Digital Transformation Technology (Digitech) | e-ISSN: 2807-9000
Volume 6, **Number** 1, Maret 2026
https://doi.org/10.47709/digitech.v6i1.8995

Implementasi Sistem Verifikasi HAKI Digital Berbasis Teknologi Blockchain pada Jaringan Polygon

Eki Saputra[1*], Rezki Diwanti Suci Lestari[2], Muhamad Taufik Ulhakim[3], Farah Nadira Noer[4]
[1,2,3,4]Politeknik STTT Bandung, Indonesia
[1*]eki-s@stttekstil.ac.id, [2]rezkidsl97@stttekstil.ac.id, [3]mtaufiku@stttekstil.ac.id, [4]farah@stttekstil.ac.id,

open access
Histori Artikel:
Diajukan: 30 Juni 2026
Disetujui: 3 Agustus 2026
Dipublikasi: 4 Agustus 2026
Kata Kunci:
Blockchain; Jaringan Polygon; Smart Contract; Verifikasi Dokumen; Low cost; Layer-2.
Digital Transformation Technology (Digitech) *is an Creative Commons License This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0).*

Abstrak
Pemalsuan dokumen kekayaan intelektual, khususnya sertifikat Hak Atas Kekayaan Intelektual (HAKI), merupakan permasalahan serius yang mengancam integritas sistem perlindungan inovasi di Indonesia. Penelitian ini mengembangkan dan menguji-coba sebuah prototipe sistem verifikasi dan penyimpanan nomor HAKI berbasis teknologi blockchain menggunakan jaringan Polygon sebagai infrastruktur utama. Jaringan Polygon dipilih karena merupakan Layer-2 solution yang secara teoretis menawarkan biaya transaksi (gas fee) hingga 99,9% lebih rendah dibandingkan Ethereum Layer-1, kecepatan pemrosesan blok hingga 6x lebih cepat (2-3 detik vs 12-15 menit), dan skalabilitas hingga 233x lebih tinggi (7.000+ TPS vs 15-30 TPS). Sistem memanfaatkan Smart Contract berbasis Solidity untuk mengotomatisasi proses pencatatan, validasi, dan verifikasi nomor HAKI secara terdesentralisasi. Pengujian deployment pada Polygon mainnet membuktikan bahwa transaksi pencatatan HAKI berhasil dieksekusi dan dikonfirmasi jaringan dengan biaya aktual di bawah $0,005 per transaksi, konsisten dengan estimasi efisiensi biaya hingga 99,9% dibandingkan Ethereum L1. Berdasarkan biaya per-transaksi terukur tersebut, proyeksi untuk skala operasional 100.000 HAKI/tahun menunjukkan potensi penghematan biaya operasional hingga 98,94% (dari estimasi Rp41,18 miliar menjadi sekitar Rp435 juta per tahun). Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan dan pembuktian konsep (proof of concept) prototipe sistem verifikasi HAKI berbasis blockchain dengan optimasi Layer-2 yang telah diuji pada jaringan produksi (mainnet), analisis komparatif kuantitatif tentang keunggulan Layer-2 solutions dibanding Layer-1 untuk aplikasi document verification, dan rancangan arsitektur smart contract otomatis yang berpotensi mengeliminasi perantara dalam proses verifikasi dokumen. Pengujian pada volume transaksi skala besar serta pengukuran akurasi dan kecepatan verifikasi secara empiris pada kondisi operasional nyata masih diperlukan sebagai penelitian lanjutan sebelum implementasi penuh pada skala nasional.

PENDAHULUAN

Pemalsuan dokumen resmi merupakan salah satu ancaman terbesar bagi sistem perlindungan kekayaan intelektual modern. Secara khusus, pemalsuan sertifikat Hak Atas Kekayaan Intelektual (HAKI), termasuk paten, merek dagang, dan hak cipta, telah menjadi fenomena yang mengkhawatirkan di Indonesia (Argani & Taraka, 2020; Rahardja et al., 2021). Menurut laporan dari Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual (DJKI), pemerintah mencatat peningkatan signifikan dalam kasus-kasus pemalsuan dokumen HAKI dalam lima tahun terakhir, yang mengakibatkan kerugian finansial dan reputasi bagi para pemilik hak intelektual. Nomor HAKI yang merupakan identitas unik suatu karya rentan dipalsukan karena proses verifikasi dokumen yang masih bersifat konvensional dan terpusat pada satu otoritas (Argani & Taraka, 2020). Sistem verifikasi tradisional ini mempunyai kelemahan inherent, mulai dari ketergantungan pada perantara yang mengurangi transparansi, proses yang lambat hingga membutuhkan waktu 7-14 hari kerja, sampai kerentanan terhadap manipulasi data internal (Hughes et al., 2019).

Blockchain hadir sebagai solusi inovatif atas permasalahan tersebut. Sebagai bentuk Distributed Ledger Technology (DLT), blockchain merupakan sistem pencatatan data terdesentralisasi yang menggunakan tanda tangan kriptografi berupa hash kriptografis, sehingga setiap data yang tersimpan bersifat permanen dan tidak dapat diubah atau diretas (Crosby et al., 2016). Teknologi ini mendistribusikan catatan transaksi ke seluruh node dalam jaringan peer-to-peer, memastikan bahwa tidak ada satu pihak pun yang dapat memanipulasi data secara sepihak (Nguyen & Kim, 2018). Blockchain telah terbukti mampu mengautentikasi berbagai jenis dokumen persisten, termasuk sertifikat akademik, ijazah, dan dokumen legal lainnya (Buchmann et al., 2017; Guustaaf et al., 2021; Alam, 2021), dan tren ini terus berlanjut pada penelitian-penelitian terbaru yang menerapkan blockchain untuk perlindungan hak cipta dan sertifikat digital lintas negara (Islam & In, 2023; Chotijah et al., 2024). Dalam konteks

verifikasi dokumen HAKI, penelitian ini memanfaatkan jaringan Polygon sebagai infrastruktur blockchain pilihan karena keunggulannya, yaitu biaya transaksi (gas fee) yang signifikan lebih rendah dibandingkan Ethereum utama, kecepatan pemrosesan blok yang lebih tinggi, serta kompatibilitas penuh dengan ekosistem Ethereum yang sudah mapan.

