychomyidae); Odonanta (Gomphidae, Plarycnematidae, Agriidae, Aeshnidae); Coleoptera (Elminthidae)
3) Tercemar sedang	Mollusca (Pulmonata, Bivalvia); Crustacea (Gammaridae); Odonanta (Libellulidae, Cordulidae)
4) Tercemar	Hirudinea (Glossiphonidae, Hirudidae); Hemiptera
5) Tercemar agak berat	Oligochaeta (ubificidae); Diptera (Chironomus thummi-plumosus); Syrphidae
6) Sangat tercemar	Tidak terdapat makrozoobentos. Besar kemungkinan dijumpai lapisan bakteri yang sangat toleran terhadap limbah organik (<i>Sphaerotilus</i>) di permukaan

Sumber: Wardhana, 1999

E. Makrofita/Tumbuhan Air

1. Tinjauan secara umum

Makrofita air membentuk komunitas penting dalam ekosistem perairan karena, dalam banyak kasus, mereka adalah produsen utama, mereka menghasilkan biomassa yang tinggi, dan mereka berkontribusi terhadap keanekaragaman hayati. Makrofita air terlibat dalam berbagai mekanisme umpan balik yang cenderung mempertahankan keadaan air yang jernih. Komunitas ini memiliki amplitudo ekologis yang besar dan oleh karena itu dapat menempati lingkungan dengan karakteristik ekologi yang berbeda dan menahan perubahan lingkungan mendadak (Pereira *et al.*, 2012).

Telah menjadi fakta yang diketahui bahwa struktur vegetasi akuatik dapat berubah sebagai hasil dari kedua pengayaan nutrisi dan keberadaan polutan. Selain itu, makrofita telah dilaporkan mampu meningkatkan kualitas air dan untuk mempengaruhi pertumbuhan alga. Demikian juga, keragaman spesies makrofita dapat memiliki efek pada fungsi ekosistem lahan basah. Hal yang paling penting, pemeliharaan keanekaragaman makrofita dianggap dapat meningkatkan kualitas ekosistem lahan basah yang berdampak positif kepada manusia (Onaindia *et al.*, 2005; Thiébaud & Muller 2003)

Makrofita air dapat memperoleh nutrisi dari sedimen serta langsung dari air itu sendiri. Akibatnya, ketersediaan nutrisi sedimen dapat membatasi pertumbuhan dan distribusi makrofita (Spencer & Ksander, 2003). Beberapa penelitian gagal menghubungkan distribusi spesies makrofita dengan kondisi sedimen di sungai-sungai dataran rendah di Inggris dan misalnya untuk memisahkan efek dari pengayaan nutrisi pada distribusi makrofita dari pengaruh faktor lingkungan lain (seperti konduktivitas), dan efek pH dari pengayaan fosfat dan amonium. Di sisi lain, penelitian menunjukkan bahwa kondisi lingkungan lokal mungkin menjadi faktor yang kurang penting dibanding proses kolonisasi spesies dalam distribusi spesies makrofita (Demars & Harper, 2005).

Meskipun dengan keterbatasan tersebut, makrofita adalah indikator yang berguna dari kondisi lingkungan sungai. Banyak peneliti telah melaporkan peran makrofita sebagai bioindikator yang berharga dari kualitas air (Demirezen & Askoy, 2004). Dalam hal ini, peningkatan nutrisi tertentu dan keberadaan polutan diketahui memiliki efek terhadap distribusi makrofita akuatik (Samecka-

Cymerman & Kempers, 2002). Secara khusus, makrofit dapat digunakan sebagai akumulator logam (Comin *et al.*, 1997). Spesies makrofit tertentu dan kelompok spesies telah digambarkan sebagai bioindikator karakteristik morfometrik dan fitur fisik aliran (Onaindia *et al.*, 2005).

Makrofit air tampaknya merespon dengan cara yang dapat diprediksi terhadap karakteristik trofik dan fisik perairan. Bahkan, korelasi tanaman air terhadap parameter lingkungan menunjukkan preferensi lingkungan dan rentang setiap komunitas tumbuhan atau tanaman. Hal yang paling penting, pengembangan metode untuk menilai integritas ekologi perairan berjalan memerlukan integrasi parameter fisik dan kimia, serta pengaruhnya terhadap struktur biologis (Harper *et al.*, 2000; Onaindia *et al.*, 2005).

Secara aplikatif, penelitian Ceschin *et al* (2010) menunjukkan bahwa komunitas makrofit telah dikaji untuk mengevaluasi peran mereka sebagai bioindikator kualitas air sungai-sungai di Italia. Kurva kompatibilitas *phytocoenoses* untuk kemiringan fisika-kimia menunjukkan korelasi antara pola distribusi dari tipe vegetasi dan fitur chemico-fisik air, seperti tingkat polusi air yang berbeda. Secara khusus, *Fontinaletum antipyreticae*, *Ranunculo-Sietum*, *Elodeo-Potametum crispum* dan *Nasturtietum officinalis* berkembang di air meso-eutrofik dan cukup bersih, komunitas *Potamogeton nodosus* dan *Ceratophylletum demersi* dalam air eutrofik dengan kualitas sedang, sementara *Myriophylletum spicati* dan terutama *Potametum pectinati* dan komunitas alga *Entheromorpha flexuosa* ditemukan dalam air hipertrofik berkualitas buruk. *Phytocoenoses* ini dapat digunakan sebagai bioindikator yang valid dari kualitas air. Sebaliknya, *Callitrichetum stagnalis*, *Myriophylletum verticillati*, *Najadetum marinae* dan komunitas alga dengan *Cladophora glomerata* bukanlah bioindikator yang efektif, menunjukkan sinekologi yang luas dan kadang tidak jelas.

2. Contoh Metode Penelitian/Pengamatan Berdasar Pereira *et al* (2012).

Metode ini merujuk pada penelitian Pereira *et al* (2012) pada perairan danau, sebagai berikut.

- a. Pengambilan sampel dilakukan setiap bulan dan terdiri dari survei spesies yang ada di setiap lokasi dan karakteristik limatis lingkungan.

- b. Survei spesies dilakukan dengan berjalan melalui lingkungan sampai tidak ada peningkatan lebih lanjut dalam jumlah spesies. Upaya pengambilan sampel proporsional dengan ukuran lingkungan sampel untuk mendapatkan gambaran yang lebih baik dari jumlah total spesies di setiap lingkungan. Identifikasi mengikuti literatur taksonomi. Spesies disusun oleh keluarga menurut beberapa literatur. Kelompok ekologis diklasifikasikan menurut literatur.
- c. Karakteristik limnologi yang dianalisis secara in situ adalah suhu air ($^{\circ}\text{C}$), oksigen terlarut (mg.L^{-1}), pH, dan konduktivitas ($\mu\text{S.cm}^{-1}$).
- d. Sampel air bawah permukaan dibawa ke laboratorium untuk menentukan alkalinitas total (mEq.L^{-1}), total nitrogen (mg.L^{-1}), fosfor total ($\mu\text{g.L}^{-1}$), padatan tersuspensi (mg.L^{-1}), dan klorofil-a (mg.L^{-1}).
- e. Pengambilan sampel variabel dilakukan pada saat yang sama (antara 10 jam dan 12 jam) dan dalam tiga ulangan. Klasifikasi kondisi trofik danau mengikuti studi sebelumnya, dan lokasi diklasifikasikan menjadi mesotrofik, oligotrofik, distrofik, dan eutrofik.
- f. Kekayaan makrofit ditentukan untuk jumlah total dan jumlah rata-rata tahunan spesies yang tercatat di masing-masing lingkungan dan frekuensi untuk proporsi danau di mana spesies terjadi dan jumlah de kejadian selama tahun di setiap danau. Perbedaan dalam kekayaan spesies rata-rata dan variabel abiotik sepanjang tahun (untuk musim) dan di antara danau yang diteliti diuji menggunakan pengukuran berulang ANOVA, dengan uji posteriori Tukey.
- g. Pengaruh variabel lingkungan pada komposisi spesies dianalisis dengan *Canonical Correspondence Analysis* (CCA). Untuk variabel lingkungan dilakukan "a priori" test (ANOVA berulang) yang menunjukkan perbedaan yang signifikan antara danau, tetapi tidak perbedaan antara musim tahun di setiap danau ($p > 0,05$). Kemudian, CCA didasarkan pada frekuensi spesies yang dicatat selama periode penelitian di setiap lingkungan dan data tahunan rata-rata untuk variabel abiotik (semua variabel log-berubah). Nilai frekuensi berkisar dari nol (tidak ada di lingkungan) hingga 12 (hadir selama 12 bulan pengumpulan).

3. Contoh Metode Penelitian Berdasar *Water Framework Directive* (WFD)

Di negara-negara Uni Eropa, *Water Framework Directive* (WFD) adalah dokumen kunci yang menetapkan aturan untuk konservasi permukaan daratan, transisional, pesisir, dan perairan bawah tanah. Persyaratan dalam dokumen harus dipenuhi oleh masing-masing jenis perairan. Perairan kualitas moderat dipicu oleh gangguan radiasi pada nilai-nilai dari ruang-ruang biologis, sedangkan air dari sumur atau kualitas biologis memiliki nilai di bawah tingkat (Hutorowicz & Napiórkowska-Krzebietke 2014). Dalam WFD, makrofita diakui sebagai penting untuk menentukan status ekologis dari badan air. Spesifikasi nilai-nilai isolator dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada jenis satelit dan karena itu tidak cocok untuk mendeteksi perbedaan dalam toleransi ekologi spesies di seluruh Eropa. Banyak metode macrophyte digunakan untuk menilai status trofik badan air di Eropa: *Macrophyte Index* (MI, danau) dan *the Trophic Index of Macrophytes* (TIM, sungai) di Jerman, *Mean Trophic Rank* (MTR, sungai) di Inggris, *Indice Biologique Macrophytique en Rivière* (IBMR, sungai) di Perancis, *Ecological State Macrophyte Index* (ESMI, danau) dan *Macrophyte River Index* (MRI, sungai) di Polandia (Szczerbińska & Galczyńska, 2015; Szoszkiewicz et al., 2009).

MI berlaku di danau berkapur di Alpen dan wilayah prealpine. Sebanyak 45 spesies makrofita yang tenggelam termasuk dalam katalog sembilan kelompok indikator. Rata-rata MI sebuah danau berkorelasi dengan konsentrasi fosfor totalnya selama waktu sirkulasi. ESMI dikembangkan pada tahun 2006 untuk dua jenis danau (danau terkarakterisasi dan tanpa *stratified*). ESMI mengevaluasi dua aspek komunitas makrofita, yaitu komposisi taksonomi dan kelimpahan, yang digabungkan menjadi satu indeks multimetrik. ESMI dihitung dengan memeriksa tanaman sepanjang transek danau yang ditentukan dengan lebar 20-30 m. Jumlah transek bergantung pada garis pantai dan luas danau. Nilai ESMI berkisar dari 0 hingga 1, di mana 1 menunjukkan kondisi murni dan 0 habitat yang sangat terdegradasi (Ciecierska & Kolada, 2014; Szczerbińska & Galczyńska, 2015).

MTR adalah metode yang berfokus pada dampak yang ditimbulkan oleh pengayaan fosfat. Setiap spesies yang terkandung dalam spesies dialokasikan skor *Species Trophic Rank* (STR) menurut responsnya terhadap eutrofikasi. STR menunjukkan bahwa tanaman ini toleran terhadap eutrofikasi atau alternatifnya tidak memiliki preferensi dan

disebut “kosmopolitan”. MTR dari situs sampling dinyatakan dengan mengintegrasikan STR dari spesies yang ada di suatu situs sebagai nilai rata-rata, tertimbang menurut persentase tutupan relatif dari masing-masing spesies (Szczerbińska & Galczyńska, 2015).

Dalam TIM nilai indikator makrofita diberikan untuk total 49 spesies makrofita yang terendam pada skala dari 1 hingga 4 (1 mengindikasikan kondisi oligotropik dan 4 polytropic). IBMR berlaku untuk perairan alami dan buatan. Setiap 207 taksa dialokasikan *spoteif cote* menurut responnya terhadap eutrofikasi. Nilai spesies IBMR berkisar dari 0 hingga 20 dengan 0 menunjukkan hipertrofik dan 20 menunjukkan kondisi oligotropik. *Macrophyte River Assessment Method* (MMOR) telah digunakan di Polandia sejak 2007. Metode ini menggunakan karakteristik kuantitatif dan kualitatif dari macrophytes di bagian sungai yang sedang dianalisa. Metode ini memungkinkan penentuan tingkat degradasi sungai dan menentukan trofi menggunakan Macrophyte Index untuk Rivers (MIR) (Szozkiewicz *et al.*, 2009).

4. Huisman–Olf–Fresco models (Model HOF)

a. Konsep Model HOF

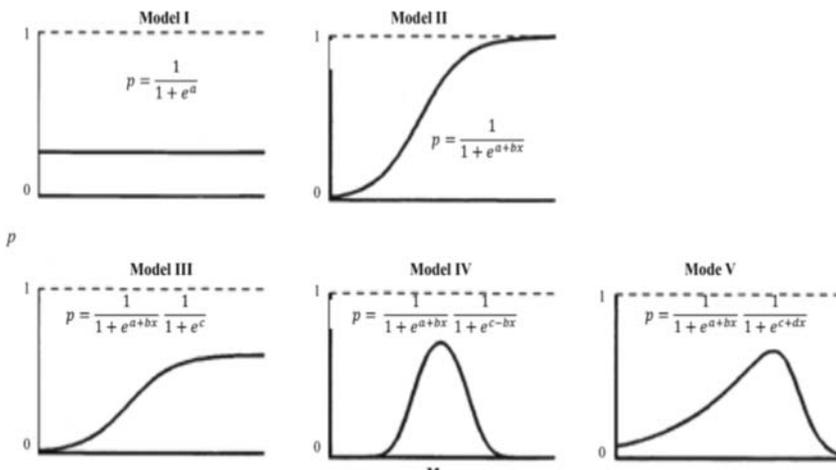
Huisman–Olf–Fresco models (Model HOF) adalah satu set hirarkis dari 5 model dengan peningkatan kompleksitas, yang ditujukan untuk menyesuaikan kurva respon spesies satubentuk pada gradien lingkungan (Huisman *et al.*, 1993; Jansen & Oksanen, 2013). Model HOF adalah rangkaian dari lima model respons spesies bertingkat sepanjang gradien ekologis (Gambar. 4.5). Model HOF juga disebut dengan pemodelan regresi logistik hierarkis (*hierarchical logistic regression modelling*), merupakan model terbaik dipilih dari sekumpulan model yang telah ditentukan menggunakan kriteria informasi statistik, yaitu keseimbangan antara model yang sesuai dengan data dan kesederhanaan model (Jansen *et al.*, 2013). Model HOF memberikan kompromi yang masuk akal antara kebenaran statistik, fleksibilitas, dan interpretasi ekologi untuk memodelkan respons spesies (Michaelis & Diekmann, 2017).

Preferensi lingkungan dan potensi makrofita bioindikator dapat dinilai menggunakan model Model HOF (Jenaekoviæ *et al.*, 2016). Secara umum, ketika mencari model yang paling sesuai yang menggambarkan hubungan antar variabel, dua jenis kriteria harus dipertimbangkan - kriteria ‘kebaikan’ dari sudut pandang statistik

dan kriteria jika interpretasi dari sudut pandang ekologis. Ketika kriteria ini saling bertentangan, kita harus menghadapi keputusan: mana yang lebih disukai?

Pemodelan kurva respon spesies (menggambarkan bentuk respon spesies sepanjang gradien ekologi tertentu) merupakan masalah statistik yang cukup khusus. Kurva ini biasanya diperiksa untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini: dimana spesies optimum sepanjang gradien? Spesies apakah yang toleransi di sepanjang gradien ini? Dan, apakah bentuk respons setiap spesies, apakah monoton, simetris, atau asimetris?

Tidak semua strategi pemodelan cocok untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, misalnya model yang paling umum digunakan bisa saja memberikan kurva respons yang seringkali tidak sesuai dan tidak realistis (Oksanen & Minchin, 2002). Pilihan yang menjanjikan tampaknya adalah model HOF, yang dirancang secara khusus dengan memperhatikan respon spesies yang ekspresif sepanjang gradien secara ekologis yang berarti dan dapat ditafsirkan (Huisman *et al.*, 2003).



(Sumber: Goguen, & Arp, 2017; Huisman *et al.*, 2003)

Gambar 4.5. Satu set hirarkis model-model respon ketidakhadiran/ kehadiran spesies secara teoritis, yang diberi peringkat berdasarkan peningkatan kompleksitas

Model HOF adalah sarana untuk menggambarkan tanggapan spesies, yang mungkin dihasilkan dari kedua kondisi lingkungan dan interaksi intra dan inter-spesifik (Lawesson & Oksanen, 2002). Ini

adalah satu set hirarkis dari lima model respon, yang diranking oleh peningkatan kompleksitasnya (Model I, tidak ada tren spesies [*no response*]; Model II, peningkatan atau penurunan tren [*sigmoidal*]; Model III, peningkatan atau penurunan tren di bawah respon maksimum yang dapat dicapai [*sigmoidal with plateau*]; Model IV, kurva respons simetris [*unimodal symmetric*]; Model V, kurva respons miring [*unimodal skewed*]).

b. Metode

Contoh metode ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Michaelis dan Diekmann (2017), sebagai berikut:

1) Pengumpulan data

Data vegetasi dan pH tanah dikumpulkan dari beberapa survei vegetasi yang telah dilakukan atau dipublikasikan dari daerah yang akan dikaji. Data set terdiri dari sejumlah plot dari semua jenis komunitas yang ditemukan di daerah tersebut.

2) Pendekatan pemodelan

Model HOF dipasang dalam program statistik R (v. 3.3.1) menggunakan paket "eHOF" (versi 3.2.2). Untuk meningkatkan hasil pemodelan bahkan untuk set data kecil, stabilitas pemilihan model digandakan oleh (1) bootstrapping (100 sampling, *default package setting*) untuk memastikan kekokohan model, dan (2) kriteria informasi Akaike dikoreksi untuk set data kecil (*AICc, default setting*). Jika kedua prosedur berbeda dalam pilihannya untuk tipe model terbaik, model *bootstrap* lebih disukai. Jumlah minimal 10 kehadiran dan ketidakhadiran dalam set data ditetapkan sebagai pra-kondisi untuk pemodelan dalam paket.

3) Parameter kurva/relung (Nische)

Parameter model berikut, yang secara numerik menggambarkan fitur-fitur berbeda dari suatu niche spesies, dihitung dari model HOF:

(a) Respons spesies umum sepanjang gradien (bentuk kurva)

Bentuk kurva diberikan oleh tujuh tipe model berbeda dari pendekatan HOF. Sebagai perkiraan stabilitas bentuk model, kita menghitung *Index of Qualitative Variation* (IQV). Indeks ini adalah 0 (nol) ketika semua pengulangan yang berulang tiba pada bentuk model yang sama, dan bernilai 1 (satu) ketika semua jenis model dipilih sama sering. Dengan n sebagai jumlah kategori (jenis model) dan p sebagai proporsi untuk setiap kategori, indeks dihitung dengan rumus:

$$IQV = \frac{1 - \sum_{i=1}^n p_i^2}{\frac{1}{n} * (n - 1)}$$

(b) Spesies optimum

Spesies optimum menggambarkan probabilitas tertinggi kemunculan spesies di sepanjang gradien pH. Ini dapat dengan mudah diekstraksi dari model tipe II, IV dan V. Dalam kasus model tipe III, optimum didefinisikan sebagai titik tengah. Tidak ada satu pun yang dapat dihitung untuk jenis kurva bimodal. Dua optima yang berbeda dibedakan: optimum_{any} dan optimum₅₁. Dalam kasus optimum_{any}, suatu optimum ditugaskan untuk suatu spesies setiap kali optimum ditemukan dalam 100 repetisi, bahkan jika ini hanya terjadi sekali. Untuk optimum₅₁, nilai diberikan hanya jika minimal 51 pengulangan menghasilkan optimal.

(c) Batas toleransi tetap

Batas tetap adalah titik-titik kurva di mana probabilitas kejadian mencapai 0,05. Mereka mengukur batas-batas statistik terjadinya spesies, terlepas dari kebugaran spesies atau umum/kelangkaan dalam kumpulan data atau area survei. Batas toleransi tetap berada di bawah ini yang disebut batas 0,05 atau LowLim dan UppLim untuk sisi kiri dan sisi kanan kurva respons, masing-masing. Dalam model bimodal, batas 0,05 terluar dihitung. Kami mengasumsikan suatu spesies memiliki LowLim₅₁ atau UppLim₅₁ jika setidaknya 51% pengulangan model memungkinkan penghitungan nilai. LowLim_{any} dan UppLim_{any} ditugaskan jika setidaknya satu run memberikan batas yang sesuai.

(d) Batas toleransi relatif dan lebar relung (niche)

Sebuah prosedur untuk menghitung batas toleransi relatif untuk setiap spesies sudah diimplementasikan dalam paket "eHOF": central border (CB). Ini didefinisikan sebagai nilai respons yang sama dengan fraksi tertentu dari kurva maksimum: maks* e^{-0.5}. Mirip dengan batas tetap, batas tengah dihitung secara terpisah untuk sisi kiri (LowCB) dan kanan (UppCB) dari sisi optimum. Sekali lagi, batas terluar digunakan dalam respons bimodal. Lebar relung didefinisikan sebagai jarak antara batas tengah bawah dan atas.

4) Analisis statistik

Analisis statistik dilakukan dalam R. Untuk mengevaluasi efek dari berbagai jumlah kehadiran (Pra) dan frekuensi (Fre) pada parameter niche (IQV, optima, limits, width), model campuran linier

((G) LMM) menggunakan ("lme4" paket). Variabel penjelas (Pra, Fre) diskalakan dan dipusatkan (untuk interpretasi yang lebih mudah dari hasil dan pemasangan model kecuali untuk analisis IQV). Spesies ditetapkan sebagai intersepsi acak untuk memungkinkan variasi antara-spesies dalam preferensi pH. Pra dan Fre juga dimasukkan sebagai acak lereng, dihitung untuk respon yang berbeda dari spesies tunggal terhadap perubahan Pra dan Pre. Membangun model seperti itu memungkinkan perlakuan setiap spesies sebagai replikasi independen dalam masing-masing dari sejumlah skenario (dan untuk setiap parameter niche), menghasilkan sejumlah ulangan. Untuk parameter niche (misalnya posisi optimum sepanjang gradien), distribusi normal diasumsikan. Perubahan dalam jumlah parameter niche (misalnya optima) yang berasal dari operasi berulang dianalisis sebagai data penghitungan. Secara umum, ini adalah proporsi, karena jumlah maksimum pengulangan yang berulang diketahui (100). Dalam kasus ini, model binomial gagal untuk menyatu dan over dispersion adalah masalah. Analisis sebagai data penghitungan dengan model terdistribusi Poisson adalah titik temu (kompromi) dan perkiraan terbaik, karena hasilnya mengikuti tren keseluruhan. Pemilihan model dan evaluasi mengikuti Zuur *et al.* (2009) dan Bolker *et al.* (2009). Nilai-nilai untuk (G) LMM dihitung menggunakan fungsi *Anova* dari paket "car". Untuk melihat sejauh mana parameter niche untuk spesies terkait antara skenario yang berbeda dan apakah ada perubahan terarah atau tak terduga, digunakan *Spearman correlation matrice* (paket "psych").

F. Ikan

1. Tinjauan Secara Umum

Ikan adalah salah satu spesies hewan yang sering digunakan sebagai bioindikator lingkungan untuk memantau tingkat pencemaran atau kualitas air lingkungan karena kepekaannya terhadap pencemaran. Disarankan bahwa pemantauan pencemaran air harus seteliti mungkin, yang berarti bahwa tingkat xenobiotik harus diketahui tidak hanya dalam air tetapi juga pada sedimen dan jaringan hewan yang dianggap sebagai bioindikator. Ikan sering digunakan untuk mengetahui dampak berbagai jenis polutan organik (Sucman *et al.*, 2010).

Pengetahuan yang komprehensif tentang taksonomi, persyaratan habitat, dan fisiologi ikan merupakan prasyarat utama menggunakan

ikan sebagai indikator. Harus diingat bahwa tidak ada organisme akuatik lain yang cocok untuk penerapan berbagai metode yang memungkinkan evaluasi tingkat keparahan dampak beracun dengan menentukan akumulasi racun dalam jaringan, dengan menggunakan pendekatan histologis dan hematologis atau dengan mendeteksi anomali morfologi. Karena persyaratan habitatnya yang kompleks, ikan merupakan indikator penting dari integritas ekologi sistem perairan pada skala yang berbeda, dari habitat mikro hingga tangkapan. Kesesuaian spesies ikan baik pada tingkat individu (misalnya kinerja pertumbuhan) dan pada tingkat populasi (misalnya struktur populasi) ditentukan oleh konektivitas berbagai elemen habitat dalam konteks spasial-temporal yang luas. Jadi menggunakan ikan sebagai bioindikator merupakan alat pemantauan yang baik terutama yang berkaitan dengan aspek polusi dan implementasi teknik dalam pengelolaan sungai, misalnya restorasi dan pengelolaan sungai (Chovanec *et al.*, 2003).

