 ISSN 3123-2795 (E)

ANALISIS KEANEKARAGAMAN MAKROINVERTEBRATA BENTIK SEBAGAI BIOINDIKATOR KUALITAS AIR BERDASARKAN GRADIEN AKTIVITAS MANUSIA PADA EKOSISTEM SUNGAI TROPIS

Niat Hasrat Anita Tafonao[1)], Intra Damai Jaya Halawa[2)]

[1)]Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nias Raya, Nias Selatan, Indonesia
Email: niathasratanita@gmail.com
[2)]Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nias Raya, Nias Selatan, Indonesia
Email: intradamai_jaya@gmail.com

Abstract

Benthic macroinvertebrates are widely used as biological indicators because their community composition integrates ecological pressures over time. This article aims to critically synthesize evidence on macroinvertebrate diversity and water-quality assessment along gradients of human activity in tropical rivers, with attention to Indonesian conditions. A focused narrative literature review was undertaken using peer-reviewed studies and established biomonitoring protocols published between 1993 and 2026. Evidence from 23 streams in Yogyakarta shows that urbanization is associated with elevated nutrients and reduced invertebrate richness. A subsequent Indonesian index-development study assessed 13,268 organisms representing 60 taxa from 69 samples and proposed an adapted BMWP IDN metric. Research in 19 Guatemalan tropical headwater streams also reported poorer biological water-quality conditions in pasture and oil-palm catchments than in forested catchments. Across studies, the response to human pressure is mediated by riparian cover, substrate, nutrient enrichment, hydrology, and seasonal conditions. Simple diversity metrics alone cannot establish a pollution category; biological indices should be evaluated alongside habitat and physicochemical measurements, and tolerance values require local calibration. This review proposes an integrated and reproducible gradient-based field assessment framework without claiming new field measurements. The synthesis highlights the value of locally validated macroinvertebrate biomonitoring for tropical river conservation and community-based water-quality surveillance.
Keywords: benthic macroinvertebrates, bioindicators, anthropogenic gradient, tropical rivers, water quality.

Abstrak

Makroinvertebrata bentik digunakan sebagai indikator biologis karena komposisi komunitasnya merekam tekanan ekologis dalam rentang waktu yang lebih panjang daripada pengukuran kualitas air sesaat. Artikel ini bertujuan menyintesis secara kritis bukti mengenai keanekaragaman makroinvertebrata dan penilaian kualitas air sepanjang gradien aktivitas manusia pada sungai tropis, terutama dalam konteks Indonesia. Metode penelitian berupa kajian pustaka naratif terarah terhadap artikel ilmiah dan pedoman biomonitoring yang relevan pada rentang 1993–2026. Penelitian pada 23 sungai di Yogyakarta menunjukkan hubungan urbanisasi dengan peningkatan nutrien serta penurunan kekayaan taksa. Pengembangan indeks di Indonesia selanjutnya menggunakan 13.268 individu dari 60 taksa dalam 69 sampel dan mengusulkan indeks BMWP IDN. Studi pada 19 lokasi hulu sungai tropis di Guatemala juga melaporkan kondisi biologis yang lebih buruk pada daerah tangkapan padang penggembalaan dan kelapa sawit dibandingkan hutan. Sintesis menunjukkan bahwa respons bentos dipengaruhi penutup riparian, substrat, nutrien, hidrologi, dan musim. Indeks keanekaragaman tidak dapat digunakan sendirian untuk menyimpulkan kelas pencemaran; indikator biologis perlu dipadukan dengan parameter habitat dan fisika-kimia serta dikalibrasi secara lokal. Artikel ini menghasilkan kerangka penilaian berbasis gradien yang dapat diuji di lapangan, tanpa menyatakan adanya data pengamatan primer dari penulis
Kata Kunci: makroinvertebrata bentik, bioindikator, gradien antropogenik, sungai tropis, kualitas air.

ISSN 3123-2795 (E)

PENDAHULUAN

Ekosistem sungai merupakan sistem yang menghubungkan proses di daerah tangkapan air dengan kondisi habitat akuatik. Perubahan tutupan lahan, pembangunan permukiman, intensifikasi pertanian, dan pelepasan limbah dapat memengaruhi karakter sungai melalui peningkatan sedimen, perubahan rezim aliran, serta masuknya bahan organik dan unsur hara. Dalam lingkungan tropis, interaksi faktor-faktor tersebut berlangsung di bawah variasi hujan musiman, temperatur, dan karakter riparian yang beragam sehingga tidak selalu tercermin secara memadai oleh satu parameter kimia. Allan (2004) menegaskan bahwa respons ekosistem sungai perlu dipahami pada skala bentang alam dan jaringan aliran, bukan hanya titik pengambilan contoh.

Keanekaragaman hayati perairan tawar memiliki fungsi penting bagi aliran energi, dekomposisi serasah, daur unsur hara, dan jaring makanan. Keberadaannya juga rentan terhadap pencemaran, modifikasi debit, serta perubahan habitat di sepanjang sungai. Dudgeon et al. (2006) menunjukkan bahwa ancaman terhadap biota air tawar sering bekerja secara bersamaan dengan tekanan penggunaan lahan di luar badan air. Oleh karena itu, evaluasi kualitas sungai yang hanya berorientasi pada pemenuhan parameter fisika-kimia belum tentu menggambarkan perubahan komunitas organisme secara utuh.

