

SMART CONTRACT PENYIMPANAN DATA GENETIKA MANUSIA BERBIAYA MURAH PADA BLOCKCHAIN ETHEREUM

Tri Stiyo Famuji^{*1}, Herman², Sunardi³

^{1,2,3}Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta

Email: tristiyoofamuji@gmail.com¹, hermankaha@mti.uad.ac.id², sunardi@mti.uad.ac.id³

^{*}Penulis Korespondensi

(Naskah masuk: 28 Juli 2023, diterima untuk diterbitkan: 20 Juni 2024)

Abstrak

Genetika manusia merujuk pada informasi yang dikumpulkan tentang genom atau warisan genetik individu manusia. Data ini mencakup sekuens DNA, variasi genetik, mutasi, dan informasi lain yang terkait dengan sifat dan karakteristik genetik individu manusia. Data genetika manusia diperoleh melalui serangkaian proses, meliputi penguntai genetik, pengujian genetik, analisis DNA, dan pemetaan genetik. Data genetika terutama pada manusia merupakan data yang bersifat privat yang harus dilindungi keamanan dan kerahasiaannya. Beberapa penelitian telah menggunakan teknologi *Blockchain* untuk menyimpan data yang memerlukan keamanan ekstra. *Blockchain* memberikan solusi untuk perlindungan dan pengelolaan data dengan fitur teknologinya yang terdesentralisasi, terenkripsi, setiap transaksi bisa ditelusuri, dan *antitampering* atau sulit dimodifikasi. Penelitian menerapkan teknologi *Blockchain* untuk menyimpan dan mengelola data genetik. Sebagai bahan penelitian data genetika manusia diakusisi dari NCBI repository. Data genetik tersebut disimpan dalam *Smart contract* pada *blockchain Ethereum* yang ditulis menggunakan bahasa pemrograman *Solidity*. Setiap transaksi dan penyimpanan data pada *Ethereum* dibebankan biaya yang cukup mahal atau yang dikenal dengan biaya *gas* maka penelitian ini menawarkan solusi hanya menyimpan *signature* saja dari data genetik itu dalam *blockchain*. Data genetik yang riil dan berukuran besar disimpan dalam *InterPlanetary File System* (IPFS). Hasil pengujian menjalankan *smart contract* pada *blockchain Ethereum* yang hanya menyimpan *signature* data genetik ini menunjukkan biaya *gas* yang sangat efisien karena hanya menyimpan 256 bit saja dari data genetik riilnya yang dapat mencapai *giga byte*.

Kata kunci: *Smart contract, Blockchain, Ethereum, Genetika Manusia, Solidity*

LOW-COST SMART CONTRACT FOR HUMAN GENTIC DATA ON ETHEREUM BLOCKCHAIN

Abstract

Human genetics refers to information gathered about the genome or genetic heritage of human individuals. This data includes DNA sequences, genetic variations, mutations, and other information related to individual human genetic traits and characteristics. Human genetic data is obtained through a series of processes, including genetic sequencing, genetic testing, DNA analysis, and genetic mapping. Genetic data, especially in humans, is private data that must be protected by security and confidentiality. Several studies have used Blockchain technology to store data that requires extra security. Blockchain provides solutions for data protection and management with its technological features that are decentralized, encrypted, every transaction can be traced, and anti-tampering or difficult to modify. Research uses Blockchain technology to store and manage genetic data. As research material, human genetic data was acquired from the NCBI repository. The genetic data is stored in Smart contracts on the Ethereum blockchain written using the Solidity programming language. Every transaction and data storage on Ethereum is charged with a fairly expensive fee, known as a gas fee, so this research offers a solution by only storing the signature of the genetic data in the blockchain. The real and large-scale genetic data is stored in the InterPlanetary File System (IPFS). The test results of running a smart contract on the Ethereum blockchain that only stores genetic data signatures show a very efficient gas cost because it only stores 256 bits of real genetic data, which can reach gigabytes.

Keywords: *Smart contract, Blockchain, Ethereum, Human Genetics, Solidity*

1. PENDAHULUAN

Smart contract pada *Ethereum* berjalan di atas platform *Blockchain* (Taherdoost, 2023), dimana

setiap node di jaringan harus menyimpan salinan dari seluruh *Blockchain* (Ali, Farouk and Sharaf, 2022). Setiap transaksi yang terjadi pada jaringan *Ethereum* dicatat dalam blok yang ditambahkan ke *Blockchain*

(Ullah et al., 2020). Setiap *node* di jaringan harus menyetujui transaksi tersebut sebelum blok dapat ditambahkan ke *Blockchain* (Ullah et al., 2020).

Setiap *smart contract* pada *Ethereum* memiliki alamat yang unik (Di Angelo and Salzer, 2021). Setiap kali kontrak dipanggil, kode kontrak dijalankan di setiap *node* yang terhubung ke jaringan *Ethereum* (Chatterjee, Goharshady and Goharshady, 2019). *Smart contract* dapat menyimpan data seperti data kesehatan, keuangan, dan arsip-arsip berharga. Pada penelitian ini, *smart contract* digunakan untuk menyimpan data biomedis. Data yang termasuk dalam bidang biomedis, salah satunya adalah data genetika manusia. Hal ini karena data genetika setiap individu mengandung informasi yang sangat sensitif dan apabila bocor dapat mengakibatkan permasalahan yang fatal karena memiliki data tentang genom individu, termasuk potensi risiko kesehatan, kerentanan terhadap penyakit tertentu, informasi tentang keturunan, dan karakteristik fisik unik (Mohammed Yakubu and Chen, 2022). Penelitian ini akan mengembangkan *smart contract* yang digunakan untuk menyimpan data genetika manusia (Jin et al., 2019). Data yang terkait dengan *smart contract* disimpan dalam basis data terdistribusi yang terdapat di setiap *node* sehingga setiap *node* memiliki salinan data kontrak yang sama (Kamal and Fareed, 2021).

Dalam *Ethereum*, setiap transaksi yang dikirim ke jaringan harus mengandung biaya *gas* (Laurent, Brotcorne and Fortz, 2022). Biaya *gas* ini membayar untuk penggunaan sumber daya jaringan *Ethereum* (Liu et al., 2022), termasuk penggunaan memori dan penyimpanan (Zahed Benisi, Aminian and Javadi, 2020). Oleh karena itu, ketika suatu *smart contract* digunakan untuk menyimpan data atau melakukan transaksi, biaya *gas* harus dibayar untuk setiap operasi yang dilakukan pada data tersebut (Park et al., 2018).

Untuk menyimpan data di dalam *smart contract*, kontrak harus memiliki variabel yang dapat menyimpan data (Khan et al., 2021). Variabel tersebut dapat dideklarasikan dalam kontrak dan digunakan untuk menyimpan data dengan tipe yang berbeda-beda, seperti angka, *string*, atau *array* (Zakrzewski, 2018). Data ini dapat dimanipulasi dan diakses oleh kode kontrak melalui fungsi yang didefinisikan dalam kontrak (Feng et al., 2019).

