

# Rancang Bangun Aplikasi Pengelolaan Sertifikat Digital Berbasis NFT Pada Jaringan Solana

<sup>1</sup>Matthew Imanuel Sumita, <sup>2</sup>Rufman Iman Akbar

<sup>1,2</sup>Universitas Pembangunan Jaya, Indonesia

[1matthew.manuels17@gmail.com](mailto:matthew.manuels17@gmail.com); [2rufman.iman@upj.ac.id](mailto:rufman.iman@upj.ac.id)

## Article Info

### Article history:

Received, 2025-05-30

Revised, 2025-06-01

Accepted, 2025-06-13

### Kata Kunci:

Sertifikat Digital  
NFT  
Blockchain  
Solana

### Keywords:

Digital Certificate  
NFT  
Blockchain  
Solana

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun aplikasi pengelolaan sertifikat digital berbasis Non-Fungible Token (NFT) pada jaringan blockchain Solana. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk membuat, memverifikasi, dan mentransfer sertifikat dalam bentuk NFT yang aman dan terdesentralisasi. Pengujian dilakukan dalam dua aspek utama: fungsional dan performa. Hasil pengujian fungsional menunjukkan tingkat keberhasilan 100%, yang mengindikasikan bahwa seluruh fitur utama aplikasi berjalan sesuai ekspektasi. Dari sisi performa, pembuatan NFT membutuhkan waktu rata-rata 29 detik dengan biaya 0.00008 SOL, verifikasi NFT berlangsung sangat cepat dalam 1.5 detik tanpa biaya, dan transfer NFT memakan waktu 19 detik dengan biaya yang sama seperti pembuatan. Hasil ini menunjukkan bahwa aplikasi mampu menjalankan fungsinya secara efisien dan ekonomis di atas jaringan Solana. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pemanfaatan teknologi blockchain untuk pengelolaan dokumen digital yang transparan dan aman.

## ABSTRACT

This research aims to design and build a Non-Fungible Token (NFT) based digital certificate management application on the Solana blockchain network. This application enables users to create, verify, and transfer certificates in the form of secure and decentralized non-fungible tokens (NFTs). Testing was conducted in two main aspects: functional and performance. The functional testing results showed a 100% success rate, indicating that all the application's main features performed as expected. In terms of performance, NFT creation took an average of 29 seconds for 0.00008 SOL, NFT verification took 1.5 seconds at no cost, and NFT transfer took 19 seconds at the same cost as creation. These results show that the application is able to perform its functions efficiently and economically on top of the Solana network. This research contributes to the utilization of blockchain technology for transparent and secure digital document management.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) license.



## Penulis Korespondensi:

Rufman Iman Akbar  
Program Studi Sistem Informasi,  
Universitas Pembangunan Jaya,  
Email: [rufman.iman@upj.ac.id](mailto:rufman.iman@upj.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Di era digital, sertifikat digital telah menjadi komponen penting dalam pendidikan dan pelatihan profesional. Selain sebagai bukti partisipasi, sertifikat ini juga menjadi nilai tambah bagi pencari kerja untuk menunjukkan kompetensi mereka di *platform* seperti LinkedIn. Meski demikian, keaslian dan validitas sertifikat digital sering dipertanyakan karena maraknya pemalsuan. Permasalahan yang timbul akibat dari adanya pemalsuan sertifikat digital dapat mengurangi kepercayaan kepada institusi atau organisasi yang telah menerbitkan sertifikat digital. Selain dari permasalahan itu, penyalahgunaan identitas dan kebocoran data merupakan suatu hal yang harus diperhatikan [1]. Blockchain hadir sebagai solusi dengan menyimpan data sertifikat dalam jaringan terdesentralisasi yang terenkripsi. Setiap perubahan data memerlukan validasi jaringan, sehingga

meminimalkan risiko manipulasi [2]. Penerapan *Blockchain*, seperti dalam bentuk NFT (*Non-Fungible Token*) dapat merepresentasikan aset digital, termasuk sertifikat digital [3].