Salah satu kelompok yang banyak digunakan untuk menilai kondisi ekologis ialah makroinvertebrata bentik, yaitu organisme tanpa tulang belakang berukuran relatif besar yang hidup pada atau di dalam substrat dasar perairan. Kelompok ini mencakup larva serangga, moluska, krustasea, dan cacing akuatik. Sebagian taksa memiliki mobilitas terbatas serta siklus hidup yang cukup panjang untuk mencerminkan paparan gangguan pada lokasi tertentu. Kombinasi variasi toleransi, keragaman relung, dan ketersediaan metode pengambilan contoh menjadikan komunitas tersebut relevan dalam biomonitoring (Rosenberg & Resh, 1993; Bonada et al., 2006).

Penggunaan makroinvertebrata sebagai bioindikator tidak berarti setiap spesies mempunyai respons yang sama. Taksa tertentu berkurang ketika oksigen terlarut menurun atau substrat tertutup sedimen halus, sedangkan taksa lain bertahan pada tekanan organik yang lebih tinggi. Kelompok Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera (EPT) kerap dipakai sebagai unsur metrik sensitivitas, tetapi toleransi tetap bervariasi menurut famili, habitat, serta kawasan biogeografis. Demikian pula, keluarga Chironomidae memiliki rentang toleransi yang luas sehingga kehadirannya saja tidak cukup untuk menggolongkan sungai sebagai tercemar.

Penilaian pada sungai tropis menuntut penyesuaian terhadap perbedaan fauna dan kondisi alam setempat. Indeks yang dirancang pada sungai di wilayah beriklim sedang tidak otomatis memiliki ambang interpretasi yang sama di Indonesia. Buss et al. (2015) mengidentifikasi kesamaan komponen utama antarpedoman biomonitoring global sekaligus menekankan perlunya evaluasi kinerja, ketelitian sampling, dan resolusi identifikasi taksonomi. Artinya, standarisasi prosedur perlu berjalan bersama kalibrasi indikator terhadap kondisi referensi lokal.

Di Indonesia, penelitian Patang et al. (2018) pada sejumlah sungai di Kalimantan Timur menunjukkan kegunaan analisis makroinvertebrata yang dipadukan dengan parameter fisika-kimia. Studi Il Maknuun et al. (2021) membandingkan beberapa indeks biotik pada sungai di Indonesia dan memperlihatkan bahwa interpretasi serta sensitivitas indeks dapat berbeda antarperairan. Hasil tersebut menyoroti potensi kesalahan apabila satu nilai indeks dipakai tanpa memeriksa habitat, musim, dan daftar taksa yang mendasari perhitungan.

Bukti yang lebih mutakhir berasal dari penelitian Budi Prakoso et al. (2023), yang menemukan bahwa sungai pada daerah tangkapan terurbanisasi di Yogyakarta cenderung memiliki konsentrasi nutrien lebih tinggi serta kekayaan taksa invertebrata lebih rendah. Penelitian lanjutan Budi Prakoso et al. (2024) mengembangkan indeks yang lebih sesuai untuk sungai Indonesia dengan menilai enam indeks terdahulu dan memasukkan taksa indikator yang belum terwakili. Temuan tersebut memperkuat pentingnya gradien penggunaan lahan dan kalibrasi lokal sebagai bagian dari rancangan evaluasi kualitas air.

Pada konteks tropis lintas wilayah, Mosquera et al. (2026) membandingkan lokasi sungai hulu dengan penutup hutan, pertanian tanaman pangan, padang penggembalaan, serta perkebunan kelapa sawit di Guatemala. Penilaian berbasis makroinvertebrata menunjukkan perbedaan kondisi biologis antarpenggunaan lahan yang tidak seluruhnya terdeteksi oleh indeks fisika-kimia sederhana. Kendati demikian, perbandingan kawasan perlu mempertimbangkan komposisi fauna, curah hujan, dan pengelolaan lahan yang berbeda dari kondisi kepulauan Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini mengkaji tiga persoalan utama: bagaimana perubahan aktivitas manusia berhubungan dengan struktur komunitas makroinvertebrata; sejauh mana metrik biologis dapat digunakan untuk menilai kualitas air sungai tropis; dan bagaimana rancangan pengamatan yang terstandar dapat mengurangi bias habitat, musim, serta perbedaan taksonomi. Tujuan kajian adalah menghasilkan sintesis bukti dan kerangka operasional yang layak digunakan sebagai dasar penelitian lapangan berikutnya. Artikel ini tidak menyajikan observasi sungai baru maupun klaim hubungan sebab-akibat yang belum dibuktikan.



Gambar 1. Gradien aktivitas manusia dan kategori tekanan yang dikaji (skema konseptual, bukan data pengamatan).

METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian dan Pendekatan Kajian

Penelitian ini merupakan kajian pustaka naratif terarah dengan analisis komparatif-kritis. Sumber utama meliputi artikel penelitian dan telaah ilmiah mengenai makroinvertebrata bentik, penggunaan lahan, respons ekologis, serta indeks penilaian sungai. Pedoman biomonitoring digunakan sebagai rujukan operasional. Rentang tahun sumber yang digunakan adalah 1993–2026, dengan penekanan pada penelitian tropis dan kajian terbitan terbaru yang relevan terhadap konteks Indonesia.

