JURNAL ILMU KOMPUTER
Volume 4 Nomor 2, Juli, 2026
ISSN: 3031-125X (ONLINE)
Penerbit: Program Studi Teknik Informatika S-2 Universitas Pamulang

Pemanfaatan Blockchain untuk Mencatat Potensi Carbon Credit Berdasarkan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

*Hanif Ramadhan [1], Arya Adhyaksa Waskita [2], Winarni [3]

[1,2,3)] Teknik Informatika S-2, Program Pascasarjana, Universitas Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten

Email: [1]h4nif.ramadhan@gmail.com, [2]aawaskita@gmail.com, [3]wina005@brin.go.id

ABSTRACT

Global climate change driven by greenhouse gas emissions highlights the need for transparent, secure, and auditable renewable energy verification systems, particularly for converting clean energy into carbon credits. Solar power plants (PLTS) offer significant potential for emission reduction, yet conventional verification mechanisms remain constrained by slow processes, high costs, and vulnerability to data manipulation and double counting. This study proposes integrating a PLTS monitoring system with private blockchain technology and smart contracts to automate real-time energy-production verification. The proposed system, EnergyCreditUnit (ECU), records daily production data from logger devices as blockchain blocks secured by SHA-256 hashing and validates them through smart contracts on a Node.js runtime with RocksDB state storage. Using a 91-day dataset from PT XYZ (October-December 2020), the system achieved an average transaction latency of 122.32 ms, a throughput of 8.18 TPS, 100% hash consistency, 185.67 ms multi-peer block propagation, and a 100% voucher-transaction success rate. Three attack scenarios (block tampering, chain manipulation, and forged ECDSA signatures) were all detected. The results show that a private blockchain can serve as a viable, tamper-evident infrastructure for recording carbon-credit potential from solar energy production.

Keywords: Blockchain; Solar Power Plant; Carbon Credit; Energy Verification; Smart Contract

ABSTRAK

Perubahan iklim global akibat emisi gas rumah kaca mendorong kebutuhan akan sistem verifikasi energi terbarukan yang transparan, aman, dan dapat diaudit, khususnya dalam konteks konversi energi bersih menjadi carbon credit. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki potensi besar dalam pengurangan emisi, namun sistem verifikasi konvensional masih menghadapi kendala berupa proses yang lambat, biaya tinggi, serta risiko manipulasi dan duplikasi klaim. Penelitian ini mengusulkan integrasi sistem monitoring PLTS dengan teknologi *blockchain* privat dan *smart contract* untuk mengotomatisasi proses verifikasi produksi energi secara real-time. Sistem yang diusulkan, EnergyCreditUnit (ECU), mencatat data produksi energi harian dari perangkat logger sebagai blok *blockchain* yang diamankan dengan *hashing* SHA-256, dan memvalidasinya melalui *smart contract* pada *runtime* Node.js dengan penyimpanan state RocksDB. Dengan dataset produksi 91 hari milik PT XYZ (Oktober-Desember 2020), sistem mencapai latensi transaksi rata-rata 122,32 ms, *throughput* 8,18 TPS, konsistensi *hash* 100% pada blok yang diaudit, propagasi blok *multi-peer* 185,67 ms, serta tingkat keberhasilan transaksi *voucher* 100%. Tiga skenario serangan (manipulasi blok, manipulasi rantai, dan pemalsuan tanda tangan ECDSA) seluruhnya berhasil dideteksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *blockchain* privat dapat menjadi infrastruktur yang *viable* dan *tamper-evident* untuk mencatat potensi carbon credit dari produksi energi surya serta mendukung partisipasi Indonesia dalam pasar karbon berbasis blockchain.

Kata kunci: blockchain; PLTS; carbon credit; verifikasi energi; smart contract

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan dekarbonisasi yang cepat tidak dapat disangkal. Sejak era pra-industri, suhu rata-rata global telah meningkat sekitar 1,1 derajat Celsius, terutama akibat emisi karbon dioksida dari pembakaran bahan bakar fosil yang menyumbang sekitar 73 persen emisi gas rumah kaca global. Dampaknya bersifat sistemik, dan Asia Tenggara termasuk Indonesia tergolong paling rentan terhadap kenaikan permukaan laut. Kondisi ini menegaskan urgensi strategi mitigasi emisi yang juga didukung instrumen ekonomi yang efektif.