Menurut Vile (2011) keuntungan menggunakan ikan sebagai indikator kesehatan lingkungan, yaitu (1) Ikan adalah indikator yang baik untuk efek jangka panjang (beberapa tahun) dan kondisi habitat yang luas karena mereka relatif berumur panjang dan bergerak. (2). Ikan pada umumnya mencakup berbagai spesies yang mewakili berbagai tingkat tropik (omnivora, herbivora, insektivora, planktivora, dan piscivora). Mereka cenderung mengintegrasikan efek dari tingkat trofik yang lebih rendah; dengan demikian struktur kumpulan ikan mencerminkan kesehatan lingkungan yang terintegrasi. (3). Ikan berada di bagian atas rantai makanan akuatik dan dikonsumsi oleh manusia, menjadikannya subjek penting dalam menilai kontaminasi. (4). Ikan relatif mudah dikumpulkan dan diidentifikasi pada tingkat spesies. Sebagian spesimen dapat disortir dan diidentifikasi di lapangan dan dilepaskan tanpa cedera. Persyaratan lingkungan dari ikan secara umum relatif sudah diketahui. Informasi tentang distribusi ikan biasanya tersedia. (5). Penggunaan kehidupan akuatik (standar kualitas air) biasanya dicirikan dengan istilah perikanan (misalnya air dingin, air hangat, olahraga, hijau). Pemantauan kumpulan ikan memberikan evaluasi langsung dari "fishability", yang menekankan pentingnya ikan bagi pemancing dan nelayan komersial. (6) Ikan terhitung hampir separuh spesies vertebrata yang terancam punah dan subspecies di Amerika Serikat.

Ikan adalah indikator yang baik untuk kontaminasi perairan untuk polychlorinated biphenyls (PCB) terutama ikan gabus khususnya dalam jaringan ikan. Ikan *Tilapia nilotica* dapat digunakan untuk menunjukkan zat besi, mangan, nikel, timbal, kadmium, dan seng dalam jaringan yang berbeda dengan efek mematikan dan bioakumulasi. Tingkat merkuri pada lumba-lumba yang tertangkap telah ditemukan lebih banyak dibandingkan dengan organisme air lainnya. Ikan dapat menjadi indikator pencemaran yang sesuai untuk polusi nitrogen limbah. Ikan seperti ikan trout, sunfish biru, ikan zebra dan ikan *mini fathead* juga dapat digunakan sebagai bioindikator (Jain *et al.*, 2010).

2. Beberapa Contoh metode

Indeks hepatosomatik (*Hepatosomatic Index/HSI*) adalah dikenal luas sebagai bioindikator paparan kontaminan. Karena hati sangat penting dalam detoksifikasi, paparan kontaminan dapat menyebabkan peningkatan ukuran hati dari hipertrofi (peningkatan ukuran), hiperplasia (peningkatan jumlah) hepatosit, atau keduanya. Studi mengevaluasi ukuran hati relatif ikan dari situs yang terkontaminasi dan situs yang terganggu terakhir sering memanfaatkan HSI, yang mengekspresikan ukuran hati sebagai persentase dari berat total tubuh (Araújo *et al.*, 2017).

Indeks gonadosomatik (*Gonadosomatic Index/GSI*) adalah bioindikator yang memasok informasi struktural, lebih dari fungsional untuk menghormati kesehatan dan status pematangan gonad. Ada bukti bahwa sebagian besar spesies mengalami siklus reproduksi dan, sering, variasi dalam ukuran gonad diamati di seluruh siklus. Konsekuensinya, menghitung berat gonad sebagai persentase berat badan telah digunakan untuk menentukan kematangan reproduksi, serta respons terhadap dinamika lingkungan (misalnya, perubahan musiman) atau stres eksogen (misalnya, eksposur terhadap kontaminan). Ada bukti signifikan bahwa eksposisi terhadap beberapa pencemar lingkungan dapat menghasilkan perubahan gonad seperti pengurangan GSI, perubahan morfologi, atau keduanya (Araújo *et al.*, 2017).

Faktor kondisi (*Condition Factor/CF*) adalah indikator kuantitatif dari kesejahteraan individu, yang mencerminkan kondisi ketersediaan makanan baru-baru ini. Ada juga beberapa argumen bahwa CF dapat meningkat di area materi organik yang tercemar dan kaya karena

peningkatan sumber pakan yang digunakan oleh spesies toleran yang mengambil keuntungan dari sumber daya ini. Ini adalah proporsi berat yang terkait dengan panjang, menjadi ukuran tidak langsung dari cadangan energi ikan. Karena bioindikator ini masuk akal untuk stres di lingkungan alam, faktor kondisi juga dapat digunakan sebagai bioindikator integratif (Barrilli *et al.*, 2015).

Penggunaan tiga bioindikator tersebut, yaitu hepato-somatic index (HSI), gonadosomatic index (GSI), dan condition factor (CF), mengikuti persamaan berikut. $HSI = (\text{berat organ hati} \times \text{berat total}^{-1}) \times 100$; $GSI = (\text{berat gonad} \times \text{berat total}^{-1}) \times 100$; $CF = (\text{berat total} \times \text{panjang total}^{-3}) \times 100$ (Araújo *et al.*, 2017).

Keanekaragaman jenis ikan, kelimpahan, dan keanekaragaman ikan dapat juga dinilai dan analisis hubungan kanonik (*canonical correspondence analysis/CCA*) dapat digunakan mengevaluasi hubungan antara komunitas ikan dan variabel lingkungan (Naigaga *et al.*, 2011). Peneliti dapat mengkaji hal tersebut dengan membaca literatur-literatur terkait. Telah banyak publikasi khususnya jurnal ilmiah yang dipublikasi para peneliti di dunia.

3. Contoh Penerapan “Fish” Index of Biotic Integrity (IBI)

Terkait dengan penggunaan ikan sebagai bioindikator, dikenal istilah *Index of Biotic Integrity* (IBI). Ikan sangat penting dalam pengembangan IBI, mengingat ketersediaan informasi yang relatif lengkap tentang mereka: riwayat hidup dan ekologi; posisi dalam jaringan tropik; relatif mudah identifikasi; dan kepekaan terhadap berbagai penyebab stres antropogenik. Banyak IBI berbasis ikan yang telah dikembangkan oleh para ahli untuk mengevaluasi kualitas lingkungan perairan dan sungai di AS dan negara-negara beriklim sedang lainnya. IBI ini telah terbukti membantu dalam membangun strategi restorasi sungai dan konservasi (Mercado-Silva *et al.*, 2002).

Adapun penerapannya dalam penelitian bila merujuk pada Lammert dan Allan (1999) yaitu populasi ikan diambil sampelnya di setiap lokasi lebih dari 100 m dengan menggunakan unit kejutan listrik ABP-3 backpackmounted. Setiap lintasan 100 m ditempuh dengan rata-rata 225 V, 10 siklus tugas dan 60 pulse per detik, oleh operator yang sama. Jaring ditempatkan di ujung-ujung jangkauan, dan juga pada titik 50-m setiap kali kepadatan ikan yang tinggi diperkirakan. Usaha penangkapan bervariasi di setiap lokasi tergantung pada kerumitan habitat yang ada dan kepadatan ikan, tetapi tetap distandarkan namun

mempertimbangkan sisi kepraktisan. Ikan diidentifikasi dan dihitung di tempat, dan mengukur panjang ikan. Ikan individu yang tidak dapat diidentifikasi di situs diawetkan dalam formalin 10% dan kemudian diidentifikasi di laboratorium.

IBI digunakan untuk mengevaluasi kondisi lingkungan berdasarkan penilaian populasi dan komunitas ikan. Setelah sampel ikan yang terkoleksi telah diidentifikasi, dihitung, diperiksa untuk penyakit dan anomali, dan dicatat, beberapa biometrik diterapkan untuk mengevaluasi integritas biotik. Di Amerika, dalam hal ini misalnya *New Jersey Department of Environmental Protection* (Vile, 2011) memodifikasi IBI menggunakan sepuluh biometrik berikut: 1) jumlah total spesies ikan, 2) jumlah dan identitas spesies pemakan benthik, 3) jumlah dan identitas ikan trout (*nonstocked*) dan/atau spesies mola-mola (*sun fish*), 4) jumlah dan identitas spesies tidak toleran, 5) proporsi individu sebagai pengisap putih (*white suckers*), 6) proporsi individu sebagai generalis, 7) proporsi individu sebagai Cyprinids pemakan serangga, 8) proporsi individu jenis *trout non-stocked* atau proporsi individu Piscivores (tidak termasuk belut Amerika), 9) jumlah individu dalam sampel dan, 10) proporsi individu dengan penyakit atau anomali.

Data komposisi komunitas untuk ikan dirangkum menggunakan IBI (Karr *et al.*, 1986). Skor indeks biotik ditentukan sesuai dengan prosedur yang dijelaskan oleh Hilsenhoff (1987) dan Lenat (1993). Toleransi nilai ditugaskan untuk taksa berdasarkan nilai-nilai yang diberikan dalam Lenat (1993) atau Hilsenhoff (1987, 1988) di mana Lenat (1993) tidak memberikan nilai. Jumlah individu dalam setiap kelompok taksonomis dikalikan dengan nilai toleransinya, dan skor toleransi rata-rata tertimbang untuk sampel tersebut dihitung (Hilsenhoff, 1987). Skor yang lebih tinggi menunjukkan tempat/daerah yang lebih terdegradasi dalam hal pencemaran organik tetapi tidak selalu merupakan indikator degradasi habitat (Lammert & Allan, 1999).

a. Pengambilan Sampel Lapangan (*Field Sampling*)

Tujuan utama dari koleksi ikan adalah untuk mendapatkan sampel dengan spesies dan kelimpahan perwakilan, pada tingkat upaya yang wajar. Upaya pengambilan sampel distandarisasi dengan menggunakan panjang aliran yang sama, metode pengumpulan, dan tipe habitat. Segmen arus yang dipilih untuk pengambilan sampel mewakili habitat jangkauan. Selain itu, lokasi sampel akan mewakili

habitat jangkauan yang diambil sampelnya, dan akan memiliki urutan pengaktifan, pelarian, dan pool jika memungkinkan.

Tabel 4.10 Persyaratan untuk pengambilan sampel ikan berdasarkan ukuran aliran

Syarat	A	B	C
Ukuran aliran (<i>Stream Size</i>)	Aliran dan sungai sedang hingga besar (urutan ke-5 atau lebih besar)	Aliran yang dapat dipindahkan (urutan ke-3 dan ke-4)	Aliran headwater (urutan pertama dan kedua)
Jarak Sampling (<i>Sampling Distance</i> dalam meter)	500 m	150 m	150 m
Perlengkapan <i>Electrofishing</i>	Perahu 12'	2 Ransel atau <i>unit electrofishing</i>	1-2 <i>electrofisher Backpack</i>
Sumber energi (<i>power source</i>)	5000 watt generator	24 volt battery atau 2500 watt generator	24 volt battery

(Sumber: Vile, 2011)

Aliran dengan area drainase kurang dari 5 mil persegi saat ini dikeluarkan dari penilaian IBI karena kekayaan spesies rendah yang terjadi secara alami. Seringkali aliran diklasifikasikan sebagai air produksi trout jatuh ke dalam kategori ini. Metode penilaian yang lebih tepat untuk aliran ini termasuk pengukuran kelimpahan ikan trout dan/atau produksi muda tahun ini. Penentuan makroinvertebrata benthik juga merupakan alternatif. Selain itu, habitat atipikal seperti bendungan dan mulut anak sungai dihindari, kecuali maksud dari penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh habitat ini pada kumpulan ikan. Paling sering, sampling habitat atipikal menghasilkan koleksi spesies ikan tidak diwakili dalam mencapai aliran khas. Sampling aliran intermiten juga dihindari. Aliran-aliran ini membutuhkan pengembangan sekumpulan kriteria penilaian IBI yang terpisah.

b. *Electrofishing*

Ikan ditangkap terutama dengan peralatan elektrofikasi menggunakan output arus searah (*direct current/DC*). Metode pengumpulan ini telah terbukti menjadi metode tunggal paling komprehensif dan efektif untuk mengumpulkan ikan sungai. Arus DC lebih aman, lebih efektif, terutama dalam air keruh, dan kurang

berbahaya bagi ikan. Di perairan dengan konduktivitas rendah (kurang dari 75 $\mu\text{mhos/cm}$) mungkin perlu menggunakan unit AC. Pemilihan perlengkapan elektrofishing yang sesuai bergantung pada ukuran aliran (Tabel 4.10). Tenaga yang dilibatkan dalam pengambilan sampling terdiri dari empat hingga tujuh orang, tergantung pada peralatan yang digunakan. Minimal dua orang diperlukan untuk menjaring ikan yang tercengang. Elektrofishing dilakukan dengan bekerja perlahan-lahan di hulu sejauh 150 meter dan menempatkan elektroda di semua habitat ikan yang tersedia. Ikan yang tercengang terjaring di dan di bawah elektroda saat mereka melayang ke hilir. Jaring (serokan) berusaha menangkap ikan yang mewakili semua kelas ukuran. Semua ikan yang ditangkap segera ditempatkan dalam wadah berisi air yang berlokasi strategis di sepanjang tepi sungai untuk mengurangi kematian ikan.

Waktu pengambilan sampel umumnya membutuhkan 4 hingga 5 jam per stasiun. Ini termasuk pengukuran parameter kimia dan fisik. Pengambilan sampel dilakukan selama siang hari, selama beberapa bulan (misalnya Juni hingga awal Oktober), di bawah aliran normal atau rendah, dan tidak pernah di bawah kondisi atipikal seperti aliran tinggi atau kekeruhan yang berlebihan yang disebabkan oleh hujan lebat. Koleksi ikan yang dibuat di musim panas dan awal musim gugur lebih mudah, lebih aman dan cenderung tidak mengganggu ikan yang memasuki masa pemijahan.

c. Pengolah Sampel

Ikan diidentifikasi sampai tingkat spesies, dihitung, diperiksa aspek penyakit dan anomali, diukur, dirilis, dan dicatat pada lembar data ikan di lapangan. Protokol sampling yang digunakan tidak efektif dalam menangkap sampel ikan yang lebih kecil karena mereka sulit dilihat dan cenderung berkumpul. Akibatnya, hanya ikan yang lebih besar dari 25 mm atau 1 inchi panjangnya yang dihitung. Spesimen referensi dan sulit untuk mengidentifikasi individu ditempatkan dalam stoples yang mengandung formalin 10% dan kemudian dikonfirmasi di laboratorium menggunakan buku kunci taksonomi. Spesies yang sangat sulit diidentifikasi dapat diteruskan ke para ahli perikanan atau laboratorium yang sesuai.

d. Pengukuran Parameter Fisik dan Kimia

Pengukuran fisika dan kimia (misalnya pH, konduktivitas, suhu, oksigen terlarut, kedalaman, dan aliran) dari kondisi aliran yang ada

dicatat pada karakterisasi fisika/lembar data lapangan kualitas air dan kemudian dirangkum. Potensi stressor, seperti *outfalls* saluran pembuangan, diidentifikasi dan dipetakan menggunakan GPS.

e. Penilaian Habitat

Penilaian habitat dilakukan di setiap lokasi pengambilan sampel dan semua informasi dicatat pada lembar lapangan. Pengkajian habitat memberikan informasi yang berguna tentang kemungkinan penyebab gangguan untuk menanamkan biota ketika parameter kualitas air tidak menunjukkan masalah. Penilaian habitat terdiri dari evaluasi fitur fisik berikut sepanjang jangkauan 150 meter: substrat, morfologi saluran, aliran sungai, stabilitas bank, kanopi, dan sampel aliran sungai. Parameter individu dalam masing-masing kelompok ini diberi skor dan dijumlahkan untuk menghasilkan skor total, yang diberi kategori kualitas habitat.

f. Menghitung IBI

Setelah ikan dari setiap koleksi sampel telah diidentifikasi, dihitung, diperiksa untuk penyakit dan anomali, dan dicatat, beberapa biometrik digunakan untuk mengevaluasi integritas biologis. Analisis kumpulan ikan dilakukan menggunakan modifikasi IBI. Kerangka teoritis dibangun dari beberapa metrik biologis yang digunakan untuk menilai kekayaan kumpulan ikan, komposisi trofik, kelimpahan dan kondisi, dibandingkan dengan kumpulan ikan yang ditemukan di aliran rujukan regional. Kalibrasi ulang metrik baru-baru ini telah menghasilkan dalam pemilihan proporsi metrik baru dari individu yang toleran sebagai pengganti proporsi sebelumnya dari metrik pengisap putih. IBI yang dimodifikasi menggunakan 10 biometrik berikut: 1) jumlah total spesies ikan, 2) jumlah spesies pemakan serangga benthik, 3) jumlah spesies ikan trout dan sunfish, 4) jumlah spesies intoleran, 5) proporsi individu toleran, 6) proporsi individu sebagai generalis, 7) proporsi individu sebagai cyprinids pemakan serangga, 8) proporsi individu sebagai trout atau proporsi individu sebagai piscivora (karnivora atas), 9) jumlah individu dalam sampel dan 10) proporsi individu dengan penyakit atau anomali, tidak termasuk penyakit blackspot.

Kriteria penilaian kuantitatif dikembangkan untuk setiap biometrik berdasarkan tingkat penyimpangan; 5 (tidak ada yang sedikit), 3 (cukup), dan 1 (signifikan) dari kondisi referensi ecoregional yang sesuai. Skor untuk biometrik individu di setiap lokasi

pengambilan sampel dijumlahkan untuk menghasilkan skor total, yang kemudian diberi kategori kondisi. Nilai IBI maksimum adalah 50, mewakili integritas biologis yang sangat baik. Skor kurang dari 29 menunjukkan aliran yang memiliki integritas biologis yang buruk, dengan 10 menjadi skor terendah yang dapat diterima situs. Deskripsi lebih lanjut dari semua metrik yang digunakan dalam perhitungan IBI disajikan di bawah ini:

1) Kekayaan Spesies dan Komposisi

Empat biometrik membutuhkan penggunaan garis Kekayaan Jenis Maksimum (*Maximum Species Richness/MSR*). Garis MSR menghubungkan kekayaan spesies dengan ukuran aliran dan kualitas lingkungan. Untuk aliran dengan area drainase lebih dari 5 mil persegi kekayaan spesies diperkirakan akan meningkat dengan kualitas lingkungan yang lebih tinggi. Selain itu, dalam aliran dengan tingkat kualitas lingkungan tertentu, kekayaan spesies akan meningkat dengan ukuran aliran. Dengan demikian, sungai berukuran besar dengan kualitas air yang baik harus memiliki spesies yang secara signifikan lebih banyak daripada aliran kecil dengan kualitas air yang baik. Garis MSR dikembangkan untuk menunjukkan hubungan antara kekayaan spesies dan ukuran badan air. Menggunakan prosedur yang dijelaskan dalam Karr *et al.* (1986), garis MSR untuk setiap metrik kekayaan digambar oleh Kurtenbach (1994) dengan kemiringan sesuai mata untuk memasukkan 95% dari titik data. Garis MSR ini baru-baru ini telah dievaluasi dan dimodifikasi bila diperlukan. Area di bawah garis MSR disambung dua garis diagonal.

Titik-titik yang terletak di dekat garis MSR mewakili kekayaan spesies yang mendekati yang diharapkan untuk aliran yang tidak disalurkan. Titik jatuh ke dalam wilayah yang paling rendah yang diraih, terjauh dari garis MSR, merupakan penyimpangan terbesar dari kondisi referensi ecoregional. Sebagai contoh, menggunakan grafik "jumlah total spesies ikan", pengumpulan sampel yang menghasilkan penangkapan sepuluh spesies ikan total dalam aliran dengan drainase seluas 10 mil persegi, akan menerima skor tiga dan memiliki penyimpangan menengah dari kondisi yang diharapkan.

(a) Jumlah total spesies ikan

Metrik ini hanyalah ukuran jumlah spesies ikan yang diidentifikasi dari sampel koleksi. Pengurangan kekayaan taksonomi dapat menunjukkan masalah polusi (misalnya, pengayaan organik,

toksitas) dan/atau hilangnya habitat fisik. Spesies ikan dengan toleransi terkecil terhadap perubahan lingkungan, biasanya adalah yang pertama tidak ada atau hilang ketika terjadi degradasi air. Keefektifan metrik ini sebanding dengan daerah dengan fauna ikan yang lebih kaya.

(b) Jumlah spesies pemakan serangga benthik

Metrik ini merupakan modifikasi dari beberapa metrik yang digunakan dalam IBI asli (Karr 1981). Spesies Darter membentuk komponen yang relatif kecil dari fauna ikan. Namun, beberapa spesies benthik lainnya membutuhkan kerikil bersih atau substrat batu untuk reproduksi dan/atau ruang hidup. Degradasi habitat menyebabkan hilangnya kekayaan spesies benthik dan kelimpahan. Beberapa ikan benthik membutuhkan dasar kolam yang tenang dan dapat menurun ketika penipisan oksigen benthik terjadi. Lebih lanjut, pengurangan beberapa ikan insektivora benthik secara tidak langsung menunjukkan masalah racun. Makroinvertebrata benthik merupakan sumber makanan penting bagi ikan pemakan benthik dan gaya hidup mereka yang sessile membuat mereka sangat rentan terhadap efek racun.

(c) Jumlah spesies ikan trout dan *sunfish*

Metrik ini diadopsi sebagai gabungan untuk aliran air hangat dan air dingin. Metrik ini mirip dengan yang digunakan dalam versi gabungan air dingin-air dari IBI yang dikembangkan di Ontario, tetapi dirancang untuk gradien tinggi daripada aliran gradien rendah. Baik ikan sunfish dan ikan trout adalah spesies kolom air yang sensitif terhadap degradasi habitat dan hilangnya penutup instream. Dalam aliran air dingin di mana ikan mola-mola biasanya tidak ada, ikan trout mengisi ceruk ekologi yang sama dan dapat digunakan untuk menggantikan ikan mola-mola. Ikan trout sama, jika tidak lebih sensitif terhadap degradasi habitat. Hubungan antara populasi ikan trout dan habitat didokumentasikan dengan baik.

(d) Jumlah spesies yang tidak toleran

Metrik ini memberikan ukuran spesies ikan yang paling sensitif terhadap degradasi lingkungan. Ketiadaan beberapa spesies ikan terjadi dengan perubahan lingkungan halus yang disebabkan oleh gangguan antropogenik. Spesies ikan yang ditetapkan sebagai tidak bertoleransi harus memiliki distribusi historis yang secara signifikan lebih besar daripada populasi yang terjadi saat ini dan terbatas pada aliran yang memiliki kualitas air yang luar biasa.

(e) Proporsi individu yang toleran

Metrik ini dipilih sebagai pengganti persentase pengisap putih sebagai kelompok toleran yang lebih tepat secara regional. Sejumlah spesies toleran umumnya ditemukan di sungai-sungai kecil dan besar yang mewakili berbagai kondisi kualitas air. Spesies toleran ini beradaptasi dengan baik terhadap perubahan kondisi lingkungan dan sering menjadi dominan di lokasi yang terganggu. Metrik ini umumnya berguna dalam membedakan kondisi yang sedang dan sangat terganggu.

2) Komposisi Trofik

Metrik komposisi trofik, tidak seperti metrik kekayaan, dinilai berdasarkan persentase dari jumlah total ikan yang ditangkap

(a) Proporsi individu sebagai generalis

Metrik ini menggantikan metrik omnivora yang digunakan di IBI. Secara umum, kelompok spesies omnivora memiliki strategi pemberian makan yang fleksibel dan persyaratan habitat yang luas. Seringkali pergeseran dari kelompok yang didominasi spesialis ke kelompok generalis terjadi ketika kualitas air menjadi terdegradasi. Karena kebutuhan makan dan habitat yang luas, spesies yang termasuk untuk digunakan dalam metrik ini dianggap toleran terhadap degradasi lingkungan.

(b) Proporsi individu sebagai cyprinids pemakan serangga

Seperti banyak aliran yang ditemukan di Amerika Utara, cyprinids adalah ikan insektivora yang dominan. Pergeseran dari pengumpan invertebrata khusus ke generalis dengan perilaku makan fleksibel sering menunjukkan kondisi buruk terkait dengan kualitas air dan/atau degradasi habitat fisik. Mirip dengan metrik insektivora bentik, cyprinids pemakan serangga dalam beberapa contoh, dapat secara tidak langsung mengukur efek toksisitas.

(c) Proporsi individu trout atau proporsi individu piscivora (karnivora atas)

Aliran dengan penurunan kualitas air ringan atau sedang umumnya mengandung beberapa spesies ikan predator teratas. Dalam aliran air dingin, ikan predator seperti bass dan pickerel adalah depauperate dan biasanya digantikan oleh ikan trout. Jadi, diperlukan untuk metrik yang mengukur kedua kelompok karnivora atas.

3) Kelimpahan dan Kondisi Ikan

(a) Jumlah individu dalam sampel - termasuk spesies toleran

Metrik ini mengukur kelimpahan ikan yang ditangkap dari area tertentu atau jangkauan aliran dan digunakan untuk membedakan aliran dengan gangguan kualitas air yang parah. Hasil per satuan usaha digunakan untuk menilai metrik ini. Toksisitas berat dan penipisan oksigen adalah contoh gangguan yang sering menyebabkan kelimpahan ikan yang sangat rendah. Spesies toleran telah dikeluarkan dari metrik ini, karena seringkali spesies ini berkembang dan banyak di bawah kondisi terdegradasi.

(b) Proporsi individu dengan penyakit atau anomali (tidak termasuk penyakit *blackspot*)

Metrik ini memberikan ukuran relatif dari kondisi ikan individual. Serupa dengan metrik sembilan, metrik ini sangat berguna dalam membedakan aliran dengan dampak kualitas air yang serius. Metrik ini dimaksudkan untuk mendeteksi dampak pada aliran yang sangat terkontaminasi oleh bahan kimia. Hubungan yang signifikan antara insiden penyakit *blackspot* dan kualitas lingkungan belum ditetapkan. Akibatnya, penyakit *blackspot* dikeluarkan dari penggunaan dalam metrik ini.

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

1. Penelitian Purwati (2015) menghasilkan beberapa kesimpulan, yaitu (a) Ordo Ephemeroptera, Familia Lephophlebiidae, Genus *Paraleptoplebia*, Spesies *P. submarginata* dan *P. cinca* merupakan bioindikator yang mencirikan daerah hulu Sungai Cisadane. (b) Ordo Ephemeroptera, Familia Baetidae, Genus *Baetis*, Spesies *B. Niger*. (c). Ordo Trichoptera, Familia *Hydropsychidae*, Genus *Hydropsyche*, Spesies *H. siltalai* dan *H. angustipennis* merupakan bioindikator yang mencirikan daerah dengan gangguan dominan dari pencemar domestik di Sungai Cisadane (daerah tengah). (d). Class Oligochaeta, Familia Haplotaxidae dan Cacing Tubificidae merupakan bioindikator yang mencirikan daerah hilir di Sungai Cisadane. (e). Kualitas air Sungai Cisadane dari hulu sampai hilir berdasarkan bioindikator Bentos makroinvertebrata berada pada

status tercemar sedang sampai buruk. Menurut Anda, apa manfaat hasil tersebut dalam kajian karakteristik bioindikator Sungai Brantas? Jelaskan!

