



Rancang Bangun Alat Pemilihan Suara Berbasis Internet of Things Menggunakan Blockchain

Ahmad Saiful Mutaqi Azis*, Fara Triadi, Irwansyah

Program Studi Teknologi rekayasa Komputer, Politeknik Negeri Samarinda, Samarinda, Indonesia

Email: ^{1*}ahmadsaifulmutaqiazis1@gmail.com, ²fara_triadi@polnes.ac.id, ³irwansyah@polnes.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ahmadsaifulmutaqiazis1@gmail.com

Abstrak—Pelaksanaan pemilu secara manual masih menghadapi berbagai persoalan dalam hal akurasi, efisiensi, dan transparansi, termasuk potensi manipulasi data serta keterlambatan rekapitulasi hasil suara. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe sistem e-voting berbasis Internet of Things (IoT) yang diintegrasikan dengan jaringan permissioned blockchain Hyperledger Fabric, sebagai solusi untuk meningkatkan akurasi pencatatan, transparansi proses, dan efisiensi rekapitulasi suara. Sebagai metode penyelesaian masalah, arsitektur sistem dirancang terdiri atas perangkat Electronic Voting Machine (EVM) berbasis mikrokontroler ESP32-S3, layanan Backend API Gateway berbasis Node.js, serta chaincode VotingContract yang menegakkan fase pemilihan, mencegah pemungutan ganda melalui mekanisme voterHash yang diturunkan dari transient map, dan menyediakan antarmuka kueri hasil secara real-time. Pengembangan sistem dilakukan dengan metodologi Agile Scrum dalam empat sprint, meliputi penyiapan infrastruktur Fabric, perakitan EVM dan pengembangan firmware, perancangan skema data serta integrasi API-ledger, hingga pengembangan dashboard web. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil menjalankan proses autentikasi, pemilihan kandidat, perekaman suara dengan Transaction ID (TxID), peningkatan tally, serta penolakan pemungutan suara ganda pada simulasi 74 transaksi tanpa satu pun kegagalan, tanpa menyimpan data pribadi pemilih pada ledger. Kontribusi utama penelitian ini adalah implementasi langsung jaringan Hyperledger Fabric pada perangkat keras EVM mandiri berbasis ESP32-S3 yang portabel dan hemat sumber daya, sebuah pendekatan yang belum banyak dieksplorasi pada penelitian e-voting berbasis IoT-blockchain sebelumnya.

Kata Kunci: E-voting; Internet of Things; Hyperledger Fabric; Permissioned Blockchain; Smart Contract; ESP32

Abstract—Manual election processes still face various challenges regarding accuracy, efficiency, and transparency, including the potential for data manipulation and delayed vote recapitulation. This study aims to design and build a prototype Internet of Things (IoT)-based e-voting system integrated with the Hyperledger Fabric permissioned blockchain network, as a solution to improve recording accuracy, process transparency, and recapitulation efficiency. As the problem-solving method, the system architecture comprises an ESP32-S3-based Electronic Voting Machine (EVM), a Node.js Backend API Gateway, and a VotingContract chaincode that enforces election phases, prevents double voting via a voterHash derived from the transient map, and provides real-time result query interfaces. Development followed an Agile Scrum methodology across four sprints: Fabric infrastructure setup, EVM assembly and firmware development, data-schema design with API-ledger integration, and web dashboard development. Testing results demonstrate successful execution of authentication, candidate selection, vote recording with Transaction ID (TxID), tally increments, and rejection of double voting across a 74-transaction simulation without a single failure, without storing voters' personal data on the ledger. The main contribution of this research lies in the direct implementation of the Hyperledger Fabric network on a standalone, resource-efficient ESP32-S3-based EVM hardware terminal, an approach that remains largely unexplored in prior IoT-blockchain e-voting research.

Keywords: E-voting; Internet of Things; Hyperledger Fabric; Permissioned Blockchain; Smart Contract; ESP32

1. PENDAHULUAN

Pemilu merupakan implementasi nyata nilai-nilai demokrasi dalam penentuan pemimpin oleh rakyat secara langsung (Muhamad Musta'in, 2024). Meskipun demikian, pelaksanaan pemilu secara manual masih menghadapi berbagai persoalan yang berkaitan dengan akurasi, efisiensi, dan transparansi. Proses rekapitulasi yang dilakukan secara bertahap dan manual membuka ruang terjadinya kesalahan input data oleh petugas, potensi manipulasi hasil, serta keterlambatan publikasi akibat luasnya wilayah Indonesia dan keterbatasan infrastruktur di daerah tertentu (Nurkamiden, 2024). Dalam Pemilu 2024 di Indonesia, tercatat bahwa sebanyak 24,2% proses rekapitulasi menghadapi kendala teknis (Anin Dhita Kiky Amrynudin, 2024), yang mengindikasikan perlunya inovasi teknologi yang mampu menjadi alternatif konkret terhadap permasalahan tersebut.

Internet of Things (IoT) menawarkan solusi teknis untuk mengotomatisasi sistem pemungutan suara melalui pemanfaatan perangkat mikrokontroler yang terhubung dengan jaringan internet. Sistem berbasis IoT memungkinkan pemilih memasukkan identitas unik yang diverifikasi sebelum data suara dikirim langsung ke platform pemrosesan, sehingga meningkatkan transparansi, menyederhanakan interaksi pemilih melalui antarmuka yang intuitif, serta meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengumpulan suara digital (Adewale Ajao et al., 2025; Arun et al., 2022). Namun, tantangan baru muncul pada aspek keamanan dan integritas data suara yang dikirim melalui jaringan. Teknologi blockchain menjawab kebutuhan ini dengan menyediakan struktur penyimpanan data yang desentralistik dan tidak dapat diubah. Setiap data suara yang dikirim melalui perangkat IoT dapat direkam sebagai transaksi dalam blockchain, menjamin bahwa suara tidak dapat dimanipulasi setelah pengiriman dilakukan. Bhadoria et al. (2022) menyatakan bahwa integrasi blockchain dalam e-voting menciptakan sistem yang tahan gangguan, terverifikasi secara kriptografis, dan transparan karena setiap node dalam jaringan menyimpan salinan ledger yang sama. Penggunaan blockchain pada sistem pemungutan suara juga mampu meningkatkan keamanan dan auditabilitas transaksi secara signifikan (Syaifudin et al., 2024).



Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi kombinasi IoT dan blockchain untuk sistem e-voting. (Toma et al., 2022) membangun sistem e-voting anonim menggunakan perangkat IoT berbasis Raspberry Pi dan smart contract Ethereum, di mana suara direkam sebagai transaksi unik dan pemungutan ganda berhasil dicegah dalam 100 transaksi uji coba. Jayakumari et al. (2024) mengintegrasikan arsitektur hibrid dengan edge dan cloud server menggunakan smart contract dan konsensus PBFT, menghasilkan perbaikan waktu autentikasi dari 2,5 ms menjadi 1,5 ms sekaligus menurunkan tingkat vote alteration. Syaifudin et al. (2024) mengembangkan e-voting terdesentralisasi pada jaringan Ethereum privat dengan transaksi suara tersimpan secara immutable dalam waktu kurang dari dua detik. Díaz-Santiso & Fraga-Lamas (2021) membuktikan bahwa Hyperledger Fabric mampu menangani hingga 2.500 transaksi per detik pada kondisi benchmarking menggunakan Hyperledger Caliper, dengan latensi baca-tulis yang sangat rendah. Abo-Aklee et al. (2025) menunjukkan bahwa arsitektur e-voting terdistribusi berbasis blockchain mampu melayani hingga 20.000 pengguna secara bersamaan sekaligus tahan terhadap serangan DDoS dan SQL injection. Kajian literatur tersebut menunjukkan bahwa kombinasi IoT dan blockchain terbukti meningkatkan keamanan, transparansi, dan efisiensi sistem pemungutan suara elektronik, meskipun implementasi Hyperledger Fabric secara langsung pada perangkat keras EVM yang berdiri sendiri masih jarang dieksplorasi.

