



DIMENSI
Jurnal Sains dan Teknologi

Published by Yayasan Yetti Afrida Center Bengkulu

pISSN | eISSN

Vol. 1 No. 1 Oktober 2026 | Pages 29-42

<https://yettiafridacenter.com/Dimensi>

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Integrasi Pendekatan Sains dan Teknologi dalam Pemantauan Kualitas Lingkungan untuk Mendukung Pembangunan Berkelanjutan

Khosi'in*

Universitas Islam Negeri Fatmawati Sukarno Bengkulu, Indonesia

Email: khosiin88@mail.uinfasbengkulu.ac.id

ABSTRACT

Purpose: This article examines how environmental science, sensor technologies, geographic information systems, and data analytics can be integrated into a defensible framework for monitoring environmental quality and informing sustainable development.

Design/Methodology: A conceptual and analytical literature review synthesizes principles of environmental measurement, continuous sensing, remote sensing, quality assurance, spatial analysis, and sustainability indicators. The study proposes an integrated monitoring workflow and evaluation criteria; it does not claim to have collected field observations.

Findings: Reliable monitoring depends on combining fit-for-purpose indicators, calibrated instruments, representative sampling, metadata, and explicit uncertainty assessment. Digital platforms improve temporal coverage and visualization but cannot replace reference measurements, ecological interpretation, or institutional accountability.

Practical Implications: The framework can support local governments, researchers, and communities in designing transparent monitoring systems, prioritizing field verification, communicating risks, and evaluating environmental interventions.

Originality/Value: The article links scientific validity, interoperable technologies, participatory governance, and decision thresholds into one adaptable monitoring architecture oriented toward the Sustainable Development Goals.

Keywords: environmental monitoring; integrated science; sensor networks; remote sensing; data quality; sustainable development.

Received: 16/09/2026

Accepted: 23/09/2026

Published: 12/10/2026

A. INTRODUCTION (PENDAHULUAN)

Pemantauan kualitas lingkungan menjadi kebutuhan mendasar ketika kegiatan ekonomi, pertumbuhan kota, perubahan penggunaan lahan, dan tekanan iklim berlangsung secara bersamaan. Kualitas udara, air, tanah, serta kondisi ekosistem tidak dapat dinilai hanya melalui satu kunjungan lapangan. Perubahan berlangsung dalam rentang waktu dan ruang yang berbeda; pencemaran dapat meningkat sesaat akibat aktivitas industri, lalu menurun ketika cuaca berubah, sedangkan kerusakan daerah aliran sungai dapat berkembang perlahan selama bertahun-tahun. Keputusan pembangunan membutuhkan gambaran yang membedakan fluktuasi sementara dari perubahan ekologis yang menetap.

Ilmu lingkungan menyediakan prinsip tentang mekanisme pencemaran, siklus materi, respons organisme, dan keterkaitan aktivitas manusia dengan sistem alam. Teknologi memperluas kemampuan mengukur dan mengamati melalui sensor otomatis, citra satelit, telemetri, komputasi awan, dan analitik data. Kedua pendekatan memiliki kekuatan yang saling melengkapi. Instrumen digital dapat merekam konsentrasi secara rapat dalam waktu, tetapi pengukuran tetap membutuhkan pemilihan indikator, kalibrasi, dan penafsiran ilmiah. Tanpa landasan tersebut, banyaknya titik data tidak otomatis meningkatkan ketepatan kesimpulan.

Agenda pembangunan berkelanjutan mempertemukan kebutuhan peningkatan kesejahteraan dengan perlindungan fungsi lingkungan. Target kesehatan, air bersih, kota yang berkelanjutan, aksi iklim, dan keanekaragaman hayati memerlukan informasi yang dapat ditelusuri. Kerangka Tujuan Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa

menekankan pentingnya indikator untuk melacak kemajuan, meskipun satu indikator tidak pernah menggambarkan keseluruhan kualitas suatu kawasan (United Nations, 2015). Karena itu, sistem pemantauan hendaknya dirancang untuk menjawab pertanyaan kebijakan, bukan sekadar menampilkan angka yang mudah dihasilkan perangkat.

Permasalahan utamanya adalah pemisahan antara pengukuran laboratorium, observasi lapangan, sensor daring, citra penginderaan jauh, serta keputusan pengelolaan. Laporan dari beberapa instansi sering menggunakan satuan, lokasi, periode, dan metode yang tidak sebanding. Keterbatasan sumber daya pada pemerintah daerah juga dapat menimbulkan jeda pengamatan yang panjang. Artikel ini bertujuan merumuskan kerangka konseptual integrasi sains dan teknologi untuk pemantauan kualitas lingkungan, menilai manfaat dan keterbatasannya, serta menawarkan langkah penerapan yang transparan, adaptif, dan relevan bagi pembangunan berkelanjutan.

B. LITERATURE REVIEW (KAJIAN PUSTAKA)

Kualitas Lingkungan sebagai Konsep Multidimensi

Kualitas lingkungan mengacu pada keadaan komponen fisik, kimia, dan biologis yang menentukan kemampuan suatu wilayah menopang kehidupan serta aktivitas manusia. Pada air permukaan, indikator dapat meliputi suhu, pH, oksigen terlarut, kekeruhan, nutrisi, dan mikroorganisme. Pada udara ambien, parameter yang umum digunakan mencakup partikel halus, ozon permukaan, dan gas pencemar tertentu. Kondisi tanah dapat dilihat dari karakter fisik, unsur hara, kontaminan, dan aktivitas biologis. Pemilihan variabel perlu didasarkan pada sumber tekanan dan tujuan pemantauan, bukan pada banyaknya jenis sensor yang tersedia.

Indikator fisik sering memberi informasi cepat, namun tidak selalu cukup untuk menilai dampak ekologis. Perubahan suhu sungai dapat memengaruhi oksigen terlarut dan komunitas akuatik; konsentrasi nutrisi yang meningkat dapat mendahului perubahan komposisi alga. Pemantauan biologi melengkapi pengujian kimia karena organisme mencerminkan paparan yang berlangsung dalam periode tertentu. Di sisi lain, bioindikator dipengaruhi musim, habitat, dan proses ekologis lain. Interpretasi yang kuat memerlukan penggabungan bukti, bukan anggapan bahwa satu nilai tunggal menjadi ukuran mutlak seluruh kondisi lingkungan.

