

Kajian Literatur: Rollups Sebagai Solusi Skalabilitas Jaringan Ethereum Layer 2

Yudhistira Nanda Kumala¹, Rizky Parluka^{2*}, Hendra Maulana³

^{1,2,3}Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

¹22081010055@student.upnjatim.ac.id

³hendra.maulana.if@upnjatim.ac.id

*Corresponding author email: rizkyparlika.if@upnjatim.ac.id

Abstrak— Ethereum sebagai platform *smart contract* banyak digunakan untuk dApps, namun Ethereum (Layer 1) masih menghadapi kendala skalabilitas ketika aktivitas transaksi meningkat, yang berdampak pada kemacetan jaringan, naiknya latensi, dan biaya transaksi yang tinggi. Makalah ini menyajikan kajian literatur yang berfokus pada *rollups* sebagai solusi utama Ethereum Layer 2 untuk mengurangi beban pemrosesan transaksi pada Layer 1. Metode yang digunakan adalah *literature review* terarah dengan sintesis tematik terhadap literatur yang membahas: sumber masalah skalabilitas di Ethereum Layer 1, konsep dan arsitektur *rollups*, perbedaan *Optimistic Rollups* dan *Zero-Knowledge Rollups*, serta tantangan implementasi *rollups* pada kondisi nyata. Hasil kajian menunjukkan bahwa *rollups* menjadi pendekatan dominan karena menggabungkan transaksi dalam *batch* untuk diproses di Layer 2, lalu melaporkan ringkasan/bukti ke Layer 1 sehingga efisiensi biaya dan kapasitas transaksi meningkat. Namun, efektivitas *rollups* bergantung pada aspek operasional dan keamanan seperti ketersediaan data, mekanisme penarikan dana, serta risiko ketergantungan pada operator/penyedia infrastruktur. Secara keseluruhan, *rollups* efektif sebagai solusi skalabilitas Ethereum, tetapi memerlukan penguatan desain keamanan dan keandalan operasional agar dapat diadopsi lebih luas.

Kata Kunci— Ethereum, Skalabilitas, Layer 1, Layer 2, *Optimistic Rollups*, *Zero-Knowledge Rollups*.

I. PENDAHULUAN

Ethereum (Layer 1) dikenal sebagai platform *smart contract* yang memungkinkan berbagai aplikasi terdesentralisasi (*decentralized application* atau dApps) berjalan tanpa pihak pusat. Namun, cara kerja *blockchain* yang harus diverifikasi bersama oleh banyak pihak membuat kapasitas jaringan terbatas. Ketika jumlah transaksi meningkat, sebagian transaksi harus menunggu giliran untuk diproses. Akibatnya, waktu konfirmasi menjadi lebih lama (latensi meningkat) dan biaya transaksi (*gas fee*) dapat naik karena persaingan ruang blok [1]. Kondisi ini membuat skalabilitas menjadi isu penting pada Ethereum, terutama saat digunakan pada layanan yang menuntut transaksi cepat dan biaya rendah [2].

Sejumlah solusi telah diupayakan di tingkat Ethereum Layer 1 untuk meningkatkan kapasitas jaringan. Literatur menjelaskan

bahwa peningkatan dapat dilakukan melalui penyesuaian mekanisme konsensus dan pengembangan teknik seperti *sharding* untuk memproses transaksi lebih paralel [1]. Meski demikian, peningkatan di Layer 1 tetap menghadapi batas praktis karena transaksi dan data masih harus dicatat serta disebarkan di jaringan dasar, sehingga latensi dan biaya penyimpanan data sulit ditekan secara signifikan hanya dari perubahan di Layer 1 [1], [3].

Karena keterbatasan tersebut, muncul pendekatan Ethereum Layer 2 sebagai solusi yang menjalankan sebagian proses transaksi “di luar” Layer 1, kemudian hasilnya dicatat kembali ke Layer 1 dalam bentuk ringkasan data atau bukti. Dengan pendekatan ini, beban pemrosesan di Layer 1 dapat dikurangi sehingga efisiensi biaya dan kapasitas transaksi dapat meningkat [1], [4]. Survei terkait Layer 2 juga menegaskan bahwa solusi L2 dirancang untuk meningkatkan skalabilitas tanpa menghilangkan peran Ethereum Layer 1 sebagai lapisan keamanan dan penyelesaian transaksi (*settlement*) [4].

Dalam praktiknya, solusi Layer 2 memiliki beberapa bentuk, tetapi literatur banyak menempatkan *rollups* sebagai pendekatan yang paling menonjol, karena dapat menggabungkan banyak transaksi menjadi satu kumpulan (*batch*), diproses pada Layer 2, lalu dilaporkan kembali ke Layer 1 [1], [5]. Dua jenis utama *rollups* adalah *Optimistic Rollups* dan *Zero-Knowledge (ZK) Rollups*, yang berbeda pada cara memastikan transaksi valid (misalnya melalui mekanisme *fraud proof* atau *validity proof*) [1], [5]. Meski demikian, studi juga menunjukkan bahwa penggunaan *rollups* membawa tantangan tambahan, terutama terkait ketersediaan data (*data availability*), keamanan dan keandalan mekanisme pemindahan aset antarlayer (*bridge*), serta keterbatasan operasional seperti proses penarikan dana (*withdrawal*) dan asumsi kepercayaan terhadap operator/protokol Layer 2 [6], [7], [8].