2. Diantara beberapa organisme, makrozoobenthos sering digunakan sebagai bioindikator kualitas air. Jelaskan pendapat Anda mengenai kelebihan dan kelemahan makrozoobenthos sebagai bioindikator! Bagaimana pula strategi Anda untuk mengurangi (mengatasi) kelemahan tersebut?

BAB V

BIOINDIKATOR KUALITAS TANAH

A. Pengantar

Beberapa senyawa kimia yang berpotensi berbahaya, yang berasal dari aktivitas manusia di perkotaan, pedesaan, maupun kawasan industri, terus-menerus dilepaskan ke lingkungan, khususnya tanah. Tanah adalah sumber daya penting bagi manusia dan ekosistem. Tanah merupakan rumah bagi banyak organisme yang saling bergantung yang masing-masing memainkan peran penting dalam fungsi tanah dan siklus biogeokimia. Namun, meskipun kita telah mengetahui peran dan fungsi tersebut, masih sangat sedikit penelitian tentang apa sebenarnya kehidupan tanah tersebut dan bagaimana mengukur dan mengetahui kondisinya berdasarkan indikator-indikator yang ada.

Pemantauan jenis dan jumlah zat beracun yang masuk ke tanah merupakan pekerjaan yang melelahkan dan rumit, karena kompleksitas, waktu, dan biaya yang dibutuhkan, terutama bila proses identifikasi mengarah pada bahan kimia. Meskipun telah banyak metode analitik yang dapat menjadi pilihan, mengumpulkan sampel yang cukup pada waktu yang tepat terus menjadi kendala besar dalam evaluasi kondisi tanah. Selain itu, penentuan zat yang terisolasi melalui proses analisis kimia tradisional memiliki aplikasi lingkungan yang terbatas, karena tidak dapat mendeteksi efek pada organisme dan tidak menginformasikan tentang interaksi yang mungkin terjadi antara zat dengan sumberdaya hayati yang ada (aditif, antagonis atau sinergis). Dalam hal ini, para peneliti telah menunjukkan perlunya menerapkan metodologi biologis untuk mendapatkan pendekatan ekosistem. Oleh karena itu, penelitian tentang komponen biologis tanah diperlukan untuk meningkatkan pemahaman tentang fungsinya dan untuk mengidentifikasi bioindikator yang berguna, yaitu organisme (atau bagian dari organisme atau komunitas organisme) yang dapat digunakan untuk memberi tahu kami tentang kondisi ekosistem tanah. dan seberapa baik kerjanya.

Faktor biologis dapat menunjukkan keseimbangan lingkungan yang lebih baik melalui indeks biotik, yang berasal dari pengamatan spesies bioindikator. Bioindikator mampu menghadirkan perubahan yang memungkinkan generalisasi informasi tentang kualitas lingkungan, misalnya, akumulasi zat dalam konsentrasi lebih tinggi dibanding yang dianggap normal atau esensial untuk metabolisme tubuh atau menghadirkan perubahan dalam hal jumlah organisme. Organisme seperti itu, karena karakteristiknya yang toleran terhadap beberapa zat kimia, dapat menghadirkan beberapa perubahan, apakah itu fisiologis, morfologis, dan perilaku ketika terpapar polutan tertentu. Kehidupan beberapa hewan dan tumbuhan sangat bergantung pada tanah, baik makro, meso, maupun makro seperti, Isopoda, Collembola, Oligochaeta dan Diplopoda, telah diusulkan sebagai organisme bioindikator. Selain itu, tanaman tingkat tinggi juga biasa digunakan dalam penilaian tanah (Magalhães & Ferrão-Filho, 2008).

Berdasarkan sistem biologis, urutan perubahan akibat adanya polutan pada organisasime, berawal dari tingkat molekuler atau biokimia hingga tingkat fisiologis atau individual, hingga tingkat populasi dan ekosistem. Teknik yang menunjukkan respons pada tingkat yang lebih rendah dari organisasi biologis dianggap lebih preventif. Perubahan morfologis dapat digunakan sebagai penanda biologis dalam penyelidikan toksisitas senyawa kimia tertentu dan dalam pemantauan efek akut dan kronis organisme yang terpapar pada lingkungan yang terkena dampak. Dalam konteks ini, analisis morfologis organ target, yang dilakukan melalui ultra-morfologi, histologi, dan ultrastruktur, telah banyak digunakan dalam penelitian menggunakan invertebrata, yang bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai kerusakan yang disebabkan oleh zat berbahaya bagi organisme (Fontanetti *et al.*, 2010; Fontanetti *et al.*, 2011).

Teknik lain yang banyak digunakan dan dianggap efisien dalam penilaian polusi tanah pada organisme adalah penggunaan biomarker molekuler. Studi terbaru menunjukkan minat besar dalam penggunaan biomarker enzimatik untuk memantau lingkungan, karena peningkatan atau penghambatan aktivitas enzim tertentu dapat menjelaskan kemungkinan respons terhadap tekanan lingkungan. Karena pentingnya untuk memastikan integritas genetik organisme, biomarker genotoksitas mendapatkan perhatian dalam evaluasi potensi toksik sampel tanah. Uji yang digunakan dalam penilaian genotoksik suatu agen (tes genotoksitas dan

mutagenisitas), meliputi tes Ames, uji penyimpangan kromosom, uji mikronukleus, uji komet, uji SMART, uji AR Mutasi dan Rekombinasi, mikroarray dan mikroskop, menggunakan teknik seluler, biologi molekuler dan genetik baik *in vitro* dan *in vivo*, *in situ* dan *ex situ* (Fontanetti *et al.*, 2011; Misik *et al.*, 2011).

B. Hewan Tanah

1. Invertebrata

Kepentingan ekologis dan toksikologisnya, fasilitas yang harus dipertahankan di laboratorium, tingkat reproduksi, dan sensitivitas menjadi pertimbangan pemilihan bioindikator. Banyak penulis setuju bahwa fitur utama yang diperlukan untuk menjadi bioindikator yang baik adalah sensitivitas, keterwakilan yang baik dan kepentingan fungsional dalam ekosistem, serta pengumpulan, identifikasi, dan analisis yang mudah. Dalam konteks ini, menurut Fontanetti *et al* (2011) beberapa kelompok taksonomi invertebrata tanah dan tanaman tingkat tinggi telah diusulkan sebagai organisme bioindikator, yang dapat diuraikan sebagai berikut.

a. Isopoda, Collembola dan Diplopoda

Artropoda tanah dari kelompok hewan saprofit, yaitu Isopoda, Collembola dan Diplopoda adalah di antara organisme yang dianggap paling tepat untuk mengevaluasi efek akumulasi zat beracun yang ada di tanah, karena kontak langsung dengan kontaminan yang ada di dalamnya. Annelida, khususnya Oligochaeta, juga sering digunakan dalam tes toksisitas. Invertebrata ini melakukan kontak dengan sejumlah besar polutan yang ada di kompartemen ini dengan gerakan dan konsumsi tanah atau serasah daun yang terkontaminasi. Oligochaeta dianggap sebagai salah satu representasi terpenting dari makro-fauna edafik.

Beberapa faktor menjadikan cacing tanah sebagai bioindikator yang sangat baik untuk toksisitas zat-zat kimia dalam tanah, seperti pengetahuan yang telah terakumulasi di habitatnya dan posisi trofik penting dari invertebrata ini, yang terletak di tingkat terendah dari jaring makanan darat, yang berfungsi sebagai makanan bagi beberapa hewan dan rute pemindahan dan biomagnifikasi kontaminan di sepanjang jaring makanan ini. Karena sangat penting di tanah, penyebarannya yang luas dan semua alasan yang disebutkan sebelumnya, cacing tanah, terutama spesies *Eisenia fetida* dan *E. andrei*

dipilih untuk beberapa uji toksisitas untuk pendaftaran agrokimia di beberapa negara. Spesies lain seperti *Lumbricus terrestris* dan *L. rubellus* telah banyak digunakan dalam studi bioakumulasi logam.

Cacing tanah dikelompokkan menjadi tiga kelompok berdasarkan habitatnya. Penghuni serasah tinggal di serasah, menelan residu tumbuhan, dan mungkin tidak ada di tanah yang dibajak dan bebas serasah. Penghuni tanah mineral hidup di tanah lapisan atas yang kaya akan bahan organik. Mereka menggali saluran sempit dan memakan campuran tanah dan residu tanaman. *Land-burrower* (perayap malam) menggali lubang yang panjang dan besar ke dalam lapisan tanah yang dalam. Mereka membawa residu tanaman untuk dikonsumsi. Cacing tanah adalah jenis yang mampu mencerna bahan dan kemudian membuang kembali ke tanah. Produk itu diperkaya dengan nutrisi (N, P, K, dan Ca) dan mikroorganisme selama perjalanannya melalui sistem pencernaan cacing. Cacing tanah berkontribusi dalam menambah nutrisi ke tanah dan meningkatkan porositas, dan perkembangan akar. Mereka juga berkontribusi pada pembangunan struktur tanah dan stabilisasi agregat.

Cacing tanah dapat menunjukkan kualitas tanah dengan (1) kelimpahan dan komposisi spesies fauna cacing tanah di lokasi tertentu, (2) perilaku masing-masing cacing tanah yang bersentuhan dengan substrat tanah (preferensi, penghindaran, dan/atau aktivitas), (3) akumulasi bahan kimia dari tanah ke dalam tubuh, dan (4) biokimia / sitologi stres-biomarker di cacing tanah. Cacing tanah dinilai dalam beberapa program pemantauan tanah jangka panjang di Eropa. Data kelimpahan cacing tanah mungkin tidak hanya mewakili kualitas tanah karena cuaca dan makanan juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi. Tes penghindaran ISO dan tes dengan *terraria 2D* (dua dimensi) adalah tes laboratorium dengan titik akhir perilaku yang dapat melengkapi pemantauan lapangan kelimpahan cacing tanah. Analisis konsentrasi kimia dalam cacing tanah telah digunakan untuk menunjukkan risiko keracunan sekunder bagi predator pemakan cacing dan untuk mendapatkan perkiraan ketersediaan hayati kontaminan di dalam tanah. Faktor bioakumulasi (*bioaccumulation factor*/BAF) untuk bahan kimia dalam cacing tanah dapat sangat berbeda dari satu situs ke situs dan dari spesies ke spesies yang menunjukkan bahwa ketersediaan hayati kontaminan dipengaruhi oleh parameter kimia, fisik, perilaku, dan fisiologis (Fründ, *et al.*, 2010).

Beberapa studi menunjukkan organisme ini sebagai bioindikator, menerapkan metodologi berbeda dan parameter evaluasi. Tes reproduksi terkait dengan tingkat kelangsungan hidup dan evaluasi kelimpahan dan/atau keanekaragaman spesies di daerah yang menderita beberapa jenis degradasi adalah metodologi yang paling banyak digunakan. Kelompok taksonomi lain yang digunakan dalam analisis toksikologi adalah Isopoda, salah satu ordo terbesar dari krustasea dengan sekitar 10.000 ribu spesies yang dideskripsikan, sebagian besar laut. Isopoda terestrial telah digunakan dalam uji toksisitas tanah dan parameter utama evaluasi adalah kelimpahan individu, tingkat reproduksi, dan kelangsungan hidup.

Logam adalah agen toksik utama yang dievaluasi menggunakan Isopoda, karena invertebrata ini mengakumulasi unsur-unsur ini. Dalam pengertian ini, para peneliti telah melakukan studi tentang bioakumulasi, efek sitotoksik logam, dan mekanisme detoksifikasi. Pentingnya diplopoda dalam daur ulang nutrisi, aerasi dan pemupukan tanah sering disebutkan dalam literatur. Karena kebiasaan para diplopoda, penjajah dari berbagai lapisan tanah, hewan-hewan ini dapat sangat dipengaruhi oleh pengendapan logam, senyawa organik, dan zat kompleks di dalam tanah. Sebagian besar studi dalam literatur menggunakan diplopoda sebagai bioindikator tanah terkait dengan logam. Namun, efek dari polutan organik dan campuran kompleks pada invertebrata ini relatif sedikit diketahui. Dalam konteks ini, studi pertama dilakukan pada diplopoda, sebagai bioindikator, yang melibatkan asimilasi logam oleh spesies *Glomeris marginata*. Dalam penelitian tersebut, diverifikasi serapan tembaga, seng, dan kadmium yang lebih tinggi oleh hewan yang terkumpul di tanah yang terkontaminasi bila dibandingkan dengan hewan yang dikumpulkan di lingkungan yang tidak terkontaminasi. Para peneliti menyarankan bahwa studi ultrastruktural dari berbagai organ akan diperlukan untuk memahami "jalur logam", terutama di usus invertebrata ini.

Beberapa invertebrata seperti tungau, serangga, dan diplopoda terhadap berbagai zat beracun dan menggunakan analisis ultrastruktural untuk menunjukkan penerapan penggunaan hewan tersebut dalam biomonitoring. Dalam penelitian dianalisis dampak timbal pada efisiensi asimilasi dalam diplopoda, disampaikan kepada kondisi lingkungan yang berbeda. Para peneliti menggunakan spesies diplopoda yang berbeda dan menemukan bahwa hanya *Glomeris conspersa* yang meningkatkan konsumsi makanan yang mengandung

timah bila dibandingkan dengan makanan yang tidak terkontaminasi. Baru-baru ini, penilaian toksisitas zat kompleks dilakukan dengan spesies *Rhinocricus padbergi* terkena berbagai konsentrasi lumpur limbah dan landfarming. Analisis histologis dan histokimia, serta analisis ultrastruktural, menunjukkan bahwa zat-zat tersebut beracun bagi diplopoda yang diteliti, karena perubahan-perubahan seluler dan seluler yang berbeda diamati pada tubuh lemak midgut dan perivisceral invertebrata ini.

Collembola adalah salah satu anggota terpenting dari mesofauna tanah yang terlibat dalam proses dekomposisi dan rentan terhadap efek kontaminasi. Beberapa poin yang menguntungkan dalam memilih Collembola sebagai bioindikator, seperti keberadaan di semua ekosistem, kelimpahan dan kemudahan pengumpulan dalam jumlah yang cukup untuk memungkinkan analisis statistik. Selain itu, mereka memiliki siklus hidup yang pendek, sehingga mereka merespon dengan cepat terhadap perubahan lingkungan dan, karena mereka bersentuhan langsung dengan tanah, mereka lebih sensitif terhadap beberapa jenis tekanan yang diterapkan dalam ekosistem.

Penelitian yang dilakukan Husamah *et al* (2015) menunjukkan bahwa 1) kadar air tanah, derajat keasaman (pH), dan kandungan C-organik tanah tidak mempengaruhi jumlah jenis Collembola di tiga tipe habitat (hutan, pertanian, dan pemukiman) di Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas Hulu. Hal ini berarti jumlah jenis ditentukan berbagai faktor lingkungan secara bersama-sama dalam kurun waktu tertentu. Dampak faktor lingkungan secara parsial dalam jangka pendek tidak akan tampak pada jumlah jenis Collembola tanah. 2) Ada pengaruh kadar air tanah dan kandungan C-organik tanah pada jumlah individu Collembola. Kandungan C-organik berperan paling dominan (nyata) pada jumlah individu Collembola. Kadar air tanah juga memiliki dampak bagi jumlah individu Collembola pada habitat pertanian.

Sehubungan dengan itu, terkait implementasi struktur komunitas Collembola sebagai bioindikator, hasil penelitian Husamah (2015) menunjukkan bahwa keanekaragaman jenis pada agroekosistem apel semiorganik dan anorganik adalah sama dan termasuk kategori rendah. Kemerataan Collembola pada tipe agroekosistem apel semiorganik dan nonorganik adalah sama dan termasuk memiliki kemerataan tinggi. Berdasarkan itu maka kualitas tanah di kedua agroekosistem apel relatif sama yaitu berkualitas rendah (kurang sehat) dan cenderung menghambat kehidupan Collembola.

b. Nematoda

Nematoda banyak dimanfaatkan sebagai bioindikator. Nematoda bebas maupun tanah menjadi indikator karena memberikan gambaran taksonomi dan pakannya melimpah. Nematoda memiliki peran penting dalam *food webs*. Nematoda memiliki sifat, yaitu 1) Respon terhadap pencemar memberikan gambaran perbaikan ekosistem karena mempunyai lapisan kulit permeable; 2) Sifat tahan se, misalnya Cryptobiosis akan inaktif bila lingkungan tidak mendukung, sementara Dorylamidae bersifat rentan sehingga mudah terpengaruh perubahan ekosistem. Nematoda mempunyai protein kejutan panas (*heat shock protein*) dan dapat dihemat. Protein tersebut akan meningkat bila ada tekanan panas, logam atau racun; 3). Ada Nematoda yang bersifat berbahaya bagi tumbuhan, memutus sirkulasi air dan hara, sehingga merusak tumbuhan dan mengganggu produktivitas. Kebanyakan Nematoda bersifat menguntungkan dalam ekosistem karena mempercepat laju perombakan bahan organik dan pembentukan mineral dalam tanah. Nematoda biasanya menjadi hewan tanah yang terakhir mati pada tanah tercemar, karena tahan terhadap kekeringan dan pulih seiring peningkatan kelembaban. 4) Nematoda mudah pelajari secara terpisah, berdasarkan bentuk morfologi dan jenis makanan. Kelimpahan relatif dan ukuran yang khas memudahkan pengambilan sampel dan proses ekstraksi, serta relatif lebih murah daripada hewan lain (Husamah *et al.*, 2017).

Berdasarkan jenis makanan atau mangsa Nematoda terdiri atas tujuh kelompok, yaitu pemangsa algae atau lumut (*moss feeder*), pemangsa jamur (*fungus feeder*), pemangsa bakteri (*bacterial feeder*), predator, parasit pada serangga, parasit pada tumbuhan. Tanah yang "dikuasai" oleh Nematoda pemangsa jamur biasanya adalah tanah berkualitas (sehat) karena suplai mineral tanah terjaga dan tersedia baik untuk menopang kehidupan Nematoda sendiri maupun bagi jamur. Namun demikian, apabila tanah "dikuasai" oleh Nematoda bersifat parasit terhadap tumbuhan, maka dapat dikatakan tanah tersebut tidak berkualitas atau tidak sehat (Husamah *et al.*, 2017).

2. Ular Buta *Ramphotyphlops braminus*

Ular buta jenis *Ramphotyphlops braminus* hidup pada tipe habitat dengan nilai kadar air tanah, kadar organik tanah, dan porositas tanah yang tinggi. Kehadiran kelompok hewan ini berhubungan dengan kualitas kesuburan tanah. Populasi *Ramphotyphlops braminus*

yang kecil menjadi indikator bahwa nilai kadar air tanah, kadar organik tanah, dan porositas tanah rendah sehingga dapat dikatakan bahwa kesuburan tanah rendah (Nuswantoro, Rizaldi, & Tjong, 2015).

Ular tipe fossorial kehidupannya dipengaruhi kelembaban tanah yang optimal. Kelembaban tanah berhubungan dengan kadar air tanah. Kelembaban tanah menentukan mekanisme penyesuaian kelembaban tubuh ular yang berkaitan dengan mekanisme menjaga kestabilan metabolisme dan keseimbangan homeostasis. Sebagai kelompok poikilothermis dan reptil fossorial, ular akan mencari tipe habitat yang sesuai dan suhu lingkungan yang memungkinkan adaptasi suhu tubuh lebih optimal. Termoregulasi penting dilakukan reptil karena berhubungan dengan kemampuan mencari makan, menghindari pemangsa, atau berkembang biak (Mattison, 2014).

Porositas tanah yang relatif tinggi merupakan hal penting bagi pemilihan preferensi habitat oleh *R. braminus*. Hal ini dikarenakan sifat ular buta yang hidup dengan cara menggali tanah untuk mencari makan, bersarang, dan bereproduksi. Secara morfologi sisik rostral ular buta telah termodifikasi untuk menggali tanah serta ditambah dengan bantuan ekor yang meruncing untuk mencongkel tanah (Mattison, 2014).

Nilai kadar organik tanah pada masing-masing tipe habitat bervariasi. Kadar organik tanah >5% merupakan kriteria sangat tinggi, 3-5% kriteria tinggi, 2-3% kriteria sedang, dan < 2% kriteria rendah. *R. braminus* cenderung untuk memilih tipe habitat dengan kadar organik yang tinggi. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan keberadaan makanan bagi *R. braminus* yaitu berupa rayap dan semut yang lebih sering dijumpai pada habitat dengan kadar organik yang tinggi. Kadar organik tanah merupakan salah satu indikator kesuburan tanah. Lahan yang subur dapat diasumsikan memiliki ketersediaan makanan yang cukup bagi *R. braminus* (Nuswantoro *et al.*, 2015).

Potensi makanan yang ada pada masing-masing tipe habitat juga menentukan pemilihan preferensi habitat bagi *R. braminus*. Makanan utama dari ular famili Typhlopidae adalah berupa telur dan larva rayap dan semut. Pada tipe habitat pekarangan rumah ditemukan rayap dengan jenis *Macrotermes gilvus* dan *Schedarhinotermes* sp. dengan kelimpahan yang cukup tinggi dibandingkan dengan tipe habitat lainnya. Pada tipe habitat hutan sekunder dan kebun/ladang juga

ditemukan keberadaan semut dan rayap namun memiliki kelimpahan yang lebih rendah dibandingkan dengan pekarangan rumah, sedangkan pada tipe habitat tempat pembuangan sampah akhir tidak ditemukan adanya semut atau rayap (Wallach, 2008).

C. Tumbuhan

Tumbuhan, terlepas dari perbedaan struktur dan metaboliknya, dapat memberikan informasi penting tentang potensi zat sitotoksik, genotoksik, dan mutagenik, bahkan ketika terpapar dalam jangka pendek dan menawarkan beberapa keuntungan seperti budidaya berbiaya rendah dan perawatan yang relatif mudah, dibandingkan mamalia. Dalam studi dengan campuran kompleks, tumbuhan juga menunjukkan hasil yang memuaskan, menunjukkan bahwa tanaman cukup sensitif untuk mendeteksi efek buruk dari sampel lingkungan. Tumbuhan dapat langsung terkena kontaminan, tanpa pengenceran atau penyaringan sampel.

Fontanetti *et al.*, (2011) mengutip keuntungan lain dari penggunaan tumbuhan, yaitu (1) tumbuhan tinggi adalah eukariota, dengan demikian, struktur dan organisasi selulernya mirip dengan manusia dan dimungkinkan untuk membuat perbandingan dengan hewan; (2) teknik yang digunakan untuk penelitian ini relatif sederhana dan dapat dilakukan dengan gesit; (3) budidaya organisme memiliki biaya rendah dan perawatan yang mudah; (4) pengujian dapat dilakukan di bawah berbagai kondisi lingkungan, pH dan suhu; (5) tumbuhan tingkat tinggi dapat regenerasi dengan mudah; (6) pengujian dengan tumbuhan tingkat tinggi dapat digunakan untuk menilai potensi genotoksik zat sederhana atau bahkan campuran kompleks; (7) dapat digunakan untuk pemantauan *in situ*; (8) dapat digunakan untuk pemantauan selama beberapa tahun dan sangat andal; (9) penelitian telah menunjukkan korelasi dengan uji sitogenetik pada mamalia; (10) dapat digunakan bersama dengan uji mikroba untuk mendeteksi metabolit mutagenik (pro-mutagen); (11) studi genotoksitas dengan tanaman menunjukkan sensitivitas tinggi dalam tes dengan agen karsinogenik.

Di sisi lain, salah satu keterbatasan menggunakan tumbuhan sebagai bioindikator adalah kurangnya sensitivitas untuk kelas pro-mutagen tertentu seperti nitrosamin, amina heterosiklik dan beberapa kelas PAH. Ventura (2009) menunjukkan bahwa sistem *A. cepa* (bawang) rentan terhadap nitro aminobenzene, sementara Mazzeo

(2009) mengamati efek yang sama untuk benzena, toluena, etilbenzena dan xilena (BTEX). Di antara tanaman yang lebih tinggi, bawang (*A. cepa*) adalah tanaman yang paling banyak digunakan untuk menentukan efek sitotoksik, genotoksik dan mutagenik dari banyak zat yang ada di tanah. Karakteristik kinetik selulernya mendukung pertumbuhan akar yang cepat, karena banyaknya sel yang mengalami pembelahan. Oleh karena itu, catatan aktivitas mitosis dan kelainan dalam siklus sel sel-sel meristematik akarnya dapat dengan mudah divisualisasikan.

Uji *A. cepa* adalah teknik cepat dan sensitif untuk mendeteksi zat genoksotik dan mutagenik yang tersebar di lingkungan. Evaluasi perubahan genetik juga dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai spesies genus *Tradescantia* melalui deteksi mutasi yang disebabkan oleh agen yang ada di udara, tanah dan air dengan analisis mikronuklei dalam sel induk dari serbuk sari (Trad-MCN). Spesies *Tradescantia* secara khusus diindikasikan untuk aplikasi langsung di wilayah dan negara dalam pengembangan karena keunggulannya seperti penanganan yang mudah dan biaya perawatan yang relatif rendah. *Vicia faba* adalah bahan populer yang telah banyak digunakan tidak hanya dalam studi sitologi, tetapi juga dalam eksperimen fisiologis. Organisme ini awalnya digunakan dalam tes radiobiologis dalam penyelidikan mekanisme pembentukan penyimpangan kromosom dengan radiasi pengion. Kemudian, Kihlman (1975) mengembangkan dan menstandarisasi bioassay sel meristematik *V. faba* untuk analisis penyimpangan kromosom, dan sejak itu telah banyak digunakan untuk studi genotoksisitas untuk evaluasi pertukaran kromatid saudara perempuan. Teknik ini sangat mirip dengan tes *A. cepa*; metode ini tidak memerlukan kondisi steril atau material atau peralatan dengan biaya tinggi.