Smart contract juga dapat mengakses data dari sumber eksternal, seperti API atau basis data terdistribusi lainnya (Lin et al., 2022b). Untuk melakukan ini, *smart contract* harus berinteraksi dengan kontrak yang menyediakan data atau mengakses API melalui jaringan *Ethereum* (Kannengieser et al., 2022).

Dalam hal penyimpanan data, *Ethereum* menggunakan mekanisme penyimpanan yang disebut *merkle tree*. Mekanisme ini memungkinkan *Ethereum* untuk menyimpan data terdistribusi secara efisien dan aman. *Merkle tree* adalah struktur data pohon yang memungkinkan data untuk disimpan

secara terdistribusi dan diakses dengan cepat melalui kode kontrak. Data yang disimpan dalam *Merkle tree* dienkripsi dan diotentikasi dengan *hash* kriptografi, sehingga aman dari manipulasi atau modifikasi yang tidak sah (Sato et al., 2021). *Merkle tree* merupakan struktur data berbasis *hash* yang sering digunakan sebagai teknik kompresi data, sehingga mekanisme ini dapat diimplementasikan untuk kompresi data genetika manusia yang dapat memiliki ukuran yang sangat besar menjadi berukuran 256 bit jika menggunakan SHA-1, dan berukuran 128 bit jika menggunakan MD5 (Al Aziz, Thulasiraman and Mohammed, 2022).

Selain itu, *Ethereum* juga memiliki mekanisme memori yang memungkinkan kode kontrak untuk mengakses data yang disimpan dalam memori sementara selama kontrak dijalankan (Duan et al., 2022). Memori ini berbeda dengan penyimpanan permanen pada *Blockchain* dan hanya digunakan untuk memproses data selama kontrak dijalankan (Ghosh et al., 2023). Biaya *gas* yang dibayarkan untuk penggunaan memori juga lebih rendah daripada biaya *gas* untuk penggunaan penyimpanan permanen pada *Blockchain* (Kurt Peker et al., 2020).

Secara keseluruhan, *Ethereum* menggunakan kombinasi penyimpanan permanen pada *Blockchain* dan penyimpanan sementara di memori untuk menyimpan dan mengakses data genetika manusia dalam *smart contract* (Aldyafillah et al., 2023). Mekanisme ini memungkinkan *smart contract* untuk menyimpan data genetika manusia terdistribusi secara aman dan efisien, sambil meminimalkan biaya *gas* yang harus dibayarkan oleh pengguna jaringan *Ethereum* (Kirli et al., 2022). Infrastruktur penelitian biomedis yang menggunakan *Blockchain* untuk manajemen akses data dan komputasi terdistribusi untuk analisis data yang disimpan dalam catatan kesehatan elektronik berpotensi mengurangi risiko pelanggaran privasi seminimal mungkin (Porsdam Mann et al., 2021).

1.1 Blockchain

Blockchain pada dasarnya adalah buku besar dari semua aktivitas transaksional yang terjadi di jaringan. Buku besar disimpan di jaringan menggunakan blok: objek yang menyimpan serangkaian transaksi unik, yang semuanya dapat diidentifikasi dengan ID uniknya sendiri (Pacheco et al., 2023). Teknologi *Blockchain* didasarkan pada jaringan terdesentralisasi yang berarti beroperasi sebagai jaringan *peer to peer* (Lakkis and Issa, 2022). *Blockchain* didistribusikan menggunakan skema konsensus yang memungkinkan data transaksi disimpan dengan aman di jaringan *Blockchain* setelah proses verifikasi dan validasi tanpa intervensi pihak ketiga (Riadi et al., 2020). *Blockchain* biasanya tidak secara langsung menyimpan data asli atau catatan transaksi; sebaliknya, *Blockchain* menyimpan nilai *hash* mereka dengan menyalin data asli ke dalam

rangkaian angka dan huruf dengan panjang tertentu (Qiao et al., 2022).

1.2 Ethereum

Ethereum adalah salah satu *platform* paling populer untuk pengembangan aplikasi bertenaga *Blockchain* (Pacheco et al., 2023). *Ethereum* adalah salah satu jaringan yang mengimplementasikan teknologi *Blockchain* terdistribusi yang memanfaatkan *smart contract* dan *open-source* serta dapat diprogram (Riadi et al., 2020). *Ethereum* adalah platform *Blockchain* terbesar kedua setelah *Bitcoin* dan memungkinkan pengguna untuk melakukan transaksi kompleks berdasarkan *smart contract*, yang merupakan aplikasi yang berjalan di mesin virtual *Ethereum* (Zhou et al., 2022). *Ethereum* sering disebut juga sebagai *platform* untuk mengimplementasikan *smart contract* (Ahn, 2022).

1.3 Smart contract

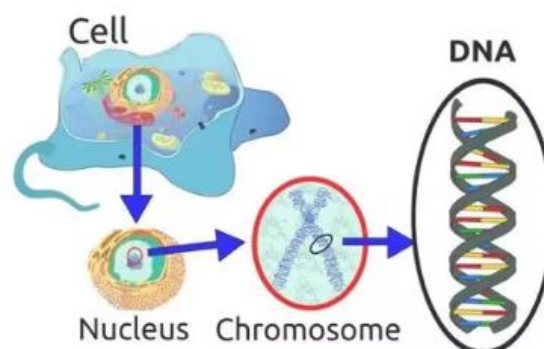
Smart contract adalah protokol komputer yang dirancang untuk menyebabkan, memverifikasi, dan mengeksekusi kontrak dengan cara berbasis informasi. *Smart contract* merupakan program yang dijalankan sendiri yang disimpan di *Blockchain* (Palechor and Bezemer, 2022). *Blockchain* membuat *Smart contract* memiliki keunggulan programabilitas, desentralisasi, non-gangguan, dan *traceability* (Lin et al., 2022a). Pada era *Blockchain* 3.0, platform *smart contract* saat ini termasuk *Bitcoin*, *Ethereum*, *Hyperledger*, dan *EOS* (Sharma et al., 2019). Untuk penginderaan data dan banyak bentuk data lain seperti rekam medis biomedis, perawatan kesehatan, dan elektronik, sangat penting untuk hanya mengizinkan pengguna yang sah untuk mengunggah data genetika manusia ke dalam penyimpanan data *smart contract* karena jika tidak maka integritas data tidak dapat dijamin. Untuk kerahasiaan data, hanya pengguna yang berwenang yang dapat menanyakan data genetika manusia dari *smart contract*. *Smart contract* ditulis dalam *Solidity*, bahasa pemrograman resmi untuk kontrol cerdas *Ethereum*.