Salah satu pendekatan mitigasi adalah mekanisme carbon offset seperti carbon credit yang mengubah pengurangan emisi menjadi aset yang dapat diperdagangkan, dan banyak dikaitkan dengan proyek energi terbarukan termasuk tenaga surya. Di tingkat nasional, Pemerintah Indonesia mengembangkan Skema Sertifikasi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia (SPEI) sebagai bagian dari Nilai Ekonomi Karbon untuk memastikan pengurangan emisi dapat diukur, dilaporkan, diverifikasi, dan dicatat melalui Sistem Registri Nasional.

Namun, mekanisme verifikasi yang masih bergantung pada proses manual dan berbasis dokumen memiliki keterbatasan dalam menjamin transparansi menyeluruh. Keterbatasan akses terhadap data primer dan metodologi penghitungan menghambat penilaian kualitas klaim pengurangan emisi secara independen [1], sehingga membuka peluang greenwashing dan manipulasi data pada pasar karbon sukarela (*voluntary carbon market*) [2].

Celah ini mendorong pengembangan pendekatan berbasis teknologi yang meningkatkan transparansi, auditabilitas, dan keandalan verifikasi secara *end-to-end*. *Blockchain* menawarkan infrastruktur *ledger* terdistribusi dengan validasi konsensus yang mengurangi ketergantungan pada otoritas terpusat dan mencegah manipulasi data. Karakteristik *immutability* dan kemampuan pelacakan *end-to-end* menjadikannya relevan untuk integritas data pada sistem *Monitoring, Reporting, and Verification* (MRV) [3], [4].

Pada PLTS, protokol RS485 lazim menghubungkan inverter dengan sistem monitoring sehingga data produksi energi dapat diakuisisi *real-time* dengan biaya rendah, namun memerlukan pencatatan yang aman dan tahan manipulasi. Penelitian ini mengembangkan sistem *blockchain* privat, EnergyCreditUnit (ECU), yang mencatat

dan memverifikasi produksi energi bersih serta menerbitkan *token* digital atas setiap satuan energi terverifikasi untuk ditukar dengan *voucher* digital melalui smart contract. Berbeda dari studi terdahulu yang umumnya berfokus pada akuntansi emisi [4] atau perdagangan energi [3] dan kerap bergantung pada platform *blockchain* publik, kebaruan penelitian ini terletak pada protokol *blockchain* privat mandiri berbasis Node.js dan SHA-256 yang menyatukan verifikasi produksi energi PLTS sekaligus penerbitan insentif tokenisasi dalam satu rantai data yang terauditabel secara end-to-end.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis kebutuhan teknis integrasi PLTS dengan *blockchain* privat; (2) mengembangkan algoritma perhitungan *token* berbasis data *real-time* produksi energi; (3) merancang *smart contract* untuk tokenisasi energi bersih pada pasar karbon sukarela; dan (4) mengevaluasi performa dan keamanan sistem, termasuk perbandingannya terhadap *baseline* Proof-of-Authority (PoA).

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan Design Science Research (DSR) yang berfokus pada perancangan, pembangunan, dan evaluasi artefak *blockchain* privat. Sistem dikembangkan pada *runtime* Node.js dengan *hashing* SHA-256 melalui modul crypto bawaan Node.js untuk menjamin integritas dan konsistensi *hash* antarnode, serta dirancang independen dari platform *blockchain* publik.

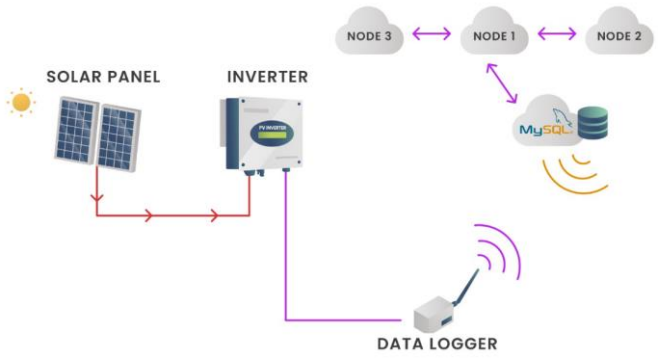
2.1. Data dan Sumber Data

Data berupa produksi energi harian PLTS PT XYZ periode Oktober-Desember 2020 yang tersimpan pada basis data MySQL Cloud, bersumber dari sistem logger inverter. Sampel diambil secara *purposive sampling*, lalu di-query dan diekspor dalam format JSON beserta metadata logger sebagai referensi waktu dan identitas unit.

