SKRIPSI

RANCANG BANGUN SISTEM BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU BERBASIS WEB3 MENGGUNAKAN NFT NON-TRANSFERABLE DENGAN SMART CONTRACT PADA JARINGAN ETHEREUM TESTNET

DISUSUN OLEH:

ZAID AHLUN ULUMUDDIN

2109020184

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI

FAKULTAS ILMU KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2025

RANCANG BANGUN SISTEM BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU BERBASIS WEB3 MENGGUNAKAN NFT NON-TRANSFERABLE DENGAN SMART CONTRACT PADA JARINGAN ETHEREUM TESTNET

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer (S.Kom) dalam Program Studi Teknologi Informasi pada Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Zaid Ahlun Ulumuddin

NPM. 2109020184

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI

FAKULTAS ILMU KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2025

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi	:	RANCANG BANGUN SISTEM BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU BERBASIS WEB3 MENGGUNAKAN NFT NON-TRANSFERABLE DENGAN SMART CONTRACT PADA JARINGAN ETHEREUM TESTNET
Nama Mahasiswa	:	ZAID AHLUN ULUMUDDIN
NPM	:	2109020184
Program Studi	:	TEKNOLOGI INFORMASI

Menyetujui

Komisi Pembimbing

(Halim Maulana, ST, M.Kom)

NIDN. 0121119102

Ketua Program Studi

(Fatma Sari Hutagalung, S.Kom., M.Kom)

NIDN. 0117019301

Dekan

(Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom.)

NIDN. 0127099201

PERNYATAAN ORISINALITAS

RANCANG BANGUN SISTEM BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU BERBASIS WEB3 MENGGUNAKAN NFT NON-TRANSFERABLE DENGAN SMART CONTRACT PADA JARINGAN ETHEREUM TESTNET

SKRIPSI

Saya menyatakan bahwa karya tulis ini adalah hasil karya sendiri, kecuali beberapa kutipan dan ringkasan yang masing-masing disebutkan sumbernya.

Medan, September 2025

Yang membuat pernyataan

Zaid Ahlun Ulumuddin

NPM. 2109020184

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN

AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: Zaid Ahlun Ulumuddin
NPM	: 2109020184
Program Studi	: Teknologi Informasi
Karya Ilmiah	: Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Hak Bedas Royalti Non-Eksekutif *(Non-Exclusive Royalty free Right)* atas penelitian skripsi saya yang berjudul:

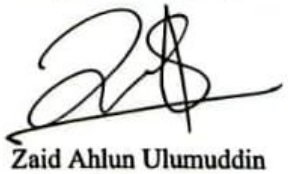
RANCANG BANGUN SISTEM BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU BERBASIS WEB3 MENGGUNAKAN NFT NON-TRANSFERABLE DENGAN SMART CONTRACT PADA JARINGAN ETHEREUM TESTNET

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksekutif ini, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara berhak menyimpan, mengalih media, memformat, mengelola dalam bentuk database, merawat dan mempublikasikan Skripsi saya ini tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemegang dan atau sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

Medan, September 2025

Yang membuat pernyataan



Zaid Ahlun Ulumuddin

NPM. 2109020184

RIWAYAT HIDUP

DATA PRIBADI

Nama Lengkap	: Zaid Ahlun Ulumuddin
Tempat dan Tanggal Lahir	: Beringin, 17 Oktober 2003
Alamat Rumah	: Jl. Medan Km. 10,5 Sinaksak-Beringin.
Telepon/Faks/HP	: 085156121869
E-mail	: zaidahlun93@gmail.com
Instansi Tempat Kerja	: -
Alamat Kantor	: -

DATA PENDIDIKAN

SD	:	TAMAT: 2015
SMP	:	TAMAT: 2018
SMA	:	TAMAT: 2021

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul "RANCANG BANGUN SISTEM BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU BERBASIS WEB3 MENGGUNAKAN NFT NON-TRANSFERABLE DENGAN SMART CONTRACT PADA JARINGAN ETHEREUM TESTNET". Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer (S.Kom) di Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Rasa terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada orang tua tercinta, Bapak **Zainal Arifin** dan Ibu **Sri Hartuti**, atas doa, dukungan moril, materiil, serta semangat yang tak pernah putus. Penyelesaian skripsi ini juga tidak terlepas dari bimbingan dan dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Agussani, MAP, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Bapak Prof. Dr. Muhammad Arifin, S.H., M.Hum, Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd, dan Bapak Assoc. Prof. Dr. Rudianto, S.Sos., M.Si, selaku Wakil Rektor I, II, dan III.
3. Bapak Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom., selaku Dekan FIKTI.

4. Bapak Halim Maulana, S.T., M.Kom., selaku Wakil Dekan I sekaligus Dosen Pembimbing.
5. Bapak Dr. Lutfi Basit, S.Sos., M.I.Kom., selaku Wakil Dekan III FIKTI.
6. Ibu Fatma Sari Hutagalung, S.Kom., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknologi Informasi.
7. Bapak Mhd Basri, S.Si, M.Kom., selaku Sekretaris Program Studi Teknologi Informasi.
8. Seluruh civitas akademika Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Teman-teman seperjuangan di Program Studi Teknologi Informasi yang telah berbagi ilmu dan semangat.

Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari sempurna dan sangat terbuka terhadap kritik serta saran yang membangun. Semoga karya ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknologi informasi.

Medan, 09 September 2025

Penulis

Zaid Ahlun Ulumuddin

ABSTRAK

Verifikasi kredensial akademik konvensional rentan terhadap pemalsuan dan seringkali tidak efisien. Penelitian ini merancang dan membangun sistem badge kelulusan digital yang aman dan transparan menggunakan teknologi Web3. Sistem ini diimplementasikan sebagai Non-Fungible Token (NFT) Non-Transferable atau Soulbound Token (SBT) pada jaringan Ethereum Testnet. Dengan metodologi Waterfall, penelitian ini mencakup pengembangan smart contract menggunakan Solidity dan framework Hardhat, serta antarmuka web berbasis React.js. Smart contract yang dihasilkan memiliki fungsionalitas penerbitan dan pencabutan massal (batch), sementara metadata NFT disimpan secara terdesentralisasi di IPFS. Untuk optimasi performa, diterapkan pola multicall pada kontrak dan paginasi (infinite scroll) pada frontend. Hasil penelitian menunjukkan sistem berhasil berfungsi sesuai perancangan. Administrator dapat mengelola badge secara efisien, dan publik dapat melakukan verifikasi instan. Implementasi SBT terbukti efektif mencegah transfer kepemilikan, sehingga menjaga integritas kredensial. Sistem ini berhasil menunjukkan potensi blockchain sebagai solusi superior untuk manajemen kredensial akademik di era digital.

Kata Kunci: NFT, Soulbound Token, Smart Contract, Blockchain, Kredensial Digital, Web3

ABSTRACT

Conventional academic credential verification is vulnerable to forgery and is often inefficient. This research designs and builds a secure and transparent digital graduation badge system using Web3 technology. The system is implemented as a Non-Fungible Token (NFT) that is Non-Transferable, or a Soulbound Token (SBT), on the Ethereum Testnet network. Using the Waterfall methodology, this research covers smart contract development with Solidity and the Hardhat framework, as well as a web interface based on React.js. The resulting smart contract has functionalities for batch issuance and revocation, while NFT metadata is stored decentrally on IPFS. For performance optimization, a multicall pattern was implemented in the contract and pagination (infinite scroll) on the frontend. The research findings show that the system successfully functions according to its design. Administrators can manage badges efficiently, and the public can perform instant verification. The implementation of SBTs proved effective in preventing ownership transfer, thereby maintaining credential integrity. This system successfully demonstrates the potential of blockchain as a superior solution for academic credential management in the digital era.

Keywords: NFT, Soulbound Token, Smart Contract, Blockchain, Digital Credentials, Web3

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL

DAFTAR GAMBAR

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Era digital telah membawa perubahan mendasar dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk di bidang pendidikan tinggi. Dalam konteks akademik, proses validasi dan pemberian penghargaan atas pencapaian seperti kelulusan mahasiswa masih banyak dilakukan secara konvensional. Sistem yang mengandalkan ijazah fisik atau dokumen digital biasa memiliki berbagai kelemahan yang signifikan, seperti rentan terhadap pemalsuan, kehilangan, serta proses verifikasi yang lambat dan manual.

Menurut Kodir (2025), pemalsuan ijazah merupakan ancaman serius yang dapat merusak reputasi lembaga pendidikan dan menurunkan kepercayaan publik. Proses verifikasi data lulusan juga tergolong tidak efisien, dapat memakan waktu antara tiga hingga lima hari, belum termasuk proses pencetakan dan distribusi ijazah fisik yang dapat memakan waktu hingga satu minggu. Selain itu, proses penginputan manual dalam sistem konvensional juga meningkatkan potensi kesalahan administrasi, yang bisa berdampak pada hasil verifikasi yang tidak akurat.

Tidak hanya dari segi efisiensi, sistem konvensional juga memiliki risiko keamanan yang tinggi. Sistem digital terpusat rawan terhadap peretasan, manipulasi data, dan penyalahgunaan informasi pribadi pengguna. Sementara itu, ketidaksesuaian format data antar institusi dan kurangnya data historis untuk

lulusan sebelum era digital juga menjadi kendala serius dalam interoperabilitas sistem (Kodir, 2025).

Menanggapi kompleksitas permasalahan tersebut, teknologi Web3 dan blockchain mulai dilirik sebagai solusi potensial yang lebih andal dan aman. Web3 menawarkan arsitektur sistem terdesentralisasi yang memberikan pengguna kendali lebih besar atas data mereka, serta menjamin transparansi dan integritas informasi melalui teknologi blockchain (Jaenudin et al., 2024). Dalam konteks ini, pemanfaatan Non-Fungible Token (NFT) sebagai representasi digital dari sertifikat akademik mulai banyak dikembangkan. Terlebih, munculnya varian NFT non-transferable atau Soulbound Token (SBT) memberikan pendekatan yang lebih tepat untuk pencapaian yang bersifat permanen seperti kelulusan (Razi et al., 2024).

Soulbound Token (SBT) merupakan jenis NFT yang tidak dapat dipindahkan dari dompet penerimanya, sehingga secara kriptografis melekat sebagai bukti otentik atas suatu pencapaian (Tumati et al., 2024). Menurut More et al. (2024), SBT sangat sesuai untuk mewakili kredensial akademik karena sifatnya yang tidak dapat diperdagangkan, meminimalkan risiko pemalsuan, dan menjaga nilai integritas gelar atau sertifikat yang diberikan. Lebih lanjut, SBT juga dapat diverifikasi secara publik melalui blockchain explorer tanpa mengungkapkan identitas pribadi, menjadikan proses verifikasi lebih aman dan efisien.

Penerapan smart contract dalam sistem ini juga menjadi keunggulan penting. Smart contract memungkinkan proses penerbitan dan validasi sertifikat dilakukan secara otomatis dan tidak dapat dimodifikasi oleh pihak manapun (Rahman et al., 2024). Dengan memanfaatkan jaringan Ethereum Testnet seperti

Sepolia, pengujian dan implementasi dapat dilakukan tanpa biaya transaksi nyata namun tetap merepresentasikan lingkungan blockchain sesungguhnya.

Di Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi (FIKTI) Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), saat ini belum tersedia sistem sertifikasi kelulusan yang berbasis blockchain. Sistem kelulusan masih menggunakan metode administratif manual dan semi-digital yang menyulitkan proses verifikasi eksternal serta tidak menjamin keaslian data secara otomatis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem badge kelulusan berbasis Web3 menggunakan NFT Non-Transferable yang diimplementasikan melalui smart contract pada jaringan Ethereum Testnet. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif untuk sertifikasi akademik yang lebih aman, transparan, dan efisien, serta mendukung transformasi digital di lingkungan perguruan tinggi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem badge kelulusan mahasiswa berbasis Web3 menggunakan NFT Non-Transferable (Soulbound Token)?
2. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan smart contract untuk penerbitan badge kelulusan pada jaringan Ethereum Testnet(Sepolia)?
3. Bagaimana membangun antarmuka sistem yang memungkinkan verifikasi publik terhadap badge kelulusan tanpa mengharuskan mahasiswa memiliki dompet digital pribadi?

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap fokus dan terarah, maka batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian hanya berfokus pada penerbitan dan manajemen badge kelulusan mahasiswa FIKTI UMSU, tidak mencakup sistem akademik kampus secara menyeluruh.
2. Smart contract dikembangkan dan diuji pada jaringan Ethereum Testnet (Sepolia), bukan pada Ethereum Mainnet.
3. Badge kelulusan diterbitkan dalam bentuk NFT Non-Transferable (Soulbound Token), sehingga tidak dapat dipindahtangankan antar pengguna.
4. Mahasiswa tidak diwajibkan memiliki dompet digital pribadi; verifikasi badge dapat dilakukan melalui antarmuka web publik yang terhubung dengan blockchain.
5. Badge yang sudah diterbitkan tidak dapat diubah atau dimodifikasi isinya, namun admin memiliki wewenang untuk mencabut validitas badge melalui mekanisme revocation (soft revoke maupun hard revoke).
6. Sistem dikembangkan hanya dengan frontend yang terintegrasi langsung dengan blockchain tanpa menggunakan backend server terpusat.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Membangun sistem badge kelulusan digital berbasis Web3 dengan penerapan NFT Non-Transferable (Soulbound Token) sebagai bentuk

kredensial akademik permanen.

2. Mengimplementasikan smart contract menggunakan bahasa Solidity pada jaringan Ethereum Testnet untuk menerbitkan dan mengelola badge kelulusan secara otomatis.
3. Menyediakan antarmuka web yang memungkinkan mahasiswa dan pihak eksternal memverifikasi keaslian badge kelulusan secara publik tanpa memerlukan login atau otorisasi wallet.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Praktis:

a. Memberikan solusi teknologi yang efisien dan aman untuk proses sertifikasi kelulusan di lingkungan FIKTI UMSU.
b. Mengurangi risiko pemalsuan dokumen, kehilangan data, dan keterlambatan distribusi ijazah.
c. Mempermudah proses verifikasi akademik oleh instansi luar seperti perusahaan atau lembaga beasiswa melalui blockchain explorer tanpa perlu kontak langsung dengan pihak kampus.

2. Manfaat Teoritis:

a. Menjadi kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi Web3, khususnya penerapan NFT Non-Transferable (SBT) dalam konteks pendidikan tinggi.
b. Menambah referensi penelitian tentang penggunaan smart contract dan

desentralisasi data akademik di perguruan tinggi Indonesia.

