

SISTEM DISTRIBUSI DAN VERIFIKASI BERBASIS BLOCKCHAIN UNTUK SERTIFIKAT DIGITAL EMAS DOMESTIK: DESAIN KONSEPTUAL

Tanzi Mubaroq Santoso^{1*}, Shelve Nidya Neyman², Irman Hermadi³, Didi Rosiyadi⁴

^{1,2,3}*Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika, IPB University, Bogor, Indonesia*

⁴*Pusat Riset Kecerdasan Artfisial dan Keamanan Siber, BRIN, Serpong, Indonesia*

**Penulis korespondensi: tanzi.mubaroq@apps.ipb.ac.id*

ABSTRAK

Tantangan dalam industri perdagangan emas Indonesia masih berlanjut, dengan berbagai masalah seperti maraknya produk ilegal, kurangnya ketertelusuran dalam rantai pasokan, dan ketergantungan yang berlebihan pada sistem verifikasi terpusat yang dipimpin oleh kepentingan asing. Platform CE saat ini hanya menawarkan status verifikasi yes/no respon dan tidak menyediakan riwayat distribusi. Lebih lanjut, arsitektur terpusat berisiko terhadap manipulasi data. Dalam makalah ini, kami mengusulkan kerangka kerja konseptual dan desain arsitektur untuk sistem distribusi dan verifikasi sertifikat emas berbasis blockchain berdasarkan platform Hyperledger Fabric. Kerangka kerja yang diusulkan mendefinisikan jaringan permission untuk empat aktor yang terdiri dari organisasi produsen, distributor, auditor, dan konsumen yang saling terhubung melalui saluran bersama dengan kontrol akses yang dibedakan berdasarkan peran dan logika bisnis melalui chaincode. Kerangka kerja ini divalidasi melalui metodologi evaluasi desain sistematis yang terdiri dari Evaluasi Kualitas Arsitektur sesuai dengan karakteristik kualitas perangkat lunak ISO/IEC 25010. Hasil evaluasi menegaskan bahwa kerangka kerja yang diusulkan memenuhi kriteria desain utama untuk keamanan, keterlacakan, interoperabilitas, dan kedaulatan data, memberikan landasan konseptual yang kuat untuk implementasi prototipe di masa mendatang. Penelitian ini menyediakan kerangka kerja arsitektur blockchain yang dapat direplikasi untuk digunakan dalam rantai pasokan komoditas bernilai tinggi di negara-negara berkembang.

Kata kunci: blockchain, Hyperledger Fabric, keterlacakan distribusi emas, smart contract, verifikasi digital

1 PENDAHULUAN

Sektor perdagangan emas Indonesia telah menunjukkan pertumbuhan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Antara Januari dan November 2024, transaksi emas digital mencapai Rp 53,3 triliun, menandai peningkatan tajam sebesar 556% dibandingkan periode yang sama tahun sebelumnya (BAPPEBTI, 2024). Meskipun ekspansi yang pesat ini mencerminkan meningkatnya minat pasar, hal ini memunculkan kekhawatiran terkait dengan keaslian produk, transparansi distribusi legal, dan keamanan data. Isu diatas menimbulkan pertanyaan di kalangan konsumen dan regulator mengenai integritas ekosistem perdagangan emas.

Kasus-kasus yang melibatkan emas palsu telah mengakibatkan kerugian negara yang diperkirakan mencapai Rp 3,3 triliun antara tahun 2010 dan 2022 (CNNINDONESIA, 2025), yang menyoroti kebutuhan mendesak akan sistem distribusi yang lebih andal dan dapat dilacak. Saat ini, basis data aplikasi CE yang dikelola asing berfungsi sebagai salah satu mekanisme verifikasi utama di Indonesia. Meskipun menyediakan validasi produk dasar, beberapa

keterbatasan struktural masih ada. Sistem ini tidak mendukung pelacakan distribusi ujung ke ujung, bergantung pada otoritas terpusat yang mungkin rentan terhadap manipulasi data. Selain itu, hal ini tidak memungkinkan konsumen untuk mengakses riwayat kepemilikan produk emas secara lengkap (Febriandika dan Mahanani, 2023). Tantangan ini diperparah oleh insiden keamanan siber di Indonesia, termasuk serangan ransomware pada Pusat Data Nasional yang memengaruhi lembaga pemerintah utama (CSIRT, 2024), dalam infrastruktur data terpusat.