Kajian tidak dilaporkan sebagai systematic review atau meta-analisis karena tidak dilakukan penghitungan artikel melalui penyaringan basis data secara menyeluruh, penilaian risiko bias terstruktur pada seluruh studi, maupun penggabungan ukuran efek. Literatur dipilih berdasarkan keterkaitan substantif dengan pertanyaan penelitian, keterjelasan metode, akses terhadap deskripsi hasil, serta relevansi geografi dan indikator. Dengan demikian, istilah "hasil kajian" dalam naskah ini merujuk pada sintesis informasi yang dipublikasikan, bukan hasil survei lapangan oleh penulis.

3.2. Sumber dan Kriteria Penggunaan Literatur

Sumber prioritas mencakup publikasi mengenai gradien urbanisasi atau pertanian, studi perbandingan indeks biotik, dan dokumen prosedur pengambilan contoh. Literatur dari Indonesia menjadi rujukan utama, sedangkan penelitian negara tropis lain digunakan untuk menguji apakah pola umum respons komunitas konsisten pada kondisi geografis yang berbeda. Identitas studi, lokasi, jumlah sampel bila dinyatakan, kelompok variabel, dan batas interpretasi dicatat sebagai dasar perbandingan antarsumber.

Informasi kuantitatif hanya disampaikan apabila angka tersebut tertera pada studi yang dirujuk. Sebaliknya, pemilihan jumlah stasiun atau ulangan pada bagian rancangan lapangan merupakan rekomendasi metodologis yang belum diuji dalam kajian ini. Praktik pembedaan tersebut penting agar pembaca dapat mengidentifikasi bukti empiris yang sudah terbit, usulan penelitian, dan inferensi konseptual secara terpisah.

Tabel 1. Literatur inti dan kontribusinya dalam kajian

Sumber	Konteks	Pokok bukti
Bonada dkk. (2006)	Metode global	Perbandingan pendekatan biomonitoring
Patang dkk. (2018)	Kalimantan Timur	Komunitas bentik dan fisika-kimia
Il Maknuun dkk. (2021)	Beberapa sungai RI	Sensitivitas indeks biotik berbeda
Budi Prakoso dkk. (2023)	Yogyakarta	Penggunaan lahan dan invertebrata
Budi Prakoso dkk. (2024)	23 sungai RI	Pengembangan BMWP IDN
Mosquera dkk. (2026)	Guatemala; 19 lokasi	Perbandingan empat tipe lahan

3.3. Kerangka Variabel dan Unit Analisis

Variabel tekanan antropogenik diwakili oleh kategori penggunaan lahan dan intensitas aktivitas di daerah tangkapan: tutupan hutan relatif baik, pertanian, permukiman, serta kegiatan lain yang teridentifikasi. Unit analisis konseptual adalah segmen sungai berikut wilayah tangkapan terdekatnya. Indikator respons meliputi kekayaan taksa, komposisi famili, kelimpahan, metrik EPT, dan indeks biotik yang sesuai. Parameter pendamping berupa oksigen terlarut (DO), suhu, pH, konduktivitas listrik, kekeruhan, hara, substrat, debit, dan kondisi vegetasi riparian.

Pengelompokan lokasi berdasarkan kategori dominan tidak boleh mengabaikan penggunaan lahan campuran. Sebagai contoh, suatu segmen dapat mengalir melewati kebun tetapi menerima limbah domestik dari hulu. Oleh sebab itu, interpretasi yang lebih baik menggunakan persentase tutupan lahan daerah tangkapan, catatan saluran masuk, penggunaan lahan setempat, serta variabel fisik yang mungkin menjadi pembaur. Faktor musim dan ketinggian harus dicatat agar perubahan alamiah tidak salah dianggap akibat kegiatan manusia.

3.4. Prosedur Penilaian Lapangan yang Diusulkan

Untuk pengujian empiris selanjutnya, lokasi sebaiknya dipilih secara bertingkat mengikuti gradien tekanan dengan stasiun referensi di kawasan yang gangguannya relatif rendah. Setiap kelompok lahan dianjurkan memiliki lebih dari satu lokasi yang bebas secara hidrologis bila memungkinkan, bukan sekadar tiga titik berdekatan pada satu sungai. Pemilihan segmen perlu menyeimbangkan orde sungai, kisaran kedalaman, kemiringan, dan karakter substrat supaya perbedaan biologis tidak sepenuhnya dijelaskan oleh ketidaksamaan tipe habitat.

Makroinvertebrata dapat dikumpulkan menggunakan jaring D-frame atau kick-net pada habitat dangkal, serta alat lain yang sesuai untuk substrat berlumpur atau perairan lebih dalam. Titik contoh diambil dari kombinasi riffle, run, vegetasi tepi, atau mikrohabitat lain yang benar-benar tersedia. Waktu pengadukan, luas area, ukuran mata jaring, dan upaya sampling harus distandardisasi. Barbour et al. (1999) serta Buss et al. (2015) menjadi rujukan untuk penyusunan protokol yang dapat dibandingkan.