1.4 Solidity

Solidity merupakan bahasa pemrograman untuk *smart contract*. *Solidity* digunakan sebagai bahasa pemrograman berorientasi kontrak untuk menulis *smart contract* (Riadi, Herman and Ifani, 2021). Pada berbagai platform *Blockchain*, *Solidity* sangat populer digunakan untuk membuat *smart contract*, termasuk *Ethereum* yang populer. Di *Ethereum*, *smart contract* berjalan di mesin penambang dan *gas* sesuai dengan biaya eksekusi yang mengkompensasi sumber daya komputasi tersebut (Di Sorbo et al., 2022). Untuk pengembangan *smart contract*, pengembang dapat menggunakan *Ethereum IDE Remix online* atau menginstal secara lokal kompiler *Solidity* dari versi tertentu untuk mengkompilasi kode sumber *smart contract* (Tian et al., 2022).

1.5 Genetika Manusia

Data genetika manusia mengacu pada informasi genetik yang terkait dengan manusia (Whitmore et al., 2023). Genetika adalah studi tentang warisan genetik, variasi genetik, serta hubungan antara gen dan fenotipe (karakteristik yang terlihat). Data genetika manusia mencakup informasi tentang struktur dan fungsi genom manusia, termasuk urutan DNA, variasi genetik, serta pola pewarisan sifat genetik dari generasi ke generasi (Hoekstra and Robinson, 2022). Informasi genetik manusia dapat ditemukan dalam DNA (asam deoksiribonukleat), yang merupakan molekul penyimpan informasi genetik dalam sel-sel tubuh manusia. Setiap sel dalam tubuh manusia mengandung salinan lengkap genom manusia yang terdiri dari kromosom yang membawa gen (Telser, 2002). Ilustrasi kromosom pada genetika manusia dapat dilihat pada Gambar 1.



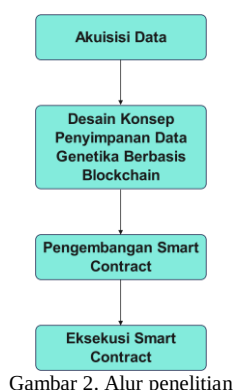
Gambar 1. Struktur kromosom pada genetika manusia (Quora, 2023)

Data genetika manusia dapat diperoleh melalui berbagai metode. Salah satu metode yang umum adalah pengurutan gen, dimana urutan asam amino dalam DNA dianalisis untuk mengidentifikasi perbedaan genetik (Li et al., 2020). Teknologi pengurutan gen saat ini telah memungkinkan untuk mengembangkan basis data genetika yang besar, seperti Proyek Genom Manusia (Bansal and Boucher, 2019).

Informasi genetik manusia memiliki banyak aplikasi dalam ilmu biomedis. Misalnya, data genetika dapat digunakan untuk mempelajari penyakit genetik dan faktor risiko genetik yang terkait dengan penyakit tertentu. Data ini juga digunakan dalam penelitian farmakogenomik untuk mengidentifikasi respons obat individu pada tingkat genetik, serta dalam studi evolusi dan keturunan manusia. Farmakogenetik mengacu pada variabilitas dalam menanggapi terapi obat pada manusia, yang merupakan bidang yang berkembang pesat dalam biologi molekuler dan kedokteran klinis (Lopez, 2018).

Penting untuk diingat bahwa data genetika manusia memiliki implikasi etis yang signifikan. Perawatan harus diambil untuk melindungi privasi dan keamanan informasi genetik dan data genetika individu.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 2. Alur penelitian

Alur dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2, yang terdiri atas empat tahap yang dijelaskan seperti berikut:

2.1 Akuisisi Data

Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengakuisisi data genetika manusia, yang mana data tersebut didapatkan dari website *National Center for Biotechnology Information* (NCBI), yaitu lembaga yang merupakan bagian dari *National Institutes of Health* (NIH) di Amerika Serikat. NCBI bertanggung jawab untuk menyediakan akses terhadap berbagai basis data dan sumber daya biologi molekuler yang penting dalam bidang bioteknologi dan biomedis seperti data dari genetika manusia. NCBI menyediakan akses ke basis data publik seperti *GenBank*, *Database of Genotypes and Phenotypes* (DbGaP), dan *Sequence Read Archive* (SRA), yang berisi informasi tentang sekuens DNA, data ekspresi gen, dan data lain yang relevan dengan penelitian genetika.

```

>ref|NC_000007.14|:54999755-55238888 Homo sapiens chromosome 7, GRCh38.p14 Primary
Assembly
AATATATTGACTACAAAGTATGACCACTAGGAAATAACTTCTGTGTTCATTTCATGCAGGTTTAG
GCACGGCAAGAGATGGCAGGACACACACTTCTGAGGACACACAGGTTATCCAAACAACTACTTC
CAGATCTTACCTAAAGGGAAGTCACTCAAGGCCGGAACACTGAGGAAAGCATCACTGTGCCAAGTTT
TAGAGTCTGATGAGATAAAACACTATTAGAGAAATGTGCACCACTCTTTTAACTAGTGGTGAAT
GGATAACAAAGGAGCATATAGCCACACATGGAGTATGACGAGTAAAGGAAACAACTACCAAT
AAATGCAGAAACATGGAGGAATATTGAGCTGAGTGACAAAGCCAAACAAATGCTTCATCTGA
ATGATCTTTTGAATCTAGATCTTTATGAACTTATACAAATACAACTATTCTGTAGTGACCTCAG
ATAGATCACTAGTGTGGGAGGCCACCGGACAGGCGAGAGATTTTGCAAGTAGCATGGAACCTCTCT
GGGTGATGGAACATCTGTGCTTGAATTGATGACGCTCATGTGTCACAGCAGTGAATGGACACT
CTAAATAATGCAAGCTTTGCTTGTAACTATACCTTGATTAAGTGAAGATAAAGGCTAATTAGTACA
TGAACAAAGCTTGTGACCTATAGACATAAAGAAATGCAAAACAGATAAAACATTTATGCTGCTGAAG
TTTATGTCATAGAAATTTATCTAATTTAAAGGTGACAGTCTTTAAAGAAATATAAATAAAAAATTT
TTAACTAGAAACAAAGCACTCAAACTTACTTGTCAAAATGTGTGAATTTGTTACAGGTTATTCACTTA
GCATTGTATGGAATACCTTTAAGTGTCTTCAAGTGAAGGCGAGGTAATAAATAGCTTCAACTTAAG
GAGGTATAGTTACATACATAAGCCAGATCTATTAGAGTGTCTTACATAGACAGATAGATAGATA
GATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGAT
AGAGAAAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAA
AAATAAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAGAAA
TACTGGCAATAAATAAGTAACTTAAGTATTGATGATGAGTCAAGTCCAGGATATACTATTACAT
ATTTTTTAAAGTGCAGAAATAACAGTGTATGATAGACATCTTGGAGGACCGCTCTATGCTTGA
ATGCTCTTCCAAACTCATGCTGAACTTAATTTCAATGTGAGCATTAAGAGGTTAATATTAGA
TTAATGAATCAATGTGTATGATGAGAGAGAGGCTTGTGGCTTTATAGAGAGAGAGAGGAACTGAGTAG
CATGTTGTATGACAGCTCAGCCCCCTTAACATGAGATGCCCTGCACACCTCGGGACTCTGACAGGGC
CCCACAGCAAGAGGCTCAGCAGATGAGTGTCCCAACCTGTACTCTCCAGCTCCATAAATGTAA
GAAATAAATTCATTTTCTTAAGTACTCAGTTTCAAGTGTGTTATAGCAACAGAAATCAAACT
AAAACCCCAAGGAGCTGATGAGCTGATCATCTAGTATGAGTGGCTGAGATGGGATGGGTTTTCAT
GTACAGTTTAAATTAATTTCAACCAAGTGAATTAAGTATCAAAATGTAATGAAATTAATTAATA
AAACATGTGAGCATTAACAGAGAGAGGATGCTTTCTCAAGGGTCCGTCTATTACCGTTTCTAAGGCA
AGCTTTGGTATGATGCTGCAACCACTGTCCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCTCT
GCTTTGATGCCACCTTCACTGACCTCACTCCCATGACCTGCTGATCTGAGAGACATCTCT
  