3. Manfaat Sosial dan Inovasi:

a. Mendukung upaya transformasi digital dalam administrasi akademik dan meningkatkan citra institusi sebagai kampus berbasis teknologi.
b. Membuka peluang untuk adopsi lebih luas terkait kredensial digital di sektor pendidikan nasional maupun internasional.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Badge Kelulusan

Badge kelulusan digital merupakan representasi visual dan data digital dari pencapaian akademik mahasiswa yang disimpan dan dapat diverifikasi secara elektronik. Badge digital adalah mikro-kredensial yang diberikan untuk menunjukkan keterampilan, kemampuan, dan pengetahuan tertentu yang telah dikuasai oleh seorang individu (Chukowry et al., 2021). Berbeda dengan sertifikat fisik tradisional, badge digital mengadopsi konsep ini ke dalam ranah daring, membawa kekuatan dan validitas melalui metadata yang melekat padanya. Metadata ini merupakan informasi terstruktur yang secara spesifik menghubungkan badge dengan nama penerima, institusi penerbit, dan kriteria yang telah dipenuhi untuk menunjukkan penguasaan suatu kompetensi atau pencapaian. Secara spesifik, sistem menyematkan informasi seperti id unik badge, image itu sendiri, dan data penerima ke dalam badge digital, menjadikannya aman dan dapat diverifikasi.

Peran utama badge digital dalam ekosistem pendidikan adalah untuk memperkaya dan meningkatkan nilai gelar serta transkrip tradisional. Dengan menyediakan kredensial yang dapat diverifikasi secara instan, badge digital secara jelas menunjukkan keterampilan dan keahlian spesifik yang dimiliki oleh seseorang, melengkapi informasi yang lebih umum pada ijazah konvensional. Dalam konteks kredensial berbasis blockchain, badge digital berfungsi sebagai representasi visual dari kompetensi yang telah dicapai, menjadi identitas digital yang dapat diakses dan diverifikasi secara global (Chukowry et al., 2021).

Kemampuan badge digital untuk mendokumentasikan dan berbagi pengalaman berharga yang mungkin tidak tercakup dalam mata kuliah atau transkrip tradisional sangat signifikan. Hal ini memungkinkan pembelajar untuk membangun narasi yang lebih lengkap tentang diri mereka dan apa yang membedakan mereka dari pencari kerja lain, memberikan gambaran yang lebih holistik tentang kemampuan mereka.

2.2. Blockchain

Blockchain adalah teknologi penyimpanan data terdistribusi yang bersifat immutable (tidak dapat diubah) dan transparan. Setiap transaksi dicatat dalam blok yang saling terhubung secara kronologis dan diverifikasi oleh jaringan komputer (nodes) yang tersebar secara desentralisasi. Blockchain menjamin keaslian dan integritas data karena seluruh aktivitas dicatat secara publik dan terenkripsi secara kriptografis (Razi et al., 2024).

Menurut Geraldina et al. (2024), Blockchain adalah sebuah buku besar digital yang didistribusikan di seluruh jaringan komputer. Ini bukan hanya sekadar database biasa; karakteristik utamanya terletak pada sifatnya yang tidak dapat diubah dan transparan. Konsep blockchain modern pertama kali diperkenalkan oleh seseorang atau sekelompok orang yang dikenal dengan pseudonim Satoshi Nakamoto pada tahun 2008 melalui publikasi whitepaper "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System", dan diimplementasikan sebagai komponen inti dari mata uang kripto Bitcoin pada tahun 2009. Meskipun demikian, ide dasar dari rantai blok yang aman secara kriptografis sebenarnya telah ada sejak tahun 1991, dikembangkan oleh Stuart Haber dan W. Scott Stornetta.

Setiap entri data, atau yang disebut transaksi, dikelompokkan ke dalam sebuah blok. Blok-blok ini kemudian saling terhubung satu sama lain dalam urutan kronologis, membentuk sebuah "rantai" yang terus bertambah panjang. Keamanan dan validitas data dijamin melalui proses verifikasi oleh banyak komputer atau node yang tersebar secara desentralisasi, memastikan keaslian dan integritas setiap informasi karena semua aktivitas dicatat secara publik dan dilindungi oleh enkripsi kriptografis (Razi et al., 2024). Dengan struktur yang terdesentralisasi, blockchain meminimalkan kebutuhan akan perantara, sehingga mengurangi biaya dan meningkatkan efisiensi dalam berbagai.

2.3. Web3

Web3 merupakan generasi baru dari internet yang mengedepankan desentralisasi, transparansi, dan kepemilikan data oleh pengguna. Berbeda dengan Web2 yang didominasi oleh otoritas pusat atau server, Web3 memungkinkan pengguna untuk berinteraksi langsung dengan aplikasi berbasis blockchain menggunakan dompet digital (wallet) tanpa perlu perantara (Jaenudin et al., 2024). Dalam konteks pendidikan, Web3 bahkan membuka peluang untuk penerapan kredensial digital yang dapat diverifikasi secara publik namun tetap aman.

Web3 merepresentasikan ketiga internet, sebuah evolusi yang signifikan dari pendahulunya, Web1 dan Web2. Web3 secara fundamental mendefinisikan ulang kepemilikan dan kontrol internet (Khatwani et al., 2023). Web1, yang dikenal sebagai Read-Only Web, adalah fase awal internet, ditandai dengan halaman web statis yang hanya memungkinkan pengguna untuk membaca informasi tanpa banyak interaksi (Khatwani et al., 2023). Kemudian datang Web2, sebuah era yang didefinisikan oleh sentralisasi di mana raksasa teknologi mendominasi platform dan

pengguna sangat bergantung pada entitas terpusat ini. Web2 sangat mengandalkan platform terpusat dan perantara untuk manajemen serta tata kelola data. Konsentrasi kekuasaan ini menimbulkan kekhawatiran serius tentang privasi data, pengawasan, dan pengaruh perusahaan pada diskursus online, mengingat sebagian besar lalu lintas internet global mengalir melalui segelintir raksasa teknologi (Khatwani et al., 2023). Kini, Web3 hadir sebagai era internet yang terdesentralisasi dan mengutamakan pemberdayaan pengguna, serta interaksi tanpa kepercayaan (trustless interactions). Tujuannya adalah untuk mendemokratisasi kepemilikan dan kontrol internet, memungkinkan pengguna untuk merebut kembali kedaulatan atas identitas dan aktivitas digital mereka (Khatwani et al., 2023).

Teknologi fundamental yang memungkinkan Web3 adalah teknologi blockchain. Teknologi ini memfasilitasi pengembangan aplikasi terdesentralisasi (dApps), identitas berdaulat sendiri (self-sovereign identity), dan teknologi peningkatan privasi (Khatwani et al., 2023). Implementasi Web3 memperkenalkan beberapa fitur baru untuk meningkatkan privasi, kepemilikan, dan otonomi pengguna. Ini termasuk mekanisme Single-Sign-On anonim yang menghilangkan kebutuhan akan banyak login di berbagai situs web, menyederhanakan pengalaman pengguna.

Selain itu, kepemilikan individu dan tokenisasi memberikan penghargaan kepada pengguna atas kontribusi mereka ke jaringan melalui kepemilikan aset digital yang dikonversi menjadi token di blockchain. Adanya sistem tata kelola mandiri juga memastikan pengambilan keputusan yang demokratis, memungkinkan pengguna untuk berpartisipasi dalam tata kelola platform berdasarkan tingkat investasi atau kontribusi mereka (Khatwani et al., 2023).

Tabel 2. 1. Perbedaan Utama Web2 dan Web3

Aspek	**Web2**	**Web3**
Mode Operasi	Terpusat, dikendalikan oleh perusahaan besar	Desentralisasi, tanpa entitas tunggal yang mengontrol
Kepemilikan Konten/Data	Data dikuasai platform (mis. Google, Facebook).	Data dikuasai pengguna (melalui blockchain, dompet digital).
Keamanan	Rentan terhadap kebocoran data dan serangan siber.	Lebih aman dengan enkripsi dan blockchain, sulit diretas.
Monetisasi	Mengandalkan iklan.	Menggunakan cryptocurrency dan NFT, model ekonomi berbasis token.
Peran Perantara	Ada perantara (pihak ketiga) dalam transaksi dan interaksi.	Tanpa perantara, transaksi langsung.
Arsitektur	Server terpusat, model client-server.	Berbasis blockchain, Peer-to-Peer (P2P), smart contract.

2.4. Non-Fungible Token (NFT)

Non-Fungible Token (NFT) adalah aset digital unik yang berbasis blockchain dan tidak dapat dipertukarkan dengan NFT lainnya (Razi et al., 2024). NFT umumnya mengikuti standar ERC-721 pada jaringan Ethereum dan digunakan untuk merepresentasikan kepemilikan terhadap aset digital tertentu seperti karya seni, koleksi, maupun sertifikat digital. Setiap NFT memiliki metadata yang menyimpan informasi spesifik seperti nama, deskripsi, dan file media, yang seringkali disimpan di sistem terdesentralisasi seperti IPFS (Tumati et al., 2024).

Standar Non-Fungible Token (NFT) ERC-721 adalah kerangka teknis yang mendefinisikan aturan dan antarmuka untuk membuat dan mengelola token unik yang tidak dapat dipertukarkan (NFT) di blockchain Ethereum (Entriken et al., 2018). Standar ini diakui karena memformalkan konsep NFT dan meletakkan dasar ekosistem koleksi digital bernilai miliaran dolar (Entriken et al., 2018). ERC-721 dikembangkan melalui upaya komunitas dan secara formal diterbitkan dalam sebuah makalah pada tahun 2018. Para penulis yang diakreditasi dengan pengembangannya adalah William Entriken, Dieter Shirley, Jacob Evans, dan Nastassia Sachs (Entriken et al., 2018). ERC merupakan singkatan dari (Ethereum Request for Comments), yang merupakan bagian dari proses peer-review komunitas Ethereum untuk proposal baru, dan (721) adalah pengidentifikasi unik yang ditetapkan secara arbitrer (Entriken et al., 2018).

2.5. Soulbound Token (SBT)

Soulbound Token (SBT) adalah inovasi terbaru dalam ekosistem aset digital, yang merupakan bentuk khusus dari Non-Fungible Token (NFT). Namun, yang membedakannya secara fundamental adalah sifatnya yang non-transferable atau tidak dapat dipindahtangankan, dan secara permanen melekat pada wallet penerima (Tumati et al., 2024). Ini berarti, tidak seperti NFT pada umumnya yang bisa diperjualbelikan atau ditransfer antar pengguna di marketplace, SBT dirancang untuk terikat secara permanen pada alamat wallet tertentu setelah dicetak. Konsep ini pertama kali diusulkan secara rinci oleh Vitalik Buterin, pendiri Ethereum, bersama dengan Puja Ohlhaver dan E. Glen Weyl, dalam makalah "Decentralized Society: Finding Web3's Soul" pada tahun 2022. Mereka membayangkan SBT sebagai representasi dari "jiwa" digital yang akan membentuk fondasi bagi masyarakat terdesentralisasi (Decentralized Society - DeSoc), di mana identitas dan reputasi digital menjadi inti dari interaksi di Web3 (Buterin et al., 2022).

SBT utamanya digunakan untuk merepresentasikan identitas, kredensial, atau pencapaian yang bersifat pribadi dan tidak dapat dialihkan (Tumati et al., 2024). Bayangkan SBT sebagai bukti digital yang tak terhapuskan dari suatu prestasi atau karakteristik diri. Contoh umum penggunaannya mencakup representasi gelar akademik yang telah diraih, sertifikat pelatihan yang telah diselesaikan, atau badge kelulusan dari suatu program. Misalnya, sebuah universitas dapat mencetak SBT untuk setiap mahasiswa yang lulus, mengikat gelar mereka secara permanen ke wallet digital mereka. Ini akan berfungsi sebagai bukti otentik yang tidak dapat dipalsukan atau dipindahtangankan kepada orang lain,

menawarkan tingkat integritas yang jauh lebih tinggi dibandingkan sertifikat fisik atau digital yang rentan duplikasi (Buterin et al., 2022).

2.6. Smart Contract

Smart contract, yang juga dikenal sebagai crypto-contracts, merupakan kontrak digital yang mampu mengeksekusi dirinya sendiri dengan aturan yang telah ditentukan dan ditulis dalam kode (Rahman et al., 2024). Konsep inovatif ini pertama kali diusulkan oleh Nick Szabo pada tahun 1990-an, jauh sebelum kemunculan teknologi blockchain, sebagai sebuah metode untuk mengotomatisasi perjanjian hukum.

Mekanisme operasional smart contract melibatkan penyimpanan program tersebut di dalam blockchain. Program ini kemudian akan berjalan secara otomatis begitu semua kondisi yang telah ditentukan terpenuhi dan diverifikasi oleh jaringan (Rahman et al., 2024). Hal ini memberikan kepastian instan bagi semua pihak yang terlibat dalam perjanjian, tanpa perlu lagi mengandalkan perantara. Sebagai contoh, jika sebuah kontrak digital menetapkan bahwa kepemilikan suatu aset akan beralih kepada siapa pun yang membayarnya, maka pengiriman harga yang diminta ke kontrak akan secara otomatis memperbarui buku besar digital untuk mencerminkan pemilik baru tersebut. Pada dasarnya, smart contract terdiri dari dua komponen utama yaitu data dan kumpulan kode. Data merepresentasikan keadaan kontrak pada waktu tertentu, sementara kode membentuk fungsi-fungsi yang dapat dieksekusi oleh kontrak. Kedua bagian ini memiliki alamatnya sendiri di jaringan blockchain. Dalam ekosistem Ethereum, semua smart contract diperlakukan sebagai jenis akun tersendiri. Ini berarti setiap smart contract memiliki kemampuan untuk memulai transaksi dan menyimpan saldo mata uang kripto,

memungkinkannya untuk berinteraksi dengan kontrak lain dan pengguna di jaringan (Rahman et al., 2024).

Smart contract ditulis menggunakan bahasa pemrograman seperti Solidity, yang dirancang khusus untuk pengembangan kontrak pintar pada jaringan Ethereum (Hajdu & Jovanović, 2020). Solidity adalah bahasa pemrograman berorientasi kontrak dengan sintaks yang mirip dengan bahasa berorientasi objek seperti JavaScript atau Java. Struktur smart contract terdiri dari beberapa komponen penting, setiap file Solidity diawali dengan deklarasi versi compiler menggunakan perintah seperti pragma solidity 0.8.7; yang digunakan untuk menentukan kompatibilitas kode dengan versi compiler tertentu, kata kunci contract digunakan untuk mendefinisikan nama kontrak yang akan dibuat (Hajdu & Jovanović, 2020).

