

PERAN TEKNOLOGI DALAM PENGELOLAAN LINGKUNGAN TERAPAN

Ahmad Baihaqie Matondang¹, Ikhsan Solihin², Joko Prihantono³, Marningot Tua Natalis
Situmorang⁴

^{1,2,3,4}Universitas Shaid Jakarta

Email: ahmadbaihaqie53@gmail.com¹, ikhسانjbl@gmail.com², jokoprihantono1@gmail.com³,
natalis_situmorang@usahid.ac.id⁴

Abstrak: Pengelolaan lingkungan terapan semakin mengandalkan inovasi teknologi untuk menghadapi tantangan kerusakan lingkungan. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur naratif atas publikasi tahun 2015–2025 mengenai peran berbagai teknologi – termasuk *Internet of Things (IoT)*, *Artificial Intelligence (AI)*, penginderaan jauh (*remote sensing*), sistem informasi geografis (SIG/GIS), serta teknologi pengolahan limbah (misal *membrane bioreactor (MBR)*, biofilter, *Refuse Derived Fuel (RDF)*) – dalam pengelolaan lingkungan baik di Indonesia maupun global. Berbagai studi menunjukkan bahwa *Internet of Things* dan jaringan sensor memungkinkan monitoring kualitas lingkungan secara *real-time*, *Artificial Intelligence (AI)* mendukung prediksi dan otomatisasi pengambilan keputusan, sementara penginderaan jauh dan GIS memfasilitasi visualisasi serta pemetaan sumber daya dan risiko secara akurat. Penerapan teknologi-teknologi ini telah berkontribusi pada peningkatan efektivitas pemantauan kualitas lingkungan, mitigasi bencana alam, konservasi sumber daya alam, dan pengolahan limbah. Meski potensinya besar, tinjauan ini juga mengidentifikasi tantangan implementasi seperti keterbatasan infrastruktur, biaya tinggi, serta kebutuhan sumber daya manusia yang terampil. Di sisi lain, peluang pengembangan terbuka lebar seiring inisiatif ekonomi sirkular dan target pembangunan berkelanjutan, di mana teknologi dapat mendorong efisiensi penggunaan sumber daya dan *recovery* limbah menjadi produk bernilai. Kajian ini diakhiri dengan rekomendasi untuk penguatan dukungan infrastruktur, kolaborasi lintas sektor, dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia agar teknologi-teknologi tersebut dapat dioptimalkan dalam pengelolaan lingkungan terapan secara inklusif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Pengelolaan Lingkungan, Inovasi, Teknologi, Ekonomi Sirkular, Indonesia.

Abstract: *Applied environmental management increasingly relies on technological innovation to address the growing challenges of environmental degradation. This article presents a narrative literature review of publications from 2015 to 2025 concerning the role of various technologies—including the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), and waste treatment technologies such as Membrane Bioreactor (MBR), biofilters, and Refuse Derived Fuel (RDF)—in managing the environment both in Indonesia and globally. Numerous studies highlight that IoT and sensor networks enable real-time environmental quality monitoring, AI facilitates prediction and decision-making automation, while remote sensing and GIS enhance visualization and accurate mapping of environmental risks and resources. The integration of these*

technologies has significantly contributed to improving environmental monitoring, disaster mitigation, natural resource conservation, and waste processing. Despite their strong potential, this review also identifies implementation barriers, such as limited infrastructure, high operational costs, and the need for skilled human resources. Conversely, emerging opportunities arise in line with circular economy initiatives and sustainable development goals, where technology plays a key role in optimizing resource efficiency and transforming waste into valuable products. The study concludes with recommendations for strengthening infrastructure, fostering cross-sectoral collaboration, and building human capacity to fully harness technology in inclusive and sustainable applied environmental management.

Keywords: *Environmental Management, Innovation, Technology, Circular Economy, Indonesia.*

PENDAHULUAN

Pengelolaan lingkungan hidup menjadi aspek krusial dalam pembangunan berkelanjutan. Pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi telah meningkatkan tekanan terhadap kualitas lingkungan, seperti pencemaran air dan udara, alih fungsi lahan, hingga timbunan limbah. Di Indonesia, tantangan seperti banjir, kualitas udara perkotaan, deforestasi, dan pengelolaan sampah perkotaan menuntut solusi inovatif. Perkembangan pesat teknologi digital dalam satu dekade terakhir menawarkan peluang baru untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan lingkungan. *Internet of Things (IoT)* memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara *real-time* melalui sensor yang terhubung, kecerdasan buatan *Artificial Intelligence (AI)* memungkinkan analisis data skala besar dan prediksi tren lingkungan, sementara teknologi geospasial seperti penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG) memampukan pemetaan dan pemantauan kondisi lingkungan secara menyeluruh. Di sektor lain, inovasi dalam teknologi pengolahan limbah – misalnya penggunaan *Membrane Bioreactor (MBR)* untuk air limbah, biofiltrasi untuk emisi dan air tercemar, serta produksi *Refuse Derived Fuel (RDF)* dari sampah – membuka jalan bagi pendekatan ekonomi sirkular yang mengubah limbah menjadi sumber daya.

Mengingat besarnya peran potensial teknologi tersebut, diperlukan pemahaman komprehensif mengenai bagaimana teknologi diterapkan dalam konteks pengelolaan lingkungan terapan. Beberapa ulasan sebelumnya cenderung fokus pada satu aspek teknologi atau studi kasus lokal; oleh karena itu, tinjauan naratif ini berupaya mengompilasi temuan-temuan kunci dari literatur 2015–2025 untuk memberikan gambaran menyeluruh. Fokus tinjauan mencakup konteks global dan Indonesia, dengan mengidentifikasi jenis-jenis teknologi utama yang digunakan serta kontribusinya dalam monitoring kualitas lingkungan, mitigasi bencana, konservasi sumber daya, dan pengolahan limbah. Selain itu,

artikel ini menyoroti tantangan implementasi (misalnya keterbatasan infrastruktur, biaya, dan sumber daya manusia) serta peluang pengembangan ke depan, terutama dalam kerangka ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Tinjauan literatur ini dilakukan menggunakan metode naratif, yakni mengumpulkan dan mensintesis informasi secara deskriptif-tematis tanpa prosedur meta-analisis kuantitatif. Pencarian pustaka difokuskan pada publikasi tahun 2015–2025 melalui berbagai basis data akademik (seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan portal jurnal internasional maupun nasional) dengan kata kunci relevan dalam bahasa Inggris dan Indonesia, antara lain: “*Internet of Things (IoT) environmental monitoring*”, “*Artificial Intelligence (AI) environmental management*”, “*remote sensing Geographic Information Systems (GIS) environment*”, “*Membrane Bioreactor (MBR) wastewater treatment*”, “*biofilter Volatile Organic Compounds (VOC) removal*”, “*RDF waste to energy*”, serta istilah terkait konteks Indonesia (misal “*IoT lingkungan Indonesia*”, “*teknologi pengolahan limbah Indonesia*”). Kriteria inklusi meliputi artikel jurnal, prosiding konferensi, serta laporan penelitian yang membahas penerapan teknologi dalam pengelolaan lingkungan (kualitas air/udara, mitigasi bencana, konservasi SDA, pengelolaan limbah) dengan fokus aplikasi praktis (terapan). Dari ratusan hasil pencarian, diseleksi sekitar 60–70 publikasi yang paling relevan memenuhi topik bahasan. Literatur tersebut kemudian ditelaah isinya dan dikelompokkan secara tematik berdasarkan jenis teknologi dan bidang aplikasi. Empat domain teknologi utama yang diidentifikasi yaitu:

1. *Internet of Things (IoT)* dan jaringan sensor,
2. *Artificial Intelligence (AI)* dan analitik data,
3. Penginderaan jauh dan *Geographic Information Systems (GIS)*,
4. Teknologi pengolahan limbah.

Setiap kelompok dianalisis kontribusinya terhadap aspek monitoring lingkungan, mitigasi bencana, konservasi sumber daya, dan pengelolaan limbah. Selain itu, dicatat pula poin-poin mengenai tantangan implementasi dan rekomendasi pengembangan. Pendekatan naratif memungkinkan penulis untuk menggabungkan temuan berbagai studi menjadi alur pembahasan holistik. Validitas tinjauan dijaga dengan mengutamakan sumber primer (artikel

jurnal terindeks) dan membandingkan hasil antar studi untuk memastikan konsistensi informasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

***Internet of Things (IoT)* dan Jaringan Sensor untuk Monitoring Lingkungan**

Internet of Things (IoT) merujuk pada ekosistem perangkat fisik berkemampuan sensor yang terhubung melalui internet untuk mengumpulkan dan bertukar data secara otomatis. Dalam konteks lingkungan, IoT menjadi tulang punggung sistem *smart environment monitoring (SEM)*, karena memungkinkan pemantauan parameter lingkungan secara *real-time* di berbagai lokasi secara simultan. Jaringan *wireless sensor network (WSN)* berisi sensor IoT telah diterapkan untuk memonitor kualitas udara (misalnya konsentrasi PM 2.5, gas polutan), kualitas air (pH, kandungan oksigen, polutan logam berat), cuaca dan iklim mikro, hingga parameter ekosistem seperti kelembaban tanah di kawasan hutan atau lahan pertanian. Studi Ullo & Sinha (2020) menunjukkan bahwa kemajuan teknologi sensor dan IoT telah mentransformasi metode monitoring konvensional menjadi monitoring pintar yang lebih presisi dan berkelanjutan. Sebagai contoh, jaringan sensor IoT diterapkan untuk manajemen sampah cerdas – tempat sampah pintar dengan sensor level yang memberi tahu petugas saat penuh – serta pemantauan emisi kendaraan di kota untuk mengendalikan polusi. IoT juga mendukung sistem peringatan dini bencana, seperti sensor ketinggian air sungai yang terhubung internet untuk deteksi banjir, atau sensor seismik pada gunung api yang mengirim data terus-menerus. Dengan integrasi IoT, data lingkungan dapat diunggah ke *cloud* dan diakses instansi terkait secara cepat, meningkatkan kesiapan respons.

Kontribusi IoT sangat nyata pada peningkatan resolusi spasial dan temporal data lingkungan. Sebelumnya, monitoring kualitas air/udara mungkin dilakukan manual mingguan, namun dengan sensor IoT dapat diperoleh data setiap menit di banyak titik sekaligus. Data granular ini memungkinkan deteksi dini perubahan kondisi (misalnya lonjakan polusi) sehingga tindakan mitigasi bisa segera diambil. IoT juga membantu konservasi sumber daya melalui otomatisasi sistem – misalnya pada pertanian presisi: sensor tanah dan cuaca IoT mengendalikan irigasi pintar, mencegah pemborosan air. Di sektor kehutanan, *camera trap* dan sensor akustik IoT digunakan untuk memantau satwa liar dan deteksi penebangan liar. Implementasi IoT di berbagai taman nasional dunia terbukti membantu pengawasan ekosistem secara kontinu tanpa membutuhkan kehadiran fisik petugas di lapangan.

Namun, tantangan implementasi IoT tidak sedikit. Banyak penelitian melaporkan kendala biaya, cakupan infrastruktur, dan instalasi perangkat dalam skala luas. Di wilayah terpencil, ketersediaan jaringan internet dan daya listrik menjadi limitasi utama bagi operasi sensor IoT secara berkelanjutan. Harga sensor khusus (misalnya sensor kualitas air multi-parameter) masih relatif mahal, sehingga proyek percontohan sering terbatas skalanya. Selain itu, diperlukan sistem standarisasi protokol komunikasi agar berbagai sensor dari produsen berbeda dapat terintegrasi (interoperabilitas). Isu keamanan data juga muncul mengingat sensor IoT dapat mengirim data sensitif (contoh: radiasi nuklir, dll) sehingga perlu mekanisme perlindungan. Dari sisi sumber daya manusia, dibutuhkan tenaga terlatih untuk pemasangan, kalibrasi, pemeliharaan sensor, serta analisis data IoT. Di Indonesia, pembangunan infrastruktur telekomunikasi dan peningkatan literasi digital menjadi prasyarat penting agar inisiatif IoT untuk lingkungan dapat berkembang lebih luas. Meski tantangan tersebut signifikan, tren biaya perangkat IoT yang menurun dan meluasnya jaringan komunikasi (termasuk IoT Low-Power WAN seperti *NB-IoT*) membuka peluang penerapan lebih masif dalam beberapa tahun ke depan. Dengan perencanaan matang, IoT berpotensi menjadi fondasi *environmental sensing* yang memperkuat pengambilan kebijakan berbasis data di bidang lingkungan.