Di laboratorium, individu dipilah dari bahan organik dan sedimen, diawetkan sesuai kebutuhan, lalu diidentifikasi ke tingkat famili atau takson yang mampu diidentifikasi secara konsisten. Tingkat identifikasi yang berbeda antarstasiun dapat mengubah nilai kekayaan taksa secara artifisial. Sebagian sampel perlu diperiksa ulang oleh pengenal taksa kedua atau menggunakan koleksi referensi. Sampel kosong, kode lokasi, koordinat umum, waktu koleksi, cuaca, serta kondisi habitat dicatat sebagai kendali mutu.

 ISSN 3123-2795 (E)



Gambar 2. Alur rancangan biomonitoring sungai (usulan prosedur, bukan kegiatan yang telah dilakukan).

3.5. Metrik Biologi dan Analisis yang Direkomendasikan

Keanekaragaman dapat dijelaskan dengan kekayaan taksa (S), distribusi kelimpahan, indeks Shannon (H′), dan proporsi taksa peka. Nilai Shannon dihitung melalui $H' = -\Sigma(p_i \ln p_i)$, dengan p_i sebagai proporsi individu takson ke-i. Indeks tersebut menggambarkan kombinasi kekayaan dan kemerataan, bukan secara langsung kadar polutan. Dua lokasi dengan H′ yang sama mungkin memiliki komposisi taksa peka yang sangat berbeda. Karena itu, kekayaan dan komposisi taksa tetap harus ditampilkan dalam tabel.

Sebagai pelengkap, EPT richness menghitung jumlah taksa yang termasuk Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera. Indeks berbobot toleransi seperti Family Biotic Index (FBI) menggunakan rerata tertimbang nilai toleransi menurut banyaknya individu. Nilai FBI hanya dapat dibandingkan ketika daftar taksa, skor toleransi, cakupan identifikasi, dan rumus diikuti secara konsisten. Untuk Indonesia, kajian Budi Prakoso et al. (2024) mendukung pentingnya pengujian atau kalibrasi ulang sebelum meminjam ambang skor dari kawasan lain.

Hubungan komunitas dengan tekanan dapat dianalisis melalui uji perbedaan antarstasiun, korelasi dengan kualitas air, serta ordinasinya seperti non-metric multidimensional scaling (NMDS) jika jumlah sampel memadai. Model statistik perlu mempertimbangkan pengulangan pada sungai yang sama dan perbedaan musim. Nilai p harus disertai ukuran efek dan arah perubahan; hubungan antara indeks dan nutrien tidak cukup untuk membuktikan sumber pencemar tanpa data pendukung mengenai aliran dan aktivitas di daerah tangkapan.

Tabel 2. Metrik biologis, manfaat, dan keterbatasannya

Metrik	Makna	Keterbatasan
Kekayaan taksa	Jumlah jenis/famili teramati	Dipengaruhi upaya sampling
Shannon H′	Kekayaan dan kemerataan	Tidak spesifik pencemar
EPT richness	Representasi sebagian taksa peka	Variasi habitat/tropis
FBI / biotik	Skor berbobot toleransi	Butuh skor yang dikalibrasi
Komposisi taksa	Pergantian komunitas	Perlu identifikasi konsisten

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Bukti Perubahan Komunitas pada Gradien Penggunaan Lahan

Hasil sintesis memperlihatkan pola umum bahwa pemanfaatan daerah tangkapan yang lebih intensif berasosiasi dengan perubahan kualitas air dan komunitas bentik, meskipun kekuatan respons berbeda antarstudi. Budi Prakoso et al. (2023) meneliti sungai di Yogyakarta pada bentang kondisi mulai dari hutan hingga permukiman. Mereka melaporkan bahwa daerah tangkapan yang terurbanisasi mempunyai kandungan nutrien lebih tinggi dan kekayaan taksa invertebrata lebih rendah. Temuan tersebut menunjukkan bahwa tekanan domestik dan kondisi fisik perkotaan dapat menjadi faktor dominan pada beberapa sungai Indonesia.

Hubungan antara urbanisasi dan bentos perlu dipahami sebagai gabungan beberapa mekanisme. Permukaan kedap air dapat mengubah laju limpasan, sedangkan jaringan drainase menjadi jalur pengangkutan bahan tersuspensi, nutrien, dan bahan organik ke alur sungai. Apabila masukan organik melebihi kemampuan pemulihan aliran, aktivitas penguraian dapat menurunkan oksigen terlarut dan menggeser komunitas ke taksa yang lebih toleran. Di sisi lain, penutupan dasar sungai oleh sedimen halus mengurangi celah perlindungan bagi organisme yang hidup di antara batu dan kerikil. Pola yang teramati karenanya merupakan respons terhadap beberapa tekanan sekaligus.

Studi Mosquera et al. (2026) memberikan pembanding di kawasan tropis luar Indonesia. Penelitian di Guatemala menggunakan 19 lokasi sungai hulu yang dikelompokkan menurut kawasan hutan (6), kelapa sawit (5), pertanian (4), dan penggembalaan (4). Penilaian biologis memperlihatkan kondisi yang lebih baik pada kawasan berhutan serta kondisi yang lebih rendah pada kawasan penggembalaan dan kelapa sawit. Di dalam studi tersebut, perbedaan biologis antarkelompok penggunaan lahan lebih jelas daripada yang ditunjukkan oleh salah satu indeks fisika-kimia sederhana. Hal ini mendukung pendekatan multiindikator, bukan menggantikan analisis kimia air.