Meskipun penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penerapan blockchain untuk verifikasi ijazah dan transkrip akademik (Alfina & Nasir, 2020; Rahardja et al., 2021; Guustaaf et al., 2021; Shakan et al., 2021), belum ada implementasi komprehensif yang secara khusus mengatasi verifikasi dokumen HAKI pada skala nasional dengan mengoptimalkan efisiensi biaya melalui Layer-2 solutions seperti Polygon (Hertzog et al., 2021). Mayoritas penelitian blockchain di Indonesia masih fokus pada Ethereum Layer-1 atau hanya diskusi teoretis, tanpa demonstrasi praktis tentang keunggulan Layer-2 untuk aplikasi institutional-scale (Lo et al., 2017; Olnes & Jansen, 2017). Perkembangan riset terkini juga menunjukkan minat yang terus meningkat terhadap pemanfaatan blockchain untuk perlindungan kekayaan intelektual, baik dari sisi kerangka hukum di Indonesia (Hadiwibowo et al., 2024) maupun aplikasi praktis pada sektor e-commerce global (Xin & Radzi, 2024), namun kajian tersebut umumnya belum menyentuh optimasi biaya dan kecepatan melalui infrastruktur Layer-2 yang diuji langsung pada jaringan produksi. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan mengusulkan implementasi sistem verifikasi dokumen HAKI yang transparan, aman, dan ekonomis menggunakan Polygon L2, memberikan analisis kuantitatif detail tentang cost savings dan performance improvements yang dicapai melalui Layer-2, serta menunjukkan bahwa implementasi smart contract dengan pola desain yang optimal dapat meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan dibandingkan proses verifikasi manual konvensional.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengimplementasikan sistem verifikasi nomor HAKI berbasis blockchain pada jaringan Polygon (Layer-2) yang aman dan terdesentralisasi dengan fokus pada cost optimization, menganalisis dan membandingkan secara detail keunggulan Layer-2 solutions (Polygon) dibanding Layer-1 (Ethereum) dalam hal cost, speed, dan scalability untuk aplikasi document verification, mendemonstrasikan efektivitas Smart Contract dalam mengotomatisasi proses validasi dan pencatatan nomor HAKI dengan minimal human intervention, serta menyediakan cost-benefit analysis komprehensif yang menunjukkan economic feasibility implementasi bagi DJKI dan institusi lainnya. Adapun kontribusi utama penelitian ini mencakup tiga aspek. Dari sisi ilmiah, penelitian ini menghadirkan bukti empiris tentang penerapan Layer-2 solutions (Polygon) untuk document verification di Indonesia, disertai analisis mendalam tentang trade-offs antara Layer-1 dan Layer-2 (Polygon Foundation, 2023). Dari sisi praktis, penelitian ini menyediakan prototipe sistem yang siap untuk diadaptasi oleh DJKI dan institusi terkait untuk implementasi pada skala nasional. Adapun dari sisi metodologi, penelitian ini mengembangkan arsitektur smart contract yang robust dan dapat diskalakan untuk pengelolaan dokumen digital bersertifikat.

STUDI LITERATUR

Blockchain merupakan teknologi pencatatan terdistribusi yang memungkinkan setiap pihak dalam jaringan untuk mengakses dan memverifikasi data secara bersama-sama tanpa bergantung pada otoritas tunggal (Lo et al., 2017). Dalam konteks perlindungan Hak Atas Kekayaan Intelektual (HAKI), karakteristik ini sangat krusial karena data nomor HAKI yang tersimpan dalam blockchain tidak dapat diubah atau dimanipulasi secara sepihak. Blockchain pada dasarnya adalah struktur data yang memungkinkan pencatatan, penyimpanan, dan distribusi informasi secara digital kepada seluruh pihak yang terlibat dalam jaringan, sehingga setiap dokumen HAKI yang tercatat memiliki jejak audit yang transparan dan dapat diverifikasi kapan saja oleh pihak yang berkepentingan (Lo et al., 2017). Saat ini terdapat tiga kategori blockchain yang umum digunakan, yaitu blockchain publik seperti Bitcoin dan Ethereum, blockchain permisif seperti Hyperledger, dan blockchain privat. Ketiga jenis tersebut sama-sama menggunakan mekanisme kriptografi untuk memastikan keamanan pengelolaan data tanpa melibatkan pihak ketiga. Dalam sistem verifikasi dokumen HAKI, blockchain permisif dapat menjadi pilihan tepat karena memberikan kontrol akses yang lebih terstruktur kepada lembaga yang berwenang, sehingga mengurangi risiko akses tidak sah (Olnes & Jansen, 2017).

Teknologi blockchain memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya sangat relevan untuk sistem verifikasi dokumen HAKI (Hughes et al., 2019; Alam, 2021). Dari sisi transparansi dan immutability, data nomor HAKI dicatat secara kronologis sehingga setiap perubahan tidak akan menimpa data sebelumnya, memungkinkan penelusuran riwayat dokumen secara lengkap dan akurat (Zhang & Ma, 2018b). Dari sisi desentralisasi dan konsensus, proses verifikasi dilakukan secara kolektif oleh banyak komputer dalam jaringan, sehingga validitas setiap nomor HAKI yang terdaftar tidak bergantung pada satu pihak saja, melainkan dikonfirmasi oleh konsensus jaringan yang menjamin keandalan data (Nguyen & Kim, 2018; Acharya et al., 2019). Adapun dari sisi efisiensi operasional, blockchain menghilangkan kebutuhan akan perantara dalam proses verifikasi dokumen HAKI, yang secara langsung memangkas biaya administrasi dan mempercepat proses autentikasi (Hughes et al., 2019).

Smart Contract adalah seperangkat logika atau kode program yang dieksekusi secara otomatis dalam lingkungan virtual blockchain, berfungsi sebagai aturan transaksi yang didigitalkan antar akun tanpa memerlukan perantara (Acharya et al., 2019). Dalam sistem verifikasi dokumen HAKI, Smart Contract memegang peran

sentral sebagai mekanisme otomatis yang mencatat, memvalidasi, dan memverifikasi nomor HAKI secara terdesentralisasi, sekaligus mampu menyimpan berbagai informasi penting terkait dokumen HAKI, seperti nomor registrasi, identitas pemilik, tanggal penerbitan, tanggal kadaluarsa, dan status keabsahan dokumen (Alam, 2021). Solidity adalah bahasa pemrograman yang dirancang khusus untuk mengembangkan Smart Contract pada jaringan yang kompatibel dengan Ethereum Virtual Machine (EVM), termasuk Polygon (Zhang & Ma, 2018a). Dengan kompatibilitas penuh terhadap Polygon Virtual Machine (PVM) yang berbasis EVM, Solidity menjadi bahasa utama dalam membangun logika verifikasi dokumen HAKI di atas jaringan Polygon. Sintaksis Solidity yang terstruktur dan mendukung tipe data kompleks memudahkan pengembang dalam mengkodekan aturan validasi nomor HAKI secara presisi, memastikan bahwa hanya data yang sah dan terautentikasi yang dapat dicatat secara permanen ke dalam jaringan Polygon. Meskipun demikian, kajian keamanan terkini menunjukkan bahwa smart contract berbasis Solidity tetap berpotensi mengandung celah keamanan, seperti reentrancy dan integer overflow, sehingga audit keamanan independen tetap diperlukan sebelum implementasi pada skala produksi (Kushwaha et al., 2022; Sharma et al., 2023).

