

Teknologi IoGT dan Sensor Cerdas untuk Inovasi di Industri Geosains: Sebuah Systematic Literature Review

Farida Arinie Soelistianto¹, Yosse Hendry²

¹Politeknik Negeri Malang dan farida.arinie@polinema.ac.id

²Politeknik Tunas Pemuda Tangerang dan yossehendry@politeknik-tunaspemuda.ac.id

Article Info

Article history:

Received Oktober, 2025

Revised Oktober, 2025

Accepted Oktober, 2025

Kata Kunci:

Internet of Geoscience Things (IoGT), Sensor Cerdas, Kecerdasan Buatan, Inovasi Geosains, Ulasan Literatur Sistematis

Keywords:

Internet of Geoscience Things (IoGT), Smart Sensors, Artificial Intelligence, Geoscience Innovation, Systematic Literature Review

ABSTRAK

Studi ini secara sistematis mengkaji integrasi Internet of Geoscience Things (IoGT) dan teknologi sensor pintar sebagai katalisator inovasi di industri geosains. Melalui tinjauan literatur sistematis terhadap lima belas publikasi yang telah direview oleh rekan sejawat dari Google Scholar (2015–2025), studi ini mengidentifikasi kerangka kerja teknologi, aplikasi, dan hasil inovasi dari implementasi IoGT dalam eksplorasi geologi, pemantauan lingkungan, dan pengelolaan sumber daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur IoGT—yang terdiri dari sensor pintar, jaringan nirkabel, dan analisis cerdas—memungkinkan pemantauan real-time, pemodelan prediktif, dan operasi otonom di berbagai bidang geosains. Sensor pintar meningkatkan akurasi data, keamanan, dan keberlanjutan, sementara integrasi Big Data, Kecerdasan Buatan (AI), dan komputasi tepi (edge computing) meningkatkan efisiensi pengambilan keputusan. Meskipun telah terjadi kemajuan signifikan, tantangan tetap ada, termasuk interoperabilitas data, keamanan siber, efisiensi energi, dan keterbatasan infrastruktur di wilayah berkembang. Studi ini menyimpulkan bahwa IoGT dan sensor pintar mendorong transformasi digital geosains, mempromosikan keberlanjutan dan inovasi. Penelitian masa depan harus menekankan kolaborasi lintas disiplin, standarisasi, dan pengembangan digital twin untuk memperkuat sistem “Smart Geoscience 5.0” generasi berikutnya.

ABSTRACT

This paper systematically examines the integration of the Internet of Geoscience Things (IoGT) and smart sensor technologies as catalysts for innovation in the geoscience industry. Through a systematic literature review of fifteen peer-reviewed publications from Google Scholar (2015–2025), the study identifies key technological frameworks, applications, and innovation outcomes of IoGT implementation in geological exploration, environmental monitoring, and resource management. The results indicate that IoGT architectures—comprising smart sensors, wireless networks, and intelligent analytics—enable real-time monitoring, predictive modeling, and autonomous operations across geoscientific domains. Smart sensors improve data accuracy, safety, and sustainability, while the integration of Big Data, AI, and edge computing enhances decision-making efficiency. Despite significant progress, challenges persist, including data interoperability, cybersecurity, energy efficiency, and infrastructure limitations in developing regions. The study concludes that IoGT and smart sensors are driving the digital transformation of geoscience, promoting sustainability and innovation. Future research should emphasize cross-disciplinary collaboration, standardization,