Perbandingan yang lebih sistematis terhadap penelitian-penelitian tersebut menunjukkan adanya perbedaan mendasar pada tiga aspek, yaitu platform blockchain yang digunakan, jenis perangkat IoT sebagai terminal pemilih, serta cakupan pengujian yang dilakukan. Syaifudin et al. (2024) dan Toma et al. (2022) mengandalkan jaringan Ethereum yang bersifat privat maupun publik sederhana, sedangkan (Jayakumari et al., 2024) menerapkan arsitektur hybrid edge-cloud dengan konsensus PBFT tanpa disertai implementasi perangkat keras EVM yang berdiri sendiri. Di sisi lain, Díaz-Santiso & Fraga-Lamas (2021) dan Abo-Aklee et al. (2025) mengevaluasi performa Hyperledger Fabric hanya pada level jaringan tanpa melibatkan perangkat IoT fisik sebagai terminal pemungutan suara, sebagaimana juga ditegaskan oleh tinjauan sistematis Jafar et al. (2022) dan Hajian Berenjestanaki et al. (2024) bahwa integrasi perangkat keras mandiri dengan jaringan blockchain permissioned masih menjadi celah penelitian yang belum banyak dibahas secara empiris. Berdasarkan perbandingan tersebut, GAP penelitian yang teridentifikasi adalah belum tersedianya penelitian yang mengintegrasikan secara langsung perangkat keras EVM mandiri berbasis mikrokontroler dengan jaringan Hyperledger Fabric permissioned dalam satu prototipe fungsional yang teruji secara end-to-end. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengombinasikan ESP32-S3 sebagai terminal EVM fisik dan chaincode VotingContract pada jaringan Hyperledger Fabric untuk menghasilkan sistem e-voting yang permissioned, teraudit, dan hemat sumber daya perangkat keras.

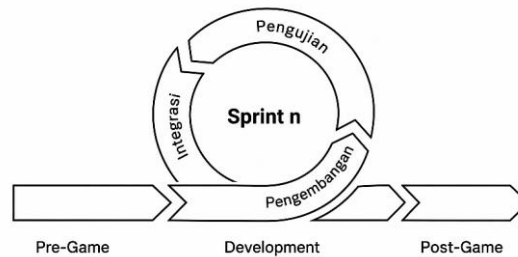
Penggabungan antara IoT dan blockchain dalam sistem pemungutan suara menciptakan arsitektur teknis yang tangguh. IoT bertindak sebagai antarmuka pemilih melalui tombol fisik pada perangkat tertanam, sementara blockchain berperan sebagai infrastruktur pencatatan dan validasi data secara terdistribusi. Pendekatan ini memastikan bahwa suara yang diberikan terekam sebagai transaksi anonim dan tidak dapat diubah, serta dapat diaudit melalui jaringan blockchain (Toma et al., 2022). Hyperledger Fabric dipilih karena mendukung sistem permissioned yang sesuai untuk konteks pemilu, dengan mekanisme konsensus fleksibel, keamanan kriptografis, dan pencatatan data yang tidak dapat diubah (Díaz-Santiso & Fraga-Lamas, 2021).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe e-voting berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 yang dilengkapi layar TFT sebagai antarmuka utama pemilih. Identitas pemilih diverifikasi melalui keypad sebelum diberikan akses untuk memilih, kemudian data suara yang dikirimkan dikemas sebagai transaksi dan disimpan dalam jaringan blockchain Hyperledger Fabric melalui smart contract. Hasil suara ditampilkan dalam dashboard web untuk transparansi dan audit publik. Dengan pendekatan ini, sistem menggabungkan keunggulan IoT dalam interaksi langsung pemilih dengan keunggulan blockchain dalam menjamin keamanan, keutuhan, dan transparansi data suara (Hossain Faruk et al., 2024; Rathee et al., 2021).

Penelitian ini difokuskan pada simulasi pemilihan Ketua Tingkat Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer Angkatan 2022, menggunakan satu unit perangkat EVM dan jaringan private blockchain Hyperledger Fabric yang dijalankan secara lokal dengan tiga kandidat. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada implementasi langsung jaringan Hyperledger Fabric pada perangkat keras Electronic Voting Machine yang mandiri dan portabel berbasis ESP32-S3, penerapan mekanisme voterHash berbasis data transient untuk menjaga anonimitas pemilih tanpa mengorbankan auditabilitas transaksi, serta integrasi menyeluruh antara perangkat EVM, backend API, dan ledger blockchain yang telah divalidasi melalui pengujian fungsional end-to-end dan simulasi pemilihan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pengembangan sistem mengadopsi kerangka kerja Agile Scrum (Schwaber & Sutherland, 2020) yang bersifat fleksibel dan adaptif terhadap perubahan kebutuhan teknis selama proses pengembangan berlangsung. Karakteristik iteratif dan inkremental dari kerangka kerja ini memungkinkan tim pengembang untuk terus melakukan evaluasi terhadap hasil kerja pada setiap tahapan, sekaligus melakukan penyesuaian arah pengembangan apabila ditemukan kendala teknis maupun perubahan kebutuhan yang tidak teridentifikasi pada tahap perencanaan awal. Kerangka kerja ini dibagi ke dalam tiga fase utama, yaitu Pre-game, Development, dan Post-game, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Gambar 1 menampilkan alur tahapan penelitian secara menyeluruh, dimulai dari fase Pre-game yang mencakup kegiatan analisis kebutuhan dan perancangan arsitektur sistem, dilanjutkan dengan fase Development yang terbagi ke dalam empat sprint pengembangan, hingga fase Post-game yang berisi kegiatan pengujian dan validasi sistem. Pemilihan Agile Scrum pada penelitian ini didasarkan pada karakteristik proyek yang menggabungkan pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak secara bersamaan, sehingga dibutuhkan pendekatan iteratif yang memungkinkan evaluasi dan penyesuaian pada setiap tahap pengembangan tanpa harus menunggu keseluruhan sistem selesai dibangun. Pendekatan bertahap semacam ini umum diterapkan pada proyek rekayasa yang melibatkan integrasi antara firmware, backend, dan infrastruktur jaringan, karena memungkinkan mengidentifikasi risiko teknis pada tingkat komponen sejak dini, sebelum risiko tersebut berdampak pada keseluruhan sistem. Selain itu, pendekatan Agile Scrum memberikan ruang untuk melakukan penyesuaian prioritas pengerjaan apabila ditemukan hambatan teknis yang tidak dapat diselesaikan dalam satu sprint, sehingga proses pengembangan tetap dapat berjalan tanpa harus menghentikan keseluruhan alur kerja. Ketiga fase tersebut dijalankan secara berurutan namun tetap terbuka terhadap umpan balik dari fase sebelumnya, sehingga hasil evaluasi pada satu fase dapat menjadi masukan bagi penyempurnaan aktivitas pada fase berikutnya.