```

Gambar 3. Data genetika manusia

Sekuen yang diperoleh dari hasil penelitian di laboratorium dapat dianalisis dengan data serupa yang telah dipublikasikan sebelumnya di gen bank. Salah satu bentuk analisis yang dapat dilakukan misalnya adalah analisis penyejajaran. Analisis penyejajaran dapat digunakan untuk membandingkan dua sekuen atau lebih. Program yang digunakan untuk analisis penyejajaran yaitu program *Basic Local Alignment Search Tools* (BLAST). Pada Gambar 3 dapat dilihat untuk data genetika yang tersedia dalam format *Fasta*. *Fasta* adalah salah satu format yang paling umum digunakan untuk menyimpan urutan DNA dan protein pada data genetika (Famuji, Herman and Sunardi, 2023). Namun, pada penelitian ini data yang akan disimpan hanyalah ID dari data file genetika dengan ukuran 256-bit.

2.2 Konsep Penyimpanan Data Genetika Berbasis Blockchain

Desain untuk penyimpanan data genetika manusia adalah proses mendesain sistem *smart contract* yang terprogram menggunakan teknologi *Blockchain* untuk mengatur dan mengelola penyimpanan data genetika manusia. Tujuan utama dari *smart contract* ini adalah untuk memberikan keamanan, keandalan, dan akses terkontrol terhadap data genetika individu. Berikut adalah konsep dari penyimpanan data genetika pada *smart contract*:

1. Data genetika atau file yang sudah didapatkan dari website NCBI dalam format *fasta*, dikarenakan ukurannya sangat besar akan disimpan ke dalam *InterPlanetary File System* (IPFS).
2. Setelah data disimpan pada IPFS maka akan didapatkan *private key* dan *public key* dari IPFS tersebut. *Private key* inilah yang akan disimpan ke dalam *smart contract*.
3. *Private key* merupakan kode unik yang didapatkan dari setiap penyimpanan data pada IPFS. Kode ini merupakan kode *hashing* yang hanya berukuran 256-bit saja.

2.3 Pengembangan Smart contract

Pengembangan *smart contract* untuk penyimpanan data genetika manusia adalah proses menciptakan kontrak pintar yang menggunakan teknologi *Blockchain* untuk mengatur pengumpulan, penyimpanan, dan akses data genetika individu. Tujuan utama dari pengembangan *smart contract* ini adalah untuk memberikan kerangka kerja yang aman, terdesentralisasi, dan terdapat kendali akses yang ketat terhadap data genetika.

Smart contract untuk penyimpanan data genetika manusia dijalankan dengan melibatkan implementasi dan eksekusi kontrak pintar yang telah dikembangkan untuk mengatur operasi penyimpanan, akses, dan manajemen data genetika. *Smart contract* yang telah dikembangkan perlu diimplementasikan pada platform *Blockchain* yang relevan. Hal ini

melibatkan penulisan kode *smart contract* dan menjalankan pada jaringan *Blockchain* yang dipilih. Pada penelitian ini *smart contract* dijalankan di *Ethereum*.

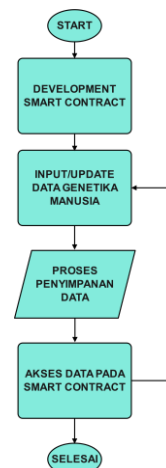
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan desain komponen *smart contract* dan konsep penyimpanan dan pengambilan data pada *smart contract*. Komponen-komponen dari *smart contract* perlu diperhatikan supaya tercapai berdasarkan tujuan dikembangkannya *smart contract* tersebut.

3.1 Konsep Smart contract

Dalam penelitian ini, yang mendorong penelitian dalam mempertimbangkan *smart contract* adalah untuk melindungi keamanan data genetika manusia yang ditempatkan di *Blockchain* sebagai bagian dari pemrosesan data penginderaan yang aman. Tanpa kontrol akses yang tepat, fungsi publik yang didefinisikan dalam *smart contract* dapat dipanggil oleh setiap pengguna yang mengetahui alamat kontrak atau ID Walletnya. Berikut adalah elemen-elemen penting dalam mengembangkan *smart contract*:

1. Identifikasi data genetika. Tentukan jenis data genetika yang akan disimpan dalam *smart contract*, seperti sekuens DNA, hasil tes genetika, riwayat keluarga, atau data terkait genetika lainnya.
2. Pengaturan akses. Atur mekanisme akses yang tepat untuk mengontrol siapa yang dapat melihat dan mengakses data genetika. Hal ini mencakup penggunaan mekanisme otentikasi, izin akses berbasis peran, enkripsi data, atau metode lain yang memastikan privasi dan keamanan data.
3. Keamanan data. Pastikan keamanan data genetika dengan menerapkan enkripsi data dan langkah-langkah perlindungan keamanan yang sesuai. *Smart contract* harus dirancang dengan mempertimbangkan kerahasiaan dan integritas data genetika.
4. Verifikasi data. Pertimbangkan metode untuk memverifikasi keaslian dan integritas data genetika yang disimpan dalam *smart contract*, misalnya mempertimbangkan penggunaan tanda waktu atau mekanisme verifikasi lainnya untuk memvalidasi data yang dimasukkan ke dalam kontrak.
5. Pengelolaan perubahan. Pertimbangkan bagaimana *smart contract* akan mengelola perubahan atau pembaruan data genetika. *Smart contract* harus mempertimbangkan mekanisme untuk mengelola versi data genetika atau pembaruan yang terkait dengan perubahan genetika individu.