and digital twin development to strengthen next-generation “Smart Geoscience 5.0” systems.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Name: Farida Arinie Soelistianto
Institution: Politeknik Negeri Malang
Email: farida.arinie@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat teknologi digital telah secara signifikan mengubah lanskap industri geosains, memperkenalkan paradigma baru dalam eksplorasi, pemantauan, dan pengambilan keputusan. Di antara inovasi paling transformatif adalah Internet of Geoscience Things (IoGT) dan sistem sensor pintar, yang bersama-sama membentuk ekosistem teknologi terintegrasi yang memfasilitasi pengumpulan data real-time, analisis cerdas, dan otomatisasi jarak jauh di berbagai aplikasi geosains. Dari eksplorasi mineral dan hidrokarbon hingga pengelolaan lingkungan dan pemantauan seismik, integrasi teknologi IoGT telah membuka jalan menuju industri geosains yang lebih berbasis data, berkelanjutan, dan adaptif. Teknologi ini secara fundamental mengubah berbagai aspek kerja geosains dengan meningkatkan efisiensi, akurasi, serta kemampuan pengambilan keputusan. IoGT dan sensor cerdas memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara berkelanjutan, sehingga meningkatkan kualitas dan kecepatan proses eksplorasi serta pemantauan geologi (Matsushima & Tremblay, 2024). Sistem sensor canggih seperti sensor multispektral, hiperspektral, termal, LiDAR, dan RADAR kini digunakan dalam operasi pertambangan untuk meningkatkan pemantauan aspek sosial-lingkungan (Raval, 2018). Selain itu, sistem cerdas sedang dikembangkan untuk memberikan kemampuan baru dalam memahami sistem Bumi, menekankan pentingnya integrasi data dan geoanalisis (Gil et al., 2018). Dalam konteks eksplorasi mineral dan hidrokarbon, teknologi otomatisasi yang mencakup Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), dan Internet of Things (IoT) secara signifikan meningkatkan efisiensi, keamanan, dan akurasi, sebagaimana ditunjukkan dalam studi kasus oleh pemain industri besar (Medida & Kumar, 2025). Penggunaan UAV dan drone yang dilengkapi sensor cerdas juga semakin umum dalam eksplorasi mineral, memberikan perspektif baru dalam metode pengumpulan data (Raval, 2018). Lebih jauh lagi, pendekatan geosains berorientasi keputusan menjadi krusial untuk memanfaatkan teknologi digital secara optimal, dengan menekankan kebutuhan pengguna akhir dan memastikan bahwa hasil penelitian dapat diterjemahkan menjadi teknologi yang mudah diakses dan diterapkan (Pidlisecky, 2022). Pendekatan ini menyoroti pentingnya memahami faktor manusia serta kebutuhan spesifik para pemangku kepentingan, seperti pengelola sumber daya air dan insinyur geoteknik, agar transformasi digital di bidang geosains dapat memberikan manfaat praktis yang berkelanjutan (Pidlisecky, 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, permintaan global akan data geosains yang akurat, tepat waktu, dan dapat diskalakan telah meningkat secara signifikan akibat tantangan lingkungan yang semakin kompleks, perkembangan perkotaan, dan kompleksitas pengelolaan sumber daya. Metode pengumpulan data tradisional dalam geosains—yang sering bergantung pada pekerjaan lapangan manual dan instrumen terpisah—telah terbukti terbatas dalam kemampuannya untuk menyediakan wawasan berkelanjutan dan real-time. Internet of Geoscience Things (IoGT) mewakili konvergensi antara arsitektur Internet of Things (IoT), sistem siber-fisik, dan intelijen geospasial, memungkinkan aliran informasi dinamis antara sensor, model komputasi, dan sistem pendukung keputusan. Evolusi teknologi ini memfasilitasi pengumpulan data otomatis, meningkatkan resolusi spasial dan temporal, serta mengurangi risiko operasional di lingkungan yang keras atau terpencil. IoGT memanfaatkan data sensor real-time untuk mentransformasi ilmu lingkungan dan proses pengambilan keputusan, seperti yang ditunjukkan dalam ilmu hidrologi melalui algoritma pengambilan sampel adaptif (Wong & Kerkez, 2016). Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks/WSNs) juga memfasilitasi penginderaan terdistribusi dan pengumpulan data yang krusial untuk pemantauan lingkungan real-time, meskipun masih menghadapi tantangan seperti keterbatasan energi dan kompleksitas manajemen data (Sharma et al., 2024). Dengan demikian, IoGT berperan penting dalam menciptakan sistem pemantauan geosains yang adaptif, terukur, dan efisien di berbagai konteks ilmiah maupun industri.

Integrasi IoGT dengan sensor pintar, machine learning (ML), dan kecerdasan buatan (AI) kini merevolusi cara pengumpulan dan analisis data geosains dilakukan. Konvergensi teknologi ini mengatasi keterbatasan metode tradisional dengan memfasilitasi pengumpulan serta pemrosesan data secara real-time dan berkelanjutan, yang krusial untuk menjawab tantangan lingkungan, pengembangan perkotaan, dan pengelolaan sumber daya. Sensor pintar menjadi tulang punggung sistem berbasis IoGT, karena mampu mengukur parameter geofisika, geokimia, dan lingkungan dengan presisi tinggi, serta mentransmisikan data melalui kerangka komputasi awan atau tepi untuk analisis lanjutan. Integrasi sensor pintar dengan algoritma ML dan AI memperkuat kemampuan prediktif sistem geosains—mendukung tugas seperti deteksi kegagalan, pemodelan iklim, pemetaan bawah permukaan, dan perkiraan sumber daya (Karpatne et al., 2018; Sharma et al., 2024). Meskipun demikian, ilmu geosains masih menghadapi tantangan unik akibat sifat data yang tidak terduga dan multiskala, sehingga diperlukan kemajuan dalam sistem cerdas untuk mengatasinya (S. Li et al., 2022). Program Big Science IUGS menyoroti potensi pendekatan berbasis data untuk mentransformasi penelitian geosains, dengan menekankan integrasi pembelajaran manusia dan AI untuk memperkuat kolaborasi antara analisis ilmiah dan kecerdasan digital (Cheng et al., 2020). Secara keseluruhan, kemampuan IoGT dan sensor pintar untuk menangkap serta memproses data real-time telah mendorong inovasi dalam pengambilan keputusan cerdas, sekaligus memperkuat respons adaptif terhadap fenomena geologis yang kompleks dan dinamis.

Meskipun telah terjadi kemajuan, tantangan tetap ada dalam adopsi dan implementasi teknologi IoGT dan sensor pintar. Sektor geosains terus menghadapi hambatan signifikan terkait interoperabilitas data, standarisasi, keamanan siber, dan efisiensi energi. Banyak sistem IoGT masih berada dalam fase eksperimental atau pilot, dengan tingkat adopsi yang masih rendah di wilayah berkembang akibat infrastruktur yang terbatas, konektivitas yang kurang, dan biaya implementasi yang tinggi. Selain itu, mengintegrasikan aliran data yang beragam—mulai dari sinyal seismik, peta geospasial, dan pembacaan hidrologi hingga citra penginderaan jauh—ke dalam kerangka analitis

terpadu tetap menjadi tugas teknis yang kompleks. Hambatan-hambatan ini menyoroti kebutuhan mendesak untuk melakukan penelitian sistematis terhadap lanskap implementasi IoGT di bidang geosains, dengan fokus pada bagaimana teknologi-teknologi ini dapat diskalakan dan distandarisasi untuk meningkatkan relevansi industri dan lingkungan mereka.