Dalam membandingkan kedua kawasan tropis tersebut, terdapat perbedaan tipe perkebunan, sistem pertanian, dan derajat urbanisasi. Oleh karena itu, hasil dari Guatemala tidak dapat dijadikan angka baku untuk menilai sungai di Sumatera, Kalimantan, atau Jawa. Pelajaran utamanya adalah pentingnya mengukur komposisi penggunaan lahan dan melibatkan lokasi referensi. Ketika kawasan hutan memiliki kondisi riparian dan substrat yang lebih baik, peningkatan kualitas biologis mungkin mencerminkan kombinasi tekanan kimia yang rendah dan habitat yang menyediakan keragaman mikrorelung.

 ISSN 3123-2795 (E)

Tabel 3. Temuan empiris terbitan yang relevan dengan gradien

Studi	Desain / cakupan	Temuan utama
Budi Prakoso dkk. (2023)	Sungai Indonesia; gradien lahan	Urbanisasi: nutrien naik, kekayaan turun
Budi Prakoso dkk. (2024)	23 lokasi; 69 sampel; 60 taksa	Indeks lokal BMWP IDN dikembangkan
Mosquera dkk. (2026)	19 lokasi; 4 kategori lahan	Hutan lebih baik secara biologis
Il Maknuun dkk. (2021)	Berbagai indeks di 4 sungai	Sensitivitas indeks berbeda antar-sungai

4.2. Keanekaragaman sebagai Sinyal Ekologis

Keanekaragaman komunitas sering menurun seiring meningkatnya gangguan berat, tetapi hubungan tersebut tidak harus linier. Pada intensitas gangguan rendah hingga sedang, beberapa lokasi dapat memiliki kekayaan taksa yang relatif tinggi karena adanya gabungan mikrohabitat atau tambahan sumber makanan. Namun, bila tekanan meningkat terus, hilangnya taksa sensitif dapat menyebabkan komunitas lebih homogen. Oleh karena itu, satu nilai indeks keanekaragaman tidak boleh diinterpretasikan secara terlepas dari komposisi famili dan kondisi referensi yang setara.

Indeks Shannon memerlukan kehati-hatian karena perubahan jumlah individu dominan dapat menurunkan H′ walaupun kekayaan taksa tetap. Sebaliknya, ketika beberapa taksa yang toleran memiliki kelimpahan merata, H′ dapat tampak relatif baik meskipun taksa peka telah hilang. Bagi pelaporan kualitas air, daftar famili dan kelimpahan aktual memberikan transparansi yang tidak dapat digantikan oleh skor ringkasan. Interpretasi yang baik menempatkan H′ sebagai deskripsi struktur komunitas, bukan "alat ukur langsung" kadar pencemar.

Pergeseran dari kelompok pemakan serasah atau pengikis perifiton menuju dominasi pengumpul partikel halus dapat pula memberikan informasi tentang perubahan sumber makanan dan substrat. Akan tetapi, kelompok fungsi makan dipengaruhi jenis tumbuhan riparian, ukuran aliran, ketersediaan bahan organik, serta sifat genetik dan ekologis taksa lokal. Data fungsi makan paling tepat dipakai sebagai analisis pelengkap apabila identifikasi organisme cukup rinci dan basis atributnya sesuai dengan fauna sungai tropis.

Perbedaan habitat juga dapat menjelaskan pola yang tampak seperti tekanan manusia. Sungai berbatu yang mengalir cepat cenderung menyediakan relung berbeda dari sungai dasar pasir atau lumpur. Jika stasiun referensi hanya memiliki riffle berkerikil sedangkan stasiun permukiman berupa kolam aliran lambat, ketidaksamaan EPT belum tentu seluruhnya merupakan efek pencemaran. Rancangan yang menyetarakan tipe habitat atau menggunakan pendekatan multi-habitat akan memperkuat pemisahan pengaruh antropogenik dan pengaruh alami.



Gambar 3. Contoh kelompok makroinvertebrata bentik (ilustrasi orisinal, bukan spesimen dari lokasi penelitian).

4.3. Perbandingan Indeks Biotik dan Pentingnya Kalibrasi Lokal

Il Maknuun et al. (2021) menguji perbedaan penafsiran status sungai menggunakan beberapa indeks pada Brantas, Opak, Progo, dan Cileungsi. Hasilnya menunjukkan bahwa FBI, Lincoln Quality Index, dan SingScore tidak selalu memberikan penilaian yang sama pada lokasi yang sama. Perbedaan tersebut berkaitan dengan kondisi sungai dan karakter tekanan yang diwakili indikator, sehingga pemilihan indeks memerlukan pertimbangan ilmiah, bukan hanya kemudahan penghitungan.

Budi Prakoso et al. (2024) membandingkan enam indeks terdahulu menggunakan data dari 23 sungai Yogyakarta. Data dasar memuat 13.268 individu yang diklasifikasikan menjadi 60 taksa dalam 69 sampel. Di antara indeks yang dievaluasi, pendekatan BMWP yang diadaptasi untuk Thailand memperlihatkan hubungan yang paling kuat dengan konsentrasi fosfat sebagai proksi kondisi air. Peneliti selanjutnya menambahkan lima taksa indikator dari analisis Threshold Indicator Taxa Analysis (TITAN) sehingga terbentuk usulan BMWP IDN. Hasil ini merupakan temuan studi tersebut, bukan hasil penghitungan baru dalam artikel ini.