Banyak gulma dapat tumbuh di tanah dan lingkungan yang berbeda, tetapi masing-masing spesies memiliki kisaran kondisi optimum di mana ia dapat ditemukan. Menurut klasifikasi strategi tanaman Grime, gulma biasanya dicirikan oleh strategi kompetitif atau kasar, dan hanya sedikit yang memiliki kapasitas untuk beradaptasi dengan kondisi yang sangat ekstrem (spesies yang toleran terhadap stres). Pada tingkat kelimpahan berapa pun, beberapa spesies gulma biasanya dapat ditemukan di bawah kondisi tanah tertentu. Mengetahui spesies mana yang dapat dikaitkan dengan kondisi tanah mana yang menjadi dasar untuk menggunakannya sebagai

bioindikator. Gulma sebagai bioindikator telah dikenal sejak lama. Dalam hal ini, penulis mulai dengan menganalisis literatur lama, terutama anekdotal dan mengintegrasikan bukti yang lebih modern dan berbasis ilmiah, yang masih agak jarang. Akhirnya, spesies dikelompokkan menjadi dua kelompok berdasarkan jumlah catatan yang secara jelas mengaitkannya dengan karakteristik tanah tertentu.

Spesies gulma yang jenis hubungannya sama dengan karakteristik tanah tertentu dilaporkan dalam tiga atau lebih sumber berbeda didefinisikan sebagai indikator 'sangat andal'. Spesies gulma yang hubungannya dilaporkan dalam dua sumber berbeda didefinisikan sebagai indikator 'dapat diandalkan'. Spesies gulma tercantum dalam 'tabel spesies bioindikator' yang ditunjukkan pada lampiran. Langkah kedua adalah mengembangkan metodologi yang memungkinkan petani dan manajer agroekosistem untuk mengekstraksi informasi terbaik tentang gulma sebagai bioindikator kondisi tanah dari pengambilan sampel lapangan khusus. Strategi pengambilan sampel yang disarankan di sini tidak dapat dianggap lengkap, tetapi merupakan kompromi yang baik antara upaya pengambilan sampel dan akurasi data. Untuk mendapatkan informasi yang lebih tepat tentang kondisi tanah, direkomendasikan penggunaan teknik pengujian tanah konvensional (Carlesi & Bàrberi, 2017).

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

1. "Deteksi dini kesuburan tanah salah satunya dapat dilakukan dengan menggunakan bioindikator yang ada di suatu ekosistem atau habitat yang memberikan respon terhadap perubahan tersebut. Penggunaan bioindikator sangat penting untuk memperlihatkan hubungan antara lingkungan biotik dengan abiotik. Kelompok organisme yang sensitif dapat dijadikan petunjuk bahwa mereka dipengaruhi oleh tekanan lingkungan akibat berbagai macam faktor". Terkait dengan hal itu, *Collembola* berfungsi sebagai bioindikator tanah. Jelaskan potensi *Collembola* sebagai bioindikator tanah!

2. "Bahan organik tanah sangat menentukan kelimpahan hewan tanah. Materi organik tanah merupakan sisa-sisa tumbuhan dan hewan organisme tanah, baik yang telah terdekomposisi maupun yang sedang terdekomposisi." Dalam implementasi pertanian, cara/teknik apa yang dapat dilakukan para petani untuk memastikan tersedianya bahan organik tanah? Jelaskan pendapat Anda!

BAB VI

BIOINDIKATOR KUALITAS UDARA

A. Pengantar

Selama beberapa dekade terakhir, polusi udara menjadi semakin serius. Peningkatan kuantitas dan kepadatan lalu lintas yang diiringi kemacetan, emisi gas limbah industri dan kendaraan di jalan, menyebabkan kualitas udara di sejumlah kota besar dan menengah secara bertahap menurun. Saat ini, kita tidak dapat hanya mengandalkan satu langkah untuk meningkatkan kualitas udara. Mendorong investasi untuk meningkatkan kualitas udara perlu dilakukan, namun pada saat yang sama kita hanya dapat melakukan pengujian ketat terhadap adanya polutan di atmosfer, untuk memahami kualitas udara dan dampaknya terhadap manusia (Cen, 2015).

Polusi udara mengacu pada jumlah zat berbahaya yang terkonsentrasi di atmosfer dan mengisi udara dalam waktu dan konsentrasi melebihi yang diizinkan. Penurunan kualitas udara, membawa pengaruh buruk secara langsung atau tidak langsung terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Polutan di udara dihasilkan oleh aktivitas manusia dan proses alami, namun pencemaran terutama mengacu pada polutan yang dihasilkan oleh aktivitas manusia termasuk produksi industri dan pertanian, kehidupan sehari-hari dan sarana transportasi. Beberapa polutan udara yang umum adalah SO_2 , partikel tersuspensi terutama $\text{PM}_{2.5}$, NO_x , CO , VOC (*Volatile Organic Compounds*/Senyawa Organik Volatile), logam berat, zat radioaktif, oksida fotokimia, dan lain-lain.

Monitoring udara berarti deteksi dini polutan udara, sumber polusi, dan bahan lainnya, untuk meramalkan masalah lingkungan dan untuk mencegah masalah lingkungan. Melalui pengamatan dan studi terus-menerus, orang menemukan bahwa beberapa tumbuhan ternyata menunjukkan beberapa reaksi dan respon terhadap gas berbahaya, yang dapat digunakan sebagai indikator biologis tertentu untuk memantau kondisi udara. Tumbuhan yang terdampak polusi yang berbeda akan menunjukkan gejala yang berbeda. Gejala-gejala

ini dapat digunakan untuk menilai jenis polutan di udara, dan memperkirakan rentang konsentrasinya sesuai dengan tingkat kerusakan tumbuhan dan waktu pencemaran (Conti & Cecchetti, 2001). Dibandingkan dengan metode pemantauan tradisional, menggunakan tumbuhan untuk memantau polutan udara adalah metode yang lebih ekonomis, sederhana, dan dapat diandalkan.

B. Lichen

Lichen adalah gabungan bakteri (Cyanobacterium) dan alga simbiotik, sebagian besar dapat bertahan pada kondisi lingkungan yang keras. Bentuk lichen adalah seperti kerak (sehingga disebut lumut kerak), tumbuh lebat pada pohon, batu dan tanah kosong. Tapi lumut peka terhadap SO_2 , H_2S dan polutan udara lainnya, dan bahkan sejumlah kecil zat beracun dapat mempengaruhi pertumbuhannya, dan menyebabkan kematian. Kita dapat menyelidiki spesies, jumlah, dan daerah penyebaran lichen di sekitar area yang terkontaminasi untuk memperkirakan polusi (Cen, 2015).

Lichen sangat sensitif terhadap polusi H_2S di udara. Karena lichen tidak memiliki akar, mereka menyerap banyak bahan mentahnya langsung dari udara dan uap air di sekitar mereka. Hal ini membuat mereka sangat sensitif terhadap polusi udara dan hujan asam dan karena lichen tidak memiliki cara untuk mengeluarkan polutan yang mereka serap, bahan-bahan ini tetap berada di dalam sel mereka. Karena polutan menumpuk di dalamnya, lichen dapat digunakan untuk memantau akumulasi polutan jangka panjang. Para ilmuwan mengumpulkan dan menganalisis lichen dekat sumber polusi untuk menentukan seberapa jauh polusi telah menyebar. Dibandingkan dengan indikator fisika-kimia, penggunaan lichee sebagai bioindikator tidak mahal untuk digunakan dalam mengevaluasi polusi udara. Lichen juga dapat digunakan untuk mengukur polutan unsur beracun dan logam radioaktif karena mereka mengikat zat-zat ini dalam benang jamur mereka di mana mereka memusatkan mereka dari waktu ke waktu. Para ilmuwan lingkungan kemudian dapat mengevaluasi akumulasi ini untuk menentukan sejarah udara lokal.

1. Keuntungan Penggunaan Lichen sebagai Bioindikator

Beberapa keuntungan penggunaan lichen sebagai bioindikator adalah sebagai berikut:

- a. Banyak spesies lichen memiliki rentang geografis yang luas, memungkinkan studi gradien polusi jarak jauh.
- b. Morfologi lichen tidak bervariasi dengan musim, dan akumulasi polutan dapat terjadi sepanjang tahun.
- c. Lichen biasanya berumur panjang.
- d. Pertukaran air dan gas di seluruh thallus lichen membuat mereka sensitif terhadap polusi.
- e. Lichen tidak memiliki akar dan tidak memiliki akses ke sumber nutrisi tanah dan bergantung pada endapan, rembesan air di atas permukaan substrat, atmosfer dan sumber nutrisi lain yang sangat encer. Dengan demikian, kandungan jaringan mereka sebagian besar mencerminkan sumber nutrisi di atmosfer dan kontaminan.
- f. Lichen tidak memiliki jaringan pelindung atau jenis sel yang diperlukan untuk menjaga kadar air internal tetap konstan.

Kebanyakan lichen yang melewati beberapa siklus pembasahan dan pengeringan selama sehari. Ketika terhidrasi, nutrisi dan kontaminan diserap di seluruh permukaan lichen. Selama dehidrasi, nutrisi dan banyak kontaminan terkonsentrasi dengan diubah menjadi bentuk *slow release*, yaitu diserap ke dinding sel, tertutup di dalam organel atau mengkristal di antara sel-sel. Selama hujan lebat, nutrisi dan polutan secara bertahap tercuci. Sebuah keseimbangan dinamis dengan demikian ada antara akumulasi/kehilangan nutrisi/pencemar atmosfer, yang membuat lichen menjadi alat analisis yang sensitif untuk mendeteksi perubahan kualitas udara (Pearson, 1993).

2. Metode Pengukuran Respon Lichen terhadap Polusi Udara

Menurut Sett dan Kundu (2016) metode yang paling banyak digunakan untuk mengukur respon lichen terhadap polusi udara adalah studi fumigasi dan gradien. Dasar pertimbangan melakukan metode analisis gradien terletak pada fakta karakteristik dari spesies yang terpengaruh bervariasi sesuai dengan gradien lingkungan. Studi semacam itu biasanya dilakukan sekitar sumber kontaminan yang ada atau yang diproyeksikan, dengan beban polutan diharapkan bervariasi dengan jarak dari sumber. Studi Gradien melibatkan pengamatan terhadap spesies yang terlihat cedera, seperti pemutihan, thallus mengalami deformasi, dan perubahan struktur komunitas, seperti kekayaan spesies, kelimpahan, atau penutupan/coverage serta

proses fisiologis seperti fotosintesis, aktivitas nitrogenase, serapan elemen, integritas membran (kebocoran elektrolit), kuantitas pigmen, degradasi, dan fluoresensi.

Metode gradien biasanya dirancang untuk memonitor secara alami kondisi yang terjadi pada suatu spesies di suatu wilayah. Ketika faktor iklim dan polusi menciptakan kondisi yang tidak menguntungkan untuk lichen, sangat mungkin untuk mengidentifikasi dan menggunakan spesies indikator yang terjadi secara alami. Mentransplantasi lichen merupakan metode alternatif itu dapat digunakan untuk menentukan efek polutan pada lichen dan photobionts mereka di daerah yang tercemar. Lichen dengan thalli bisa melekat pada penopang yang kemudian ditempatkan pada jarak yang berbeda dari sumber polusi.

Beberapa kesulitan mungkin dihadapi ketika studi gradien dilakukan seperti identifikasi spesies, bentuk spesies indikator yang sesuai, dan interpretasi data yang tepat menunjukkan bahwa pola yang diamati mencerminkan tekanan polusi dan bukan karena faktor biotik dan abiotik lainnya. Studi gradien lebih jauh dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tahap; yaitu (a) Dengan memetakan semua spesies yang ada di suatu area dan (b) dengan memindahkan lichen dari tempat yang tidak terkontaminasi ke yang terkontaminasi dan mengukur bioakumulasi polutan.

a. Pemetaan spesies berdasarkan kehadiran di area tertentu

Pemetaan kualitas udara di suatu area dapat dilakukan dengan mengikuti metode *Index of Atmospheric Purity* (IAP), berdasarkan jumlah (n), frekuensi (F) dan Toleransi kehadiran lumut di daerah yang diteliti. IAP dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$IAP = \sum F_i$$

Keterangan:

Di mana F adalah frekuensi (maks. 10) dari setiap spesies ke-i dihitung sebagai jumlah persegi panjang dalam satu kotak. Kotaknya adalah dari dimensi 30x50 cm masing-masing di mana suatu spesies tertentu muncul.

Nilai IAP dikelompokkan ke dalam lima level kualitas yang diberikan pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Tingkatan kualitas berdasarkan nilai IAP

Nilai IAP	Tingkat Polusi
$0 \leq \text{IAP} \leq 12,5$	Polusi sangat tinggi
$12,5 < \text{IAP} \leq 25$	Polusi tinggi
$25 < \text{IAP} \leq 37,5$	Polusi sedang
$37,5 < \text{IAP} \leq 50$	Polusi rendah
$\text{IAP} > 50$	Polusi sangat rendah

(Sumber: Sett & Kundu, 2016)

Suatu studi gabungan dengan pemetaan dan analisis lichen tingkat kuantitatif elemen jejak sedang dilakukan oleh Jeran *et al.* (2002) untuk pemantauan polusi udara.

b. Penggunaan metode transplantasi

Thalli dari lichen ditransplantasikan pada substrat yang sesuai dan daerah yang tercemar. Sampel diambil secara berkala dan diamati untuk kerusakan apa pun. Metode ini digunakan dalam studi bioakumulasi untuk mempelajari penyerapan, retensi, lokalisasi dan pelepasan, toleransi dan toksisitas polutan.

c. Studi fumigasi

Studi fumigasi sering dilakukan untuk mengetahui paparan polutan spesifik di bawah lingkungan yang kondisinya terkendali. Studi fumigasi melibatkan pengukuran variabel respons proses fisiologis yang dipilih. Proses kepekaan meliputi aktivitas, ketidakseimbangan K⁺, fotosintesis, dan status pigmen pernapasan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan untuk memberikan masukan untuk studi lapangan. Namun, bias mungkin lebih besar karena adanya paparan campuran polutan dan sifat dinamis dari kondisi lingkungan. Studi lapangan dengan pengasapan lichen dari daerah sekitar sumber polusi telah terbukti lebih bermanfaat dalam memprediksi potensi dampak dari sumber polusi pada berbagai spesies, karena memungkinkan pengamatan yang realistis secara lingkungan bagaimana perubahan fisiologis atau morfologis tertentu berkorelasi dengan polutan spesifik.

d. Mengukur (*sizing-up*) lichen

Ukuran lichen adalah indikator kualitas udara yang baik tergantung pada usia dan jumlah sinar matahari. Asumsi standar kondisi untuk pertumbuhan data dapat digunakan untuk menentukan udara kualitas. Hubungan antara ukuran dan kualitas udara sedang diberikan pada Tabel 6.2.

Tabel 6.2. Ukuran lichen dan kualitas udara

Ukuran (cm ²)	Tingkat kualitas udara
0-3	Miskin/buruk
4-6	Cukup
7-9	Baik
10-12	Sangat baik

(Sumber: Sett & Kundu, 2016)

3. Lichen sebagai Bioindikator Pencemaran Logam

Pb, Ni, Cu, Cr, dan Cd adalah beberapa logam dalam debu semen, yang dihasilkan oleh industri semen. Angin dan hujan menyebabkan debu semen menyebar dan bahan kimia yang terkait biasanya ditemukan di lumut, tanah, hewan, dan tanaman. Untuk mendeteksi polusi udara, lumut cenderung digunakan sebagai indikator. Karena kepekaan mereka terhadap berbagai faktor lingkungan, lumut dianggap sebagai biomonitor kualitas udara yang paling tepat selama 30 tahun terakhir (Asif, 2018; Conti & Cecchetti, 2001).

Lichen dianggap sebagai biomonitor yang paling andal menurut karakteristik fisiologis, morfologi, dan anatomi spesifik mereka. Perubahan kualitas udara dapat dideteksi oleh spesies lichen *epiphytic* yang sensitif terhadap pencemar udara. Sangat penting untuk melakukan penilaian suatu daerah yang seharusnya memiliki cukup spesies liche untuk memantau polusi udara (Asif, 2018).

a. Pengaruh SO₂ pada Lichen

Menurut Asif (2018) lichen sangat terpengaruh oleh oleh sulfur dioksida (SO₂). Peneliti telah menghitung bahwa lebih dari sepertiga dari Inggris dan Wales telah kehilangan hampir semua lichens epiphitiknya, sebagian besar karena emisi SO₂ dari pembangkit listrik tenaga batu bara. Di Siberia Utara yang sangat tercemar, jumlah spesies lichen telah turun dari 50 menjadi sekitar 3, dan pertumbuhan lichen pada umumnya berada pada sekitar 1 atau 2% atau tingkat normal, mengancam pola makan rusa; di Alaska ada kekhawatiran yang sama tentang pengurangan lichen dan sebagai sumber makanan bagi karibu.

Kerugian di bagian lain dunia mencerminkan semakin buruknya kualitas udara bumi dan kebutuhan akan bioindikator peringatan dini seperti lichen. Polutan ini memiliki sumber alami, seperti letusan gunung berapi dan bahan bakar. Sejauh ini sumber terbesar untuk

itu, bagaimanapun, adalah pembakaran bahan bakar fosil, emisi mobil, dan beberapa proses industri. Polutan dibawa ke atmosfer disimpan sebagai partikel kering atau sebagai gas sampai terjadinya hujan. Sulfur dioksida bergabung dengan uap air di atmosfer untuk membentuk asam sulfur (H_2SO_3) atau asam sulfat (H_2SO_4). Ketika ini terjadi dengan air hujan, hasilnya adalah hujan asam. Semua bentuk belerang ini berbahaya bagi lichen dan tanaman.

Lebih lanjut menurut Asif (2018) lichen juga menunjukkan kepekaan terhadap beberapa polutan lain, seperti logam berat dan ozon, tetapi untuk sebagian besar kerusakan lumut dapat dikaitkan dengan SO_2 . Efek polusi terhadap lichen tergantung pada pH substrat, permukaan tempat lichen tumbuh. Secara umum, substrat alkalin seperti kulit dasar atau batu kapur melawan keasaman pencemaran SO_2 . Ketika hujan asam jatuh pada substrat, satu jenis bentuk pertumbuhan lichen akan sering diganti dengan bentuk lain yang lebih toleran. Di daerah-daerah dengan lichen yang tinggi dapat ditemukan hanya di tempat-tempat seperti luka di pohon dan di dinding batu pasir, yang memiliki pH (dasar) tinggi.

C. Bryofita

Bryofita adalah tumbuhan yang tidak memiliki sistem vaskular dan sederhana baik secara morfologi maupun anatomis. Potensi pertumbuhan dalam bryofita tidak begitu terpolarisasi sebagai tanaman vaskular. Bryofita tumbuh di berbagai habitat terutama di tempat lembab di tanah, batu, batang dan ranting pohon dan batang pohon yang jatuh. Mereka mendapatkan nutrisi langsung dari zat terlarut dalam kelembaban udara. Beberapa zat mungkin diserap langsung dari substrat oleh difusi melalui sel-sel gametofit. Bryofita digunakan sebagai indikator yang dapat diandalkan dari polusi udara. Mereka dieksploitasi sebagai instrumen bryometers untuk mengukur polusi udara fitotoksik. Bryofita baik secara mandiri atau bersama dengan lumut dapat menjadi organisme berharga dalam mengembangkan *Index of Atmospheric Purity* (IAP) yang didasarkan pada jumlah, frekuensi-cakupan dan faktor resistensi spesies. Indeks ini dapat menyediakan gambaran yang adil tentang efek jangka panjang dari polusi di daerah tertentu.

Ada dua kategori bryofita sebagai respons terhadap polusi, yaitu (1) yang sangat sensitif terhadap polusi dan menunjukkan gejala-gejala cedera yang terlihat bahkan di hadapan sejumlah kecil polutan.

Ini berfungsi sebagai indikator yang baik tentang tingkat polusi dan juga sifat polutan. (2) yang memiliki kapasitas untuk menyerap dan menyimpan polutan dalam jumlah yang jauh lebih tinggi daripada yang diserap oleh kelompok tanaman lain yang tumbuh di habitat yang sama. Tanaman ini menjebak dan mencegah daur ulang polutan-polutan tersebut dalam ekosistem untuk periode waktu yang berbeda. Analisis tanaman semacam itu memberi gambaran yang adil tentang tingkat pencemaran logam (Govindaparyi *et al.*, 2010).

1. Efek polutan pada bryofita dan peran sebagai agen biomonitoring

Ada gejala menurunnya jumlah pemiskinan komunitas bryofita di dalam dan di sekitar kota-kota dan kawasan industri. Daerah pinggiran terdiri dari serangkaian habitat dengan berbagai substrat dan kelembapan air dan tunduk pada berbagai tingkat polusi. Bryofita yang menempati substrat tertentu tampak lebih sensitif terhadap polusi udara daripada yang lain. Bryofita telah menghilang dari lingkungan industri perkotaan karena kepekaannya terhadap udara yang tercemar. Keanekaragaman spesies di daerah yang tercemar tidak hanya berbeda dengan jarak dari sumber polusi tetapi juga dengan jenis substrat. (Govindaparyi *et al.*, 2010).

Ekspansi dan kurangnya regulasi lingkungan telah menyebabkan input besar berbagai polutan beracun ke atmosfer. Ada kebutuhan pemantauan kualitas udara terus menerus. Ini dicapai baik dengan konstruksi atau pekerjaan bioindikator/biomonitor. Bioindikator mengacu pada semua organisme yang menggambarkan kualitas lingkungan atas dasar perubahan morfologi; fisiologi dan lain-lain tetapi biomonitor memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif. Penggunaan organisme sebagai monitor lingkungan dikenal sebagai biomonitoring dan organisme yang dikenal sebagai biomonitor.

Organisme yang disukai adalah organisme yang mampu mengakumulasi polutan, tersedia sepanjang tahun, mudah ditangkap dan diidentifikasi, relatif tidak aktif dan kosmopolitan dalam distribusi. Akumulasi polutan mudah diukur oleh analisis organisme yang memberikan informasi tentang tingkat deposisi polutan. Lumut dan lumut juga, dianggap sebagai bahan tanaman yang paling tepat untuk mempelajari deposisi atmosfer logam berat.

Analisis kimia sangat bergantung pada waktu dan tempat pengambilan sampel. Jika polutan yang dilepaskan mudah tersebar,

konsentrasi mereka di atmosfer akan jatuh di bawah batas deteksi dan dengan demikian melarikan diri kehadiran mereka sedangkan bryofita memiliki kemampuan untuk memfasilitasi deteksi unsur-unsur yang hadir dalam konsentrasi yang sangat rendah. Lumut dapat disimpan selama beberapa tahun tanpa kerusakan yang nyata dan spesimen lama dapat dengan mudah dianalisis secara kimia. Jadi bryofita dapat berfungsi sebagai “Bank Spesimen Lingkungan”. Bryofita tumbuh di berbagai habitat dan memperoleh nutrisi dari zat terlarut dalam kelembaban udara. Substansi secara langsung diserap dari substrata oleh difusi melalui sel. Polutan mencapai dalam jaringan bryofita dari pengendapan kering dalam bentuk gas dan partikel. Zat-zat ini mudah terakumulasi di pabrik dan jumlahnya melebihi dari yang ada di lingkungan sekitarnya. Jadi bryofita menunjukkan adanya elemen dan gradien konsentrasinya di masing-masing substrata. Kualitas unik dari bryofita untuk mengakumulasi unsur-unsur adalah karena distribusi mereka yang luas, kemampuan untuk tumbuh di berbagai habitat, luas permukaan yang besar, dan kurangnya kutikula dan stomata dan sifat hijau dan ektohidrat alami dari tanaman.

2. Metode Pemantauan

Untuk memantau polusi udara secara keseluruhan oleh bryofita epifit, beberapa metode telah dikembangkan dan diterapkan dalam berbagai studi *in situ*. Bryophyta terrestrial terutama menjadi sasaran studi eksperimental, di mana pengaruh atmosfer deposisi pada spesies dan populasi diselidiki. Eksperimen ini terutama dilakukan dalam kerangka penelitian perubahan global dalam ekosistem Arktik dan tundra dan berfokus pada deposisi N dan fosfor. Penelitian eksperimental dibatasi untuk jangka waktu dua hingga empat tahun dan hasilnya sangat kontroversial, tergantung pada spesies dan ekosistem yang diamati.

Eksperimen jangka panjang atau program biomonitoring menggunakan bryofita terrestrial sebagai indikator reaktif masih jarang. Pengamatan gabungan dari data lingkungan yang diperoleh oleh perangkat pengukuran dan data biomonitoring (misalnya bryofita) selama periode panjang sangat dibutuhkan namun masih sangat jarang tersedia (Zechmeister *et al.*, 2007).

a. Metode survei

Metode ini menilai gradien kelimpahan atau kelimpahan individu atau spesies. Perubahan ini secara langsung berkaitan dengan

perubahan tingkat polutan. Survei dan perbandingan komunitas bryofita dari lokasi yang berbeda menunjukkan kuantitas polutan atau stres pada organisme. Survei periodik dilakukan pada bryofita asli di lokasi yang berbeda. Jumlah, frekuensi, dan kelimpahan spesies asli dan dominasi bentuk pertumbuhan dapat dibandingkan dengan catatan masa lalu, laporan, dan koleksi herbarium periodik. Hilangnya spesies yang sudah dilaporkan (sensitif) dan munculnya spesies baru (toleran) menunjukkan kondisi stres di lokasi yang dipelajari.

b. Metode transplantasi

Spesies bryofita ditransplantasikan secara in situ bersama dengan substrat asal, dari lingkungan yang tidak tercemar ke kondisi lingkungan yang secara ekologis kurang lebih sama tetapi tercemar untuk mendapatkan bukti rusaknya tumbuhan yang disebabkan oleh polusi. Spesies yang ditransplantasikan menunjukkan pola pertumbuhan tunas dan percabangan yang dimodifikasi dan pengendapan lilin di permukaan tanaman. Gejala umum adalah plasmolisis dan degradasi klorofil pada sel daun dan akhirnya tumbuhan kehilangan kemampuan untuk hidup kembali atau beregenerasi. Transplantasi dapat dilakukan dengan mengikuti tiga cara.