Dalam beberapa penelitian yang mengungkap kelemahan sistem terpusat dalam studi kasus. Pertama adalah sistem terpusat memiliki kerentanan single point of failure, di mana gangguan pada satu simpul pusat dapat melumpuhkan seluruh fungsionalitas jaringan. Berdasarkan penelitian Sunny, arsitektur terpusat dinilai rapuh karena kegagalan dapat menyebabkan penghentian layanan secara total, berisiko bagi rantai pasok global (Sunny *et al.*, 2020). Searah penelitian Wu, bahwa desentralisasi diperlukan untuk menghilangkan titik kegagalan tersebut (Wu & Yang, 2025).

Kedua adalah risiko keamanan data yang tinggi, termasuk kebocoran informasi dan serangan siber. Dalam penelitian oleh Afrianto, dijelaskan sistem terpusat sering gagal menjamin integritas data dan privasi pengguna (Afrianto *et al.*, 2025). Sehingga rentan terhadap pencurian identitas dan manipulasi informasi transaksi. Penelitian Guixia juga menyoroti bahwa sistem terpusat sangat rentan terhadap pelanggaran keamanan dan akses tidak sah yang dapat merusak kepercayaan konsumen (Guixia Xiao *et al.*, 2023).

Ketiga adalah masalah asimetri informasi menyebabkan data terfragmentasi dan tidak dapat diakses secara transparan antar aktor. Penelitian Guan berargumen bahwa dalam sistem terpusat, menyimpan data dalam format yang berbeda secara terisolasi, sehingga sulit untuk menjamin keaslian data dalam rantai pasok (Guan, 2021). Kerentanan ini menyebabkan distribusi informasi menjadi tidak normal, sebagaimana dibahas dalam penelitian Gayialis, bahwa permasalahan yang sering kali berujung pada pemalsuan produk dan praktik tidak etis lainnya (Gayialis *et al.*, 2022).

Teknologi blockchain menawarkan alternatif yang kokoh secara struktural untuk mengatasi keterbatasan ini (Khunaifi *et al.*, 2023). Sifat intinya berupa ketahanan terhadap manipulasi, desentralisasi, validasi berbasis konsensus, dan manajemen identitas kriptografi sangat sesuai dengan persyaratan verifikasi komoditas bernilai tinggi (Zhu *et al.*, 2023).

Hyperledger Fabric, kerangka kerja blockchain perusahaan yang diizinkan, sangat cocok untuk konteks ini karena dukungannya terhadap privasi organisasi, logika bisnis berbasis chaincode modular, dan kontrol akses yang terperinci tanpa paparan publik dari jaringan blockchain terbuka (Juliansyah *et al.*, 2024)(Santoso, 2023).

Meskipun jumlah studi tentang sistem rantai pasokan berbasis blockchain semakin meningkat, masih terdapat kekurangan penelitian yang secara khusus membahas kebutuhan arsitektur ekosistem sertifikasi emas domestik Indonesia.

