

Literature Review: Blockchain dan Edge Computing dalam Optimalisasi Sistem Terdistribusi Masa Depan

Literature Review: Blockchain And Edge Computing In Optimizing Future Distributed System

Vivie Zuliani Erikasari¹, Tyanshi Firli Maharani², Elkin Rilvani³

^{1,2,3}Universitas Pelita Bangsa, Jl. Inspeksi Kalimalang No.9, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat

^{1,2,3}Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa, Jawa Barat

e-mail: *[1viviezuliani@gmail.com](mailto:viviezuliani@gmail.com), [2firlymaharani27@gmail.com](mailto:firlymaharani27@gmail.com),
[3elkin.rilvani@pelitabangsa.ac.id](mailto:elkin.rilvani@pelitabangsa.ac.id)

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada integrasi edge computing dan blockchain untuk mengoptimalkan sistem terdistribusi, terutama dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan keamanan data pada aplikasi Internet of Things (IoT), smart cities, dan jaringan 6G. Skalabilitas blockchain dan sumber daya yang terbatas untuk perangkat edge masih menjadi masalah, meskipun kedua teknologi ini mengatasi masalah latensi, transparansi, dan keamanan. Pendekatan Review Literatur Sistematis (SLR) menggunakan teknik text mining untuk meninjau artikel dari basis data terkemuka seperti Google Scholar dan IEEE Xplore. Artikel yang relevan dipilih dan kualitasnya dinilai untuk mendapatkan pemahaman tentang integrasi kedua teknologi. Meskipun kombinasi komputasi edge dan blockchain dapat meningkatkan efisiensi dan keamanan sistem terdistribusi, masalah dengan sumber daya perangkat edge dan algoritma konsensus blockchain harus ditangani sebelum skalabilitas yang lebih baik diterima. Penelitian ini menemukan bahwa kedua teknologi ini memiliki potensi yang sangat besar untuk membangun infrastruktur digital yang aman dan responsif di masa depan.

Kata kunci—Blockchain, Komputasi Tepi, Internet of Things, Skalabilitas, dan Latensi.

Abstract

This research focuses on the integration of edge computing and blockchain to optimize distributed systems, especially with the aim of improving efficiency and data security in Internet of Things (IoT) applications, smart cities, and 6G networks. Blockchain's scalability and limited resources for edge devices are still an issue, although both technologies address latency, transparency, and security issues. The Systematic Literature Review (SLR) approach uses text mining techniques to review articles from leading databases such as Google Scholar and IEEE Xplore. Relevant articles were selected and quality assessed to gain an understanding of the integration of the two technologies. Although the combination of edge computing and blockchain can improve the efficiency and security of distributed systems, issues with edge device resources and blockchain consensus algorithms must be addressed before better scalability is accepted. This research found that these two technologies have enormous potential to build a secure and responsive digital infrastructure in the future.

1. PENDAHULUAN

Di era transformasi digital, data telah menjadi aset yang sangat berharga. Aplikasi seperti Internet of Things (IoT), kota pintar, dan jaringan berbasis 6G menunjukkan bahwa penyebaran data harus aman, efektif, dan dapat diandalkan. Sementara edge computing menawarkan efisiensi dengan memproses data lebih dekat ke sumbernya, blockchain dikenal karena keamanan dan transparansinya melalui buku besar terdesentralisasi. Teknologi blockchain, di sisi lain, muncul sebagai solusi potensial untuk masalah ini. Tapi masing-masing teknologi memiliki kekurangan. Skalabilitas blockchain dan kekurangan sumber daya di edge computing adalah contohnya (Bhat, Sofi, and Chi 2020).

Penyebaran data yang aman, efektif, dan skalabel semakin penting di era di mana semua orang terhubung. Meskipun enkripsi dan konsensus memberikan keamanan dan transparansi, blockchain memiliki beberapa keterbatasan dalam skalabilitas, terutama untuk transaksi berfrekuensi tinggi. Sebaliknya, edge computing memproses informasi lebih dekat ke sumbernya, yang menghasilkan pemrosesan yang lebih efektif dan latensi yang lebih rendah. Kolaborasi kedua teknologi ini dapat menawarkan solusi potensial untuk mengatasi masalah tersebut dan mendukung arsitektur sistem yang lebih fleksibel dalam konteks Internet of Things dan lingkungan berbasis 6G (Xue, Chen, Zhang, Dai, & Yu, 2023).

Kombinasi edge computing dan blockchain menawarkan solusi untuk mengatasi keterbatasan masing-masing teknologi. Kolaborasi ini memungkinkan pengembangan arsitektur distribusi yang lebih canggih untuk aplikasi seperti Internet of Things (IoT), sistem cerdas, dan jaringan masa depan berbasis 6G. Misalnya, Mobile Edge Computing (MEC) memungkinkan offloading komputasi secara adaptif, sementara blockchain memastikan integritas data dan kepercayaan dalam jaringan terdistribusi (Bhat et al. 2020).

Namun, kedua teknologi ini memiliki kekurangan. Perangkat edge memiliki kapasitas pemrosesan, memori, dan penyimpanan yang terbatas, sementara blockchain membutuhkan sumber daya komputasi yang tinggi untuk menangani transaksi berfrekuensi tinggi. Tujuan dari artikel ini adalah untuk mencari solusi untuk masalah seperti meningkatkan keamanan data, efisiensi sistem, dan skalabilitas. Ekosistem Internet of Things, Edge Computing, dan IoT adalah contoh teknologi yang memiliki kekurangan (Nguyen, Nguyen, and Nguyen Gia 2024).