2.1 Pre-game

Fase Pre-game berfokus pada pembentukan landasan konseptual dan teknis proyek sebelum memasuki tahap pengembangan aktif. Aktivitasnya mencakup analisis kebutuhan sistem melalui studi literatur terhadap teknologi e-voting dan blockchain, serta observasi terhadap alur proses pemilihan konvensional guna mengidentifikasi permasalahan yang hendak diselesaikan melalui sistem yang dikembangkan. Studi literatur dilakukan tidak hanya untuk memahami konsep dasar teknologi yang digunakan, tetapi juga untuk mengkaji studi kasus penerapan blockchain pada sistem pemilihan di berbagai konteks, sehingga hasil kajian dapat dijadikan acuan dalam menentukan spesifikasi kebutuhan fungsional maupun non-fungsional sistem. Seluruh temuan dari tahap analisis kebutuhan tersebut kemudian dirumuskan menjadi product backlog yang terprioritaskan berdasarkan tingkat urgensi dan ketergantungan antarkomponen. Penyusunan product backlog dilanjutkan dengan perancangan arsitektur yang mencakup diagram blok integrasi sistem, topologi jaringan Hyperledger Fabric, dan skema perangkat keras EVM (Electronic Voting Machine) sebagai cetak biru pengembangan pada fase berikutnya. Rancangan arsitektur ini disusun secara rinci agar setiap anggota tim memiliki pemahaman yang sama mengenai batasan dan cakupan kerja pada masing-masing komponen sistem.

Penyusunan product backlog pada fase ini turut memungkinkan penyesuaian urutan pengerjaan sprint apabila ditemukan ketergantungan teknis antarkomponen, misalnya kebutuhan topologi jaringan Hyperledger Fabric yang harus tersedia terlebih dahulu sebelum pengujian integrasi API-ledger pada sprint ketiga dapat dilakukan. Dengan kata lain, urutan backlog tidak bersifat statis, melainkan dapat disesuaikan sepanjang fase Development berlangsung berdasarkan hasil evaluasi teknis pada setiap sprint.

2.2 Development

Fase Development dilaksanakan secara iteratif melalui empat sprint yang masing-masing menghasilkan inkremen produk fungsional. Setiap sprint diakhiri dengan sprint review untuk mengevaluasi hasil inkremen terhadap kriteria keberhasilan yang telah ditetapkan pada tahap perencanaan, sebelum melanjutkan ke sprint berikutnya. Mekanisme evaluasi bertahap ini memastikan bahwa setiap komponen yang telah dikembangkan pada suatu sprint telah teruji fungsinya secara mandiri sebelum diintegrasikan dengan komponen lain pada sprint selanjutnya. Sprint pertama berfokus pada pengembangan infrastruktur blockchain, yaitu penyiapan dan konfigurasi jaringan Hyperledger Fabric sebagai ledger terdistribusi yang menjadi fondasi pencatatan suara. Pada sprint ini, konfigurasi peer, orderer, dan channel disesuaikan dengan kebutuhan sistem pemilihan yang bersifat terdesentralisasi namun tetap dapat diaudit. Sprint kedua mencakup perakitan dan pemrograman perangkat keras EVM, termasuk integrasi modul autentikasi pemilih dan antarmuka input suara. Sprint ketiga berfokus pada pengembangan lapisan backend, yaitu chaincode VotingContract untuk validasi dan pencatatan suara serta Node.js API sebagai perantara komunikasi antara EVM dan blockchain. Sprint keempat merupakan tahap integrasi sistem secara menyeluruh dan pengembangan dashboard web untuk memvisualisasikan hasil rekapitulasi suara secara transparan dan real-time.



2.3 Post-game

Fase Post-game berfokus pada validasi dan evaluasi prototipe sistem melalui pengujian fungsional end-to-end serta simulasi proses pemilihan secara menyeluruh. Pengujian dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh fungsi sistem, mulai dari autentikasi pemilih, pencatatan suara, hingga rekapitulasi hasil, telah berjalan sesuai dengan kebutuhan yang ditetapkan pada tahap Pre-game. Selain skenario keberhasilan, pengujian juga mencakup skenario penolakan transaksi, seperti upaya pemilihan ganda atau input data yang tidak valid, guna mengevaluasi keandalan dan konsistensi sistem dalam berbagai kondisi operasional. Hasil dari keseluruhan pengujian pada fase ini menjadi dasar penarikan kesimpulan mengenai kelayakan sistem untuk diterapkan pada konteks pemilihan yang lebih luas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pre-game

Bagian ini memaparkan hasil dari fase Pre-game, meliputi penyusunan product backlog serta rancangan arsitektur sistem dan alur pemilihan yang menjadi cetak biru pengembangan pada fase Development.

3.1.1 Product Backlog

Hasil analisis kebutuhan dan studi literatur pada fase Pre-game dirumuskan ke dalam product backlog yang memuat enam item utama, yaitu penyiapan infrastruktur jaringan Hyperledger Fabric, perakitan dan pemrograman perangkat keras Electronic Voting Machine (EVM), pengembangan chaincode VotingContract, pengembangan Backend API Gateway, pengembangan dashboard web untuk administrator dan pemilih, serta integrasi dan pengujian end-to-end sistem secara menyeluruh. Keenam item tersebut disusun dan diprioritaskan berdasarkan ketergantungan teknis antarkomponen, dengan penyiapan infrastruktur jaringan blockchain ditempatkan sebagai item berprioritas tertinggi karena menjadi fondasi bagi item-item pengembangan lainnya, sedangkan integrasi dan pengujian end-to-end ditempatkan sebagai item terakhir karena baru dapat dikerjakan setelah seluruh komponen tersedia. Rincian pemetaan setiap item backlog terhadap sprint pelaksanaannya disajikan pada Tabel 1.

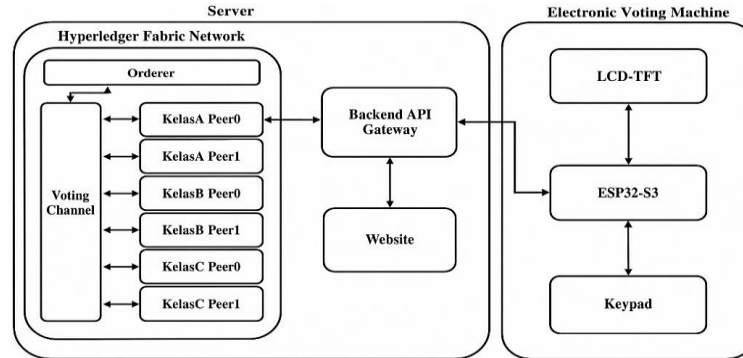
Tabel 1. Product Backlog

Sprint	Aktivitas	Prioritas	Hasil
Sprint 1	Instalasi Prasyarat Server	Tinggi	Lingkungan pengembangan siap digunakan
Sprint 1	Konfigurasi Kriptografi & Organisasi	Tinggi	Artefak krypto dan Genesis block terbentuk
Sprint 1	Deployment Kontainer Jaringan	Tinggi	6 Peer dan 3 Orderer berstatus Up/Running
Sprint 1	Inisialisasi Channel	Tinggi	Seluruh peer tergabung dalam satu jaringan privat
Sprint 2	Integrasi Perangkat Keras	Tinggi	Prototipe fisik EVM siap diprogram
Sprint 2	Pengembangan Firmware UI	Sedang	Menu navigasi tampil dan responsif
Sprint 2	Manajemen Konektivitas	Tinggi	Perangkat terhubung otomatis ke jaringan
Sprint 2	Fitur Input Multitap	Sedang	Pemilih dapat memasukkan password alfanumerik
Sprint 3	Pengembangan Chaincode (Node.js)	Tinggi	Chaincode terpasang dan dapat dieksekusi
Sprint 3	Implementasi Keamanan Vote	Tinggi	Transaksi ganda ditolak oleh blockchain
Sprint 3	Pengembangan Backend & Basis Data	Tinggi	API server berjalan dan terhubung ke database
Sprint 3	Sistem Autentikasi	Tinggi	API terlindungi, hanya pengguna terdaftar bisa akses
Sprint 3	Integrasi Gateway SDK	Tinggi	API dapat mengirim transaksi ke blockchain
Sprint 4	Implementasi Halaman Landing Page	Sedang	Halaman landing tampil dengan informasi fitur sistem
Sprint 4	Implementasi Halaman Login	Tinggi	Pengguna diarahkan ke dashboard sesuai hak akses
Sprint 4	Implementasi User Dashboard	Tinggi	Pemilih dapat memberi suara dan memantau hasil real-time
Sprint 4	Implementasi Admin Dashboard	Tinggi	Admin dapat mengelola pemilihan, kandidat, dan audit
Sprint 4	Pengujian Integrasi Sistem	Tinggi	Alur sistem terbukti berjalan lancar tanpa kendala