Meskipun berbagai penelitian terdahulu telah membahas skalabilitas Ethereum, sebagian besar literatur masih menganalisis solusi Layer 2 secara parsial. Penelitian sebelumnya sering kali hanya berfokus pada evaluasi performa komputasi murni, atau secara eksklusif hanya menyoroti satu aspek seperti ketersediaan data dan keamanan *smart contract*. Terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) dalam literatur saat ini, di mana belum banyak kajian sistematis yang menyintesis hubungan antara batasan operasional di

kondisi nyata (seperti sentralisasi *sequencer* dan mekanisme penarikan dana) dengan perbandingan teknis antara varian *Optimistic* dan *ZK-Rollups* secara *holistic*. Untuk memperjelas posisi penelitian ini dibandingkan dengan literatur terdahulu, Tabel 1 menyajikan matriks *State of the Art* (SOTA) dari beberapa studi utama yang menjadi fondasi kajian ini.

TABEL I
MARIKS *STATE OF THE ART* (SOTA)

Peneliti	Fokus Penelitian	Kelebihan	Research Gap
Schaffner (2021)	Analisis komprehensif <i>Optimistic</i> dan <i>ZK Rollups</i> .	Membedah arsitektur teknis dan kinerja dasar komputasi.	Belum mencakup tantangan keamanan operasional terbaru seperti <i>bridge</i> dan sentralisasi <i>sequencer</i> .
Sguanci et al. (2021)	Survei umum mengenai berbagai solusi skalabilitas L2.	Memberikan peta jalan yang luas mengenai ekosistem skalabilitas.	Pembahasan terlalu umum dan tidak berfokus mendalam pada mekanisme spesifik <i>rollups</i> .
Neiheiser et al. (2023)	Evaluasi limitasi praktis pada Ethereum Layer 2.	Menyoroti batasan nyata dalam implementasi protokol.	Kurang membandingkan secara komparatif dampak <i>fraud</i> vs <i>validity proofs</i> terhadap limitasi tersebut.
Bin Saif et al. (2024)	Survei tentang <i>Data Availability</i> pada <i>rollups</i> .	Analisis mendalam pada satu metrik keamanan kritis L2.	Tidak menyintesis aspek keamanan eksternal seperti kerentanan <i>bridge</i> antar-layer.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini melakukan tinjauan sistematis terhadap 30 literatur mengenai teknologi *rollups* sebagai solusi utama skalabilitas Ethereum. Kajian ini difokuskan untuk: (1) membandingkan performa *rollups* dengan solusi Layer 1; (2) menganalisis pengaruh *fraud* dan *validity proofs* terhadap finalitas transaksi; serta (3) mengidentifikasi tantangan keamanan pada *bridge* Layer 2 untuk mendukung adopsi massal.

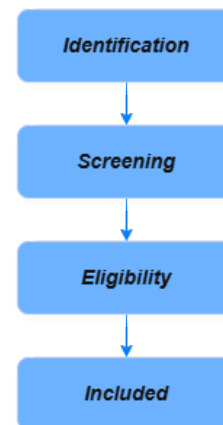
II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan mengadaptasi pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Pendekatan ini dipilih untuk memastikan proses pengumpulan, penyaringan, dan sintesis literatur terkait skalabilitas Ethereum Layer 2 dilakukan secara terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi. Proses penelitian dibagi menjadi tiga tahapan utama: Strategi Pencarian Data, Alur Seleksi PRISMA, dan Ekstraksi Data.

A. Database dan Strategi Pencarian Literatur

Pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan sumber literatur sekunder berupa jurnal internasional, naskah prosiding konferensi, dan laporan teknis yang divalidasi melalui proses *peer-review*. Pencarian literatur dilakukan secara ekstensif pada beberapa basis data akademik bereputasi tinggi, yaitu: IEEE Xplore, ScienceDirect (Elsevier), MDPI, SpringerLink, serta repositori arXiv. Pencarian dilakukan menggunakan rumusan *query* boolean yang menggabungkan kata kunci spesifik untuk menjaga relevansi hasil, yaitu: ("*Ethereum*" OR "*Blockchain*") AND ("*Layer 2*" OR "*L2*") AND ("*Rollups*" OR "*Optimistic Rollups*" OR "*Zero-Knowledge Rollups*") AND ("*Scalability*" OR "*Blockchain Trilemma*").

B. Alur Seleksi PRISMA dan Kriteria Kelayakan



Gbr. 1 Alur Seleksi PRISMA.