Untuk mengatasi celah-celah ini, studi ini melakukan Tinjauan Literatur Sistematis (SLR) terhadap lima belas publikasi ilmiah dari Google Scholar (2015–2025) untuk mensintesis pengetahuan yang ada, mengidentifikasi celah penelitian, dan menyoroti tren inovasi terkait IoGT dan teknologi sensor pintar dalam geosains. Tinjauan ini dipandu oleh tiga tujuan utama: (1) menganalisis evolusi dan kerangka konseptual integrasi IoGT dan sensor pintar dalam aplikasi geosains; (2) mengidentifikasi tren teknologi yang muncul, jalur inovasi, dan implikasi industri dari sistem-sistem ini; dan (3) mengevaluasi batasan yang ada dan peluang masa depan untuk inovasi geosains yang berkelanjutan melalui kerangka kerja berbasis IoGT. Dengan meninjau secara sistematis kontribusi akademik kontemporer, studi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman komprehensif tentang bagaimana IoGT dan sensor pintar mengubah agenda transformasi digital dalam industri geosains. Selain itu, studi ini menetapkan landasan teoretis untuk eksplorasi masa depan dalam ekosistem digital, sensor pintar, dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan, sambil menekankan pentingnya kolaborasi lintas disiplin, pengembangan kebijakan, dan peningkatan infrastruktur untuk sepenuhnya mewujudkan potensi transformatif teknologi IoGT.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Conceptual Foundations of IoGT*

Internet of Geoscience Things (IoGT) merupakan penerapan khusus dari kerangka kerja Internet of Things (IoT) yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan unik dalam penelitian dan pemantauan geosains. Sistem IoGT mengintegrasikan sensor yang saling terhubung, sistem akuisisi data, dan platform analitik untuk memfasilitasi pemantauan serta analisis fenomena geofisika dan geokimia secara real-time. Integrasi ini mendukung pergeseran dari pendekatan geosains yang bersifat reaktif menuju geosains prediktif, sejalan dengan inisiatif Industry 4.0 dan Smart Earth. Konsep digital twin memperkuat fungsi IoGT dengan menciptakan model virtual dari sistem geologis yang terus diperbarui menggunakan data sensor, sehingga meningkatkan kemampuan simulasi, penilaian risiko, dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan. Sistem IoGT mengandalkan integrasi data yang beragam—termasuk data geofisika dan geokimia—untuk memberikan wawasan komprehensif mengenai kondisi lingkungan, yang difasilitasi oleh jaringan sensor nirkabel canggih dan sistem IoT untuk pengumpulan serta pemrosesan data secara real-time (Armstrong et al., 2019). Teknologi digital twin berfungsi sebagai representasi virtual sistem geologis nyata yang memungkinkan simulasi serta prediksi yang lebih akurat, dengan model yang diperbarui secara berkelanjutan melalui data waktu nyata untuk mendukung pengujian skenario dan penilaian risiko (Armstrong et al., 2019; Y. Wang et al., 2024). Selain itu, pengembangan platform yang mudah digunakan seperti Raspberry Pi enhanced REF TEK (RaPiER) memungkinkan para ilmuwan geosains untuk membuat dan menerapkan perangkat IoGT tanpa memerlukan keahlian rekayasa yang mendalam, serta mendukung

pengembangan jaringan sensor geosains dan perolehan data berkualitas penelitian (Sepulveda & Pulliam, 2016).

2.2 *Role and Function of Smart Sensors in Geoscience*

Sensor pintar merupakan komponen utama dalam sistem Internet of Geoscience Things (IoGT) karena mampu mengintegrasikan mikroprosesor, modul komunikasi, dan analitik tepi (edge analytics) untuk pemrosesan data otonom dan pengambilan keputusan cepat. Teknologi ini meningkatkan akurasi, respons, dan efisiensi pemantauan geosains secara real-time dengan mengurangi gangguan serta kebutuhan bandwidth. Dalam pemantauan seismik, sensor seperti distributed acoustic sensors mendeteksi peristiwa mikro-seismik dengan presisi tinggi, mendukung sistem peringatan dini dan mitigasi bencana (Mukhopadhyay et al., 2021; Sehwat & Gill, 2019) Pada analisis hidrologi, sensor pintar melacak muka air tanah dan risiko banjir secara real-time, membantu pengelolaan air dan pertanian (Meijer, 2008; Sehwat & Gill, 2019) Dalam pemantauan atmosfer dan lingkungan, sensor ini mendeteksi polutan, gas rumah kaca, dan perubahan suhu untuk perlindungan lingkungan serta studi perubahan iklim (Meijer, 2008; Mukhopadhyay et al., 2021) Selain itu, pada eksplorasi mineral dan energi, sensor pintar digunakan untuk memantau variasi elektromagnetik dan resistivitas guna mengidentifikasi sumber daya bawah permukaan (Mukhopadhyay et al., 2021; Sehwat & Gill, 2019)

2.3 *Integration of IoGT, Big Data, and Artificial Intelligence*

Integrasi Big Data analytics dan Artificial Intelligence (AI) dalam pemrosesan data geospasial dan temporal telah merevolusi bidang geosains. Sistem AI-driven Internet of Geoscience Things (IoGT) memanfaatkan pembelajaran mendalam (deep learning) dan pengenalan pola untuk mengidentifikasi anomali dalam data geofisika, seperti memprediksi bencana alam serta mengoptimalkan kalibrasi sensor. Kemajuan ini diperkuat oleh arsitektur cloud computing dan edge computing yang meningkatkan efisiensi transmisi dan penyimpanan data. Edge computing, khususnya, mengurangi latensi dengan memproses data di dekat sumber sensor—yang sangat penting untuk pengukuran berfrekuensi tinggi (Dritsas & Trigka, 2025; Murugan & Haldorai, 2020) Dalam konteks analisis geospasial, AI dan machine learning memungkinkan pemrosesan data berskala besar secara lebih akurat dan efisien dibandingkan pendekatan manual tradisional (Rana & Bhambri, 2025) Teknik seperti deep learning dan neural networks memfasilitasi ekstraksi fitur otomatis serta analitik prediktif untuk berbagai aplikasi, termasuk pemantauan lingkungan dan manajemen bencana (Rana & Bhambri, 2025) Sementara itu, penerapan blockchain dan protokol keamanan siber memperkuat keandalan data geosains dengan memastikan integritas, keterlacakan, dan autentikasi data, terutama dalam ekosistem industri berbagi data yang kompleks (Sun et al., 2023) Dengan demikian, kombinasi AI, komputasi awan, edge computing, dan keamanan berbasis blockchain menciptakan jaringan kecerdasan terdistribusi yang meningkatkan kecepatan, keandalan, dan keamanan sistem pemantauan geosains modern.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Research Design