3.1.2 Arsitektur Sistem

Sistem yang dibangun terdiri dari empat komponen utama yang saling terintegrasi, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Komponen pertama adalah Electronic Voting Machine (EVM) yang berfungsi sebagai terminal input bagi pemilih di lokasi pemungutan suara. Perangkat ini dibangun di atas mikrokontroler ESP32-S3, yang dipilih karena kemampuan komputasinya yang memadai untuk aplikasi IoT dengan konsumsi daya rendah, dilengkapi konektivitas Wi-Fi dan antarmuka GPIO yang fleksibel. Layar LCD-TFT menampilkan surat suara digital, sedangkan keypad matriks 4x4 berfungsi sebagai media masukan pilihan pemilih. Seluruh komponen dikemas dalam satu unit perangkat

yang portabel dan mandiri. Data suara kemudian dikirimkan secara aman ke lapisan backend melalui jaringan lokal. Komponen kedua adalah Backend API Gateway yang dibangun menggunakan framework Express.js. Lapisan ini berperan sebagai penghubung antara antarmuka pengguna, baik EVM maupun website, dengan jaringan Hyperledger Fabric. Selain meneruskan instruksi transaksi ke jaringan blockchain melalui Fabric Gateway SDK, backend juga mengelola data non-transaksional seperti profil dan hak akses pengguna melalui basis data MongoDB

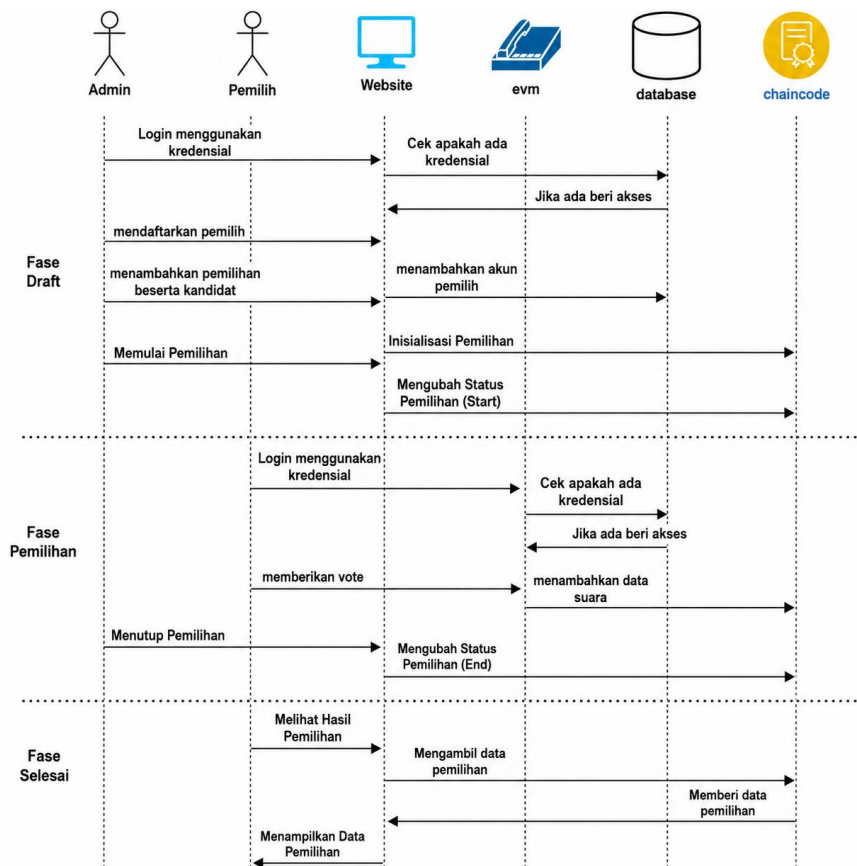


Gambar 2. Diagram Arsitektur sistem

. Komponen ketiga adalah Hyperledger Fabric Network yang berperan sebagai lapisan ledger terdistribusi dan inti keamanan sistem. Chaincode dieksekusi pada lapisan ini untuk mengelola seluruh logika bisnis pemilihan, sementara CouchDB digunakan sebagai basis data state yang mendukung kueri rekapitulasi hasil secara efisien. Komponen keempat adalah antarmuka website yang menyediakan akses bagi administrator untuk mengelola siklus pemilihan secara penuh, dan bagi pemilih untuk memverifikasi serta memantau hasil rekapitulasi secara langsung.

3.1.3 Alur Pemilihan

Alur operasional sistem terbagi ke dalam tiga fase, yaitu fase persiapan (Draft), fase pelaksanaan (Open), dan fase penyelesaian (Closed). Pada fase persiapan, administrator login menggunakan kredensial melalui website, yang diteruskan ke basis data untuk pengecekan; apabila kredensial valid, akses ke halaman administrasi diberikan. Administrator kemudian mendaftarkan data pemilih, menambahkan pemilihan beserta kandidat, dan setiap akun pemilih yang didaftarkan disimpan ke basis data melalui website.



Gambar 3. Diagram Aktivitas Alur Pemilihan

Administrator selanjutnya memulai pemilihan, yang diteruskan website untuk melakukan inisialisasi pemilihan pada chaincode dan mengubah status pemilihan menjadi START pada ledger blockchain. Pada fase pelaksanaan, pemilih login menggunakan kredensial melalui perangkat EVM, yang diteruskan ke basis data untuk pengecekan; apabila kredensial valid, EVM memberikan akses untuk memberikan suara. Suara yang diberikan pemilih dikirim EVM sebagai transaksi baru langsung ke chaincode. Fase ini ditutup oleh administrator melalui website dengan mengubah status pemilihan menjadi END pada chaincode. Pada fase penyelesaian, pemilih melihat hasil pemilihan melalui website, yang mengambil data rekapitulasi dari chaincode dan menampilkannya kepada pemilih. Ketiga fase tersebut digambarkan pada Gambar 3.

Kredensial pemilih yang didaftarkan pada fase Draft dienkripsi ke dalam basis data MongoDB menggunakan algoritma hashing Argon2id, sementara metadata pemilihan dicatat ke ledger Hyperledger Fabric dengan status DRAFT. Pada fase Open, suara yang dikirimkan melalui EVM divalidasi secara kriptografis di lapisan blockchain, meliputi verifikasi tanda tangan dan keunikan voterHash, sebelum dicatat secara permanen sebagai blok baru. Pada fase Closed, smart contract secara otomatis mengunci rekapitulasi hasil dan menolak input suara baru, sementara fitur audit memungkinkan siapa pun untuk memverifikasi jejak transaksi melalui TxID.