Proses penyeleksian literatur dilakukan secara bertahap mengikuti empat fase standar PRISMA: Identifikasi (*Identification*), Penyaringan (*Screening*), Uji Kelayakan (*Eligibility*), dan Penyertaan (*Included*). Alur seleksi ini secara visual digambarkan pada Gbr. 1. Untuk menentukan kelayakan suatu literatur pada tahap evaluasi teks penuh (*full-text*), penelitian ini menetapkan kriteria inklusi dan eksklusi yang disajikan pada Tabel II.

TABEL II
KRITERIA INKLUSI DAN EKSKLUSI STUDI

Kriteria	Deskripsi
Inklusi 1	Studi berfokus pada skalabilitas <i>blockchain</i> Ethereum (Layer 1 atau Layer 2)
Inklusi 2	Studi yang membahas teknologi <i>rollups</i> (<i>Optimistic</i> atau <i>Zero-Knowledge</i>)
Inklusi 3	Studi yang menganalisis aspek keamanan, konsensus, atau efisiensi energi pada Ethereum
Eksklusi 1	Studi yang tidak berkaitan dengan ekosistem Ethereum atau solusi skalabilitas.
Eksklusi 2	Artikel yang berjenis opini, berita pendek, atau literatur non-ilmiah.

Melalui proses penyaringan bertingkat berdasarkan kriteria di atas, diperoleh 30 artikel penelitian permanen yang memenuhi standar kelayakan dan ditetapkan sebagai korpus literatur utama dalam kajian ini.

C. Ekstraksi dan Sintesis Data

Pada tahap ini, Setiap dari 30 artikel yang lolos seleksi akhir dianalisis secara komparatif untuk mengekstrak informasi kunci yang meliputi: (a) Arsitektur protokol (*Optimistic vs ZK Rollups*), (b) Mekanisme keamanan operasional (*Fraud proofs vs Validity proofs*), (c) Tantangan pada *smart contract* penyedia infrastruktur *bridge*, dan (d) Isu ketersediaan data (*data availability*). Sintesis dilakukan secara tematik untuk menemukan pola konsensus dalam literatur serta mengidentifikasi limitasi teknis di lingkungan nyata. Daftar 30 artikel yang dianalisis disajikan pada Tabel III.

TABEL III
DAFTAR 30 ARTIKEL YANG DIANALISIS

Referensi	Judul
[1]	Scaling Public Blockchains: A Comprehensive Analysis of Optimistic and Zero-Knowledge Rollups
[2]	A New Framework for Enhancing VANETs through Layer 2 DLT Architectures with Multi-Party Threshold Key Management and PETs
[3]	A Survey on Data Availability in Layer 2 Blockchain Rollups: Open Challenges and Future Improvements
[4]	Advancing Blockchain Scalability: An Introduction to Layer 1 and Layer 2 Solutions
[5]	An Overview of Ethereum Layer 2 Scaling Solutions
[6]	Architecture for the Academic Certificate System on the Ethereum Layer 2 Solution
[7]	Blockchain Layer 2 Rollups, Optimistic vs Zero Knowledge
[8]	Blockchain Layer 2 Scalability Solutions: A Framework for Comparison
[9]	Ethereum Layer 2 Scaling Solutions: A Comprehensive Security Analysis of Contemporary Approaches
[10]	Exploring the Efficacy of Rollups: A Comparative Study of Optimistic and ZK-Rollups and Their Popular Implementations
[11]	Scalable Integration of Ethereum in a Microservice based Application through Layer 2 Rollups
[12]	Network Analysis of Ethereum Layer 2
[13]	A Formulation of the Trilemma in Proof of Work Blockchain
[14]	Breaking the Blockchain Trilemma: A Comprehensive Consensus Mechanism for Ensuring Security, Scalability, and Decentralization
[15]	A Review of Blockchain Platforms Based on the Scalability, Security and Decentralization Trilemma

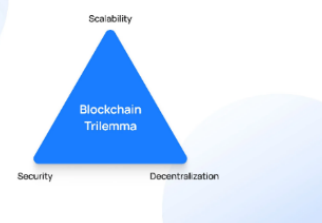
[16]	Smart Contract Vulnerabilities, Tools, and Benchmarks: an Updated Systematic Literature Review
[17]	Enhancing DeFi Consensus: Scaling Ethereum for Performance
[18]	Shaping the future of Ethereum: exploring energy consumption in PoW and PoS
[19]	Resource Analysis of Ethereum 2.0 Clients
[20]	SoK: Public Blockchain Sharding
[21]	Scalable Blockchains A Systematic Review
[22]	Blockchain security enhancement: hybrid consensus algorithms and machine learning
[23]	Layer 2 Blockchain Scaling: a Survey
[24]	Layer 2 Ecosystem of the Ethereum Blockchain
[25]	Mitigating Challenges in Ethereum's Proof-of-Stake Consensus: Evaluating the Impact of EigenLayer and Lido
[26]	The Investigation of Layer 2 Blockchain Technologies for Decentralized Applications
[27]	Practical Limitations of Ethereum's Layer-2
[28]	The Impact of Layer 2 Technologies on the Adoption and Security of Blockchain
[29]	Role of Layer 2 Solutions in Enhancing DeFi Scalability
[30]	Scalable Layer 2 & Sharding Architectures

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil sintesis literatur mengenai efektivitas berbagai solusi skalabilitas yang diterapkan pada ekosistem Ethereum. Pembahasan difokuskan pada perbandingan performa antara Layer 1 dan Layer 2 serta analisis mendalam terhadap mekanisme *rollups* sebagai solusi dominan.