Penggunaan fosfat sebagai proksi bukan berarti status seluruh bentuk polusi hanya ditentukan fosfat. Sungai dapat mengalami tekanan logam, pestisida, perubahan debit, limbah organik, atau sedimen meskipun konsentrasi fosfat relatif rendah. Oleh karena itu, indeks yang terkalibrasi terhadap fosfat tetap perlu diuji silang dengan gradien tekanan lain sebelum diterapkan untuk menyatakan kesehatan ekologis secara menyeluruh. Penyajian ketepatan klasifikasi, kesalahan penafsiran, dan keragaman kondisi referensi akan membuat indeks lebih bermanfaat bagi pengelola lingkungan.

Metrik EPT dan FBI mempunyai arah interpretasi yang berbeda secara konseptual. Banyak metrik kekayaan EPT cenderung bernilai lebih tinggi pada habitat yang mendukung taksa peka, sedangkan FBI berbobot toleransi tertentu dapat meningkat ketika individu yang toleran mendominasi. Namun, arah dan titik potong angka selalu bergantung pada formulasi dan wilayah asal indeks. Nilai kategori internasional tidak boleh ditransplantasikan begitu saja ke sungai Indonesia tanpa pembuktian kesetaraan nilai toleransi serta validasi terhadap standar lokal.

 ISSN 3123-2795 (E)

Penelitian lintas negara dari Buss et al. (2015) menunjukkan manfaat keseragaman jaring, proses sub-sampling, periode koleksi, dan ketelitian identifikasi. Kompatibilitas prosedur tersebut memungkinkan dataset digabungkan atau dibandingkan, tetapi tidak meniadakan kebutuhan penyesuaian skor indikator. Maka, dua lapisan standardisasi diperlukan: standar teknis untuk mengurangi variasi proses pengukuran dan standar ekologis untuk memastikan skor benar-benar menanggapi tekanan yang ingin dideteksi.

Tabel 4. Rekomendasi pembacaan beberapa indeks biologis

Indikator	Kelebihan	Syarat interpretasi
Shannon H′	Ringkas dan umum	Banding habitat & usaha koleksi
EPT	Menyoroti taksa peka	Pertimbangkan fauna lokal
FBI	Toleransi berbobot	Daftar skor dan ambang jelas
BMWP IDN	Potensi adaptasi Indonesia	Validasi lintas DAS masih perlu
Komposisi / NMDS	Membaca pergantian taksa	Sampel dan identifikasi konsisten

4.4. Peran Kondisi Fisika-Kimia dan Habitat sebagai Penjelas

Komunitas bentik tidak dapat dipisahkan dari kondisi air pada saat dan sebelum pengambilan contoh. DO menggambarkan ketersediaan oksigen bagi biota, sedangkan suhu menentukan kelarutan oksigen dan laju metabolisme. Konduktivitas listrik memberi indikasi jumlah ion terlarut dan mungkin menandai masukan tertentu, tetapi bukan ukuran spesifik pencemaran. Nitrogen dan fosfor berperan sebagai unsur hara yang dalam kadar berlebih dapat mendorong perubahan produktivitas dan proses dekomposisi. Semua parameter tersebut perlu dibaca sebagai rangkaian interaksi, bukan hubungan satu faktor dengan satu hasil.

Pengukuran kualitas air sesaat dapat terpengaruh waktu sampling, kejadian hujan, dan perubahan debit harian. Sebaliknya, makroinvertebrata merangkum paparan tekanan selama bagian dari siklus hidupnya. Keduanya menawarkan jendela waktu yang saling melengkapi. Bila nilai DO pada pagi hari berada dalam kisaran baik tetapi taksa peka sangat sedikit, perlu dipertimbangkan adanya tekanan episodik, modifikasi habitat, serta gangguan sebelumnya. Sebaliknya, hasil kimia sesaat yang buruk sesudah banjir belum tentu sepenuhnya tercermin pada komposisi bentos.

Gradien tutupan riparian menentukan intensitas cahaya, masukan serasah, suhu mikrohabitat, dan kestabilan tebing. Akar vegetasi membantu menahan partikel tanah, sedangkan kanopi mengubah produktivitas perifiton. Sungai dengan vegetasi riparian yang terfragmentasi dapat menunjukkan suhu yang lebih tinggi dan peningkatan sedimen, meskipun tidak menerima limbah domestik secara langsung. Variabel penutup riparian karenanya penting untuk dibedakan dari persentase tutupan lahan pada skala daerah tangkapan yang lebih luas.

Pada daerah tropis dengan curah hujan kontras, kondisi dasar sungai dapat berubah cepat setelah banjir besar. Organisme yang tersapu arus mungkin memerlukan waktu untuk mengkolonisasi kembali habitat. Ketika stasiun dikunjungi sekali pada musim hujan dan stasiun lain sekali pada musim kemarau, perbedaan tersebut dapat mencerminkan waktu pemulihan, bukan intensitas pencemaran. Penelitian multimusim dan pencatatan peristiwa hujan ekstrem akan meningkatkan daya tafsir indeks secara substansial.