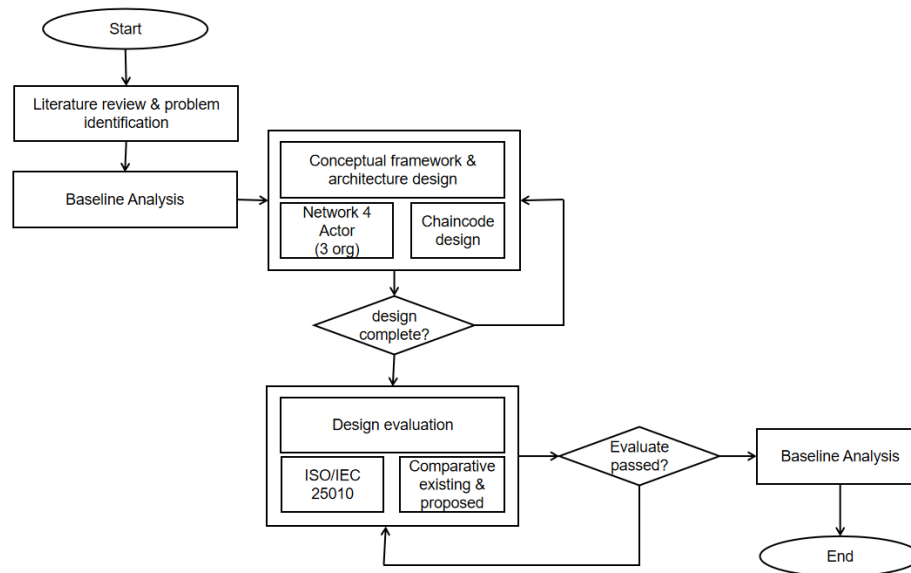
Solusi yang ada cenderung bergantung pada infrastruktur terpusat (Febriandika dan Mahanani, 2023), berfokus terutama pada otentikasi fisik tanpa menangkap aliran distribusi digital (ISMIA, 2022), atau dirancang untuk konteks internasional dengan karakteristik regulasi dan operasional yang berbeda (Choi, 2019).

Untuk mengatasi kesenjangan ini, studi ini memberikan beberapa kontribusi. Pertama, studi ini mengusulkan kerangka kerja konseptual untuk jaringan blockchain berizin empat aktor yang disesuaikan dengan lanskap distribusi emas Indonesia. Kedua, studi ini menyajikan desain

arsitektur terperinci dan mekanisme interaksi antar aktor. Makalah ini disusun: Bagian I untuk pendahuluan, bagian II menyajikan metodologi penelitian, bagian III membahas hasil dan diskusi dan bagian IV menyimpulkan penelitian.

2 METODE

Dalam rekayasa perangkat lunak dan penelitian sistem informasi, praktik umum adalah menilai kerangka arsitektur yang disarankan tanpa menggunakan prototipe lengkap. ISO/IEC 25010 merupakan salah satu model kualitas yang dapat digunakan sebagai standar dalam melakukan pengukuran kualitas perangkat lunak. ISO/IEC 25010 terdiri dari software product quality model dan quality in use model (Mulyawan *et al.*, 2021). Kesesuaian fungsional, efisiensi kinerja, kompatibilitas, keamanan, pemeliharaan, dan keandalan semuanya termasuk dalam model kualitas produk perangkat lunak ISO/IEC 25010, yang banyak digunakan sebagai kerangka kerja terorganisir untuk evaluasi kualitas arsitektur. Tahapan penelitian digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Metodologi

Penelitian ini mengadopsi pendekatan Design Science Research yang terdiri dari lima tahap utama sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Tahap pertama adalah tinjauan literatur dan identifikasi masalah, yang dilakukan melalui telaah sistematis terhadap studi terdahulu mengenai sistem rantai pasokan berbasis blockchain, kelemahan arsitektur terpusat, serta kebutuhan spesifik sertifikasi emas. Tahap kedua adalah analisis baseline, yaitu penilaian terhadap sistem yang ada saat ini, CE, untuk mengidentifikasi kesenjangan fungsional dan struktural yang menjadi dasar justifikasi usulan sistem baru. Hasil analisis baseline ini menjadi masukan langsung bagi tahap perancangan.