A. Identifikasi Hambatan Skalabilitas pada Layer 1

Ethereum di tingkat dasar (Layer 1) dirancang dengan memprioritaskan keamanan dan desentralisasi, namun hal ini menyebabkan keterbatasan signifikan pada kapasitas transaksi. Berdasarkan kajian literatur, mekanisme konsensus yang mewajibkan setiap simpul (*node*) untuk memverifikasi seluruh transaksi menciptakan antrean panjang pada *mempool* [1]. Kondisi ini seringkali memicu lonjakan biaya transaksi (*gas fees*) yang tidak terprediksi, terutama saat terjadi kepadatan aktivitas aplikasi terdesentralisasi [3]. Selain itu, keterbatasan ukuran blok dan interval waktu pembuatan blok menjadi penghambat utama bagi Ethereum untuk mencapai *throughput* yang setara dengan sistem pembayaran terpusat [9], [10].



Gbr. 2 Blockchain Trilemma.

Gbr. 2, menunjukkan konsep *blockchain trilemma* yang sering digunakan untuk menjelaskan masalah skalabilitas, di mana sebuah protokol sulit mencapai tingkat desentralisasi, keamanan, dan skalabilitas secara optimal secara bersamaan [11]. Upaya peningkatan di Layer 1, seperti implementasi *sharding*, bertujuan untuk membagi beban kerja jaringan menjadi bagian-bagian yang lebih kecil guna meningkatkan pemrosesan paralel [1]. Namun, literatur menunjukkan bahwa perubahan struktural pada Layer 1 membutuhkan waktu implementasi yang lama dan berisiko terhadap stabilitas jaringan utama [12]. Oleh karena itu, keterbatasan praktis pada Layer 1 menjadi faktor pendorong utama munculnya solusi Layer 2 yang memindahkan beban komputasi ke luar rantai utama [4].

Dalam banyak *blockchain*, hal ini sering dijelaskan melalui *blockchain trilemma* yaitu *trade-off* antara keamanan, skalabilitas, dan desentralisasi [13], [14], [15]. Pada Ethereum, keterbatasan *throughput* dan meningkatnya biaya transaksi saat kemacetan mendorong kebutuhan solusi di luar peningkatan langsung pada Layer 1 [1], [5]. Selain itu, aspek keamanan juga menjadi perhatian karena kompleksitas *smart contract* membuka ruang kerentanan dan eksploitasi; kajian sistematis terbaru menegaskan bahwa kerentanan kontrak pintar dan ekosistem tooling/benchmark keamanan masih berkembang dan berpengaruh pada risiko operasional aplikasi di jaringan publik seperti Ethereum [16]. Dengan demikian, perbaikan skalabilitas tidak hanya soal menaikkan TPS, tetapi juga menjaga keamanan aplikasi dan ekosistemnya.

Di sisi konsensus, Ethereum telah bergerak ke *Proof-of-Stake* (PoS), namun literatur menunjukkan bahwa PoS tetap memiliki tantangan dan dinamika baru, misalnya terkait konsentrasi kekuatan staking dan dependensi pada pihak tertentu [17]. Kajian energi juga menunjukkan bahwa perubahan konsensus (PoW ke PoS) berdampak pada konsumsi energi, namun perubahan ini tidak otomatis menyelesaikan *bottleneck* skalabilitas pada Layer 1 [18]. Di level implementasi klien, analisis sumber daya klien Ethereum 2.0 menegaskan adanya biaya operasional (*resource cost*) yang perlu diperhitungkan dalam keberlanjutan *node* dan desentralisasi [19]. Keseluruhan temuan ini memperkuat bahwa “menskalakan Layer 1 saja” bukan solusi tunggal, karena ada batas praktis di konsensus, sumber daya *node*, dan keamanan aplikasi [1], [16], [19].