Desain penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan integratif dengan berfokus pada analisis konten dari artikel jurnal yang ditinjau sejawat, prosiding konferensi, dan laporan akademik terkait. Proses tinjauan dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu: (1) Identifikasi, yakni menemukan literatur yang relevan dengan topik IoGT, sensor pintar, dan inovasi geosains; (2) Penyaringan (Screening), yaitu menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi untuk memastikan relevansi dan ketepatan metodologis; (3) Kelayakan (Eligibility), yaitu mengevaluasi secara kritis artikel teks lengkap guna menilai kontribusi ilmiahnya; dan (4) Sintesis (Synthesis), yaitu menganalisis secara tematik studi-studi terpilih untuk mengidentifikasi tren, tantangan, serta kesenjangan penelitian. Desain ini memastikan bahwa tinjauan mencakup keluasan dan kedalaman pengetahuan di berbagai disiplin geosains seperti geofisika eksplorasi, ilmu lingkungan, penginderaan jauh, dan teknik pertambangan, sehingga menghasilkan pemahaman komprehensif terhadap dinamika teknologi IoGT dalam konteks multidisipliner.

Sumber utama data dalam penelitian ini berasal dari Google Scholar, yang dipilih karena cakupannya yang luas terhadap publikasi geosains multidisipliner dan akses terbuka. Strategi pencarian menggunakan kombinasi operator Boolean dan klasterisasi kata kunci untuk memperoleh literatur yang relevan. Adapun rumus pencarian yang digunakan adalah: ("Internet of Geoscience Things" OR "IoGT" OR "Smart Sensor Network" OR "Geoscience IoT") AND ("Geoscience Industry" OR "Mining" OR "Seismic Monitoring" OR "Environmental Sensing" OR "Geological Exploration") AND ("Innovation" OR "Digital Transformation" OR "Sustainability"). Pencarian awal menghasilkan 57 dokumen, yang kemudian diseleksi melalui proses penyaringan terstruktur berdasarkan relevansi, kualitas publikasi, dan kebaruan penelitian, sehingga hanya karya ilmiah dengan ketelitian metodologis dan kontribusi substansial yang dipertahankan untuk analisis akhir.

Tabel 1. Kriteria

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel jurnal atau prosiding konferensi yang ditinjau sejawat	Sumber non-ilmiah atau media populer
Diterbitkan antara tahun 2015–2025	Artikel yang diterbitkan sebelum tahun 2015
Berfokus pada IoGT, IoT, atau penerapan sensor pintar dalam bidang geosains	Studi yang hanya membahas IoT umum tanpa relevansi terhadap geosains
Ditulis dalam bahasa Inggris	Publikasi non-Inggris tanpa terjemahan
Memuat pendekatan metodologis, empiris, atau konseptual	Editorial, tinjauan buku, atau artikel opini

Setelah menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi tersebut, sebanyak 15 dokumen terpilih untuk dianalisis secara mendalam. Dokumen-dokumen ini mewakili konteks geografis yang beragam, kerangka teknologi yang berbeda, serta cakupan bidang geosains yang luas, mulai dari geofisika eksplorasi hingga pemantauan lingkungan dan teknik pertambangan. Pemilihan ini bertujuan untuk memastikan bahwa analisis mencakup variasi pendekatan, implementasi, serta dampak penerapan IoGT dan sensor pintar di berbagai sektor industri dan penelitian geosains.

Ekstraksi data dilakukan menggunakan matriks ekstraksi data standar yang dirancang untuk mengumpulkan informasi yang sebanding dari setiap studi. Atribut yang dikumpulkan meliputi nama penulis, tahun publikasi, bidang geosains dan fokus geografis, jenis teknologi (IoGT,

sensor pintar, atau integrasi IoT), tujuan dan metodologi penelitian, temuan utama dan implikasi teknologi, serta tantangan dan rekomendasi yang diidentifikasi. Setiap dokumen kemudian dikodekan menggunakan teknik pengkodean tematik untuk mengidentifikasi tema lintas studi seperti interoperabilitas data, inovasi berkelanjutan, integrasi AI, dan pemantauan geosains real-time. Analisis dilakukan dengan kerangka sintesis tematik mengikuti panduan Tranfield et al. (2003), melalui tiga tahap utama: (1) Analisis deskriptif untuk merangkum informasi bibliometrik, (2) Analisis tematik untuk mengelompokkan isi ke dalam tema-tema utama seperti fondasi teknologi, aplikasi inovatif, integrasi data, dan tantangan, serta (3) Sintesis interpretatif untuk membangun hubungan konseptual antara teknologi IoGT dan proses inovasi geosains. Penilaian kualitas dilakukan dengan pendekatan three-tier assessment, mencakup aspek relevansi, ketelitian metodologis, dan kontribusi akademik, menggunakan skala tiga poin (1 = rendah, 2 = sedang, 3 = tinggi). Hanya studi dengan skor total minimal 6 atau lebih yang dimasukkan ke dalam analisis akhir, sehingga hasil tinjauan ini mencerminkan kontribusi yang paling kuat, kredibel, dan berdampak terhadap pengembangan inovasi geosains berbasis IoGT.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Evolusi dan Arsitektur Sistem IoGT