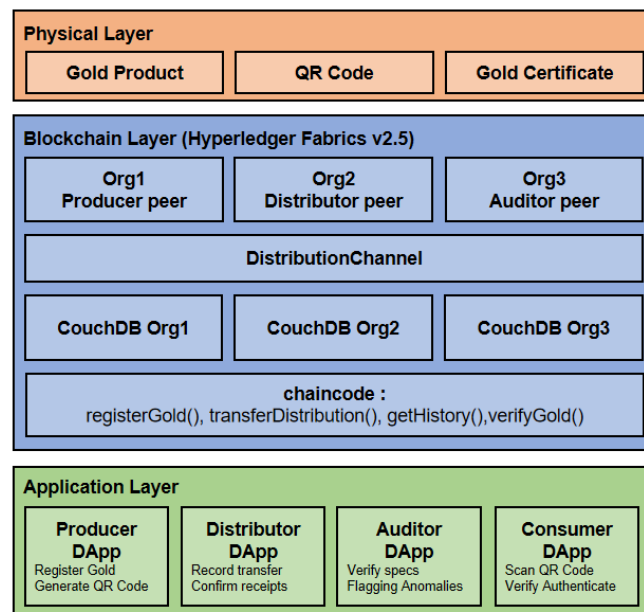
Tahap ketiga adalah perancangan kerangka konseptual dan desain arsitektur, yang mencakup dua komponen utama: (1) desain jaringan empat aktor dengan tiga organisasi, dan (2) desain chaincode yang mendefinisikan logika bisnis sistem. Tahap ini bersifat iteratif, apabila desain belum dinyatakan lengkap berdasarkan tinjauan internal, proses perancangan diulang hingga seluruh elemen arsitektur terpenuhi.

Tahap keempat adalah evaluasi desain, yang dilaksanakan menggunakan dua pendekatan komplementer. Pertama adalah penilaian kualitas arsitektur berdasarkan model kualitas produk perangkat lunak ISO/IEC 25010, yang mencakup karakteristik kesesuaian fungsional, efisiensi kinerja, kompatibilitas, keamanan, pemeliharaan, dan keandalan (Dasaklis *et al.*, 2022). Pendekatan kedua (masih dalam tahap keempat) adalah analisis komparatif antara sistem yang diusulkan dan sistem yang ada saat ini. Apabila hasil evaluasi belum memenuhi kriteria yang ditetapkan, proses dikembalikan ke tahap perancangan untuk penyempurnaan. Tahap kelima adalah finalisasi, yang menandai selesainya seluruh rangkaian proses perancangan dan evaluasi konseptual.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kerangka Konseptual

Sistem yang diusulkan, yang menggantikan arsitektur terpusat dengan jaringan terdistribusi, diposisikan dalam kerangka konseptual sebagai lapisan perantara antara antarmuka verifikasi yang berorientasi konsumen dan produk emas fisik. Interaksi antara aset emas fisik, jaringan blockchain, organisasi aktor, dan lapisan antarmuka verifikasi digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka Konseptual

3.2 Aktor Terlibat

Berdasarkan dokumen yang bernama komitmen rantai pasok emas dan perak yang bertanggung jawab yang dimuat dalam logammulia.id, memaparkan beberapa penjelasan. Secara keseluruhan dibagi menjadi 2 bagian besar yaitu bagian hulu dan hilir, namun pada penelitian ini berfokus pada bagian hilir sebagai pendistribusian ke publik (KOMITMEN, 2024).

Berdasarkan dokumen ini mengidentifikasi empat pemain utama dalam distribusi hilirisasi produk emas, yang masing-masing mewakili pemain organisasi dalam ekosistem distribusi emas Indonesia pada tabel 1.

Tabel 1. Batas atas dan batas bawah faktor Peran dan Tanggung Jawab Aktor dalam Kerangka Kerja yang Diusulkan

Aktor	Aktivitas
Produsen	● Mendaftarkan produk emas. ● Membuat kode QR. ● Memulai rantai distribusi. ● Memelihara catatan produksi
Distributor	● Mencatat peristiwa transfer distribusi. ● Mengkonfirmasi penerimaan pengiriman emas. ● Memperbarui catatan rantai kepemilikan.
Auditor	● Melakukan verifikasi independen terhadap spesifikasi emas. ● Mengirimkan catatan pengesahan. ● Menandai anomali
Konsumer	● Verifikasi keaslian emas melalui pemindaian kode QR. ● Akses riwayat distribusi lengkap dan catatan audit.