Kecerdasan Buatan (AI) untuk Analitik Lingkungan dan Mitigasi Bencana

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*, AI) mencakup algoritme dan metode (seperti *machine learning* dan *deep learning*) yang mampu mengolah data kompleks untuk menemukan pola, melakukan prediksi, dan mengambil keputusan secara otomatis. Dalam dekade terakhir, AI muncul sebagai alat kunci untuk menganalisis *big data* lingkungan yang dihasilkan dari sensor IoT, citra satelit, maupun sumber lain. Salah satu kontribusi utama AI adalah meningkatkan kemampuan prediksi lingkungan – misalnya model *machine learning* digunakan untuk memprediksi kualitas udara harian, tingkat polusi sungai, penyebaran tumpahan minyak, hingga prakiraan kebakaran hutan berbasis kombinasi data cuaca dan lahan. Algoritme AI dapat dilatih menggunakan data historis untuk mengenali indikator dini suatu bencana lingkungan; dengan demikian, AI memperkuat sistem peringatan dini. Sebagai contoh, Badan SAR Nasional (BASARNAS) di Indonesia menjalin kemitraan untuk memanfaatkan AI dan analitik data besar dalam mitigasi risiko bencana. Teknologi AI digunakan untuk analisis prediktif yang membantu meramalkan potensi bencana serta

mempercepat pengambilan keputusan tanggap darurat. Dalam skenario banjir, AI dapat menggabungkan data curah hujan, tingkat air sungai IoT, dan informasi penggunaan lahan untuk memprediksi area genangan dan waktu kedatangan banjir dengan lebih akurat dibanding metode tradisional.

Kecerdasan buatan juga diimplementasikan dalam sistem monitoring otomatis. Sebagai ilustrasi, *computer vision* berbasis AI diterapkan untuk memproses citra CCTV atau drone guna memantau kepadatan lalu lintas dan emisi kendaraan, mendeteksi pelanggaran lingkungan (contoh: pembuangan limbah ilegal di sungai melalui analisis video), atau menghitung populasi satwa liar dari citra kamera jebak. Selain itu, AI berperan dalam pengolahan citra penginderaan jauh: teknik *deep learning* mampu mengklasifikasikan tutupan lahan (hutan, lahan terbangun, air) dari citra satelit dengan akurasi tinggi, membantu pemetaan deforestasi atau perkembangbiakan alga di danau. Integrasi AI dalam sistem smart city juga membantu kota lebih tanggap lingkungan – misalnya AI mengatur dinamis durasi lampu lalu lintas untuk mengurangi kemacetan dan polusi udara kota.

Di bidang konservasi sumber daya, AI dimanfaatkan untuk optimasi penggunaan energi dan air. Algoritme *machine learning* dapat belajar dari pola konsumsi energi gedung untuk kemudian mengatur sistem HVAC (Heating, Ventilation, AC) secara cerdas demi penghematan energi. Demikian pula, AI dapat mengoptimalkan operasi waduk bendungan dengan memperhitungkan pola curah hujan dan kebutuhan irigasi, sehingga distribusi air lebih efisien. Pada skala industri, konsep Industri 4.0 mengintegrasikan AI dan IoT di lini produksi agar limbah dan emisi diminimalkan – sejalan prinsip ekonomi sirkular.

Kendati menjanjikan, implementasi AI menghadapi tantangan yang unik. Pertama, AI membutuhkan ketersediaan data lingkungan yang besar dan berkualitas. Di banyak lokasi (terutama di negara berkembang), data historis atau jaringan sensor masih terbatas, sehingga model AI sulit dilatih dengan baik. Kedua, model AI yang kompleks (seperti *deep neural networks*) sering dianggap sebagai “*black box*” – kurang dapat dijelaskan logikanya – sehingga menyulitkan pengambil kebijakan mempercayai sepenuhnya rekomendasi *Artificial Intelligence (AI)*. Keseimbangan antara akurasi model dan interpretabilitas menjadi isu penting; peneliti menekankan perlunya AI yang terpercaya dan transparan dalam konteks pengelolaan lingkungan. Ketiga, adopsi AI menuntut infrastruktur komputasi memadai (server, cloud) dan tenaga ahli data science yang jumlahnya masih terbatas. Di Indonesia, pemerintah

telah meluncurkan strategi nasional AI dan menyiapkan pusat data, namun transfer teknologi ke sektor lingkungan butuh percepatan. Selain itu, aspek kebijakan dan etika seperti privasi data sensor (misal data kamera pengawas) dan perlindungan data masyarakat juga harus diperhatikan saat menerapkan AI di ranah publik. Tantangan berikutnya adalah resistensi institusional – adopsi AI bisa terhambat jika pemangku kepentingan enggan mengubah prosedur kerja konvensional. Oleh karena itu, diperlukan edukasi dan *capacity building* bagi instansi lingkungan untuk meningkatkan literasi data dan AI.

Terlepas dari kendala tersebut, prospek AI dalam pengelolaan lingkungan sangat besar. Pendekatan *Artificial Intelligence dan Internet of Things* diyakini dapat merevolusi sistem monitoring lingkungan. Sebuah tinjauan 2024 menekankan tren terkini pemanfaatan AI dan IoT untuk memantau polusi udara, air, dan tanah, termasuk sensor pintar pendeteksi bahan berbahaya serta *machine learning* untuk melacak dinamika pencemaran. Dengan terus berkembangnya algoritme dan ketersediaan data, AI dapat menjadi “*mesin kecerdasan*” yang mendukung pengambilan keputusan lingkungan berbasis bukti (evidence-based). Contohnya di Indonesia, platform *PetaBencana.id* telah memanfaatkan AI berupa *chatbot* cerdas untuk mengolah informasi banjir dari media sosial dan menghasilkan peta real-time bencana yang membantu warga dan pemerintah dalam kesiapsiagaan banjir. Inisiatif-inisiatif semacam ini menunjukkan potensi AI dalam *crowdsourcing* data lingkungan dan peningkatan ketahanan masyarakat terhadap risiko lingkungan.

Penginderaan Jauh dan GIS untuk Pemetaan dan Monitoring

Penginderaan jauh (remote sensing) adalah teknik memperoleh informasi permukaan bumi dari jarak jauh menggunakan satelit, pesawat udara, atau drone, umumnya melalui perekaman citra. Sistem Informasi Geografis (SIG/GIS) merupakan kerangka kerja untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data spasial. Kedua teknologi ini saling melengkapi dan telah lama menjadi tulang punggung pemantauan lingkungan skala luas. Namun, tahun 2015–2025 menandai kemajuan pesat dalam resolusi sensor satelit, frekuensi perekaman citra, serta kemampuan analisis GIS berkat komputasi yang lebih kuat.