Gambar 4. Kerangka mekanisme pengaruh penggunaan lahan terhadap indikator bentik; panah adalah hipotesis konseptual.

4.5. Keterbatasan Bukti dan Risiko Salah Klasifikasi

Temuan yang tersedia menunjukkan variasi cakupan daerah aliran sungai, musim koleksi, alat, dan tingkat taksonomi. Penelitian berbasis satu wilayah dapat memberi bukti kuat bagi wilayahnya, namun tidak cukup untuk menyimpulkan bahwa ambang indeks berlaku universal. Perbedaan komposisi taksa antarpulau Indonesia juga dapat mengubah kepekaan skor yang berasal dari taksa tertentu. Sistem referensi lokal dan kalibrasi antarhabitat dibutuhkan sebelum pengguna menetapkan kategori “baik”, “sedang”, atau “buruk” secara definitif.

Keterbatasan kedua adalah pengukuran tekanan manusia yang sering disederhanakan menjadi persentase lahan terbangun. Dua sub-DAS dengan tingkat urbanisasi serupa dapat berbeda besar dalam pengolahan air limbah, sistem drainase, penyangga vegetasi, dan keberadaan industri. Faktor pengelolaan tersebut dapat memediasi efek yang terlihat. Analisis yang lebih kuat menggabungkan informasi penggunaan lahan dengan inventaris sumber buangan, pengukuran air, serta kondisi fisik stasiun.

Ketiga, beberapa studi menilai perbedaan komunitas menggunakan data sekali waktu sehingga respons jangka panjang belum dapat dipastikan. Pemantauan berkala diperlukan untuk menilai apakah penurunan taksa peka menetap atau hanya dipengaruhi fluktuasi alami. Variasi pengamat saat memilah dan mengidentifikasi organisme juga harus diaudit. Pengambilan contoh ulangan dan identifikasi ulang sebagian spesimen dapat digunakan untuk memperkirakan ketidakpastian analitis.

4.6. Implikasi untuk Pemantauan Sungai Tropis di Indonesia

Pengelolaan kualitas air akan memperoleh manfaat dari penggabungan data fisika-kimia dan biologis pada stasiun yang dipantau secara berulang. Indikator biologis dapat memberi tanda awal perlunya investigasi lebih rinci, sedangkan analisis kimia membantu menilai jenis tekanan yang sedang berlangsung. Jika data tersedia selama beberapa musim, tren komunitas dapat dihubungkan dengan intervensi restorasi riparian, peningkatan sistem pengolahan limbah, atau perubahan tata guna lahan.

Rancangan operasional yang disarankan terdiri atas kelompok stasiun referensi, transisi pertanian, dan area permukiman dengan prosedur sampling yang sama. Peneliti perlu menyimpan data mentah kelimpahan taksa dan kualitas air agar penilaian dapat dihitung ulang ketika skor toleransi diperbaiki. Penggunaan informasi spasial tentang persentase tutupan hutan, kebun, dan permukiman akan memperjelas skala tekanan. Pada lingkungan yang minim fasilitas laboratorium, prioritas awal dapat diberikan pada identifikasi famili, DO, pH, konduktivitas, kekeruhan, serta karakter substrat dan riparian.

Monitoring partisipatif bersama sekolah atau masyarakat dapat mendukung pengamatan secara berkelanjutan, tetapi identifikasi oleh peserta pemula perlu pendampingan. Foto spesimen, kode sampel, dan koleksi rujukan dapat membantu verifikasi. Hasil hendaknya ditulis sebagai indikasi kondisi ekologis hingga terdapat validasi lapangan yang memadai; publikasi angka "kelas pencemaran" tanpa menyebut metode dan ambang akan menimbulkan kesan kepastian yang tidak sebanding dengan bukti.

Tabel 5. Rancangan pemantauan yang direkomendasikan untuk verifikasi

Tahap	Data wajib	Kendali mutu
Pra-survei	Tutupan lahan, peta alir	Catat pembaur & referensi
Lapangan	Bentos, DO, pH, suhu	Upaya sampling setara
Laboratorium	Taksa dan jumlah individu	Identifikasi ulang sebagian
Analisis	H′, EPT, indeks lokal	Uji sensitivitas & habitat
Pelaporan	Data mentah & ketidakpastian	Bedakan fakta dan inferensi

4.7. Prioritas Penelitian Lanjutan

Prioritas pertama adalah pengujian kemampuan indeks yang telah ada untuk membedakan tekanan pada berbagai wilayah biogeografis Indonesia. Dataset dari kawasan hutan, pertanian, serta perkotaan perlu mewakili tipe substrat dan orde sungai yang sebanding. Pendekatan tersebut memungkinkan pengujian apakah taksa indikator tertentu tetap peka di pulau dan daerah tangkapan yang berbeda. Penelitian kalibrasi hendaknya melaporkan kekuatan diskriminasi, ketidakpastian kelas, dan nilai ambang yang berasal dari data, bukan semata mengikuti publikasi luar negeri.

Prioritas kedua adalah mengintegrasikan pemantauan lintas musim dan sebelum-sesudah perubahan pengelolaan. Contohnya, peningkatan pengolahan limbah domestik dapat dikaji dengan stasiun intervensi dan pembanding yang dipantau berkala. Jika kekayaan taksa meningkat tanpa perubahan pada sebagian parameter air, peneliti tetap perlu menilai pemulihan habitat. Desain tersebut lebih informatif terhadap perubahan nyata daripada survei satu kali yang semata membandingkan lokasi.