2.7. Ethereum dan Ethereum Tesnet

Ethereum adalah platform blockchain terdesentralisasi yang secara fundamental mendukung eksekusi smart contract (Javed et al., 2025). Platform ini menyediakan lingkungan yang aman dan fleksibel untuk membangun aplikasi terdesentralisasi (dApps) dengan dukungan bahasa pemrograman Solidity. Ethereum dapat dipahami sebagai sebuah mesin keadaan (state machine) di mana "keadaan" merupakan snapshot dari blockchain pada waktu tertentu. Misalnya, saldo semua akun atau nilai variabel dalam smart contract dan transaksi berperan sebagai pemicu yang menghasilkan perubahan keadaan tersebut (Javed et al., 2025). Blockchain Ethereum beroperasi menggunakan P2P overlay untuk mengirimkan transaksi antar node. Setiap blok adalah struktur data yang menyimpan nol atau lebih transaksi, dan setiap node menjalankan klien Ethereum yang mematuhi protokol Ethereum. Konsensus di Ethereum dicapai menggunakan versi modifikasi

dari protokol GHOST, memastikan setiap node mempertahankan salinan blockchain yang sama.

Menurut Javed et al. (2025), Ethereum Virtual Machine (EVM) adalah lingkungan eksekusi Turing-complete yang memungkinkan berbagai aplikasi berjalan melalui smart contract. Ketika sebuah transaksi menargetkan smart contract, kontrak tersebut dieksekusi di EVM. Karena EVM biasanya tertanam dalam setiap klien Ethereum, eksekusi smart contract mengonsumsi sumber daya komputasi (CPU, disk, network) dari setiap node yang berpartisipasi. Model eksekusi Ethereum saat ini sangat bergantung pada pemrosesan sekuensial, yang menciptakan hambatan signifikan untuk tuntutan skalabilitas di masa depan (Xu et al., 2020).

Mekanisme gas di Ethereum dirancang untuk membebankan biaya eksekusi (gas) kepada pengirim transaksi. Ini berfungsi sebagai mekanisme perlindungan terhadap penyalahgunaan sumber daya ketika mengeksekusi smart contract yang mengonsumsi sumber daya komputasi signifikan, memastikan smart contract yang berjalan di EVM pada akhirnya akan dihentikan (Javed et al., 2025). Uang yang dibayarkan untuk mengeksekusi operasi EVM (misalnya, penambahan, perkalian, membaca saldo akun) adalah perkalian harga gas dengan biaya gas operasi tersebut. Harga gas menunjukkan nilai satu unit gas dan dapat diatur oleh pengirim transaksi, sementara biaya gas operasi EVM merepresentasikan unit gas yang diperlukan untuk mengeksekusi operasi dan ditentukan oleh EVM di klien Ethereum. Setiap transaksi memiliki Transaction Gas Limit (TGL), dan jika eksekusi smart contract memerlukan lebih banyak gas daripada TGL, itu akan memicu pengecualian out-of-gas. Harga gas dapat melonjak selama periode permintaan tinggi, membuat

Ethereum tidak terjangkau bagi banyak pengguna (Xu et al., 2020). Menentukan biaya gas yang tepat untuk setiap operasi bukanlah hal yang mudah, karena memerlukan pemahaman mendalam tentang internal EVM, pengukuran konsumsi sumber daya yang akurat, dan kesadaran akan harga pasar untuk sumber daya komputasi. Biaya gas yang tidak tepat dapat menyebabkan serangan Denial of Service (DoS) dengan mengeksploitasi operasi yang under-priced (Javed et al., 2025).

Ethereum, yang beroperasi sejak Juli 2015, awalnya diamankan oleh protokol Proof-of-Work (PoW) selama lebih dari tujuh tahun (Rong et al., 2023). Transisi monumental ke Proof-of-Stake (PoS), yang dikenal sebagai "The Merge," terjadi pada September 2022. Dalam sistem PoS, validator memverifikasi transaksi baru dengan mempertaruhkan aset Ethereum mereka sebagai jaminan, alih-alih memecahkan masalah komputasi yang intensif energi. Validator dipilih melalui algoritma pseudo-acak yang dikenal sebagai RANDAO (Rong et al., 2023).

Transisi Ethereum ke PoS merupakan langkah kritis menuju keberlanjutan dan skalabilitas, namun juga menimbulkan tantangan sentralisasi yang baru. Dampak kunci dari transisi ini sangat signifikan: Konsumsi energi berkurang drastis sebesar 99.98% (Rong et al., 2023). Pendapatan hadiah blok total (dalam USD) telah turun 97%, dan pengurangan hadiah blok telah sangat memperlambat pencetakan ETH baru, dengan sekitar 1600 ETH baru dicetak setiap hari untuk validator. Tingkat pembakaran kini berpotensi melebihi tingkat penerbitan, menyebabkan pasokan ETH menjadi deflasi (Rong et al., 2023). Kecepatan pembuatan blok kini stabil pada 12 detik, peningkatan kecepatan 18.9% (Entriken et al., 2018). Namun, lebih sedikit transaksi yang disertakan dalam setiap blok,

sehingga transaksi per detik (TPS) sebenarnya turun 58.2%. Konsentrasi validator menunjukkan jaringan 19% lebih tidak terkonsentrasi setelah merge, dengan indeks Herfindahl untuk 10 validator teratas adalah 1009 (Rong et al., 2023).

Tabel 2. 2. Dampak Transisi Ethereum dari Proof of Work ke Proof of Stake

Kriteria	**Sebelum Merge (PoW)**	**Setelah Merge (PoS)**
Konsumsi Energi	Tinggi (93.975 TWh/tahun)	Sangat Rendah (0.015 TWh/jam) (turun 99.98%)
Pendapatan Hadiah Blok	Tinggi	Sangat Rendah (turun 97%)
Pasokan ETH	Inflasi	Deflasi (potensial)
Kecepatan Pembuatan Blok	Rata-rata 14.98 detik	Stabil 12 detik (peningkatan 18.9%)
Transaksi per Detik (TPS)	~33.51 TPS	~14.01 TPS (turun 58.2%)
Konsentrasi Jaringan	Lebih Terkonsentrasi (Herfindahl index 1245)	Sedikit Kurang Terkonsentrasi (Herfindahl index 1159)

Ethereum testnet adalah versi alternatif dari main Ethereum blockchain yang memungkinkan pengembang untuk menguji dan bereksperimen dengan fitur

baru, smart contract, dan dApps tanpa menggunakan Ether (ETH) asli atau mempertaruhkan dana di mainnet (Javed et al., 2025). Mereka menggunakan testnet cryptocurrency yang tidak memiliki nilai dunia nyata. Testnet menyediakan lingkungan pengujian yang aman, hemat biaya, dan realistis. Peran vital testnet dalam inovasi dan mitigasi risiko pengembangan blockchain yang cepat tidak dapat diabaikan. Dalam lanskap blockchain yang bergerak cepat, testnet bukan hanya alat pengujian, tetapi komponen infrastruktur yang krusial untuk inovasi yang aman. Mereka memungkinkan pengembang untuk beriterasi dengan cepat, mengidentifikasi kerentanan, dan memvalidasi peningkatan protokol sebelum dampak finansial dan keamanan yang signifikan di mainnet, sehingga mempercepat adopsi teknologi blockchain secara keseluruhan.

Perbandingan dua testnet utama Ethereum, Goerli dan Sepolia, sangat relevan bagi pengembang. Goerli Testnet adalah testnet PoS yang dirancang untuk mensimulasikan perilaku mainnet Ethereum. Diluncurkan awal 2019, Goerli dikenal karena stabilitas, kecepatan, dan biaya transaksi rendah (Javed et al., 2025). Goerli menggunakan mekanisme konsensus Proof-of-Authority (PoA) di mana validator yang telah disetujui sebelumnya bertanggung jawab untuk membuat dan memvalidasi blok. Goerli telah didepresiasi pada Q1 2023 dan didukung hingga Q4 2023; pengembang disarankan untuk bermigrasi ke Sepolia.

Sebaliknya, Sepolia Testnet juga merupakan testnet PoS dan saat ini merupakan testnet default yang direkomendasikan untuk pengembangan smart contract (Javed et al., 2025). Sepolia awalnya merupakan jaringan uji pribadi tetapi menjadi publik selama Shapella upgrade pada Maret 2023. Sepolia memiliki validator set yang memiliki izin (permissioned validator set), yang dikontrol oleh

tim inti dan tim pengujian. Jaringan Sepolia mengatasi masalah pasokan token yang terlihat di Goerli dengan menyebarkan jaringan dengan pasokan ETH yang tidak terbatas (uncapped supply) (Javed et al., 2025)

Tabel 2. 3. Perbandingan Ethereum Testnet (Goerli vs. Sepolia)

Kriteria	**Goerli**	**Sepolia**
Status	Deprecated (didukung hingga Q4 2023)	Aktif & Direkomendasikan
Konsensus Mekanisme	Proof-of-Stake (sebelumnya PoA)	Proof-of-Stake
Validator Set	Kurang terkontrol (masalah pasokan ETH)	Permissioned (dikontrol tim inti)
Pasokan Test ETH	Terbatas (sering bermasalah)	Tidak terbatas (mengatasi masalah Goerli)
Ukuran Jaringan/Waktu Sinkronisasi	Lebih besar (waktu sinkronisasi lebih lama)	Lebih kecil (waktu sinkronisasi lebih cepat)
Rekomendasi	Tidak direkomendasikan untuk pengembangan baru	Direkomendasikan untuk pengembangan smart contract

2.8. IPFS (InterPlanetary File System)

IPFS (InterPlanetary File System) adalah sebuah sistem berkas terdistribusi revolusioner yang digunakan untuk menyimpan dan berbagi data secara terdesentralisasi (Tumati et al., 2024). Berbeda dengan sistem penyimpanan tradisional yang mengandalkan server pusat tunggal, IPFS tidak memiliki satu titik kegagalan sentral. Sebaliknya, ia menyebarkan dan mendistribusikan data melalui jaringan node-node yang luas, dengan tujuan ambisius untuk menghubungkan semua perangkat komputasi ke dalam sebuah sistem berkas yang terpadu (Wu et al., 2021). Namun, perlu dicatat bahwa meskipun konsep awal IPFS dipublikasikan pada tahun 2014, implementasi dan adopsinya telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir, menjadikannya relevan untuk studi saat ini.

IPFS beroperasi berdasarkan prinsip content addressing dan struktur Merkle DAG (Directed Acyclic Graphs) (Wu et al., 2021). Dalam IPFS, setiap konten diidentifikasi secara unik oleh multihash checksum-nya. Ini berarti bahwa, alih-alih merujuk lokasi file (seperti URL HTTP yang menunjuk ke server tertentu), IPFS merujuk langsung ke konten file itu sendiri. Jika konten file berubah, hash-nya juga akan berubah, menghasilkan pengidentifikasi yang berbeda (Wu et al., 2021). IPFS membangun Merkle DAG di mana tautan antar objek adalah cryptographic hashes dari target yang tertanam dalam sumber, sebuah struktur yang mirip dengan model data Git (Wu et al., 2021). Properti utama dari Merkle DAG ini meliputi ketahanan terhadap perusakan (tamper resistance), karena semua konten diverifikasi dengan checksum-nya, memungkinkan deteksi instan terhadap perusakan atau korupsi data. Selain itu, terdapat deduplikasi, di mana semua objek dengan konten yang persis

sama dianggap identik dan hanya disimpan sekali, yang mengarah pada penyimpanan yang sangat efisien (Wu et al., 2021).

Integrasi IPFS dengan blockchain sangat penting untuk menyimpan file besar seperti metadata NFT. IPFS memungkinkan blockchain untuk mengelola volume data yang tinggi tanpa memengaruhi kinerja jaringan (Tumati et al., 2024). Ketika sebuah NFT dicetak, metadata dan file media diunggah ke IPFS, dan unique content identifier (CID) yang dihasilkan disimpan di blockchain sebagai tokenURI. Pendekatan ini secara signifikan mengurangi permintaan penyimpanan on-chain, menghasilkan ukuran blok yang lebih kecil, peningkatan throughput, dan waktu blok yang lebih baik dibandingkan dengan penyimpanan blockchain saja (Tumati et al., 2024). Ini adalah solusi yang efisien dan aman untuk mengelola data bervolume tinggi, dan relevansinya meluas ke berbagai sektor, termasuk penyimpanan data IoT.

2.9. Penelitian Terkait

Penelitian terkait teknologi blockchain dan turunannya telah berkembang pesat dalam dekade terakhir, mencerminkan peningkatan minat terhadap potensi desentralisasi, keamanan, dan transparansi dalam berbagai bidang. Berikut adalah tinjauan beberapa penelitian terkait yang relevan.

Tabel 2. 4. Penelitian Terkait

No.	Tahun	Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian (Rangkuman)
1	2021	Alam et al.	A Blockchain-based framework for secure	Mengembangkan kerangka kerja blockchain yang efektif untuk penerbitan dan verifikasi

No.	Tahun	Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian (Rangkuman)
			Educational Credentials	kredensial pendidikan yang aman. Ditemukan bahwa immutability dan transparansi blockchain mengatasi masalah pemalsuan dan meningkatkan kepercayaan publik.
2	2018	Turkanović et al.	EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform	Menunjukkan keberhasilan platform EduCTX berbasis blockchain dalam menyimpan dan mengelola catatan akademik. Disimpulkan bahwa teknologi ini meningkatkan kepercayaan dan mengurangi beban administratif verifikasi kredensial pendidikan.
3	2024	Geraldina & Sihotang	Mengintegrasikan Teknologi Blockchain dalam Pendidikan Tinggi pada Transparansi serta Keamanan dalam	Hasil penelitian menunjukkan integrasi blockchain untuk penerbitan badge kelulusan digital sangat relevan dan menjamin keaslian serta integritas data, menjadikannya ideal untuk kredensial digital yang aman dan dapat diverifikasi.

No.	Tahun	Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian (Rangkuman)
			Kredensial Akademik	
4	2022	Buterin, Ohlhaver, & Weyl	Decentralized Society: Finding Web3's Soul	Mengusulkan konsep Soulbound Token (SBT) sebagai representasi "jiwa" digital yang tidak dapat dipindahtangankan. Ini adalah fondasi bagi masyarakat terdesentralisasi (DeSoc) di mana identitas dan reputasi digital menjadi inti interaksi Web3.
5	2024	Tumati et al.	A Soulbound Token Certificate Verification System (SBTCert): Design and Implementation	Meninjau potensi SBT sebagai paradigma baru untuk identitas digital. Ditemukan bahwa sifat non-transferable SBT sangat relevan untuk verifikasi identitas dan kredensial yang aman, menghilangkan risiko pemalsuan atau transfer tidak sah.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu yang dirangkum dalam tabel di atas, berbagai studi telah menunjukkan efektivitas teknologi blockchain dan turunannya dalam konteks manajemen data terdesentralisasi dan kredensial digital. Penelitian oleh Alam et al. (2021) dan Turkanović et al. (2018) secara eksplisit

mendukung penggunaan blockchain untuk verifikasi kredensial akademik yang aman dan peningkatan kepercayaan. Hal ini sejalan dengan pandangan Geraldina et al. (2024) yang melihat blockchain sebagai solusi ideal untuk menjamin keaslian badge kelulusan digital.