2.2. Arsitektur Sistem

Sistem dirancang untuk mengintegrasikan data produksi energi PLTS dari logger, lalu memprosesnya pada jaringan *blockchain* privat. ECU dibangun sebagai *blockchain* privat *multi-chain* dengan penyimpanan *state* RocksDB dan *hashing* SHA-256 [5], terdiri atas *main chain* (data produksi harian), *coin chain* (penerbitan *token* ECU), dan *transaction chain* (penukaran *voucher*). Ketiga rantai berjalan pada topologi *peer-to-peer* dengan sinkronisasi replaceChain mengikuti *longest-chain rule*, dan komunikasi

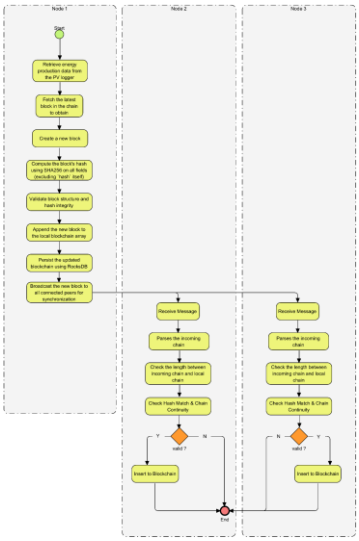
antarnode melalui WebSocket dengan *discovery* otomatis. Arsitektur sistem yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Sistem EnergyCreditUnit

Sumber: Olahan peneliti, 2026

Secara garis besar, alur sistem mencakup pengambilan data logger, pembentukan blok, validasi melalui *smart contract*, penyimpanan pada RocksDB, sinkronisasi antarnode *peer-to-peer*, dan transfer kepemilikan blok. Blok yang terverifikasi dapat dipindahtangankan, misalnya saat pengguna menukar *token* hasil produksi terverifikasi dengan *voucher* digital melalui *smart contract*, yang dicatat sebagai transfer kepemilikan dari *wallet* pengguna ke *wallet* sistem reward. Alur utama pembentukan dan sinkronisasi blok ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alur Main Blockchain

Sumber: Olahan peneliti, 2026

2.3. Teknik Analisis

Evaluasi sistem mencakup validasi keutuhan *blockchain* (kesesuaian *hash* SHA-256 dan kesinambungan rantai antarnode), konsistensi data logger terhadap sumber MySQL Cloud, kinerja sinkronisasi (propagasi blok dan konsistensi *hash* antarnode), keamanan (simulasi manipulasi data dan transaksi tidak sah), serta pengujian transaksi *voucher* dari penerbitan hingga konsumsi.

Sebagai pembanding, sistem diuji terhadap algoritma Proof-of-Authority (PoA) yang dikenal memiliki finalitas cepat dan overhead komunikasi rendah [6], namun cenderung mengutamakan *availability* dibandingkan konsistensi kuat menurut analisis CAP theorem [6]. PoA diemulasikan melalui Ganache, dengan parameter pembanding meliputi waktu pembentukan blok, latensi transaksi, kecepatan sinkronisasi, dan konsistensi *hash* [7], [8].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengembangan dan evaluasi empiris sistem ECU pada data produksi PLTS PT XYZ.

3.1. Karakteristik Dataset Produksi Energi PLTS

Dataset berjumlah 91 baris data harian (inverter serial 33400) dengan atribut TotalYield, DayYield (kWh), dan metadata temporal yang menjadi basis pembentukan blok. Total produksi tiga bulan tercatat 2.848,7 kWh dengan rata-rata harian 31,30 kWh dan variasi 2,9-55,5 kWh.

Total produksi tiga bulan 2.848,7 kWh dengan rata-rata harian 31,30 kWh. Variasi harian yang lebar (2,9-55,5 kWh) menjadi *stress-test* alami karena setiap nilai produksi menghasilkan payload blok unik dengan komputasi *hash* independen.