Teknologi *Blockchain* adalah buku besar digital yang menyimpan data atau informasi secara terdesentralisasi dan terenkripsi di berbagai komputer dalam suatu jaringan global [4]. Teknologi *Blockchain* pertama kali diterapkan oleh seorang yang bernama Satoshi Nakamoto yang merupakan pencipta Bitcoin [4]-[6]. Bitcoin merupakan implementasi pertama teknologi *blockchain* dengan keamanan kriptografinya dan menggunakan *Proof of Work (PoW)* sebagai konsensus persetujuan transaksi data di jaringan desentralisasi [7].

Salah satu jaringan *blockchain* yang menonjol saat ini adalah Solana. Solana adalah jaringan dasar (layer-1) yang mengadopsi kontrak pintar (*smart contract*), menjadikannya platform ideal untuk membangun aplikasi terdesentralisasi dan mengimplementasikan NFT dengan mudah [7]. Solana dirancang untuk penggunaan umum yang luas karena efisien dalam konsumsi energi, cepat, dan memiliki biaya transaksi yang sangat rendah. Berbeda dengan *blockchain* lain, Solana menggunakan sistem *Proof of Stake (PoS)* untuk memvalidasi transaksi, di mana validator mempertaruhkan token mereka tanpa melibatkan penambangan [8]. Selain itu terdapat inovasi khusus yang disebut *Proof of History (PoH)* untuk memproses transaksi lebih cepat [8].

Dalam ekosistem jaringan Solana, NFT dapat dibuat untuk berbagai tujuan, seperti karya seni digital, tiket acara, item permainan, atau bukti kepemilikan [9]. *NFT (Non-Fungible Token)* adalah token unik yang tidak dapat dipertukarkan dan disimpan secara terdesentralisasi dalam blockchain. Dalam konteks Web3, NFT berfungsi sebagai aset digital yang dapat dimiliki melalui identitas daring pengguna [10]. Dengan NFT, pengguna dapat membuktikan kepemilikan aset unik dengan mengaitkannya pada dompet digital (*wallet*) mereka, yang berfungsi sebagai identitas dan tempat penyimpanan aset digital di blockchain [11].

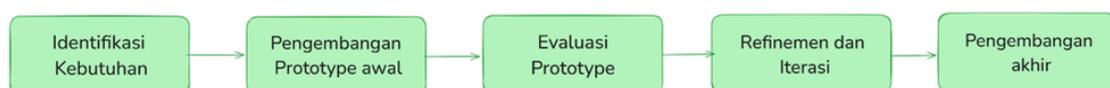
Penelitian sebelumnya telah mengembangkan aplikasi manajemen sertifikat digital menggunakan NFT dalam jaringan Ethereum (ETH) [12]. Namun, dari segi biaya dan kecepatan transaksi, jaringan Ethereum (ETH) masih kalah dibandingkan jaringan Solana [13]. Oleh karena itu, peneliti menggunakan jaringan Solana dalam penelitian ini.

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan membangun aplikasi pengelolaan sertifikat digital berbasis NFT pada jaringan Solana. Sertifikat digital nantinya akan diubah menjadi NFT pada aplikasi tersebut, memberikan pengguna kepemilikan yang aman dan transparan karena dapat diidentifikasi oleh sistem blockchain.

Aplikasi ini diharapkan dapat membantu pengguna membuat NFT dari sertifikat digital, sehingga sertifikat digital menjadi lebih aman dan dapat diverifikasi secara akurat. Hasil NFT juga dapat ditransfer ke wallet lain jika ingin memindahkannya. Aplikasi ini juga dapat diterapkan dalam institusi pendidikan, mengingat frekuensi penggunaan sertifikat digital yang tinggi dan kebutuhan akan keamanan yang ketat.

## 2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, perancangan dan pembangunan aplikasi pengelolaan sertifikat digital berbasis NFT pada jaringan Solana menggunakan metode rekayasa perangkat lunak *prototype*. Metode *Prototype* merupakan metode yang menghasilkan gambaran awal perangkat lunak atau aplikasi yang akan dilakukan dan diperlihatkan kepada pengguna [14]. Dengan menggunakan metode *prototype*, dapat menjelaskan tujuan dari pengembangan produk atau aplikasi yang akan diwujudkan dengan melihat dari bukti konsep, bukti proses, bukti produksi dan bukti produk atau aplikasi [15]. Berikut adalah **Gambar 1** tahapan penelitian.