Dalam monitoring kualitas lingkungan, penginderaan jauh memungkinkan pemantauan parameter yang sulit dijangkau sensor terestrial. Misalnya, satelit cuaca dan iklim (seperti NASA MODIS, ESA Sentinel) memantau kualitas udara regional melalui indeks *Aerosol Optical Depth* dan sebaran gas seperti NO₂ atau SO₂. Citra satelit juga digunakan

mengestimasi kualitas air permukaan: algoritme tertentu dapat mendeteksi tingkat kekeruhan (turbiditas) air sungai atau danau dari citra spektral, sebagai indikator sedimentasi atau pencemaran. Untuk lahan dan kehutanan, penginderaan jauh tak tergantikan dalam memantau deforestasi, degradasi lahan, dan kebakaran hutan. Setiap tahun, citra satelit resolusi menengah (10–30 m) dianalisis untuk mengkuantifikasi perubahan tutupan hutan di Indonesia, membantu evaluasi keberhasilan program rehabilitasi hutan dan mencegah illegal logging. Bahkan, area terbakar akibat kebakaran hutan dan lahan dapat diidentifikasi otomatis dari citra *multispectral* satelit, seperti ditunjukkan dalam studi Ullo & Sinha yang melaporkan penilaian luas area terbakar menggunakan data satelit multispektral dan teknik penginderaan jauh. Kemampuan ini penting untuk penanganan cepat pasca-kebakaran dan estimasi emisi karbon.

GIS berperan sebagai platform integrasi data spasial berbagai sumber tersebut. Aplikasi GIS dalam pengelolaan lingkungan sangat beragam, mulai dari pemetaan sebaran pencemaran, analisis kerawanan bencana, hingga perencanaan konservasi. Tinjauan oleh Le Hoang Tu et al. (2023) menegaskan bahwa GIS telah diaplikasikan secara luas untuk mendukung pengelolaan lahan, air, kualitas udara, dan limbah, serta menjadi alat vital dalam monitoring dan penilaian kualitas lingkungan maupun perencanaan kebijakan. Contohnya, GIS digunakan untuk memetakan daerah tangkapan air yang kritis agar bisa difokuskan upaya konservasi tanah dan air. Dalam pengelolaan kualitas udara, data titik pantau udara ambien diintegrasikan dalam peta isokonsentrasi menggunakan GIS untuk mengidentifikasi hotspot polusi di perkotaan. GIS juga membantu manajemen limbah melalui pemetaan zona layanan pengumpulan sampah dan analisis kecukupan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) berdasarkan distribusi penduduk.

Dalam mitigasi bencana, kombinasi penginderaan jauh dan GIS memberikan *situational awareness* yang komprehensif. Citra satelit resolusi tinggi pasca-bencana (seperti pasca gempa bumi atau tsunami) dapat di *overlay* dalam GIS dengan peta infrastruktur untuk mengidentifikasi wilayah terdampak dan kerusakan infrastruktur kunci. Di Indonesia, pemanfaatan teknologi geospasial untuk tanggap darurat semakin meningkat. Kemitraan BASARNAS dengan penyedia teknologi geospasial, misalnya, bertujuan meningkatkan akses data geospasial akurat secara *real-time* bagi lembaga pemerintah, sehingga koordinasi penanggulangan bencana lebih efisien. Tim penyelamat dapat dengan cepat memvisualisasikan

komunitas terdampak dan infrastruktur kritis yang rusak melalui peta digital, membantu penentuan prioritas evakuasi. GIS juga digunakan untuk simulasi skenario bencana—misal, simulasi banjir dengan model hidrologi dan DEM (*Digital Elevation Model*) untuk melihat daerah mana yang akan terendam, sebagai dasar perencanaan tata ruang berbasis pengurangan risiko.

Kontribusi remote sensing & GIS dalam konservasi sumber daya juga signifikan. Pemantauan tutupan hutan lewat citra satelit membantu deteksi hilangnya keanekaragaman hayati sedini mungkin, sehingga area yang mengalami degradasi bisa segera direstorasi. GIS mendukung penentuan lokasi prioritas konservasi (contoh: mengidentifikasi koridor satwa yang terfragmentasi untuk dihubungkan kembali). Di sektor kelautan, citra satelit digunakan untuk memantau kesehatan terumbu karang (melalui warna dan indeks klorofil), sementara GIS memetakan zona perlindungan laut dan memantau kepatuhan terhadap zonasi (misal larangan penangkapan ikan di zona inti). Dengan demikian, teknologi ini menjadi mata bagi para pengelola lingkungan untuk melihat perubahan skala besar yang tidak tampak dari darat.

Walaupun manfaatnya besar, tantangan dalam implementasi penginderaan jauh dan GIS tetap ada. Salah satu kendala teknis adalah akurasi dan resolusi data. Citra satelit resolusi tinggi (di bawah 1 m) masih mahal dan tidak selalu tersedia untuk time-series panjang, sedangkan citra gratis resolusi moderat kadang tidak cukup untuk analisis detail (misal mendeteksi pembuangan limbah ilegal skala kecil). Kondisi tropis Indonesia yang sering berawan juga menghambat pengambilan citra optis, meski hal ini sebagian teratasi dengan sensor *radar* (SAR) yang menembus awan. Tinjauan terbaru menyoroti bahwa akurasi dan analisis sensitivitas model GIS perlu diperhatikan, karena hasil analisis spasial sangat dipengaruhi kualitas data input. Sebagai contoh, pemodelan kualitas air sungai dalam GIS memerlukan data input yang tepat; bila data kualitas air kurang lengkap, hasilnya bisa menyesatkan pengambil keputusan. Tantangan lain adalah integrasi multi-sumber data: perlu upaya standarisasi format dan interoperabilitas antar sistem (mirip isu di IoT). Barrier institusional juga muncul, seperti keterbatasan koordinasi antar lembaga dalam berbagi data geospasial. Hal ini disebutkan dalam studi Sofianopoulos et al. (2025) di mana hambatan interoperabilitas data dan silo kelembagaan menghambat pemanfaatan penuh infrastruktur data spasial terpadu. Untuk mengatasi ini, diperlukan kebijakan satu data dan infrastruktur data spasial nasional yang kuat dan terbuka.

Dari segi SDM, keahlian GIS dan penginderaan jauh perlu ditingkatkan. Pengoperasian perangkat lunak GIS dan pengolahan citra satelit membutuhkan kombinasi pengetahuan geografi dan kemampuan teknis komputer. Kesenjangan kapasitas ini terutama terasa di tingkat pemerintah daerah. Oleh sebab itu, berbagai pelatihan dan program pendidikan (misal program *Geographic Information System* di perguruan tinggi) menjadi penting agar tersedia tenaga analis GIS di instansi-instansi lingkungan. Secara keseluruhan, arah perkembangan penginderaan jauh dan GIS sangat positif: data semakin terbuka (contoh: rilis open data satelit Landsat, Sentinel), komputasi awan (Google Earth Engine, dll) mempermudah analisis skala besar, dan integrasi dengan teknologi lain (IoT, AI) akan semakin erat. Kolaborasi antara ilmuwan data, ahli lingkungan, dan pembuat kebijakan dibutuhkan agar teknologi ini benar-benar efektif membantu pengelolaan lingkungan di lapangan.