Kesesuaian indikator juga bergantung pada skala pengelolaan. Pemeriksaan kualitas air minum di titik konsumsi berbeda tujuan dari pemantauan mutu sungai pada tingkat daerah aliran. Indikator kesehatan masyarakat tidak identik dengan indikator stabilitas habitat. Oleh karena itu, sebelum perangkat dipasang, tim perlu merumuskan objek pemantauan, kelompok penerima manfaat, potensi gangguan, serta keputusan yang mungkin diambil apabila nilai berubah. Penyusunan kerangka konsep ini mengurangi risiko pengumpulan data yang melimpah namun sukar ditindaklanjuti.

Dasar Pengukuran dan Ketidakpastian

Setiap hasil pengukuran mengandung ketidakpastian yang berasal dari keterbatasan instrumen, variasi sampel, prosedur pengukuran, dan perubahan kondisi lokasi. Sensor berbiaya rendah memberikan peluang perluasan jaringan pengamatan, tetapi dapat mengalami drift, interferensi, dan ketergantungan terhadap suhu atau kelembapan. Pembandingan dengan instrumen rujukan diperlukan untuk mengetahui kapan pembacaan layak digunakan. Kalibrasi bukan kegiatan satu kali; interval pemeriksaan perlu mempertimbangkan karakter instrumen dan kondisi operasional.

Perbedaan antara akurasi, presisi, keterwakilan, dan kelengkapan data perlu dinyatakan secara eksplisit. Data yang sangat rapat secara temporal dapat memiliki bias bila sensor ditempatkan di lokasi tidak representatif. Sebaliknya, sampel laboratorium yang terukur dengan baik dapat melewatkan peristiwa pencemaran singkat jika diambil terlalu jarang. Rancangan pengamatan perlu menggabungkan keunggulan keduanya. Prinsip metrologi menuntut satuan yang konsisten, keterlacakan standar, batas deteksi, serta catatan prosedur dan koreksi yang dilakukan terhadap hasil.

B. LITERATURE REVIEW (KAJIAN PUSTAKA) — LANJUTAN

Sensor, Internet of Things, dan Telemetry

Jaringan Internet of Things menghubungkan perangkat penginderaan dengan sistem penyimpanan dan analisis sehingga perubahan kondisi dapat diamati mendekati waktu nyata. Stasiun pemantauan dapat mengirim suhu, kelembapan, partikel udara, tinggi muka air, atau parameter perairan melalui jaringan seluler maupun komunikasi jarak jauh berdaya rendah. Rancangan sistem tidak hanya membahas sensor, tetapi juga catu daya, ketahanan terhadap cuaca, sinkronisasi waktu, keamanan komunikasi, dan strategi penyimpanan ketika jaringan terputus.

Penggunaan sensor murah tidak meniadakan kebutuhan prosedur kualitas. Sensor udara partikulat optik, misalnya, dapat dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel dan kelembapan. Sensor elektrokimia memiliki respons silang terhadap gas tertentu. Pada perairan, permukaan probe dapat tertutup biofilm dan mengubah pembacaan. Oleh sebab itu, perangkat perlu dilengkapi jadwal pembersihan, inspeksi, dan perbandingan berkala. Sistem yang tampak berfungsi secara digital masih dapat mengirim data keliru apabila kualitas pengindraannya tidak diuji.

Desain jaringan ditentukan oleh heterogenitas fenomena yang diamati. Untuk kualitas udara perkotaan, penempatan dekat jalan raya dan permukiman menghasilkan informasi paparan berbeda. Untuk sungai, lokasi hulu, titik masuk limbah, dan hilir memberi gambaran perubahan ruang yang lebih bermakna daripada pemasangan acak. Tim pemantau harus menghindari penempatan sensor semata-mata berdasarkan ketersediaan listrik atau kemudahan akses. Kepentingan ilmiah pemilihan lokasi perlu ditimbang bersama keselamatan peralatan dan biaya pemeliharaan.

Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis

Penginderaan jauh memungkinkan analisis penutup lahan, suhu permukaan, perubahan vegetasi, dan beberapa karakteristik perairan pada area yang tidak selalu mudah dijangkau. Sistem Informasi Geografis membantu menggabungkan citra tersebut dengan batas administrasi, jaringan sungai, penggunaan lahan, topografi, dan lokasi kegiatan industri. Integrasi ruang memperlihatkan hubungan antara sumber tekanan dan wilayah terdampak, serta mempermudah komunikasi pola yang sulit dikenali melalui tabel angka semata.

Data satelit tidak dapat diperlakukan sebagai pengganti langsung setiap pengukuran permukaan. Banyak produk merekam sifat spektral atau besaran kolom atmosfer yang berbeda dari konsentrasi di titik paparan manusia. Tutupan awan, resolusi spasial, dan waktu lintasan juga membatasi interpretasi. Karena itu, pemetaan sebaiknya disertai validasi dengan data lapangan, informasi resolusi, periode pengamatan, dan proses prapemrosesan. Kesesuaian antara ukuran piksel dan skala keputusan harus dinilai sebelum menghasilkan peta prioritas lingkungan.

B. LITERATURE REVIEW (KAJIAN PUSTAKA) — LANJUTAN

Analitik Data dan Pemodelan Lingkungan

Teknik statistik dan komputasi memungkinkan pengenalan pola, pencarian anomali, estimasi data hilang, serta pengembangan prakiraan jangka pendek. Namun, sinyal lingkungan memiliki musiman, autokorelasi, hubungan nonlinear, dan perubahan karena intervensi manusia. Model yang dilatih pada satu musim dapat menunjukkan kinerja berbeda pada musim lain. Pembagian data acak sering memberi gambaran terlalu optimistis apabila pengamatan yang sangat berdekatan masuk sekaligus dalam data latihan dan pengujian. Evaluasi berdasarkan urutan waktu dan lokasi menjadi penting.

Penjelasan berbasis proses alam perlu melengkapi pemodelan berbasis data. Algoritma dapat mempelajari keterkaitan konsentrasi polutan dengan arah angin, curah hujan, atau arus, tetapi korelasi tidak otomatis menunjukkan penyebab. Model fisik mengenai dispersi atau hidrologi dapat membantu memeriksa kewajaran hasil. Literatur mengenai sistem Bumi menegaskan potensi perpaduan pembelajaran mesin dengan pemahaman proses, bukan persaingan antara keduanya (Reichstein et al., 2019). Integrasi ini juga membantu menghindari penggunaan prediksi yang melampaui kondisi pelatihan.