Gambar 1 Tahap Penelitian

### Identifikasi Kebutuhan

Tahap ini merupakan tahap untuk mengumpulkan dan mengidentifikasi kebutuhan dari pengguna untuk proses pembuatan aplikasi pengelolaan sertifikat digital berbasis NFT pada jaringan Solana. Kebutuhan pengguna menentukan apa saja fitur penting yang ingin diimplementasikan dan diwujudkan ke aplikasi.

### Pengembangan Prototype awal

Pada tahap ini, peneliti berfokus membangun *prototype* awal sesuai dengan kebutuhan pengguna yang telah diidentifikasi sebelumnya. *Prototype* ini memprioritaskan implementasi fitur-fitur penting berdasarkan kebutuhan yang ada. Dalam tahap ini, penekanannya kepada kecepatan dan visualisasi ide.

### Evaluasi Prototype

Dalam tahap ini, peneliti mengumpulkan umpan balik dari pengguna sebelum proses penyempurnaan *prototype*. Peneliti memastikan kepada pengguna apakah *prototype* sudah sesuai dengan kebutuhan awal. Jika belum maka akan dievaluasi dan diperbaiki

### Refinemen dan Iterasi

Tahap ini merupakan tahap penyempurnaan berkelanjutan dari *prototype* awal dan menjadikannya sebagai produk atau aplikasi akhir. Proses ini memungkinkan penyempurnaan berdasarkan umpan balik dan memperkuat produk akhir. Tahap ini juga mencakup implementasi, yaitu pengkodean.

### Pengembangan akhir

Pada tahap pengembangan akhir, produk akhir telah terwujud dari berbagai proses penyempurnaan *prototype*. Dalam tahap ini juga disertakan pengujian pada produk akhir atau aplikasi dengan sistematis dan berfokus pada kualitasnya.

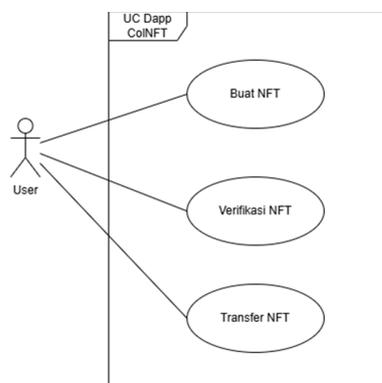
Dalam penelitian ini, bahasa pemrograman *Rust* digunakan untuk kontrak pintar (*smart contract*) pada jaringan Solana. *Rust* sangat cocok karena keandalannya dalam performa tinggi, keamanan memori, dan konkurensi yang aman. Untuk bagian *front-end* menggunakan *React.js* dengan alat tambahan yaitu *Vite*. Penyimpanan file sertifikat dilakukan secara *off-chain* (di luar kontrak pintar) menggunakan *IPFS (InterPlanetary File System)*.

## 3. HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan hasil identifikasi kebutuhan, diperoleh beberapa fitur penting yang akan diterapkan pada aplikasi ini, yaitu Buat NFT, Verifikasi NFT, dan Transfer NFT. Pengguna dapat mengubah file atau sertifikat digital menjadi NFT dengan mengunggahnya ke menu yang disediakan dan menambahkan deskripsi; sistem kemudian akan memproses dan menjadikannya NFT. Pengguna juga dapat melakukan verifikasi NFT dari hasil proses pembuatan NFT untuk memastikan bahwa NFT memang milik pengguna. Terakhir, fitur Transfer NFT berfungsi untuk memindahkan aset atau NFT ke dompet (*wallet*) baru pengguna.