Prioritas ketiga ialah meningkatkan basis data taksonomi dan atribut ekologis fauna lokal. Buku panduan identifikasi yang mudah diakses, spesimen pembanding, serta pelatihan pengamat akan memperkuat data antarinstitusi. Indikator berbasis ciri fungsional dan metode identifikasi molekuler dapat menjadi pelengkap pada kondisi tertentu, tetapi tidak seharusnya menggantikan dokumentasi dasar sampel, habitat, dan keterlacakan identifikasi. Peningkatan mutu data menjadi prasyarat utama bagi penerapan biomonitoring skala luas.

KESIMPULAN

Sintesis literatur menunjukkan bahwa gradien aktivitas manusia pada daerah tangkapan sungai berhubungan dengan perubahan kualitas air serta komposisi komunitas makroinvertebrata bentik. Bukti pada sungai Indonesia dan wilayah tropis lain memperlihatkan kecenderungan penurunan kekayaan atau perubahan kelompok indikator ketika tekanan penggunaan lahan meningkat, khususnya pada lingkungan dengan urbanisasi serta gangguan riparian dan substrat yang kuat. Namun, pola tersebut dimodifikasi oleh karakter aliran, tipe habitat, musim, dan campuran sumber pencemar.

Makroinvertebrata merupakan bioindikator yang berguna apabila metrik kekayaan, komposisi taksa, dan indeks toleransi ditafsirkan bersama data fisika-kimia serta kondisi habitat. Pengembangan BMWP IDN dalam penelitian terdahulu memperlihatkan potensi penyesuaian indeks untuk sungai Indonesia, tetapi kalibrasi dan validasi pada berbagai DAS masih diperlukan. Tidak ada satu nilai Shannon, EPT, atau indeks biotik lain yang dapat secara mandiri membuktikan kelas pencemaran suatu sungai tanpa standar yang relevan.

Kajian ini merekomendasikan rancangan sampling berbasis gradien penggunaan lahan dengan stasiun referensi, ulangan, keseragaman metode, identifikasi taksa konsisten, dan pemantauan multimusim. Artikel merupakan kajian literatur dan kerangka pengujian lapangan; jumlah individu, taksa, serta lokasi yang disebutkan merupakan data dari studi terpublikasi, bukan pengamatan primer penulis. Penelitian lapangan berikutnya diperlukan untuk menilai besarnya hubungan dan kemampuan indeks membedakan kondisi ekologis secara lokal.

DAFTAR PUSTAKA

Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 35, 257–284. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122

Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish (2nd ed.; EPA 841-B-99-002). U.S. Environmental Protection Agency.

Bonada, N., Prat, N., Resh, V. H., & Statzner, B. (2006). Developments in aquatic insect biomonitoring: A comparative analysis of recent approaches. Annual Review of Entomology, 51, 495–523. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151124

Budi Prakoso, S., Miyake, Y., Ueda, W., & Suryatmojo, H. (2023). Impact of land use on water quality and invertebrate assemblages in Indonesian streams. Limnologica, 101, 126082. https://doi.org/10.1016/j.limno.2023.126082

Budi Prakoso, S., Miyake, Y., Ueda, W., & Suryatmojo, H. (2024). Application and development of invertebrate indices for water quality assessment in Indonesian streams. Journal of Tropical Ecology, 40, e26. https://doi.org/10.1017/S0266467424000257

Buss, D. F., Carlisle, D. M., Chon, T. S., Culp, J., Harding, J. S., Keizer-Vlek, H. E., Robinson, W. A., Strachan, S., Thirion, C., & Hughes, R. M. (2015). Stream biomonitoring using macroinvertebrates around the globe: A comparison of large-scale programs. Environmental Monitoring and Assessment, 187, 4132. https://doi.org/10.1007/s10661-014-4132-8

Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D. J., Lévêque, C., Naiman, R. J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, M. L. J., & Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. Biological Reviews, 81(2), 163–182. https://doi.org/10.1017/S1464793105006950

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. https://doi.org/10.2307/1467832

Il Maknuun, L. L., Krisanti, M., & Wardiatno, Y. (2021). Sensitivitas dan kelayakan indeks biotik menggunakan makroavertebrata untuk menentukan status kesehatan sungai. Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 26(1), 151–158. https://doi.org/10.18343/jipi.26.1.151

Mosquera, V., Garcia, J., Reyes, E., Castaneda, J. P., Gordillo, C., Pineda, P., & Maas, R. (2026). Effect of land use on water quality of tropical headwater streams: Comparison across rainforest, cropland, pastureland, and oil palm plantation. Aquatic Sciences, 88, 21. https://doi.org/10.1007/s00027-025-01254-3

Patang, F., Soegianto, A., & Hariyanto, S. (2018). Benthic macroinvertebrates diversity as bioindicator of water quality of some rivers in East Kalimantan, Indonesia. International Journal of Ecology, 2018, 5129421. https://doi.org/10.1155/2018/5129421

Rosenberg, D. M., & Resh, V. H. (Eds.). (1993). Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman & Hall.