Penelitian ini berkonsentrasi pada integrasi blockchain dan kecerdasan edge untuk mengoptimalkan sistem terdistribusi untuk menjawab empat pertanyaan: (1) Bagaimana Integrasi Blockchain dan Edge Computing dalam Mengoptimalkan Sistem Terdistribusi dengan Meningkatkan Efisiensi dan Keamanan Data? (2) Bagaimana metode konvensional dapat mendukung Internet of Things, kota pintar, dan jaringan 6G? (3) Bagaimana blockchain dapat menangani masalah keamanan perangkat edge? (4) Apa tren terbaru tentang edge computing, teknologi blockchain, dan prospek masa depan mereka.

Untuk mendukung arsitektur sistem terdistribusi yang berkelanjutan, penelitian ini diharapkan akan membantu memberikan gambaran tentang prospek dan tantangan implementasi di masa depan dan juga membantu kemajuan teknologi, khususnya dalam membangun arsitektur sistem yang lebih canggih untuk mendukung ekosistem Internet of Things (IoT), kota pintar, dan otomasi industri, dengan mengoptimalkan pengelolaan sumber daya dan meningkatkan keamanan data.

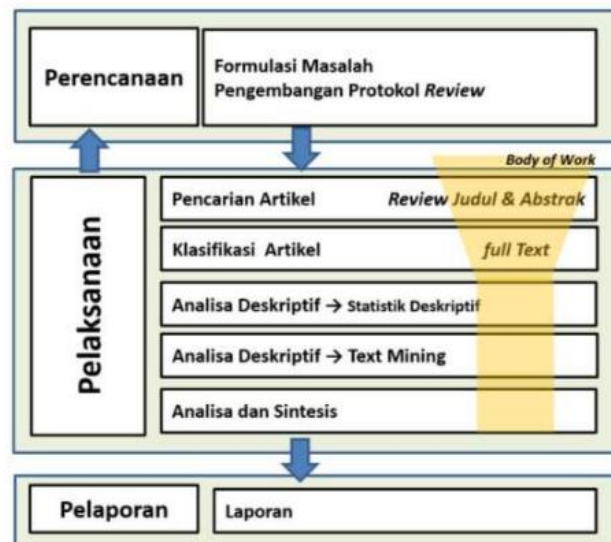
2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan Review Literatur Systematik (SLR), yang diperkuat oleh teknik text mining. Proses sistematis untuk mengumpulkan, mengevaluasi,

dan menyusun penelitian yang relevan dengan subjek penelitian digunakan dalam metode peninjauan literatur sistematis (SLR). SLR ini bertujuan untuk membuat kesimpulan singkat tentang penelitian sebelumnya, menentukan hal-hal yang harus diperbaiki antara penelitian saat ini dan yang sebelumnya, membuat laporan yang terintegrasi atau sintesis, dan membangun kerangka kerja untuk penelitian yang akan datang (Alkadrie 2024).

Peneliti melihat tren, masalah, dan solusi dalam pengoptimalan blockchain dan komputasi edge. Standar inklusi dan eksklusi digunakan dalam pemilihan penelitian. Sumber data untuk penelitian ini berasal dari jurnal, konferensi, artikel ilmiah, dan publikasi terpercaya lainnya yang diperoleh melalui basis data seperti Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, ScienceDirect, dan ACM Digital Library (Masyhur, Rizaldy, & Kartini, 2021).

Dalam penelitian ini, SLR dilakukan dalam tiga fase: perencanaan, pelaksanaan, dan pelaporan. Tahap perencanaan mencakup penentuan dan pengembangan pertanyaan penelitian (RQ). Pada fase pelaksanaan, literatur yang relevan dicari, kertas dipilih, dan data diekstraksi, dinilai untuk kualitas kertas, dan disintesis. Terakhir, fase pelaporan mencakup proses penulisan dan pemilihan publikasi (Alkadrie 2024). Gambar 1 menunjukkan proses ini.



Sumber: Blockchain Dan Kecerdasan Buatan Dalam Pertanian : Studi Literatur (2021).

Gambar 1. Proses SLR dengan teks mining

Pada awal pencarian, kriteria digunakan oleh peneliti untuk memasukkannya ke dalam database. Ini mencakup artikel dan jurnal yang menyelidiki hubungan antara blockchain dan edge computing dalam sistem terdistribusi. Peneliti menggunakan Tabel 1 untuk membuat struktur desain pertanyaan penelitian. Pertanyaan-pertanyaan ini disusun sesuai dengan topik penelitian.

Tabel 1. Pertanyaan Penelitian

ID	Pertanyaan Penelitian	Tujuan
RQ1	Bagaimana Integrasi Blockchain dan Edge Computing dalam Mengoptimalkan Sistem Terdistribusi dengan Meningkatkan Efisiensi dan Keamanan Data?	Menjelaskan bagaimana kedua teknologi ini dapat bekerja sama untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi sistem terdistribusi.

RQ2	Bagaimana metode konvensional dapat mendukung Internet of Things, kota pintar, dan jaringan 6G?	Memahami bagaimana metode konvensional mendukung peluncuran Internet of Things, kota pintar, dan jaringan 6G.
RQ3	Bagaimana blockchain dapat menangani masalah keamanan perangkat edge?	Menjelaskan solusi berbasis blockchain untuk meningkatkan keamanan perangkat keras komputasi.
RQ4	Apa tren terbaru tentang edge computing, teknologi blockchain, dan prospek masa depan mereka?	Menjelaskan prediksi masa depan edge computing dan blockchain dan kemajuan terbarunya.