Untuk menggunakan fitur-fitur dalam aplikasi ini, pengguna wajib memiliki dompet digital (*digital wallet*) yang mendukung jaringan Solana, seperti *Phantom Wallet*, *Solflare*, dan lain-lain. Dompet digital (*digital wallet*) digunakan untuk menyimpan aset atau NFT pengguna dan memfasilitasi transaksi antar dompet. Untuk penelitian ini, peneliti menggunakan *Phantom wallet* dalam pengembangan aplikasi ini.

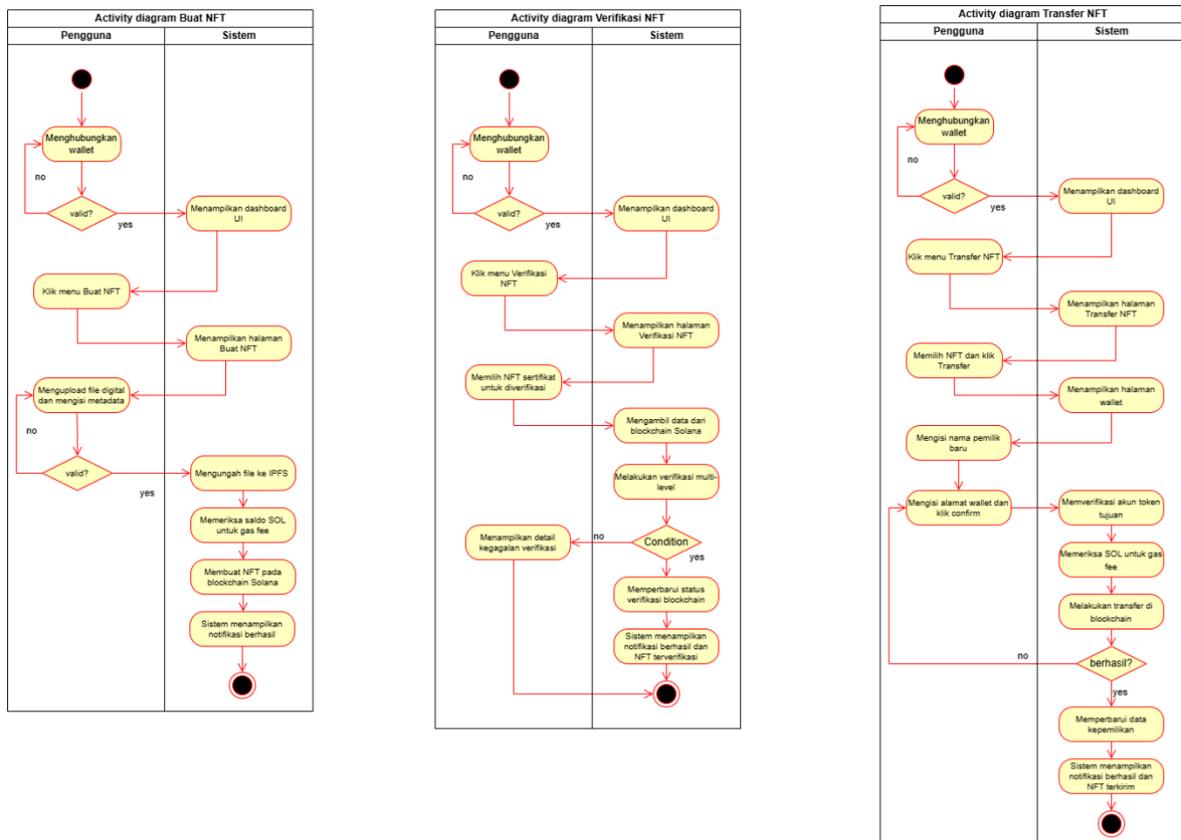
Hasil identifikasi ini menghasilkan diagram dalam bentuk *use case* dan dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Use Case