3.2. Arsitektur dan Implementasi Smart Contract

Smart contract ECU diimplementasikan sebagai modul JavaScript pada yang dieksekusi pada mesin virtual JavaScript, mengikuti pola *token* standar Ethereum, yaitu EIP-20 untuk *fungible token* [9] dan EIP-721 untuk non-fungible *token* [10]. Sistem terdiri atas tiga modul utama, yaitu coinBridge (penerbitan *token* ECU dan pencegahan *double-spending* melalui state.spent[owner]), ownership (pencatatan klaim *voucher* beserta metadata dan pencegahan klaim ulang voucher_id), dan injectVault (pengelolaan saldo insentif administratif secara terpisah dari saldo utama).

Mekanisme pencegahan pencatatan ganda (*double-counting*) diterapkan pada dua lapis. Pada lapis contract-level, fungsi deduct pada coinBridge memvalidasi bahwa setiap coin *hash* tidak pernah dipakai sebelumnya dengan mencocokkan array state.spent[owner] terhadap daftar *hash* yang diajukan dalam satu transaksi. Pada lapis ownership-level, fungsi claim pada ownership menolak transaksi apabila voucher_id yang diajukan sudah pernah tercatat pada state.claims, sehingga satu *voucher* tidak dapat di-redeem lebih dari satu kali.

3.3. Hasil Pengukuran Performa Sistem ECU

Pengukuran performa menjalankan *benchmark* atas 91 transaksi unik, 15 percobaan klaim *voucher*, dan 20 blok pemeriksaan *hash*, dengan hasil ringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Performa Sistem EnergyCreditUnit

Parameter	Hasil Pengukuran	Keterangan
Latensi Transaksi Rata-rata	122,32 ms	Std Dev 115,90 ms; median 89,00 ms; 91 trial
Throughput	8,1754 TPS	Successfully committed transactions per second
Block Creation Time Rata-rata	3078,58 ms	Event-driven, bukan cron interval
Konsistensi Hash	100,00%	20 dari 20 blok konsisten
Propagasi Blok Multi-peer	185,67 ms	15 trial; mode multi-peer
Keberhasilan Transaksi Voucher	100,00%	15 dari 15 trial; konfirmasi rata-rata 88,60 ms

Tabel 1 menunjukkan latensi transaksi rata-rata 122,32 ms dan *throughput* 8,1754 TPS, sebanding dengan *blockchain* privat berbasis Ethereum pada skala *node* terbatas [7], [8]; definisi *throughput* mengikuti Hyperledger Caliper [11]. Konsistensi *hash* 100% pada 20 blok sejalan dengan sifat determinisme SHA-256, yang versi penuh 64 langkahnya hingga kini belum memiliki serangan kolisi praktis [12]. Distribusi latensi terkonsentrasi pada nilai rendah (median 89,00 ms, P95 379 ms; standar deviasi 115,90 ms), dengan sebaran yang lebih lebar akibat proses verifikasi tanda tangan ECDSA per transaksi dan penulisan state durable ke RocksDB.

Kinerja sinkronisasi antarnode dievaluasi melalui mode *multi-peer* dengan *submit* transaksi pada *node* utama dan pengukuran hingga blok terbaca konsisten pada dua *peer*. Rata-rata propagasi blok 185,67 ms (maksimum 334 ms) menunjukkan determinisme mekanisme *broadcast-and-validate*: setiap *peer* melakukan rekomputasi

hash dan validasi rantai sebelum menerima blok, sehingga konsistensi *state* terjaga tanpa bergantung pada trust antar *peer*.

3.4. Hasil Pengujian Skalabilitas *Multi-Node*

Pengujian skalabilitas dilakukan untuk mengukur perilaku sistem pada konfigurasi 3, 4, 5, dan 6 node aktif. Definisi scalability mengikuti kemampuan sistem untuk mendukung peningkatan jumlah peserta jaringan yang diindikasikan oleh perilaku *throughput* dan latensi [7]. Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Skalabilitas Multi-Node (Konfigurasi 3 Node Aktif)