Pencarian literatur dilakukan melalui berbagai basis data, termasuk Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, ScienceDirect, dan ACM Digital Library. Keyword seperti "Blockchain AND Edge Computing" memberikan kontribusi terbesar sebesar 40%, diikuti oleh "IoT AND Distributed Systems" dengan kontribusi 30%, "Blockchain" dengan kontribusi 15%, "6G AND Blockchain" dengan kontribusi 10%, dan "Applications of Edge Computing" dengan kontribusi 5%.

Artikel yang relevan telah dipilih untuk dievaluasi sebesar 23 artikel. Hasil analisis menunjukkan bahwa sembilan artikel menggunakan metode simulasi dan eksperimen, delapan menggunakan tinjauan literatur yang menyeluruh, empat menggunakan analisis data empiris, dan dua artikel tidak menyebutkan metode pengumpulan data. Terdapat penelitian bahwa kurangnya sumber daya perangkat edge sering memengaruhi efisiensi algoritma konsensus blockchain. Selain itu, algoritma seperti Proof-of-Work, yang digunakan dalam blockchain, membutuhkan banyak sumber daya komputasi, yang menghambat skalabilitas (Herdiana 2023a).

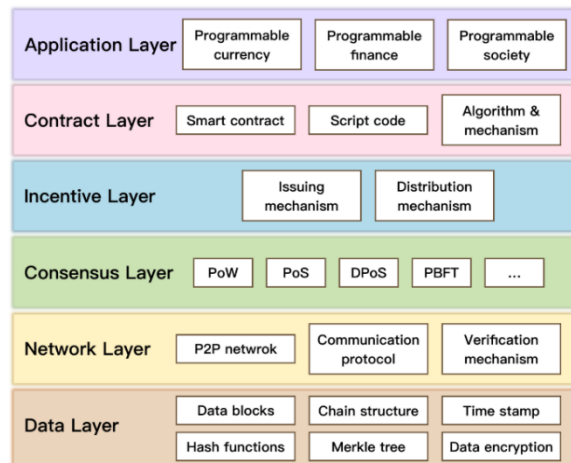
Fokus utama pada penelitian ini adalah pada temuan dan diskusi yang menggabungkan teori dan ide dari artikel yang dipilih untuk meningkatkan pemahaman yang mendalam tentang perkembangan teknologi blockchain dan kecerdasan edge dalam konteks sistem terdistribusi (Alhmda and Rahman 2022).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Teknologi Blockchain

Blockchain adalah sebuah sistem terdesentralisasi yang menggunakan rantai blok, juga dikenal untuk mencatat dan mengamankan transaksi secara konsisten dan transparan. Teknologi ini bergantung pada struktur blok. Rantai blok terdiri dari tanda tangan digital, tanda waktu atau timestamp, dan data transaksi yang dihubungkan dengan blok sebelumnya secara kriptografis. Dalam teknologi blockchain, setiap komponen jaringan memiliki salinan buku besar terdistribusi yang sama, yang berarti tidak ada satu pusat yang benar-benar memiliki otoritas total atas jaringan (HM and Junianti 2023).

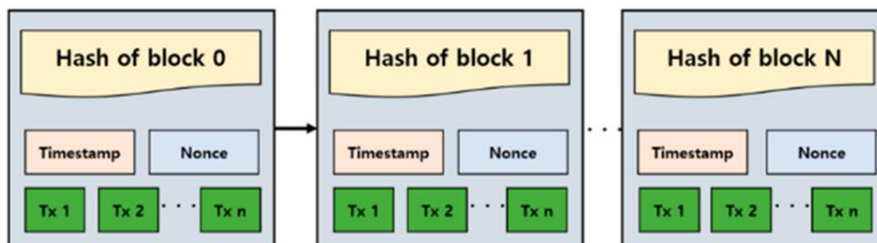
Blockchain database lebih tahan terhadap kebocoran data daripada sistem database biasa karena didistribusikan ke berbagai node jaringan dalam sistem yang desentralisasi dan terenkripsi (Chen, Wang, Zhou, Ahmed, & Wei, 2021). Teknologi ini memungkinkan penyimpanan transaksi dalam blok yang hanya dapat diperbarui melalui konsensus antar node, yang menjamin integritas dan keaslian data dalam transaksi.



Sumber: Joint Optimization For Mobile Edge Computing-Enabled Blockchain Systems: A Deep Reinforcement Learning Approach (2022).

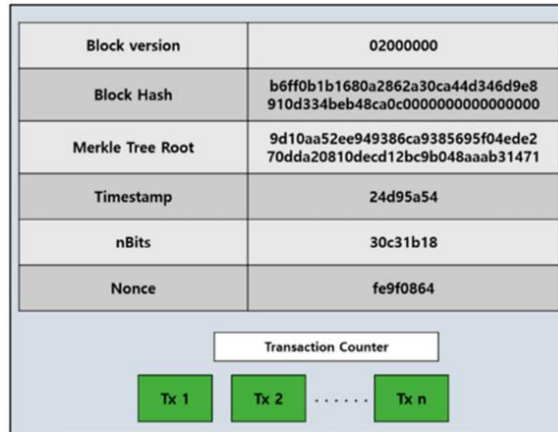
Gambar 2. Gambaran arsitektur umum blockchain

Semua transaksi yang disetujui disimpan dalam rantai blok, yang dimulai dari blok genesis tanpa hash sebelumnya. Setiap blok baru mencatat hash, stempel waktu, dan detail transaksi, yang menciptakan hubungan berantai (Nyamtiga et al. 2019). Gambar 3 dan 4 di bawah ini menunjukkan konfigurasi umum dan struktur internal masing-masing blok blockchain.