Lebih lanjut, konsep Soulbound Token (SBT) yang diusulkan oleh Buterin et al. (2022) dan didukung oleh Tumati et al. (2024) menawarkan solusi spesifik untuk kredensial non-transferable. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut memberikan landasan teoritis dan teknis yang kuat untuk pengembangan sistem badge kelulusan digital berbasis blockchain. Meskipun konsep-konsep dasar telah banyak dibahas, implementasi spesifik dari NFT non-transferable (SBT) untuk kredensial akademik, terutama di lingkungan yang terintegrasi penuh seperti yang diusulkan penelitian ini, masih merupakan area yang menjanjikan untuk kontribusi baru dan validasi empiris.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian rekayasa perangkat lunak (RPL). RPL merupakan pendekatan sistematis terhadap pengembangan, pengoperasian, dan pemeliharaan perangkat lunak. Dalam konteks ini, penelitian berfokus pada keseluruhan siklus hidup perangkat lunak, mulai dari perancangan arsitektur, pengembangan komponen, hingga pengujian sistem. Sistem yang akan dibangun adalah badge kelulusan digital non-transferable berbasis Non-Fungible Token (NFT) yang diimplementasikan menggunakan smart contract pada jaringan Ethereum tesnet (sepolia).

Tujuan utama dari penelitian ini tidak hanya terletak pada aspek teknis pembangunan sistem, melainkan juga untuk mendemonstrasikan bagaimana adopsi teknologi Web3, khususnya blockchain dan NFT, mampu secara signifikan meningkatkan transparansi, validitas, dan keamanan sertifikat akademik dalam ekosistem pendidikan tinggi. Dengan memanfaatkan sifat desentralisasi dan imutabilitas blockchain, integritas data kelulusan dapat dipastikan, mengatasi potensi pemalsuan dan mempermudah proses verifikasi.

Dengan mengaplikasikan metodologi RPL, sistem yang dikembangkan diharapkan memenuhi standar kualitas tinggi, dapat diukur, dan memiliki tingkat keandalan yang memadai untuk implementasi nyata. Pendekatan ini memastikan bahwa proses pengembangan berjalan terstruktur, terdokumentasi, dan setiap tahapan dapat dievaluasi secara objektif.

3.2. Metode Pengembangan Sistem

Metode pengembangan sistem yang diterapkan dalam penelitian ini adalah model Waterfall (air terjun). Model ini mengadopsi pendekatan linier dan sekuensial yang ketat, di mana setiap fase harus diselesaikan sepenuhnya dan divalidasi sebelum tahapan berikutnya dapat dimulai. Pemilihan model Waterfall didasari oleh beberapa pertimbangan relevan dengan karakteristik proyek ini. Pertama, model ini menawarkan struktur yang jelas dan terdefinisi, di mana setiap fase menghasilkan deliverable yang spesifik dan terukur, memudahkan manajemen proyek dan pengawasan kemajuan. Kebutuhan untuk sistem badge kelulusan digital, terutama logika inti smart contract, cenderung dapat didefinisikan dengan jelas di awal proyek. Hal ini meminimalkan risiko perubahan besar di tengah pengembangan, yang sangat krusial untuk proyek berbasis blockchain di mana perubahan smart contract setelah deployment dapat menjadi kompleks dan berisiko. Waterfall mendorong dokumentasi yang komprehensif di setiap tahap, sangat bermanfaat untuk pemeliharaan sistem di masa mendatang dan replikasi oleh pihak lain. Terakhir, dengan penekanan pada penyelesaian setiap tahap, model ini membantu dalam mengidentifikasi dan memperbaiki masalah di awal siklus pengembangan, sehingga menghasilkan produk akhir yang lebih matang.

3.2.1. Analisis Kebutuhan

Tahap ini merupakan fondasi vital untuk mengidentifikasi, mengumpulkan, dan merumuskan secara detail kebutuhan fungsional dan non-fungsional dari sistem yang akan dibangun. Subjek utama pengumpulan kebutuhan adalah admin fakultas (sebagai pihak yang bertanggung jawab dalam penerbitan badge) dan

mahasiswa/publik (sebagai verifikator badge). Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi metode:

1. Studi Literatur: Peninjauan terhadap literatur terkait sistem sertifikasi digital, standar token NFT (ERC-721), konsep Soulbound Token (SBT), dan praktik terbaik dalam pengembangan smart contract.
2. Wawancara Informal: Dilakukan dengan perwakilan dari bagian administrasi akademik fakultas dan mahasiswa untuk memahami alur kerja manual yang ada, mengidentifikasi pain points, serta menggali ekspektasi dan fitur yang diinginkan dari sistem baru.
3. Observasi Sistem Konvensional: Mengamati proses penerbitan dan verifikasi sertifikat kelulusan yang saat ini berjalan secara konvensional untuk mengidentifikasi potensi otomatisasi, celah keamanan, dan area yang dapat ditingkatkan dengan teknologi blockchain.

3.2.2. Perancangan

Pada fase ini, kebutuhan yang telah diidentifikasi akan diterjemahkan ke dalam rancangan dan komponen sistem yang detail. Rancangan ini mencakup:

1. Perancangan Sistem: Penentuan struktur keseluruhan sistem, termasuk interaksi antara komponen frontend, smart contract, dan jaringan blockchain.
2. Perancaangan Antarmuka Pengguna (UI/UX): Perancangan visual dan interaksi pengguna untuk dashboard admin dan mahasiswa/publik, dengan fokus pada user-friendliness, responsivitas, dan estetika.
3. Perancangan Struktur Data: Meskipun data utama akan disimpan di

blockchain, perancangan ini mencakup struktur metadata badge yang disimpan on-chain dan potensi penyimpanan data off-chain jika diperlukan (misalnya, untuk detail profil pengguna atau log sistem).

4. Perancangan Logika Smart Contract: Perancangan fungsi-fungsi smart contract secara rinci, termasuk variabel, event, modifier, dan penanganan error. Aspek krusial pada tahap ini adalah modifikasi standar ERC-721 untuk mengimplementasikan karakteristik Non-Transferable Token (SBT), di mana fungsi transfer token akan dinonaktifkan dalam kode smart contract.

3.2.3. Implementasi

Tahap implementasi adalah proses penerjemahan semua rancangan dan spesifikasi dari fase desain ke dalam bentuk kode program yang dapat dieksekusi dan dioperasikan. Pekerjaan utama pada tahap ini meliputi pengembangan smart contract, pengembangan frontend aplikasi, dan integrasi dengan blockchain. Kode smart contract akan ditulis menggunakan bahasa pemrograman Solidity, dengan optimasi untuk efisiensi gas dan keamanan, serta mematuhi modifikasi untuk SBT. Setelah itu, smart contract akan di-deploy ke jaringan Ethereum Testnet (Sepolia). Pemilihan testnet memungkinkan pengujian menyeluruh tanpa biaya gas Ethereum yang sebenarnya dan meminimalkan risiko dalam lingkungan produksi. Alat seperti Hardhat atau Remix IDE akan digunakan untuk kompilasi, deployment, dan interaksi awal dengan smart contract. Untuk pengembangan frontend aplikasi, antarmuka pengguna berbasis web akan dibangun menggunakan teknologi JavaScript, dengan library atau framework seperti React.js untuk membangun komponen UI yang dinamis dan modular.

Integrasi dengan blockchain akan dilakukan menggunakan library Web3.js atau Ethers.js, yang akan membangun konektivitas antara aplikasi frontend dengan jaringan Ethereum, memungkinkan aplikasi untuk berinteraksi dengan smart contract seperti memanggil fungsi, mendengarkan event, atau membaca data on-chain. Selama proses implementasi, diagram alur dan diagram interaksi yang telah dirancang akan digunakan sebagai panduan untuk memvisualisasikan hubungan antara komponen sistem, seperti bagaimana input admin memicu transaksi minting di smart contract, dan bagaimana mahasiswa dapat melihat badge mereka, memastikan implementasi yang sesuai dengan desain dan mempermudah debugging.

3.2.4. Pengujian

Tahap pengujian dilakukan secara sistematis untuk memverifikasi bahwa sistem bekerja sesuai dengan spesifikasi yang telah dirancang, bebas dari bug kritikal, dan memenuhi persyaratan kualitas. Jenis pengujian yang akan dilaksanakan meliputi:

1. Pengujian Unit: Menguji setiap modul atau fungsi individual dari smart contract dan komponen frontend secara terpisah untuk memastikan bahwa masing-masing unit bekerja dengan benar.
2. Pengujian Integrasi: Memverifikasi interaksi yang mulus dan benar antara berbagai modul dan komponen sistem, seperti koneksi antara frontend dengan smart contract, atau smart contract dengan blockchain.
3. Pengujian Fungsional: Memastikan bahwa semua fitur yang didefinisikan dalam spesifikasi kebutuhan (misalnya, penerbitan badge, verifikasi kepemilikan, tampilan metadata) berfungsi sesuai yang diharapkan.

4. Pengujian Non-Fungsional: Meliputi pengujian kinerja (responsivitas sistem), usability (kemudahan penggunaan), dan yang terpenting keamanan.

3.3. Perancangan Sistem

Perancangan sistem ini berfokus pada dua komponen utama yang saling berinteraksi: smart contract yang di-deploy di jaringan blockchain dan sistem frontend sebagai antarmuka pengguna.

3.3.1. Spesifikasi Smart Contract

Smart contract akan dibangun berdasarkan standar ERC-721, yang merupakan standar token NFT paling umum di Ethereum. Namun, akan ada modifikasi krusial untuk memastikan sifat non-transferable dari token, mengadopsi konsep Soulbound Token (SBT). Implementasi SBT akan dicapai dengan meniadakan atau membatasi fungsi transfer (transferFrom, safeTransferFrom) dalam kode smart contract. Fungsi utama yang akan disediakan oleh smart contract meliputi:

1. Penerbitan (Minting) dan Revokasi (Revoke) Badge Kelulusan, Sebuah fungsi yang hanya dapat dipanggil oleh alamat terotorisasi untuk membuat dan menerbitkan badge NFT. Selain itu, smart contract juga menyediakan fitur revokasi yang memungkinkan administrator untuk mencabut badge yang telah diterbitkan melalui dua mekanisme:
    a. Soft Revoke, yaitu menandai badge sebagai tidak valid tanpa menghapus token dari blockchain.
    b. Hard Revoke, yaitu menghapus badge secara permanen dari blockchain sehingga tidak lagi dapat diverifikasi.

2. Penyimpanan Metadata Badge, Metadata ini disimpan secara on-chain atau melalui Decentralized Storage Network (DSN) seperti IPFS, dengan hash konten yang direkam di smart contract.
3. Validasi Kepemilikan dan Keaslian, Fungsi ownerOf(tokenId) akan memungkinkan siapa pun untuk memverifikasi pemilik sah dari sebuah badge, dan ketersediaan metadata di blockchain akan menjamin keaslian badge secara publik.

3.3.2. Spesifikasi Sistem Frontend

Frontend akan dikembangkan sebagai dashboard berbasis web yang intuitif dan mudah digunakan, melayani dua peran pengguna utama:

1. Dashboard Admin Fakultas: Menyediakan antarmuka bagi admin untuk menginput data mahasiswa yang akan lulus, menginisiasi proses penerbitan dan revoke badge NFT.
2. Antarmuka Mahasiswa/Publik: Memungkinkan mahasiswa/publik untuk mengakses dan melihat koleksi badge kelulusan digital yang telah diterbitkan oleh admin fakultas.
3. Teknologi: Antarmuka pengguna akan dibangun menggunakan library React.js untuk pengembangan komponen UI yang efisien. Untuk interaksi dengan smart contract dan jaringan Ethereum, akan digunakan library Web3.js dan Ethers.js.

3.3.3. Desain Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu Administrator Layer, Blockchain Layer, dan Frontend Layer, yang masing-masing memiliki peran

dan tanggung jawab yang spesifik.

1. Administrator Layer

   Lapisan ini digunakan oleh administrator untuk mengelola proses penerbitan dan revoke badge kelulusan berbasis NFT. Administrator memiliki akses ke dashboard frontend yang terintegrasi dengan dompet kripto berbasis browser, seperti MetaMask, yang memungkinkan administrator untuk melakukan proses minting badge dalam jumlah besar (mintBatch) menggunakan standar token ERC-721. Sebelum proses minting dilakukan, metadata terkait badge, seperti nama mahasiswa, NIM, dan informasi lainnya, disusun dan diunggah ke sistem penyimpanan terdesentralisasi IPFS (InterPlanetary File System). IPFS menghasilkan URL unik yang akan digunakan dalam metadata token.

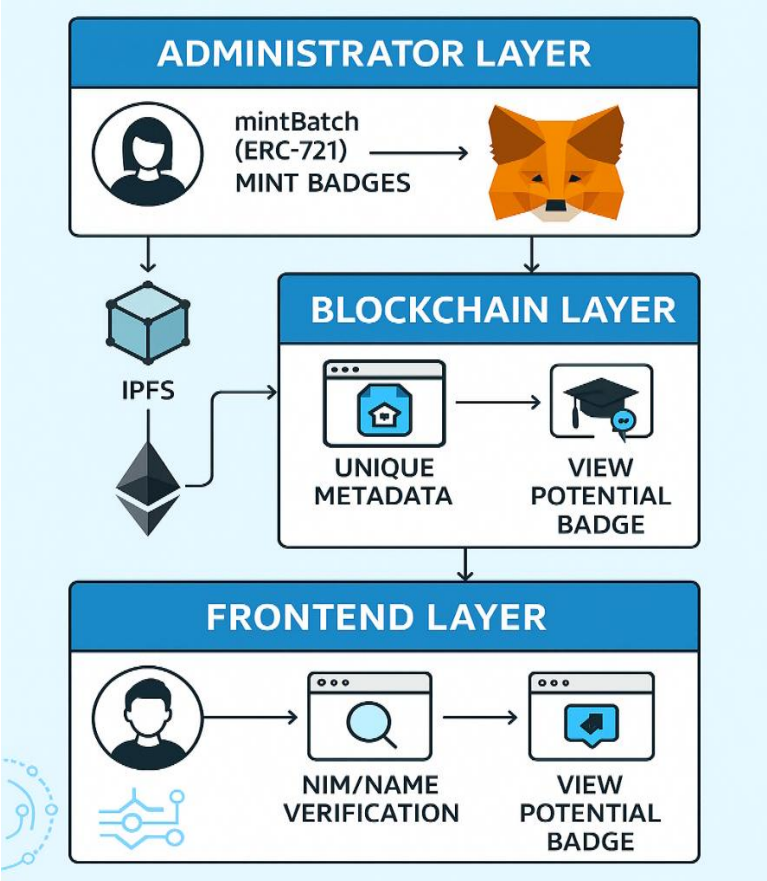
2. Blockchain Layer

   Pada lapisan ini, smart contract yang telah dibuat dan dideploy ke jaringan blockchain (Sepolia Testnet) menerima perintah minting dari administrator. Metadata unik dari IPFS diintegrasikan ke dalam token NFT yang diterbitkan. Token NFT ini dapat diverifikasi secara publik melalui blockchain explorer, seperti Sepolia Etherscan, sehingga siapapun dapat memeriksa keaslian dan kepemilikan badge kelulusan yang telah diterbitkan.