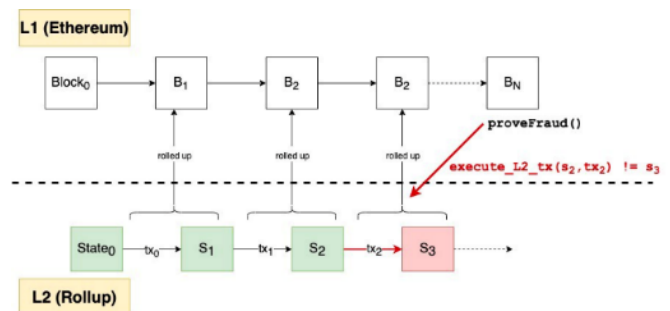
B. Upaya Skalabilitas pada Layer 1

Pada Tabel III ada beberapa pendekatan untuk menskalakan Layer 1, termasuk optimasi protokol, peningkatan kapasitas, dan *sharding*. SoK: Public *Blockchain Sharding* merangkum *sharding* sebagai strategi untuk memproses data/transaksi secara paralel pada jaringan publik [20]. Beberapa studi survei sistematis juga menempatkan *sharding* sebagai salah satu solusi skalabilitas utama bersama pendekatan Layer 2 [21]. Namun, pengantar skalabilitas *blockchain* menekankan bahwa perubahan Layer 1 memiliki keterbatasan inheren pada biaya

penyimpanan data dan latensi, serta risiko kompleksitas ketika protokol utama terus dimodifikasi [1]. Selain itu, ketika fokus diarahkan pada keamanan sistem, literatur tentang peningkatan keamanan *blockchain* menunjukkan bahwa pendekatan seperti konsensus hibrida dan dukungan teknik analitik (misalnya *machine learning*) dapat membantu, tetapi tidak menghilangkan *trade-off* dasar antara keamanan dan performa [22]. Dengan kata lain, solusi Layer 1 cenderung menghadapi batas teknis dan ekonomi, sehingga Layer 2 berkembang sebagai jalur yang lebih pragmatis untuk meningkatkan kapasitas transaksi tanpa memaksa semua eksekusi terjadi langsung di Layer 1 [1], [21].

C. Analisis Efektifitas Solusi Layer 2 (Rollups)

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa di antara ragam solusi Layer 2, *rollups* menjadi pendekatan dominan untuk Ethereum karena desainnya memindahkan eksekusi transaksi ke luar Layer 1 namun tetap “menempel” pada keamanan Ethereum melalui publikasi data atau bukti ke Layer 1 [1], [23]. Survei Layer 2 menempatkan *rollups* sebagai keluarga solusi yang berkembang pesat dibanding pendekatan lain seperti *channels* atau *sidechains*, terutama karena lebih sesuai untuk eksekusi *smart contract* dan integrasi ekosistem Ethereum [23]. Kerangka perbandingan solusi Layer 2 juga menegaskan bahwa *rollups* menonjol pada aspek keamanan (bergantung pada Layer 1) dan kompatibilitas aplikasi, sehingga banyak dipilih sebagai jalur penskalaan yang realistis [8].



Gbr. 3 Cara kerja *rollups*.

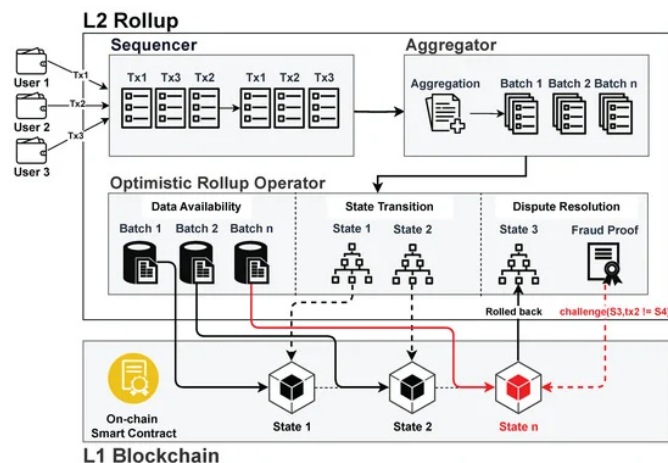
Gbr. 3 merupakan cara kerja *rollups*. Secara mekanisme, *rollups* menggabungkan banyak transaksi menjadi *batch*, dieksekusi di Layer 2, lalu diposting kembali ke Layer 1 dalam bentuk data ringkas atau bukti verifikasi [1], [7]. Studi komparatif implementasi *Optimistic* dan *ZK-rollups* menunjukkan bahwa perbedaan kunci antarvarian terletak pada cara memastikan validitas transaksi dan konsekuensi finalitasnya [10]. Literatur tentang integrasi *rollups* pada aplikasi (misalnya arsitektur *microservice*) juga memperlihatkan alasan praktis mengapa *rollups* diadopsi: biaya transaksi lebih rendah dan performa lebih baik untuk kebutuhan aplikasi nyata yang sensitif terhadap gas fee [11]. Dengan demikian, *rollups* bukan hanya konsep protokol, tetapi solusi operasional yang telah diuji pada kebutuhan implementasi tertentu [11].