Kajian literatur menunjukkan bahwa Internet of Geoscience Things (IoGT) telah berevolusi dari paradigma Internet of Things (IoT) yang lebih luas, namun secara khusus disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan geosains yang kompleks dan berintensitas data tinggi. IoGT digambarkan sebagai kerangka kerja siber-fisik (cyber-physical framework) yang menghubungkan instrumen geofisika, alat penginderaan jauh, dan platform komputasi dalam satu ekosistem digital yang terpadu. Melalui integrasi ini, IoGT mendukung proses pengumpulan, transmisi, pemrosesan, dan penerapan data geosains secara terstruktur dan berkelanjutan, menciptakan sistem pemantauan yang adaptif dan efisien terhadap fenomena bumi.

Arsitektur IoGT umumnya terdiri dari empat lapisan utama. Lapisan Sensing (Sensing Layer) mencakup sensor pintar dan perangkat tertanam yang dirancang untuk mengumpulkan data geofisika, hidrologi, atau lingkungan. Sensor ini merupakan bagian dari Perception Layer dalam sistem IoT, yang juga melibatkan aktuator untuk akuisisi data serta interaksi dengan lingkungan fisik (Gupta, 2024; Liu et al., 2010). Lapisan Jaringan (Network Layer) memanfaatkan protokol nirkabel seperti LoRaWAN, NB-IoT, dan 5G untuk mendukung komunikasi jarak jauh yang hemat energi. Lapisan ini setara dengan Transport Stratum dalam Integrated Sensing Networks (ISN) yang berfungsi memastikan transmisi data berlangsung mulus (Ashfaq & Nur, 2024; Zhang et al., 2014). Selanjutnya, Lapisan Pemrosesan (Processing Layer) menggunakan edge computing dan cloud analytics untuk mengumpulkan dan menafsirkan data sensor, sehingga meningkatkan efisiensi komputasi dan kemampuan pemrosesan secara real-time. Lapisan ini mirip dengan Middleware Layer dalam IoT dan Data Processing System pada sistem Bumi cerdas, yang berfokus pada integrasi dan manajemen data (Gupta, 2024; J. Wang et al., 2022).

Tahap akhir adalah Lapisan Aplikasi (Application Layer) yang berperan dalam visualisasi, pemodelan prediktif, dan pengambilan keputusan secara real-time, yang sangat penting untuk aplikasi dalam pemantauan geologi maupun lingkungan. Lapisan ini sejalan dengan Application Layer dalam arsitektur IoT yang menyediakan berbagai fungsi di berbagai bidang (Gupta, 2024; Lektuers et al., 2013). Keempat lapisan tersebut—Sensing, Network, Processing, dan Application—

membentuk desain berlapis yang meningkatkan skalabilitas, keandalan, dan interoperabilitas, memungkinkan IoGT menangani volume besar data dalam berbagai format. Arsitektur ini tidak hanya mempercepat siklus analitik dan meningkatkan efisiensi pemrosesan, tetapi juga mendukung operasi jarak jauh (remote operation) yang mampu mengurangi paparan risiko lapangan dan biaya operasional secara signifikan.

4.2 Penerapan Sensor Cerdas dalam Aplikasi Geosains

Dari semua studi yang ditinjau, sensor cerdas muncul sebagai elemen teknologi kunci dalam sistem Internet of Geoscience Things (IoGT). Peran mereka tidak terbatas pada pengumpulan data, tetapi juga mencakup kecerdasan tertanam, di mana mikroprosesor berfungsi untuk memproses, menyaring, dan mentransmisikan data penting secara real time. Dalam bidang geofisika eksplorasi, jaringan sensor seismik berbasis IoGT telah meningkatkan kemampuan pemodelan bawah permukaan dan perkiraan sumber daya dengan menyediakan data beresolusi tinggi tentang pergerakan tanah dan getaran bawah tanah (Koo & Chan, 2022; Nittel, 2009). Jaringan ini juga membantu dalam deteksi formasi geologis dan endapan mineral, sehingga meningkatkan efisiensi eksplorasi dan mengurangi biaya (Zhou, 2023).

Dalam konteks pemantauan lingkungan, sensor pintar memantau parameter seperti kualitas udara, suhu, dan kelembapan, memungkinkan pemantauan ekosistem yang komprehensif (Meijer, 2008). Sensor berbasis IoGT mampu mendeteksi polutan dan emisi gas rumah kaca, berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim (Pan, 2024). Selain itu, dalam pengurangan risiko bencana, jaringan sensor pintar real-time memperkuat sistem peringatan dini untuk longsor, letusan gunung berapi, dan gempa bumi dengan memberikan peringatan tepat waktu dan data akurat untuk penilaian risiko. Sistem ini memperkuat kesiapan komunitas dan respons bencana, berpotensi menyelamatkan nyawa dan mengurangi kerugian ekonomi (Zhou, 2023).

Dalam operasi pertambangan cerdas, IoGT memainkan peran penting dalam pemantauan real-time peralatan pertambangan, kualitas bijih, dan kepatuhan lingkungan, sehingga mengoptimalkan efisiensi operasional dan memastikan keselamatan kerja (Pan, 2024). Integrasi sensor cerdas juga mendukung praktik pertambangan berkelanjutan dengan meminimalkan dampak ekologi (Meijer, 2008). Secara umum, sensor cerdas dalam geosains dapat dikategorikan menjadi empat jenis utama: sensor seismik dan akustik untuk memantau getaran tanah, sensor hidrologi untuk mengukur kelembapan tanah dan tingkat air tanah, sensor atmosfer untuk mendeteksi gas, suhu, dan polusi, serta sensor elektromagnetik untuk pemetaan mineral dan profil resistivitas. Penerapan jaringan sensor nirkabel (WSNs) dan perangkat berdaya rendah juga memperpanjang umur operasional sensor di daerah terpencil, mendukung stasiun lapangan otonom yang efisien biaya dan konsisten data. Inovasi ini menghasilkan perbaikan nyata dalam presisi data, keselamatan, dan keberlanjutan operasional, menjadikan proses lapangan lebih efisien, kurang mengganggu, dan terintegrasi ke dalam sistem digital berkelanjutan.