Pemantauan tidak selalu membutuhkan algoritma rumit. Rata-rata bergerak, grafik kendali, serta pengujian perubahan tren kadang cukup untuk mengidentifikasi kejadian yang perlu ditinjau. Metode kompleks baru dibenarkan bila memperbaiki keandalan, ketepatan waktu, atau ketepatan interpretasi dibanding metode sederhana. Kriteria penerimaan harus disepakati sebelum analisis, mencakup kesalahan pada data pengujian, kemampuan mengenali kejadian ekstrem, biaya pemrosesan, dan kemudahan menjelaskan hasil kepada pengambil keputusan.

Dimensi Sosial, Partisipasi, dan Keterbukaan

Warga sering memiliki pengetahuan lokal tentang perubahan bau, warna air, kerusakan vegetasi, atau waktu terjadinya gangguan. Informasi ini dapat membantu merancang pengambilan sampel dan menandai kejadian yang tidak tercakup instrumen. Meski demikian, laporan komunitas perlu diverifikasi dengan prosedur yang jelas agar tidak disamakan dengan pengukuran instrumental. Citizen science mempunyai manfaat pendidikan dan pengawasan sosial ketika panduan pengumpulan data, mekanisme umpan balik, dan kualitas informasi disusun secara konsisten.

Keterbukaan data dapat memperkuat kepercayaan publik jika disertai penjelasan mengenai ketidakpastian dan keterbatasan. Menampilkan grafik tanpa definisi parameter atau standar pembanding berpotensi memicu kesimpulan keliru. Platform informasi yang bertanggung jawab harus menyediakan satuan, tanggal pembaruan, lokasi, status validasi, serta keterangan apakah nilai merupakan pengukuran langsung atau hasil model. Komunikasi risiko harus menghindari penyederhanaan berlebihan, khususnya ketika data terkait kesehatan masyarakat atau sumber penghidupan warga.

C. METHOD (METODE)

Desain Kajian Konseptual-Analitis

Artikel ini menggunakan kajian konseptual-analitis untuk menyintesis prinsip ilmu lingkungan, teknologi pengukuran, analitik data, dan tata kelola informasi. Bahan kajian meliputi karya ilmiah tentang sistem pengamatan lingkungan, pengindraan jauh, analisis ketidakpastian, serta kerangka pembangunan berkelanjutan. Model integrasi dikembangkan

dengan membandingkan fungsi tiap teknologi terhadap persyaratan validitas ilmiah. Artikel tidak melakukan pengambilan sampel lapangan dan tidak melaporkan hasil laboratorium atau percobaan yang belum dilaksanakan.

Analisis dilakukan melalui empat pertanyaan. Pertama, indikator apa yang diperlukan agar keadaan lingkungan dapat dipahami secara sah? Kedua, bagaimana pengukuran dari sumber berbeda dapat saling melengkapi tanpa mengaburkan perbedaan metode? Ketiga, prosedur apa yang diperlukan untuk menangani kesalahan, kekosongan, dan perubahan karakter data? Keempat, bagaimana informasi diterjemahkan menjadi keputusan yang relevan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan? Pertanyaan tersebut membentuk urutan logis dari perencanaan hingga evaluasi tindakan.

Kerangka tidak bermaksud menyatakan bahwa satu arsitektur teknis paling tepat untuk semua wilayah. Kondisi geografis, ketersediaan tenaga ahli, akses internet, anggaran pemeliharaan, dan prioritas pencemar dapat berubah antarinstansi. Karena itu, kajian menekankan kriteria desain yang dapat ditransfer, bukan spesifikasi merek atau alat tunggal. Setiap rekomendasi ditempatkan sebagai prinsip metodologis yang memerlukan adaptasi dan pengujian ketika digunakan untuk sistem nyata.

Tahapan Sintesis dan Penilaian

Sintesis konsep menggunakan matriks fungsi yang membedakan sumber data, parameter, resolusi, keterbatasan, prosedur verifikasi, serta penggunaan potensial. Observasi langsung menekankan bukti di lokasi, sensor kontinu menambah resolusi waktu, penginderaan jauh memperluas cakupan ruang, sedangkan analitik data membantu menggabungkan dan memahami pola. Evaluasi dilakukan terhadap kelayakan pengukuran, ketepatan analisis, keterbacaan informasi, dan kemungkinan tindak lanjut.

Keberhasilan rancangan ditinjau melalui indikator proses: proporsi data tervalidasi, kesinambungan pencatatan, keterlacakan kalibrasi, kesesuaian satuan, dan kejelasan respons terhadap nilai ambang. Indikator keluaran terkait kemampuan membedakan perubahan nyata dari gangguan alat serta tersedianya informasi dalam waktu yang mendukung keputusan. Ukuran tersebut merupakan usulan evaluasi, bukan angka hasil survei. Pembedaan ini perlu dinyatakan agar pembaca tidak salah menafsirkan kerangka konseptual sebagai sistem yang telah dioperasikan.

C. METHOD (METODE) — LANJUTAN

Arsitektur Pemantauan Terintegrasi

Rancangan konseptual dimulai dari inventarisasi sumber tekanan, karakter ekosistem, dan kebutuhan informasi pemangku kepentingan. Tahap berikutnya menentukan indikator prioritas dan desain jaringan pengamatan. Data diperoleh dari kombinasi pengujian laboratorium, stasiun tetap, sensor bergerak, citra satelit, dan pencatatan warga yang terverifikasi. Semua aliran informasi masuk ke repositori dengan pengenalan lokasi, waktu pengamatan, satuan, serta keterangan metode. Metadata menjadi unsur utama untuk menjamin bahwa penggabungan tidak mencampur data yang tidak sebanding.

Dalam tahapan pemrosesan, sistem menandai nilai yang berada di luar rentang fisik wajar, perubahan mendadak yang mencurigakan, dan periode saat alat menjalani pemeliharaan. Pemeriksaan otomatis harus menghasilkan bendera mutu alih-alih langsung menghapus data. Penghapusan yang tidak tercatat dapat menghilangkan bukti kejadian pencemaran ekstrem.

Keputusan apakah suatu pembacaan benar-benar salah dilakukan melalui pengujian silang, riwayat alat, serta informasi cuaca atau kegiatan lapangan. Alur ini memungkinkan audit terhadap koreksi yang dilakukan.