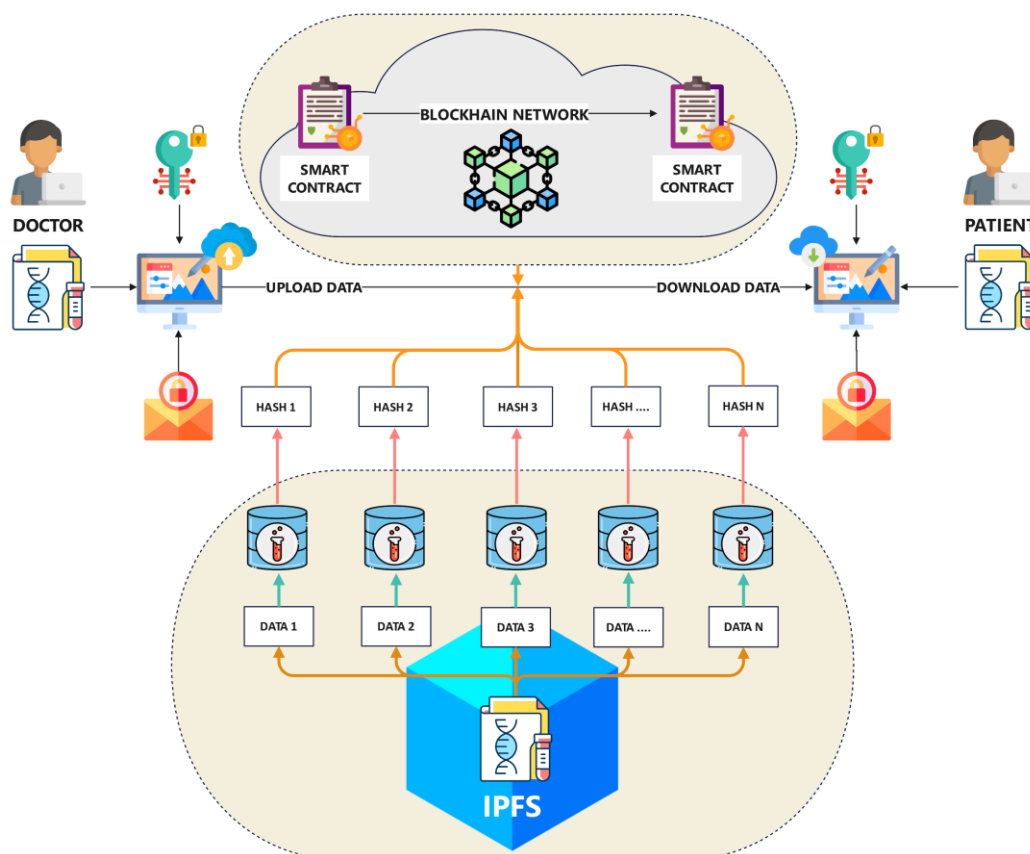


Gambar 4. Data genetika manusia

Berdasarkan gambar 4, penyimpanan data mencakup informasi dari data genetika yang disimpan. Kontrak ini memiliki tiga fungsi, yaitu untuk menyimpan informasi data genetika, mengedit informasi data genetika, dan memanggil data genetika.

3.2. Penyimpanan dan Pengambilan Data

Pada metode penyimpanan data genetika manusia secara konvensional terdapat kerentanan untuk kehilangan data, IPFS adalah metode penyimpanan terdesentralisasi sebagai solusi untuk mengatasi masalah tersebut. Dengan penyimpanan data genetika manusia pada IPFS, informasi genetik menjadi lebih aman, terdesentralisasi, dan mudah diakses oleh para peneliti di seluruh dunia. Hal ini tidak hanya memudahkan kolaborasi lintas batas geografis, tetapi juga memastikan bahwa data genetika berharga tetap terlindungi dan dapat ditemukan oleh generasi mendatang. Penyimpanan data genetika pada IPFS juga menghilangkan ketergantungan pada pusat data tunggal, menciptakan ketahanan yang lebih besar terhadap risiko hilangnya data yang sangat berharga dalam penelitian genetika dan kesehatan manusia. Dalam implementasi sederhana penelitian dapat menggunakan variabel *Solidity* untuk menyimpan data seperti *string*, *integer*, atau tipe data kustom dari kreasi sendiri. Fungsi ini memungkinkan untuk menyimpan data baru atau memulihkan data yang sudah disimpan. Selain itu dapat menggunakan struktur data seperti tabel atau peta untuk mengelola data dalam jumlah besar atau menata data berdasarkan kunci atau pengidentifikasi unik. Ada beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan saat menyimpan dan mengambil informasi tentang kontrak pintar. Pertama, pertimbangkan ruang lingkup aplikasi dan jumlah data yang akan disimpan. Kedua, perhatikan biaya transaksi yang terkait dengan setiap operasi penyimpanan dan pengambilan data karena ada biaya *gas* yang harus dibayarkan untuk setiap operasi di *Blockchain Ethereum*. Untuk skema penyimpanan data genetika manusia menggunakan platform IPFS dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Data genetika manusia

Berdasarkan gambar 5, proses bisnis pada jaringan *Ethereum Blockchain* dengan memadukan *smart contract* yang mengatur akses dan perlindungan data genetika manusia serta penggunaan IPFS sebagai antarmuka untuk berinteraksi dengan platform terkait, teknologi *blockchain* dapat memberikan keamanan, privasi, dan kontrol yang diperlukan dalam penyimpanan dan pengelolaan informasi genetika manusia. Untuk terhubung ke jaringan *Ethereum*, setiap pengakses data genetika manusia harus memiliki akun di jaringan *Ethereum* terlebih dahulu karena setiap transaksi di *Ethereum* memerlukan gas atau biaya untuk setiap transaksi yang dilakukan. *Smart contract* secara otomatis akan menjalankan setiap kode untuk mengeksekusi transaksi dan perjanjian tanpa memerlukan perantara. Mengidentifikasi *smart contract* harus terhubung terlebih dahulu ke jaringan *Ethereum* yaitu jaringan dimana *smart contract* dikembangkan. Pengontrolan akses, *smart contract* akan mengontrol data akun user yang terhubung dengan *smart contract* untuk melihat apakah valid dengan *public key* yang tersimpan di *smart contract*. Jika otorisasi berhasil maka user akan mendapatkan akses IPFS untuk mengunduh data genetiknya yang berupa kode *hashing* yang memiliki panjang karakter 256-bit atau setara dengan 32 bytes. Namun, jika otorisasi tidak berhasil atau tidak valid maka user tidak akan mendapatkan akses ke IPFS, tempat penyimpanan data genetiknya.

The screenshot shows the 'saveGen' web interface. It includes a 'wallet' field with the value '0x5B38Da6a701c568545dCfc803FcB', a 'first' name field with 'Tri Stiyo', a 'last' name field with 'Famuji', an 'email' field with 'tristiyofamuji@gmail.com', and a 'genID' field with '>ref[NC_000001.11]:16561764-2318'. At the bottom, there are three buttons: 'CallData', 'Parameters', and 'transact'.