1) Transplantasi di tanah

Bryofita ditumbuhkan di petak-petak kecil, yang disiapkan di tanah pada tempat-tempat pencemaran terpilih dan beberapa titik petak yang tidak tercemar ditetapkan sebagai kontrol. Tingkat percabangan bagian-bagian tanaman, produksi tunas regeneratif basal, dan tingkat kelangsungan hidup dicatat secara berkala yang memberikan gambaran tentang tekanan pencemaran.

2) Metode kantung Moss

Kantung kain (ukuran 20 × 20 cm) disiapkan dengan jumlah bryofita yang sama. Kantung-kantung ini digantung di berbagai lokasi. Analisis berkala terkait tingkat dan kemampuan regenerasi sampel ini memberikan data tentang kecenderungan polusi. Bryofita yang diisikan dalam kantung dapat disimpan di badan air. Analisis bryofita ini menunjukkan tingkat pencemaran di badan air.

3) Bryometer

Ini berupa kotak tempat bryofita ditanam di ruangan lembab dengan substrat asli. Kotak memiliki sisi transparan yang dibuat dari kaca tipis, diberi lubang sehingga udara dan cahaya dapat melewati

tanaman di dalam kotak. Kotak-kotak disimpan di lokasi yang berbeda di area yang tercemar. Pengamatan berkala pada pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup bryofita menunjukkan kecenderungan polusi. Pola spora yang berkecambah dan pertumbuhan protonema akan mudah diamati di ruang lembab ini.

c. Metode *Phytosociological*

Perubahan *phytosociological* secara langsung berkaitan dengan perubahan tingkat kualitas udara yang ditunjukkan dalam *Index of Atmospheric Purity* (IAP). Pada metode ini, bryofita yang tumbuh di kulit pohon diperiksa sepanjang garis atau transek garis yang memiliki gradien polusi. Studi tentang frekuensi dan kelimpahan spesies dilakukan melalui sejumlah transek tersebar ke segala arah dan dengan jarak yang semakin jauh dari sumber pencemaran. *Index of Atmospheric Purity* (IAP) ditentukan atas dasar frekuensi dan faktor ketahanan spesies yang dapat memberikan gambaran yang benar tentang efek jangka panjang dari pencemaran di suatu tempat. Menurut Govindapyan et al, (2010). Nilai IAP dapat ditentukan dengan menerapkan rumus berikut:

$$IAP = \sum_n^1 (Q \times \frac{f}{10})$$

Keterangan:

n = jumlah total kehadiran spesies di suatu tempat

f = frekuensi penutupan spesies di setiap tempat

Q = faktor resisten

d. Metode ekofisiologis

Pada metode ini, bryofita terpapar pada konsentrasi polutan yang sudah diketahui sebelumnya. Paparan polutan dapat diberikan kepada tanaman di lapangan dengan fumigasi atau tanaman dapat dikultur dalam medium yang memiliki konsentrasi polutan dan logam berat yang berbeda. Pengamatan terhadap pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup, cedera/kerusakan organ tanaman, degradasi kloroplas, atau jenis pertumbuhan protonema yang tidak biasa lainnya pada tanaman dewasa menunjukkan tingkat toksisitas polutan. Metode ini berguna dalam menentukan tingkat toksisitas polutan dan tingkat toleransi spesies yang berbeda.

D. Pteridofita

Pteridofita (kelompok paku-pakuan) adalah indikator positif dari integritas hutan. Dianggap berada di antara tanaman darat paling awal muncul, pteridofita adalah kelompok yang terdiversifikasi secara global (Kreft *et al.*, 2010). Oleh karena itu, kelompok tumbuhan ini ada di mana-mana dan memiliki kombinasi atribut menguntungkan untuk studi bioindikator. Pertama, sebagian besar herbivora (vertebrata, serangga) menghindarinya. Kedua, mereka tidak memiliki mekanisme penyerbukan biotik atau *zoochory*. Akhirnya, spora pteridofita memungkinkan mereka menjadi pionir di habitat asli yang terisolasi dari lainnya. Oleh karena itu, distribusi mereka erat mencerminkan kondisi habitat abiotik, memfasilitasi analisis pola kelompok taksa lainnya. Memang, pteridofita adalah salah satu perintis biodiversitas; keanekaragaman hayati mereka telah ditunjukkan untuk memprediksi kekayaan spesies secara keseluruhan (Leal *et al.*, 2010), dan kehadiran atau ketiadaan dapat digunakan untuk membedakan pola floristik dari tipe hutan. Beberapa taksa atau kelompok pteridofita telah dipelajari di daerah dekat pemukiman, tetapi pengaruh gangguan masih sedikit dipelajari. Beberapa peneliti telah menyarankan bahwa efek panas sebagian dapat menjelaskan pola distribusi mereka (Daniel & Lecamp, 2004; Murakami *et al.*, 2005).

Berikut ini merupakan contoh pemilihan plot dan sampling lapangan yang mengacu pada Bergeron dan Pellerin (2014). Selama pengambilan sampel hutan, koordinat geografis dari semua titik pengambilan sampel pteridofita ditandai menggunakan perangkat GPS. Penutupan total pteridofita di setiap situs diperkirakan secara kasar untuk area seluas 100 m² berdasarkan tiga kelas, yaitu 0,1-15%, 16-50% dan 51-100%. Di setiap lokasi, dibuat plot sampel 10 m × 10 m. Pada setiap plot, kita perlu mencatat kehadiran semua spesies pteridofita. Kita juga harus memperkirakan total penutupan tempat oleh herba dan semak menggunakan 7 kelas: <1%, 1-5%, 6-25%, 26-40%, 41-60%, 61-80% dan 81-100%, dan mengukur diameter setinggi dada (*Diameter at Breast Height/DBH*) dari semua pohon (>1 cm DBH). DBH digunakan untuk menghitung total basal area per plot. Persentase keterbukaan kanopi dihitung dengan rata-rata empat bacaan dari sebuah densiometer bola model Lemmon C, satu dari setiap sudut plot. Proporsi batu di permukaan lantai hutan (kekakuan) diperkirakan secara visual (ukuran kelas masing-masing 20%). Ketebalan ufuk A (yaitu, mineral teratas bercampur dengan

materi yang dihaluskan) diukur dari lubang yang digali di sisi timur dan barat plot, dan sampel tanah dikumpulkan. Di laboratorium, sampel tanah dikering-anginkan dan disaring (mata saringan 2 mm).

Besarnya pH tanah dan konduktivitas listrik ditentukan dalam 1:10 suspensi tanah/air menggunakan pH Orion/konduktivitas meter bintang-4. Kita juga memperkirakan indeks kelembaban relatif topografi (*Topographic Relative Moisture Index/TRMI*) di lapangan, yang berkisar dari 0 (kebanyakan kondisi xeric) hingga 60 (kebanyakan kondisi higienis). TRMI dihitung dengan menjumlahkan skor yang terkait dengan posisi topografi, kecuraman, aspek, dan konfigurasi lereng dominan di plot. Selain itu, kita perlu mengevaluasi jumlah jenis mikro-landform (datar, depresi, gundukan tanah, kemiringan ke bawah, lereng tengah, kemiringan ke atas dan kemiringan curam) di plot menurut dua kelas, yaitu 1 jenis atau > 2 jenis. Akhirnya, untuk mempertimbangkan efek internal tepi, jarak ke area terbuka terdekat (misalnya, jalur, parit, jalan, padang rumput) diukur dan dikelompokkan dalam dua kelas, yaitu > 30 m atau < 30 m. Delapan puluh tujuh persen dari tepi internal terletak pada kurang dari 30 m berjalan setapaknya.

E. Tumbuhan Tingkat Tinggi

1. Respon Tumbuhan

Tumbuhan tidak dapat memilih dan memindahkan tempat tinggal mereka seperti hewan, dan dengan demikian menjalani hidupnya dengan menanggapi lingkungan sekitarnya. Setiap kali komponen lingkungan, seperti suhu, kadar air tanah, nutrisi, dan polutan udara, melebihi kisaran adaptasi atau menjadi terbatas, tanaman mengembangkan gejala atau pertumbuhan abnormal. Munculnya gejala atau pertumbuhan abnormal semacam itu merupakan indikator yang baik tentang bahaya pencemaran lingkungan pada manusia. Sejumlah polutan udara, seperti sulfur dioksida, nitrogen oksida, ozon, nitrat peroksikarat, halogen, dan hujan asam, dapat merusak tumbuhan. Oleh karena itu, tumbuhan menawarkan sistem alarm atau peringatan dini yang sangat baik untuk mendeteksi keberadaan konsentrasi polutan udara yang berlebihan dan sering memberikan bukti pertama bahwa udara tercemar. Respon tumbuhan, terutama gejala daun yang khas, telah lama digunakan sebagai indikator polutan udara. Selain itu, jumlah akumulasi logam juga telah digunakan sebagai bioindikator (Nouchi, 2002).

Prinsip dasar pemantauan polutan udara menggunakan tumbuhan adalah menggunakan efek biologis mereka untuk polutan udara. Dapat dikatakan, gejala kerusakan organ tumbuhan terutama daun, berkaitan dengan jenis, konsentrasi, dan waktu pengontakan polutan. Situasi polusi udara, khususnya jenis-jenis polutan di udara, dapat dievaluasi melalui jenis tumbuhan yang terluka atau mengalami kerusakan dan menunjukkan gejala-gejala tertentu. Selain itu, konsentrasi polutan dinilai berdasarkan jumlah tumbuhan yang terpapar dan waktu kontaminasi tumbuhan.

Polutan yang berasal dari udara memasuki tumbuhan melalui stomata daun. Daun adalah bagian penting dari tumbuhan, dan merupakan organ utama untuk fotosintesis dan transpirasi. Polutan udara secara langsung dapat merusak daun. Tingkat viktimisasi secara langsung berkaitan dengan apakah polusi udara masuk ke stomata atau tidak dan berapa banyak polutan yang masuk. Hal tersebut dimonitor dari gejala tanaman yang mana dan berapa banyak konsentrasi gas berbahaya (Pesch & Schroeder, 2006), khususnya (1) Memantau polusi udara menggunakan tumbuhan indikator untuk dijaga. Misalnya, menanam berbagai tumbuhan berbeda yang memiliki kepekaan, tidak hanya memperindah lingkungan tetapi juga memantau polusi. (2) Memperkirakan tingkat polusi udara melalui komunitas tumbuhan. Karena kepekaan tumbuhan berbeda terhadap pencemaran, maka reaksi berbagai jenis tumbuhan berbeda secara signifikan untuk setiap polusi udara.

Bentuk reaksi tumbuhan terhadap polutan udara teramati, meningkat sejalan dengan peningkatan akumulasi polutan. Pada tingkat paparan polutan rendah, belum ditemukan adanya tanda kerusakan secara signifikan bisa diamati. Bahkan tumbuhan dapat memanfaatkan polutan pada konsentrasi rendah, sebagai bahan nutrisi untuk pertumbuhan dan meningkatkan proses biologis tertentu. Sebaliknya pada tingkat paparan tertinggi, tumbuhan akan mati. Serangkaian kerusakan pada tumbuhan akan terjadi dengan semakin meningkatnya paparan, meliputi perubahan reaksi biokimia, respon fisiologis tanaman, kerusakan jaringan, dan kematian tumbuhan. Fenomena bahwa ada beberapa tumbuhan yang dapat memanfaatkan polutan udara, misalnya SO_2 sebagai nutrisi (fenomena *hormesis*). Kajian *hormesis* tumbuhan belum banyak dilakukan. Spesies bersifat *hormesis*, juga belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, kajian mengenai sifat *hormesis* tumbuhan ke depannya sangat perlu dilakukan.

Tabel 6.3. Gejala tanaman yang terancam punah oleh beberapa jenis polutan udara berbahaya.

Polutan udara	Mekanisme kerusakan	Area titik kerusakan	bentuk titik kerusakan	warna titik kerusakan	Umur dan tingkat daun yang rusak
SO ₂	Induksi plasmolisis sel spons dan sel palisade, kemudian mengecil atau roboh, dekomposisi klorofil	Umumnya tengah daun, kadang-kadang tepi daun	Titik tidak teratur, blok, batas yang jelas	Coklat, coklat kemerahan	Daun yang diperluas> daun tua dan daun dewasa> daun yang tidak dilipat
Fluoride	Induksi plasmolisis mesofil dan sel	Terutama daun dan batas daun	Berbentuk strip atau pita	Pucat coklat	Daun muda> daun dewasa> daun tua
O ₃	Merusak dinding sel pada jaringan palisade dan sel epidermis, mengoksidasi glukosa	Terutama permukaan daun	Belang-belang tebal dan tersebar	Cokelat, kuning	daun dewasa> daun muda> daun tua
Peroxyacyl nitrates(PAN)	Induksi daun sampai menyusut, kehilangan air, dan kemudian diisi ke udara	Terutama bilah balik, kadang-kadang ujung daun	Kaca, zona nekrotik	Keperakan putih, coklat, kecoklatan	Ujung daun muda dan daun tua yang rentan
NO ₂	Sel istirahat	Pulse	Spot tempat yang tidak teratur atau seluruh daun	Putih, kuning kecoklatan, coklat	Daun muda rentan
Chlorine and chloride	Merusak klorofil	Pulse	Batas point blok atau transisi	Klorosis berat, pemutihan	Daun yang matang rentan

(Sumber: Cen, 2015)

2. Pengamatan Kerusakan Tumbuhan

Menurut Singh et al (1991) dan Nugratani dan Prasetyawati (2010) Pengamatan kerusakan tumbuhan dapat dilakukan melalui pengamatan langsung (visual) terhadap gejala nekrotik (gejala kematian/kerusakan) daun serta organ lain pada tumbuhan.

a. Pengukuran *Air Pollutant Tolerance Index*/APTI pada Tumbuhan)

Salah satu yang dapat diukur adalah *Air Pollutant Tolerance Index* (APTI) dilakukan dengan cara mengukur berbagai variabel penting pada daun, yaitu jumlah klorofil, Ph, kadar air relatif, dan kadar asam askorbat.

1) Kadar air relatif

Kadar air relatif diketahui dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar air} = \frac{Wf - Wd}{Wt - Wd} \times 100$$

Keterangan:

Wf: berat segar daun

Wt: berat kering ensit (24 jam)

Wd: berat kering (dioven selama 48 jam dengan suhu 105⁰ C)

2) Pengukuran Kadar Klorofil Total

Tahap pengukuran kadar klorofil total, yaitu (1) menghancurkan daun segar sebanyak 0,5 gram lalu larutkan dalam 10 ml air destilasi. (2) mengambil sebanyak 2,5 ml, dicampur dengan 10 ml aseton, dan kemudian disaring. (3) *Optical density* disetting pada 645 nm (D645) dan 663 nm (D663). (4) menghitung kadar klorofil total dengan rumus:

$$Ct = 20,2(D645) + 8,02(D663)$$

$$TCH(\text{mg/g}) = 0,1Ct \times (\text{berat kering/berat basah})$$

3) Pengukuran pH

Langkah pengukuran pH, yaitu (1) Sebanyak 4 gram daun segar dihancurkan dalam air destilasi sebanyak 40 ml, lalu disaring. (2) Mengukur Ph ekstrak daun diukur menggunakan pH meter terkalibrasi pada pH 7.

4) Pengukuran kadar asam askorbat

Langkah pengukuran kadar asam askorbat, yaitu (1) Sebanyak 1 gram daun segar dilarutkan dalam 40 ml larutan ekstrak asam oksalat (5 g asam oksalat + 0.75 g NaEDTA dalam 1 L air destilasi).

(2) Larutan ekstrak disentrifuge dengan suhu 5°C. (3) Sebanyak 1 ml larutan standar dicampur dengan 5 ml larutan DCPIP (2.6. dichlorophenol-indophenol) untuk penetapan kolorimetrik. (4) Larutan diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 520 nm pada kurva standar.

5) Nilai APTI

Data-data yang terkumpul dari poin a sampai d dapat digunakan untuk menghitung besarnya nilai APTI, melalui rumus berikut (Singh *et al.*, 1991; Nugrahani & Prasetyawati, 2010):

$$\text{APTI} = \frac{[A(T+P)+R]}{10}$$

Keterangan:

A = asam askorbat (mg/g)

P = pH

T = total klorofil (mg/g)

R = kadar air relatif (%)

Hasil penghitungan dengan rumus dapat dicocokkan dengan kisaran penggolongan toleransi, yaitu 0-1 termasuk sangat sensitive, 1-16 termasuk sensitif; 17-29 termasuk sensitif sedang; dan 30-100 termasuk toleran (Gaikwad *et al.*, 2006).

b. Memperkirakan Pencemaran Menurut Kandungan Zat Beracun dalam Tanaman

Daun adalah organ utama untuk menyerap polutan atmosfer. Oleh karena itu, penentuan kandungan daun polutan dapat menjelaskan kontaminasi di daerah tersebut.

c. Analisis oleh *Tree Ring* (lingkar pohon/lingkar tahun)

Lingkar pohon dapat mencerminkan sejarah polusi beberapa tahun, lingkar pohon rata-rata terkontaminasi menyempit. Juga bahan lingkar ditentukan oleh X-ray, situasi polusi, tahun proporsi polusi serius dari kayu kecil.

d. Metode Pemantauan Lainnya

Perubahan fotosintesis dan indeks fisiologis lainnya dari tanaman dapat mencerminkan pencemaran lingkungan atmosfer, seperti penentuan fotosintesis tumbuhan untuk menghasilkan kapasitas oksigen dan kandungan klorofil a.

3. Lebah Madu sebagai Bioindikator Kualitas Lingkungan

Aktivitas manusia menghasilkan kontaminan dengan jumlah dan toksisitas yang sering melebihi kapasitas homeostatik lingkungan untuk membersihkan dirinya. Oleh karena itu, analisis sistematis dan pemantauan lingkungan semakin menjadi masalah yang mendesak. Oleh karena itu, analisis sistematis dan pemantauan lingkungan semakin menjadi masalah yang mendesak (Bargańska *et al.*, 2016). Menurut Asif (2018) lebah madu sangat mungkin digunakan untuk menentukan kualitas lingkungan untuk bioindikasi. Lebah madu adalah bioindikator efisien yang bereaksi dengan cepat terhadap berbagai faktor eksternal. Kasus pencemaran lingkungan dan udara atmosfer yang telah menyumbang ketidakseimbangan tingkat kesehatan, status kehidupan, dan kualitas penduduk dalam beberapa tahun terakhir, telah dimonitor. Masalah yang ada di lingkungan dimonitor dengan menentukan jejak di pabrik dan asal-usul hewan bersama dengan lebah madu dan manusia.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melihat Sebagai konsekuensi dari pengujian nuklir atmosfer, lebah telah dimonitor sebagai indikator radionuklida strontium 90 di lingkungan. Sejak 1970, dalam survei teritorial dan perkotaan, pencemaran lingkungan disebabkan oleh logam berat dan pestisida di daerah pedesaan (Asif, 2018). Lebah madu, berkat fitur morfologi mereka dan juga produknya, dianggap sebagai indikator pencemaran lingkungan yang baik oleh zat beracun, baik logam berat, unsur radioaktif, atau polutan organik yang persisten seperti pestisida. Lebah dapat membawa kembali ke sarang banyak kontaminan yang disimpan pada tumbuhan utilitarian. Pestisida yang digunakan dalam pertanian (terutama pada musim ketika kegiatan pertanian mencapai puncaknya) bukan hanya menjadi penyebab kematian lebah skala besar, tetapi juga bisa menjadi produk lebah. Kehadiran xenobiotik dalam produk ini dapat merusak kualitas dan sifat mereka, dan membahayakan kesehatan manusia (Bargańska *et al.*, 2016).

Hasil penelitian Zhelyazkova (2012) menyimpulkan bahwa sangat memungkinkan untuk mengasumsikan bahwa lebah madu (*Apis mellifera* L.) menanggapi perubahan di lingkungan mereka dan khususnya untuk peningkatan jumlah logam berat di tanah, udara, tanaman. Itu membuat mereka menjadi indikator yang andal dan memungkinkan penggunaannya dalam biomonitoring lingkungan. Sejalan dengan itu, menurut Skorbiowicz *et al* (2018) kesamaan

kontaminasi logam, bahkan pada jarak yang cukup jauh dari pusat-pusat industri dan area ekonomi yang digunakan secara intensif, telah menjadi minat banyak peneliti. Masalah bagaimana mengevaluasi keadaan lingkungan dengan bantuan organisme hidup telah menjadi bagian yang sangat penting dalam pengendalian lingkungan alam. Madu lebah (*Apis mellifera* L) adalah bioindikator yang baik karena terkait erat dengan lingkungan alam di mana ia hidup. Hasil penelitian menunjukkan adanya Cu, Cr Zn, Mn dan Fe pada semua sampel lebah. Peningkatan kandungan Cr dalam lebah juga ditemukan, yang mungkin merupakan hasil dari kehadiran unsur ini di lingkungan (udara, tanah, air, tanaman, serbuk sari) dan di agen impregnasi yang diterapkan untuk melindungi elemen kayu sarang lebah. Penelitian menunjukkan adanya variasi musiman logam pada tubuh lebah. Sumber utama logam dipelajari dalam sampel lebah tampaknya akibat banyaknya kendaraan bermotor, aktivitas industri, dan berkembangnya kegiatan ekonomi di daerah perkotaan. Perhitungan statistik menunjukkan sumber logam yang diteliti. Kajian terkait kandungan logam pada lebah dapat menjadi elemen penting dari biomonitoring perubahan lingkungan sebagai konsekuensi dari aktivitas antropogenik.

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

1. Hutan mengabsorpsi CO_2 melalui proses fotosintesis dan menyimpannya sebagai materi organik dalam biomassa tumbuhan. Pada permukaan bumi ini, kurang lebih terdapat 90% biomassa yang terdapat dalam hutan berbentuk kayu, dahan, daun, akar dan sampah hutan (serasah), hewan, dan jasad renik. Semakin banyak karbondioksida yang diserap oleh tumbuhan dalam bentuk biomasa karbon maka semakin besar pengaruh buruk *global warming* dapat ditekan. Jelaskan teknik pemanfaatan tumbuhan di hutan sebagai bioindikator kondisi udara!
2. Ruang terbuka hijau (RTH) sebagai kawasan penyerap emisi berperan dalam mengkonversi gas CO_2 menjadi O_2 . Karakteristik RTH dan vegetasi di dalamnya merupakan aspek penting bagi kepentingan masyarakat dalam penyerapan emisi CO_2 . Peran vegetasi pada RTH sebagai penyerap CO_2 di atmosfer menjadi

bagian penting untuk mengatasi pencemaran udara. Dalam hubungannya dengan bioindikator pencemaran udara, berikan langkah-langkah yang dapat dilakukan sebagai upaya memanfaatkan RTH dalam implementasi bioindikator kualitas udara!

BAB VII

BIOINDIKATOR KONDISI

EKOSISTEM SECARA UMUM

A. Pengantar

Di tingkat global, regional, dan lokal, perhatian besar muncul akibat hilangnya keanekaragaman hayati dan homogenisasi lanskap. Keberadaan keanekaragaman spesies yang lebih luas, keragaman genetik dan kompleksitas struktural ekosistem memungkinkan adaptasi ekosistem yang lebih besar dan lebih baik terhadap perubahan. Sebagai kebalikannya, ekosistem dengan keanekaragaman hayati yang lebih sedikit lebih rapuh dan rentan terhadap gangguan, fakta yang dapat mengubah integritas dan stabilitasnya dengan lebih mudah (Moreno *et al.*, 2018).

Pengelolaan hutan lestari adalah tujuan yang dipegang secara luas dan dalam beberapa kasus merupakan mandat yang diundangkan. Namun, menilai keberlanjutan merupakan tugas yang sangat rumit. Indikator biologi telah disarankan sebagai salah satu komponen dari strategi untuk menilai keberlanjutan (Venier & Pearce, 2004). Dalam konteks lokal, Indonesia memiliki berbagai macam ekosistem hutan (hutan hujan yang luar biasa). Hutan-hutan tersebut saat ini sangat terfragmentasi karena berbagai tekanan khususnya karena aktivitas manusia. Fragmen hutan dianggap sebagai salah satu tempat utama keanekaragaman hayati planet ini, itulah sebabnya perawatan mereka seharusnya menjadi prioritas bagi pemerintah kita. Fragmentasi dan degradasi habitat hutan mempengaruhi (kerentanan beberapa spesies tinggi) spesies yang sangat sensitif, mendorong penurunan serius keanekaragaman hayati.

Sebagai upaya menjaga kelestarian ekosistem hutan maka perlu mempertimbangkan tingkat konservasi spesies bioindikator dan pengembangan pengelolaan hutan berkelanjutan dari sumber daya alam. Hal yang perlu diperhatikan adalah menurut Dudley *et al* (2005) bahwa dalam prakteknya seringkali pemilihan bioindikator sering

dipengaruhi oleh minat khusus dari peneliti yang terlibat, daripada sebagai upaya untuk memilih bioindikator yang memberikan penilaian keseluruhan dan valid. Pemahaman yang lebih luas tentang keanekaragaman hayati menyiratkan pemilihan sekumpulan indikator yang akan memberi gambaran seluas mungkin tentang keadaan ekologi dan alam liar.