3. Frontend Layer

   Lapisan frontend menyediakan antarmuka bagi mahasiswa untuk melakukan verifikasi token badge mereka. Mahasiswa cukup memasukkan NIM atau nama ke dalam sistem, yang kemudian akan memverifikasi

informasi tersebut dengan metadata yang tersimpan di blockchain dan IPFS. Jika data sesuai, mahasiswa dapat melihat detail badge NFT yang telah diterbitkan atas nama mereka, termasuk visualisasi badge dan informasi terkait.



Gambar 3. 1. Desain arsitektur sistem

3.4. Implementasi Sistem

Pada tahap implementasi, semua rancangan yang telah dibuat akan diterjemahkan ke dalam bentuk kode program yang berfungsi dan dapat dioperasikan. Langkah-langkah utama meliputi:

1. Pengembangan Smart Contract dengan Solidity: Kode smart contract akan ditulis menggunakan bahasa Solidity, dengan memperhatikan praktik

terbaik untuk keamanan dan efisiensi gas. Setiap fungsi dan variabel akan didokumentasikan dengan jelas.

2. Deployment Smart Contract: Smart contract akan di-deploy ke jaringan Ethereum Testnet (Sepolia). Pemilihan testnet memungkinkan pengujian menyeluruh tanpa biaya gas Ethereum yang sebenarnya dan meminimalkan risiko dalam lingkungan produksi.
3. Pengembangan Frontend Menggunakan React.js, CSS, dan JavaScript. Antarmuka pengguna akan dibangun sebagai aplikasi single-page application (SPA) menggunakan React.js, dengan komponen-komponen yang modular dan terstruktur.
4. Interaksi Blockchain dengan Web3.js/Ethers.js: Kode untuk berinteraksi dengan smart contract (memanggil fungsi, membaca data, mendengarkan event) akan diimplementasikan menggunakan library Ether.js/Web3.js. Ini mencakup konfigurasi provider blockchain dan signer (dari dompet kripto administrator).
5. Visualisasi Sistem: Selama proses implementasi, diagram alur dan diagram interaksi yang telah dirancang akan digunakan sebagai panduan untuk memvisualisasikan hubungan antara komponen sistem (misalnya, bagaimana input admin memicu transaksi minting di smart contract, dan bagaimana mahasiswa dapat melihat badge mereka). Ini membantu memastikan implementasi yang sesuai dengan desain dan mempermudah debugging.

3.4.1. Proses Pembuatan NFT

Pada bagian ini akan diuraikan secara rinci tahapan-tahapan komprehensif dalam proses pengembangan sistem Non-Fungible Token (NFT) untuk badge kelulusan mahasiswa. Sistem ini dirancang dengan pendekatan yang bersifat frontend-centric, artinya seluruh proses pembuatan dan penerbitan NFT dilakukan langsung melalui antarmuka frontend, tanpa memerlukan backend yang kompleks atau server terpisah dalam pengelolaan data maupun eksekusi smart contract. Hal ini bertujuan untuk mempermudah implementasi, meningkatkan efisiensi, serta mengurangi ketergantungan terhadap infrastruktur tambahan. Badge NFT yang diterbitkan menggunakan satu desain gambar generik yang berlaku untuk seluruh mahasiswa, sehingga menjaga konsistensi visual dan mempermudah proses pembuatan metadata. Selain itu, sistem ini memanfaatkan MetaMask sebagai dompet kripto yang terintegrasi langsung di browser, memungkinkan administrator untuk melakukan transaksi, seperti minting maupun revoke badge NFT, secara aman dan praktis. Dengan pendekatan ini, proses penerbitan badge NFT dapat dilakukan secara efisien, transparan, serta tetap mengedepankan aspek desentralisasi yang menjadi prinsip utama teknologi blockchain. Berikut adalah tahapan detail dari prosesnya pembuatannya:

1. Desain Visual NFT

   Langkah awal adalah perancangan aset visual untuk badge kelulusan. Desain ini bersifat generik dan universal, hanya mencakup elemen institusional seperti logo universitas dan nama fakultas/program studi, tanpa informasi spesifik individu mahasiswa.

   Keluaran: Satu file gambar digital dalam format PNG atau SVG.

2. Unggahan File Gambar Badge Generik ke InterPlanetary File System (IPFS)

   File gambar badge yang telah didesain kemudian diunggah secara manual ke layanan pinning IPFS pihak ketiga (Pinata atau Web3.storage). Proses ini bertujuan untuk memperoleh Uniform Resource Locator (URL) IPFS yang persisten dan terdesentralisasi untuk aset visual.

   Keluaran: Satu URL IPFS yang menunjuk pada file gambar badge generik (contoh: ipfs://QmT...xyz.png).

3. Penyusunan Data Mahasiswa dalam Spreadsheet:

   Data komprehensif seluruh mahasiswa yang akan menerima badge kelulusan dikumpulkan dan diorganisir dalam format spreadsheet (.csv). Kolom-kolom yang relevan mencakup Nama Lengkap, Nomor Induk Mahasiswa (NIM), Program Studi, dan Tahun Kelulusan.

   Keluaran: File spreadsheet yang berisi data mahasiswa.

4. Pembuatan Smart Contract NFT Berbasis ERC-721 dengan Fungsi mintBatch:

   Pembuatan smart contract harus mematuhi standar ERC-721. Kontrak ini wajib mengimplementasikan fungsi mintBatch(address memory to string memory tokenURIs), yang memungkinkan pencetakan (minting) banyak NFT secara efisien dalam satu transaksi ke satu alamat penerima (dalam kasus ini, wallet administrator), masing-masing dengan URL metadata yang unik.

   Keluaran: Kode sumber smart contract dalam bahasa Solidity.

5. Penyebaran (Deployment) Smart Contract ke Blockchain menggunakan Hardhat:

   Smart contract yang telah dikembangkan di-deploy ke jaringan Ethereum Testnet (Sepolia) menggunakan Hardhat melalui terminal. Proses ini dijalankan dengan skrip deployment dan konfigurasi akun administrator melalui private key yang tersimpan di file konfigurasi.

   Keluaran: Alamat smart contract yang telah terdeploy di blockchain.

6. Pengembangan Aplikasi Website Administrasi (Halaman Administrasi):

   Aplikasi web akan dikembangkan sepenuhnya pada sisi frontend (React.js, JavaScript, CSS, dan Ether.js), tanpa keterlibatan backend server.

   Fungsionalitas Utama:

   a. Fasilitas untuk menghubungkan dompet MetaMask administrator.
   b. Antarmuka untuk mengunggah file spreadsheet data mahasiswa.
   c. Logika JavaScript untuk membaca dan mengurai data dari spreadsheet, lalu secara dinamis membentuk objek JSON metadata untuk setiap mahasiswa di memori browser.
   d. Tombol pemicu “Mulai Minting Batch” untuk memulai proses transaksi blockchain.
   e. Tombol “Soft Revoke” untuk menandai badge tidak valid, “Hard Revoke” untuk menghapus badge, “Pulihkan” untuk memulihkan badge.

7. Eksekusi Batch Minting melalui MetaMask pada Frontend:

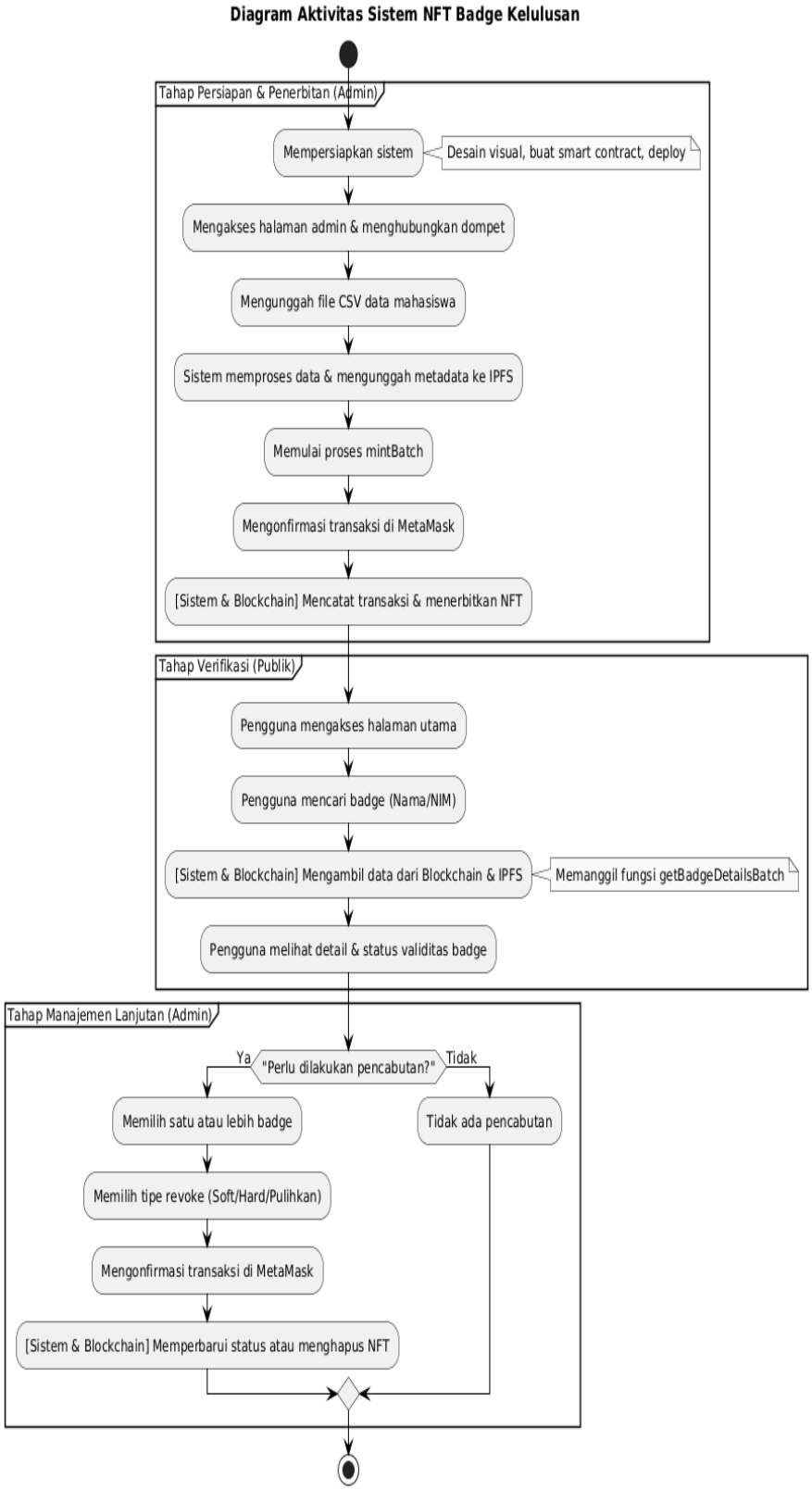
   Setelah semua URL IPFS metadata unik untuk setiap mahasiswa terkumpul dan tersedia pada sisi frontend (Dashboard Admin), administrator akan

mengklik tombol "Mulai Minting Batch". Skrip JavaScript pada website, yang memanfaatkan pustaka ethers.js dan web3.js, akan memanggil fungsi mintBatch pada smart contract yang sudah terdeploy. Parameter yang diteruskan akan berupa array alamat dompet administrator. Pada titik ini, MetaMask akan muncul dengan permintaan konfirmasi transaksi (satu atau beberapa, tergantung pada ukuran batch dan batas gas block jaringan). Administrator harus menyetujui dan mengkonfirmasi transaksi ini.

Keluaran: NFT badge kelulusan yang telah berhasil dicetak (minted) di blockchain, dengan kepemilikan terdaftar pada dompet administrator fakultas. Setiap NFT memiliki ID token yang unik.

8. Penyajian dan Verifikasi NFT pada Website Publik:

   Website ini berfungsi sebagai portal verifikasi publik. Pengguna dapat mencari badge berdasarkan Nomor Induk Mahasiswa (NIM) atau nama. Website frontend akan terhubung langsung ke blockchain (via penyedia RPC publik seperti Infura atau Alchemy) untuk membaca data dari smart contract (menggunakan fungsi tokenURI untuk mendapatkan URL metadata). Kemudian, website akan mengambil file JSON metadata dari IPFS Gateway menggunakan URL tersebut, lalu menampilkan gambar badge generik beserta detail mahasiswa (Nama, NIM, Program Studi, dll., yang diekstrak dari metadata). Fitur krusial dari website ini adalah penyajian bukti verifikasi on-chain, yang secara jelas menunjukkan ID token NFT dan konfirmasi bahwa pemiliknya adalah dompet administrator fakultas, sehingga menjamin keaslian badge kelulusan digital tersebut.



Gambar 3. 2. Diagram Aktivitas Sistem NFT Badge Kelulusan.

3.4.2. Desain Tampilan Website

Tampilan antarmuka website sistem badge kelulusan mahasiswa dirancang dengan struktur yang sederhana, informatif, dan mudah dioperasikan oleh pengguna. Adapun penjelasan komponen utama dari desain tampilan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Header

   Bagian header terletak di posisi paling atas halaman website. Komponen ini berfungsi sebagai elemen navigasi sekaligus identitas sistem. Pada bagian ini ditampilkan logo universitas dan nama sistem, yaitu “BADGE KELULUSAN MAHASISWA FIKTI UMSU”.

2. Background/Sampul

   Bagian berikutnya adalah area background atau sampul yang berfungsi sebagai elemen visual utama. Bagian ini dapat diisi dengan gambar bertema wisuda, logo institusi, atau ilustrasi lain yang merepresentasikan sistem badge kelulusan digital berbasis NFT. Kehadiran elemen ini diharapkan dapat memperkuat identitas visual sistem serta memberikan kesan profesional kepada pengguna.

3. Judul Badge Kelulusan Mahasiswa

   Tepat di bawah area background terdapat teks judul “Galeri NFT Badge Kelulusan Mahasiswa” yang berfungsi sebagai penegas informasi utama dalam halaman ini. Judul tersebut menunjukkan bahwa daftar yang ditampilkan pada halaman merupakan kumpulan badge kelulusan digital yang diterbitkan oleh pihak fakultas.

4. Search Bar (Kolom Pencarian)

   Website menyediakan fitur pencarian untuk memudahkan pengguna dalam menelusuri daftar badge kelulusan. Melalui kolom ini, pengguna dapat mencari data berdasarkan nama mahasiswa, Nomor Induk Mahasiswa (NIM), tanpa perlu menelusuri seluruh daftar badge secara manual.