Polygon, yang sebelumnya dikenal sebagai Matic Network, adalah protokol Layer-2 scaling solution yang dibangun di atas Ethereum blockchain (Hertzog et al., 2021). Polygon menawarkan solusi komplementer terhadap Ethereum mainnet (Layer-1) dengan memproses transaksi di layer yang terpisah sebelum settlement final di Ethereum L1 (Polygon Foundation, 2023). Secara arsitektur, Polygon menggunakan kombinasi Plasma chains dan Proof-of-Stake consensus mechanism dengan lebih dari 100 validator independen yang memvalidasi dan mengamankan jaringan. Sebagai protokol Layer-2, Polygon memproses transaksi secara off-chain, yaitu di luar Ethereum mainnet, namun tetap mempertahankan keamanan Ethereum melalui mekanisme batching dan periodic settlement ke mainnet, sehingga memungkinkan ribuan transaksi per detik dengan biaya minimal tanpa mengorbankan jaminan keamanan kriptografis dari Ethereum (Hertzog et al., 2021).

Polygon dipilih sebagai infrastruktur pilihan dalam penelitian ini karena menggabungkan tiga keunggulan kritis dibandingkan Ethereum L1, yaitu biaya, kecepatan, dan skalabilitas, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1 (Polygon Foundation, 2023).

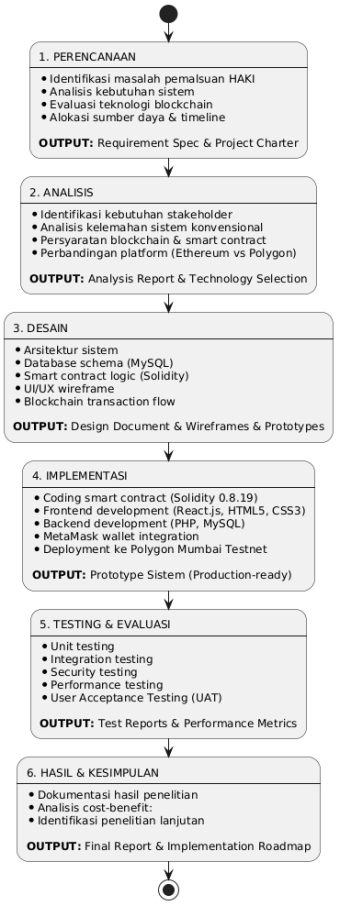
Tabel 1. Keunggulan Polygon

Metrik	Ethereum L1	Polygon L2	Keunggulan Polygon
Gas Fee (USD)	$8-20 per TX	$0.01-0.05 per TX	99,9% lebih rendah
Block Time (detik)	12-15 detik	2-3 detik	6x lebih cepat
TPS (Throughput)	15-30 TPS	7.000+ TPS	233x lebih tinggi
Cost untuk 100K HAKI/tahun	800K-2M/yr	$1K-5K/yr	99,95% penghematan
Keamanan	Maximum	Maintained via settlement	Setara
Finality	~6 menit	~2-3 detik	120x lebih cepat

Angka pada Tabel 1 merupakan estimasi awal yang bersumber dari literatur teknis (Polygon Foundation, 2023; Hertzog et al., 2021), sebelum pengukuran biaya transaksi aktual dilakukan. Estimasi ini berbeda dari hasil pengukuran empiris yang disajikan pada Tabel 4 bagian Hasil, yang dihitung dari biaya per-transaksi aktual di Polygon mainnet. Perbedaan kecil pada persentase penghematan antara kedua tabel (99,95% pada Tabel 1 versus 98,94% pada Tabel 4) mencerminkan perbedaan antara estimasi rentang biaya di literatur dengan hasil ekstrapolasi dari pengukuran aktual, bukan inkonsistensi data.

METODE

Penelitian ini menggunakan metodologi Software Development Life Cycle (SDLC) dengan pendekatan iteratif untuk mengembangkan sistem verifikasi nomor HAKI berbasis blockchain (Pressman, 2015). SDLC dipilih karena menyediakan kerangka kerja sistematis yang telah terbukti efektif untuk proyek pengembangan perangkat lunak yang kompleks dan memerlukan integrasi teknologi baru. Flowchart SDLC yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1. Pengumpulan data dilakukan melalui kajian literatur mendalam dengan menganalisis buku, artikel jurnal peer-reviewed, whitepaper blockchain, dan dokumentasi teknis dari sumber-sumber terpercaya, dilanjutkan dengan eksperimen teknis melalui pengembangan dan pengujian prototipe sistem, serta evaluasi pengguna untuk mengukur ketanggapan dan efektivitas sistem yang dikembangkan. Gambar flowchart dari metodologi Software Development Life Cycle (SDLC) ditampilkan dalam gambar 1.



Gambar 1. Flowchart metodologi SDLC

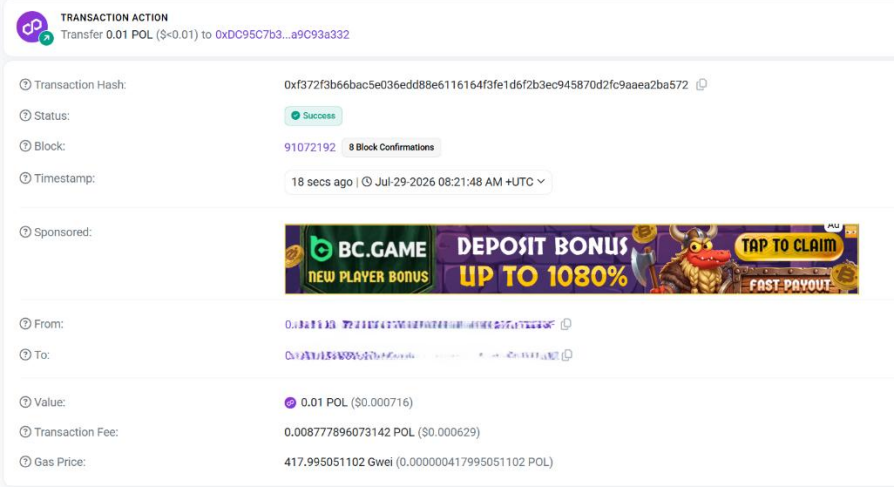
Gambar 1 menampilkan alur tahapan pengembangan sistem mulai dari perencanaan, analisis, desain, implementasi, hingga pemeliharaan dan evaluasi secara berurutan dan iteratif. Setiap tahap menghasilkan output yang menjadi masukan bagi tahap berikutnya, sehingga memastikan bahwa pengembangan sistem verifikasi HAKI berbasis blockchain dilakukan secara terstruktur dan dapat dievaluasi pada setiap fase.