Berikut akan disampaikan beberapa bioindikator yang potensial berdasarkan tinjauan Maleque *et al* (2009). Tinjauan potensi bioindikator difokuskan ke beberapa kelompok arthropoda hutan. Kelompok arthropoda yang berbeda bereaksi secara berbeda terhadap pengelolaan hutan. Semut, kumbang carabid, dan laba-laba sering memberikan tanggapan skala lokal, gangguan pertumbuhan vegetasi yang disebabkan oleh penipisan dan dapat digunakan untuk menyimpulkan kesesuaian ekologi perawatan pengelolaan hutan. Kumbang kotoran dan ngengat merespon perubahan habitat yang disebabkan oleh fragmentasi hutan dan dapat menunjukkan kesesuaian teknik pengelolaan hutan tingkat lansekap. Kumbang kupu-kupu dan *cerambycid* merespon sangat positif terhadap keberadaan tanaman herba dan pohon *understory* dan dapat digunakan untuk menyimpulkan integritas perawatan penipisan dalam pengelolaan hutan. Lalat Syrphid, yang merupakan selebaran kuat yang terkait dengan kompleksitas vegetasi, dapat digunakan sebagai bioindikator praktik pengelolaan hutan tingkat lansekap.

B. Arthropoda yang Digunakan Secara Frequent

1. Semut

Semut telah digunakan secara luas sebagai efektif bioindikator gangguan untuk manajemen ekosistem dan restorasi keanekaragaman hayati berkenaan dengan kepentingan eko-fungsional mereka dan sensitivitas tinggi terhadap gangguan ekosistem yang ditimbulkan dengan menipisnya hutan, invasi spesies, kebakaran hutan, konversi hutan, fragmentasi hutan, dan bentuk-bentuk gangguan lainnya.

2. Kupu-kupu dan ngengat

Kupu-kupu telah digunakan sebagai indikator ekosistem yang sehat karena mereka memiliki asosiasi yang kuat dengan variabel habitat seperti kondisi cerah, ladang penuh bunga, padang rumput, daerah perbukitan, tepi hutan, dan kelimpahan tanaman herba. Pemantauan kelimpahan kupu-kupu dapat menunjukkan keberadaan

seminatural kondisi; khususnya, kelimpahan bunga, understory herba penutup, dan keragaman vegetasi yang telah ditemukan untuk mempromosikan keragaman kupu-kupu dalam suatu ekosistem. Hal ini mungkin karena kekayaan spesies kupu-kupu dikaitkan dengan kekayaan jenis tumbuhan vascular, kekayaan spesies tumbuhan nektar, dan kekayaan spesies tumbuhan herba. Oleh karena itu, pemeliharaan penduduk asli vegetasi *understory* dan kondisi padang rumput melalui praktik kehutanan harus memastikan kupu-kupu konservasi, bahkan di hutan tanaman conifer.

Ngengat juga telah digunakan sebagai bioindikator selama vegetasi pemulihan setelah gangguan lingkungan. Beberapa ngengat keluarga/subfamili (misal Arctiinae, Catocalinae, Heliiothinae, Noctuidae, Hermeniidae, dan Phycitinae) menanggapi secara positif gangguan, sementara yang lain (misal, Ennominae, Geometrinae, Epipaschiinae, Lymantriidae, dan Anthelidae) merespon negatif terhadap gangguan. Tanggapan yang berbeda ini untuk perubahan lingkungan membuat mereka bioindikator yang sesuai.

3. *Carabid beetles*

Penggunaan carabid atau kumbang tanah bisa efektif karena biaya karena mudah sampel, dan dengan demikian sering digunakan sebagai indikator perubahan ekosistem di padang rumput dan hutan boreal. *Carabid beetles* bisa digunakan untuk menyimpulkan intensitas gangguan skala lokal. Fragmentasi hutan mengurangi jumlah spesies carabid berbadan besar yang tidak menyebar dengan baik, sementara itu jumlah mereka meningkat di beberapa jenis non-hutan. Karenanya, carabid dapat digunakan untuk mengindikasikan gangguan hutan yang disebabkan oleh fragmentasi. Peneliti menemukan bahwa pertanian yang lanskapnya disederhanakan mendukung kekayaan spesies carabid yang lebih tinggi, tetapi tidak mengandung atau beberapa spesies berbadan besar (misalnya, *Carabus* spp.), Hal ini menunjukkan bahwa intensitas rendah pada padang rumput seminatural dan hutan seminatural seharusnya dipertahankan dalam lanskap pertanian berintensitas tinggi untuk melestarikan komposisi komunitas carabid pada skala lanskap.

4. *Kumbang Cerambycid*

Larva *cerambycid* sering tergantung pada kayu dalam berbagai kondisi, sementara yang dewasa adalah pengumpan tanaman dan penyerbuk di ekosistem hutan yang beragam, dan dengan demikian

telah menjadi kelompok serangga sasaran untuk penelitian keanekaragaman hayati hutan. Kumbang *cerambycid* berasosiasi dengan tumbuhan berbunga, material kayu kasar, dan pohon tua (yaitu sisa-sisa bekas hutan tua dalam perkebunan konifer) di ekosistem hutan subtropis. Spesifisitas habitat dan kunci identifikasi sederhana membuat indikator kumbang *cerambycid* sesuai perubahan ekosistem hutan.

5. Kumbang kotoran

Kumbang kotoran tersebar luas di hampir semua bentang alam, termasuk gurun, lahan pertanian, hutan, dan padang rumput. Selain kotoran dan bangkai, beberapa memakan jamur, daun yang membusuk, dan buah-buahan. Berdasarkan karakteristik ini, kumbang kotoran dianggap sebagai takson fokus ideal untuk keanekaragaman hayati pemantauan. Kumbang kotoran bisa digunakan sebagai bioindikator yang sangat baik dari modifikasi hutan, fragmentasi, tebang habis, dan pengurangan dampak penebangan, terutama di daerah tropis.

6. Laba-laba

Laba-laba telah sukses digunakan sebagai bioindikator dalam praktik pengelolaan hutan karena mereka dapat dengan mudah diidentifikasi dan memiliki respon berbeda terhadap gangguan alami dan antropogenik. Laba-laba bioindikator dari perubahan ekosistem yang disebabkan oleh tebang habis, kebakaran hutan, perkembangan vegetasi, dan kompleksitas tegakan hutan Laba-laba dengan kemampuan penyebaran tinggi dapat bertahan di vegetasi yang terisolasi, sementara spesies dengan kemampuan penyebaran yang buruk dapat hilang dari tanah yang kecil dan sangat terisolasi. Variabel respons ini membuat laba-laba menjadi baik indikator gangguan habitat akibat konversi hutan dan fragmentasi.

7. Syrphid terbang

Distribusi geografis yang luas dan lingkungan yang sesuai merupakan variabel penting saat larva membuat syrphid lalat berpotensi bioindikator yang baik. Lalat syrphid diakui memiliki tanggapan yang berbeda di antara hutan sekunder muda, campuran hutan, dan hutan tua. Hutan harus nilai bioindikator potensial dalam membandingkan keanekaragaman hayati berbagai habitat hutan. Dalam skala lokal, lalat syrphid adalah fitur indikator habitat structural karena kekayaan spesies dan keragaman lalat syrphid

berkorelasi positif dengan kompleksitas struktural berdiri vertikal dan vegetasi lapisan tanah. Keragaman lalat syrphid meningkat hanya setelah tebang habis tetapi menurun saat usia tegakan. Mobilitas yang tinggi lalat syrphid dewasa membuat mereka alat yang paling cocok untuk menilai keragaman hayati tingkat lanskap.

8. Tawon parasit

Karena posisi trofiknya yang tinggi, biologi kompleks, dan rentang inang sempit, persyaratan habitat untuk tawon parasit adalah kompleks dan khusus, dan mereka baru-baru ini digunakan sebagai bioindikator untuk habitat hutan. Peneliti menemukan bahwa parasitoid lebih berlimpah di habitat hutan campuran yang kaya spesies (terdiri dari atas pohon berdaun lebar dan kekayaan spesies pohon tinggi) daripada di hutan jenis konifer pada skala lanskap. Kedua hutan jenis dan karakteristik kayu mati memiliki efek yang lebih besar pada kumpulan parasitoid, menunjukkan bahwa pemeliharaan keanekaragaman habitat kayu mati adalah penting untuk konservasi parasitoid.

Pengumpulan parasitoid di antara jenis hutan yang berbeda, seperti padang alang-alang setelah kebakaran hutan, perkebunan muda dan dewasa *Acacia mangium*, hutan sekunder muda, dan hutan sekunder tua di dataran rendah Kalimantan Timur, Indonesia, dan menemukan bahwa pemantauan keragaman parasitoid dapat menunjukkan tahap pemulihan tegakan perkebunan.

9. Nyamuk

Data dari 20 survei nyamuk yang dilakukan di daerah hutan tropis dianalisis dengan menggunakan prosedur statistik multivariat (analisis korespondensi dan analisis kluster). Hasilnya ditafsirkan dalam kaitannya dengan tingkat degradasi yang dilaporkan untuk setiap hutan di lokasi pengumpulan data, memungkinkan pemilihan spesies atau kelompok spesies yang bertindak sebagai indikator yang baik dari perubahan lingkungan lokal. Dengan pendekatan ini, berbagai lokasi yang berbeda di sepanjang gradien modifikasi antropogenik berkorelasi dengan nyamuk tertentu. Model yang dihasilkan memungkinkan untuk mengklasifikasikan jenis kayu yang berbeda menurut status pengawetan mereka, dengan menggunakan spesies nyamuk yang ada. Empat nyamuk bioindikator untuk tingkat degradasi hutan tertentu di Brasil diusulkan, yaitu *Kerteszia*, *Aedes scapularis*, *Mansoniini* dan *Haemagogus* (Dorvillé, 1996).

C. Penggunaan Fungsi Ekosistem dan Beberapa Kelompok Taksonomi Jamak

Beberapa kelompok artropoda memiliki arti fungsional yang telah digunakan sebagai indikator degradasi atau peningkatan peran ekologi di hutan. Secara khusus, kelimpahan penyerbuk dan musuh alami (parasitoid dan predator) dapat digunakan untuk menunjukkan peraturan untuk pertanian dan kehutanan. Hewan penyerbuk berkontribusi sekitar sepertiga dari produksi tanaman, dan 60–90% spesies tanaman membutuhkan suatu hewan penyerbuk. Penyerbuk menanggapi secara kuat perubahan ekosistem dan mereka kehilangan dapat memiliki konsekuensi negatif untuk reproduksi tanaman.

Spesies *bumblebee* meningkat seiring dengan peningkatan keanekaragaman tumbuhan, tetapi menurun dengan peningkatan ternak merumput. Di lanskap hutan-lahan pertanian campuran, hasil tanaman yang diserbuki oleh hewan mungkin menurun karena penurunan penyerbuk yang tinggal di hutan. Misalnya, *bumblebee* yang tinggal di hutan (yaitu, *Bombus ardens sakagami* dan *B. sapporoensis hypocrite*) telah dilaporkan sebagai penyerbuk utama di Jepang. Pemantauan kelimpahan *bumblebee* dapat menjadi indikasi keberhasilan penyerbukan dan hasil tanaman. Penyerbuk hutan yang tinggal di sana meningkatkan hasil kopi.

Banyak musuh alami juga bisa digunakan sebagai bioindikator ekosistem-ekosistem. Hubungan fungsional antara parasitoid dan herbivora host sangat bergantung pada kepadatan, distribusi, dan faktor-faktor yang berhubungan dengan habitat seperti struktur vegetasi dan tempat mencari makan untuk serangga herbivora. Selain itu, keanekaragaman spesies tanaman dan struktur lanskap habitat secara langsung mempengaruhi ketergantungan tanaman herbivora, dan secara tidak langsung mempengaruhi predator herbivora. Umumnya kompleks lanskap dengan mosaik tanaman yang terhubung dengan baik, mendukung kelimpahan dan makanan musuh yang lebih tinggi.

Satu kelompok spesies, satu takson, atau satu grup fungsional tidak dapat digunakan sebagai pengganti untuk keseluruhan keanekaragaman hayati karena spesies yang berbeda dan kelompok spesies merespon secara berbeda terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu, kelompok taksonomi jamak telah banyak digunakan sebagai indikator keanekaragaman hayati secara keseluruhan. Peneliti

telah mempelajari keragaman lima organisme yang berbeda kelompok taksonomi, tanaman vaskular, kupu-kupu, belalang, gastropoda, dan *carabid beetles*, yang tidak perbedaannya ada kelompok spesies tunggal yang diwakili secara keseluruhan. Peneliti menemukan bahwa hanya hutan bryofita dan *hoverflies saproxylic* berhubungan satu sama lain ketika mereka membandingkan lima kelompok taksonomi, bryophyta, tanaman vaskular, laba-laba, *hoverflies*, dan burung.

Peneliti hanya menemukan korelasi yang lemah antara empat kelompok taksonomi (kumbang, polipora, burung, dan tanaman vaskular), menyarankan bahwa kelompok taksonomi tunggal mungkin bukan bioindikator yang cocok dari semua spesies yang tersisa di ekosistem. Umumnya kelompok taksonomi adalah bioindikator yang lebih baik dalam daun hutan berdaun lebar di daerah beriklim dingin di Jepang. Temuan ini menunjukkan bahwa beberapa taksonomi yang berbeda harus digunakan untuk menilai keseluruhan keanekaragaman hayati dari setiap tipe hutan. Kelemahannya adalah meskipun kelompok taksonomi jamak telah dilaporkan memiliki potensi besar sebagai bioindikator, proses taksonomi jamak membutuhkan waktu dan sumber daya. Padahal, penilaian bioindikator haruslah hemat biaya dan mudah dieksekusi. Penggunaan bioindikator taksonomi jamak hanya mungkin layak ketika ahli taksonomi yang terampil, dukungan keuangan, dan fasilitas teknis yang memadai tersedia.

Sungai di banyak negara merupakan satu-satunya habitat akuatik alami. Habitat riparian menyediakan makanan dan sumber daya penampungan bagi banyak spesies, mereka bertindak sebagai koridor biologis, terbukti sangat penting untuk keanekaragaman hayati pada skala yang berbeda. Namun, daerah-daerah ini menderita dari aktivitas manusia melalui perubahan dalam penggunaan lahan, fragmentasi habitat, erosi, saluranisasi, atau penurunan kualitas air. Untuk menilai kualitas dan integritas ekologi sungai dan habitat riparian, perlu untuk mengembangkan metodologi standar. Indikator dapat merangkum atau mengelompokkan data lingkungan yang kompleks, memberikan gambaran global tentang keanekaragaman hayati dan ancamannya. Invertebrata, tanaman, atau ikan biasanya digunakan, tetapi hal ini hanya fokus pada sungai itu sendiri, mengabaikan ekosistem riparian.

D. Penggunaan Burung Sebagai Bioindikator

Hubungan spesies-lingkungan burung terbukti menjadi indikator yang baik untuk habitat riparian sungai Mediterania (Godinho *et al.*, 2010) dan dengan demikian dapat digunakan sebagai model untuk menilai kualitas, gangguan yang relevan, dan efisiensi proses restorasi. Survei burung dilakukan pada skala ruang dan waktu yang berbeda menggunakan metode pengukuran titik standar. Beberapa aspek berbeda dari variasi komunitas burung riparian dinilai, diantaranya (1) sepanjang gradien kompleksitas vegetasi menurun, (2) sepanjang gradien hulu-hilir, (3) lanskap sekitarnya yang berbeda, (4) waktu, (5) status manajemen, (6) waktu dan status manajemen, dan (7) sebelum dan sesudah rehabilitasi sungai (Roché *et al.*, 2010).

1. Generasi informasi ekofisiografi untuk mengembangkan model

Model ini didasarkan pada variabel topografi dan ekologi. Variabel topografi, ketinggian, kemiringan dan eksposur digunakan untuk mengevaluasi parameter ini menggunakan resolusi spasial digital 25 x 25 m model elevasi. Kategorisasi ketinggian didasarkan pada ketinggian di atas permukaan laut (dalam tiga interval atau kategori, yaitu <895 mdpl, 895-1175 mdpl, dan >1175 mdpl). Kemiringan dikategorikan dalam lima kategori, yaitu <15%, 15-30%, 30-45%, 45-60%, dan > 60%, dalam fungsi dari jenis pengelolaan vegetasi, dan eksposur yang dikategorikan menjadi tiga kategori, yaitu naungan, parsial-teduh, dan cerah.

Dalam kaitannya dengan variabel lingkungan, pekerjaan kartografi memungkinkan kita untuk mengidentifikasi delapan jenis penggunaan lahan: perkotaan/pemukiman, padang rumput, semak belukar, perkebunan, dan hutan. Karakteristik dari empat tipe hutan yang disarankan untuk mengevaluasi perbedaan dalam tiga strata kanopi yang dirujuk, yaitu Dominan (lebih dari 75% dari dedaunan yang tersinari matahari), kodominan (antara 50 -75% dari dedaunan yang tersinari matahari), sedang (antara 25-50% dari dedaunan yang tersinari matahari), dan delated (kurang dari 25% puncak pohon yang terbakar matahari)

2. Generasi informasi ekofisiografi Inventarisasi burung

Inventarisasi burung dilakukan menggunakan metode stasiun "dengar". Lima puluh stasiun dengar melingkar dengan radius 20 m didirikan di dalam hutan di daerah penelitian, dipisahkan pada jarak

250 m. Untuk menghilangkan efek tepi, pengumpulan data kurang dari 30 m dari sumbu jalan dilewati (Moreno *et al.*, 2010). Inventarisasi dilakukan dengan mencatat keberadaan burung di setiap stasiun dengar yang sesuai dengan cara mendengarkan atau menonton mereka. Beberapa burung telah ditetapkan sebagai bioindikator hutan dalam hal keseimbangan dan keanekaragaman hayati yang tinggi, karena spesifisitas mereka dalam habitat.

3. Analisis statistik

Analisis statistik didasarkan pada pemodelan logistik binomial, yang hasilnya ditafsirkan sebagai probabilitas (p) untuk prediksi keragaman burung yang tinggi, menurut berbagai variabel independen (prediktor). Pemilihan model ini dibenarkan dengan memperoleh tidak hanya probabilitas suatu peristiwa, tetapi juga pengaruh atau kepentingan relatif dari variabel dalam model. Teknik ini lebih kuat dan akurat daripada teknik statistik lainnya ketika kondisi normal tidak terpenuhi. Hasilnya akan menjadi probabilitas bahwa suatu area atau habitat potensial dikaitkan dengan keberadaan keragaman yang tinggi.

Soal Pengayaan Kompetensi!

Anda dapat memperdalam wawasan atau mengukur pengetahuan tentang bahasan ini, dengan menjawab atau mendiskusikan beberapa pertanyaan berikut.

1. Jelaskan pengaruh paparan kimia pada gangguan sistem endokrin hewan air? Untuk kajian ini, Anda disarankan membaca artikel yang dipublikasi oleh Mahmudati dan Husamah (2017) berjudul *Effect of Chemical Exposure on Endocrine System Disorder (Article Review)* (In Proceedings of Surabaya International Physiology Seminar/SIPS 2017, pages 220-225).
2. Serangga, misalnya Kupu-kupu dan lebah pada umumnya mempunyai peranan yang sangat penting bagi ekosistem, baik secara langsung maupun tidak langsung. Tanpa kehadiran suatu serangga, maka kehidupan suatu ekosistem akan terganggu dan tidak akan mencapai suatu keseimbangan. Dapatkah kupu-kupu dan lebah digunakan sebagai bioindikator? Jelaskan!

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander D.E. (1999) Bioaccumulation, bioconcentration, biomagnification. In: Environmental Geology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht
- Andrew, G. (2015). The role of bioassessment in restoration. *Ecesis*, 25(4), 1-11.
- Anderson, M. (2009). Evaluation of bioindicators and structural attributes as indicators of old-growth forests. Undergraduate Thesis (Natural Resources Conservation, B.Sc.) CONS 498. University of British Columbia Vancouver.
- Araújo, F. G., Morado, C. N., Parente, T. T. E., Paumgarten, F. J. R, & Gomes, I. D. (2018). Biomarkers and bioindicators of the environmental condition using a fish species (*Pimelodus maculatus* Lacepède, 1803) in a tropical reservoir in Southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 78(2), 351-359. Epub August 17, 2017. <https://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.167209>
- Asif, N., Malik, M. F. & Chaudhry, F. N. A. (2018). Review of on environmental pollution bioindicators. *Pollution*, 4(1): 111-118. DOI: 10.22059/poll.2017.237440.296
- Balls, M., Goldberg, A. M., Fentem, J. H., Broadhead, C. L., Burch, R. L., Festing, M. F. W., Frazier, J. M., Hendriksen, C. F. M., Jennings, M., Van Der Kamp, M. D. O., Borton, D. B., Rowan, A. N., Russell, C., Russell, W. M. S., Spielmann, H., Stephens, M. L., Stokes, W. S., Straughan, D. W., Yager, J. D., Zurlo, J. & Van Zutphen, B. F. M. (1995) The three Rs: The way forward - The report and recommendations of ECVAM workshop 11. *ATLA Alternatives to Laboratory Animals*, 23, 838-866.
- Bargańska, Z., Celebioda, M. & Namieczenik, J. (2016) Honey bees and their products: Bioindicators of environmental contamination, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(3), 235-248, DOI: 10.1080/10643389.2015.1078220

- Barrilli, G.H.C., Rocha, O., Negreiros, N.F. & Verani, J.R., (2015). Influence of environmental quality of the tributaries of the Monjolinho River on the relative condition factor (Kn) of the local ichthyofauna. *Biota Neotropica*, 15(1), e20140107. <http://dx.doi.org/10.1590/1676-06032015010714>.
- Bergeron, A. & Pellerin, S. (2014). Pteridophytes as indicators of urban forest integrity. *Ecological Indicators*, 38, 40–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.015>.
- Bhat, S. (2013). Ecotoxicology & impact on biodiversity. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2(2), 1-18.
- Biggs, B. J. F. (2000). New Zealand Periphyton Guideline: Detecting, Monitoring and Managing Enrichment of Streams. repared for the Ministry for the Environment. NIWA, Christchurch.
- Biggs, B.J.F. & Kilroy, C. (2000). Stream periphyton monitoring manual. Prepared for the New Zealand Ministry for the Environment. NIWA, Christchurch.
- Biggs, B.J.F. & Kilroy, C. (2004). Periphyton. Pp. 15.1–15.21 in Harding, J.S.; Mosley, P.; Pearson, C.; Sorrell, B. (Eds): Freshwaters of New Zealand. New Zealand Hydrological Society and New Zealand Limnological Society: Christchurch.
- Blaise, C. & Féraud, J. (Eds.) (2005) *Small-scale freshwater toxicity investigations*, Springer.
- Bolker BM, Brooks ME, Clark CJ, Geange SW, Poulsen JR, Stevens MHH, & et al. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends Ecol Evol*. 24(3):127–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>.
- Borgå, K. (2013). Ecotoxicology: Bioaccumulation. In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.00765-X>.
- Brown, R. E., Mathieson, W. B., Stapleton, J., & Neumann, P. E. (1999). Maternal behavior in female C57BL/6J and DBA/2J inbred mice. *Physiology & Behavior*, 67(4), 599-605. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9384\(99\)00109-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9384(99)00109-2)
- Brown, R. E., & McFarland, D. J. (1979). Interaction of hunger and sexual motivation in the male rat: A time-sharing approach. *Animal Behaviour*, 27(3), 887-896. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-3472\(79\)90026-5](http://dx.doi.org/10.1016/0003-3472(79)90026-5)

- Brown, R. & Bolivar, B. (2013). What are “Behavioural Bioassays” and why are they important in neuroscience? Dalhousie University. Retrieve from <http://www.uonbi.ac.ke/projects/ibro/images/documents/2014/behavioural.pdf>.
- Brown, R. & Bolivar, B. (2018). The importance of behavioural bioassays in neuroscience. *Journal of Neuroscience Methods*, 300, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2017.05.022>
- Cappenberg, H. A. W. (2011). Kelimpahan dan keragaman megabentos di perairan Teluk Ambon. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 37(2), 277-294.
- Carlesi, C. & Bàrberi, B. (2017): Weeds as soil bioindicators: How to sample and use data. FertilCrop Technical Note. Download at www.fertilcrop.net
- Casarrubea, M., Davies, C., Faulisi, F., Pierucci, M., Colangeli, R., Partridge, L., ... Di Giovanni, G. (2015). Acute nicotine induces anxiety and disrupts temporal pattern organization of rat exploratory behavior in hole-board: a potential role for the lateral habenula. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 9, 197. <http://doi.org/10.3389/fncel.2015.00197>.
- Cen, S. (2015). Biological monitoring of air pollutants and its influence on human beings. *The Open Biomedical Engineering Journal*, 9, 219–223. <http://doi.org/10.2174/1874120701509010219>
- Ceschin, S., Zuccarello, V. & Caneva, G. (2010) Role of macrophyte communities as bioindicators of water quality: Application on the Tiber River basin (Italy), Plant Biosystems. *An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 144:3, 528-536, DOI: 10.1080/11263500903429221
- Chovanec, A., Hofer, R., & Schiemer., F. (2003). Chapter 18 Fish as bioindicators. In B.A. Markert, A.M. Breure, H.G. Zechmeister (Eds). (2003). *Bioindicators & Biomonitoring: Principles, Concepts and Applications*. Elsevier Publisher. [https://doi.org/10.1016/S0927-5215\(03\)80148-0](https://doi.org/10.1016/S0927-5215(03)80148-0)
- Ciecierska, H., & Kolada, A. (2014). ESMI: a macrophyte index for assessing the ecological status of lakes. *Environ. Monit Assess*, 186, 5501-5517.
- Cobb, D. & Frydenborg, R. (2018). Bioassessment of Florida’s aquatic ecosystems. Florida, US: Partners in Florida’s Bioassessment