Berdasarkan tabel 1, produsen berperan sebagai titik awal rantai distribusi dengan mendaftarkan produk emas, membuat kode QR sebagai identitas digital produk, memulai rantai distribusi, dan memelihara catatan produksi. Distributor bertanggung jawab atas pencatatan setiap peristiwa transfer distribusi, konfirmasi penerimaan pengiriman emas, dan pembaruan catatan rantai kepemilikan secara berkelanjutan untuk menjamin ketertelusuran produk. Auditor menjalankan fungsi verifikasi independen terhadap spesifikasi emas dan laporan distribusi legal, mengirimkan catatan pengesahan ke blockchain. Konsumen sebagai aktor akhir dalam rantai distribusi dapat melakukan verifikasi keaslian emas melalui pemindaian kode QR dan mengakses riwayat distribusi yang legal.

3.3 Evaluasi dengan ISO/IEC 25010

Kerangka kerja yang diusulkan dievaluasi berdasarkan delapan karakteristik kualitas yang berasal dari ISO/IEC 25010 yang sangat relevan dengan sistem rantai pasokan terdistribusi (Mulyawan *et al.*, 2021). Setiap karakteristik diperiksa dan memberikan bukti pendukung tinjauan untuk memperkuat evaluasi pada Tabel 2.

Tabel 2. Penilaian Karakteristik Mutu ISO/IEC 25010

Karakteristik	Hasil Desain Blockchain	Skor (1-3)	Alasan
Functional Suitability	Semua persyaratan fungsional (registrasi, distribusi, verifikasi, audit) ditangani secara eksplisit oleh fungsi chaincode khusus dengan aturan yang telah ditentukan.	3	Seluruh 4 use case terpetakan penuh ke chaincode tanpa celah fungsional
Performance Efficiency	● Konsensus Raft meminimalkan latensi ● CouchDB memungkinkan kueri	2	Klaim throughput bersumber dari benchmark konteks berbeda (ticketing),

	besar tanpa membaca buku besar penuh ● Pemisahan read/write mengurangi biaya untuk kueri verifikasi frekuensi tinggi		belum divalidasi untuk konteks distribusi emas
Security	● Identitas berbasis sertifikat ● Ledger tidak dapat diubah dan hanya dapat ditambahkan; pengikatan hash kriptografi untuk kode QR ● ABAC diberlakukan pada tingkat kode rantai	3	Tiga mekanisme keamanan berlapis (X.509, append-only, ABAC) terdokumentasi secara ilmiah
Reliability	● Konsensus Raft mentolerir kesalahan crash ● Replikasi buku besar terdistribusi di 3 organisasi menghilangkan titik kegagalan tunggal ● Tidak ada ketergantungan pada server pusat	2	Toleransi kegagalan Raft terbukti secara teoritis, namun belum divalidasi pada konfigurasi jaringan spesifik penelitian ini
Maintainability	● Manajemen lifecycle Hyperledger Fabric v2.x memungkinkan peningkatan chaincode tanpa gangguan jaringan ● Arsitektur chaincode modular mendukung pembaruan fungsi secara independen	3	Chaincode lifecycle upgrade terdokumentasi resmi oleh Hyperledger Fabric v2.x tanpa ambiguitas
Portability	● Penyebaran berbasis Docker mendukung portabilitas lintas environment ● Namun, Hyperledger Fabric membutuhkan infrastruktur berbasis Linux, sehingga membatasi penyebaran hanya pada environment yang kompatibel	2	Docker mendukung portabilitas, namun ketergantungan Linux menjadi batasan nyata yang terdokumentasi
Interoperability	● Gateway API RESTful memungkinkan integrasi dengan sistem ERP/SCM yang sudah ada	2	API RESTful memungkinkan integrasi, namun belum ada bukti integrasi aktual dengan sistem ERP/SCM spesifik
Usability	● Antarmuka DApp yang dibedakan berdasarkan peran, dirancang untuk alur kerja spesifik setiap aktor ● Antarmuka konsumen	2	Prinsip role-based UI terdefinisi dalam desain, namun belum diuji dengan pengguna nyata

disederhanakan menjadi pemindaian
QR + hasil verifikasi

Indikator penilaiannya: Skor 3 = klaim didukung bukti langsung dan terdokumentasi secara resmi/ilmiah. Skor 2 = klaim masuk akal secara teoritis tetapi belum divalidasi dalam konteks penelitian ini. Skor 1 = tidak ada justifikasi yang mendukung (tidak ada yang masuk kategori ini). Akumulasi skor adalah 19 dari 8 aspek dinilai menghasilkan rata-rata skor 2,37.