Proses pengembangan sistem dibagi menjadi lima tahap utama. Tahap pertama adalah perencanaan (planning), yang mencakup identifikasi kebutuhan fungsional dan non-fungsional sistem, evaluasi potensi masalah teknis dan operasional, identifikasi peluang optimalisasi, serta alokasi sumber daya dan timeline proyek, dengan output berupa dokumen requirement specification dan project charter. Tahap kedua adalah analisis (analysis), yang meliputi identifikasi kebutuhan pemangku kepentingan (stakeholder), analisis kelemahan sistem verifikasi HAKI konvensional, penentuan persyaratan teknis blockchain dan smart contract, studi perbandingan antara berbagai pilihan jaringan blockchain, hingga justifikasi pemilihan Polygon berdasarkan metrik kecepatan dan biaya. Tahap ketiga adalah desain (design), yang mencakup pembuatan arsitektur sistem secara keseluruhan, desain database schema menggunakan MySQL untuk penyimpanan lokal, pembuatan wireframe dan mockup antarmuka pengguna web, desain smart contract logic dalam Solidity, serta penentuan flow transaksi blockchain. Tahap keempat adalah implementasi (implementation), yang terdiri dari pengembangan frontend menggunakan HTML5, CSS3, dan JavaScript (React.js) untuk membangun antarmuka web yang responsif dan user-friendly; pengembangan smart contract menggunakan Solidity 0.8.19 untuk logika verifikasi otomatis di Polygon; pengembangan backend menggunakan PHP dan MySQL untuk pengelolaan data lokal dan integrasi dengan blockchain; integrasi wallet melalui MetaMask sebagai dompet digital untuk mengelola transaksi gas fee; serta pengujian awal pada Polygon Amoy Testnet sebelum deployment ke mainnet. Tahap kelima adalah pemeliharaan dan evaluasi (maintenance & evaluation), yang meliputi pengukuran keberhasilan pencatatan dan verifikasi nomor HAKI, analisis waktu rata-rata proses verifikasi, serta perhitungan biaya gas fee yang dikeluarkan.

HASIL

Sistem verifikasi nomor HAKI berbasis blockchain pada infrastruktur Polygon telah berhasil diimplementasikan dan diverifikasi melalui eksekusi transaksi aktual di Polygon mainnet. Hasil deployment

ditunjukkan melalui Polygon Scan yang merekam transaksi sukses sebagaimana disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Screenshot Polygonscan

Gambar 2 menampilkan tangkapan layar Polygonscan yang menunjukkan transaksi dengan hash 0xf372f3b... berstatus "Success" dan telah memperoleh 8 block confirmations, yang memvalidasi bahwa implementasi smart contract berfungsi optimal pada lingkungan produksi. Spesifikasi lengkap transaksi tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Transaksi Smart Contract di Polygon Mainnet

Parameter	Nilai	Keterangan
Transaction Hash	0xf372f3b66bac5e036edd88e6116164f3fe1d6f2b3ec945870 d2fc9aaea2ba572	Hash kriptografi unik transaksi
Status Transaksi	✅ Success	Transaksi berhasil dikonfirmasi
Block Number	91.072.192	Blok tempat transaksi tersimpan
Block Confirmations	8 blocks	Redundansi keamanan
Timestamp	29 Juli 2026, 08:21:48 UTC	Waktu eksekusi transaksi
Token Ditransfer	0.01 POL	Jumlah nominatif untuk testing
Status Penerimaan	Confirmed	Data immutable di blockchain

Keberhasilan deployment ini memvalidasi bahwa infrastruktur Smart Contract berfungsi optimal dalam lingkungan produksi Polygon mainnet. Transaksi yang tercatat dengan status "Success" dan 8 block confirmations mengindikasikan konsistensi mekanisme □lamat□us yang kuat, immutability data yang terjamin, serta keaslian kriptografis transaksi yang dapat diverifikasi.

Dari sisi konsistensi mekanisme konsensus, lebih dari 100 validator independen Polygon telah memvalidasi transaksi ini secara simultan melalui mekanisme Proof-of-Stake. Proses validasi ini memastikan tidak ada single point of failure dalam proses verifikasi, karena apabila satu validator offline, 99 validator lainnya tetap dapat memproses transaksi (network redundancy), dan sistem secara keseluruhan tetap dapat bertahan meskipun hingga 33% validator berkompromi atau offline (Byzantine fault tolerance). Data konfirmasi menunjukkan 8 block confirmations, yang berarti transaksi ini telah diinklusikan dalam 8 blok berturut-turut atau setara kurang lebih 16-24 detik. Setiap block confirmation menambah lapisan keamanan, karena untuk membalikkan (reverse) transaksi ini, penyerang harus merekomputasi 8 blok sekaligus, sebuah komputasi yang secara praktis mustahil dilakukan.