Sumber: Blockchain-Based Secure Storage Management With Edge Computing For IoT (2019).

Gambar 3. Konfigurasi blockchain



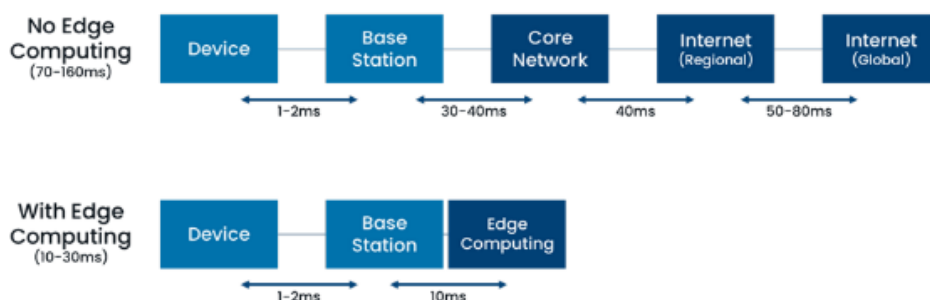
Sumber: Blockchain-Based Secure Storage Management with Edge Computing for IoT (2019).

Gambar 4. Struktur internal sebuah blok dalam blockchain

3. 2 Edge Computing

Pemrosesan data lebih dekat ke sumbernya, mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi, dimungkinkan oleh edge computing. MEC adalah teknologi penting yang membantu mewujudkan banyak visi untuk jaringan seluler generasi berikutnya (5G) dan Internet (IoT dan internet taktis). Ini memungkinkan penyebaran aplikasi baru yang lebih besar dan memenuhi persyaratan ketat dari kedua 5G dan IoT dengan meningkatkan skalabilitas, latensi minimal, dan otomatisasi secara keseluruhan dan memungkinkan rantai nilai baru, peluang bisnis baru, dan banyak kasus penggunaan baru di berbagai industri (Nyamtiga et al. 2019).

Multi-Access Edge Computing (MEC) memungkinkan pemrosesan data di berbagai titik dalam jaringan, mendekatkan layanan ke pengguna akhir dan mengurangi latensi arsitektur terpusat, sehingga pemrosesan data lebih dekat ke sumbernya dan lebih efisien. Studi ini menunjukkan bahwa penggunaan teknologi ini dapat meningkatkan throughput dan responsivitas sistem dalam aplikasi Internet of Things (IoT) dan 5G (P. A. Budiman, 2022).



Sumber: Analisis Multi-Access Edge Computing Menggunakan Jaringan Open Ran Pada Politeknik Negeri Jakarta (2023).

Gambar 5. Manfaat latensi dengan Edge Computing

3. 3 Bagaimana Integrasi Blockchain dan Edge Computing dalam Mengoptimalkan Sistem Terdistribusi dengan Meningkatkan Efisiensi dan Keamanan Data? (RQ1)

Blockchain adalah teknologi pencatatan permanen yang mencatat setiap transaksi data secara aman dalam jaringan, mempersulit manipulasi data tanpa terdeteksi. Dengan memberikan keandalan dan transparansi, blockchain meningkatkan integritas (Sulistiawati and Firdaus 2024). Edge computing dan blockchain saling melengkapi dalam sistem terdistribusi, memungkinkan pengolahan data di dekat sumbernya, mengurangi latensi dan beban jaringan. Di sisi lain, blockchain memberikan keamanan data melalui mekanisme pencatatan yang tidak dapat diubah, sedangkan edge computing memungkinkan pengolahan data di dekat sumbernya (Adhichandra 2024).

Blockchain dan Internet of Things (IoT) telah berhasil mengatasi kelemahan sistem konvensional di berbagai industri, terutama dalam rantai pasokan. Teknologi ini memungkinkan catatan transaksi dari produksi hingga konsumsi secara terdesentralisasi, sehingga jejak data menjadi aman dan transparan (Javaid et al. 2022).

Dengan kontrak pintar, setiap produk dapat disimpan secara permanen dalam buku besar terdistribusi. Dengan cara ini, riwayat pengiriman dan pergerakan produk tetap akurat dan tidak dapat diubah. Proses seperti pelacakan, pengiriman, dan registrasi dapat diotomatisasi, yang meningkatkan produktivitas dan transparansi. Aplikasi dan aliran data dapat dipercepat dengan kerja sama blockchain dan Internet of Things (IoT) (Alhamda and Rahman 2022). Berbagai sistem, termasuk sistem hardware dan software, memiliki kemampuan untuk berinteraksi satu sama lain dalam dunia Internet (IoT) yang heterogen.

Internet of Things terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan perangkat, lapisan gateway, dan lapisan cloud. Lapisan internet back end adalah lapisan pertama, di mana penyimpanan data dan komputasi berat dapat dilakukan. Lapisan tengah terdiri dari gateway, yang menghubungkan perangkat Internet of Things ke internet dan memberikan akses ke data dan layanan. Lapisan ketiga adalah perangkat Internet of Things bertenaga rendah, yang memiliki sumber daya komputasi yang lebih rendah (Nyamtiga et al. 2019).