Metrik Pengujian	**3 Node**	**4 Node**	**5 Node**	**6 Node**
Latensi Rata-rata (ms)	122,32	145,70	122,13	83,47
P95 Latensi (ms)	379	433	380	145
Throughput (TPS)	8,1754	6,8633	8,1879	11,9800
Block Creation Time (ms)	3078,58	3560,73	6778,35	4150,37
Propagasi Blok Multi-peer (ms)	185,67	288,73	249,00	204,87
Konfirmasi Voucher (ms)	88,60	221,33	119,73	93,00
Konsistensi Hash (%)	100,00	100,00	100,00	100,00
Success Rate Voucher (%)	100,00	100,00	100,00	100,00
Konsistensi Chain	100%	100%	100%	100%

Seluruh konfigurasi 3, 4, 5, dan 6 node tersinkron dengan *chain height* dan *hash* terminal yang identik, dengan konsistensi *chain* 100% tanpa *divergence*. Perbaikan *leader-election* dan validasi urutan transaksi pada *mempool* menghilangkan *race condition* yang ditemukan pada pengujian iterasi sebelumnya. Latensi dan *throughput* tidak memburuk secara monoton terhadap penambahan node; konfigurasi enam node justru mencatat performa temporal terbaik (latensi 83,47 ms; *throughput* 11,98 TPS), menandakan beban verifikasi dan I/O lebih dominan daripada *overhead* koordinasi antar-peer pada rentang skala yang diuji.

3.5. Hasil Evaluasi Keamanan Sistem

Evaluasi keamanan dilakukan melalui tiga skenario simulasi serangan yang mewakili kelas ancaman umum pada sistem *blockchain*: manipulasi data blok, manipulasi keseluruhan rantai, dan pemalsuan tanda tangan transaksi. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Evaluasi Keamanan Sistem

Skenario	Deskripsi Serangan	Mekanisme Deteksi	Hasil
S1	Manipulasi field totalKwh pada blok tanpa memperbarui hash	Perbandingan hash SHA-256 hasil komputasi ulang terhadap hash tersimpan dan pemeriksaan prevHash	DETECTED
S2	Pengujian keseluruhan rantai yang telah dimanipulasi melalui isValidChain()	Verifikasi genesis block dan rekomputasi hash setiap blok dalam rantai	DETECTED
S3	Transaksi plant_claim dengan tanda tangan ECDSA palsu	Verifikasi signature ECDSA secp256k1 melalui verifySignature() sesuai FIPS 186-5	DETECTED

Ketiga skenario berhasil dideteksi. Pengubahan field totalKwh (S1) memutus kesesuaian *hash* dan chain continuity sesuai sifat one-way *hash* function SHA-256 yang tahan kolisi [12]; isValidChain() (S2) menolak rantai termanipulasi pada titik pertama *hash* mismatch; dan verifySignature() (S3) menolak tanda tangan palsu mengikuti skema ECDSA secp256k1 FIPS 186-5 [13].

3.6. Perbandingan dengan Ganache (Baseline PoA)

Sebagai *baseline* pembanding, *benchmark* dijalankan pada jaringan Ganache yang mengemulasi karakteristik konsensus PoA dengan finalitas instan dan produksi blok yang ditentukan oleh satu *node* berotoritas.

Dibandingkan *baseline* Ganache (PoA), sistem ECU memiliki overhead waktu yang lebih besar pada hampir seluruh metrik temporal (latensi +1.129,3%, propagasi +1.951,6%, konfirmasi voucher +1.065,8%) dan *throughput* lebih rendah (-91,9%), namun mencapai skor identik pada metrik integritas (konsistensi hash 100%) dan keandalan fungsional (success rate voucher 100%).

3.7. Pembahasan

Konsistensi *hash* 100% pada 20 blok dan keberhasilan deteksi ketiga serangan menunjukkan sistem ECU memenuhi properti integritas yang kuat sebagai prasyarat

pencatatan carbon credit. Properti ini ditopang oleh *hash* SHA-256 yang *tamper-evident* [12], *chain-of-hashes* yang memperkuat *immutability* [8], dan verifikasi ECDSA secp256k1 yang menjamin *non-repudiation* [13]. Pendekatan kriptografis ini menggeser basis kepercayaan dari auditor ke properti matematis, relevan dengan temuan bahwa verifikasi konvensional pada proyek kredit karbon kerap gagal memastikan pengurangan emisi yang benar-benar riil [1].