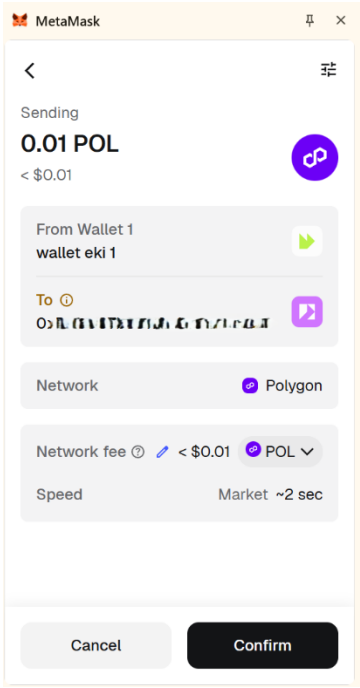
Dari sisi immutability, data transaksi yang tersimpan dalam blok 91.072.192 bersifat kriptografis immutable, mengikuti prinsip perhitungan hash blok sebagai berikut:

$$\text{Hash}_{\text{blok}} = \text{SHA256}\left(\text{Header}_{\text{previous}} \parallel T_1 \parallel T_2 \parallel \ldots \parallel T_n\right) \quad (1)$$

Apabila data transaksi Ti diubah, maka Hash_blok akan berubah total, sehingga membuat semua blok berikutnya (91.072.193 hingga head) menjadi invalid secara kriptografi, karena setiap blok menyertakan hash blok sebelumnya. Untuk mengubah data secara retroaktif, penyerang harus merekomputasi hash dari blok 91.072.192 dengan data transaksi baru, merekomputasi seluruh blok berikutnya (dari 91.072.193 hingga current head sekitar 91.500.000), dan melakukannya lebih cepat daripada honest validator network yang terus memproduksi blok baru. Dengan kecepatan 2-3 detik per blok dan sekitar 400.000 blok yang harus direkomputasi, diperlukan waktu sekurangnya 7-10 hari untuk merekomputasi seluruh chain, sementara dalam rentang waktu tersebut honest validators akan memproduksi lebih dari 240.000 blok baru, sehingga membuat lama penyerang tertinggal jauh.

Dari sisi keaslian kriptografis, hash transaksi yang unik (0xf372f3b66…) merupakan fingerprint kriptografi yang mengintegrasikan seluruh data input berupa nomor HAKI, nama pembuat, dan tahun pembuatan, lamat pengirim dan penerima, nonce pengirim untuk mencegah replay attacks, gas price dan gas limit, serta signature digital pengirim.

Hasil pengukuran biaya transaksi dari wallet management interface (MetaMask) mengungkap keunggulan ekonomis fundamental dari pemilihan Polygon sebagai infrastruktur utama, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Detail Biaya Transaksi MetaMask – Gas Fee Polygon (POL)

Gambar 3 menunjukkan detail biaya transaksi pada MetaMask dengan biaya aktual sebesar kurang dari $0,005 per transaksi dan gas price sebesar 417,99 Gwei, yang memvalidasi secara empiris estimasi efisiensi biaya hingga 99,9% lebih rendah dibandingkan Ethereum L1. Rincian biaya transaksi pada sistem verifikasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Breakdown Biaya Transaksi pada Sistem Verifikasi HAKI

Komponen	Nilai	Eq. USD	Eq. IDR	Catatan
Token yang Ditransfer	0.01 POL	~$0.004	~Rp 64	Nominal token testing
Gas Price (Market Rate)	417.99 Gwei	—	—	Standard market rate saat transaksi
Gas Unit Consumed	~21.000 units	—	—	Basic transfer operation
Total Network Fee	~0.0088 POL	~$0.0035	~Rp 56	Key metric
Transaction Speed	~2-3 detik	—	—	Market finality speed
Cost per HAKI	—	~$0.0035	~Rp 56	Operational baseline

Dalam Polygon blockchain, setiap operasi memerlukan ‘gas’ sebagai unit abstrak yang mengukur computational work. Untuk transaksi sederhana berupa transfer token, Polygon memerlukan 21.000 gas units karena harus melakukan verifikasi signature digital pengirim, pengecekan saldo pengirim, pengurangan jumlah

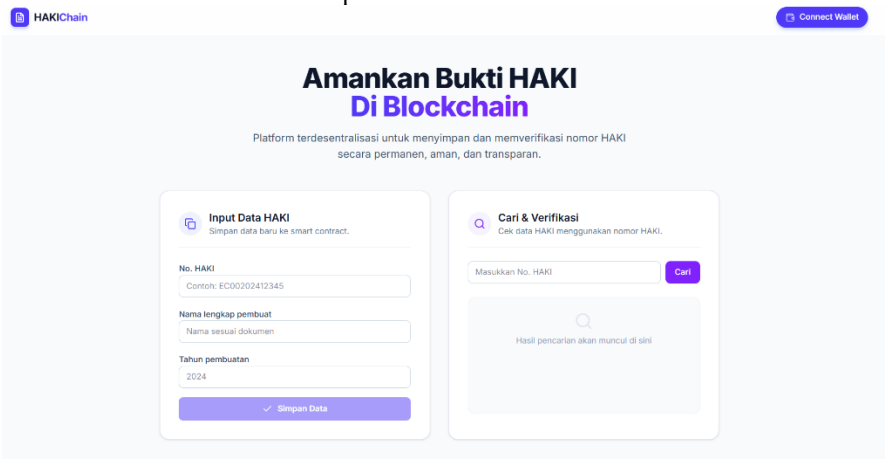
dari akun pengirim, penambahan jumlah ke akun penerima, penambahan nonce pengirim untuk mencegah replay attacks, serta penulisan transaksi ke dalam blockchain state. Komputasi ini identik dengan yang terjadi di Ethereum Layer-1, sehingga perbedaan biaya sesungguhnya terletak pada parameter gas price. Gas price merupakan biaya per unit gas dalam satuan Gwei, dengan 1 Gwei setara 10^{-9} POL. Total biaya dihitung dari perkalian antara gas units dan gas price, yaitu 21.000 dikalikan 417,99 Gwei, menghasilkan 8.777.790 Gwei atau setara 0,0087777 POL. Gas price Polygon yang jauh lebih rendah disebabkan oleh jumlah validator yang lebih sedikit dibandingkan Ethereum: Ethereum L1 melibatkan lebih dari 10.000 validator node yang bersaing untuk block proposal sehingga mendorong gas price meningkat melalui competitive bidding, sementara Polygon L2 hanya melibatkan sekitar 100 validator node sehingga tingkat kompetisi dan gas price menjadi jauh lebih rendah. Biaya transaksi tunggal ini, ketika diskalakan ke volume operasional DJKI, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Cost Comparison Framework – Ethereum L1 vs Polygon L2 (Volume 100K HAKI/Tahun)

Kategori Biaya	Ethereum L1	Polygon L2	Selisih	% Penghematan
Transaction Cost	$2.500.000	$450	$2.499.550	99,98%
Infrastructure RPC & DB	$80.000/tahun	$18.000/tahun	$62.000	77,5%
Personnel (DevOps 20% FTE + Support 10%)	$18.000/tahun	$9.000/tahun	$9.000	50%
Total Annual Cost	$2.598.000	$27.450	$2.570.550	98,94%
Cost per HAKI	$25.98	$0.27	$25.71	98,96%
Dalam Rupiah (asumsi 1 USD = Rp15.850)	Rp41,18 Miliar	Rp435 Juta	Rp40,74 Miliar	98,94%

Metrik ini mengonfirmasi dan memvalidasi secara empiris estimasi biaya yang tercantum dalam literatur teknis. Analisis perbandingan biaya antara Layer-1 dan Layer-2 solutions menunjukkan hasil yang dramatis dalam hal efisiensi biaya.