Dengan menyediakan mekanisme konsensus yang transparan dan enkripsi data, blockchain juga menambah keamanan arsitektur edge computing. Sebuah penelitian, menunjukkan bahwa kedua teknologi ini dapat bekerja sama untuk meningkatkan kinerja sistem Internet of Things (IoT) (Hu et al. 2022). Transaksi antar perangkat edge dapat dilakukan secara otomatis dan aman menggunakan kontrak pintar yang diterapkan di blockchain.

Hal ini sangat penting dalam lingkungan Internet of Things (IoT) yang membutuhkan pertukaran data secara real-time antara berbagai perangkat yang berbeda, yang masing-masing memiliki tingkat keamanan dan kapasitas yang berbeda. Selain itu, integrasi edge computing dan blockchain memastikan konsistensi data di seluruh jaringan, yang memungkinkan perangkat dengan topologi dinamis untuk berinteraksi dengan aman dan efisien satu sama lain (Rahardja et al. 2021).

3. 4 Bagaimana metode konvensional dapat mendukung Internet of Things, kota pintar, dan jaringan 6G? (RQ2)

Meskipun cloud computing dan arsitektur client-server masih merupakan metode konvensional yang penting untuk mendukung Internet of Things (IoT) dan kota pintar, teknologi ini harus disesuaikan untuk mengatasi masalah seperti latensi dan keamanan data. Blockchain memberikan perlindungan data yang kuat, tetapi edge computing memungkinkan pengelolaan data secara real-time transparansi (Anggy Giri Prawiyogi and Aang Solahudin Anwar 2023).

Kombinasi keduanya telah membantu mengatasi kekurangan sistem konvensional di banyak bidang, terutama di rantai pasokan. Catatan dapat terdesentralisasi dari produksi hingga konsumsi berkat teknologi ini. Akibatnya, tidak hanya data dilindungi, tetapi juga dapat diakses. Melalui kontrak pintar, setiap produk dapat dicatat secara permanen dalam buku besar distribusi. Metode ini menjamin bahwa catatan pengiriman dan pergerakan produk tetap akurat dan tidak

dapat diubah. Pengiriman, pelacakan, dan registrasi dapat diautomatisasi, meningkatkan efisiensi, dan meningkatkan (Yang et al. 2019).

Melalui kontrak pintar, setiap produk dapat dicatat secara permanen dalam buku besar distribusi. Metode ini menjamin bahwa catatan pengiriman dan pergerakan produk tetap akurat dan tidak dapat diubah. Pengiriman, pelacakan, dan registrasi dapat diautomatisasi, meningkatkan efisiensi, dan meningkatkan transparansi. Selain itu, aliran data dan aplikasi dipercepat dengan kerja sama IoT dan blockchain (Alhamda and Rahman 2022). Dalam lingkungan Internet of Things yang beragam, berbagai sistem hardware dan software dapat berfungsi dengan baik.

Internet of Things terdiri dari tiga lapisan utama: lapisan perangkat, lapisan gateway, dan lapisan cloud. Lapisan perangkat terdiri dari perangkat IoT bertenaga rendah yang memiliki kapasitas komputasi terbatas. Lapisan kedua, gateway, menghubungkan perangkat IoT ke internet dan memberikan akses ke data dan layanan. Lapisan ketiga, cloud backend, adalah tempat pemrosesan dan penyimpanan data besar dilakukan (Nyamtiga et al. 2019).

Dengan menyediakan mekanisme konsensus yang transparan dan enkripsi data, blockchain juga menambah keamanan arsitektur edge computing. Transaksi antar perangkat edge dapat dilakukan secara otomatis dan aman menggunakan kontrak pintar yang diterapkan di blockchain. Hal ini sangat penting dalam lingkungan Internet of Things (IoT) yang membutuhkan pertukaran data secara real-time antara berbagai perangkat yang berbeda, yang masing-masing memiliki tingkat keamanan dan kapasitas yang berbeda. Selain itu, integrasi edge computing dan blockchain memastikan konsistensi data di seluruh jaringan, yang memungkinkan perangkat dengan topologi dinamis untuk berinteraksi dengan aman dan efisien satu sama lain (Javaid et al. 2022).

Transformasi infrastruktur digital menuju era 6G membutuhkan integrasi teknologi mutakhir seperti edge computing dan blockchain untuk mencapai sistem yang lebih efisien, aman, dan responsif. Edge computing memungkinkan pemrosesan data lebih dekat ke sumber, mengurangi latensi dan beban jaringan inti. Sebaliknya, blockchain memberikan fondasi keamanan dan kepercayaan dalam infrastruktur digital karena memiliki buku besar terdesentralisasi dan mekanisme konsensus yang transparan. Ini sangat penting untuk menghadapi ancaman keamanan siber yang semakin kompleks di era digital (Mourtzis, Angelopoulos, and Panopoulos 2023).

Integrasi blockchain dan edge computing diproyeksikan menjadi fondasi jaringan 6G, dengan fokus pada latensi ultra-rendah, bandwidth tinggi, dan keamanan data yang optimal. Edge computing akan mendukung komputasi lokal untuk aplikasi seperti kendaraan otonom dan kota pintar, sementara blockchain memastikan koordinasi data yang aman di antara node-node jaringan.

Menggabungkan kedua teknologi ini diharapkan akan berfungsi sebagai dasar utama untuk membangun infrastruktur digital yang canggih. Keamanan, transparansi, dan keandalan data yang dijamin oleh kombinasi blockchain dan edge computing memungkinkan pengembangan aplikasi baru seperti sistem manajemen energi pintar, logistik berbasis kecerdasan buatan, dan jaringan komunikasi berbasis sensor.