Gambar 6. Luaran fungsi dari saveGen

Gambar 6 merupakan hasil luaran dari fungsi **SaveGen**. Fungsi dari luaran tersebut adalah untuk menyimpan informasi dari data genetika yang akan disimpan seperti data ID Wallet, nama, email pemilik dari data genetik tersebut, dan id dari data genetika. Dimana data-data tersebut akan otomatis tersimpan pada jaringan *Blockchain Ethereum*.

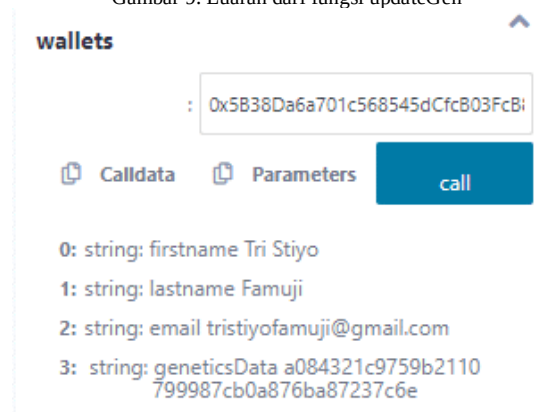


Gambar 7. Informasi gas untuk fungsi saveGen

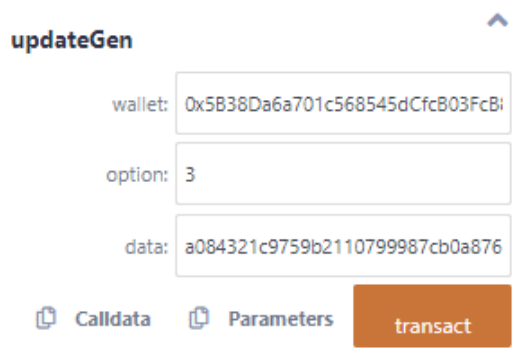
Gambar 7 menampilkan informasi *gas* yang digunakan dalam melakukan setiap transaksi menyimpan data genetika dimana pada gambar tersebut ditunjukkan untuk biaya transaksi sebesar 390438 *gas*. Berdasarkan pertimbangan untuk menghindari keborosan penggunaan *gas* dalam proses penyimpanan data genetika maka yang disimpan hanyalah ID dari data genetika yang akan di *hashing* sebelumnya pada *platform* penyimpanan IPFS. Data *hashing* tersebut berukuran 256-bit atau setara dengan 32 *bytes* dari ukuran file yang ukurannya bisa mencapai ratusan *Megabyte* (MB). Dengan solusi ini maka penyimpanan data *Blockchain* hanya akan memakan ruang penyimpanan 256 bit atau setara dengan 32 *bytes*. Sedangkan untuk biaya penyimpanan data genetika apda IPFS tidak dikenakan biaya *gas* dikarenakan IPFS bersifat *open source*. IPFS sendiri tidak mengenakan biaya karena fokus utamanya adalah pada akses terdesentralisasi dan pertukaran data yang terdistribusi secara luas.



Gambar 9. Luaran dari fungsi updateGen



Gambar 10. Output dari pemanggilan data genetika berdasarkan ID Wallet



Gambar 8. Fungsi dari updateGen

Gambar 8, merupakan fungsi dari *update data* genetika manusia yang sudah tersimpan pada *Blockchain Ethereum*. Dimana fungsi untuk mengubah data dari data genetika yang berukuran besar tersebut diubah dengan data dari *ID hash* dalam IPFS yang berukuran 32 *bytes*.

Dapat lihat pada gambar 9, menampilkan informasi dari hasil *update data* dengan memerlukan biaya *gas* sebesar 31.815 *gas* dimana biaya ini lebih murah daripada biaya penyimpanan data genetika manusia dengan data yang sebenarnya.

Gambar 10 merupakan *form* untuk pemanggilan informasi data genetika manusia yang sudah tersimpan dalam *smart contract*. Proses pemanggilan ini berdasarkan ID Wallet yang digunakan untuk menyimpan data genetika pada *smart contract*.

3.2 Evaluasi Perbandingan Biaya Gas

Pada hasil diatas dapat disimpulkan dari setiap transaksi akan dikenakan biaya *gas* yang tidak sedikit. Namun, perlu diingat bahwa penyimpanan data genetika manusia pada *Blockchain* memiliki implikasi privasi dan etika yang signifikan. Data genetika adalah informasi pribadi yang sangat sensitif dan publikasi data tersebut pada *Blockchain* dapat menimbulkan masalah privasi dan keamanan. Oleh karena itu, sebelum mengimplementasikan penyimpanan data genetika manusia pada *smart contract* maka perlu memastikan bahwa semua persyaratan privasi, peraturan, dan etika yang berlaku telah terpenuhi. Menentukan penurunan biaya *gas* pada *smart contract* khususnya pada jaringan *Ethereum* perlu memperhitungkan biaya *gas* yang diperlukan untuk operasi penyimpanan data pada *Blockchain Ethereum*. Setiap operasi yang dilakukan pada *Ethereum* memerlukan *gas* yang merupakan unit untuk mengukur konsumsi sumber daya (seperti komputasi atau penyimpanan) dalam jaringan *Ethereum*. Setiap *byte* data yang disimpan pada *smart contract* pada umumnya memerlukan 20.000 *gas* (Boubeta-Puig, Rosa-Bilbao and Mendling, 2021). Oleh karena itu, untuk menyimpan data dengan ukuran 32 *bytes* dapat dihitung secara matematika sebagai berikut:

Biaya gas = Ukuran data $\times$ biaya gas per byte
 Biaya gas = 32 bytes $\times$ 20,000 gas per byte
 Biaya gas = 640000 gas

Harga dari setiap gas bersifat fluktuatif tergantung pada kondisi pasar dan kepadatan jaringan *Ethereum*. Perlu diperhatikan bahwa nilai gas dapat berubah-ubah sesuai dengan permintaan dan aktivitas transaksi di dalam jaringan. Oleh karena itu, ketika melakukan transaksi atau operasi pada *Ethereum*, penting untuk memantau harga gas saat itu agar dapat menyesuaikan biaya transaksi sesuai dengan kondisi pasar yang sedang berlangsung.