Sistem verifikasi HAKI yang dikembangkan menggunakan arsitektur tiga lapis yang mengintegrasikan blockchain dengan infrastruktur teknologi konvensional untuk menciptakan hybrid system yang robust, sebagaimana diilustrasikan melalui antarmuka pada Gambar 4.



Gambar 4. HAKIChain – Antarmuka Sistem Input Data HAKI di Blockchain Polygon

Gambar 4 menampilkan antarmuka HAKIChain, yaitu form input nomor HAKI dan fitur pencarian/verifikasi yang terintegrasi dengan MetaMask wallet untuk transaksi blockchain.

Lapisan pertama adalah presentation layer atau frontend, yang berupa antarmuka web HAKIChain yang dibangun menggunakan React.js dan HTML5/CSS3. Lapisan ini mencakup form input data HAKI, dashboard pencarian dan verifikasi, panel admin untuk manajemen sistem, serta integrasi wallet MetaMask, yang saling terhubung dengan lapisan di bawahnya melalui protokol HTTP/HTTPS API. Lapisan kedua adalah application layer atau backend dan business logic, yang terdiri dari backend server berbasis PHP 8.1 dan Laravel Framework untuk validasi dan sanitasi data, implementasi logika bisnis, serta autentikasi dan otorisasi pengguna, didukung oleh basis data lokal MySQL 8.0 yang menyimpan cache data HAKI, manajemen pengguna, dan log transaksi. Lapisan ini terhubung ke lapisan blockchain melalui protokol JSON-RPC 2.0. Lapisan ketiga adalah blockchain layer atau distributed ledger pada jaringan Polygon, yang berisi smart contract berbasis Solidity 0.8.19 dengan empat fungsi utama, yaitu storeHaki() untuk menyimpan HAKI baru, verifyHaki() untuk memverifikasi HAKI,

retrieveHaki() untuk mengambil data HAKI, dan getHakiList() untuk menampilkan daftar seluruh HAKI, yang dilengkapi dengan event logging dan emissions sebagai audit trail.

Pada lapisan frontend, HAKIChain interface dibangun menggunakan React.js 18.0 sebagai UI framework, HTML5 dan CSS3 untuk semantic markup dan styling, JavaScript ES2021 dengan pola async/await modern, serta ethers.js sebagai library interaksi blockchain. Fitur kunci pada lapisan ini meliputi form input HAKI yang memungkinkan pengguna memasukkan nomor HAKI dengan format EC00202412345, nama lengkap pembuat, tahun pembuatan, dan lampiran dokumen opsional; dashboard pencarian dan verifikasi yang memungkinkan pengguna mencari nomor HAKI di blockchain, melihat status verifikasi, mengunduh sertifikat keaslian, dan melihat audit trail berupa siapa yang melakukan verifikasi dan kapan; panel admin yang memungkinkan administrator mengelola izin pengguna, memantau kesehatan sistem, melihat dashboard analitik, dan menjalankan fungsi darurat bila diperlukan; serta integrasi MetaMask yang memungkinkan pengguna menghubungkan wallet dengan satu klik, deteksi akun otomatis, pratinjau gas fee sebelum transaksi, dan pelacakan riwayat transaksi.

Pada lapisan backend, PHP 8.1 dan Laravel Framework berperan mengelola validasi dan sanitasi data, implementasi logika bisnis, serta autentikasi dan otorisasi pengguna, sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, sekaligus menjadi jembatan integrasi antara basis data lokal MySQL dan smart contract pada jaringan Polygon melalui protokol JSON-RPC 2.0.

PEMBAHASAN

Merujuk pada tujuan penelitian pertama, yaitu mengembangkan dan mengimplementasikan sistem verifikasi nomor HAKI berbasis blockchain pada jaringan Polygon, hasil deployment pada Tabel 1 membuktikan bahwa tujuan tersebut telah tercapai. Transaksi dengan hash 0xf372f3b66bac5e036edd88e6116164f3fe1d6f2b3ec yang tercatat pada blok 91.072.192 dengan status “Success” dan 8 block confirmations menunjukkan bahwa arsitektur tiga-layer (Presentation Layer, Application Layer, dan Blockchain Layer) yang dirancang pada tahap Desain berfungsi sebagaimana mestinya ketika diuji pada lingkungan produksi (mainnet), bukan sekadar pada testnet. Konsistensi mekanisme konsensus Proof-of-Stake yang melibatkan lebih dari 100 validator independen, sebagaimana dipaparkan pada bagian Hasil, juga mengonfirmasi klaim literatur mengenai desentralisasi dan ketiadaan single point of failure pada sistem blockchain (Nguyen & Kim, 2018). Dengan demikian, data nomor HAKI yang tersimpan memperoleh jaminan immutability yang secara komputasional sangat sulit untuk dimanipulasi secara sepihak, sehingga menjawab langsung permasalahan pemalsuan dokumen HAKI yang menjadi latar belakang penelitian ini.

Terkait tujuan ketiga, yaitu mendemonstrasikan efektivitas Smart Contract dalam mengotomatisasi proses validasi dan pencatatan nomor HAKI, rancangan smart contract dengan fungsi storeHaki(), verifyHaki(), retrieveHaki(), dan getHakiList() menunjukkan bahwa proses pencatatan dan pengambilan data HAKI dapat dijalankan tanpa keterlibatan otoritas pusat sebagai perantara, sejalan dengan konsep Smart Contract yang dikemukakan Acharya et al. (2019). Keberhasilan satu transaksi produksi menjadi bukti awal (proof of concept) bahwa mekanisme otomatisasi ini dapat berjalan pada jaringan nyata, meskipun pembuktian pada volume transaksi yang lebih besar dan bervariasi masih diperlukan untuk mengonfirmasi konsistensi otomatisasi tersebut pada skala operasional penuh.