Kesesuaian fungsional, keamanan, dan kemudahan pemeliharaan memperoleh skor tertinggi (3) karena seluruh empat persyaratan fungsional terpetakan penuh ke dalam fungsi chaincode tanpa celah fungsional, ledger append-only, dan ABAC membentuk lapisan keamanan berlapis yang (Benhamouda *et al.*, 2019). Serta mekanisme chaincode Hyperledger Fabric v2.x pembaruan logika bisnis. Sementara efisiensi kinerja memperoleh skor 2 karena data throughput ~3.500 TPS bersumber dari konteks berbeda (Juliansyah *et al.*, 2024) dan belum divalidasi untuk distribusi emas, keandalan memperoleh skor 2 karena toleransi kegagalan protokol Raft (Ongaro & Ousterhout, 2014) baru terbukti secara teoritis. Portabilitas memperoleh skor 2 akibat ketergantungan pada infrastruktur berbasis Linux, interoperabilitas memperoleh skor 2 karena integrasi dengan sistem ERP/SCM belum dibuktikan secara aktual, dan kemudahan penggunaan memperoleh skor 2 karena prinsip role-based UI belum diuji dengan pengguna nyata

4 KESIMPULAN

Makalah ini menyajikan kerangka kerja konseptual untuk sistem distribusi dan verifikasi berbasis blockchain untuk sertifikat emas domestik di Indonesia, yang dibangun di atas Hyperledger Fabric. Kerangka kerja yang diusulkan mendefinisikan arsitektur jaringan berizin empat aktor dengan kontrol akses berbasis peran. Desain tersebut dievaluasi melalui evaluasi terstruktur dari penilaian kualitas ISO/IEC 25010 sistem yang ada. Hasilnya menegaskan bahwa kerangka kerja yang diusulkan memenuhi skor diatas rata-rata delapan karakteristik mutu (skor 2,37 dari skor 3) dan secara teoritis mampu memenuhi kinerja operasional berdasarkan data benchmark Hyperledger Fabric yang dipublikasikan. Untuk pekerjaan kedepannya akan dikembangkan prototipe dengan hyperledger fabrics.

DAFTAR PUSTAKA

- BAPPEBTI. (2024). *Utamakan Keamanan Transaksi, Bappebti Pastikan Wujud Fisik Emas dalam Perdagangan Emas Fisik secara Digital*. https://bappebti.go.id/siaran_pers/detail/15687.
- Benhamouda, F., Halevi, S., & Halevi, T. (2019). Supporting private data on Hyperledger Fabric with secure multiparty computation. *IBM Journal of Research and Development*, 63(2/3), 3:1-3:8. <https://doi.org/10.1147/JRD.2019.2913621>.
- Choi, T.-M. (2019). Blockchain-technology-supported platforms for diamond authentication and certification in luxury supply chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 128, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.05.011>.
- CNNINDONESIA. (2025). *INFOGRAFIS: Kasus Emas Antam Ilegal Rugikan Negara Rp3,3 T*. <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20250307061947-15-1205959/infografis-kasus-emas-antam-ilegal-rugikan-negara-rp33-t>