Dalam perancangan sistem, *activity diagram* menjadi salah satu diagram yang digunakan dalam pembuatan aplikasi ini. Aplikasi ini memiliki tiga *activity diagram*: Buat NFT, Verifikasi NFT, dan Transfer NFT. Pada

activity diagram Buat NFT, pengguna mengharuskan untuk menghubungkan wallet dengan aplikasi untuk masuk dalam halaman utama aplikasi. Setelah berhasil menghubungkannya, pengguna memasuki halaman utama dan terdapat menu Buat NFT. Ketika pengguna mengklik menu tersebut, terdapat halaman untuk mengunggah file atau sertifikat digital serta mengisi informasi terkait seperti nama file, deskripsi dan nama pemilik. Setelah selesai, sistem akan memproses dan membuat NFT. Sistem akan menampilkan notifikasi berhasil dan NFT berhasil dibuat. Untuk activity diagram Verifikasi NFT sangat mirip dari prosesnya activity diagram Buat NFT. Sistem akan mencocokkan hash dari file yang telah menjadi NFT dengan file yang ingin diverifikasi lewat menu verifikasi. Pada activity diagram Transfer NFT, terdapat menu verifikasi yang dimana pengguna dapat memilih NFT yang ingin ditransfer ke wallet lain. Pengguna memasukkan alamat dompet (wallet) dan menekan tombol konfirmasi untuk melakukan proses transfer. Sistem akan memproses dan akan menampilkan notifikasi. Jika berhasil, data kepemilikan akan berganti; jika tidak, pengguna harus memasukkan kembali alamat dompet (wallet) tujuan dan mengulang proses. Semua activity diagram ini dapat dilihat pada gambar 3



Gambar 3 Activity Diagram

Kontrak pintar (*smart contract*) merupakan komponen program krusial dalam penelitian ini. Kontrak pintar berguna supaya proses transaksi dapat berjalan dengan baik. Selain dalam proses transaksi, kontrak pintar juga berperan sebagai logika aplikasi untuk penyimpanan data yang terdesentral. Penyimpanan data yang penting seperti kepemilikan sertifikat digital dan riwayat transfer dilakukan berdasarkan penggunaan kontrak pintar. Untuk keamanan dapat terjamin karena terdapat unsur ketidakberubahan (*immutability*) dalam kode kontrak pintar (*smart contract*). Jika kode tersebut sudah di-*deploy*, kode tersebut tidak dapat diubah tanpa konsensus.

Kontrak pintar (*smart contract*) pada jaringan Solana diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Rust dengan *framework Anchor*. *Framework Anchor* menyediakan metode yang lebih terstruktur dan aman untuk mengembangkan kontrak pintar di Solana [16]. Terdapat tiga struktur data utama dalam kontrak pintar:

1. *CertificateNFT* - Menyimpan informasi tentang sertifikat digital
2. *ProgramState* - Menyimpan status global program
3. *Transaction* - Mencatat riwayat transaksi NFT

Smart contract memiliki beberapa fungsi utama:

1. Initialize: Menginisialisasi program state
2. CreateNFT: Membuat sertifikat NFT baru
3. VerifyNFT: Memverifikasi sertifikat NFT
4. TransferNFT: Mentransfer kepemilikan NFT ke *wallet* lain
5. UpdatePlatformSettings: Mengubah pengaturan *platform*

Kontrak pintar dilengkapi dengan beberapa mekanisme keamanan:

1. Validasi Input: Memastikan data yang dimasukkan sesuai dengan batasan yang ditetapkan
2. Kontrol Akses: Memastikan hanya pemilik yang dapat mentransfer NFT, dan hanya pembuat (*creator*) atau admin *platform* yang dapat memverifikasi NFT
3. Pencatatan Transaksi: Mencatat semua transaksi untuk jejak audit (*audit trail*)

Untuk implementasi berdasarkan hasil analisis dan desain sistem, implementasi dalam pembuatan aplikasi ini diharuskan berada dalam lingkungan linux. Dalam penelitian ini menggunakan lingkungan WSL (*Windows Subsystem for Linux*) dan diintegrasikan ke Visual Studio Code sebagai editor kode. Terdapat perintah untuk membuat struktur folder *Dapp* Solana sehingga memudahkan pengembangan kontrak pintar dan *frontend* aplikasi. Perintah yang digunakan adalah “`npx create-solana-dapp@latest`”.