Namun, transformasi ini menghadapi tantangan. Beberapa di antaranya adalah bahwa berbagai teknologi harus bekerja sama, algoritma konsensus yang lebih efisien harus dibuat, dan untuk mendukung keberlanjutan jaringan, efisiensi energi harus ditingkatkan. Oleh karena itu, kolaborasi antara peneliti, industri, dan pemerintah sangat penting untuk mengatasi tantangan ini dan memaksimalkan potensi teknologi di era 6G (Hu et al. 2022).

3. 5 Bagaimana blockchain dapat menangani masalah keamanan perangkat edge? (RQ3)

Blockchain digunakan dalam konteks Internet of Things (IoT) untuk melindungi terhadap serangan seperti manipulasi data atau akses ilegal. Ini dapat dicapai melalui mekanisme seperti pencatatan transaksi yang transparan, autentikasi perangkat, dan enkripsi data, yang

memungkinkan transaksi antar perangkat dilakukan secara aman dan otomatis (Rahardja et al. 2021).

Dua teknologi, blockchain dan edge computing, bekerja sama untuk mengatasi masalah dalam sistem terdistribusi. Blockchain melindungi data melalui buku besar terdesentralisasi, sementara edge computing mendukung pengolahan data lokal untuk mengurangi latensi dan penggunaan bandwidth (Khusmufa, Iman, and Arifin 2021).

Karena potensinya untuk meningkatkan keamanan, efisiensi, dan latensi dalam pemrosesan data di tepi, kombinasi kecerdasan tepi dan blockchain dianggap menjanjikan. Kecerdasan tepi memungkinkan pemrosesan data lebih dekat ke sumbernya, yang meningkatkan pemrosesan real-time, sementara blockchain memberikan keamanan dengan menyediakan catatan transaksi yang terdesentralisasi dan tidak dapat diubah.

Integrasi teknologi blockchain dengan edge computing dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi dan keamanan sistem distribusi data. Studi menunjukkan bahwa kombinasi ini dapat meningkatkan pemanfaatan sumber daya dalam hal komputasi, jaringan, penyimpanan, dan keamanan. Selain itu, kombinasi ini dapat meningkatkan efisiensi audit akuntansi dengan mengurangi biaya dan waktu yang dihabiskan (Nugroho 2023). Selain itu, Edge computing memungkinkan pengolahan data yang lebih cepat dan hemat sumber daya, sementara blockchain memastikan keaslian data sensor dalam sistem transportasi pintar (Nugroho 2023).

3. 6 Apa tren terbaru tentang edge computing, teknologi blockchain, dan prospek masa depan mereka? (RQ4)

Tren terbaru menunjukkan bahwa edge computing dan kecerdasan buatan (AI) semakin terintegrasi untuk pemrosesan data real-time. Sebaliknya, blockchain secara luas digunakan untuk memperkuat keamanan dan keterbukaan data dalam berbagai sektor, seperti manajemen rantai pasokan (Bentayeb, Chaoui, and Badir 2024). Aplikasi masa depan seperti Internet of Things (IoT), sistem berbasis 6G, dan arsitektur cerdas memiliki peluang besar untuk menggabungkan blockchain dan edge computing, dua teknologi mutakhir, untuk membuat sistem distribusi yang lebih canggih, efisien, dan aman. Kontrak pintar dalam blockchain mendukung transparansi, akuntabilitas, dan otomatisasi proses yang relevan untuk perangkat edge, tetapi masih ada masalah dengan standar interoperabilitas, sumber daya terbatas, dan konsumsi energi tinggi (HASFANI and RISTIAN 2024).

Dengan kontrak pintar yang diterapkan di dalam blockchain, transaksi antar perangkat edge dapat dilakukan secara otomatis dan aman. Di mana banyak perangkat berinteraksi satu sama lain secara real-time, masing-masing dengan kapasitas dan tingkat keamanan yang berbeda. Selain itu, integrasi edge computing dan blockchain memastikan konsistensi data di seluruh jaringan, yang memungkinkan perangkat dengan topologi dinamis berinteraksi dengan aman dan efisien satu sama lain (Wihartiko et al. 2021).

Dalam implementasi teknologi blockchain di Indonesia, ada banyak peluang dan hambatan yang harus dipertimbangkan. Peningkatan keamanan data dan transaksi digital memiliki peluang besar, desentralisasi dan transparansi blockchain dapat mengurangi kemungkinan manipulasi data dan penipuan. Selain itu, blockchain memiliki potensi untuk meningkatkan transparansi dan efisiensi manajemen rantai pasokan energi di sektor energi. Namun, masalah yang dihadapi termasuk kerangka regulasi yang tidak jelas, infrastruktur digital yang tidak merata, dan kurangnya pemahaman masyarakat tentang teknologi ini (Geraldina 2024).

Saat mengintegrasikan blockchain dengan komputasi edge, penelitian ini menemukan beberapa masalah. Kemampuan untuk melakukan konsensus blockchain dan kecepatan pemrosesan sering dipengaruhi oleh keterbatasan sumber daya pada perangkat edge (Herdiana 2023b). Selain itu, algoritma konsensus seperti Proof-of-Work sangat membutuhkan sumber daya, yang menghambat skalabilitas. Akibatnya, untuk mengatasi masalah ini, metode inventif seperti pengoptimalan algoritma konsensus dan penerapan sumber daya yang lebih efisien diperlukan (Bentayeb et al. 2024).