D. Komparasi *Optimistic vs Zero-Knowledge Rollups*

Tinjauan literatur menunjukkan adanya dua pendekatan utama dalam teknologi *rollups*, yaitu *Optimistic Rollups* dan *Zero-Knowledge (ZK) Rollups*. Sebelum membedah perbedaan teknis keduanya, sangat penting untuk memahami dua komponen utama yang menjalankan operasional di Layer 2, yaitu *sequencer* dan *aggregator*. *Sequencer (operator)* adalah pihak atau sistem yang bertugas untuk menerima, mengurutkan, dan membundel transaksi pengguna di luar rantai utama sebelum dikirimkan ke Ethereum. Sementara itu, *aggregator (batcher)* berperan untuk menghasilkan bukti validitas atau ringkasan data dari kumpulan transaksi tersebut agar dapat diterima oleh Layer 1 secara efisien.

1. *Optimistic Rollups*

Optimistic Rollups adalah teknik Layer 2 yang bertujuan mengurangi beban Ethereum (Layer 1) dengan cara memindahkan eksekusi transaksi ke jaringan Layer 2. Disebut “*optimistic*” karena sistem menganggap semua transaksi itu benar terlebih dahulu, kecuali ada pihak yang membuktikan sebaliknya [4], [7], [12], [23], [24], [25]. Dengan cara ini, Ethereum tidak perlu memproses semua transaksi satu per satu di Layer 1, sehingga biaya bisa lebih murah dan kapasitas transaksi bisa meningkat, tetapi keamanan tetap dijaga karena hasilnya masih bisa diperiksa [4], [1].



Gbr. 4 Arsitektur *Optimistic Rollups* [3].

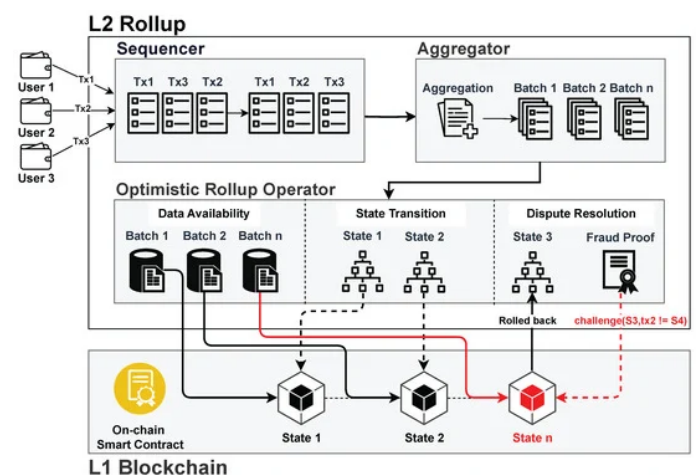
Gbr. 4 merupakan arsitektur *Optimistic Rollups*, secara arsitektur *Optimistic Rollups* umumnya melibatkan komponen *sequencer/operator*, *aggregator/batcher*, serta *smart contract on-chain* di Layer 1. Alurnya dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, pengguna mengirimkan transaksi ke sequencer pada Layer 2. Sequencer mengurutkan transaksi, melakukan pemeriksaan dasar, lalu mengelompokkan transaksi menjadi *batch*. Setelah transaksi dieksekusi di Layer 2 dan menghasilkan perubahan status (*state transition*), operator mengirimkan komitmen hasil (misalnya *state root*) ke kontrak rollup di Layer 1. Data yang diposting ke Layer 1 biasanya berupa ringkasan transaksi (sering dalam bentuk *calldata*) dan

komitmen status, sehingga Layer 1 memiliki “jejak” yang cukup untuk audit/rekonstruksi bila diperlukan [4], [3], [26]. Mekanisme ini menegaskan peran *data availability*, karena jika data transaksi tidak tersedia, maka pihak luar akan kesulitan memverifikasi hasil atau menyusun bukti kecurangan [3].

Perbedaan utama *Optimistic Rollups* dibanding *ZK-Rollups* terletak pada cara memastikan validitas. Pada *Optimistic Rollups*, setelah komitmen status diposting ke Layer 1, sistem memberikan periode tantangan. Dalam periode ini, siapa pun (misalnya *watcher* atau pihak independen) dapat mengajukan sengketa bila menemukan transaksi atau *state transition* yang tidak sesuai. Jika ada sengketa, mekanisme *fraud proof* digunakan untuk membuktikan bahwa hasil eksekusi *batch* tersebut salah. Ketika *fraud proof* terbukti benar, hasil *batch* dapat dibatalkan (*rollback*) dan *operator* yang berperilaku curang akan menerima penalti sesuai desain protokol [4], [1], [7]. Dengan kata lain, keamanan *Optimistic Rollups* bergantung pada ketersediaan data, keberadaan pihak yang memantau, dan efektivitas mekanisme sengketa untuk mendeteksi serta membatalkan *state transition* yang tidak valid [3], [4], [9].

2. *Zero-Knowledge Rollups*

Zero-Knowledge Rollups (ZK-Rollups) adalah jenis Layer 2 yang juga memindahkan eksekusi transaksi dari Ethereum (Layer 1) ke Layer 2, tetapi cara memastikan kebenarannya berbeda dari *Optimistic Rollups*. Pada *ZK-Rollups*, setiap kumpulan transaksi (*batch*) yang diproses di Layer 2 akan disertai bukti kriptografi yang disebut *validity proof*. Bukti ini membuat Layer 1 bisa memverifikasi bahwa hasil transaksi memang benar, tanpa perlu menjalankan ulang semua transaksi satu per satu [4], [7], [1]. Karena ada bukti validitas ini, *ZK-Rollups* umumnya memberikan kepastian hasil yang lebih cepat setelah bukti diverifikasi di Layer 1 [4], [10].