- Programs. Division of Water Resource Management Stormwater/ Nonpoint Source Management Section Bioassessment Program.
- Comin, F. A., Romero, J. A., Astorga, V. & García, C. (1997). Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff. *Water Sci. Technol.*, 35, 255-261.
- Conti M. E. & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: Lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review. *Environ. Pollut.*, 114(3):471–492. doi: 10.1016/S0269-7491(00)00224-4.
- Dallinger R., & Höckner, M. (2013). Evolutionary concepts in ecotoxicology: tracing the genetic background of differential cadmium sensitivities in invertebrate lineages. *Ecotoxicology*, 22(5):767-78. doi: 10.1007/s10646-013-1071-z.
- Daniel, H., Lecamp, E., 2004. Distribution of three indigenous fern species along a rural–urban gradient in the city of Angers, France. *Urban For. Urban Green*. 3, 19–27.
- Demars, B. O. L. & Harper, D. M. (2005). Distribution of aquatic vascular plants in lowland rivers: separating the effects of local environmental conditions, longitudinal connectivity and river basin isolation. *Freshwat. Biol.*, 50, 418-437.
- Demirezen, D. & Aksoy, A. (2004). Accumulation of heavy metals in *Typha angustifolia* (L.) and *Potamogeton pectinatus* (L.) living in sulta Marsh (Kayseri, Turkey). *Chemosphere*, 56, 685-696.
- Department of Environment and Science. (2018). Ecosystem health indicators. The State of Queensland, Australia.
- Dorvillé, L. F. M. (1996) Mosquitoes as bioindicators of forest degradation in Southeastern Brazil, a statistical evaluation of published data in the literature, studies on neotropical. *Fauna and Environment*, 31(2), 68-78, DOI: 10.1076/snfe.31.2.68.13331.
- Dudley, N., Baldock, D., Nasi, R., & Stolton, S. (2005). Measuring biodiversity and sustainable management in forests and agricultural landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1454), 457–470. <http://doi.org/10.1098/rstb.2004.1593>
- ECOTON (2013). *Panduan biotilik untuk pemantauan kesehatan daerah aliran sungai "Selamatkan sungai kita sekarang"*. Gresik: ECOTON.
- Environmental Health Standing Committee (enHealth) (2012). The role of toxicity testing in identifying toxic substances in water: A

- framework for identification of suspected toxic compounds in water. Canberra: Australian Health Protection Principal Committee.
- Escher, B. I. & Hermens, J. L. M. (2002) Modes of action in ecotoxicology: Their role in body burdens, species sensitivity, QSARs, and mixture effects. *Environmental Science & Technology*, 36, 4201-4217.
- Fabricius, E., & Jansson, A.-M. (1963). Laboratory observations on the reproductive behaviour of the pigeon (*Columba livia*) during the pre-incubation phase of the breeding cycle. *Animal Behaviour*, 11(4), 534-547. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-3472\(63\)90276-8](http://dx.doi.org/10.1016/0003-3472(63)90276-8)
- Fabricius, K. E., Uthicke, S., Cooper, T. F., Humphrey, C. A., De'ath, A. G. & Mellors, J. (2007) Candidate bioindicator measures to monitor exposure to changing water quality on the Great Barrier Reef. Interim Report. Catchment to Reef Research Program - CRC Reef and Rainforest CRC and Australian Institute of Marine Science.
- Fadila, K., Houria, D., Rachid, R. & Reda, D. M. (2009). Cellular response of a pollution bioindicator model (*Ramalina farinacea*) following treatment with fertilizer (NPKs). *American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences*, 1(2), 69-73.
- Fontanetti, C.S.; Christofolletti, C.A.; Pinheiro, T.G.; Souza, T.S. & Pedro-Escher, J. (2010). Microscopy as a tool in toxicological evaluations, In: *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*. Méndez-Vilas, A. & Diaz, J, pp.(1001-1007), Badajoz: Formatex Research Center, ISBN 9788461461905
- Fontanetti, C. S., Nogarol, L. R., de Souza, R. B., Perez, D. G. & Maziviero, G. T. (2011). bioindicators and biomarkers in the assessment of soil toxicity, soil contamination, Pascucci, M. S. (Ed.), ISBN: 978-953-307-647-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/soil-contamination/bioindicators-and-biomarkers-in-the-assessment-of-soiltoxicity>
- Forbes, V. E. & Forbes, T.L. (1994). *Ecotoxicology in theory and practice*. Chapman & Hall Ecotoxicology Series 2: London.
- Fründ, H., Graefe, U. & Tischer, S. (2010). Earthworms as Bioindicators of Soil Quality. *Biology of Earthworms*, 24, 261-278

- Gaikwad, U. S, Ranade, C. D., & Gadgil, J. M. (2006) Plants as bio-indicators of automobile exhaust pollution-A case study of Sangli City. *J Institution Engineers: Environ Engineering Division*, 86, 26-8.
- Gerhardt, A. (2009). Vol. I – Bioindicator species and their use in biomonitoring. In Inyang, H. I. & Daniels, J. (Eds). Environmental monitoring. Oxford, UK: UNESCO and EOLSS.
- Ghosh, R. K., Ray, D. P. & Reddy, D. D. (2015). Biomarkers: A tool for monitoring pesticide pollution. *International Journal of Bioresource Science*, 2(2), 111-128.
- Gilmour, J. P., Cooper, T. F., Fabricius, K. E. & Smith, L. D. (2006) Early warning indicators of change in corals and coral communities responding to anthropogenic stressors in the Pilbara, Western Australia. Environmental Protection Authority, Western Australia.
- Goguen, M. & Arp, P.A. (2017). Modeling and Mapping Forest Floor Distributions of Common Bryophytes Using a LiDAR-Derived Depth- to-Water Index. *American Journal of Plant Sciences*, 8, 867-890. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.84059>.
- Govindapryari, H., Leleeka, M. Nivedita, M. & Uniyal, P. L. (2010). Bryophytes: Indicators and monitoring agents of pollution. *NeBIO*, 1(1), 35-41.
- Gray, D. (2013). Introduction to periphyton monitoring in freshwater ecosystems Version 1.0. nventory and monitoring toolbox: freshwater ecology. Departmen of Concervation, New Zealand.
- Grove, S.J. (2002). Saproxylic insect ecology and the sustainable management of forests. *Annual Review of Ecology Systematics*, 33, 1-23.
- Hamza-Chaffai, C. (2014). Usefulness of bioindicators and biomarkers in pollution biomonitoring. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 3, 19-26.
- Hilsenhoff, W. L. 1987. An improved biotic index of organic stream pollution. *Great Lakes Entomologist* 20:31–39.
- Hilsenhoff, W. L. 1988. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index. *Journal of the North American Benthological Society* 7(1):65–68.

- Hordkinson, I. D. & Jackson, J. K. (2005). Terrestrial and aquatic invertebrates as bioindicators for environmental monitoring, with particular reference to mountain ecosystems. *Environmental Management*, 35(5), 649–666.
- Holt, E. A. & Miller, S. W. (2010) Bioindicators: Using organisms to measure environmental impacts. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 8.
- Hosmani, S. (2014). Freshwater plankton ecology: a review. *J Res Manage Technol*. 3, 1–10. doi: 10.1016/j.jmrt.2014.02.001.
- Huisman, J., Olff, H., & Fresco, L.F.M. (1993). A hierarchical set of models for species response analysis. *Journal of Vegetation Science*, 4, 37-46.
- Husamah, H. (2014). Struktur komunitas Collembola tanah pada tipe habitat hutan, pertanian, dan pemukiman sepanjang daerah aliran Sungai Brantas Hulu Kota Batu sebagai bahan pengembangan buku pengayaan di perguruan tinggi (Tesis tidak diterbitkan). Malang: Pascasarjana UM.
- Husamah, H. (2015). Kualitas tanah agroekosistem apel Kota Batu Jawa Timur berdasarkan bioindikator struktur komunitas Collembola. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 1(2), 141-155.
- Husamah, H. & Hudha, A. M. (2018). Evaluasi implementasi prinsip ekowisata berbasis masyarakat dalam pengelolaan Clungup Mangrove Conservation Sumbermanjing Wetan, Malang. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(1), 86-95.
- Husamah, H., Hudha, A. M. & Rahardjanto, A. (2017). *Ekologi hewan tanah: Teori dan Praktik*. Malang: UMM Press.
- Husamah, H., Rohman, F., & Sutomo, H. (2015). Pengaruh C-organik dan kadar air tanah terhadap jumlah jenis dan jumlah individu Collembola sepanjang daerah aliran Sungai Brantas Kota Batu. *Prosiding Symbion*, 392-410.
- Husamah, H., Rohman, F., & Sutomo, H. (2016). Struktur komunitas Collembola tanah pada tipe habitat hutan, pertanian, dan pemukiman sepanjang daerah aliran Sungai Brantas Hulu Kota Batu. *Bioedukasi*, 9(1), 45-50.
- Husamah, H. & Setiawan, A. (Eds). (2016). *Pemahaman lingkungan secara holistik*. Malang: PSLK UMM & UMM Press.

- Hutorowicz, A., & Napiórkowska-Krzebietke A. (2014). The European Union Water Framework Directive and the ecological status assessment of inland waters. *Arch. Pol. Fish.* 22, 3-5.
- Jain, A., Singh, B. N., Singh, S. P. Singh, H. B. & Singh, S. (2010). Exploring biodiversity as bioindicators for water pollution. National Conference on Biodiversity, Development and Poverty Alleviation 22nd, 2010.
- Jansen, F. & Oksanen, J. (2013) How to model species responses along ecological gradients - Huisman-Olff-Fresco models revisited. *Journal of Vegetation Science*, 24, 1108–1117.
- Jenaèkoviæ, D., Zlatkovic, D., Lakusic, D., & Randjelovic, V. (2016). M acrophytes as bioindicators of the physicochemical characteristics of wetlands in lowland and mountain regions of the central Balkan Peninsula. *Aquatic Botany*, 134, DOI: 10.1016/j.aquabot.2016.06.003
- Jha, P, & Barat S. (2003). Hydrobiological study of Lake Mirik in Darjeeling, Himalayas. *J Environ Biol.* 24, 339–344.
- Juliantara, K. (2011). *Lintah (Hirudo medicinalis) sebagai bioindikator pencemaran lingkungan perairan tawar*. Retrieved from [http://www.kompasiana.com/lintah_\(Hirudomedicinalis\) sebagai_Bioindikator_Pencemaran_Lingkungan_Perairan_Tawar](http://www.kompasiana.com/lintah_(Hirudomedicinalis) sebagai_Bioindikator_Pencemaran_Lingkungan_Perairan_Tawar).
- Kalueff, A. V. & Tuohimaa, P. (2005). The grooming analysis algorithm discriminates between different levels of anxiety in rats: potential utility for neurobehavioural stress research. *J Neurosci Methods*, 143(2), 169-77. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2004.10.001>
- Karr, J. R., K. D. Fausch, P. L. Angermeier, P. R. Yant, and I. J. Schlosser. (1986). Addressing biological integrity in running waters: A method and its rationale. Special Publication 5. Illinois Natural History Survey, Champaign, Illinois.
- Kelada, S. N., Shelton, E., Kaufmann, R. B., & Khoury, M. J. (2001). Delta-aminolevulinic acid dehydratase genotype and lead toxicity: A HuGE review. *American Journal of Epidemiology*, 154(1):1-13.
- Komarawidjaja, W. & Titiresmi, T. (2006). Teknik biomonitoring-sebagai alternatif “tool” pemantauan kualitas lingkungan perairan. *J.Tek.Ling*, 2006, 144-147.

- Kreft, H., Jetz, W., Mutke, J., Barthlott, W. (2010). Contrasting environmental and regional effects on global pteridophyte and seed plant diversity. *Ecography*, 33(2), 408-419. doi: 10.1111/j.1600-0587.2010.06434.x
- Kripa, P. K., Prasanth, K. M., Sreejesh, K. K. & Thomas, T. P. (2013). Aquatic macroinvertebrates as bioindicators of stream water quality-A case study in Koratty, Kerala, India. *Research Journal of Recent Sciences*, 2 (ISC-2012), 217-222.
- Kroes, R., Renwick, A. G., Cheeseman, M., Kleiner, J., Mangelsdorf, I., Piersma, A., SCHILTER, B., Schlatter, J., Van Schothorst, F., Vos, J. G. & Würtzen, G. (2004) Structure-based thresholds of toxicological concern (TTC): guidance for application to substances present at low levels in the diet. *Food and Chemical Toxicology*, 42, 65-83.
- Kuniyoshi, L.S. & Braga, E. S. (2010). *Cytogenetic disruption in fishes as bioindicator of the environmental quality in two estuarine systems under different exposition to anthropogenic influences*. Makalah dipresentasikan pada Safety, Health and Environment World Congress, São Paulo, Brazil, 25-28 Juli.
- Lachat, T., P. Nagel, Y. Cakpo, S. Attignon, G. Goergen, B. Sinsin, R. Peveling. 2006. Dead wood and saproxylic beetle assemblages in a semi-deciduous forest in Southern Benin. *Forest Ecology and Management*, 225, 27-38.
- Lammert, M. & Allan, J. D. (1999). Environmental auditing: Assessing Biotic Integrity of Streams: Effects of Scale in Measuring the Influence of Land Use/Cover and Habitat Structure on Fish and Macroinvertebrates. *Environmental Management*, 23(2), 257-270.
- Leah, R. (2018). Introduction to Environmental Toxicology. Biological Sciences, University of Liverpool. Retrieved from pcwww.liv.ac.uk/aquabiol/BIOL367_Web/lect_notes/Ecotoxicology%20Notesv-longv0.1.doc.
- Leal, I.R., D.Bieber, A.G., Tabarelli, M., Andersen, A.N., 2010. Biodiversity surrogacy: indicator taxa as predictors of total species richness in Brazilian Atlantic forest and Caatinga. *Biodivers. Conserv.* 19, 3347-3360.

- Lenat, D. R. 1993. A biotic index for the southeastern United States: derivation and list of tolerance values, with criteria for assigning water-quality ratings. *Journal of the North American Benthological Society* 12(3):279–290.
- Liang, S. & Menzef, B. W. (1997). A new method to establish scoring criteria of the index of biotic integrity. *Zoological Studies*, 36(3), 240-250.
- López-López E., Sedeño-Díaz J.E. (2015) Biological Indicators of Water Quality: The Role of Fish and Macroinvertebrates as Indicators of Water Quality. In: Armon R., Hänninen O. (eds) Environmental Indicators. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2_37.
- Magalhães, D. P. & Ferrão Filho, A.S. (2008). A ecotoxicologia como ferramenta no biomonitoramento de ecossistemas aquáticos. *Oecologia Brasiliensis*, 12(3), 355-381.
- Mahmudati, N. & Husamah, H. (2017). Effect of chemical exposure on endocrine system disorder (Article review). In *Proceedings of Surabaya International Physiology Seminar (SIPS 2017)*, 220-225, ISBN: 978-989-758-340-7.
- Maleque MA, Maeto K, Ishii HT (2009) Arthropods as bioindicators of sustainable forest management, with a focus on plantation forests. *Appl Entomol Zool* 44(1):1–11 https://www.jstage.jst.go.jp/article/aez/44/1/44_1_1/_article.
- Martignoni, M., Groothuis, G. M. M. & De Kanter, R. (2006) Sp. ecies differences between mouse, rat, dog, monkey and human CYP-mediated drug metabolism, inhibition and induction. *Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology*, 2, 875-894.
- Mattison, C. (2014). *Smithsonia nature guide snake and other reptiles and amphibians*. New York: Dorling Kindersley Limited.
- McGeoch, M.A. van Rensburg, B.J. & Botes, A. (2002). The verification and application of bioindicators: a case study of dung beetles in savanna ecosystem. *J Appl Ecol*, 39, 661-672.
- Mercado-Silva, N., Lyons, J. D., Maldonado, G. S. & Nava, M. M. (2002). Validation of a fish-based index of biotic integrity for streams and rivers of central Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12, 179–191.

- Mertz, J. C. & Barlow, G. W., 1966. On the reproductive behavior of *Jordanelia Jordani* (Pisces: Cyprinodontidae) with special reference to a quantitative analysis of parental fanning. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 23: 537-554.
- Michaelis, J., Pannek, A., & Diekmann, M. (2016); Soil pH limits of forest vascular plants determine range size and threat level. *J. Veg. Sci.* 27(3), 535–44. <https://doi.org/10.1111/jvs.12380>
- Michaelis, J. & Diekmann, M. R. (2017). Biased niches – Species response curves and niche attributes from Huisman-Olff-Fresco models change with differing species prevalence and frequency. *PLoS ONE*, 12(8): e0183152. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183152>.
- Miharja, F. J., Husamah, H., & Muttaqin, T. (2018). Analisis kebutuhan ruang terbuka hijau sebagai penyerap emisi gas karbon di kota dan kawasan penyangga Kota Malang. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, 2(3), 165-174.
- Moreno, R., Molina, J. R., Machuca, M. Á. H., Soler, N. S., & Zamora, R. (2017). Habitat modeling for the family of Rhinocryptids in the rain forest in the south of Chile. *Revista Árvores*, 41(6), e410612. Epub June 14, 2018. <https://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000600012>
- Moreno, RA, Zamora, R, & Herrera, M. A. (2014). Habitat selection of endemic birds in temperate forests in a biodiversity Hotspot. *For. Syst.*, 23(2), 216-24. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2014232-03700>.
- Moreno, RA, Zamora, R, Molina, JR, Vasquez, A, & Herrera, MÁ. (2011). Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent). *Ecol Inform.*, 6(6), 364-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.07.003>.
- Mukono, H. (2006). *Prinsip dasar kesehatan lingkungan*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Murakami, K., Maenaka, H., Morimoto, Y., 2005. Factors influencing species diversity of ferns and fern allies in fragmented forest patches in the Kyoto city area. *Landsc. Urban Plan.* 70, 221–229.
- Naigaga, I., Kaisaer, H., Muller, W. J., Ojok, L., Mbabazi, D., Magezi, G., & Muhumuza, E. (2011). Fish as bioindicators in aquatic environmental pollution assessment: A case study in Lake Victoria wetlands, Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(14–15), 918-928. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.066>.

- Náray, M. & Kudász, F. (2016). *Biological monitoring (biomonitoring)*. Hungarian Institute of Occupational Health. Retrieved from [https://oshwiki.eu/wiki/Biological_monitoring_\(biomonitoring\)](https://oshwiki.eu/wiki/Biological_monitoring_(biomonitoring)).
- Newman, J. (2016). Essential standards 8.E E.1.4. Retrieved from <https://slideplayer.com/slide/5731439/>
- Nielsen, R., Ostergaard, G. & Larsen, J. C. (2008) *Toxicological risk assessment of chemicals: A practical guide*, New York, NY, USA, Informa Healthcare.
- Nouchi I. (2002) Plants as bioindicators of air pollutants. In: Omasa K., Saji H., Youssefian S., Kondo N. (eds) *Air Pollution and Plant Biotechnology*. Springer, Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-4-431-68388-9_2
- Nugrahani, P. & Prasetyawati, E. T. (2010, Desember). *Semak hias elemen lanskap perkotaansebagai fitoindikator pencemaran udara sulfur dioksida dalam kajian hormesis*. Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat yang Didanai DP2M DIKTI, RISTEK, KKP3T, KPDT, PEMDA dan UPNVJ Tahun 2010, LPPM – UPN “Veteran” Jawa Timur, Surabaya.
- Nuswantoro, N. F., Rizaldi, & Tjong, D. H. (2015). Preferensi habitat ular buta *Ramphotyphlops braminus*, Daudin 1903 pada beberapa tipe habitat. *Prosiding Seminar Nasional Biodiversitas dan Ekologi Tropika Indonesia 2015*.
- Octaviany, E., Rahardjanto, A., Waluyo, L. & Husamah, H. (2017). Keanekaragaman tumbuhan bawah di hutan hujan tropis Blok Puyer Taman Nasional Bromo Tengger Semeru. *Prosiding Seminar Nasional III Tahun 2017*, 370-374.
- Oksanen J., & Minchin, P.R., (2002). Continuum theory revisited: what shape are species responses along ecological gradients? *Ecological Modelling*, 157, 119-129.
- Omar, W. M. W. (2010). Perspectives on the Use of Algae as Biological Indicators for Monitoring and Protecting Aquatic Environments, with Special Reference to Malaysian Freshwater Ecosystems. *Tropical Life Sciences Research*, 21(2), 51–67.
- Onaindia, M., Amezcaga, I., Garbisu, C. & García-Bikuña, B. (2005). Aquatic macrophytes as biological indicators of environmental conditions of rivers in north-eastern Spain. *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.*, 41(3), 175-182. <http://dx.doi.org/10.1051/limn:20054130175>.

- Pambudi, P. A., Rahardjanto, A., Nurwidodo, N. & Husamah, H. (2017). Analisis serapan karbondioksida (CO₂) tumbuhan di Blok Puyer Kawasan Ranu Pani Taman Nasional Bromo Tengger Semeru (TNBTS) pada tahun 2016. *Prosiding Seminar Nasional III tahun 2017*, 277-282.
- Parmar, T. K., Rawtani, D. & Agrawal, Y. K. (2016) Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution, *Frontiers in Life Science*, 9(2), 110-118, DOI: 10.1080/21553769.2016.1162753.
- Pearson, L. (1993). Active monitoring. In: Lichens as bio-indicators of air quality. Stolte, K., Mangis, D., Doty, R., Tonnessen, K. and Huckaby, L.S. (Eds.). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report RM-224, Fort Collins, Colorado. pp. 89-95.
- Pesch R., & Schroeder, W. (2006). Mosses as bioindicators for metal accumulation: Statistical aggregation of measurement data to exposure indices. *Ecol. Indic*, 6(1):137–152. doi: 10.1016/j.ecolind.2005.08.018.
- Pereira, S. A., Trindade, C. R. T., Albertoni, E. F. & Palma-Silva, C. (2012). Aquatic macrophytes as indicators of water quality in subtropical shallow lakes, Southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 24(1), 52-63. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000026>.
- Pradhan, A, Bhaumik P, Das S, Mishra M, Khanam S, Hoque BA, Mukherjee I, Thakur AR, & Chaudhuri SR. (2008). Phytoplankton diversity as indicator of water quality for fish cultivation. *Am J Environ Sci*. 4(4), 406–411. doi: 10.3844/ajessp.2008.406.411
- Pratiwi, Y. (2010). Penentuan tingkat pencemaran limbah industri tekstil berdasarkan nutrition value coefficient bioindikator. *Jurnal Teknologi*, 3(2), 129-137.
- Pribadi, T. (2009). *Keanekaragaman komunitas rayap pada tipe penggunaan lahan yang berbeda sebagai bioindikator kualitas lingkungan* (Tesis tidak diterbitkan). Bogor: Sekolah Pascasarjana IPB.
- Rahayu, S., Widodo, R. H. van Noordwijk, M., Suryadi, I. & Verbist, B. (2009). *Monitoring air di daerah aliran sungai*. Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre-Southeast Asia Regional Office.