Double-counting merupakan akar masalah kegagalan pasar karbon sukarela (*voluntary carbon market*) yang memicu tuduhan greenwashing pada beberapa registry [2]. Pada ECU, mekanisme anti *double-counting* berlapis berjalan konsisten (15 percobaan, keberhasilan 100%): pengecekan state.spent[owner] menjamin keunikan koin *hash* per *wallet*, dan state.claims[voucher_id] mencegah satu *voucher* di-redeem dua kali. Keduanya berjalan pada level protokol sehingga perubahan *state* ter-klaim akan terdeteksi oleh validasi *hash*, sejalan dengan gagasan *retirement on-chain* untuk transparansi pasar [14].

Selisih *throughput* terhadap Ganache (-91,9%) berasal dari tiga pilihan desain: ECU menjalankan *broadcast-and-validate ke beberapa peer* (bukan RPC tunggal), menulis *state durable* ke RocksDB (bukan *in-memory*), dan melakukan re-execution *hash* pada setiap blok yang diterima (bukan finalitas instan). Ketiganya merupakan konsekuensi untuk memperoleh redundansi data, *durability*, dan auditabilitas penuh. Dalam verifikasi carbon credit yang mengutamakan integritas daripada performa maksimal, pilihan ini sejalan dengan analisis CAP *theorem* pada *permissioned blockchain* [6].

Hasil penelitian ini menjawab celah sistem MRV tradisional yang bergantung pada proses manual. ECU menggantikan verifikasi manusia dengan verifikasi kriptografis (SHA-256 dan ECDSA) dan logika bisnis *smart contract* dalam orde milidetik per transaksi. Pada konteks PT XYZ (setara 2,42 tCO2e dalam tiga bulan), kontribusi lingkungan tercatat granular dan akumulatif. Tanpa biaya gas seperti Ethereum publik [15], biaya operasional hanya komputasi dan penyimpanan, menurunkan hambatan partisipasi pengembang PLTS kecil-menengah, sementara adopsi EIP-20 [9] membuka interoperabilitas ke pasar karbon publik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi *blockchain* privat mampu menjadi infrastruktur yang *viable* untuk pencatatan potensi *carbon credit* berbasis produksi

PLTS. Integrasi sistem monitoring PLTS dengan jaringan *blockchain* privat berhasil dirancang melalui skema *multi-chain* yang terdiri atas *main chain* untuk pencatatan data produksi energi, *coin chain* untuk penerbitan *token* ECU, dan *transaction chain* untuk penukaran voucher. Arsitektur ini mengambil data logger dari MySQL Cloud PT XYZ, memprosesnya melalui *smart contract*, dan menyimpannya pada RocksDB dengan mekanisme *hashing* SHA-256. Pengujian pada dataset Oktober-Desember 2020 menunjukkan 91 baris data harian berhasil diproses tanpa kegagalan, menghasilkan total produksi terverifikasi 2.848,7 kWh yang seluruhnya dapat diaudit secara kriptografis.

Algoritma perhitungan *token* insentif diimplementasikan dengan rasio linier 1 ECU setara 100 kWh, menghasilkan potensi penerbitan 28,49 ECU dari dataset PT XYZ, setara dengan potensi pengurangan emisi 2,42 tCO2e pada faktor emisi grid Jawa-Madura-Bali. *Smart contract* dirancang dalam tiga modul komplementer (coinBridge, ownership, dan injectVault) dengan mekanisme anti *double-counting* berlapis melalui pengecekan state.spent[owner] dan state.claims[voucher_id]. Tingkat keberhasilan transaksi *voucher* mencapai 100% pada 15 trial dengan waktu konfirmasi rata-rata 88,60 ms.