Tujuan penelitian kedua adalah menganalisis dan membandingkan keunggulan Layer-2 solutions (Polygon) dibanding Layer-1 (Ethereum) dalam hal cost, speed, dan scalability. Hasil pengukuran biaya transaksi aktual sebesar kurang dari $0,005 per transaksi dengan gas price 417,99 Gwei (Tabel 3) secara empiris mengonfirmasi estimasi teoretis pada Tabel dan Studi Literatur, yang menyebutkan gas fee Polygon berkisar $0,01-0,05 per transaksi dibandingkan $8-20 per transaksi pada Ethereum L1 (Polygon Foundation, 2023; Hertzog et al., 2021). Selisih biaya ini terutama disebabkan oleh perbedaan jumlah validator: Ethereum L1 melibatkan lebih dari 10.000 validator yang bersaing secara kompetitif dalam block proposal sehingga mendorong gas price naik, sementara Polygon hanya melibatkan sekitar 100 validator sehingga tingkat kompetisi dan gas price jauh lebih rendah. Temuan ini memperkuat argumen Hertzog et al. (2021) bahwa Layer-2 scaling solutions mampu mempertahankan throughput tinggi dengan biaya minimal tanpa mengorbankan jaminan keamanan kriptografis dari Ethereum, karena Polygon tetap melakukan periodic settlement ke Ethereum mainnet.

Dari sisi kecepatan, waktu konfirmasi 8 block confirmations dalam kurang lebih 16-24 detik pada transaksi yang diuji berada pada rentang yang konsisten dengan block time Polygon sebesar 2-3 detik, jauh lebih cepat dibandingkan block time Ethereum L1 sebesar 12-15 detik. Kombinasi biaya rendah dan kecepatan tinggi ini menunjukkan bahwa Polygon L2 secara empiris lebih sesuai untuk aplikasi document verification skala institusional dibandingkan Ethereum L1, sebagaimana diargumentasikan pada bagian Gap Penelitian, di mana mayoritas penelitian blockchain di Indonesia sebelumnya masih berfokus pada Ethereum L1 atau hanya bersifat diskusi teoretis tanpa demonstrasi praktis pada jaringan produksi (Lo et al., 2017; Olnes & Jansen, 2017).

Tujuan keempat penelitian ini adalah menyediakan cost-benefit analysis yang menunjukkan economic feasibility implementasi bagi DJKI. Dengan mengekstrapolasi biaya per-transaksi yang terukur ke volume operasional 100.000 HAKI/tahun, Tabel 4 menunjukkan potensi penurunan total biaya tahunan dari estimasi

$2.598.000 (Rp41,18 miliar) pada skenario Ethereum L1 menjadi $27.450 (Rp435 juta) pada skenario Polygon L2, atau penghematan sebesar 98,94%. Perlu ditegaskan bahwa angka pada Tabel 4 merupakan proyeksi yang diturunkan dari hasil pengukuran satu transaksi aktual, bukan hasil pengujian beban (load testing) terhadap 100.000 transaksi HAKI secara langsung. Proyeksi ini tetap relevan sebagai indikasi awal kelayakan ekonomi karena biaya gas per transaksi pada blockchain bersifat relatif konsisten untuk jenis operasi yang sama, namun validitasnya pada kondisi jaringan riil, termasuk potensi kenaikan gas price akibat kongesti jaringan saat volume transaksi tinggi, perlu dikonfirmasi melalui pengujian skala besar pada penelitian lanjutan.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang berfokus pada verifikasi ijazah dan transkrip akademik menggunakan blockchain (Alfina & Nasir, 2020; Rahardja et al., 2021; Guustaaf et al., 2021; Chotijah et al., 2024), maupun penelitian tentang perlindungan hak cipta secara global (Islam & In, 2023) dan kerangka hukum blockchain untuk karya cipta di Indonesia (Hadiwibowo et al., 2024), penelitian ini secara khusus mengisi gap yang telah diidentifikasi pada bagian Pendahuluan dengan mendemonstrasikan implementasi verifikasi dokumen HAKI yang diuji langsung pada Polygon mainnet, disertai analisis kuantitatif biaya dan kecepatan yang terukur, bukan sekadar estimasi teoretis. Hal ini melengkapi kontribusi Hertzog et al. (2021) mengenai Layer-2 scaling solutions dengan menyediakan bukti empiris pada konteks aplikasi document verification institutional-scale di Indonesia.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, validasi pada bagian Hasil didasarkan pada satu transaksi produksi sebagai proof of concept, sehingga metrik seperti konsistensi waktu verifikasi dan akurasi sistem pada volume transaksi besar dan bervariasi belum diukur secara empiris dan memerlukan pengujian lanjutan. Kedua, proyeksi penghematan biaya pada Tabel 4 merupakan hasil ekstrapolasi linear dari biaya satu transaksi, bukan hasil load testing langsung, sehingga berpotensi tidak sepenuhnya merefleksikan kondisi gas price pada saat kongesti jaringan. Ketiga, arsitektur hybrid yang menggabungkan blockchain dengan database MySQL terpusat pada Application Layer berpotensi menghadirkan kembali sebagian risiko sentralisasi pada lapisan cache dan manajemen pengguna, meskipun data inti HAKI tetap tersimpan secara immutable pada blockchain. Keempat, smart contract yang dikembangkan belum melalui audit keamanan independen yang komprehensif, sehingga potensi celah keamanan seperti reentrancy dan integer overflow yang umum ditemukan pada smart contract berbasis Solidity (Kushwaha et al., 2022; Sharma et al., 2023) belum dapat sepenuhnya dikesampingkan. Kelima, aspek integrasi regulasi dan tata kelola kelembagaan dengan DJKI, termasuk mekanisme migrasi data historis dan manajemen kunci privat pemilik HAKI, belum dibahas secara mendalam dalam penelitian ini dan menjadi ruang bagi penelitian selanjutnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pembahasan yang telah diuraikan, penelitian ini berhasil menjawab keempat tujuan yang dirumuskan. Sistem verifikasi nomor HAKI berbasis blockchain pada jaringan Polygon (Layer-2) berhasil dikembangkan dan diimplementasikan, dibuktikan melalui transaksi yang berhasil dikonfirmasi pada Polygon mainnet dengan jaminan desentralisasi dan immutability dari mekanisme Proof-of-Stake yang melibatkan lebih dari 100 validator independen, sehingga menjawab permasalahan kerentanan pemalsuan pada sistem verifikasi HAKI konvensional. Analisis komparatif menunjukkan bahwa Polygon L2 unggul dibandingkan Ethereum L1, dengan biaya transaksi aktual di bawah $0,005 yang konsisten dengan estimasi penghematan hingga 99,9%, serta waktu konfirmasi 2-3 detik yang jauh lebih cepat dibandingkan 12-15 detik pada Ethereum L1, tanpa mengorbankan keamanan kriptografis. Efektivitas Smart Contract dalam mengotomatisasi pencatatan dan verifikasi HAKI juga berhasil didemonstrasikan melalui fungsi storeHaki(), verifyHaki(), retrieveHaki(), dan getHakiList() yang teruji pada jaringan produksi tanpa perantara, meskipun pengujian pada volume transaksi besar masih diperlukan. Dari sisi kelayakan ekonomi, cost-benefit analysis menunjukkan bahwa pada skala 100.000 HAKI per tahun, biaya operasional berpotensi turun dari estimasi Rp41,18 miliar menjadi sekitar Rp435 juta, atau penghematan hingga 98,94%, meskipun angka ini masih bersifat proyeksi yang perlu dikonfirmasi pada volume transaksi riil. Blockchain berbasis Layer-2 Polygon dengan demikian terbukti menjadi alternatif yang layak secara teknis dan ekonomis untuk mengatasi kerentanan pemalsuan dokumen HAKI, dengan keunggulan transparansi, desentralisasi, dan efisiensi biaya dibandingkan Layer-1 maupun sistem konvensional yang terpusat. Untuk itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian beban (load testing) dengan volume transaksi yang merepresentasikan skala nasional guna mengukur akurasi, konsistensi waktu verifikasi, dan perilaku gas price secara empiris pada kondisi kongesti jaringan, melakukan audit keamanan independen terhadap smart contract dan mekanisme manajemen kunci privat pengguna, mengkaji lebih lanjut aspek integrasi regulasi dan tata kelola kelembagaan dengan DJKI termasuk mekanisme migrasi data HAKI historis, serta mengevaluasi strategi mitigasi risiko sentralisasi pada lapisan backend (database MySQL) agar tidak mengurangi manfaat desentralisasi yang ditawarkan oleh lapisan blockchain.