- Ramchandra TV, Rishiram R, & Karthik B. (2006). Zooplanktons as bioindicators: hydro biological investigation in selected Bangalore lakes. Technical report 115.
- Roché, J., Godinho, C., Rabaça, J. E., Frochot, B., Faivre, B., Mendes, A., & Dias, P. C. (2010). Birds as bio-indicators and as tools to evaluate restoration measures. Proceedings 7th European Conference on Ecological Restoration Avignon, France, 23-27/08/2010
- Samecka-Cymerman, A. & Kempers, A. J. (2002). Aquatic macrophytes as biomonitors of pollution by textile industry. *Bull. Envi. Cont. Tox*, 69, 82-96.
- Schäfer, S., Buchmeier, G., Claus, E., Duester, L., Heining, P., Körner, A. et al. (2015). Bioaccumulation in aquatic systems: methodological approaches, monitoring and assessment. *Environmental Sciences Europe*, 27, 5. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0036-z>.
- Setiawan, D. (2008). *Struktur komunitas makrozoobentos sebagai bioindikator kualitas lingkungan perairan Hilir Sungai Musi*. (Tesis tidak diterbitkan). Bogor: Sekolah Pascasarjana IPB.
- Sett, R. & Kundu, M. (2016). Epiphytic lichens: Their usefulness as bio-indicators of air pollution. *Donnish Journal of Research in Environmental Studies*, 3(3), 017-024.
- Setyono, P. & Soetarto, E. S. (2008). Biomonitoring degradasi ekosistem akibat limbah CPO di muara Sungai Mentaya Kalimantan Tengah dengan metode elektromorf isozim esterase. *Biodiversitas*, 9(3), 232-236.
- Silva, J.; Heuser, V. & Andrade, V. (2003). *Biomonitoramento ambiental*, In: *Genética Toxicológica*, Silva, J.; Erdtmann, B. & Henriques, J.A.P. pp.(167-178), Alcance, ISBN 8575920111, Porto Alegre.
- Sinaga, T. (2009). *Keanekaragaman makrozoobentos sebagai indikator kualitas perairan Danau Toba Balige Kabupaten Toba Samosir*. Tesis. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Singh, S. K., Rao, D. N., Agrawal, J., Pandey, J. & Narayan, D. (1991). Air pollution tolerance index of plants. *Journal of Environment Management*, 32, 45-55.
- Skorbi³owicz, M., Skorbi³owicz, E., Cieceluk, I. (2018). Bees as bioindicators of environmental pollution with metals in an

- urban area. *Journal of Ecological Engineering*, 19(3), 229-234. <https://doi.org/10.12911/22998993/85738>
- Stevenson, J. & Bahls, L. L. (1999).** *Chapter 6: Periphyton protocols*. In Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder, and J.B. Stribling. (Eds) (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*, Second Edition. EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water; Washington, D.C.
- Subagiada, K. (2011). Penentuan kadar timbal (Pb) dengan Bioindikator rambut pada pekerja SPBU di Kota Samarinda. *Mulawarman Scientifie*, 10(2), 151-162.
- Sucman, E.; Vávrová, M.; Zlámalová-Gargošová, H.; and Mahrová, M. (2010). Fish – Useful Bio-Indicators For Evaluation Of Contamination In Water Ecosystems, "Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy: Vol. 11, Article 3. Available at:<http://scholarworks.umass.edu/soilsproceedings/vol11/iss1/3>
- Suheriyanto, D. (2012). Keanekaragaman fauna tanah di Taman Nasional Bromo Tengger Semeru sebagai bioindikator tanah bersulfur tinggi. *Saintis*, 2(1), 29-38.
- Sun, R., Sun, P., Zhang, J., Esquivel-Elizondo, S. & Wu, Y. (2018). Microorganisms-based methods for harmful algal blooms control: A review. *Bioresource Technology*, 248(Part B), 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.175>.
- Szczerbińska, N. & Galczyńska, M. (2015). Biological methods used to assess surface water quality. *Arch. Pol. Fish.* (2015) 23: 185-196. DOI: 10.1515/aopf-2015-0021.
- Szoszkiewicz, K., Zbierska, J., Staniszewski, R., & Jusik, S. (2009). The variability of macrophyte metrics used in river monitoring. *Oceanol. Hydrobiol. Stud.* 38, 117-126.
- Tang, W., Cui, J., Shan, B., Wang, C., & Zhang, W. (2014). Heavy Metal Accumulation by Periphyton Is Related to Eutrophication in the Hai River Basin, Northern China. *PLoS ONE*, 9(1), e86458. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0086458>
- Thakur, RK, Jindal, R, Singh, UB, & Ahluwalia, A. S. (2013). Plankton diversity and water quality assessment of three freshwater lakes of Mandi (Himachal Pradesh, India) with special

- reference to planktonic indicators. *Environ Monit Assess.* 185(10), 8355–8373. doi: 10.1007/s10661-013-3178-3
- Thiébaud, G. & Muller, S. 2003. - Linking phosphorus pools of water, sediment and macrophytes in running waters. *Ann. Limnol - Int. J. Lim.*, 39, 307-316.
- Tinbergen**, N. (1952). The curious behaviour of the **stickleback**. *Scient. Am.* 187, 22–26
- Triatmodjo, B. (2008). *Hidrologi terapan*. Yogyakarta: Gadjadara University Press.
- Trihadiningrum, Y. (2003). *Perbandingan metode monitoring kualitas air konvensional dengan biomonitoring*. Bandung: Pusat Penelitian Elektronika Dan Telekomunikasi LIPI.
- Valon, M., Valbona, A., Sula, E., Fahri, G., Dhurata, K. & Fatmir, C. (2013). Histopathologic biomarker of fish liver as good bioindicator of water pollution in Sitnica River, Kosovo. *Global Journal of Science Frontier Research Agriculture and Veterinary*, 13(5), 1-5.
- Venier, L. A. & Pearce, J. L. (2004). Birds as indicators of sustainable forest management. *The Forestry Chronicle*, 80(1), 61-66.
- Vile, J. (2011). Fish IBI report 2010 sampling round 3, year 1 of 5. New Jersey Department of Environmental Protection.
- Walker, E. D., and W. E. Archer. 1988. Sequential organization of grooming behaviors of the mosquito, *Aedes triseriatus*. *J. Insect Behav.* 1: 97-109.
- Wallach, V. (2008). Range extensions and New Island records for *Ramphotyphlops braminus* (Serpentes: Typhlopidae). *Bull. Chicago Herp. Soc.*, 43(5), 80-82.
- Wardhana, W. A. (1999). *Perubahan lingkungan perairan dan pengaruhnya terhadap biota akuatik*. Disampaikan pada Pelatihan Monitoring Biologi Bagi Pengelola Taman Nasional Gunung Halimun, Stasiun Penelitian Cikaniki TNGH, 5-10 April 1999. Jakarta: FMIPA UI.
- Weissman, L. Fraiber, M. Shine, L. Garty, J. and Hochman, A. (2006). Responses of antioxidants in the lichen *ramalina lacera* may serve as a warning nearly bioindication systems for detection of water pollution stress. *Fems. Microbiol. Ecol.* 58, 41-53.

- Wibisono, W. R. R. & Muntalif, B. S. (2013). *Penentuan kualitas air sungai cihampelas dengan bioindikator makrozoobentos* (Naskah Publikasi). Bandung: Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- Wilkinson, E. & Brown, R.E. (2015). **An introduction to neuroendocrinology** (Second edition), Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Wilson, A. J., Gelin, U., Perron, M. C., & Réale, D. (2008). Indirect genetic effects and the evolution of aggression in a vertebrate system. *Proceedings. Biological sciences*, 276(1656), 533-41.
- Winarni, I. (2016) *Peran mikroba sebagai biomonitoring kualitas perairan tawar pada beberapa situ*. In: Peran Matematika, Sains, dan Teknologi dalam Mendukung Gaya Hidup Perkotaan (Urban Lifestyle) yang Berkualitas. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.
- Zannatul, F. & Muktadir, A. K. M. (2009). A review: potentiality of zooplankton as bioindicator. *Am J Appl Sci.*, 6(10):1815–1819. doi: 10.3844/ajassp.2009.1815.1819
- Zechmeister, H.G., Dirnböck, T., Hülber, K., Mirtl, M. (2007): Assessing airborne pollution effects on bryophytes Lessons learned through longterm integrated monitoring in Austria. *Environmental Pollution*, 147, 696705. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.09.008
- Zhelyazkova, I. (2012). Honeybees–Bioindicators for environmental quality. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(3), 435-442.
- Ziglio, G., M. Siligardi, and G. Flaim (eds). 2006. Biological monitoring of rivers: applications and perspectives. John Wiley & Sons, New York.
- Zulkifli, H. & Setiawan, D. (2011). Struktur komunitas makrozoobentos di perairan sungai Musi kawasan Pulokerto sebagai instrumen biomonitoring. *Jurnal Natur Indonesia*, 14(1), 95-99.
- Zuur A, Ieno E, Walker N, Saveliev A, & Smith G. (2009). Mixed effects models and extensions in ecology. New York, NY: Spring Science and Business Media.

INDEKS

A

Abiotik, 15, 18, 3747, 51, 60, 96,
130, 138,
Air ambien, 65,
Air Pollutant Tolerance Index, 142
Anthelidae, 149
Antropogenik, 18, 21, 24, 31, 47,
55, 105, 111, 145, 150, 151,
Apis mellifera, 144, 145,
Arctiinae, 149
Atmosfer, 37, 43, 127, 129, 133, 134,
135, 143, 144, 145,
Autekologi, 82,

B

Bahan organik, 4, 19, 64, 76, 118
Bank Spesimen Lingkungan, 135
Batas toleransi tetap, 101
Behavioral bioassays, 9, 10, 11
Benthic algal growth, 56
Benthic oxygen demand, 56
Bioassay in vitro, 5, 7, 8
Bioassessments study, 2,
Biocoenosis, 20, 37
Biodiversitas, 20, 25, 138,
Biologis, 1, 2, 3, 6, 10, 16, 17, 18, 19,
20, 21, 35, 37, 45, 46, 55, 56,
58, 60, 79, 90, 97, 109, 110, 115,
116, 124, 140, 153,

*Biological Monitoring Working Party-
Average Score Per Taxon*, 92
Biomarker genotoxicity, 42,
Biomarker of effect, 42, 47
Biomarker of exposure, 42
Biomarker of susceptibility, 43
Biomarker nonspesifik, 46, 28,
Biomonitoring, 1, 2, 4, 5, 10, 12,
14, 15, 16
Bioritme, 20,
Biotic index, 22, 91, 92
Bryofita, 31, 32, 33, 34, 133, 134,
135, 136, 137

C

Cacing tanah, 54, 117, 118
Callitrichetum, 95
Canonical Correspondence Analysis,
96, 105,
Carabid beetles, 149, 153
Catocalinae, 149
Ceratophylletum, 95
Cladophora, 81, 95
Collembola, 116, 117, 120, 125
Condition Factor, 104
Cyanobacteria, 58, 65, 81
Cyprinids pemakan serangga, 106,
109, 112,

- D**
Diameter at Breast Height, 138,
 Diatom, 24, 65, 65, 75
Diffuse source pollution, 90,
 Distribusi geografis, 150
 Dosis, 40, 5, 6, 7, 14, 41, 42, 54, 72
- E**
Early indicator, 26
Ecological State Macrophyte Index, 97
 Efek antropogenik, 18
 Efek endokrin, 6
 Ekskresi, 7, 44, 49
 Ekofisiografi, 154
 Ekosistem, 50
 Ekotoksikologi, 49, 50, 51, 52, 52
Electrofishing, 107
 Ennominae, 149,
 Ephemeroptera, Plecoptera dan
 Trichoptera, 88
Epilithic, 66
 Ethogram, 11,
- F**
Family Biotic Index, 91, 92
 Fitoindikator, 26
Fixed action pattern, 12
 Fragmentasi hutan, 31, 148, 149
 Fumigasi, 129, 131, 137
- G**
 Gastropoda, 92, 93, 153
 Geometrina, 149
Gonadosomatic Index, 104, 105,
 GPS, 109, 138
 Grime, 124
 Gulma, 124
- H**
Habitat riffle stream, 168
Heat shock proteins, 22
 Heliethinae, 149
Hepatosomatic Index, 104
 Hermeniidae, 149
*Hierarchical logistic regression
 modelling*, 98
 Homogenisasi lanskap, 147
Hormesis, 140
Hoverflies saproxylic, 153
Huisman–Olf–Fresco models, 98
- I**
 Ikan *stickleback*, 12
 Imunotoksitas, 6
Index of Atmospheric Purity, 130
Index of Biotic Integrity, 105
Index of Qualitative Variation, 100
 Inhalasi, 43
In silico, 3
Integrity Biotics Index, 81
 Interaksi biotik, 24
- J**
 Jarak Sampling, 107
 Jaring, 108, 117, 129

K

Kadar Klorofil Total , 142

Keystone species, 26

Koefisien saprobik, 58

Konduktivitas, 61

Konifer, 150, 151

Koridor biologis, 153

Kumbang kotoran, 148

L

Laboratorium, 2, 3, 6, 11, 45, 46, 52

Lepidosmatidae, 93

Letal time, 46

Lichen, 128, 129, 130

Limnologi, 96

Lingkungan akuatik, 2, 15, 55

Lymantriidae, 149

M

Macrophyte River Assessment Method, 98

Makrofit, 56, 98

Makrozoobentos, 89, 90, 93

Malonedialdehyde, 45

Maximum Species Richness, 110

Mean Trophic Rank, 97

Metabolisme, 46, 49, 53, 116

Metallothioneins, 45, 46, 48

Metode kantung Moss, 136

Metode Spies dan Franklin, 31

Metrics of Biotic Integrity, 82

Morfometrik, 95

Multihabitat, 73

N

Neurotoksisitas, 6

Nische, 100

Noctuidae, 149

Nyamuk, 14, 86, 151

O

Oligochaeta, 86, 93, 113, 116

Organisme non-fotosintetik, 4

Outfalls saluran pembuangan, 109

P

Penanda biokimia, 3

Penanda eksposur, 4

Pendekatan *in silico*, 8

Penelitian epidemiologi, 8

Penelitian kohort longitudinal, 8

Percentage Aberrant Diatom, 84

Percentage Community Similarity, 83

Percentage Diatom Motil, 84

Periphytometers, 77

Penyakit *blackspot*, 109

Phycitinae, 149

Point source pollution, 90

Polychlorinated biphenyl, 104

Polinuclear aromatic hydrocarbons, 45

Pollution Tolerance Index, 83

Polutan nonmetalik, 46

Polychlorinated biphenyl, 45

- R
Radikal bebas, 46
Ranunculo-Sietum, 95
Riparian, 153, 154
- S
Saluran gastrointestinal, 7
Sampling, 2, 15, 66, 67, 68, 69
Sedwick Rafter Counting Cells, 62
Shallow pools, 74
Shannon-Wiener, 63
Simple Autecological Index, 85
Sistem biologi, 1, 116
Species Trophic Rank, 97
Spesialis *food-habitat*, 30, 32
Standard Toxicity Test, 52
Substrat Alami, 73
Surber net, 90
Syrphid, 93
- T
Taksonomi, 96
Tebang habis, 150
Toksikan, 1, 45,
Toksistas hati
Topographic Relative Moisture Index,
139
Toxicity bioassays, 3
Toxicodynamics, 43
Toxicokinetics, 43
Transek, 71
Transplantasi, 130
Trophic Index of Macrophytes, 97
- Tubifex*, 19
- U
Uji kuantitatif, 18
Unimodal skewed, 100
Unimodal symmetric, 100
- V
Vandalisme, 77
Vivinatidae, 90
Volatile Organic Compounds, 127
- W
Water Framework Directive, 97
Whio, 69
Whirl-pack, 78
- Z
Zoochory, 138
Zooplankton, 60, 61
Zoospora, 78

GLOSARIUM

Anecic: hewan yang hidup pada permukaan tanah atau terkadang juga terdapat pada tanah yang lebih dangkal.

Autekologi: kajian atau penelitian tentang jenis, yaitu mengenai aspek-aspek ekologi dari individu-individu atau populasi suatu jenis hewan tanah.

Bahan organik: bagian dari tanah yang merupakan suatu sistem kompleks dan dinamis, yang bersumber dari sisa tanaman dan atau binatang yang terdapat di dalam tanah yang terus menerus mengalami perubahan bentuk, karena dipengaruhi oleh faktor biologi, fisika, dan kimia.

Batas toleransi makhluk hidup: Batas maksimum dan minimum dimana makhluk hidup dapat mempertahankan hidupnya, di luar batas itu makhluk hidup tidak akan dapat bertahan hidup.

Biomarker: variasi yang diinduksi secara xenobiotik dalam komponen seluler atau biokimia atau proses, struktur, atau fungsi yang dapat diukur dalam sistem biologis atau sampel.

Biomarker efek (*Biomarker of effect*): perubahan terukur (biokimia, struktural, fungsional, perilaku, dan lain-lain) dalam suatu organisme yang dapat dikaitkan dengan gangguan kesehatan atau penyakit yang mapan atau potensial.

Biomarker kerentanan (*Biomarker of susceptibility*): penanda kemampuan untuk menanggapi tantangan paparan bahan kimia secara negatif.

Biomarker paparan (*Biomarker of exposure*): substansi, atau metabolitnya, atau produk dari interaksi yang diukur dalam kompartemen atau cairan tubuh.

Bioassay: analisis atau pengukuran dari suatu zat untuk menentukan keberadaan dan dampaknya.

Bioassessment: menggunakan pendekatan biologis untuk mengukur dan mengevaluasi konsekuensi dari tindakan manusia pada sistem biologis.

Bioindikator: kelompok atau komunitas organisme yang saling berhubungan, yang keberadaannya atau perilakunya sangat erat berhubungan dengan kondisi lingkungan tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai satu petunjuk kualitas lingkungan atau uji kuantitatif.

Bioindikator aktif: suatu spesies organisme yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap polutan.

Epidemiologi: ilmu yang mempelajari hal-hal yang terjadi pada populasi / penduduk (rakyat). Definisi ini merupakan definisi yang sangat luas serta dapat diterapkan pada keadaan apapun yang terjadi pada penduduk. Umumnya definisi ini mencakup hal yang berkaitan erat dengan studi epidemi. Definisi lainnya menyebutkan epidemiologi sebagai ilmu yang mempelajari penyebaran, perkembangan atau perluasan suatu penularan penyakit di dalam suatu kelompok penduduk atau masyarakat.

Ekstrapolasi interspesies: mencakup dua area topik terkait tetapi berbeda yang berhubungan dengan ekstrapolasi kuantitatif dan karenanya penskalaan dosis toksikologi-komputasi dan parameter penskalaan.

Fitoindikator: tumbuhan yang dapat digunakan sebagai indikator kekhasan habitat tertentu.

Fixed action pattern/EAP: pola tindakan tetap, salah satu metode pertama yang diadopsi oleh peneliti perilaku untuk menggambarkan urutan, umumnya digambarkan sebagai perilaku stereotip yang tidak dipelajari dan merupakan karakteristik spesies.

Habitat: tempat suatu spesies atau jenis tinggal dan berkembang.

Heterotrof: makhluk hidup di luar tumbuh-tumbuhan dan bakteri yang hidupnya tergantung dari tersedianya makhluk hidup produsen.

In silico: Percobaan melibatkan eksperimen menggunakan komputer atau melalui simulasi computer.

Invertebrata saproxylic: invertebrata yang bergantung pada kayu mati atau membusuk (atau bergantung pada organisme lain yang juga bergantung pada kayu mati).

In vitro: istilah yang dipakai dalam biologi untuk menyebutkan kultur suatu sel, jaringan, atau bagian organ tertentu di dalam laboratorium. Istilah ini dipakai karena kebanyakan kultur

artifisial ini dilakukan di dalam alat-alat laboratorium yang terbuat dari kaca, seperti cawan petri, labu Erlenmeyer, tabung kultur, botol, dan sebagainya.

In vivo: pengujian secara biologis biasanya menggunakan hewan coba untuk membantu menjalankan penelitian-penelitian yang tidak bisa secara langsung dilakukan dalam tubuh manusia dengan asumsi semua jaringan, sel-sel penyusun tubuh, serta enzim-enzim ada dalam tubuh hewan coba tersebut memiliki kesamaan dengan manusia.

Komunitas: kelompok organisme yang terdiri atas sejumlah jenis yang berbeda, yang secara bersama-sama menempati habitat atau area yang sama dan waktu secara bersamaan terjadi interaksi melalui hubungan trofik dan spasial.

Makrofauna: kelompok binatang yang berukuran panjang tubuh >10,5 mm, seperti: Insekta, Crustaceae, Chilopoda, Diplopoda, Mollusca, dan vertebrata kecil (mengacu pada Suhardjono & Adisoemarto, 1997).

Makrohabitat: ciri khas dengan skala yang luas seperti zona asosiasi vegetasi yang biasanya disamakan dengan level pertama seleksi habitat.

Mikrofauna: kelompok binatang yang berukuran tubuh <0,15 mm, seperti: Protozoa dan stadium pradewasa beberapa kelompok lain misalnya Nematoda (mengacu pada Suhardjono & Adisoemarto, 1997).

Mikrohabitat: bagian dari habitat yang merupakan lingkungan yang kondisinya paling cocok dan paling akrab berhubungan dengan makhluk hidup.

Polutan: bahan pencemaran adalah bahan/benda yang menyebabkan pencemaran, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Rantai makanan: urutan atau rangkaian dimana nutrien dan energi berpindah dari tanaman ke herbivora (pemakan tumbuhan) ke berbagai pemangsa sampai ke dekomposer atau pengurai.

Relung: setiap jenis mempunyai kemampuan untuk beradaptasi terhadap suatu kondisi lingkungan tertentu dalam satu komunitas.

Toxicity bioassays: melakukan kegiatan pengujian di laboratorium dan menganalisa dampak polutan terhadap bentuk-bentuk kehidupan (tumbuhan dan hewan).

BIOGRAFI PENULIS

HUSAMAH dilahirkan pada tanggal 18 Oktober 1985 di Pulau Pangerungan Kecil Sapeken Sumenep. Ia menamatkan pendidikan di SDN Pangerungan Kecil III, SMPN 2 Sapeken, dan SMAN 1 Banyuwangi. Gelar sarjana ia peroleh dari Prodi Pendidikan Biologi FKIP Universitas Muhammadiyah Malang tahun 2008. Pendidikan S2 diselesaikan di Pendidikan Biologi Pascasarjana Universitas Negeri Malang tahun 2014.



Ia pernah menjadi Juara I Mahasiswa Berprestasi Kopertis VII Jawa Timur tahun 2008. Ia juga beberapa kali menjuarai lomba penulisan ilmiah kategori mahasiswa dan umum, baik tingkat lokal, regional, maupun nasional. Opini dan artikelnya telah dimuat di jurnal ilmiah nasional-internasional (SCOPUS ID: 57195803428; SINTA ID: 257540) dan media massa lokal-nasional.

Saat ini ia adalah dosen tetap di Prodi Pendidikan Biologi FKIP UMM. Ia diamanahi sebagai Kepala Pusat Studi Lingkungan dan Kependudukan UMM (2015-2017), Managing Editor JPBI (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia) (2015-2018; Terakreditasi/SINTA 2), dan Sekretaris Prodi Pendidikan Biologi FKIP UMM (2017-2021).

Sembari mengajar, meneliti, mengabdikan, mengelola jurnal, dan membimbing mahasiswa, ia telah berhasil menerbitkan puluhan buku yang disebutnya sebagai "*karya-karya kecil untuk menginspirasi Indonesia*" baik sebagai penulis tunggal, penulis utama, kontributor, maupun editor. Buku yang telah diterbitkan antara lain (1) *Cerdas Menjadi Juara Karya Ilmiah* (Pinus Group, 2010), (2) *Teacherpreneur, Cara Cerdas Menjadi Guru Banyak Penghasilan* (Pinus Group, 2011), (3) *KIR Itu Selezat Ice Cream* (Pinus Group, 2011), (4) *Kamus Penyakit pada Manusia* (ANDI, 2012), (5) *Guru Profesional Perspektif Siswa Indonesia* (Editor; Aditya Media, 2012), (6) *Pembelajaran Luar Kelas/Outdoor Learning* (Prestasi Pustaka Raya, 2013), (7) *Desain Pembelajaran Berbasis Pencapaian Kompetensi* (Prestasi Pustaka Raya, 2013), (8) *Science for Grade*

I (Aditya Media, 2013), (9) *Pembelajaran Bauran: Blended Learning* (Prestasi Pustaka Raya, 2014), (10) *Kamus Super Biologi* (Prestasi Pustaka Raya, 2014), (11) *Talau Ngaluppanan, Renungan Generasi Muda Kepulauan* (Insan Cendekia, 2014); (12) *Modul Panduan Guru: Pengembangan Model Pendidikan Karakter pada Pembelajaran MIPA melalui Konsep Integratif di SMP Muhammadiyah Se-Malang Raya* (UMM Press & FKIP UMM, 2014); (13) buku dwibahasa *Motif Batik Khas Jawa Timur* (LK-UMM Press Dekranasda Jatim, 2014). (14) *A to Z, Kamus Super Psikologi* (ANDI, 2015), (15) *Pencerahan Pendidikan Masa Depan* (contributor; FKIP UMM & UMM Press, 2015), (16) *Pengantar Pendidikan* (UMM Press, 2015), (17) *Belajar dan Pembelajaran* (UMM Press, 2016), (18) *Pemahaman Lingkungan Secara Holistik* (UMM Press & PSLK UMM, 2016), (19) *Go Green & Clean School Berbasis Diet Sampah* (UMM Press & PSLK UMM, 2016), (20) *Mengurai Sengkarut Bencana Lingkungan (Refleksi Jurnalisme Lingkungan & Deep Ecology di Indonesia)* (UMM Press & PSLK UMM, 2017), (21) *Menyelamatkan Masa Depan Generasi Emas Bangsa (Catatan Kritis dan Sharing Pengalaman Guru Indonesia)* (UMM Press & PSLK UMM, 2017), (22) *Sumber Belajar Penunjang Kompetensi Profesional Mata Pelajaran Biologi* (MNC Publisher, 2017), (23) *Katalog Tumbuhan di Lingkungan SMP Negeri 8 Malang* (Penerbit Kota Tua, 2018), (24) *Ekologi Hewan Tanah (Teori dan Praktik)* (UMM Press, 2017), (25) *Mudahnya Budidaya Teripang: Terintegrasi dengan Rumput Laut* (Kota Tua, 2018); (26) *Model Pendampingan Masyarakat Kepulauan Berbasis Rumput laut* (Kota Tua, 2018); (27) *Buku ajar Belajar dan Pembelajaran FKIP-UMM* (Proses terbit); (28) *buku ajar Evaluasi Pembelajaran* (Proses terbit); (29) *Etika Lingkungan (Teori dan Praktik Pembelajarannya)* (Proses terbit), dan (30) *Bioindikator yang ada di tangan Anda ini. Bersama tim, ia berhasil menyusun Modul Ekologi Tumbuhan (Hibah DITTENDIK DIKTI 2011-2012), Petunjuk Praktikum Ekologi Tumbuhan, Petunjuk Praktikum Ekologi Hewan, dan Petunjuk Praktikum Ekologi (Lab. Biologi UMM).*



ABDULKADIR RAHARDJANTO, lahir di Banyuwangi pada tanggal 2 Desember 1963. Jenjang S1 Pendidikan Biologi di tamatkan di IKIP Negeri Yogyakarta (sekarang menjadi UNY) tahun 1990, S2 Ilmu Lingkungan di Institut Teknologi Bandung tahun 1997, dan S3 Ilmu Lingkungan dari Universitas Indonesia tahun 2014.

Aktivitas penelitian, pengabdian pada masyarakat, dan publikasi aktif dilaksanakan di tengah-tengah tugasnya sebagai dosen mata kuliah Ekologi dan Pengetahuan Lingkungan di Prodi Pendidikan Biologi FKIP UMM. Saat ini ia adalah ketua Prodi Pendidikan Biologi Pascasarjana UMM (2018-2022), dan menjadi reviewer di beberapa jurnal nasional dan internasional.

Berbagai buku telah ia hasilkan, beberapa di antaranya adalah *Model Komunikasi Lingkungan Berperspektif Gender dalam Menyelesaikan Konflik Lingkungan di Perkotaan (Peran aktivis Perempuan dalam Pengelolaan Konflik Lingkungan Secara Berkelanjutan)* (Lokus Tiara Wacana Group, 2014), *Modul Ekologi Tumbuhan* (Hibah DITENDIK DIKTI, 2011-2012), *Petunjuk Praktikum Ekologi Tumbuhan (Lab. Biologi UMM)*, *Ekologi* (UMM, 2012), *Ekologi Hewan Tanah (Teori dan Praktik)* (UMM Press, 2018), *Model Pendampingan Masyarakat Kepulauan Berbasis Rumput laut* (Kota Tua, 2018); *Mudahnya Budidaya Teripang: Terintegrasi dengan Rumput Laut* (Kota Tua, 2018), dan buku *Bioindikator* yang ada di tangan Anda ini.