Gbr. 5 Arsitektur *Zero-Knowledge Rollups* [3].

Gbr. 5 menampilkan arsitektur *Zero-Knowledge Rollups*. Alur kerjanya secara sederhana dimulai ketika pengguna mengirim, transaksi ke operator/sequencer di Layer 2, transaksi digabung

menjadi *batch*, lalu dieksekusi sehingga menghasilkan perubahan status (*state transition*). Setelah itu, sistem membuat *validity proof* untuk membuktikan bahwa perubahan status tersebut benar. Operator kemudian mengirim ringkasan perubahan status dan bukti tersebut ke kontrak verifikator di Layer 1, jika bukti valid, status di Layer 1 diperbarui mengikuti hasil Layer 2 [4], [1], [26]. Meski ada bukti validitas, isu *data availability* tetap penting, karena data perlu tersedia agar pihak luar bisa merekonstruksi *state* dan melakukan verifikasi independen bila diperlukan [3], [6].

Dari sisi kelebihan, *ZK-Rollups* sering dianggap lebih kuat pada aspek verifikasi karena bukti validitas membuat mekanisme “menganggap valid lalu menunggu tantangan” tidak diperlukan, sehingga proses seperti finalitas dan penarikan dana berpotensi lebih cepat dibanding *Optimistic Rollups* (tergantung desain implementasi) [4], [10], [7]. Namun, *ZK-Rollups* memiliki tantangan utama berupa kompleksitas komputasi untuk menghasilkan bukti kriptografi, sehingga membutuhkan infrastruktur prover yang lebih berat dan desain teknis yang lebih kompleks [1], [10]. Selain itu, seperti L2 lain, performa *ZK-Rollups* tetap dipengaruhi biaya sinkronisasi dan publikasi data ke Layer 1; studi keterbatasan praktis L2 menekankan bahwa *throughput* efektif harus mempertimbangkan overhead ini, bukan hanya angka Layer 2 saja [3], [27].

3. Tabel Perbandingan Rollups

Untuk mempermudah pemahaman mengenai perbedaan fundamental antara kedua teknologi ini, berikut disajikan tabel komparasi yang merangkum aspek-aspek kritis dari *Optimistic* dan *ZK Rollups*. Tabel ini disusun berdasarkan sintesis data dari berbagai studi literatur mengenai kecepatan, biaya, dan tingkat kerumitan teknis.

TABEL IV
TABEL PERBANDINGAN ROLLUPS

Fitur Perbandingan	<i>Optimistic</i>	<i>Zero-Knowledge</i>
Mekanisme Keamanan	<i>Fraud Proof</i>	<i>Validity Proof</i>
Waktu Penarikan	Relatif lama	Relatif cepat
Daya Komputasi	Rendah	Sangat tinggi
Kompabilitas EVM	Kompatibel	Implementasi sulit
Ketersediaan Data	<i>On-chain</i>	<i>On-chain/Off-chain</i>

Perbedaan pada Tabel IV merangkum hasil dari sintesis literatur bahwa *Optimistic Rollups* mengandalkan periode tantangan dengan *fraud proof*, sehingga finalitas atau penarikan dana cenderung lebih lambat, sedangkan *ZK-Rollups* memverifikasi melalui *validity proof* yang memungkinkan finalitas lebih cepat setelah *proof* diverifikasi. Selain itu, kompabilitas EVM pada *Optimistic Rollups* lebih kompatibel daripada *ZK-Rollups* meski demikian, keduanya sama-sama

dipengaruhi isu *data availability* dan biaya sinkronisasi/publikasi data ke Layer 1, sementara *ZK-Rollups* menambah beban komputasi untuk proses proving [1], [3], [4], [7], [10], [27].

E. *Data Availability Sebagai Isu Kunci Rollups*

Hasil kajian menunjukkan bahwa *data availability* (DA) adalah salah satu isu paling kritis pada *rollups*. Studi khusus tentang *data availability* pada *rollups* menekankan bahwa publikasi data diperlukan agar pihak luar dapat memverifikasi transisi status dan mencegah data withholding attacks [3], [6]. Karena *rollups* mengeksekusi transaksi *off-chain*, ketersediaan data menentukan apakah pengguna dapat merekonstruksi *state* dan melakukan verifikasi independen [3]. Literatur juga menempatkan DA sebagai sumber biaya signifikan karena data harus “diangkut” kembali ke Layer 1 atau ke lapisan DA tertentu, sehingga memengaruhi biaya akhir dan *throughput* efektif [3], [1].