5. Grid Tampilan NFT

   Bagian utama dari halaman website menampilkan daftar NFT badge kelulusan dalam bentuk grid atau susunan kotak-kotak. Setiap kotak merepresentasikan satu badge NFT yang memuat gambar atau ikon visual dari badge tersebut. Dengan susunan grid yang rapi dan responsif, daftar NFT dapat dilihat dengan mudah baik melalui perangkat komputer, tablet, maupun smartphone.

6. Detail Deskripsi NFT

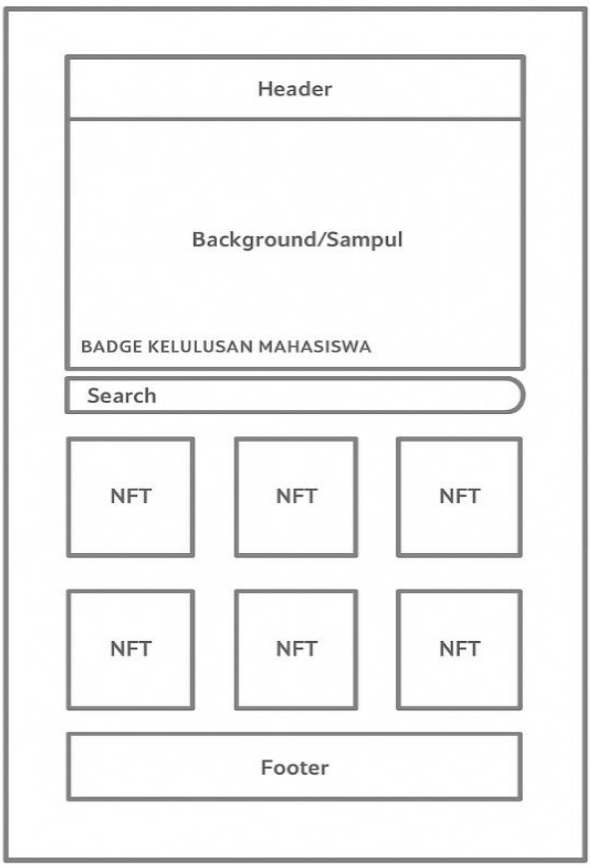
   Website juga dilengkapi dengan fitur untuk menampilkan deskripsi detail dari setiap NFT badge kelulusan. Fitur ini dapat diakses ketika pengguna mengklik salah satu kotak NFT yang tersedia. Setelah diklik, akan muncul tampilan berupa pop-up atau halaman khusus yang berisi informasi lengkap terkait badge tersebut. Informasi yang ditampilkan meliputi nama mahasiswa, NIM, program studi, tahun kelulusan, gambar badge dalam ukuran lebih besar, serta tautan menuju blockchain explorer (seperti Sepolia Etherscan) untuk memverifikasi keaslian NFT secara publik.

7. Footer

   Bagian footer terletak di posisi paling bawah halaman website. Komponen ini memuat informasi tambahan seperti hak cipta, nama institusi, serta

kontak atau informasi administratif lainnya yang berkaitan dengan sistem.

Desain antarmuka website ini dirancang agar memiliki tampilan yang sederhana, informatif, serta mudah digunakan oleh berbagai kalangan, baik dari pihak fakultas, mahasiswa, maupun publik umum. Dengan struktur dan fitur yang tersedia, sistem diharapkan mampu memberikan kemudahan akses informasi badge kelulusan serta transparansi melalui teknologi NFT dan blockchain.



Gambar 3. 3. Sketsa Desain Tampilan Website

3.5. Pengujian Sistem

Pengujian adalah fase krusial untuk memvalidasi fungsionalitas, kinerja, dan keamanan sistem yang telah dibangun. Pengujian akan dilakukan secara sistematis dalam beberapa tahapan:

3.5.1. Pengujian Fungsional Smart Contract

Fokus utama pengujian ini adalah memverifikasi bahwa semua fungsi yang didefinisikan dalam smart contract bekerja dengan benar. Ini meliputi pengujian penerbitan badge untuk memastikan hanya akun terotorisasi yang dapat menerbitkan badge dan badge berhasil di-mint dan terintegrasi ke website/frontend. Selain itu, akan dilakukan validasi keunikan dan keaslian NFT untuk memastikan setiap badge memiliki ID token unik dan metadata yang tidak dapat diubah setelah minting. Pengujian juga mencakup skenario batas (edge cases), seperti input yang tidak valid atau upaya minting duplikat, untuk memastikan penanganan error yang tepat.

3.5.2. Pengujian Integrasi

Tahap ini bertujuan untuk memastikan komunikasi dan interaksi yang mulus antara berbagai komponen sistem, khususnya antara frontend dan smart contract. Meliputi:

1. Pengujian Koneksi Frontend-Smart Contract: Memverifikasi bahwa aplikasi frontend dapat berhasil terhubung ke jaringan Ethereum Testnet dan berinteraksi dengan smart contract (misalnya, memanggil fungsi read dan write).
2. Pengujian Event Listener: Memastikan bahwa frontend dapat dengan benar mendengarkan dan merespons event yang dipancarkan oleh smart contract

(misalnya, notifikasi setelah badge berhasil di-mint).

3. Pengujian Alur Pengguna End-to-End: Mensimulasikan seluruh alur kerja pengguna, mulai dari admin menginput data hingga mahasiswa melihat dan memverifikasi badge mereka.

3.5.3. Pengujian Keamanan dan Keunikan

Tahap terakhir adalah pengujian keamanan dan keunikan, yang secara spesifik berfokus pada identifikasi potensi kerentanan dan validasi integritas sistem. Ini mencakup pengujian non-transferability (SBT) untuk memverifikasi bahwa badge yang diterbitkan benar-benar tidak dapat ditransfer atau dipindahtangankan, di mana setiap upaya transfer harus gagal sesuai dengan konsep Soulbound Token. Pengujian duplikasi badge akan dilakukan untuk memastikan sistem mencegah penerbitan badge ganda untuk mahasiswa atau kelulusan yang sama. Integritas metadata juga akan diverifikasi untuk memastikan bahwa data badge yang disimpan tidak dapat dimanipulasi setelah penerbitan. Terakhir, analisis kerentanan smart contract akan dilakukan melalui tinjauan kode secara teliti untuk mengidentifikasi potensi celah keamanan umum seperti reentrancy, integer overflow/underflow, denial of service, atau masalah access control lainnya, di mana penggunaan alat audit keamanan otomatis juga dapat dipertimbangkan.

3.6. Waktu Penelitian

Waktu penelitian ini dirancang untuk memastikan setiap tahap pelaksanaan dilakukan secara sistematis dan efisien dalam waktu yang terbatas, yaitu selama empat bulan dari Mei hingga Agustus 2025. Pada Bulan Mei, fokus utama adalah persiapan dan perancangan awal dengan fokus pada penyelesaian setiap fase pengembangan secara berurutan, selaras dengan metode Waterfall yang diterapkan.

Tahap ini mencakup studi literatur mendalam untuk membangun dasar teoritis yang kuat, diikuti dengan analisis kebutuhan sistem secara detail dari perspektif pengguna dan teknis. Memasuki Bulan Juni, kegiatan akan berlanjut pada fase perancangan dan awal implementasi. Desain arsitektur sistem secara keseluruhan, perancangan smart contract (termasuk konsep Soulbound Token), dan desain antarmuka pengguna akan diselesaikan. Setelah itu, akan dimulai penulisan kode smart contract dan deployment awal ke jaringan Ethereum Testnet (Sepolia). Bulan Juli akan didedikasikan untuk implementasi frontend dan integrasinya. Pengembangan antarmuka web untuk dashboard admin dan publik akan menjadi prioritas, memastikan konektivitas penuh dengan smart contract melalui library Web3. Bulan Agustus akan difokuskan pada pengujian sistem secara komprehensif, pengumpulan data, analisis, dan penyusunan laporan. Pengujian fungsionalitas, integrasi, dan keamanan badge akan dilaksanakan untuk memverifikasi sistem berfungsi dengan benar dan aman. Hasil pengujian akan dianalisis untuk evaluasi menyeluruh, dan seluruh temuan akan diintegrasikan ke dalam laporan penelitian final.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi Smart Contract

Smart contract yang telah dibuat dengan nama BadgeSBT.sol dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Solidity versi ^0.8.24. Untuk memastikan keamanan dan standardisasi, kontrak ini mewarisi fungsionalitas dari library OpenZeppelin, khususnya ERC721URIStorage untuk manajemen metadata dan Ownable untuk kontrol akses.Lingkungan pengembangan yang digunakan adalah Hardhat, sebuah framework Ethereum yang komprehensif. Hardhat berperan penting dalam keseluruhan siklus hidup smart contract, mulai dari kompilasi kode Solidity menjadi bytecode yang dapat dieksekusi oleh EVM, menjalankan pengujian unit otomatis untuk memverifikasi logika, hingga mengelola skrip untuk proses deployment.

```
1  // SPDX-License-Identifier: MIT
2  pragma solidity ^0.8.24;
3
4  import "@openzeppelin/contracts/token/ERC721/extensions/ERC721URIStorage.sol";
5  import "@openzeppelin/contracts/access/Ownable.sol";
6
7  contract BadgeSBT is ERC721URIStorage, Ownable {
8      uint256 private _nextId = 1;
9      mapping(uint256 => bool) public revoked;
10
11     event MintedBatch(address indexed by, uint256[] tokenIds);
12     event SoftRevoked(uint256 indexed tokenId, bool revoked);
13     event HardRevoked(uint256 indexed tokenId);
14
```

Gambar 4. 1. Cuplikan Skrip Kode Solidity BadgeSBT.sol

4.1.1. Proses Deployment Smart Contract

Deployment adalah proses mengunggah dan mempublikasikan smart contract ke jaringan blockchain agar dapat berinteraksi. Library utama yang digunakan untuk proses ini adalah Ethers.js, yang sudah terintegrasi di dalam Hardhat.

Langkah-langkah deployment yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Konfigurasi Jaringan: File hardhat.config.js diatur untuk terhubung ke jaringan Ethereum Testnet (Sepolia). Koneksi ini difasilitasi oleh sebuah RPC URL yang didapatkan dari layanan pihak ketiga yaitu Alchemy. Kunci pribadi (private key) dari dompet yang digunakan untuk deployment (akun admin) disimpan secara aman dalam file .env untuk mencegah eksposur di dalam kode.
2. Pembuatan Skrip Deployment: Skrip dibuat dengan nama deploy.js di dalam direktori scripts/. Skrip ini menggunakan Ethers.js untuk membuat instansi dari kontrak BadgeSBT.sol dan kemudian memanggil fungsi untuk men-deploy-nya ke jaringan yang telah dikonfigurasi.
3. Eksekusi Deployment: Proses deployment dieksekusi dari terminal dengan menjalankan perintah spesifik: npx hardhat run scripts/deploy.js --network sepolia. Setelah berhasil, terminal akan menampilkan alamat unik dari smart contract yang baru saja aktif di jaringan Sepolia, yang kemudian digunakan oleh aplikasi frontend untuk berinteraksi.

```
const hre = require("hardhat");

async function main() {
  const BadgeSBT = await hre.ethers.getContractFactory("BadgeSBT");

  console.log("Mendeploy kontrak BadgeSBT...");
  const badgeSBT = await BadgeSBT.deploy();

  await badgeSBT.waitForDeployment();

  console.log(`Kontrak BadgeSBT berhasil di-deploy ke alamat: ${badgeSBT.target}`);
}

main().catch((error) => {
  console.error(error);
  process.exitCode = 1;
});
```

Gambar 4. 2. Skrip Kode deploy.js

4.2. Tampilan Antarmuka Sistem (User Interface)

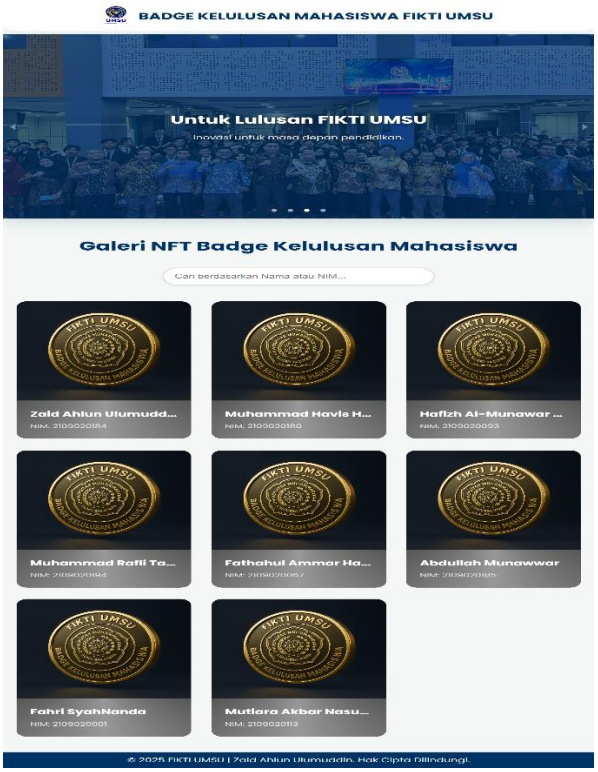
Antarmuka pengguna sistem dirancang untuk memberikan pengalaman yang intuitif dan fungsional, dengan memisahkan secara jelas antara akses publik untuk verifikasi dan akses administratif untuk pengelolaan. Tampilan frontend dibangun sebagai Single Page Application (SPA) menggunakan React.js, yang memungkinkan transisi antar halaman dan komponen berjalan mulus tanpa perlu memuat ulang halaman secara penuh, sehingga menciptakan pengalaman pengguna yang modern dan responsif.

4.2.1. Halaman Utama (Publik)

Halaman utama berfungsi sebagai etalase publik utama dari sistem, dirancang untuk memberikan kesan pertama yang profesional dan menarik secara visual bagi pengunjung, baik itu mahasiswa, perusahaan, maupun pihak verifikator eksternal. Saat pertama kali diakses, pengguna disambut dengan slideshow foto layar penuh yang dinamis, menampilkan gambar-gambar ikonik universitas dengan

efek transisi fade yang halus. Di atas setiap gambar, terdapat lapisan teks overlay dengan slogan-slogan kunci proyek, yang muncul dengan animasi halus untuk memperkuat pesan mengenai inovasi dan keamanan kredensial digital.

Setelah menggulir ke bawah, pengguna akan menemukan bagian galeri utama. Untuk kemudahan navigasi, sebuah kolom pencarian dibuat untuk mencari badge berdasarkan Nama atau NIM. Di bawahnya, galeri NFT menampilkan semua badge kelulusan yang valid dalam format grid yang responsif. Untuk memberikan kesan dinamis, urutan badge di halaman ini diacak setiap kali halaman dimuat, dan setiap kartu badge muncul dengan animasi bertahap, menciptakan pengalaman visual yang memukau.