4. KESIMPULAN

Peningkatan penggunaan data genetika manusia merupakan hal penting untuk analisis informasi penting tentang genom atau warisan genetik individu manusia dan untuk memahami dan mengatasi penyebab penyakit. Oleh karena itu, sangat penting adanya tata kelola data yang sesuai didokumentasikan dan kegiatan keterlibatan publik dilakukan untuk memastikan praktik yang dapat diterima secara sosial. Hal ini akan memastikan bahwa penggunaan data genetika manusia untuk memajukan penelitian kesehatan dapat dimanfaatkan secara maksimal. Oleh karena itu, penyimpanan data genetika manusia sebaiknya menggunakan teknologi yang memiliki perlindungan dan pengelolaan data genetika manusia yang terdesentralisasi, *traceability*, terenkripsi, dan fitur *antitampering* atau sulit dimodifikasi seperti penggunaan teknologi *Blockchain*. Namun perlu diperhatikan dalam penyimpanan pada *Blockchain* harus dipertimbangkan ukuran dari data yang akan disimpan karena pada *blockchain Ethereum* adanya biaya gas yang harus ditanggung untuk setiap transaksi yang dijalankan. Berdasarkan hasil penelitian dengan pengujian menjalankan *smart contract* pada *blockchain Ethereum* yang hanya menyimpan *signature* data genetik ini menunjukkan biaya gas yang sangat efisien karena hanya menyimpan 256-bit saja dari data genetik riilnya yang dapat mencapai *giga byte*. Pada penelitian ini sekedar membandingkan penyimpanan data genetika manusia pada *Smart Contract* pada jaringan *Ethereum Blockchain* yang dikombinasikan dengan IPFS. IPFS sebagai *platform* untuk penyimpanan data asli dari data genetika manusia yang berukuran besar dimana jumlah gas yang digunakan untuk menyimpan data tersebut mencapai 390.438 gas. Nilai gas tersebut akan berubah mengikuti ukuran dari data yang disimpan. Dibandingkan dengan menyimpan hasil *hashing* dari penyimpanan data genetika manusia pada IPFS yang hanya memiliki ukuran 32 bytes dengan biaya sebesar 31.815 gas.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat, serta Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik

Indonesia, sesuai dengan Surat Keputusan Nomor 0536/E5/PG.02.00/2023 dan Perjanjian/Kontrak Nomor 181/E5-PG.02.00.PL/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- AHN, B., 2022. Implementation and Early Adoption of an Ethereum-Based Electronic Voting System for the Prevention of Fraudulent Voting. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5), p.2917. <https://doi.org/10.3390/su14052917>.
- ALDYAFLAH, I.M., ZHAO, W., UPADHYAY, H. AND LAGOS, L., 2023. The Design and Implementation of a Secure Datastore Based on Ethereum Smart Contract. *Applied Sciences*, [online] 13(9), p.5282. <https://doi.org/10.3390/app13095282>.
- ALI, S.I.M., FAROUK, H. AND SHARAF, H., 2022. A blockchain-based models for student information systems. *Egyptian Informatics Journal*, [online] 23(2), pp.187–196. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2021.12.002>.
- DI ANGELO, M. AND SALZER, G., 2021. Identification of token contracts on Ethereum: standard compliance and beyond. *International Journal of Data Science and Analytics*, 16, pp.333–352. <https://doi.org/10.1007/s41060-021-00281-1>.
- AL AZIZ, M.M., THULASIRAMAN, P. AND MOHAMMED, N., 2022. Parallel and private generalized suffix tree construction and query on genomic data. *BMC Genomic Data*, 23(1), p.45. <https://doi.org/10.1186/s12863-022-01053-x>.
- BANSAL, V. AND BOUCHER, C., 2019. Sequencing Technologies and Analyses: Where Have We Been and Where Are We Going? *iScience*, [online] 18, pp.37–41. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.06.035>.
- BOUBETA-PUIG, J., ROSA-BILBAO, J. AND MENDLING, J., 2021. CEPchain: A graphical model-driven solution for integrating complex event processing and blockchain. *Expert Systems with Applications*, [online] 184, p.115578. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115578>.
- CHATTERJEE, K., GOHARSHADY, A.K. AND GOHARSHADY, E.K., 2019. The treewidth of smart contracts. In: *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. [online] New York, NY, USA: ACM. pp.400–408. <https://doi.org/10.1145/3297280.3297322>.
- DUAN, L., SUN, Y., ZHANG, K. AND DING, Y., 2022. Multiple-Layer Security Threats on the Ethereum Blockchain and Their Countermeasures. *Security and Communication Networks*, [online] 2022, pp.1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/5307697>.
- FAMUJI, T.S., HERMAN, H. AND SUNARDI, S., 2023. PROSES IMPLEMENTASI

- BIOINFORMATIKA PADA DIGITALISASI DATA GENETIKA MANUSIA. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, [online] 14(1), pp.1–12. <https://doi.org/10.24176/simet.v14i1.9064>.
- FENG, T., YU, X., CHAI, Y. AND LIU, Y., 2019. Smart contract model for complex reality transaction. *International Journal of Crowd Science*, [online] 3(2), pp.184–197. <https://doi.org/10.1108/IJCS-03-2019-0010>.
- GHOSH, P.K., CHAKRABORTY, A., HASAN, M., RASHID, K. AND SIDDIQUE, A.H., 2023. Blockchain Application in Healthcare Systems: A Review. *Systems*, [online] 11(1), p.38. <https://doi.org/10.3390/systems11010038>.
- HOEKSTRA, H.E. AND ROBINSON, G.E., 2022. Behavioral genetics and genomics: Mendel's peas, mice, and bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [online] 119(30). <https://doi.org/10.1073/pnas.2122154119>.
- JIN, X.L., ZHANG, M., ZHOU, Z. AND YU, X., 2019. Application of blockchain platform to manage and secure personal genomic data: A case study of lifecode.AI in China. *Journal of Medical Internet Research*, 21(9). <https://doi.org/10.2196/13587>.
- KAMAL, Z.A. AND FAREED, R., 2021. Data retrieval based on the smart contract within the blockchain. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, [online] 9(4), p.491. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i4.2353>.
- KANNENGIESER, N., LINS, S., SANDER, C., WINTER, K., FREY, H. AND SUNYAEV, A., 2022. Challenges and Common Solutions in Smart Contract Development. *IEEE Transactions on Software Engineering*, [online] 48(11), pp.4291–4318. <https://doi.org/10.1109/TSE.2021.3116808>.
- KHAN, S.N., LOUKIL, F., GHEDIRA-GUEGAN, C., BENKHELIFA, E. AND BANI-HANI, A., 2021. Blockchain smart contracts: Applications, challenges, and future trends. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, [online] 14(5), pp.2901–2925. <https://doi.org/10.1007/s12083-021-01127-0>.
- KIRLI, D., COURAUD, B., ROBU, V., SALGADO-BRAVO, M., NORBU, S., ANDONI, M., ANTONOPOULOS, I., NEGRETE-PINCETIC, M., FLYNN, D. AND KIPRAKIS, A., 2022. Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 158, p.112013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112013>.
- KURT PEKER, Y., RODRIGUEZ, X., ERICSSON, J., LEE, S.J. AND PEREZ, A.J., 2020. A Cost Analysis of Internet of Things Sensor Data Storage on Blockchain via Smart Contracts. *Electronics*, [online] 9(2), p.244. <https://doi.org/10.3390/electronics9020244>.
- LAKKIS, H. AND ISSA, H., 2022. Understanding Blockchain Technology. *International Journal of Technology and Human Interaction*, [online] 18(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.4018/IJTHI.297617>.
- LAURENT, A., BROTCORNE, L. AND FORTZ, B., 2022. Transaction fees optimization in the Ethereum blockchain. *Blockchain: Research and Applications*, [online] 3(3), p.100074. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2022.100074>.
- LI, H., YANG, Y., HONG, W., HUANG, M., WU, M. AND ZHAO, X., 2020. Applications of genome editing technology in the targeted therapy of human diseases: mechanisms, advances and prospects. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, [online] 5(1), pp.1–23. <https://doi.org/10.1038/s41392-019-0089-y>.
- LIN, H., LI, X., GAO, H., LI, J. AND WANG, Y., 2022a. ISC-MTI: An IPFS and smart contract-based framework for machine learning model training and invocation. *Multimedia Tools and Applications*, 81(28), pp.40343–40359. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13163-w>.
- LIN, S.-Y., ZHANG, L., LI, J., JI, L. AND SUN, Y., 2022b. A survey of application research based on blockchain smart contract. *Wireless Networks*, [online] 28(2), pp.635–690. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02874-x>.
- LIU, Y., LU, Y., NAYAK, K., ZHANG, F., ZHANG, L. AND ZHAO, Y., 2022. Empirical Analysis of EIP-1559: Transaction Fees, Waiting Times, and Consensus Security. *Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security*, pp.2099–2113. <https://doi.org/10.1145/3548606.3559341>.
- LOPEZ, D., 2018. Pharmacogenetics: An Important Part of Drug Development with A Focus on Its Application. *International Journal of Biomedical Investigation*, [online] 1(2), pp.1–16. <https://doi.org/10.31531/2581-4745.1000111>.
- MOHAMMED YAKUBU, A. AND CHEN, Y.P.P., 2022. A blockchain-based application for genomic access and variant discovery using smart contracts and homomorphic encryption. *Future Generation Computer Systems*, [online] 137, pp.234–247. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.07.012>.
- PACHECO, M., OLIVA, G., RAJBAHADUR, G.K. AND HASSAN, A., 2023. Is My Transaction Done Yet? An Empirical Study of Transaction Processing Times in the Ethereum Blockchain Platform. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, [online] 32(3), pp.1–46. <https://doi.org/10.1145/3549542>.
- PALECHOR, L. AND BEZEMER, C.P., 2022. How are Solidity smart contracts tested in open source projects? An exploratory study.