Sehingga dapat disimpulkan bahwa blockchain database lebih tahan terhadap kebocoran data daripada sistem database biasa karena didistribusikan ke berbagai node jaringan dalam sistem yang desentralisasi dan terenkripsi. Teknologi ini memungkinkan penyimpanan transaksi dalam blok yang hanya dapat diperbarui melalui konsensus antar node, yang menjamin integritas dan keaslian data dalam transaksi (Chen et al. 2021).

4. KESIMPULAN

Hasil diskusi menunjukkan bahwa teknologi edge computing dan blockchain meningkatkan keamanan data dalam berbagai aplikasi kontemporer, meningkatkan efisiensi, dan mengoptimalkan sistem distribusi. Kedua teknik ini dapat membantu menyelesaikan masalah latensi, transparansi, dan keamanan. Edge computing mempercepat pemrosesan data dengan mengurangi latensi dan beban jaringan, sementara blockchain memberikan transparansi dan keamanan melalui mekanisme pencatatan transaksi yang tidak dapat diubah. Kedua teknologi ini mempercepat aliran data sambil menjamin bahwa data antar perangkat aman dan konsisten. Mereka merupakan komponen dari Internet of Things (IoT), smart cities, dan jaringan 6G. Mereka memungkinkan proses diotomatisasi dan memungkinkan kontrak pintar blockchain untuk mengurangi jumlah data yang dapat dimanipulasi.

Namun, pengolahan edge memungkinkan data diproses lebih dekat ke sumbernya, mengurangi kebutuhan untuk pengolahan terpusat, yang dapat menyebabkan latensi dan beban jaringan yang berlebihan. Standar interoperabilitas, sumber daya yang terbatas untuk perangkat edge, dan pengelolaan algoritma konsensus yang perlu dioptimalkan untuk meningkatkan skalabilitas semuanya masih menjadi masalah. Selain itu, transisi ke era 6G membutuhkan kerja sama yang lebih efektif.

Pendekatan Review Literatur Sistematis (SLR), yang diperkuat dengan teknik text mining, digunakan untuk melakukan penelitian ini. Metode ini menggunakan artikel yang relevan dari berbagai basis data terkemuka, seperti Google Scholar dan IEEE Xplore untuk memastikan bahwa hanya studi yang relevan tentang integrasi edge computing dan blockchain ke dalam sistem terdistribusi yang terintegrasi.

Studi ini menunjukkan bahwa perangkat edge memiliki keterbatasan dalam hal sumber daya dan algoritma konsensus, yang membutuhkan optimalisasi, tetapi hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi edge computing dan blockchain dapat memberikan solusi yang lebih aman, efektif, dan skalabel untuk berbagai aplikasi modern. Sebaliknya, jelas bahwa kedua teknologi ini memiliki kekuatan besar untuk mengubah infrastruktur digital masa depan, terutama untuk aplikasi baru seperti manajemen energi pintar dan logistik berbasis kecerdasan buatan.

Secara keseluruhan, edge computing dan blockchain memiliki potensi besar untuk membangun infrastruktur digital yang lebih aman, efisien, dan responsif di masa depan, mendukung berbagai industri yang terus berkembang, meskipun terdapat beberapa tantangan teknis dan sumber daya yang perlu diatasi.

5. SARAN

Penelitian tentang integrasi edge computing dan blockchain dapat difokuskan pada sejumlah masalah strategis. Penelitian dapat berfokus pada pembuatan algoritma konsensus yang lebih efisien untuk meningkatkan kinerja komputasi dan mengurangi konsumsi energi, terutama dalam lingkungan yang membutuhkan pemrosesan data yang intensif. Kedua, penelitian dapat melihat bagaimana teknologi ini dapat digabungkan dengan kecerdasan buatan (AI) untuk meningkatkan prediksi, keamanan, dan manajemen data secara real-time pada aplikasi seperti Internet of Things (IoT) dan kota. Selain itu, studi kasus tentang implementasi edge computing

dan blockchain di berbagai sektor, seperti otomasi industri, logistik, atau kesehatan, dapat digunakan untuk menemukan masalah dan solusi praktis dalam skala besar.