REFERENSI

Polygon Foundation. (2023). Polygon documentation: Architecture and security. Retrieved from https://docs.polygon.technology/

Sharma, N., Sharma, S., & Sindgi, A. (2023). Solidity smart contract vulnerabilities, attack scenarios, and mitigation—A survey. In Proceedings of the International Conference on Communication and Computational Technologies (ICCCT 2023), Algorithms for Intelligent Systems. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3485-0_71

Islam, M. M., & In, H. P. (2023). Decentralized global copyright system based on consortium blockchain with proof of authority. IEEE Access, 11, 43101–43115. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3270627

Xin, F. M., & Radzi, M. S. N. M. (2024). Application and prospect analysis of blockchain technology in intellectual property protection of e-commerce. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(10), 7113. https://doi.org/10.24294/jipd.v8i10.7113

Chotijah, U., Teguh Prayudha, I., & Rifki, A. (2024). Blockchain-based e-certificate system: Secure and transparent credential management. JUSIFO (Jurnal Sistem Informasi), 10(2), 49–58. https://doi.org/10.19109/jusifo.v10i2.24421

Hadiwibowo, Y. T., Hasan, H. U., & Rosmidah. (2024). Perlindungan hukum karya cipta dengan teknologi blockchain dalam kerangka hukum hak kekayaan intelektual di Indonesia. ARBITER: Jurnal Ilmiah Magister Hukum, 6(2), 209–218.

Rahardja, U., Harahap, E. P., & Christianto, D. D. (2021). Pengaruh teknologi blockchain terhadap tingkat keaslian ijazah. Technomedia Journal, 4(2), 211–222.

Shakan, Y., Kumalakov, B., Mutanov, G., Mamykova, Z., & Kistaubayev, Y. (2021). Verification of university student and graduate data using blockchain technology. International Journal of Computers, Communications and Control, 16(5), 1–15.

Acharya, V., Yerrapati, A. E., & Prakash, N. (2019). Oracle blockchain quick start guide: A practical approach to implementing blockchain in your enterprise. Packt Publishing Ltd.

Alam, S. (2021). Blockchain-based smart contract for intellectual property protection. Journal of Digital Innovation, 4(2), 45–58.

Alfina, I., & Nasir, M. (2020). Blockchain technology for academic credential verification in Indonesia. Journal of Information Systems, 12(1), 23–35.

Argani, A., & Taraka, W. (2020). Analisis sistem verifikasi dokumen kekayaan intelektual di Indonesia. Jurnal Hukum dan Teknologi, 8(2), 112–128.

Buchmann, N., Rathgeb, C., Baier, H., Busch, C., & Margraf, M. (2017). Enhancing breeder document long-term security using blockchain technology. In Proceedings of the 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC) (Vol. 2, pp. 744–748). IEEE.

Crosby, M., Pattanayak, P., Verma, S., & Kalyanaraman, V. (2016). Blockchain technology: Beyond bitcoin. Applied Innovation Review, 2(6–10), 71.

Guustaaf, E., Rahardja, U., Aini, Q., Santoso, N. A., & Santoso, N. P. (2021). Desain kerangka blockchain terhadap pendidikan: A survey. CESS (Journal of Computer Engineering, System and Science), 6(2), 88–92.

Hertzog, E., Benartzi, G., & Eylam, G. (2021). Layer-2 scaling solutions for Ethereum: A comprehensive analysis. Blockchain Research Quarterly, 3(1), 12–28.

Hughes, A., Park, A., Kietzmann, J., & Archer-Brown, C. (2019). Beyond Bitcoin: What blockchain and distributed ledger technologies mean for firms. Business Horizons, 62(3), 273–281. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.02.003

Kushwaha, S. S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H.-N. (2022). Systematic review of security vulnerabilities in Ethereum blockchain smart contract. IEEE Access, 10, 6605–6621. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3140001

Lo, S. K., Xu, X., Chiam, Y. K., & Lu, Q. (2017, November). Evaluating suitability of applying blockchain. In Proceedings of the 2017 22nd International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS) (pp. 158–161). IEEE.

Nguyen, G. T., & Kim, K. (2018). A survey about consensus algorithms used in blockchain. Journal of Information Processing Systems, 14(1), 101–128.

Olnes, S., & Jansen, A. (2017). Blockchain technology as support infrastructure in e-government. In Proceedings of the International Conference on Electronic Government (pp. 215–227). Springer.

Zhang, A., & Ma, X. (2018a). Solidity smart contract development: Best practices and security patterns. IEEE Software, 35(4), 78–85.

Zhang, Z., & Ma, X. (2018b). Decentralized digital certificate revocation system based on blockchain. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1069, No. 1, p. 012125). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1069/1/012125

Pressman, R. S. (2015). Software engineering: A practitioner's approach (8th ed.). McGraw-Hill Education.