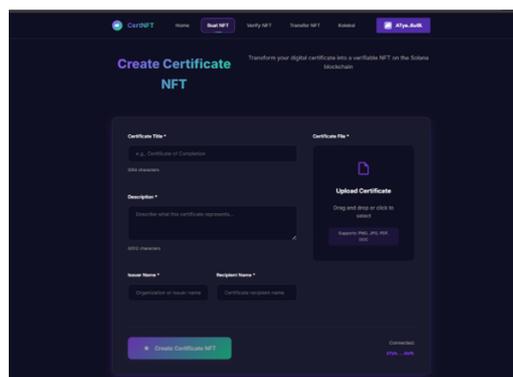
*Frontend* berfokus pada tiga fitur utama, yaitu Buat NFT, Verifikasi NFT, dan Transfer NFT. *Frontend* aplikasi dirancang untuk memudahkan pengguna dalam mengelola sertifikat digital. Dasbor atau halaman utama merupakan halaman pertama pengguna ketika memasuki aplikasi. Halaman ini menampilkan menu-menu utama serta informasi tentang aplikasi.



Gambar 4 Halaman Utama

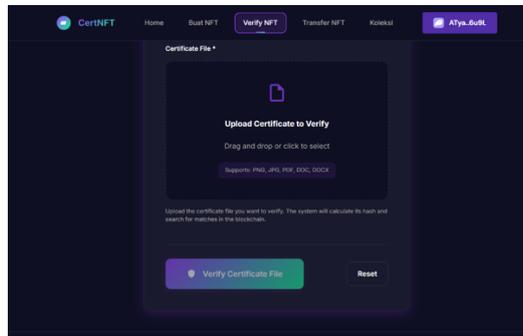
Integrasi dengan dompet (*wallet*) merupakan bagian penting dalam aplikasi ini, karena semua transaksi memerlukan otentikasi dan tanda tangan digital oleh pengguna. Selain integrasi dompet (*wallet*), integrasi ke IPFS juga dilakukan. IPFS (*InterPlanetary File System*) digunakan sebagai solusi penyimpanan *off-chain* untuk file sertifikat digital [17]. IPFS menyediakan metode terdesentralisasi untuk menyimpan file, yang sejalan dengan filosofi blockchain. Proses pengunggahan file ke IPFS menggunakan layanan Pinata. Untuk menggunakan Pinata harus membuat akun terlebih dahulu untuk bisa memakainya. Dengan Pinata, peneliti hanya membuat kode integrasi dengan mengambil *gateway* dan *API keys* yang telah dibuat.

Halaman Buat NFT memungkinkan pengguna untuk mengunggah file sertifikat digital dan mengisi informasi yang diperlukan, seperti judul, deskripsi, nama penerbit, dan nama penerima. Aplikasi akan memvalidasi input pengguna dan mengunggah file ke IPFS sebelum mencetak NFT di jaringan Solana.



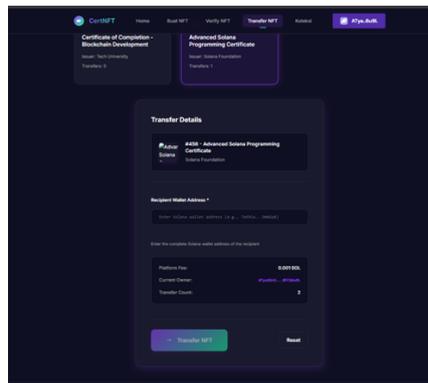
Gambar 5 Halaman Buat NFT

Halaman Verifikasi NFT memungkinkan pengguna (terutama penerbit atau administrator platform) untuk memverifikasi keaslian sertifikat NFT. Proses verifikasi akan mengubah status `status\_verify` menjadi `true` pada kontrak pintar.



Gambar 6 Halaman Verifikasi NFT

Halaman Transfer NFT memungkinkan pemilik sertifikat untuk mentransfer kepemilikan ke dompet (*wallet*) lain. Pengguna harus memasukkan alamat dompet (*wallet*) tujuan dan mengkonfirmasi transaksi melalui wallet yang mendukung Solana.