Pada tahap interpretasi, indikator dilihat dalam konteks ruang, waktu, dan fungsi ekosistem. Ambang peringatan dibedakan dari ambang regulasi karena tidak semua kenaikan sementara menunjukkan pelanggaran, dan tidak semua risiko memerlukan ambang tunggal. Informasi disampaikan melalui tampilan bertingkat: data rinci bagi analis, ringkasan kondisi bagi pengelola, dan pesan risiko yang jelas bagi publik. Mekanisme umpan balik mencatat apakah peringatan ditindaklanjuti, kapan verifikasi dilakukan, dan apakah pengukuran berikutnya menunjukkan perubahan.

Prosedur Keandalan dan Reprodusibilitas

Keandalan sistem memerlukan dokumen standar pengoperasian, penanggung jawab instrumen, log kalibrasi, dan rekaman versi pengolahan data. Rencana pemantauan sebaiknya mencatat alasan pemilihan lokasi, frekuensi sampling, waktu respons, serta cara menangani gangguan listrik atau komunikasi. Konsistensi metode sangat penting dalam analisis tren. Perubahan alat yang tidak didokumentasikan dapat tampak sebagai penurunan atau peningkatan kualitas lingkungan padahal berasal dari perubahan karakter sensor.

Dalam penelitian lanjutan, prosedur validasi dapat membandingkan sensor operasional dengan pengukuran rujukan pada beberapa kondisi lingkungan. Statistik bias, simpangan, kesalahan absolut, dan proporsi data tersedia perlu dilaporkan bersama karakteristik sampel. Evaluasi tidak cukup hanya memakai korelasi tinggi karena dua alat dapat sangat berkorelasi tetapi memiliki selisih sistematis yang besar. Pelaporan secara terbuka mengenai kegagalan dan keterbatasan lebih berguna bagi pembuat keputusan daripada skor tunggal yang tampak mengesankan.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN)

Integrasi Pengukuran sebagai Hasil Sintesis Konseptual

Hasil sintesis menunjukkan bahwa sistem pemantauan yang dapat dipercaya membutuhkan keterpaduan empat lapisan, yaitu pengukuran, validasi, interpretasi, dan keputusan. Lapisan pertama menghasilkan data berdasarkan prinsip ilmu lingkungan. Lapisan kedua menjaga mutu melalui kalibrasi, inspeksi, dan pemantauan kesalahan. Lapisan ketiga menjelaskan pola temporal-spasial berdasarkan pengetahuan proses. Lapisan terakhir menghubungkan bukti dengan tindakan institusi. Putusnya satu lapisan dapat mengurangi nilai keseluruhan sistem, meskipun komponen teknologi yang digunakan tergolong maju.

Pemantauan air memberikan ilustrasi hubungan antarlapisan. Sensor konduktivitas atau kekeruhan dapat memberikan sinyal perubahan mendadak, tetapi penyebabnya belum dapat diketahui tanpa informasi curah hujan, debit sungai, kegiatan di hulu, dan pengukuran laboratorium. Kenaikan kekeruhan setelah hujan deras mempunyai penafsiran berbeda dari kenaikan pada kondisi debit stabil di dekat sumber limbah. Model terintegrasi tidak langsung menyatakan pencemaran berdasarkan satu nilai; ia menghasilkan hipotesis yang harus diverifikasi dan dihubungkan dengan proses lingkungan.

Pada kualitas udara, penggabungan sensor lapangan dengan meteorologi dan pola penggunaan lahan membantu membedakan variasi akibat emisi lokal, transportasi polutan, serta kondisi atmosfer. Penilaian paparan manusia menuntut perhatian terhadap waktu dan lokasi

aktivitas warga. Informasi satu titik sensor tidak otomatis menggambarkan satu kota, terlebih bila struktur jalan dan ventilasi udara beragam. Pengambilan keputusan harus mempertimbangkan ketidakpastian spasial, tingkat kepercayaan tiap data, serta risiko penggunaan peta beresolusi tinggi yang sesungguhnya didukung pengamatan terbatas.

Temuan konseptual ini tidak berupa persentase peningkatan akurasi atau penurunan polusi, sebab tidak ada eksperimen operasional yang dikerjakan. Kontribusinya adalah prinsip penggabungan metode: teknologi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan standar ilmiah menentukan kualitas bukti. Kinerja nyata hanya dapat disimpulkan setelah rancangan diuji di lokasi dan periode yang sesuai. Kejelasan batas klaim ini menjadi penting agar desain sistem tidak dipromosikan sebagai keberhasilan lingkungan yang telah terbukti.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Mutu Data, Kekosongan Rekaman, dan Peristiwa Ekstrem

Aliran data kontinu rentan terhadap sensor mati, komunikasi terputus, perubahan tegangan, gangguan cuaca, dan kesalahan waktu sistem. Kekosongan data yang terjadi justru ketika banjir atau kualitas udara memburuk menimbulkan bias yang lebih serius daripada kekosongan acak. Karena itu, proporsi ketersediaan data perlu dinilai berdasarkan kondisi kejadian, tidak hanya dihitung sebagai persentase keseluruhan. Mekanisme cadangan dan pencatatan alasan kehilangan observasi harus menjadi bagian dari rancangan sejak awal.

Pemulihan nilai hilang dengan interpolasi hanya dapat dilakukan apabila asumsi kontinuitas dan karakter proses memungkinkan. Mengisi celah panjang pada saat terjadi kejadian ekstrem dengan garis halus dapat menyembunyikan puncak risiko. Metode pemodelan yang lebih kompleks pun tidak membenarkan penyajian nilai imputasi seolah-olah hasil pengukuran. Dashboard harus memberi penanda visual yang membedakan observasi nyata, estimasi berbasis model, serta nilai yang belum tervalidasi. Transparansi sumber data memperkuat kualitas interpretasi oleh publik.

Pendeteksian anomali perlu dibedakan antara gangguan instrumen dan perubahan lingkungan yang sesungguhnya. Nilai pH di luar rentang kewajaran dapat berasal dari kegagalan probe, namun perubahan kimia air juga mungkin berlangsung mendadak akibat suatu kejadian. Keputusan berbasis ambang otomatis semestinya memicu pemeriksaan, bukan menghapus pembacaan atau menetapkan kesimpulan final. Protokol verifikasi dapat menggunakan sensor pembanding, pengambilan sampel manual, serta informasi lapangan dan temporal yang berkaitan.