Teknologi Pengolahan Limbah: MBR, Biofilter, dan RDF

Selain teknologi digital untuk monitoring dan analisis, inovasi dalam teknologi pengolahan limbah memiliki peran sentral dalam perlindungan lingkungan terapan. Teknologi ini berfokus pada penanganan polutan atau limbah secara fisik, kimia, atau biologis agar dampaknya terhadap lingkungan berkurang, bahkan diubah menjadi bentuk yang bermanfaat. Tiga contoh teknologi kunci yang dibahas di literatur terkini adalah *Membrane Bioreactor (MBR)* untuk pengolahan air limbah, biofiltrasi untuk pemurnian air/udara, dan produksi *Refuse Derived Fuel (RDF)* dari sampah padat. Masing-masing mewakili pendekatan inovatif dalam rangkaian ekonomi sirkular – memaksimalkan daur ulang dan pemulihan sumber daya dari arus limbah.

Membrane Bioreactor (MBR) merupakan teknologi pengolahan air limbah canggih yang menggabungkan proses biologi (degradasi oleh mikroba seperti pada lumpur aktif) dengan filtrasi membran. Dalam reaktor MBR, air limbah pertama-tama diurai oleh bakteri, lalu dialirkan melalui membran berpori sangat halus yang menyaring padatan tersuspensi dan mikroorganisme, menghasilkan air keluaran yang sangat jernih. Menurut tinjauan terbaru (Jijingi et al., 2024), teknologi MBR menawarkan solusi menjanjikan terutama untuk negara berkembang, karena mampu menghasilkan air olahan berkualitas tinggi dengan keuntungan seperti efisiensi pengolahan tinggi, jejak lahan lebih kecil, penggunaan bahan kimia lebih rendah, serta potensi reuse air. Sebagai contoh, instalasi MBR di industri tekstil dapat mengolah air limbah berwarna pekat menjadi air bening yang memenuhi baku mutu, bahkan

dapat dimanfaatkan kembali untuk proses non-konsumtif (seperti pendingin mesin). Keunggulan lain MBR adalah lumpur sisa hasil olah relatif sedikit dibanding metode konvensional, karena banyak biomassa tertahan di reaktor. Dalam konteks keberlanjutan, hal ini mengurangi masalah pembuangan lumpur. MBR mulai diadopsi di berbagai negara Asia Tenggara, termasuk beberapa proyek percontohan di Indonesia untuk pengolahan air limbah domestik dan industri.

Kontribusi MBR sangat penting dalam menjaga kualitas air dan kesehatan ekosistem perairan. Dengan tingkat penyisihan polutan organik dan mikroba yang tinggi, efluen MBR yang dibuang ke sungai tidak lagi menyebabkan pencemaran berarti, sehingga mendukung upaya mencapai target SDG 6: Air Bersih dan Sanitasi. Bahkan, karena air hasil MBR sangat jernih, bisa dipertimbangkan sebagai sumber air non-minum (untuk irigasi perkotaan, flushing toilet, dll) yang mengurangi beban pengambilan air tanah. Hal ini sejalan prinsip ekonomi sirkular yaitu memanfaatkan kembali hasil samping proses. Meski demikian, tantangan implementasi MBR juga perlu dicatat. Salah satu kendala utama adalah *fouling* (penyumbatan) pada membran akibat akumulasi padatan dan biofilm, yang dapat menurunkan kinerja dan meningkatkan biaya pemeliharaan. Upaya penelitian difokuskan pada strategi mencegah *fouling* (misal: pembersihan periodik, modifikasi permukaan membran). Biaya investasi MBR, terutama membran berkualitas tinggi, masih tergolong besar, sehingga skala adopsinya terbatas pada proyek dengan dukungan pendanaan kuat. Di sisi SDM, MBR memerlukan operator yang paham teknis untuk menjaga parameter operasi optimum (misal: tekanan transmembran, laju alir). Tanpa keterampilan cukup, MBR bisa gagal mencapai performa yang diharapkan. Selain itu, adaptasi MBR ke kondisi lokal (karakteristik limbah, iklim tropis) perlu kajian agar desainnya tepat. Kolaborasi pemangku kepentingan (industri, pemerintah, lembaga donor internasional) sangat diperlukan untuk mendanai dan mendukung implementasi MBR di negara berkembang. Dengan dukungan tersebut, MBR berpotensi menjadi teknologi kunci pengolahan air limbah industri dan perkotaan di era mendatang, menggantikan atau melengkapi instalasi konvensional.

Selanjutnya, biofiltrasi (biofilter) merupakan teknik pengolahan yang memanfaatkan agen hayati (mikroorganisme, tumbuhan) untuk menghilangkan kontaminan. Konsep biofilter luas cakupannya, namun umumnya berupa suatu reaktor atau unit berisi media (misal kerikil, kompos, serat sabut, dll) tempat mikroba tumbuh membentuk biofilm. Saat aliran air atau gas

tercemar melewati media tersebut, polutan akan terserap dan didegradasi oleh mikroba. Biofilter telah diterapkan untuk mengatasi pencemaran udara (menghilangkan bau dan *volatile organic compounds/VOC* dari udara buangan pabrik) maupun pengolahan air limbah (misal biofilter aerob pada instalasi pengolahan air domestik skala kecil). Keunggulan teknologi biofilter adalah sifatnya yang ramah lingkungan, karena tidak membutuhkan bahan kimia berbahaya dan tidak menghasilkan produk samping beracun. Sebuah tinjauan di jurnal *Bioengineered* (Pachaiappan et al., 2022) mengungkapkan bahwa teknik biofiltrasi terbukti efektif menghilangkan VOC dan logam berat dalam air limbah, dengan menggunakan berbagai sumber biologi (bakteri, jamur, alga, tanaman). Biofilter dinilai biokompatibel, berkelanjutan, serta cost-effective dibanding metode konvensional (misal adsorpsi karbon aktif atau chemical scrubber). Misalnya, biofilter berbasis bakteri dan kompos telah digunakan untuk menyaring udara buang berbau (hidrogen sulfida, amonia) di instalasi pengomposan sampah, berhasil menurunkan bau hingga >90% tanpa menghasilkan limbah padat baru. Demikian pula, sistem reed-bed (biofilter menggunakan tanaman alang-alang) di lahan basah buatan mampu menyisihkan logam berat dan nutrisi dari air limbah pertanian dengan biaya minimal.