- Proceedings - 3rd ACM/IEEE International Conference on Automation of Software Test, AST* 2022, pp.165–169. <https://doi.org/10.1145/3524481.3527228>.
- PARK, J.-S., YOUN, T.-Y., KIM, H.-B., RHEE, K.-H. AND SHIN, S.-U., 2018. Smart Contract-Based Review System for an IoT Data Marketplace. *Sensors*, [online] 18(10), p.3577. <https://doi.org/10.3390/s18103577>.
- PORSDAM MANN, S., SAVULESCU, J., RAVAUD, P. AND BENCHOUFI, M., 2021. Blockchain, consent and present for medical research. *Journal of Medical Ethics*, [online] 47(4), pp.244–250. <https://doi.org/10.1136/medethics-2019-105963>.
- QIAO, L., DANG, S., SHIHADA, B., ALOUINI, M.S., NOWAK, R. AND LV, Z., 2022. Can blockchain link the future? *Digital Communications and Networks*, 8(5), pp.687–694. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2021.07.004>.
- QUORA, 2023. Apakah setiap sel di tubuh manusia memiliki DNA? [online] Available at: <<https://id.quora.com/Apakah-setiap-sel-di-tubuh-manusia-memiliki-DNA>>.
- RIADI, I., AHMAD, T., SARNO, R., PURWONO, P. AND MA'ARIF, A., 2020. Developing Data Integrity in an Electronic Health Record System using Blockchain and InterPlanetary File System (Case Study: COVID-19 Data). *Emerging Science Journal*, 4(Special issue), pp.190–206. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-SP1-013>.
- RIADI, I., HERMAN, H. AND IFANI, A.Z., 2021. Optimization of System Authentication Services using Blockchain Technology. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, [online] 6(4), pp.277–286. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v6i4.1325>.
- SATO, S., BANNO, R., FURUSE, J., SUENAGA, K. AND IGARASHI, A., 2021. Verification of a Merkle Patricia Tree Library Using F*. [online] Available at: <<http://arxiv.org/abs/2106.04826>>.
- SHARMA, A., AGRAWAL, D., SCHUHKNECHT, F.M. AND DITTRICH, J., 2019. Blurring the lines between blockchains and database systems: The case of hyperledger fabric. *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp.105–122. <https://doi.org/10.1145/3299869.3319883>.
- DI SORBO, A., LAUDANNA, S., VACCA, A., VISAGGIO, C.A. AND CANFORA, G., 2022. Profiling gas consumption in solidity smart contracts. *Journal of Systems and Software*, [online] 186, p.111193. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111193>.
- TAHERDOOST, H., 2023. Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review. *Information*, [online] 14(2), p.117. <https://doi.org/10.3390/info14020117>.
- TELSER, A., 2002. *Molecular Biology of the Cell*, 4th Edition. Shock, <https://doi.org/10.1097/00024382-200209000-00015>.
- TIAN, Z., TIAN, J., WANG, Z., CHEN, Y., XIA, H. AND CHEN, L., 2022. Landscape estimation of solidity version usage on Ethereum via version identification. *International Journal of Intelligent Systems*, [online] 37(1), pp.450–477. <https://doi.org/10.1002/int.22633>.
- ULLAH, A., SIDDIQUEE, S.M.S., HOSSAIN, M.A. AND RAY, S.K., 2020. An Ethereum Blockchain-Based Prototype for Data Security of Regulated Electricity Market. *Inventions*, [online] 5(4), p.58. <https://doi.org/10.3390/inventions5040058>.
- WHITMORE, L., MCCAULEY, M., FARRELL, J.A., STAMMNITZ, M.R., KODA, S.A., MASHKOUR, N., SUMMERS, V., OSBORNE, T., WHILDE, J. AND DUFFY, D.J., 2023. Inadvertent human genomic bycatch and intentional capture raise beneficial applications and ethical concerns with environmental DNA. *Nature Ecology & Evolution*, [online] 7(6), pp.873–888. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02056-2>.
- ZAHED BENISI, N., AMINIAN, M. AND JAVADI, B., 2020. Blockchain-based decentralized storage networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, [online] 162, p.102656. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102656>.
- ZAKRZEWSKI, J., 2018. Towards Verification of Ethereum Smart Contracts: A Formalization of Core of Solidity. [online] pp.229–247. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03592-1_13.
- ZHOU, J., HU, C., CHI, J., WU, J., SHEN, M. AND XUAN, Q., 2022. Behavior-Aware Account De-Anonymization on Ethereum Interaction Graph. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 17, pp.3433–3448. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2022.3208471>.