Evaluasi performa menghasilkan latensi transaksi rata-rata 122,32 ms (P95 379 ms), *throughput* 8,1754 TPS, konsistensi *hash* 100% pada 20 blok yang diperiksa, dan propagasi blok multi-peer rata-rata 185,67 ms. Pada pengujian skalabilitas 3, 4, 5, dan 6 node aktif, sistem mempertahankan konsistensi chain 100% tanpa divergence, dengan konfigurasi enam node mencatat performa temporal terbaik (latensi 83,47 ms; throughput 11,98 TPS). Tiga skenario serangan, yaitu manipulasi data blok, manipulasi keseluruhan rantai, dan transaksi dengan tanda tangan ECDSA palsu, seluruhnya berhasil dideteksi oleh mekanisme verifikasi kriptografis sistem. Perbandingan dengan Ganache sebagai *baseline* Proof-of-Authority mengindikasikan bahwa ECU memiliki overhead waktu yang lebih besar dan *throughput lebih rendah (-91,9%)*, namun mencapai skor identik pada metrik integritas dan keandalan fungsional. Selisih performa temporal ini timbul dari pendekatan P2P multi-node dengan re-execution validation yang memprioritaskan determinisme *state* dan auditabilitas penuh dibandingkan finalitas instan, dan dinilai lebih sesuai untuk sistem verifikasi carbon credit yang kritis terhadap integritas data. Pengembangan selanjutnya disarankan mencakup integrasi langsung dengan inverter via RS485/Modbus, pengujian pada skala *node* yang lebih

besar, serta pengembangan mekanisme konsensus berbasis kontribusi kolaboratif (Proof-of-Collaborative-Contribution) [16].

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] B. S. Probst *et al.*, "Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects," *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, p. 9562, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-53645-z.

[2] N. Sasaki, "Addressing scandals and greenwashing in carbon offset markets: A framework for reform," Jan. 01, 2025, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.glt.2025.06.003.

[3] A. Boumaiza, "A blockchain-centric P2P trading framework incorporating carbon and energy trades," *Energy Strategy Reviews*, vol. 54, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101466.

[4] Y. He, S. Wang, Z. Zhou, K. Xiao, A. Xie, and B. Wu, "A Blockchain-based carbon emission security accounting scheme," *Computer Networks*, vol. 243, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.comnet.2024.110304.

[5] N. A. Alghanmi, N. A. Alghanmi, S. A. Alghanmi, M. Zhao, and F. K. Hussain, "Data-driven approach for selection of on-chain vs off-chain carbon credits data storage methods," *Knowl. Based. Syst.*, vol. 310, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.knosys.2024.112871.

[6] S. De Angelis, F. Lombardi, G. Zanfino, L. Aniello, and V. Sassone, "Security and dependability analysis of blockchain systems in partially synchronous networks with Byzantine faults," *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, Oct. 2023, doi: 10.1080/17445760.2023.2272777.

[7] C. Fan, C. Lin, H. Khazaei, and P. Musilek, "Performance Analysis of Hyperledger Besu in Private Blockchain," in *2022 IEEE International Conference on Decentralized Applications and Infrastructures (DAPPS)*, 2022, pp. 64–73. doi: 10.1109/DAPPS55202.2022.00016.

[8] F. C. Geyer, H.-A. Jacobsen, R. Mayer, and P. Mandl, "An End-to-End Performance Comparison of Seven Permissioned Blockchain Systems," in *Proceedings of the 24th International Middleware Conference (Middleware '23)*, 2023. doi: 10.1145/3590140.3629106.

[9] F. Vogelsteller and V. Buterin, "EIP-20: Token Standard," Ethereum Improvement Proposals.

[10] W. Entriken, D. Shirley, J. Evans, and N. Sachs, "EIP-721: Non-Fungible Token Standard," Ethereum Improvement Proposals.

[11] H. Foundation, "Hyperledger Caliper: Blockchain Performance Benchmark Framework," 2025. [Online]. Available: https://hyperledger.github.io/caliper/

[12] Y. Li, F. Liu, and G. Wang, "New Records in Collision Attacks on SHA-2," in *Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2024*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 158–186. doi: 10.1007/978-3-031-58716-0_6.

[13] National Institute of Standards and Technology, "Digital Signature Standard (DSS)," Feb. 2023. doi: 10.6028/NIST.FIPS.186-5.

[14] A. Ballesteros-Rodríguez, J. De-Lucio, and M. Á. Sicilia, "Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: the case of KlimaDAO," *Frontiers in Blockchain*, vol. 7, 2024, doi: 10.3389/fbloc.2024.1474540.

[15] G. Wood, "Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger," 2025. [Online]. Available: https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf

[16] D. P. Oyinloye, J. Sen Teh, and M. N. Yusoff, "Proof of Collaborative Contribution — A consensus protocol that incentivizes contribution with applications to distributed solar energy generation," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 42, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.segan.2025.101641.