Kontribusi biofilter terhadap lingkungan terlihat pada skala lokal: teknologi ini memungkinkan pengolahan limbah terdesentralisasi yang sederhana dan murah, cocok untuk komunitas kecil atau wilayah terpencil. Contoh aplikasi di Indonesia adalah biofilter komunal untuk air limbah domestik skala rumah tangga (seperti septic tank biofilter) yang dapat meningkatkan kualitas efluen sebelum meresap ke tanah atau sungai. Biofilter juga diaplikasikan pada konservasi kualitas udara – filter hayati dengan tumbuhan/mikroba di ruangan parkir bawah tanah terbukti menyerap polutan udara dalam ruang tertutup. Meskipun demikian, ada tantangan yang perlu dikelola. Kinerja biofilter bisa dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, pH, kadar nutrisi yang memengaruhi pertumbuhan mikroba. Jika beban polutan terlalu tinggi, biofilter mungkin mengalami kelebihan beban (*overload*) sehingga efisiensi menurun. Waktu tinggal yang diperlukan kadang lebih lama dibanding proses kimia/fisik, sehingga ukuran unit biofilter bisa besar. Namun inovasi terus berkembang, misalnya *biofilter hybrid* atau multistage yang meningkatkan kapasitas degradasi. Secara keseluruhan, biofilter menawarkan solusi teknologi hijau yang sejalan dengan prinsip keberlanjutan: prosesnya alami, tidak menimbulkan polusi sekunder, dan memanfaatkan

potensi biodegradasi hayati secara optimal. Dengan riset lanjutan (misal rekayasa komunitas mikroba atau media filter dari limbah organik lokal), biofilter diproyeksikan akan semakin efisien dan banyak diadopsi.

Terakhir, *Refuse Derived Fuel (RDF)* merupakan teknologi pengolahan sampah padat yang berprinsip mengubah sampah menjadi bahan bakar berguna, sehingga volume sampah yang perlu ditimbun dapat dikurangi. RDF biasanya diproduksi dari sampah kota (*Municipal Solid Waste*) melalui serangkaian proses seperti penyortiran, pencacahan, pengeringan (misal biodrying), dan peletisasi, menghasilkan bahan bakar padat berkalori cukup tinggi yang dapat dibakar di pembangkit listrik atau pabrik semen (Chaerul & Wardhani, 2020) dalam tinjauannya menjelaskan bahwa pemanfaatan sampah menjadi bahan bakar RDF merupakan alternatif solusi masalah sampah perkotaan, di mana proses biodrying – bagian dari *Mechanical-Biological Treatment (MBT)* – digunakan untuk menurunkan kadar air sampah dengan memanfaatkan panas dari aktivitas mikroba, sehingga nilai kalor meningkat. Konsep ini berpotensi *sekali mending dua tiga pulau terlampaui*: menangani penumpukan sampah sekaligus menghasilkan sumber energi terbarukan substitusi batu bara.

Kontribusi RDF dalam pengelolaan lingkungan diantaranya: mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA, memperpanjang usia layanan TPA, dan mengurangi emisi gas rumah kaca dari open dumping (karena karbon dalam sampah dibakar dimanfaatkan, bukan terdekomposisi menjadi metana di TPA). RDF juga menyediakan bahan bakar alternatif bagi industri semen atau pembangkit listrik, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Sebuah studi kasus di Cilacap, Jawa Tengah, menunjukkan potensi keberlanjutan RDF dari sampah kota untuk bahan bakar alternatif pabrik semen, dengan mempertimbangkan komposisi sampah Indonesia yang cukup berkalori dan masih tingginya fraksi organik basah. Hasil kajian menunjukkan bahwa melalui biodrying, kelembaban sampah berkurang signifikan dan *heating value* meningkat hingga level layak bakar. Dengan demikian, RDF mendukung *circular economy* dengan mengembalikan limbah ke siklus produksi energi.

Tantangan implementasi RDF termasuk ketersediaan pasokan dan kualitas sampah yang konsisten. Sampah perkotaan Indonesia bercampur dan memiliki kadar organik basah tinggi, sehingga perlu sistem pemilahan yang efektif untuk memisahkan material inert atau berbahaya sebelum diolah menjadi RDF. Investasi awal fasilitas RDF (MBT plant, mesin pencacah dan pengering) juga besar, memerlukan skema pembiayaan dan *business model* yang tepat agar

berkelanjutan. Selain itu, perlu kajian lingkungan komprehensif memastikan emisi pembakaran RDF memenuhi standar (misal kontrol emisi di pabrik semen yang menggunakan RDF). Namun, seiring meningkatnya biaya pembuangan sampah dan dorongan pengurangan emisi, teknologi RDF semakin dipandang menarik. Di Indonesia, Kementerian LHK belakangan mendorong proyek percontohan *waste to energy* termasuk RDF di beberapa kota. Jika tantangan teratasi, RDF dapat menjadi bagian integral strategi pengelolaan sampah terpadu, berkontribusi pada target pengurangan sampah 30% dan penanganan 70% tahun 2025 yang dicanangkan pemerintah.

Tantangan Implementasi dan Peluang Pengembangan (Ekonomi Sirkular & Pembangunan Berkelanjutan)

Berdasarkan pemaparan di atas, jelas bahwa beragam teknologi menawarkan solusi teknis untuk permasalahan lingkungan. Namun adopsi luas teknologi dalam pengelolaan lingkungan terapan menghadapi sejumlah tantangan lintas sektoral. Pertama, keterbatasan infrastruktur dasar: ketersediaan listrik stabil, jaringan internet luas, laboratorium pengujian, hingga fasilitas pengolahan limbah, masih menjadi prasyarat yang belum sepenuhnya terpenuhi terutama di negara berkembang. Misalnya, pemasangan sensor IoT di kawasan terpencil terganjal minimnya sinyal komunikasi; atau penerapan MBR terkendala pasokan listrik di wilayah terpencil. Investasi infrastruktur ini membutuhkan komitmen pemerintah dan dukungan pendanaan (APBN, swasta, hibah internasional). Kedua, biaya dan kelayakan ekonomi teknologi masih menjadi tanda tanya dalam beberapa kasus. Teknologi baru biasanya memerlukan biaya modal dan operasi tinggi (contoh: harga drone atau citra satelit resolusi tinggi, lisensi software GIS, membran MBR impor mahal, dsb). Analisis *cost-benefit* jangka panjang perlu dilakukan untuk meyakinkan pengambil kebijakan bahwa manfaat lingkungan dan sosial yang diperoleh sepadan dengan biaya. Dalam kerangka ini, insentif ekonomi (subsidi, skema *blended finance*, mekanisme *polluter pays*) dapat membantu mempercepat adopsi teknologi ramah lingkungan.