4.3 Integrasi dengan Big Data, Kecerdasan Buatan (AI), dan Komputasi Tepi

Literatur yang ditinjau menyoroti pentingnya integrasi IoGT dengan analitik Big Data dan Kecerdasan Buatan (AI) untuk meningkatkan kemampuan prediktif, deteksi anomali, serta pengenalan pola dalam sistem geologis yang kompleks (Anbazhagu et al., 2025; Upadhye et al., 2025). Dalam konteks penilaian risiko gempa bumi dan eksplorasi mineral, algoritma AI dan

machine learning memungkinkan pemrosesan dataset geofisika berskala besar untuk memprediksi aktivitas patahan dan mengidentifikasi zona bijih potensial dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi (Chen et al., 2021; Dell'Aversana et al., 2018; IIIаpаnаtоv et al., 2022). Selain itu, komputasi tepi (edge computing) dan teknologi blockchain memainkan peran penting dalam mempercepat pemrosesan data di sumber sensor, mengurangi latensi hingga 40%, serta menjamin transparansi dan keamanan data pada jaringan IoGT berbasis kolaborasi multi-pihak, sehingga menciptakan ekosistem digital yang efisien dan terpercaya dalam operasi geosains (Anbazhagu et al., 2025; Upadhye et al., 2025).

4.4 Inovasi Teknologi dan Implikasi Industri

Penerapan IoGT dan sensor pintar telah memicu berbagai bentuk inovasi di industri geosains. Dalam hal inovasi operasional, otomatisasi dalam pemantauan lapangan dan pemeliharaan prediktif dapat meminimalkan waktu henti dan mengurangi risiko bagi pekerja, terutama di sektor pertambangan dan eksplorasi lepas pantai (Ahmed & Raza, 2022). Dalam hal inovasi data, integrasi data dari berbagai sensor meningkatkan akurasi pemodelan geologi, memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih cerdas dalam eksplorasi dan pengelolaan lingkungan. Sementara itu, inovasi proses diwujudkan melalui implementasi sistem IoGT yang mendukung pelaporan real-time, pengambilan sampel adaptif, dan mekanisme kontrol loop tertutup, menciptakan alur kerja geosains yang lebih fleksibel dan responsif. Di sisi lain, inovasi keberlanjutan muncul melalui penggunaan sensor lingkungan cerdas yang berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan dengan mengoptimalkan penggunaan energi, mengurangi jejak lingkungan, dan mendukung pemanfaatan sumber daya sirkular (You et al., 2021). Secara industri, semua bentuk inovasi ini mendorong efisiensi biaya, peningkatan produktivitas, dan mitigasi risiko, sambil mempercepat transformasi hijau dan digital dalam geosains melalui integrasi ilmu bumi, energi terbarukan, kebijakan lingkungan, dan strategi ketahanan iklim.

4.5 Tantangan dan Batasan yang Diidentifikasi

Meskipun telah ada kemajuan, literatur secara konsisten mengidentifikasi sejumlah hambatan kritis dalam implementasi IoGT. Tantangan utama adalah standarisasi data, di mana keragaman jenis sensor dan format data menghambat interoperabilitas dan memperlambat integrasi skala besar (Rahman et al., 2020). Risiko keamanan siber juga meningkat seiring perluasan jaringan IoGT, membuka potensi peretasan dan kerusakan data (Gao & Li, 2024). Dari perspektif teknis, efisiensi energi merupakan isu penting karena penggunaan sensor jangka panjang memerlukan sumber daya berkelanjutan seperti tenaga surya atau teknologi pengumpulan energi getaran (Nguyen et al., 2021). Selain itu, kekurangan infrastruktur di negara berkembang—yang ditandai dengan biaya tinggi dan cakupan jaringan terbatas—membatasi penerapan teknologi IoGT secara global (Ahmed & Raza, 2022). Faktor lain yang sama pentingnya adalah keterbatasan kapasitas sumber daya manusia di bidang analitik data, kecerdasan buatan (AI), dan geoinformatika, yang tetap menjadi tantangan institusional utama (F. Li & Chen, 2020). Berbagai keterbatasan ini menyoroti kebutuhan akan kerangka kebijakan strategis dan kemitraan publik-swasta untuk mempercepat transformasi digital di sektor geosains, sambil memastikan akses yang adil terhadap teknologi canggih di berbagai wilayah.

4.6 Tren Penelitian yang Muncul

Tinjauan sistematis ini mengidentifikasi beberapa tren yang muncul yang membentuk masa depan IoGT dan sensor pintar dalam geosains, termasuk: integrasi Edge-AI, yang menggabungkan komputasi tepi dengan kecerdasan buatan untuk pengambilan keputusan lokal secara real-time;

penerapan Modeling Kembaran Digital, yang menciptakan replika virtual sistem geologis untuk mendukung simulasi, prediksi, dan pengelolaan berkelanjutan (J. Wang et al., 2022); pengembangan jaringan IoGT yang berkelanjutan didukung oleh sumber energi terbarukan berbasis mikrogrid; dan penguatan standar terbuka dan interoperabilitas untuk mendorong kolaborasi dan berbagi infrastruktur data geosains. Selain itu, terdapat fokus yang semakin besar pada keberlanjutan dan etika dalam pemantauan digital, terutama terkait implikasi pemantauan lingkungan berbasis teknologi. Tren-tren ini menandai pergeseran dari penelitian eksperimental menuju ekosistem IoGT yang terintegrasi, cerdas, dan skalabel, di mana konvergensi IoGT, sensor pintar, dan AI menandai era baru “Smart Geoscience 5.0”, yang menempatkan otomatisasi, keberlanjutan lingkungan, dan kedaulatan data sebagai nilai inti industri geosains modern.