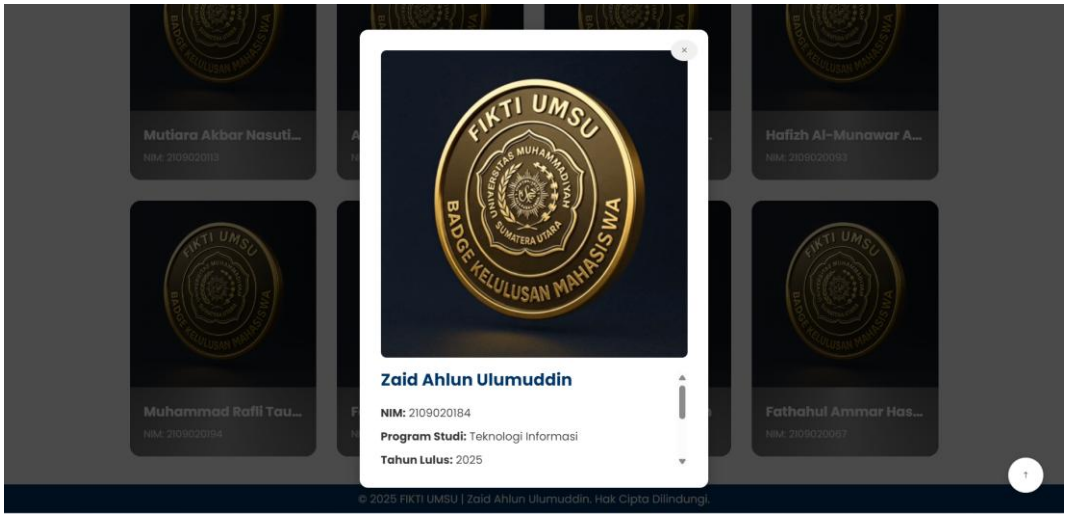


Gambar 4. 3. Tampilan Halaman Utama Publik

4.2.2. Tampilan Detail NFT

Interaktivitas pada galeri diwujudkan melalui fitur pop-up (modal) yang muncul ketika salah satu kartu badge diklik, berfungsi sebagai pusat verifikasi untuk satu kredensial spesifik. Modal ini dirancang untuk menyajikan informasi secara komprehensif dan mudah diverifikasi.

1. Visual NFT: Di bagian atas, modal menampilkan gambar animasi GIF dari badge, memberikan kesan kredensial yang lebih "hidup" dan modern dibandingkan gambar statis.
2. Metadata Lengkap: Di bawah gambar, disajikan semua atribut yang tersimpan di IPFS, seperti Nama Lengkap, Nomor Induk Mahasiswa (NIM), Program Studi, dan Tahun Lulus.
3. Status Validitas On-Chain: Terdapat indikator yang jelas (misalnya, Valid atau Tidak Valid/Ditangguhkan) yang statusnya diambil secara real-time dari pemanggilan fungsi isValid() pada smart contract, memberikan tingkat kepercayaan yang tinggi.
4. Tautan Verifikasi Eksternal: Untuk transparansi maksimal, sebuah tombol “Lihat di Etherscan” yang mengarah langsung ke halaman token di Sepolia Etherscan. Ini memungkinkan siapa pun untuk melakukan verifikasi independen di luar aplikasi, langsung pada “sumber kebenaran” di blockchain.



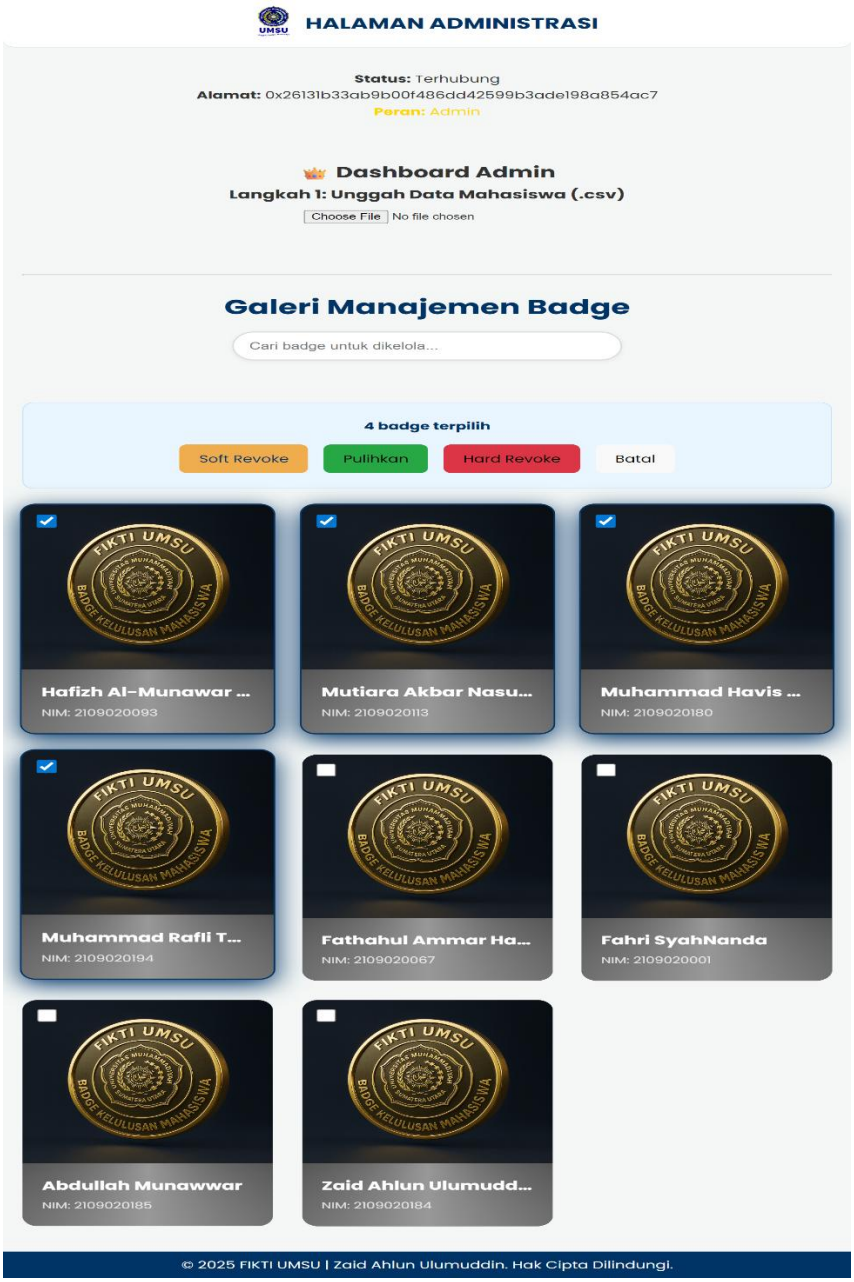
Gambar 4. 4. Tampilan Pop-up Detail NFT

4.2.3. Halaman Administrasi

Halaman /admin merupakan pusat kendali yang aman bagi administrator. Akses ke fungsionalitas penuh halaman ini dikunci hingga admin menghubungkan dompet MetaMask yang alamatnya terverifikasi sebagai pemilik (owner) dari smart contract. Halaman ini terbagi menjadi dua panel utama:

1. Dasbor Minting: Panel ini menyediakan antarmuka yang sederhana bagi admin untuk menerbitkan badge secara massal. Dengan mengunggah satu file .csv berisi data mahasiswa (Data mahasiswa harus berisi header Nama, NIM, Prodi, Tahun). Sistem secara otomatis akan memproses, membuat metadata unik untuk setiap mahasiswa, mengunggahnya ke IPFS, dan menyiapkan transaksi mintBatch.
2. Galeri Manajemen: Di bawah dasbor, admin dapat melihat galeri lengkap dari semua badge yang pernah diterbitkan. Galeri ini dilengkapi dengan fungsionalitas manajemen yang kuat, di mana admin dapat memilih beberapa badge sekaligus menggunakan checkbox. Saat setidaknya satu

badge dipilih, sebuah panel aksi massal akan muncul, memberikan tombol untuk melakukan Soft Revoke, Hard Revoke, atau Pulihkan Status pada semua badge yang dipilih dalam satu transaksi.



Gambar 4. 5. Tampilan Halaman Administrasi

4.3. Pengujian Fungsionalitas Sistem

Tahap pengujian dilakukan secara sistematis untuk memverifikasi bahwa setiap komponen sistem bekerja sesuai dengan spesifikasi fungsional dan non-fungsional yang telah dirancang. Pengujian ini mencakup validasi logika smart contract di blockchain dan pengujian alur kerja pengguna secara menyeluruh pada antarmuka frontend.

4.3.1. Pengujian Smart Contract

Pengujian smart contract dilakukan dalam lingkungan pengembangan Hardhat untuk memastikan keandalan dan keamanan logika inti sebelum di-deploy.

1. Penerbitan (Minting): Pengujian pada fungsi mintBatch menunjukkan bahwa kontrak berhasil membuat NFT sesuai dengan jumlah data yang diberikan dalam satu transaksi. Kepemilikan awal dari semua badge yang baru dibuat berhasil diverifikasi dan secara benar ditetapkan ke alamat dompet administrator. Pengujian juga memastikan bahwa setiap badge yang diterbitkan memiliki ID token yang unik, sesuai dengan mekanisme inkremental _nextId.
2. Non-Transferability (SBT): Sifat non-transferable dari badge diuji dengan mencoba memanggil fungsi-fungsi transfer standar ERC-721. Hasilnya, setiap upaya transfer berhasil digagalkan oleh logika di dalam fungsi update, yang mengembalikan pesan error "SBT: non-transferable" sesuai harapan. Hal ini mengonfirmasi bahwa karakteristik inti dari Soulbound Token telah berhasil diimplementasikan.
3. Pencabutan (Revocation): Fungsi pencabutan massal softRevokeBatch dan hardRevokeBatch diuji untuk memvalidasi fungsinya. Pengujian

softRevokeBatch berhasil mengubah status revoked menjadi true pada mapping untuk semua token yang ditargetkan, yang kemudian menyebabkan fungsi isValid() mengembalikan nilai false. Sementara itu, pengujian hardRevokeBatch berhasil menghapus (membakar) token dari blockchain, di mana upaya pemanggilan tokenURI untuk ID token yang telah dihapus akan gagal, sesuai dengan perilaku yang diharapkan.

4. Keamanan dan Penanganan Error: Tinjauan kode dilakukan untuk mengidentifikasi potensi kerentanan umum. Dengan mengandalkan implementasi standar dari OpenZeppelin yang telah diaudit, risiko seperti reentrancy atau integer overflow dapat diminimalisir. Fungsi-fungsi juga terbukti dapat menangani input yang tidak valid dengan benar, seperti mengembalikan pesan error "Length mismatch" saat jumlah alamat dan URI tidak sesuai pada mintBatch.

4.3.2. Pengujian Fungsionalitas Frontend

Pengujian frontend berfokus pada validasi alur kerja pengguna (user flow) dari awal hingga akhir, serta memastikan interaksi dengan smart contract berjalan lancar.

1. Koneksi dan Interaksi Blockchain: Aplikasi frontend berhasil terhubung ke jaringan Sepolia Testnet melalui RPC URL yang dikonfigurasi. Pengujian menunjukkan bahwa library Ethers.js mampu membaca data dari smart contract (seperti totalSupply dan getBadgeDetailsBatch) dan mengirim transaksi (seperti mintBatch dan hardRevokeBatch) dengan benar.
2. Alur Verifikasi Publik: Halaman utama berhasil menampilkan galeri badge dengan memuat data secara bertahap (infinite scroll) untuk menjaga

performa. Fitur pencarian berhasil memfilter badge berdasarkan Nama dan NIM secara real-time. Saat kartu badge diklik, modal detail berhasil muncul dan menampilkan semua metadata yang akurat, termasuk gambar animasi dan status validitas yang diambil langsung dari blockchain.

3. Alur Kerja Admin: Alur kerja admin diuji secara menyeluruh. Sistem berhasil memverifikasi dompet admin dan memberikan akses ke dasbor. Fungsi unggah file .csv berhasil membaca dan memproses data mahasiswa. Proses minting batch berjalan lancar, mulai dari pop-up konfirmasi animasi, modal umpan balik loading, hingga notifikasi sukses setelah transaksi selesai. Fitur seleksi massal dengan checkbox dan panel aksi batch revoke berfungsi sesuai harapan. Yang terpenting, setelah setiap aksi (minting/revoke), data pada galeri berhasil diperbarui secara dinamis tanpa memuat ulang halaman, sehingga status koneksi dompet admin tetap terjaga.