3.2 Development

Bagian ini memaparkan hasil implementasi keempat sprint pada fase Development, mencakup infrastruktur jaringan blockchain, perangkat keras EVM, chaincode dan backend API, hingga dashboard web.

3.2.1 Pembangunan Infrastruktur jaringan

Tahap pertama pengembangan berfokus pada penyiapan infrastruktur Hyperledger Fabric pada lingkungan server berbasis Ubuntu. Proses orkestrasi kontainer menggunakan Docker Compose berhasil mengaktifkan sembilan node utama secara bersamaan: tiga node orderer untuk konsensus Raft dan enam node peer yang mewakili tiga organisasi, masing-masing dipasangkan dengan instansi CouchDB.

```
ubuntu@ahmad:~/network$ docker ps -a --format "table {{.Names}}\t{{.Status}}\t{{.Ports}}\n0: //g' | sed 's/, \[:\].*/g' | sed 's/\/tcp//g' | (sed -u 1q; sort -k3)


| NAMES                       | STATUS           | PORTS                   |
|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| mongodb                     | Up 2 days        | 27017->27017            |
| couchdb1.kelasc.example.com | Up About an hour | 4369, 9100, 10984->5984 |
| couchdb0.kelasa.example.com | Up About an hour | 4369, 9100, 5984->5984  |
| couchdb1.kelasa.example.com | Up About an hour | 4369, 9100, 6984->5984  |
| couchdb0.kelasb.example.com | Up About an hour | 4369, 9100, 7984->5984  |
| couchdb1.kelasb.example.com | Up About an hour | 4369, 9100, 8984->5984  |
| couchdb0.kelasc.example.com | Up About an hour | 4369, 9100, 9984->5984  |
| orderer1.example.com        | Up About an hour | 7050->7050              |
| peer1.kelasb.example.com    | Up About an hour | 7051, 10051->10051      |
| peer0.kelasc.example.com    | Up About an hour | 7051, 11051->11051      |
| peer1.kelasc.example.com    | Up About an hour | 7051, 12051->12051      |
| peer0.kelasa.example.com    | Up About an hour | 7051->7051              |
| peer1.kelasa.example.com    | Up About an hour | 7051, 8051->8051        |
| peer0.kelasb.example.com    | Up About an hour | 7051, 9051->9051        |
| orderer2.example.com        | Up About an hour | 8050->8050              |
| orderer3.example.com        | Up About an hour | 9050->9050              |

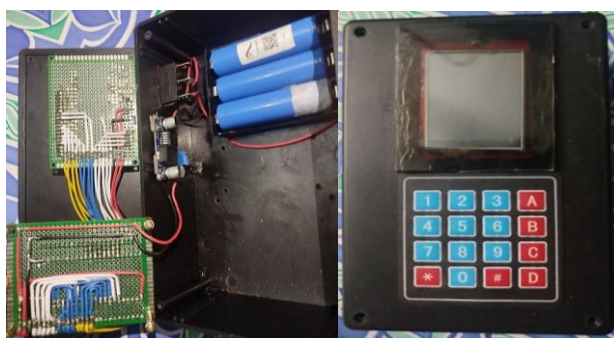

ubuntu@ahmad:~/network$
```

Gambar 4. Status Kontainer

Inisialisasi kanal votingchannel diselesaikan dengan mendaftarkan seluruh peer dari ketiga organisasi, sehingga setiap peer memperoleh salinan ledger awal yang identik dan tersinkronisasi. Hal ini dikonfirmasi melalui pemeriksaan tinggi blok inisialisasi pada setiap peer yang menunjukkan nilai yang sama. Hasil ini membuktikan bahwa fondasi jaringan blockchain terdistribusi telah berdiri secara stabil dan siap digunakan sebagai infrastruktur pencatatan suara yang terdesentralisasi.

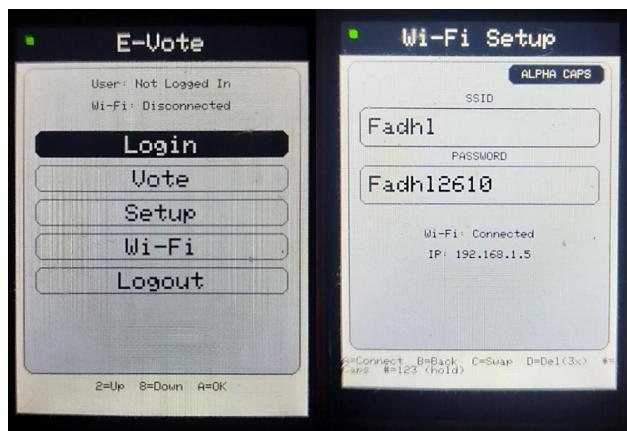
3.2.2 Pengembangan Perangkat Electronic Voting Machine

Perangkat EVM berhasil dirakit sebagai terminal fisik yang mandiri dan portabel. Mikrokontroler ESP32-S3 dihubungkan ke layar TFT LCD melalui jalur komunikasi paralel 8-bit dan ke keypad matriks 4x4 melalui GPIO digital. Sumber tegangan dari baterai diregulasi menggunakan modul buck converter agar daya yang masuk ke mikrokontroler tetap stabil, dan seluruh komponen dikemas dalam casing pelindung yang ergonomis.



Gambar 5. Model Fisik Perangkat EVM

Firmware dikembangkan menggunakan pustaka grafis LovyanGFX, menghadirkan antarmuka menu navigasi yang intuitif pada layar utama dengan opsi Login, Vote, dan Setup. Halaman status jaringan memberikan umpan balik visual kepada pengguna mengenai SSID yang terhubung dan alamat IP yang diperoleh perangkat, memastikan perangkat siap berkomunikasi dengan backend sebelum proses pemungutan suara dimulai.



Gambar 6. Tampilan Antarmuka EVM

Untuk mengatasi keterbatasan fisik keypad matriks 4x4, diterapkan algoritma input multitap yang memungkinkan pemilih memasukkan kredensial alfanumerik. Setiap tombol angka dipetakan ke rangkaian huruf standar telepon, dengan tombol khusus yang dialokasikan untuk fungsi kontrol seperti navigasi, konfirmasi, penggantian mode input, dan penghapusan karakter. Pengujian fungsionalitas input yang dilakukan menunjukkan bahwa seluruh mekanisme, termasuk pengetikan siklus, penguncian karakter otomatis berdasarkan jeda waktu, pergantian mode numerik, dan fitur kapitalisasi, berjalan sesuai spesifikasi. Koneksi Wi-Fi dikelola melalui mekanisme input manual SSID dan kata sandi yang disimpan secara permanen dalam Non-Volatile Storage (NVS), sehingga perangkat dapat terhubung kembali secara otomatis setelah dinyalakan ulang tanpa perlu konfigurasi ulang.

3.2.3 Pengembangan Chaincode dan Backend API

Chaincode VotingContract berhasil di-deploy ke seluruh node peer melalui siklus hidup resmi Hyperledger Fabric, mencakup tahap pengemasan, instalasi, persetujuan oleh organisasi sesuai kebijakan endorsement, hingga commit ke kanal setelah kuorum organisasi tercapai. Pendekatan bertahap ini memastikan setiap perubahan logika bisnis pemilihan hanya berlaku setelah disepakati organisasi-organisasi berwenang dalam jaringan, konsisten dengan prinsip desentralisasi kepercayaan pada blockchain permissioned. Ketahanan chaincode terhadap kesalahan implementasi menjadi perhatian tersendiri, mengingat (Brotsis et al., 2020) mengidentifikasinya sebagai satu dari empat permukaan serangan utama pada Hyperledger Fabric, selain konsensus, jaringan, dan mekanisme privasi. Karena itu, pengujian seluruh fungsi chaincode dilakukan langsung pada peer, termasuk skenario penolakan transaksi tidak sah, dengan hasil disajikan pada Tabel 2.