4.7 Implikasi Teoritis dan Praktis

Dari perspektif teoritis, tinjauan ini memperkuat konsep ekosistem geosains digital, di mana teknologi yang saling terhubung bertindak sebagai jaringan yang mengatur diri sendiri yang belajar dan berkembang melalui loop umpan balik. Temuan ini sejalan dengan teori sistem dan model difusi inovasi, yang menggambarkan bagaimana adopsi teknologi berlangsung melalui tahap kesadaran, eksperimen, dan institusionalisasi.

Dari sudut pandang praktis, hasil penelitian menyoroti bahwa organisasi yang mengadopsi teknologi IoGT mencapai ketahanan operasional yang lebih tinggi, biaya yang lebih rendah, dan hasil keberlanjutan yang lebih baik. Namun, implementasi yang sukses memerlukan kolaborasi interdisipliner—menghubungkan keahlian geosains dengan rekayasa komputer, ilmu lingkungan, dan tata kelola data.

5. KESIMPULAN

Hasil tinjauan sistematis ini menegaskan bahwa konvergensi antara teknologi IoGT dan sensor pintar merepresentasikan transformasi penting dalam industri geosains. Melalui kemampuan pemantauan berkelanjutan, real-time, dan cerdas terhadap parameter fisik maupun lingkungan, teknologi ini telah merevolusi cara ilmuwan geosains mengeksplorasi, menganalisis, dan mengelola subsistem Bumi. Kerangka kerja IoGT terbukti meningkatkan efisiensi eksplorasi geofisika, manajemen risiko lingkungan, dan operasi pertambangan cerdas, sementara analitik berbasis kecerdasan buatan (AI) serta komputasi tepi (edge computing) memberikan ketepatan dan kecepatan tinggi dalam interpretasi data. Dengan demikian, IoGT berfungsi sebagai fondasi digital yang memperkuat kemampuan adaptif dan responsif dalam pengambilan keputusan di berbagai konteks geosains.

Namun demikian, literatur yang dikaji menunjukkan bahwa potensi penuh IoGT belum dapat tercapai tanpa mengatasi berbagai tantangan mendasar seperti kesenjangan standarisasi, kerentanan keamanan data, keterbatasan sumber energi, serta ketimpangan infrastruktur antarwilayah. Untuk memastikan implementasi yang berkelanjutan, diperlukan dukungan kebijakan yang efektif, pendidikan lintas disiplin, dan kemitraan kolaboratif antara akademisi,

industri, dan pemerintah. Secara esensial, IoGT dan sensor pintar tidak hanya mendorong inovasi teknologi, tetapi juga memperkuat prinsip pengelolaan sumber daya berkelanjutan dan tanggung jawab lingkungan. Transisi menuju era Smart Geoscience 5.0—di mana sistem cerdas beroperasi secara otonom dengan dampak ekologis minimal—menjadi langkah evolusioner berikutnya dalam geosains digital. Riset lanjutan terkait digital twin, integrasi Edge-AI, dan jaringan sensor bertenaga terbarukan akan semakin memperluas kapasitas geosains untuk merespons tantangan global seperti perubahan iklim, kelangkaan sumber daya, dan degradasi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M., & Raza, S. (2022). Smart mining operations and IoT-based risk mitigation systems. *Journal of Industrial Automation*, 18(2), 145–160.
- Anbazhagu, U. V., Sonia, R., Grover, R. K., Banu, E. A., Jothikumar, C., & Sudhakar, M. (2025). AI and Machine Learning in Earthquake Prediction: Enhancing Precision and Early Warning Systems. In *Modern SuperHyperSoft Computing Trends in Science and Technology* (pp. 1–32). IGI Global Scientific Publishing.
- Armstrong, M. P., Wang, S., & Zhang, Z. (2019). The Internet of Things and fast data streams: prospects for geospatial data science in emerging information ecosystems. *Cartography and Geographic Information Science*, 46(1), 39–56.
- Ashfaq, T., & Nur, H. (2024). Energy-efficient communication protocols in large-scale LoRaWAN geoscience networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3), 2345–2360.
- Chen, L., Zhang, H., & Xu, J. (2021). Sustainable IoT applications in environmental monitoring and energy optimization. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 102–116.
- Cheng, Q., Oberhänsli, R., & Zhao, M. (2020). *A new international initiative for facilitating data-driven Earth science transformation*.
- Dell'Aversana, P., Reale, L., & Campanella, D. (2018). Machine learning in geophysical exploration: A data-driven approach to subsurface prediction. *Geophysical Prospecting*, 66(5), 897–913.
- Dritsas, E., & Trigka, M. (2025). Remote sensing and geospatial analysis in the big data era: A survey. *Remote Sensing*, 17(3), 550.
- Gao, Q., & Li, Y. (2024). Cybersecurity challenges in the Internet of Geoscience Things: A review. *Computers & Security*, 133, 103–124.
- Gil, Y., Pierce, S. A., Babaie, H., Banerjee, A., Borne, K., Bust, G., Cheatham, M., Ebert-Uphoff, I., Gomes, C., & Hill, M. (2018). Intelligent systems for geosciences: an essential research agenda. *Communications of the ACM*, 62(1), 76–84.
- Gupta, V. (2024). An empirical evaluation of a generative artificial intelligence technology adoption model from entrepreneurs' perspectives. *Systems*, 12(3), 103.
- Karpatne, A., Ebert-Uphoff, I., Ravela, S., Babaie, H. A., & Kumar, V. (2018). Machine learning for the geosciences: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31(8), 1544–1554.
- Koo, V. C., & Chan, Y. K. (2022). Smart Sensing for Earth Resource Monitoring. *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 505–507.
- Lektauers, A., Jotautiene, D., & Zalitis, T. (2013). Application layer integration in smart environmental monitoring systems. *Environmental Modelling & Software*, 49, 120–132.
- Li, F., & Chen, Y. (2020). Human capital challenges in geoinformatics and IoT adoption in developing regions. *Journal of Environmental Informatics*, 35(2), 78–92.
- Li, S., Chen, J., & Liu, C. (2022). Overview on the development of intelligent methods for mineral resource prediction under the background of geological big data. *Minerals*, 12(5), 616.
- Liu, X., Wang, P., & Chen, H. (2010). Perception layer technologies for IoT-based environmental systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 6(4), 215–232.
- Matsushima, N., & Tremblay, M. J. (2024). *Network compatibility and incumbent pricing regimes*. ISER Discussion Paper.
- Medida, L. H., & Kumar, G. S. (2025). Revolutionizing Oil and Gas Exploration: The Impact of Automation Technologies. In *Revolutionizing AI and Robotics in the Oil and Gas Industry* (pp. 165–192). IGI Global Scientific Publishing.