Studi kasus tentang implementasi edge computing dan blockchain di berbagai sektor, seperti logistik, otomasi industri, dan kesehatan, dapat memberikan wawasan praktis tentang masalah dan solusi yang dihadapi dalam skala besar. Selain itu, disarankan agar pemerintah dan sektor bisnis membuat standar interoperabilitas dan kebijakan yang mendorong penggunaan energi terbarukan. Terakhir, sangat penting bagi akademisi, industri, dan pembuat kebijakan untuk bekerja sama untuk memastikan bahwa teknologi ini diterapkan secara efektif dan memberikan manfaat terbaik bagi masyarakat. Edge computing dan blockchain dapat menjadi pilar utama dalam mendukung transformasi digital di masa depan dengan pendekatan yang terintegrasi dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua orang yang terlibat dalam pembuatan karya ilmiah ini dan memberikan ide-ide mereka untuk menyelesaikannya. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberi kami dukungan, inspirasi, arahan, dan bimbingan sepanjang proses. Penulis sangat berterima kasih dapat bekerja sama untuk menyelesaikan penelitian ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Bhat, I. B. Sofi, and C. Y. Chi, "Edge computing and its convergence with blockchain in 5g and beyond: Security, challenges, and opportunities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 205340–205373, 2020.
- [2] H. Xue, D. Chen, N. Zhang, H. N. Dai, and K. Yu, "Integration of blockchain and edge computing in internet of things: A survey," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 144, pp. 307–326, 2023.
- [3] T. Nguyen, H. Nguyen, and T. Nguyen Gia, "Exploring the integration of edge computing and blockchain IoT: Principles, architectures, security, and applications," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 226, no. March, p. 103884, 2024.
- [4] S. A. Alkadrie, "Keamanan Cloud Computing di Era Industri 4.0 : Systematic Literature Review," vol. 4, no. 2, pp. 1–15, 2024.
- [5] Z. Masyhur, A. Rizaldy, and P. Kartini, "Studi Literatur Keamanan dan Privasi Data Sistem Cloud Computing Pada Platform Google Drive," *J. Software, Hardw. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 31–38, 2021.
- [6] B. Herdiana, "Tinjauan Komprehensif Evolusi, Aplikasi, dan Tren Masa Depan Programmable Logic Controllers (A Comprehensive Review of the Evolution, Applications, and Future Trends of Programmable Logic Controllers)," *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 11, no. 2, pp. 173–193, 2023.
- [7] N. A. Alhamda and A. Z. Rahman, "The Impact of IoT Supply Chain Integrated Blockchain Technology Advancements in the Healthcare Sector: A Literature Review," *J. Logist. Supply Chain*, vol. 2, no. 1, pp. 33–40, 2022.
- [8] A. D. M. HM and S. A. Junianti, "Penerapan Teknologi Blockchain Dalam Sistem Informasi Akuntansi," *Jawara Sist. Inf.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–12, 2023.

- [9] J. Chen, W. Wang, Y. Zhou, S. H. Ahmed, and W. Wei, "Exploiting 5G and Blockchain for Medical Applications of Drones," *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 1, pp. 30–36, 2021.
- [10] B. W. Nyamtiga, J. C. S. Sicato, S. Rathore, Y. Sung, and J. H. Park, "Blockchain-based secure storage management with edge computing for IoT," *Electron.*, vol. 8, no. 8, 2019.
- [11] A. Sulistiawati and R. Firdaus, "Perancangan Sistem Informasi Manajemen Berbasis Teknologi Blockchain Untuk Optimalisasi Keamanan Dokumen Digital," *JICN J. Intelek dan Cendekiawan Nusant.*, vol. 1, no. 3, pp. 4142–4148, 2024.
- [12] I. Adhichandra, "Implementasi Teknologi Blockchain Dalam Sistem Manajemen Logistik Untuk Meningkatkan Keandalan Dan Transparansi," *J. Rev. Pendidik. dan Pengajaran*, vol. 7, no. 2, pp. 5209–5214, 2024.
- [13] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, and S. Khan, "A review of Blockchain Technology applications for financial services," *BenchCouncil Trans. Benchmarks, Stand. Eval.*, vol. 2, no. 3, p. 100073, 2022.
- [14] Z. Hu, G. Hui, T. Wang, D. Han, and Y. Lu, "Joint Optimization for Mobile Edge Computing-Enabled Blockchain Systems: A Deep Reinforcement Learning Approach," *Sensors*, vol. 22, no. 9, pp. 1–25, 2022.
- [15] U. Rahardja, Q. Aini, A. Khairunisa, and S. Millah, "Implementation of Blockchain Technology in Learning Management System (LMS)," *APTISI Trans. Manag.*, vol. 6, no. 2, pp. 112–120, 2021.
- [16] Anggy Giri Prawiyogi and Aang Solahudin Anwar, "Perkembangan Internet of Things (IoT) pada Sektor Energi : Sistematis Literatur Review," *J. MENTARI Manajemen, Pendidik. dan Teknol. Inf.*, vol. 1, no. 2, pp. 187–197, 2023.
- [17] R. Yang, F. R. Yu, P. Si, Z. Yang, and Y. Zhang, "Integrated Blockchain and Edge Computing Systems: A Survey, Some Research Issues and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1508–1532, 2019.
- [18] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, "Blockchain Integration in the Era of Industrial Metaverse," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 3, 2023.
- [19] A. Khusmufa, N. Iman, and S. Arifin, "An-Nisbah: Jurnal Ekonomi Syariah The Advantages And Challenges Of Implementing Sukuk Through Blockchain Technology," vol. 08, pp. 247–270, 2021.
- [20] P. A. Nugroho, "Analisis Bibliometrik tentang Studi-Studi Pendahuluan Penggunaan Blockchain pada Sistem Perpustakaan Digital," *Bul. Perpust.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–21, 2023.
- [21] Y. Bentayeb, K. Chaoui, and H. Badir, "Blockchain Meets Edge Computing : Enhancing Performance and Security for Modern Data Systems," vol. 15, no. 11, pp. 773–783, 2024.
- [22] H. HASFANI and U. RISTIAN, "Infrastruktur Jaringan Komunikasi pada Smart-Green House Tanaman Anggur berbasis Edge Computing," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 12, no. 2, p. 484, 2024.
- [23] F. D. Wihartiko *et al.*, "Blockchain Dan Kecerdasan Buatan Dalam Pertanian : Blockchain and Artificial Intelligence in Agriculture :," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 8, no. 1, pp. 177–188, 2021.
- [24] I. Geraldina, "Mengintegrasikan Teknologi Blockchain dalam Pendidikan Tinggi pada Transparansi serta Keamanan dalam Kredensial Akademik," vol. 5, no. 1, pp. 72–79, 2024.
-