- CSIRT. (2024). *Pemerintahan Sektor Paling Rentan Insiden Siber*. Databoks. <https://databoks.katadata.co.id/infografik/2024/07/02/pemerintahan-sektor-paling-rentan-insiden-siber>.
- Dasaklis, T. K., Voutsinas, T. G., Tsoulfas, G. T., & Casino, F. (2022). A Systematic Literature Review of Blockchain-Enabled Supply Chain Traceability Implementations. *Sustainability*, 14(4), 2439. <https://doi.org/10.3390/su14042439>.
- Febriandika, N. R., Mahanani, T. V. (2023). A Review of Sharia Economic Law on Gold Investment in the Gold Savings Feature in the Dana Application. *JIEI*, vol. 9, no. 1, pp. 1129–1138.
- Guan, P. (2021). Supply Chain Optimization of Agricultural Products in The Internet Environment with Blockchain. *Informatica*, 45(6). <https://doi.org/10.31449/inf.v45i6.3729>.
- Guixia Xiao, Normalia Samian, Muhammad Faiz Mohd Faizal, Muhammad Alif Zakwan Mohd As'ad, Muhammad Firdaus Mohamad Fadzil, Azizol Abdullah, Winston Khoo Guah Seah, Mastura Ishak, & Irman Hermadi. (2023). A Framework for Blockchain and Internet of Things Integration in Improving Food Security in the Food Supply Chain. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 34(1), 24–37. <https://doi.org/10.37934/araset.34.1.2437>.
- ISMIA. (2022). *Analisa sertifikasi emas pada sektor pertambangan emas skala kecil*. <https://goldismia.org/publication/analisa-sertifikasi-emas-pada-sektor-pertambangan-emas-skala-kecil>.
- Juliansyah, M. R., Khunaifi, A., Syariati, A. R., Prasetyo, A. P., Rafianti, D. S., Wijanarto, F., Ramadhan, I., Handoyo, K. M., Santoso, T. M., Harmanda, T. T., & Sahreza, Y. (2024). A Performance Analysis of Hyperledger Fabric for Blockchain-Based Concert Ticketing Systems. *2024 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, 147–151. <https://doi.org/10.1109/ICECOS63900.2024.10791096>
- Khunaifi, A., Wijananto, F., Handoyo, K. M., Juliansyah, M. R., Imdad, M. T., Wibowo, M., Santoso, T. M., Harmanda, T. T., Sahreza, Y., & Arief, M. (2023). The Utilization of Blockchain Technology in The Airport Industry: A Review. *International Conference on Information Science and Technology Innovation (ICoSTEC)*, 2(1), 145–151. <https://doi.org/10.35842/icostec.v2i1.53>
- KOMITMEN. (2024). *Komitmen Rantai Pasok Emas dan Perak yang bertanggung Jawab*.
- Mulyawan, M. D., Kumara, I. N. S., Swamardika, I. B. A., & Saputra, K. O. (2021). Kualitas Sistem Informasi Berdasarkan ISO/IEC 25010: Literature Review. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 20(1), 15. <https://doi.org/10.24843/MITE.2021.v20i01.P02>
- Ongaro, D., & Ousterhout, J. (2014). In Search of an Understandable Consensus Algorithm. *USENIX Annual Technical Conference (ATC)*, 305–319.
- Santoso, T. M. (2023). A FRAMEWORK FOR BLOCKCHAIN BASED EFFICIENT SUBSIDY DISTRIBUTION IN INDONESIA'S ELECTRIC VEHICLE SECTOR. *The Third International Conference on Innovations in Social Sciences Education and Engineering (ICoISSEE-3)* . vol 3
- Santoso, T. M. (2023). Design Optimization for Subsidy Distribution of Electric Motorcycles with Blockchain: A Case Study in Indonesia. *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427741>.

- Sunny, J., Undralla, N., & Madhusudanan Pillai, V. (2020). Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106895. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106895>.
- Wu, L., & Yang, Y. (2025). A Blockchain-Based Framework for Secure and Transparent Supply Chain Management with Quality Assurance Using AES Encryption and Ethereum Smart Contracts. *Informatica*, 49(22). <https://doi.org/10.31449/inf.v49i22.8375>.
- Zhu, P., Hu, J., Li, X., & Zhu, Q. (2023). Using Blockchain Technology to Enhance the Traceability of Original Achievements. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(5), 1693–1707. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3066090>.