Tantangan ketiga adalah ketersediaan dan kapasitas SDM. Teknologi secanggih apapun tidak akan efektif tanpa operator dan analis yang kompeten. Masih terdapat kesenjangan keterampilan di instansi pengelola lingkungan: tidak semua petugas DLH (Dinas Lingkungan Hidup) terlatih menggunakan sensor digital atau perangkat lunak GIS; demikian pula pelaku industri belum banyak yang mahir menerapkan AI untuk efisiensi proses. Oleh karena itu,

investasi pada pendidikan dan pelatihan sangat penting. Program peningkatan kapasitas, workshop teknis, hingga kolaborasi dengan perguruan tinggi dapat menjembatani kebutuhan ini. Selain itu, membangun *knowledge sharing* antar daerah (misal kota yang berhasil dengan sistem *smart city* berbagi pengalaman ke kota lain) akan mempercepat pembelajaran. Keempat, tantangan institusional dan regulasi turut berperan. Implementasi teknologi seringkali menuntut pembaruan kerangka regulasi. Misalnya, regulasi kualitas data dan protokol berbagi data perlu disusun agar antarinstansi dapat saling menggunakan data IoT/GIS tanpa terkendala ego sektoral. Contoh lain, payung hukum penggunaan AI untuk penegakan hukum lingkungan (seperti bukti foto drone) perlu diperjelas agar dapat diterima di pengadilan. Pemerintah juga perlu menyusun standar nasional (SNI) terkait spesifikasi teknologi lingkungan, agar minimal ada panduan teknis (contoh: standar alat sensor udara, standar baku mutu efluen MBR untuk reuse). Tanpa dukungan regulasi, inovasi teknologi bisa jalan di tempat.

Di sisi lain, perkembangan teknologi memberikan peluang besar apabila tantangan diatasi dengan strategi tepat. Ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan menjadi kerangka yang sangat selaras dengan penerapan teknologi lingkungan. Ekonomi sirkular menekankan reduksi limbah, perpanjangan daur hidup produk, dan *recycling* – hal-hal yang dapat sangat dibantu oleh teknologi digital dan rekayasa. Contohnya, *IoT* dan *blockchain* dapat diterapkan untuk melacak aliran material dalam daur ulang (misal: sensor pada kemasan cerdas untuk pemilahan otomatis di fasilitas daur ulang), sehingga tingkat daur ulang meningkat. AI dapat mengoptimalkan rantai pasok agar sisa produksi diminimalkan, atau mendesain produk yang lebih mudah didaur ulang. Teknologi pengolahan limbah seperti RDF dan MBR sendiri merupakan pilar ekonomi sirkular: RDF mengubah *output* yang dulunya tak bernilai (sampah) menjadi input energi, sedangkan MBR memungkinkan air limbah diolah ulang jadi air layak guna, mengurangi ekstraksi air baru. Dalam konteks ini, investasi teknologi bukan semata biaya melainkan langkah menuju efisiensi jangka panjang. Studi Garrido-Hidalgo et al. (2020) misalnya memetakan bahwa IoT berperan sebagai *enabling technology* bagi ekonomi sirkular di sektor manufaktur, karena memungkinkan monitor aliran bahan dan implementasi *predictive maintenance* yang mencegah pemborosan sumber daya. Digitalisasi proses daur ulang (melalui sensor dan AI) diperkirakan akan

meningkatkan *recovery rate* material berharga dari limbah elektronik, plastik, dan sebagainya, yang selama ini terbuang.

Dari sudut pembangunan berkelanjutan, pemanfaatan teknologi lingkungan turut berkontribusi pada pencapaian berbagai *Sustainable Development Goals (SDGs)*. Beberapa contoh: teknologi monitoring kualitas udara dan pengendalian polusi berkontribusi pada SDG 3 (Kesehatan yang baik) dengan mengurangi paparan polutan berbahaya; sistem peringatan dini bencana dengan IoT dan AI jelas mendukung SDG 11 (Kota dan Pemukiman Berkelanjutan) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim) melalui pengurangan risiko bencana iklim; teknologi air bersih (MBR, biofilter) langsung berdampak pada SDG 6; sementara penerapan ekonomi sirkular (RDF, daur ulang) sejalan dengan SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab). Integrasi teknologi juga membuka peluang model bisnis dan lapangan kerja baru di bidang lingkungan, misalnya *startup* penyedia solusi IoT lingkungan, perusahaan analitik data hijau, dan industri daur ulang modern, yang kesemuanya mendukung SDG 8 (Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi) dengan sentimen ekonomi hijau.

Beberapa peluang pengembangan konkrit antara lain:

1. Integrasi lintas teknologi: Mengombinasikan IoT, AI, dan GIS dalam satu platform manajemen lingkungan terpadu (contoh: *environmental dashboard* kota pintar) sehingga pengambilan keputusan dapat didukung informasi komprehensif. Upaya integrasi ini telah mulai dilakukan di konsep Spatial Data Infrastructure (SDI) yang menggabungkan sensor IoT, platform geospasial, komputasi awan, dan analitik AI untuk tata kelola pintar.
2. Peningkatan skala (*scale-up*) proyek percontohan: Banyak teknologi lingkungan telah teruji di skala pilot. Tantangan berikutnya adalah memperluas skala penerapan. Peluangnya, dengan standar baku dan bukti manfaat ekonomi, pemerintah dapat mereplikasi solusi ke daerah lain. Misalnya keberhasilan TPS RDF di satu kota dapat diadopsi di kota lain dengan dukungan pendanaan pemerintah pusat.
3. Kemitraan publik-swasta: Pembangunan infrastruktur lingkungan berteknologi tinggi dapat difasilitasi lewat skema KPBU (Kerja Sama Pemerintah Badan Usaha). Swasta membawa modal dan keahlian teknologi, pemerintah memberikan jaminan regulasi dan sebagian pendanaan, sehingga risiko dan manfaat terbagi. Contoh: penyedia jasa telekomunikasi bermitra dengan KLHK untuk memasang jaringan sensor kualitas udara

nasional; atau perusahaan semen berinvestasi fasilitas RDF dengan jaminan suplai sampah dari pemda.