Pengukuran yang valid juga menuntut dokumentasi ketidakpastian. Dua stasiun yang menunjukkan selisih kecil belum tentu benar-benar berbeda bila rentang galat alat saling tumpang tindih. Keputusan menentukan tren sebaiknya memperhitungkan ragam musiman, perubahan instrumen, serta prosedur sampling. Ketika jumlah data besar, signifikansi statistik dapat mudah ditemukan untuk perubahan yang secara praktis kecil. Oleh karena itu, ukuran dampak, relevansi ekologis, dan batas kesalahan perlu dibahas bersama.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Pemanfaatan GIS untuk Prioritas Spasial

Peta interaktif memberi kemampuan untuk menelusuri perbedaan kualitas lingkungan antarwilayah dan hubungan dengan sumber tekanan. Namun, peta dapat menimbulkan kesan ketelitian palsu bila interpolasi dilakukan dari titik sampel yang jarang. Pemilihan metode

interpolasi memerlukan pengujian validitas spasial, pemahaman topografi, arah aliran, penggunaan lahan, serta jarak korelasi. Pada sungai, kedekatan menurut garis lurus tidak selalu berarti keterhubungan hidrologis; hubungan hulu dan hilir sering lebih penting.

Integrasi dengan informasi sosial dapat membantu mengidentifikasi lokasi yang membutuhkan perlindungan lebih besar, misalnya kawasan sekolah, permukiman padat, atau sumber air rumah tangga. Meski demikian, penentuan prioritas harus didasarkan pada indikator yang jelas dan dapat diaudit. Ketika data demografis atau lokasi fasilitas bersifat sensitif, pengelola perlu mempertimbangkan agregasi yang memadai dan perlindungan privasi. Tujuan utamanya adalah mendukung alokasi pemantauan dan intervensi, bukan memberi label negatif tanpa bukti terhadap suatu lingkungan.

Perubahan tutupan lahan dapat dianalisis menggunakan citra pada beberapa periode untuk menilai tekanan pada daerah resapan atau wilayah pesisir. Peta perubahan tidak otomatis menjelaskan dampak kualitas air atau keanekaragaman hayati; hubungan tersebut masih memerlukan observasi pendukung. Misalnya, hilangnya vegetasi riparian dapat meningkatkan kerentanan erosi, tetapi besarnya perubahan kekeruhan dipengaruhi curah hujan, jenis tanah, dan kegiatan di wilayah sekitarnya. Perpaduan penginderaan jauh dan pengukuran langsung memungkinkan hipotesis tersebut diperiksa.

Pelaporan spasial sebaiknya menyertakan tanggal citra, resolusi, tingkat keyakinan klasifikasi, serta skala penggunaan yang disarankan. Peta yang dibuat untuk orientasi wilayah tidak layak langsung digunakan menentukan pelanggaran di suatu rumah atau bidang tanah. Kesesuaian skala merupakan prinsip sederhana tetapi menentukan keadilan keputusan. Dengan menampilkan keterbatasan tersebut, aplikasi GIS menjadi sarana analisis yang lebih dapat dipercaya.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Kecerdasan Buatan dan Pengambilan Keputusan

Pembelajaran mesin dapat membantu mengidentifikasi pergeseran pola, memperkirakan kondisi pada lokasi yang tidak terukur, atau menyusun prakiraan jangka pendek. Akan tetapi, model yang mampu mengikuti data historis belum tentu tetap andal ketika sumber emisi, aktivitas manusia, atau iklim berubah. Pengujian harus menggunakan data pada periode atau wilayah yang tidak disertakan dalam pelatihan. Seluruh normalisasi, seleksi fitur, dan imputasi sebaiknya dipelajari hanya dari data pelatihan untuk mencegah kebocoran informasi.

Keterjelasan prediksi menjadi penting apabila keluaran algoritma dipakai menetapkan inspeksi atau komunikasi peringatan kepada warga. Penjelasan berupa variabel yang memengaruhi prediksi perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Kepentingan suatu prediktor dalam model tidak sama dengan bukti hubungan sebab akibat. Variabel meteorologi mungkin kuat memprediksi konsentrasi tanpa menjadi sumber emisi. Untuk tindakan pengendalian, model statistik harus dihubungkan dengan pemeriksaan lapangan serta pengetahuan mekanisme fisik dan kimia yang relevan.

Pilihan model juga harus mempertimbangkan biaya energi, kemampuan perawatan perangkat, dan akses tenaga terampil. Penggunaan algoritma yang sangat kompleks dapat menyulitkan penerapan di daerah dengan infrastruktur terbatas. Untuk beberapa kebutuhan, model regresi atau aturan berbasis batas perubahan cukup efektif sebagai alat skrining awal. Pemilihan teknologi yang proporsional lebih sejalan dengan tujuan keberlanjutan dibanding penggunaan kecerdasan buatan hanya untuk menambah kesan modern.

Pemantauan berbasis model idealnya dilengkapi proses audit berkala, pencatatan versi, dan indikator penurunan kinerja. Apabila peringatan berulang kali keliru atau justru melewati kejadian penting, sistem perlu ditinjau ulang. Pengawasan manusia harus tetap memiliki kewenangan memeriksa alasan perubahan status dan membatalkan keputusan otomatis yang tidak beralasan. Dengan demikian, prediksi digunakan sebagai informasi pendukung, bukan pengganti tanggung jawab institusi.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Kaitan Indikator dengan Pembangunan Berkelanjutan

Penggunaan teknologi pemantauan memperoleh manfaat paling nyata ketika indikator dihubungkan dengan sasaran tindakan. Informasi air permukaan dapat mendukung evaluasi perlindungan sumber air, data udara dapat membantu penetapan prioritas pengurangan paparan, sedangkan peta penggunaan lahan mendukung perencanaan ruang dan konservasi. Keterhubungan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan harus dinyatakan secara spesifik agar tidak menjadi klaim umum yang sulit diuji. Indikator operasional perlu dibedakan dari indikator resmi tingkat nasional atau global.

Kondisi lingkungan yang membaik pada satu parameter belum tentu menunjukkan keberlanjutan menyeluruh. Penurunan konsentrasi polutan dapat terjadi karena perubahan cuaca, pemindahan sumber emisi, atau pengurangan aktivitas sementara. Evaluasi kebijakan perlu menggunakan periode pembandingan yang tepat dan, jika memungkinkan, lokasi kontrol. Pendekatan sebelum-sesudah tanpa mempertimbangkan variasi alami dapat mengaitkan perubahan yang salah dengan suatu program. Integrasi sains lingkungan dan desain evaluasi kebijakan membantu mengurangi risiko kesimpulan semacam ini.