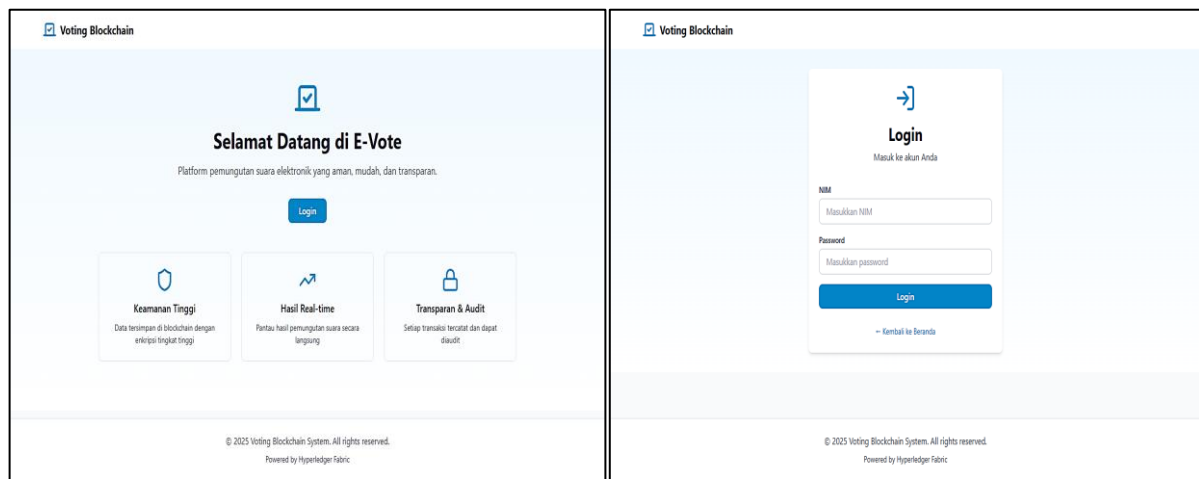
Tabel 2. Hasil Pengujian Chaincode

Fungsi Chaincode	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil
CreateElection	Pembuatan pemilihan baru	Data tersimpan di ledger dengan status DRAFT	Berhasil
AddCandidates	Penambahan kandidat massal	Kandidat berhasil masuk ke array candidates	Berhasil
OpenElection	Perubahan status ke OPEN	Status berubah, sistem siap menerima suara	Berhasil
Vote (skenario valid)	Pemberian suara sah	voterHash tercatat, tally bertambah	Berhasil
Vote (double voting)	Suara dengan NIM yang sama	Transaksi ditolak: "This voter hash has already voted"	Berhasil
Vote (kandidat tidak terdaftar)	Memilih kandidat yang tidak ada	Transaksi ditolak: "Unknown candidate"	Berhasil
Vote (fase salah)	Vote saat status DRAFT/CLOSED	Transaksi ditolak: "Operation only allowed in phase OPEN"	Berhasil
GetResults	Kueri hasil perolehan suara	Data perolehan suara berurutan berhasil dikembalikan	Berhasil
ListVotes	Audit riwayat transaksi	Daftar suara dengan TxID, timestamp, voterHash	Berhasil
CloseElection	Penutupan pemilihan	Status CLOSED, fungsi Vote tidak dapat dieksekusi	Berhasil

Keamanan lapisan backend diperkuat melalui penerapan mekanisme pertahanan berlapis, dimulai dari pemrosesan kata sandi pengguna menggunakan algoritma hashing Argon2id sebelum disimpan ke dalam basis data, perlindungan seluruh endpoint API menggunakan token JWT yang diterbitkan setelah proses verifikasi kredensial berhasil dilakukan, serta koneksi terhadap jaringan Hyperledger Fabric yang dibangun menggunakan protokol gRPC dengan autentikasi mTLS berbasis materi kriptografi administrator organisasi. Pemilihan Argon2id sebagai fungsi hashing kata sandi didasarkan pada karakteristik memory-hard yang dimilikinya sehingga lebih tahan terhadap serangan brute-force menggunakan perangkat keras khusus dibandingkan fungsi hashing konvensional (Biryukov et al., 2021), sementara skema token JWT (Sheffer et al., 2020) dipilih karena sifatnya yang stateless dan efisien untuk diterapkan pada arsitektur API yang melayani permintaan dari berbagai jenis klien, termasuk perangkat EVM. Hasil pengujian terhadap seluruh endpoint API menunjukkan bahwa seluruh skenario berjalan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan, termasuk penolakan akses tanpa token, pencegahan double voting dengan respons status 409, serta kemampuan administrator untuk mengelola siklus pemilihan secara penuh melalui endpoint yang tersedia.

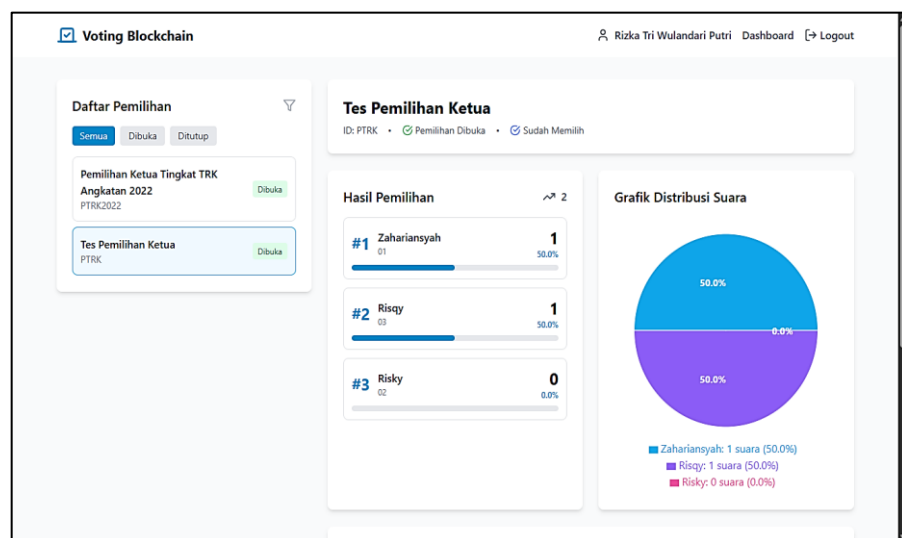
3.2.4 Pengembangan Dashboard Web

Antarmuka web dikembangkan untuk menjembatani interaksi pengguna dengan sistem blockchain secara visual dan mudah digunakan. Halaman landing page menyediakan informasi umum sistem yang dapat diakses publik, sementara halaman login mengarahkan pengguna ke dashboard yang sesuai berdasarkan peran masing-masing.