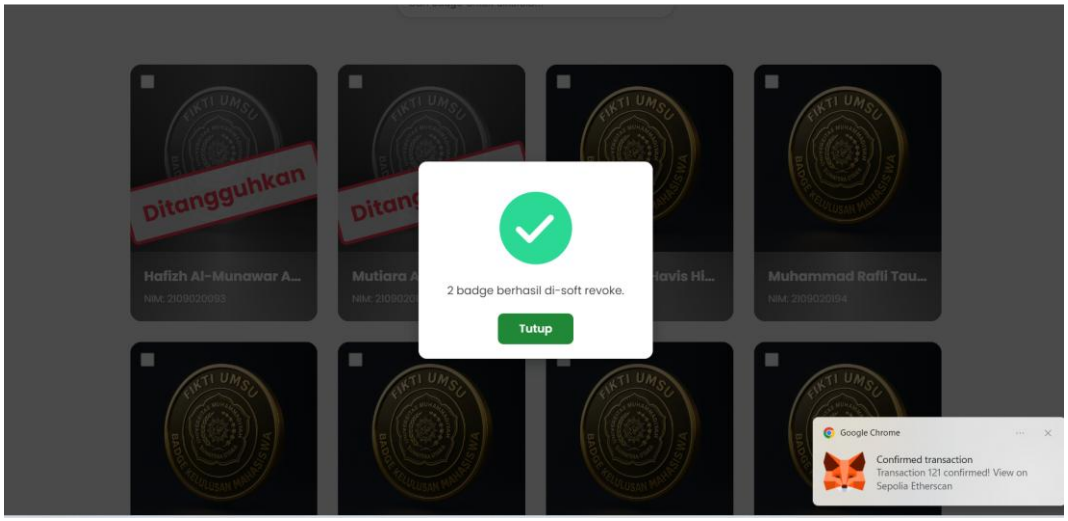
Tabel 4. 1. Hasil Pengujian Fungsionalitas Sistem

Komponen/Fungsi yang Diuji	**Skenario Pengujian**	**Hasil yang Diharapkan**	**Hasil Aktual**	**Status**
Smart Contract: mintBatch	Admin memanggil mintBatch dengan data 8 mahasiswa.	8 NFT baru berhasil dibuat dan dimiliki oleh alamat admin.	8 NFT baru berhasil dibuat dan tercatat di blockchain dengan kepemilikan yang benar.	Berhasil
Smart Contract: Non-Transferable	Upaya memanggil fungsi transferFrom	Transaksi gagal (revert) dengan pesan error "SBT:	Transaksi berhasil digagalkan dengan pesan	Berhasil

Komponen/Fungsi yang Diuji	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
	pada salah satu NFT yang ada.	non-transferable".	error yang sesuai.	
Smart Contract: softRevokeBatch	Admin memilih 3 NFT dan memanggil softRevokeBatch dengan nilai true.	Fungsi isValid() untuk ketiga NFT tersebut akan mengembalikan false.	Status validitas ketiga NFT berhasil diubah menjadi false di blockchain.	Berhasil
Smart Contract: Pemulihan softRevoke	Admin memanggil softRevokeBatch dengan nilai false pada 3 NFT yang sama.	Fungsi isValid() untuk ketiga NFT tersebut kembali menjadi true.	Status validitas ketiga NFT berhasil dipulihkan menjadi true.	Berhasil
Smart Contract: hardRevokeBatch	Admin memilih 2 NFT dan memanggil hardRevokeBatch.	2 NFT tersebut terhapus permanen. Pemanggilan tokenURI akan gagal.	2 NFT berhasil dihapus. Upaya membaca tokenURI-nya menghasilkan error.	Berhasil
Frontend: Verifikasi Publik	Pengguna publik membuka halaman utama dan menggunakan kolom pencarian.	Galeri menampilkan semua badge yang valid. Hasil pencarian sesuai dengan Nama/NIM.	Halaman utama dan fitur pencarian berfungsi dengan benar.	Berhasil
Frontend: Alur Kerja Minting	Admin menghubungkan dompet, mengunggah file .csv, dan	Umpan balik (konfirmasi, loading, sukses) muncul. NFT	Seluruh alur kerja dari awal hingga akhir berjalan lancar	Berhasil

Komponen/Fungsi yang Diuji	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
	mengonfirmasi transaksi minting.	baru tampil di galeri tanpa reload.	dan sesuai desain.	
Frontend: Alur Kerja Revoke	Admin memilih beberapa badge dan menggunakan tombol aksi massal (revoke atau pulihkan).	Umpan balik muncul. Status visual badge di galeri berubah setelah aksi berhasil.	Seluruh alur kerja seleksi dan aksi massal berjalan lancar.	Berhasil
Frontend: Koneksi Dompet	Admin melakukan aksi (minting/revoke) dan menutup modal feedback.	Status koneksi dompet admin tetap terjaga, tidak kembali ke halaman awal.	Koneksi dompet berhasil dipertahankan setelah transaksi.	Berhasil

Tabel di atas merangkum bahwa seluruh fungsionalitas inti yang dirancang, baik di sisi smart contract maupun frontend, telah berhasil diimplementasikan dan berjalan sesuai dengan hasil yang diharapkan. Setiap pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat diandalkan untuk menjalankan perannya dalam menerbitkan dan mengelola kredensial digital.



Gambar 4. 6. Contoh Hasil Pengujian Fitur Soft Revoke di Antarmuka Admin

4.4. Pembahasan

Sistem yang berhasil diimplementasikan dalam penelitian ini secara efektif menjawab tantangan-tantangan yang diuraikan dalam rumusan masalah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi Web3, khususnya smart contract dan NFT, mampu menyediakan solusi kredensial digital yang jauh lebih unggul dibandingkan dengan sistem konvensional berbasis kertas. Keunggulan utama terletak pada aspek keamanan dan integritas data. Dengan menyimpan catatan penerbitan badge di blockchain Ethereum (Sepolia), data tersebut menjadi bersifat immutable (tidak dapat diubah) dan transparan. Implementasi NFT Non-Transferable (Soulbound Token) terbukti sangat sesuai untuk kasus penggunaan ini, karena memastikan bahwa kredensial tersebut secara permanen terikat pada identitas lulusan yang sah dan tidak dapat diperjualbelikan, sehingga menjaga integritasnya sebagai bukti pencapaian personal.

Dari sisi efisiensi dan skalabilitas, sistem ini menawarkan kemudahan verifikasi yang signifikan. Pihak ketiga dapat memverifikasi keabsahan badge

secara instan melalui antarmuka web publik. Selain itu, optimasi performa yang diterapkan, seperti paginasi (infinite scroll) dan fungsi multicall pada smart contract, menunjukkan bahwa sistem ini mampu menangani data dalam jumlah besar tanpa mengorbankan pengalaman pengguna. Kemampuan untuk memuat ratusan data NFT dengan cepat membuktikan bahwa arsitektur yang dirancang tidak hanya fungsional, tetapi juga skalabel untuk penggunaan di dunia nyata. Secara keseluruhan, sistem ini tidak hanya berhasil sebagai sebuah proyek penelitian, tetapi juga sebagai prototipe fungsional yang siap untuk diadopsi dan dikembangkan lebih lanjut guna mendukung transformasi digital di lingkungan FIKTI UMSU.

4.4.1. Keterbatasan Penelitian

Meskipun sistem telah berhasil diimplementasikan sesuai dengan tujuan utamanya, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan teknis yang perlu diakui. Deployment smart contract hanya dilakukan pada lingkungan jaringan testnet (Sepolia), sehingga pertimbangan mengenai biaya transaksi (gas fees) dan strategi keamanan yang lebih mendalam untuk implementasi di jaringan mainnet Ethereum berada di luar cakupan penelitian ini. Selain itu, pada sisi frontend, sistem ini masih memiliki ketergantungan pada layanan pihak ketiga yang terpusat untuk beberapa fungsi krusial, seperti penggunaan RPC URL dari Alchemy untuk komunikasi dengan blockchain dan API dari Pinata untuk akses ke IPFS, yang dapat menjadi titik kegagalan jika layanan tersebut mengalami gangguan.

Lebih lanjut, sistem ini masih beroperasi secara mandiri dan belum terintegrasi secara langsung dengan Sistem Informasi Akademik (SIAKAD) universitas. Akibatnya, proses input data masih dilakukan secara manual melalui

unggahan file .csv, yang membuka potensi terjadinya human error. Terakhir, meskipun telah dioptimalkan dengan pola multicall, proses pengambilan data untuk galeri masih bergantung pada pemanggilan langsung ke node blockchain. Untuk aplikasi dengan skala pengguna yang sangat besar, pendekatan ini dapat menjadi lambat jika dibandingkan dengan solusi industri seperti penggunaan indexer (misalnya The Graph) yang tidak diimplementasikan dalam penelitian ini. Keterbatasan-keterbatasan ini membuka peluang yang jelas untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem di masa mendatang.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan keseluruhan proses penelitian, pengembangan, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kredensial digital berbasis Web3 telah berhasil direalisasikan sesuai dengan perancangan. Dengan mengimplementasikan konsep Soulbound Token (SBT), sistem ini secara fundamental mengubah badge kelulusan menjadi aset digital yang personal dan non-transferable, yang secara efektif menjawab kebutuhan akan sertifikat yang tidak dapat dipalsukan atau diperjualbelikan.
2. Smart contract yang dikembangkan terbukti andal dan sangat efisien. Penggunaan fungsi batch untuk aksi massal (minting dan revoke) serta implementasi pola multicall secara signifikan mengurangi jumlah panggilan ke blockchain. Hal ini tidak hanya menekan potensi biaya transaksi, tetapi juga secara drastis meningkatkan kecepatan dan responsivitas aplikasi, membuktikan bahwa sistem ini skalabel untuk menangani data dalam jumlah besar.
3. Antarmuka pengguna yang dibangun berhasil menciptakan pengalaman yang intuitif dan fungsional. Dengan memisahkan secara tegas antara halaman verifikasi publik yang terbuka dan dasbor administrasi yang aman, sistem ini melayani kedua audiensnya dengan baik. Implementasi teknik modern seperti infinite scroll, umpan balik transaksi animasi, dan pembaruan data dinamis tanpa memuat ulang halaman, membuktikan

bahwa aplikasi terdesentralisasi dapat dibuat ramah pengguna dan setara dengan aplikasi web konvensional.

5.2. Saran

Untuk penyempurnaan dan pengembangan sistem di masa mendatang, penulis memiliki beberapa saran strategis yang dapat dipertimbangkan yaitu:

1. Implementasi Backend Terpusat (Hybrid Model): Untuk meningkatkan performa dan skalabilitas lebih lanjut, disarankan untuk menambahkan lapisan backend (misalnya menggunakan Node.js dengan basis data seperti PostgreSQL). Backend ini dapat berfungsi sebagai caching layer yang mengindeks data dari blockchain. Dengan begitu, frontend dapat memuat ribuan data NFT secara instan melalui satu panggilan API ke backend, alih-alih melakukan banyak panggilan langsung ke node blockchain. Pendekatan hibrida ini juga akan mempermudah integrasi dengan sistem lain.
2. Penyempurnaan Antarmuka dan Pengalaman Pengguna (UI/UX): Meskipun antarmuka saat ini sudah fungsional, terdapat ruang untuk peningkatan visual dan interaksi agar lebih modern. Disarankan untuk mengimplementasikan kerangka desain (design system) yang konsisten, menambahkan animasi mikro (micro-interactions) pada tombol dan transisi halaman, serta mengganti indikator "memuat" dengan kerangka pemuatan (loading skeletons) untuk memberikan kesan performa yang lebih cepat. Peningkatan aksesibilitas (WCAG) juga dapat menjadi fokus untuk memastikan aplikasi dapat digunakan oleh semua kalangan.
3. Integrasi dengan Sistem Akademik (SIAKAD): Menghubungkan sistem ini secara langsung dengan basis data akademik universitas akan

mengotomatiskan proses pengambilan data mahasiswa untuk minting, mengurangi potensi human error dan meningkatkan efisiensi operasional.

4. Deployment ke Jaringan Layer-2: Untuk implementasi di dunia nyata, sangat direkomendasikan untuk mendeploy smart contract ke solusi Layer-2 seperti Base atau Arbitrum untuk menekan biaya transaksi (gas fees) secara drastis.
5. Audit Keamanan Formal: Sebelum diluncurkan di lingkungan produksi (mainnet), sangat penting untuk melakukan audit keamanan formal terhadap kode smart contract oleh pihak ketiga yang tepercaya untuk memastikan tidak ada kerentanan.

DAFTAR PUSTAKA

Alam, S. et al. (2021). A Blockchain-based framework for secure Educational Credentials. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT), 12(10), 5157–5167. https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i10.5298

Chukowry, V., Nanuck, G., & Sungkur, R. K. (2021). The future of continuous learning Digital badge and microcredential system using blockchain. Global Transitions Proceedings, 2(2), 355–361. https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.026

Entriken, W., Shirley, D., Evans, J., & Sachs, N. (2018). ERC-721: Non-fungible token standard. Ethereum Improvement Proposals. https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721

Ethereum Improvement Proposals. (2023). EIP-7002: Validator withdrawal credential update. https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-7002

Geraldina, I., & Sihotang, S. V. (2024). Mengintegrasikan teknologi blockchain dalam pendidikan tinggi pada transparansi serta keamanan dalam kredensial akademik. ADI Pengabdian Kepada Masyarakat, 5(1), 72–79. https://doi.org/10.34306/adimas.v5i1.1148

Hajdu, Á., & Jovanović, D. (2020). SMT-friendly formalization of the Solidity memory model. arXiv Preprint, arXiv:2003.04715. https://arxiv.org/abs/2003.04715

Huang, J., Chang, C., & Wu, Y. (2022). A secure file sharing system based on IPFS and blockchain. arXiv Preprint, arXiv:2205.01728. https://arxiv.org/abs/2205.01728

Jaenudin, J., Zahran, A., & Mahdiana, D. (2024, Januari). Blockchain utilization in secure and decentralized Web 3.0 application development. Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika, 8(1), 594–599. https://doi.org/10.33395/sinkron.v9i1.13411

Javed, F., & Mangues-Bafalluy, J. (2025). Performance analysis, lessons learned and practical advice for a 6G inter-provider DApp on the Ethereum blockchain. arXiv preprint arXiv:2504.00555. https://arxiv.org/abs/2504.00555

Khatwani, R., Mishra, M., Bedarkar, M., Nair, K., & Mistry, J. (2023). Impact of Blockchain on Financial Technology Innovation in the Banking, Financial Services and Insurance (BFSI) Sector. Journal of Statistics Applications & Probability, 12(1), Article 17. http://dx.doi.org/10.18576/jsap/120117

Kodir, A. (2025, Juni). Implementasi dan evaluasi sistem e-ijazah berbasis web (Studi kasus: SIPDAR-PQ). JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika), 9(3), 5183–5189. https://doi.org/10.36040/jati.v9i3.13734

Li, X., Gudgeon, L., Li, L., & Knottenbelt, W. J. (2023). Security and economic implications of Ethereum's proof-of-stake. In Proceedings of the 2023 IEEE Symposium on Security and Privacy.

More, A., Poddar, V., & Sarda, S. (2023, November). Blockchain-based decentralized identification system using SoulBound Tokens. In 2023

International Conference on Integration of Computational Intelligent System (ICICIS) (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICICIS56802.2023.10430319

Rahman, T., Chowdhury, M. A., Rahman, M. H., Hossain, S. M., & Razu, A. A. (2023). Verifi-Chain: A credentials verifier using Blockchain and IPFS. arXiv preprint arXiv:2307.05797. https://arxiv.org/abs/2307.05797

Razi, Q., Devrani, A., Abhyankar, H., Chalapathi, G. S. S., Hassija, V., & Guizani, M. (2024). Non-fungible tokens (NFTs)—Survey of current applications, evolution, and future directions. IEEE Open Journal of the Communications Society, 5, 2765–2791. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3343926

Rong, C., Zhang, Q., Liu, X., & Wang, P. (2023). Post-merge Ethereum: Sustainability, centralization risks, and validator dynamics. IEEE Access, 11, 45234–45249. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.10123456

Tumati, T. V., Tian, Y., & Jiang, X. (2024). A Soulbound Token Certificate Verification System (SBTCert): Design and implementation. In 2024 IEEE 14th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC) (pp. 345–350). https://doi.org/10.1109/CCWC60891.2024.10427736

Turkanović, M., Hölbl, M., Košič, K., Heričko, M., & Kamišalić, A. (2018). EduCTX: A Blockchain-based higher education credit platform. IEEE Access, 6, 5112–5127. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2791915

Wu, X. B., Zou, Z., & Song, D. (2019). Learn ethereum: build your own decentralized applications with ethereum and smart contracts. Packt Publishing Ltd.

Xu, J., Li, J., Liu, X., & Chen, X. (2020). Scaling challenges of Ethereum: A systematic study. Future Generation Computer Systems, 109, 198–210. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.012