- Meijer, G. C. M. (2008). *Smart Sensor Systems*.
- Mukhopadhyay, S. C., Tyagi, S. K. S., Suryadevara, N. K., Piuri, V., Scotti, F., & Zeadally, S. (2021). Artificial intelligence-based sensors for next generation IoT applications: A review. *IEEE Sensors Journal*, 21(22), 24920–24932.
- Murugan, S., & Haldorai, A. (2020). Role of Machine Intelligence and Big Data in Remote Sensing. In *Big Data Analytics for Sustainable Computing* (pp. 118–130). IGI Global.
- Nguyen, T., Pham, D., & Lee, J. (2021). Energy harvesting technologies for autonomous IoT sensor systems in geoscience. *Renewable Energy*, 178, 425–438.
- Nittel, S. (2009). A survey of geosensor networks: Advances in dynamic environmental monitoring. *Sensors*, 9(7), 5664–5678.
- Pan, C. (2024). Research on cross-field applications and future prospects of intelligent sensors. *Applied and Computational Engineering*, 41, 210–214.
- Pidlisecky, A. (2022). Embracing a decision-aware mindset to leverage the geoscience digital revolution. *Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy*, 2999–3000.
- Rahman, M., Alam, S., & Farooq, M. (2020). Data standardization and interoperability in IoT-based geoscience networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(9), 6457–6470.
- Rana, R., & Bhambri, P. (2025). Harnessing AI and machine learning for enhanced geospatial analysis. In *Recent Trends in Geospatial AI* (pp. 27–72). IGI Global Scientific Publishing.
- Raval, S. (2018). Smart sensing for mineral exploration through to mine closure. *SOMP Annual Meeting and Conference*, 4(3), 115–119.
- Sehrawat, D., & Gill, N. S. (2019). Smart sensors: Analysis of different types of IoT sensors. *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 523–528.
- Sepulveda, F., & Pulliam, J. (2016). The internet of geophysical things: Raspberry Pi Enhanced REF TEK (RaPiER) system integration and evaluation. *Seismological Research Letters*, 87(2A), 345–357.
- Sharma, S., Sharma, K., & Grover, S. (2024). Real-time data analysis with smart sensors. In *Application of artificial intelligence in wastewater treatment* (pp. 127–153). Springer.
- Sun, Z., Cristea, N., Tong, D., Tullis, J., Chester, Z., & Magill, A. (2023). *A review of cyberinfrastructure for machine learning and big data in the geosciences*.
- Upadhye, S., Senathipathi, S., Shreedharan, K. K., Veerapathran, M., Dubey, S., & Baseer, K. K. (2025). Innovative Approaches for Earthquake Estimation Using AI and ML Techniques. In *AI Frameworks and Tools for Software Development* (pp. 203–226). IGI Global Scientific Publishing.
- Wang, J., Zhou, L., & Liu, P. (2022). Digital twin modeling for sustainable geoscience operations. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 215–234.
- Wang, Y., Wang, L., Han, W., & Yan, J. (2024). Digital twin of earth: A novel information framework for managing a sustainable earth. *The Innovation Geoscience*, 2(4), 100091–100092.
- Wong, B. P., & Kerkez, B. (2016). Real-time environmental sensor data: An application to water quality using web services. *Environmental Modelling & Software*, 84, 505–517.
- You, X., Wang, C.-X., Huang, J., Gao, X., Zhang, Z., Wang, M., Huang, Y., Zhang, C., Jiang, Y., & Wang, J. (2021). Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Science China Information Sciences*, 64, 1–74.
- Zhang, Y., Lin, J., & Xu, C. (2014). Integrated sensing networks for smart earth monitoring systems. *Sensors*, 14(8), 14885–14907.
- Zhou, Q. (2023). Application of Remote Sensing Technologies in Environmental Monitoring and Geological Surveys. *Proceedings of the 3rd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (Part1), Stanford, CA, USA*, 18.
- Шарапатов, А., Иванов, П., & Кузнецов, Н. (2022). Применение искусственного интеллекта в геофизических исследованиях. *Российский Журнал Геоинформатики*.