Dimensi kesetaraan perlu masuk dalam rancangan pemantauan. Kawasan dengan akses internet lemah atau jauh dari pusat kota dapat kekurangan data, sehingga tampak lebih sedikit masalah bukan karena lingkungannya lebih baik, melainkan karena jarang diperiksa. Distribusi perangkat sebaiknya mempertimbangkan tingkat risiko, keterwakilan kelompok rentan, dan keterjangkauan layanan pengaduan. Penataan jaringan berdasarkan keadilan pengamatan menjadi bagian dari kontribusi pemantauan terhadap pembangunan yang inklusif.

Selain nilai lingkungan, indikator kelembagaan dapat mengukur apakah peringatan ditindaklanjuti, apakah hasil pengujian diumumkan, dan apakah tindakan koreksi terdokumentasi. Sistem yang menghasilkan ribuan catatan tanpa tindak lanjut belum tentu meningkatkan hasil pembangunan. Kualitas tata kelola menghubungkan informasi dengan keputusan nyata, sehingga perbaikan perlu diukur sepanjang rantai dari pengamatan hingga respons.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Tata Kelola Data dan Kolaborasi Kelembagaan

Pelaksanaan sistem terintegrasi melibatkan lembaga lingkungan, unit laboratorium, perencana wilayah, lembaga riset, komunitas, dan penyedia infrastruktur teknologi. Setiap pihak mempunyai tanggung jawab berbeda. Laboratorium memelihara metode rujukan, operator sensor memastikan perangkat bekerja, analis menyusun informasi dengan ketidakpastian yang jelas, sedangkan pejabat terkait menentukan respons sesuai kewenangan. Pembagian peran harus ditulis dalam prosedur agar kegagalan instrumen atau perubahan kebijakan tidak menghilangkan akuntabilitas.

Interoperabilitas memerlukan kamus variabel, standar satuan, format waktu, kode lokasi, dan pengenalan versi data. Penggabungan tabel dari beberapa instansi dapat menimbulkan kesalahan apabila tanggal memakai zona waktu berbeda atau satuan konsentrasi tidak konsisten. Metadata tidak boleh dipandang sebagai administrasi tambahan, melainkan elemen dasar integritas ilmiah. Ketika nilai diperbarui akibat kalibrasi atau koreksi, jejak perubahan perlu disimpan agar pengguna dapat mengetahui alasan perbedaan laporan yang dibuat pada waktu berlainan.

Keamanan siber juga relevan karena data kontinu dan perangkat jarak jauh dapat menjadi sasaran gangguan. Akses perangkat, kata sandi, pembaruan perangkat lunak, dan prosedur pencadangan perlu dikelola. Namun, keamanan sistem tidak boleh menjadi alasan otomatis untuk menutup semua hasil pengamatan publik. Prinsip yang lebih seimbang adalah membedakan data pengukuran yang patut diakses masyarakat dari informasi teknis atau pribadi yang memerlukan pembatasan.

Kolaborasi dengan perguruan tinggi dapat memperkuat analisis dan validasi melalui penelitian mahasiswa, audit metode, serta pengembangan perangkat lunak terbuka. Keterlibatan komunitas membantu memeriksa relevansi indikator dan memperluas informasi kejadian. Agar berkelanjutan, program harus menyediakan alokasi pemeliharaan, pelatihan pengganti operator, dan evaluasi manfaat secara berkala. Pengadaan alat tanpa rencana operasional jangka panjang berisiko menghasilkan infrastruktur yang cepat tidak berfungsi.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Contoh Penerapan pada Wilayah Perkotaan dan Daerah Aliran Sungai

Pada wilayah perkotaan, integrasi dapat dimulai dari peta aktivitas transportasi, kepadatan penduduk, lokasi layanan publik, dan pola meteorologi. Instrumen rujukan ditempatkan di lokasi yang relevan; sensor tambahan digunakan untuk memahami variasi lingkungan pada skala lebih kecil. Pembacaan dikoreksi berdasarkan perbandingan terencana, lalu disajikan bersama informasi cuaca dan ketidakpastian. Prioritas intervensi dapat mencakup pemeriksaan sumber emisi, pengaturan lalu lintas, atau perlindungan kelompok yang lebih rentan, bergantung pada bukti yang tersedia.

Untuk daerah aliran sungai, rancangan dapat memadukan sensor debit dan kekeruhan, sampel kimia berkala, informasi curah hujan, serta peta penggunaan lahan. Peningkatan kekeruhan sesudah hujan dapat dihubungkan dengan perubahan penutup tanah, tetapi hubungan tersebut perlu diuji pada sejumlah kejadian. Pemeriksaan hulu-hilir memudahkan peneliti mengidentifikasi lokasi perubahan. Sistem peringatan tidak boleh mengandalkan satu titik ukur bila jaringan sungai mempunyai anak sungai dan sumber tekanan yang berbeda.

Pada wilayah pesisir, citra satelit dapat membantu memantau perubahan tutupan mangrove dan suhu permukaan, sedangkan observasi lapangan menilai salinitas, sedimen, dan kondisi ekologi lokal. Perubahan garis pantai atau vegetasi memerlukan interpretasi yang memahami pasang surut, cuaca, serta aktivitas pemanfaatan. Satu peta klasifikasi tidak cukup untuk menyimpulkan keberhasilan restorasi. Pemantauan pascaintervensi perlu mempertimbangkan tingkat hidup tanaman, stabilitas habitat, dan fungsi ekosistem dalam beberapa periode.

Ketiga contoh tersebut merupakan ilustrasi rancangan, bukan laporan lokasi tertentu. Nilai praktisnya terletak pada kemampuan menerjemahkan masalah lingkungan menjadi kombinasi indikator dan metode yang tepat. Uji coba terbatas dapat dilakukan sebelum jaringan diperluas untuk mengukur kualitas data, biaya pemeliharaan, dan kemampuan instansi merespons

informasi. Replikasi sebaiknya menyesuaikan tantangan geografis, sosial, dan kelembagaan setempat.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Keterbatasan Kerangka dan Prioritas Penelitian

Kerangka yang dikemukakan bersifat konseptual sehingga belum memiliki hasil evaluasi lapangan mengenai peningkatan cakupan pemantauan, kecepatan peringatan, atau penurunan beban pencemar. Ketidakpastian manfaat praktis perlu diakui secara terbuka. Selain itu, pemilihan teknologi yang tepat berbeda menurut karakter lokasi dan sumber daya. Menggunakan sensor sederhana pada lokasi terawat mungkin lebih bermanfaat daripada jaringan luas yang gagal dikalibrasi. Trade-off cakupan, kualitas, dan keberlanjutan biaya memerlukan studi tersendiri.