Gambar 8 Halaman Transfer NFT

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa aplikasi berfungsi sesuai dengan yang diharapkan. Pengujian ini terdiri dari pengujian fungsional dan pengujian performa.

Tabel 1 Pengujian Fungsional

No	Fitur	Skenario	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	Koneksi Wallet	Menghubungkan dengan Phantom Wallet	Terhubung dengan wallet	Sesuai	Berhasil
2	Buat NFT	Mengunggah file dan mengisi data lengkap	NFT berhasil dibuat	Sesuai	Berhasil
3	Buat NFT	Mengunggah file tanpa mengisi data	Tombol Buat NFT tidak bisa ditekan	Sesuai	Berhasil
4	Verifikasi NFT	Verifikasi dengan <i>hash</i> file	Jika file yang diupload sama dengan file yang dibuat untuk NFT, file akan cocok	Sesuai	Berhasil
5	Transfer NFT	Transfer ke alamat dompet ( <i>wallet</i> ) yang cocok dengan jaringan Solana	Kepemilikan berpindah ke dompet ( <i>wallet</i> ) baru	Sesuai	Berhasil
6	Transfer NFT	Transfer ke alamat dompet ( <i>wallet</i> ) yang tidak kompatibel dengan jaringan Solana	Sistem akan menampilkan alamat dompet ( <i>wallet</i> ) tidak valid	Sesuai	Berhasil

Tabel 2 Pengujian Performa

No	Operasi	Waktu Rata-rata	Biaya Transaksi
1	Buat NFT	29 detik	0.00008 SOL
2	Verifikasi NFT	1.5 detik	0 SOL
3	Transfer NFT	19 detik	0.00008 SOL

#### 4. KESIMPULAN

Seluruh fitur yang diuji (koneksi wallet, pembuatan NFT, verifikasi, dan *transfer*) berhasil berfungsi sesuai dengan skenario yang diharapkan dengan tingkat keberhasilan 100%. Pembuatan NFT merupakan proses yang paling memakan waktu (29 detik), namun tetap dalam batas wajar untuk interaksi *blockchain*. Verifikasi NFT sangat cepat (1.5 detik) dan bebas biaya, yang mendukung efisiensi sistem. *Transfer* NFT memerlukan waktu 19 detik dan biaya yang sama dengan proses pembuatan (0.00008 SOL), menunjukkan konsistensi biaya transaksi di jaringan Solana. Kombinasi antara fungsionalitas yang berhasil dan performa yang efisien menunjukkan bahwa aplikasi ini layak diimplementasikan sebagai solusi modern dalam pengelolaan sertifikat digital berbasis blockchain.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Program studi Sistem Informasi Universitas Pembangunan Jaya yang telah mendukung proses penelitian dan juga dosen pembimbing yang telah membantu dan mengarahkan supaya penelitian dapat berjalan dengan baik.