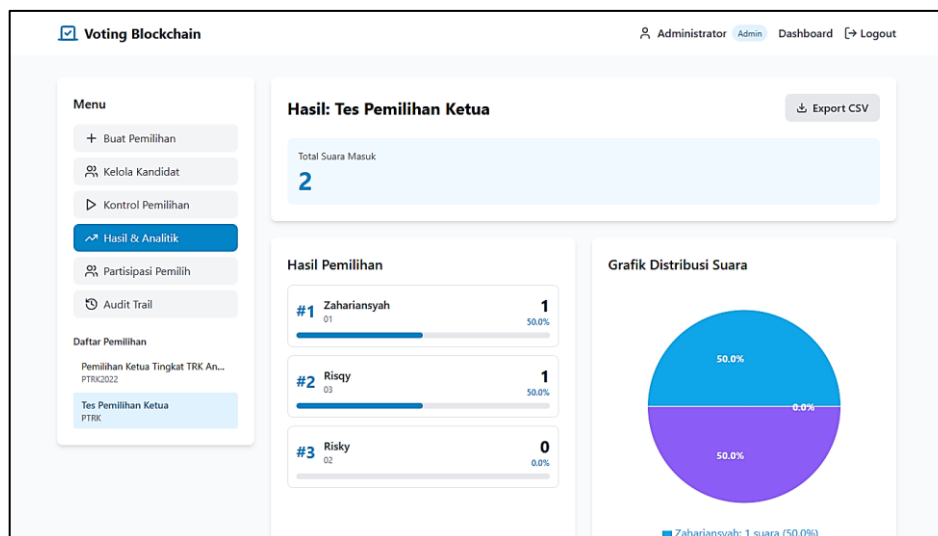
Gambar 7. Tampilan landing page dan login

User Dashboard menyajikan daftar kandidat secara visual dan dilengkapi fitur riwayat suara untuk keperluan transparansi. Grafik distribusi suara ditampilkan secara real-time sehingga pemilih dapat memverifikasi secara mandiri bahwa suaranya telah tercatat di dalam ledger.



Gambar 8. Tampilan User Dashboard

Admin Dashboard menyediakan kontrol penuh terhadap ekosistem pemilihan melalui struktur navigasi yang terorganisir: formulir pembuatan pemilihan, pengelolaan kandidat, panel kendali status (buka atau tutup pemilihan), serta tabel audit transaksi yang menampilkan riwayat TxID secara langsung dari ledger.



Gambar 9. Tampilan Admin Dashboard

3.3 Post-game

Validasi fungsional end-to-end dilakukan untuk membuktikan keandalan integrasi seluruh komponen sistem dalam satu rantai komunikasi yang utuh antara EVM, API, dan jaringan Hyperledger Fabric. Seluruh skenario pengujian yang dijalankan berhasil divalidasi sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 3. Hasil Pengujian Validasi Fungsional

Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil
Autentikasi administrator	Token admin diterbitkan, diarahkan ke Admin Dashboard	Berhasil
Pembuatan pemilihan dan pendaftaran kandidat	Data tersimpan di blockchain, tampil pada antarmuka	Berhasil
Aktivasi pemilihan (OPEN)	Status berubah, pemilih mendapat akses	Berhasil
Autentikasi pemilih	Diarahkan ke User Dashboard dengan pemilihan aktif	Berhasil
Eksekusi voting melalui EVM	Suara terkirim, TxID diterbitkan, status pemilihan diperbarui	Berhasil
Validasi suara ganda	Opsi pemilihan dikunci, hanya menu hasil yang tersedia	Berhasil
Pemantauan hasil real-time	Grafik dan tabel rekapitulasi diperbarui otomatis	Berhasil
Penutupan pemilihan (CLOSED)	Seluruh aktivitas voting baru dihentikan	Berhasil
Audit trail	TxID dan timestamp tercatat lengkap pada riwayat ledger	Berhasil

Simulasi pemilihan dilakukan dalam satu siklus operasional penuh yang mencakup seluruh fase sistem. Proses dimulai dari inisialisasi data oleh administrator pada fase DRAFT, dilanjutkan dengan partisipasi pemilih melalui perangkat EVM pada fase OPEN, dan ditutup dengan verifikasi transparansi pada fase CLOSED. Sebanyak 80 transaksi suara berhasil direkam pada ledger tanpa satu pun kegagalan. Setiap transaksi tercatat dengan TxID unik, identitas kandidat, dan voterHash anonim tanpa mengungkapkan NIM asli pemilih. Tidak ada satu pun upaya pemungutan ganda yang lolos dari mekanisme validasi chaincode, membuktikan keandalan logika keamanan yang diimplementasikan.

3.4 Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi IoT dan blockchain Hyperledger Fabric dapat mewujudkan sistem e-voting yang memenuhi tiga aspek kunci: keamanan, transparansi, dan integritas data. Dibandingkan dengan penelitian (Syaifudin et al., 2024) yang menggunakan Ethereum privat, penelitian ini mengimplementasikan Hyperledger Fabric yang secara desain lebih sesuai untuk konteks permissioned seperti pemilu dengan mekanisme kontrol akses dan identitas yang lebih ketat. Dibandingkan dengan (Toma et al., 2022) yang menggunakan Raspberry Pi sebagai perangkat IoT, penggunaan ESP32-S3 dalam penelitian ini menghadirkan solusi yang lebih hemat daya dan lebih terjangkau secara biaya untuk perangkat terminal pemilih, sekaligus tetap mampu menangani antarmuka grafis dan konektivitas jaringan secara bersamaan.

Mekanisme pencegahan pemungutan ganda menggunakan voterHash dari data transient terbukti efektif. Identitas pemilih tidak tersimpan di ledger publik, namun setiap upaya penggunaan hak suara lebih dari sekali berhasil diblokir secara otomatis oleh smart contract. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip yang dikemukakan (Bhadoria et al., 2022) bahwa privasi pemilih dapat tetap terjaga sekaligus mempertahankan verifikasi penuh terhadap setiap transaksi



suara. Hasil ini juga konsisten dengan temuan (Jayakumari et al., 2024) yang menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan blockchain berbasis smart contract mampu menurunkan tingkat vote alteration secara signifikan dibandingkan sistem tanpa mekanisme validasi terdistribusi.