Penelitian berikutnya dapat membandingkan rancangan pemantauan konvensional dengan jaringan terintegrasi pada kawasan dan periode yang serupa. Indikator evaluasi dapat mencakup galat terhadap pengukuran rujukan, waktu deteksi gangguan, biaya per pengamatan valid, kelengkapan metadata, dan tingkat tindak lanjut institusi. Uji dengan beberapa musim dibutuhkan agar kinerja tidak dinilai hanya ketika cuaca stabil. Penilaian semacam ini penting untuk memisahkan keuntungan teknologi dari faktor lokasi maupun sumber daya operator.

Pengembangan pemodelan spasial dan kecerdasan buatan hendaknya memasukkan penilaian generalisasi pada lokasi yang belum terlihat saat pelatihan. Penelitian juga perlu membandingkan kemanfaatan model kompleks dengan baseline yang lebih sederhana. Kajian sosial dapat menilai apakah masyarakat memahami pesan peringatan dan menganggap proses verifikasi adil. Tidak cukup hanya mengembangkan dashboard yang menarik; keterjangkauan informasi dan kepercayaan masyarakat menjadi bagian dari fungsi sistem.

Keterbukaan kode, protokol, serta data yang aman dibagikan akan memudahkan pengujian silang oleh peneliti lain. Walaupun demikian, replikasi tidak berarti menyalin spesifikasi instrumen tanpa mempertimbangkan kondisi lokal. Panduan implementasi yang menyertakan asumsi dan batas aplikasi dapat membantu mempercepat adopsi sambil menjaga kehati-hatian ilmiah. Agenda riset yang paling berharga adalah riset yang mengukur dampak keputusan setelah informasi tersedia, bukan sekadar jumlah data yang dikumpulkan.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Penentuan Ambang Risiko dan Tata Cara Verifikasi

Ambang peringatan lingkungan sebaiknya ditetapkan melalui pertemuan antara ahli pengukuran, ahli kesehatan lingkungan, pengelola sumber daya, dan otoritas yang berwenang. Batas regulasi memiliki dasar serta penerapan hukum khusus, sedangkan batas kewaspadaan internal dapat digunakan untuk memicu peninjauan lebih awal. Mencampur keduanya di dashboard berpotensi memberi kesan bahwa setiap peringatan otomatis berarti pelanggaran. Karena itu, sistem informasi perlu menampilkan jenis ambang, standar acuan, periode rata-rata pengukuran, dan prosedur tindak lanjut yang menyertainya. Penyajian ini membantu peneliti dan pengelola menjaga perbedaan antara hasil pemantauan, interpretasi risiko, serta kesimpulan hukum.

Jika jaringan mendeteksi peningkatan parameter tertentu, tahapan pertama adalah memastikan keadaan alat dan integritas sinyal. Tahap kedua melakukan perbandingan dengan stasiun lain, catatan cuaca, dan riwayat pengukuran. Tahap ketiga memutuskan perlu tidaknya

inspeksi atau pengambilan sampel manual. Tahap keempat menyampaikan hasil secara proporsional kepada pihak terdampak, termasuk status apakah kejadian telah terkonfirmasi. Protokol demikian membatasi kesalahan peringatan sekaligus mencegah kejadian serius diabaikan hanya karena satu instrumen pernah mengalami gangguan. Alur tanggung jawab harus dinyatakan sejak awal agar langkah verifikasi tidak berhenti pada operator perangkat.

Komunikasi risiko juga harus membedakan kondisi saat ini dari prakiraan. Grafik pengukuran merupakan catatan observasi, sedangkan prakiraan adalah keluaran model yang memiliki tingkat ketidakpastian. Masyarakat membutuhkan informasi yang dapat ditindaklanjuti, seperti status pemeriksaan, lokasi terdampak, waktu pembaruan, dan saluran pelaporan, bukan sekadar peta penuh warna. Narasi mengenai perubahan lingkungan hendaknya menggunakan satuan yang dapat dimengerti serta menghindari kepastian berlebihan. Jika hasil verifikasi mengubah kesimpulan awal, revisi perlu dinyatakan secara terbuka bersama alasannya.

Evaluasi kualitas peringatan dapat memakai catatan kejadian yang telah diperiksa, bukan hanya jumlah notifikasi. Pengelola dapat menilai proporsi peringatan yang benar, kejadian yang terlewat, waktu respons, dan manfaat informasi bagi tindakan. Perbandingan sebelum dan sesudah penerapan sistem hendaknya mempertimbangkan perubahan jumlah sensor dan intensitas pemantauan. Bertambahnya kejadian yang tercatat belum tentu berarti kondisi memburuk; peningkatan kemampuan deteksi dapat menjadi penjelasan lain. Interpretasi berbasis konteks merupakan kontribusi penting ilmu lingkungan dalam tata kelola berbasis teknologi.

D. RESULT AND DISCUSSION (HASIL DAN PEMBAHASAN) — LANJUTAN

Keberlanjutan Operasional dan Evaluasi Dampak

Pemantauan yang berhasil memerlukan kesiapan organisasi untuk merawat peralatan, mengelola pengadaan suku cadang, memperbaharui aplikasi, dan mempertahankan kompetensi tenaga teknis. Anggaran awal instalasi hanya satu komponen biaya. Konsumsi daya, konektivitas, pemeliharaan terjadwal, pengujian laboratorium pembanding, pergantian sensor, serta penanganan kerusakan juga harus dihitung. Jika biaya tersebut tidak dijamin, jaringan dapat menghasilkan peta dengan banyak lokasi yang tidak lagi memiliki data valid. Pembangunan berkelanjutan mensyaratkan keberlangsungan layanan informasi, bukan hanya keberhasilan demonstrasi teknologi pada saat peresmian.

Perencanaan dapat menggunakan tahapan demonstrasi, uji lapangan terbatas, evaluasi independen, dan perluasan bertahap. Tahap pertama menguji kesesuaian indikator dengan keputusan; tahap kedua memeriksa mutu instrumen pada berbagai kondisi; tahap ketiga menilai konsistensi data, biaya, dan kesiapan respons; tahap keempat memperluas lokasi setelah bukti manfaat tersedia. Rangkaian ini memungkinkan koreksi desain sebelum investasi besar. Standar keberhasilan juga perlu memberi ruang bagi evaluasi negatif, karena temuan bahwa sensor tertentu tidak sesuai justru mencegah kesalahan pengadaan dalam skala lebih luas.