#### REFERENSI

- [1] Giandari Maulani, G. Gunawan, L. Leli, Efa Ayu Nabila, and W. Y. Sari, "Digital Certificate Authority with Blockchain Cybersecurity in Education," *International Journal of Cyber and IT Service Management*, vol. 1, no. 1, pp. 136–150, May 2021. <https://doi.org/10.34306/ijcitsm.v1i1.40>.
- [2] M. Mulyati, I. Ilamsyah, A. Aris, I. Gunawan, and M. Suzaki Zahran, "Blockchain Technology: Can Data Security Change Higher Education Much Better?" *International Journal of Cyber and IT Service Management*, vol. 1, no. 1, pp. 121–135, May 2021. <https://doi.org/10.34306/ijcitsm.v1i1.36>.
- [3] Alif Safa Moleo, Tasrif Hasanuddin, Herdianti Darwis, and Harlinda Harlinda, "Teknologi Blockchain berbasis Non-Fungible Token sebagai Penghargaan Partisipasi Donor Darah," *EDUMATIC Jurnal Pendidikan Informatika*, vol. 8, no. 2, pp. 734–743, Dec. 2024. <https://doi.org/10.29408/edumatic.v8i2.28005>.
- [4] H. Stubić, M. Bilogrivić, and G. Zlodi, "Blockchain and NFTs in the Cultural Heritage Domain: A Review of Current Research Topics," *Heritage*, vol. 6, no. 4, pp. 3801–3819, Apr. 2023. <https://doi.org/10.3390/heritage6040202>.
- [5] Q. Wang, R. Li, Q. Wang, and S. Chen, "Non-Fungible Token (NFT): Overview, Evaluation, Opportunities and Challenges," *arXiv.org*, 2021. <https://arxiv.org/abs/2105.07447>
- [6] C. Feng, N. Li, M. H. F. Wong, and M. Zhang, "Initial Coin Offerings, Blockchain Technology, and White Paper Disclosures," *SSRN Electronic Journal*, Jan. 2019. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3256289>.
- [7] M. Ashraf and C. Heavey, "A Prototype of Supply Chain Traceability using Solana as blockchain and IoT," *Procedia Computer Science*, vol. 217, pp. 948–959, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.292>.
- [8] M. Ivanov and E. Johnson, "A Comprehensive Review of Decentralization Technologies in Bitcoin, Ethereum, and Solana," *Advances in Computer Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8–1–8, 2024. <https://acadexpinnara.com/index.php/acs/article/view/127>
- [9] Alfian Dwi Nugraha and I Made Suartana, "Implementasi State Compression dengan NFT (Non-Fungible Token) Pack pada Blockchain Solana untuk Penjualan & Pembelian Paket NFT dalam Game berbasis Web3," *Journal of Informatics and Computer Science (JINACS)*, vol. 5, no. 04, pp. 584–593, May 2024. <https://doi.org/10.26740/jinacs.v5n04.p584-593>.
- [10] F. Masroor, A. Gopalakrishnan, and N. Goveas, "Securing Patient Data in IoT Devices: A Blockchain-NFT Approach for Privacy, Security, and Authentication," *Proceedings of the 21st International Conference on Security and Cryptography*, pp. 704–709, 2024. <https://doi.org/10.5220/0012764800003767>.

- [11] Ni, angga maha putra, and W. Torbeni, "MENGENAL NFT ARTS SEBAGAI PELUANG EKONOMI KREATIF DI ERA DIGITAL," SENADA (Seminar Nasional Manajemen, Desain dan Aplikasi Bisnis Teknologi), vol. 5, pp. 342–357, 2022. <https://eprosiding.idbbali.ac.id/index.php/senada/article/view/656>
- [12] A. Ikhlas and I Made Suartana, "Pengembangan Decentralized Application (DApp) untuk Manajemen Sertifikat Digital menggunakan Non-Fungible Tokens (NFT) berbasis Standar ERC-721 di Jaringan Ethereum," *Journal of Informatics and Computer Science (JINACS)*, pp. 661–668, 2024. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jinacs/article/view/64197>
- [13] E. Kapengut and B. Mizrach, "An Event Study of the Ethereum Transition to Proof-of-Stake," *Commodities*, vol. 2, no. 2, pp. 96–110, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/commodities2020006>.
- [14] Mardhiah Fadhli and N. A. Marion, "Penerapan Metode Prototyping Pada Aplikasi Sentra Pelayanan Kepolisian Terpadu Berbasis Web," *Journal of Applied Computer Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 127–133, Jun. 2022. <https://doi.org/10.52158/jacost.v3i1.267>.
- [15] E. R. Coutts, A. Wodehouse, and J. Robertson, "A Comparison of Contemporary Prototyping Methods," *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, vol. 1, no. 1, pp. 1313–1322, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.137>.
- [16] S. Andreina et al., "Defying the Odds: Solana's Unexpected Resilience in Spite of the Security Challenges Faced by Developers," *Proceedings of the 2024 on ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, pp. 4226–4240, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1145/3658644.3670333>.
- [17] Nishara Nizamuddin, H. R. Hasan, and K. Salah, "IPFS-Blockchain-Based Authenticity of Online Publications," *Lecture notes in computer science*, pp. 199–212, Jan. 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94478-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94478-4_14).