Temuan ini juga memperkuat posisi penelitian dalam peta literatur yang lebih luas. Tinjauan sistematis (Jafar et al., 2022) mengidentifikasi bahwa skalabilitas menjadi salah satu hambatan utama pada sistem e-voting berbasis blockchain, sementara (Hajian Berenjestanaki et al., 2024) menyoroti bahwa aspek kerahasiaan data personal dan verifikasi identitas yang andal masih menjadi tantangan terbuka pada mayoritas penelitian sejenis. (Vladucu et al., 2023) turut menekankan pentingnya integrasi perangkat fisik yang teruji secara nyata, bukan hanya simulasi perangkat lunak, agar sistem e-voting berbasis blockchain dapat diadopsi pada kondisi pemilihan yang sesungguhnya. Penelitian ini merespons kebutuhan tersebut melalui pengujian pada perangkat keras EVM fisik yang terintegrasi penuh dengan jaringan blockchain, alih-alih hanya melakukan simulasi pada lingkungan perangkat lunak semata.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada cakupan pengujian yang dilakukan dalam lingkungan lokal dengan satu unit EVM dan jumlah transaksi yang terbatas, sehingga belum sepenuhnya mencerminkan kondisi pemilihan berskala besar dengan ratusan atau ribuan pemilih simultan. Pengujian beban menggunakan alat seperti Hyperledger Caliper belum dilakukan, sehingga data kuantitatif mengenai throughput dan latency pada kondisi tersebut belum tersedia sebagai dasar evaluasi skalabilitas sistem. Keterbatasan ini konsisten dengan temuan (Jafar et al., 2022) yang menyebutkan bahwa evaluasi skalabilitas pada kondisi beban tinggi masih menjadi kesenjangan umum pada mayoritas penelitian e-voting berbasis blockchain, sehingga menjadi arah penting bagi pengembangan penelitian selanjutnya. Saran perbaikan pada bagian kesimpulan turut mempertimbangkan penambahan sensor biometrik sebagai lapisan verifikasi identitas tambahan, sebagaimana diterapkan pada penelitian (Yusoff et al., 2023) yang menggabungkan sensor sidik jari dengan perangkat IoT untuk memperkuat keabsahan identitas pemilih.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi perangkat IoT dan jaringan private blockchain Hyperledger Fabric dapat direalisasikan menjadi sebuah prototipe sistem e-voting yang fungsional, sebagai alternatif yang lebih aman, transparan, dan efisien dibandingkan mekanisme pemungutan suara konvensional. Topologi jaringan dengan tiga organisasi dan tiga orderer berkonsensus Raft terbukti mampu menghasilkan infrastruktur ledger terdistribusi yang stabil, ditandai dengan keberhasilan seluruh peer bergabung dalam satu kanal dan memiliki salinan ledger yang tersinkronisasi. Di sisi perangkat keras, EVM berbasis ESP32-S3 berhasil dirakit dan diprogram sebagai terminal pemungutan suara yang mandiri, mampu mengelola konektivitas jaringan secara otomatis, menyajikan surat suara digital, serta mengirimkan data pilihan ke jaringan blockchain melalui API Gateway secara aman. Chaincode VotingContract juga terbukti mampu menegakkan aturan setiap fase pemilihan dan mencegah pemungutan ganda melalui mekanisme voterHash tanpa perlu menyimpan identitas asli pemilih pada ledger. Simulasi satu siklus pemilihan penuh dengan 74 transaksi suara mengonfirmasi bahwa seluruh rantai komunikasi antara EVM, backend, dan jaringan blockchain berjalan sesuai spesifikasi tanpa satu pun kegagalan. Meskipun demikian, cakupan pengujian yang masih terbatas pada satu unit perangkat dan lingkungan jaringan skala kecil menjadi kekurangan utama penelitian ini, sehingga belum menggambarkan performa sistem pada kondisi pemilihan berskala besar dengan jumlah pemilih simultan yang jauh lebih tinggi. Untuk penelitian selanjutnya, pengujian beban menggunakan Hyperledger Caliper perlu dilakukan guna mengukur throughput dan latency pada kondisi tersebut, serta penambahan sensor biometrik seperti pemindai sidik jari atau pembaca RFID/NFC pada perangkat EVM disarankan untuk memperkuat verifikasi identitas pemilih dan meminimalkan risiko kesalahan input manual.

REFERENCES

- Abo-Akleek, F., Mowafi, M., Taqieddin, E. S., & Shatnawi, A. S. (2025). Leveraging blockchain for robust and transparent E-voting systems. *Cyber Security and Applications*, 3, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2025.100086>
- Adewale Ajao, L., Ugbede Umar, B., Ohiani Ohize, H., Mananyi Dogo, E., Esenogho, E., & Cameron, M. (2025). Blockchain Integration With Multimodal Biometric Authentication System for Secure Smart Verifiable Electronic Voting System. *IEEE Access*, 13, 189850–189868. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3618970>
- Anin Dhita Kiky Amrynudin. (2024). *Data Anomali Dalam Sistem Informasi Rekapitulasi Pada Pemilu 2024*. <https://wnj.westsciences.com/index.php/jhhws/article/view/513>
- Arun, K. C., Ahmad, S., Noor, S., Mumtaz, I., & Ali, M. (2022). Arduino Based Secure Electronic Voting System with IoT and PubNub for Universities. *2022 Second International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICATIECE56365.2022.10047605>
- Bhadoria, R. S., Das, A. P., Bashar, A., & Zikria, M. (2022). Implementing Blockchain-Based Traceable Certificates as Sustainable Technology in Democratic Elections. *Electronics*, 11(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/electronics11203359>



- Biryukov, A., Dinu, D., Khovratovich, D., & Josefsson, S. (2021). *Argon2 Memory-Hard Function for Password Hashing and Proof-of-Work Applications* (Request for Comments RFC 9106). Internet Engineering Task Force. <https://doi.org/10.17487/RFC9106>
- Brotsis, S., Kolokotronis, N., Limniotis, K., Bendiab, G., & Shiaeles, S. (2020). On the Security and Privacy of Hyperledger Fabric: Challenges and Open Issues. *2020 IEEE World Congress on Services (SERVICES)*, 197–204. <https://doi.org/10.1109/SERVICES48979.2020.00049>
- Díaz-Santiso, J., & Fraga-Lamas, P. (2021). E-Voting System Using Hyperledger Fabric Blockchain and Smart Contracts. *Engineering Proceedings*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/engproc2021007011>
- Hajian Berenjestanaki, M., Barzegar, H. R., El Ioini, N., & Pahl, C. (2024). Blockchain-Based E-Voting Systems: A Technology Review. *Electronics*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/electronics13010017>
- Hossain Faruk, M. J., Alam, F., Islam, M., & Rahman, A. (2024). Transforming online voting: A novel system utilizing blockchain and biometric verification for enhanced security, privacy, and transparency. *Cluster Computing*, 27(4), 4015–4034. <https://doi.org/10.1007/s10586-023-04261-x>
- Jafar, U., Ab Aziz, M. J., Shukur, Z., & Hussain, H. A. (2022). A Systematic Literature Review and Meta-Analysis on Scalable Blockchain-Based Electronic Voting Systems. *Sensors*, 22(19), 7585. <https://doi.org/10.3390/s22197585>
- Jayakumari, B., Sheeba, S. L., Eapen, M., Anbarasi, J., Ravi, V., Suganya, A., & Jawahar, M. (2024). E-voting system using cloud-based hybrid blockchain technology. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(1), 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.01.002>
- Muhamad Musta'in. (2024). Sistem Pemilihan Umum Yang Dianut Di Indonesia. *Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik*, 1(5), 409–420. <https://doi.org/10.61722/jmia.v1i5.4181>
- Nurkamiden, M. (2024). SiRekap: Tantangan dan Potensi Kekeliruan Proses Rekapitulasi Pemilu Serentak di Indonesia. *Sosiologi Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(2), Article 2. <https://doi.org/10.37905/sjppm.v1i2.62>
- Rathee, G., Iqbal, R., Waqar, O., & Bashir, A. K. (2021). On the Design and Implementation of a Blockchain Enabled E-Voting Application Within IoT-Oriented Smart Cities. *IEEE Access*, 9, 34165–34176. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061411>
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*. <https://www.scrumguides.org/scrum-guide.html>
- Sheffer, Y., Hardt, D., & Jones, M. B. (2020). *JSON Web Token Best Current Practices* (Request for Comments RFC 8725). Internet Engineering Task Force. <https://doi.org/10.17487/RFC8725>
- Syaifudin, Y. W., Aprilia, S. P., Apriliyanto, S., Himmah, D. R., Siradjuddin, I., Sinal, M., & Rahmadani, A. A. (2024). Blockchain-Based E-Voting System: A Decentralized Approach on the Ethereum Private Network. *International Journal of Frontier Technology and Engineering*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.33795/ijfte.v3i1.6095>
- Toma, C., Popa, M., Boja, C., Ciurea, C., & Doinea, M. (2022). Secure and Anonymous Voting D-App with IoT Embedded Device Using Blockchain Technology. *Electronics*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/electronics11121895>
- Vladucu, M.-V., Dong, Z., Medina, J., & Rojas-Cessa, R. (2023). E-Voting Meets Blockchain: A Survey. *IEEE Access*, 11, 23293–23308. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3253682>
- Yusoff, Z. M., Yusnoor, Y., Markom, A. M., Nordin, S. A., & Ismail, N. (2023). Fingerprint biometric voting machine using internet of things. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 30(2), 699–706. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp699-706>