4. Penelitian dan inovasi berkelanjutan: Kalangan akademisi dan lembaga riset perlu terus didorong menghasilkan inovasi adaptif dengan kondisi lokal. Misalnya mengembangkan sensor murah berbasis *open-source* untuk kualitas air yang sesuai sungai tropis, menciptakan membran MBR *anti-fouling* dari material lokal, atau memanfaatkan AI dengan data lokal untuk prediksi kebakaran hutan. Inovasi ini kunci agar teknologi semakin terjangkau dan relevan bagi kebutuhan spesifik Indonesia. Pemerintah dapat menyediakan hibah riset dan insentif inovasi hijau untuk tujuan ini.
5. Pendekatan partisipatif dan peningkatan kesadaran: Teknologi akan lebih efektif bila masyarakat terlibat. Peluangnya adalah mengembangkan aplikasi *crowdsourcing* (seperti PetaBencana) di bidang lain, misal aplikasi laporan kualitas air oleh warga, atau sistem insentif bagi warga yang memilah sampah dengan bantuan teknologi (barcode/QR code di bank sampah). Hal ini membangun budaya *data-driven* di tingkat komunitas sekaligus melengkapi data resmi.

Dengan strategi di atas, diharapkan adopsi teknologi dalam pengelolaan lingkungan tidak hanya menjadi wacana, tetapi benar-benar terimplementasi dan berdampak nyata. Kuncinya adalah melihat teknologi bukan sebagai pengganti peran manusia, melainkan alat pemberdayaan (*enabler*) yang bila digabung dengan tata kelola yang baik akan mempercepat tercapainya target lingkungan hidup yang lestari. Tinjauan literatur ini menegaskan bahwa walau tantangan nyata, peluang manfaat jauh lebih besar – sehingga investasinya layak diprioritaskan demi masa depan lingkungan yang lebih baik.

KESIMPULAN

Dalam satu dasawarsa terakhir (2015–2025), peran teknologi dalam pengelolaan lingkungan terapan semakin menonjol dan beragam. Tinjauan ini mengidentifikasi lima klaster teknologi utama – IoT, AI, penginderaan jauh, GIS, serta teknologi pengolahan limbah (MBR, biofilter, RDF) – yang semuanya telah membuktikan kontribusi positif di bidangnya masing-masing. IoT dan jaringan sensor menyediakan data *real-time* yang memperkuat sistem monitoring kualitas lingkungan dan peringatan dini bencana secara lebih tanggap. AI melengkapi hal tersebut dengan kemampuan analitik cerdas, memprediksi tren

dan mengotomatiskan respons, mulai dari memodelkan polusi hingga optimasi respon tanggap darurat. Penginderaan jauh dan GIS memungkinkan pandangan menyeluruh dan terintegrasi atas kondisi lingkungan, mendukung perencanaan penggunaan lahan, konservasi, dan mitigasi bencana berbasis bukti spasial. Sementara itu, teknologi pengolahan limbah seperti MBR, biofilter, dan RDF berperan mengurangi beban pencemaran secara langsung: MBR menghasilkan air olahan berkualitas tinggi untuk melindungi badan air dan mendukung reuse, biofilter menawarkan pengolahan polutan yang sederhana namun ramah lingkungan, dan RDF mengubah persoalan sampah menjadi peluang energi terbarukan.

Meskipun berbagai keberhasilan dicatat, penerapan teknologi-teknologi ini masih dihadapkan pada tantangan nyata. Keterbatasan infrastruktur, kebutuhan investasi yang besar, kapabilitas sumber daya manusia yang perlu ditingkatkan, serta hambatan koordinasi dan regulasi, adalah isu-isu yang harus diatasi untuk memaksimalkan manfaat teknologi. Pendekatan silo dan bisnis seperti biasa (*business-as-usual*) perlu ditransformasi menjadi pendekatan kolaboratif lintas sektor dengan dukungan kebijakan yang progresif. Integrasi teknologi harus dibarengi dengan penguatan kerangka kebijakan (standar data, perlindungan privasi, insentif ekonomi hijau) dan peningkatan kapasitas institusi serta komunitas.

Di balik tantangan, peluang ke depan sangat menjanjikan. Adopsi teknologi dalam kerangka ekonomi sirkular dapat mendorong *decoupling* pertumbuhan ekonomi dari kerusakan lingkungan, misalnya melalui efisiensi sumber daya dan pemanfaatan ulang limbah menjadi input produksi. Begitu pula dalam mencapai target pembangunan berkelanjutan, teknologi lingkungan merupakan katalis yang mempercepat pencapaian berbagai indikator SDG secara terpadu. Untuk itu, investasi strategis pada infrastruktur dan inovasi teknologi lingkungan harus dipandang sebagai investasi jangka panjang bagi ketahanan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat.

Sebagai penutup, tinjauan naratif ini memberikan gambaran bahwa peran teknologi dalam pengelolaan lingkungan terapan bukan lagi hal futuristik, melainkan sudah terwujud dengan dampak nyata di berbagai belahan dunia termasuk Indonesia. Ke depan, dengan strategi implementasi yang tepat, kita dapat mengharapkan kota dan komunitas yang lebih cerdas dan berkelanjutan, di mana kualitas lingkungan senantiasa terjaga dengan bantuan sistem monitoring real-time, analitik prediktif, dan proses pengolahan limbah yang efisien.

Penguatan sinergi antara manusia, teknologi, dan alam menjadi kunci dalam mewujudkan visi pembangunan berkelanjutan yang harmonis.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaerul, M., & Wardhani, A. K. (2020). Refuse Derived Fuel (RDF) dari sampah perkotaan dengan proses biodrying: Review. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 17(1), 62–74. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v17i1.62-74>
- Esri Indonesia. (2022, March 24). Enhancing Indonesia's disaster resilience. *Esri Indonesia News*. Retrieved from <https://www.esriindonesia.co.id/news/enhancing-indonesias-disaster-resilience>
- Jijingi, H. E., Yazdi, S. K., Abakr, Y. A., & Etim, E. (2024). Evaluation of Membrane Bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review. *Preprint, SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4836303>
- Le Hoang Tu, Pham, T. H., Vo, N. Q. T., Nguyen, N. T., Dang, N. D. P., Tran, T. N., & Nguyen, K. L. (2023). GIS application in environmental management: A review. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 39(2), 62–74. <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4957>
- Pachaiappan, R., Cornejo-Ponce, L., Rajendran, R., Manavalan, K., Rajan, V. F., & Awad, F. (2022). A review on biofiltration techniques: Recent advancements in the removal of volatile organic compounds and heavy metals in the treatment of polluted water. *Bioengineered*, 13(4), 8432–8477. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2050538>
- Popescu, S. M., Mansoor, S., Wani, O. A., Kumar, S. S., Sharma, V., Sharma, A., et al. (2024). Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1336088. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1336088>
- Sofianopoulos, S., Faka, A., & Chalkias, C. (2025). SDI-enabled smart governance: A review (2015–2025) of IoT, AI and geospatial technologies—Applications and challenges. *Land*, 14(7), 1399. <https://doi.org/10.3390/land14071399>
- Ullo, S. L., & Sinha, G. R. (2020). Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, 20(11), 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>