Aspek keberlanjutan teknologi perlu memperhitungkan dampak perangkat itu sendiri. Produksi, penggantian baterai, penggunaan energi komputasi, dan limbah elektronik menimbulkan beban lingkungan. Karena itu, desain perangkat sebaiknya mengutamakan kemampuan perbaikan, pemakaian komponen yang tahan kondisi setempat, serta perencanaan pengelolaan akhir pakai. Menghemat energi dengan pengiriman data berkala dapat sesuai untuk indikator yang berubah lambat, tetapi tidak selalu sesuai untuk peringatan kejadian cepat.

Optimasi harus mempertimbangkan kebutuhan ilmiah dan biaya lingkungan sepanjang siklus hidup.

Dampak kebijakan baru dapat dinilai apabila terdapat hubungan yang masuk akal antara pemantauan dan tindakan. Sebagai contoh, pemberian informasi yang lebih cepat dapat mempercepat inspeksi, tetapi penurunan konsentrasi pencemar masih dipengaruhi keberhasilan pengendalian emisi dan kondisi atmosfer. Oleh karena itu, evaluasi perlu membedakan keluaran teknologi, perbaikan prosedur kelembagaan, dan perubahan keadaan lingkungan. Rantai hasil tersebut membuat klaim manfaat lebih jelas dan memungkinkan pemangku kepentingan mengidentifikasi bagian sistem yang masih membutuhkan penguatan.

E. CONCLUSION (KESIMPULAN)

Integrasi sains dan teknologi memberikan kerangka yang lebih utuh bagi pemantauan kualitas lingkungan karena menggabungkan pemahaman proses alam dengan kemampuan pengukuran lintas ruang dan waktu. Sensor kontinu membantu menangkap perubahan cepat, laboratorium menyediakan pemeriksaan rujukan, penginderaan jauh memperluas cakupan wilayah, sedangkan analitik data mendukung penemuan pola. Kontribusi utama bukan terletak pada penggunaan alat paling canggih, tetapi pada keterhubungan antara pertanyaan ilmiah, pengukuran yang bermutu, interpretasi yang jujur, dan respons kelembagaan.

Sintesis menunjukkan bahwa data lingkungan perlu dilengkapi kalibrasi, catatan ketidakpastian, metadata, pemisahan observasi dan estimasi, serta mekanisme verifikasi kejadian. Penentuan nilai ambang harus mengikuti jenis parameter dan konteks pemanfaatannya. Tanpa langkah tersebut, sistem otomatis dapat menyebarkan informasi yang keliru atau menimbulkan rasa aman palsu. Karena kajian ini tidak memuat pengujian operasional, manfaat teknologi masih merupakan usulan yang memerlukan evaluasi pada lokasi nyata.

Penerapan secara bertahap direkomendasikan dengan memilih wilayah prioritas, menetapkan indikator yang dapat ditindaklanjuti, menguji instrumen, melatih operator, lalu mengevaluasi perubahan mutu keputusan. Perguruan tinggi, pemerintah, dan masyarakat dapat berkolaborasi untuk menguatkan validasi dan keterbukaan. Penelitian berikutnya perlu mengukur dampak pada kecepatan deteksi, reliabilitas pengukuran, efektivitas tindak lanjut, dan pemerataan manfaat. Dengan pendekatan ini, pemantauan kualitas lingkungan dapat berperan sebagai perangkat pembelajaran dan akuntabilitas dalam pembangunan berkelanjutan.

Rekomendasi lainnya adalah menetapkan evaluasi secara periodik atas relevansi indikator. Masalah yang semula mendominasi suatu wilayah dapat berubah setelah intervensi industri, pembangunan infrastruktur, atau perubahan tata guna lahan. Jaringan pemantauan sebaiknya memiliki proses peninjauan ilmiah yang menilai apakah titik observasi masih mewakili sumber tekanan dan apakah frekuensi pengambilan sampel cukup untuk menangkap variasi baru. Revisi jaringan harus dicatat agar analisis deret waktu tidak salah membaca perubahan metode sebagai perubahan kondisi lingkungan. Dalam hal sumber daya terbatas, keputusan mempertahankan satu stasiun rujukan yang terpercaya dapat lebih bermanfaat daripada memperbanyak alat tanpa kemampuan perawatan.

Aspek penting berikutnya adalah pembentukan mekanisme koreksi publik. Informasi terbuka memungkinkan akademisi dan masyarakat menemukan ketidaksesuaian yang terlewat oleh operator, tetapi saluran keberatan harus memiliki prosedur pemeriksaan yang adil dan terdokumentasi. Ketika temuan diperbarui, riwayat versi dan alasan perubahan perlu

dipublikasikan bersama keluaran terkini. Pendekatan ini menghubungkan transparansi data dengan akuntabilitas kelembagaan, sekaligus menjaga agar inovasi digital tidak memisahkan pembuat keputusan dari konsekuensi sosialnya. Dengan demikian, kualitas pemantauan dapat dinilai bukan hanya melalui jumlah rekaman yang terkumpul, melainkan juga melalui ketelitian analisis, kemampuan menanggapi kesalahan, serta kegunaan informasi bagi perbaikan kebijakan.

F. BIBLIOGRAPHY (DAFTAR PUSTAKA)

- European Environment Agency. (2024). Europe's air quality status 2024. <https://www.eea.europa.eu/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Organization for Standardization. (2017). ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO.
- Karagulian, F., et al. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmospheric Environment*, 213, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.057>
- Lowry, C. S., Fienen, M. N., Hall, D. M., & Stepenuck, K. F. (2019). Growing pains of crowdsourced stream stage monitoring using mobile phones. *Hydrological Processes*, 33, 307–316.
- McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 56–61.
- NASA Earth Observatory. (2024). Remote sensing. <https://earthobservatory.nasa.gov/>
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566, 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Rolnick, D., et al. (2022). Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys*, 55(2), 1–96. <https://doi.org/10.1145/3485128>
- Snyder, E. G., et al. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369–11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- United Nations Environment Programme. (2021). Making peace with nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. UNEP. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>
- United States Environmental Protection Agency. (2022). Air sensor guidebook. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- World Meteorological Organization. (2024). State of the global climate 2023. WMO. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023>
- Zheng, T., et al. (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4823–4846. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018>