Keterkaitan DA dengan kinerja dan kapasitas *rollups* juga tampak pada studi keterbatasan praktis Ethereum Layer 2. Studi tersebut menekankan bahwa klaim *throughput* tinggi sering tidak memasukkan biaya sinkronisasi data ke chain utama, padahal beban sinkronisasi ini dapat mendekati atau bahkan melampaui kapasitas Layer 1 [27]. Hal ini penting untuk *rollups* karena mereka cenderung memiliki coupling kuat dengan Layer 1, dan overhead data yang besar dapat menjadi bottleneck [3], [27].

F. *Tantangan Keamanan dan Operasional Rollups*

Meskipun solusi Layer 2 menawarkan peningkatan performa yang signifikan, terdapat berbagai tantangan praktis yang harus dihadapi dalam implementasinya. Keamanan *bridge* atau jembatan antar-layer menjadi titik kritis, di mana kegagalan pada kode kontrak pintar dapat menyebabkan kerugian aset pengguna dalam jumlah besar [23]. Banyak studi menyoroti bahwa jembatan ini seringkali menjadi target utama serangan siber karena menyimpan likuiditas aset yang sangat tinggi [8]. Oleh karena itu, audit keamanan yang ketat dan desentralisasi mekanisme jembatan sangat diperlukan untuk melindungi integritas ekosistem L2 [4].

Selain masalah keamanan jembatan, sentralisasi operator atau *sequencer* pada banyak protokol Layer 2 saat ini juga menjadi perhatian utama para peneliti [12], [13]. *Sequencer* memiliki peran tunggal dalam mengurutkan transaksi, yang jika tidak dikelola dengan baik, dapat menyebabkan risiko sensor transaksi atau kegagalan sistem tunggal [28]. Keterbatasan praktis lainnya mencakup fragmentasi likuiditas antar berbagai solusi L2 yang berbeda, yang dapat menyulitkan pengalaman pengguna dalam memindahkan aset [2]. Secara keseluruhan, penguatan aspek keamanan operasional dan desentralisasi operator menjadi syarat mutlak agar adopsi Layer 2 dapat terus berkembang secara luas [27], [29], [30].

G. Mengapa Rollups Menjadi Fokus Utama

Berdasarkan penelitian, *rollups* menjadi fokus utama karena menawarkan jalur penskalaan yang paling kompatibel dengan Ethereum dimana eksekusi dipindahkan ke Lapisan 2, tetapi keamanan tetap diikat ke Lapisan 1 melalui publikasi data/bukti [1], [23], [24]. Namun, penelitian juga menunjukkan bahwa peningkatan skalabilitas memiliki efek negatif, dan trilemma tetap relevan: peningkatan performa harus diseimbangkan dengan keamanan dan desentralisasi [13], [14], [15], [17]. konsensus dan desentralisasi (misalnya konsentrasi staking atau peran entitas besar) juga dapat memengaruhi asumsi keamanan sistem di lapisan dasar [17], [19], [24]. Dari perspektif risiko, keamanan *smart contract* dan infrastruktur pendukung (bridge, sequencer, dan tooling) menjadi faktor penentu keberhasilan adopsi *rollups* [9], [28].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian, dapat disimpulkan bahwa masalah skalabilitas pada Ethereum (Layer 1) seperti kemacetan transaksi, latensi yang meningkat, dan biaya transaksi (*gas fee*) yang tinggi. Berbagai upaya peningkatan pada Layer 1 dapat membantu, tetapi tetap menghadapi hambatan karena proses pencatatan dan penyebaran data transaksi masih bergantung pada jaringan dasar. Kondisi ini mendorong berkembangnya solusi Ethereum Layer 2, terutama *rollups*. *Rollups* menjadi fokus utama karena mampu memindahkan eksekusi transaksi ke Layer 2, lalu melaporkan ringkasan hasilnya ke Layer 1 sehingga kapasitas transaksi meningkat tanpa meninggalkan fondasi keamanan Ethereum.

Kajian ini juga menunjukkan bahwa *Optimistic Rollups* dan *ZK-Rollups* memiliki perbedaan utama pada cara pembuktian validitas. *Optimistic Rollups* mengandalkan *fraud proof* dan periode tantangan, sehingga penarikan dana cenderung lebih lama, sedangkan *ZK-Rollups* menggunakan *validity proof* yang umumnya membuat finalitas lebih cepat, tetapi membutuhkan komputasi tinggi untuk membuat bukti kriptografi. Meski berbeda mekanisme, keduanya tetap sama-sama dipengaruhi isu *data availability* dan biaya publikasi data ke Layer 1, yang dapat menjadi pembatas *throughput* efektif.

V. SARAN

Berdasarkan temuan kajian, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut. Pertama, penelitian dan pengembangan *rollups* perlu lebih menekankan aspek *data availability* dan efisiensi publikasi data, karena faktor ini berpengaruh besar terhadap biaya dan *throughput* efektif. Kedua, penguatan keamanan dan reliabilitas komponen pendukung seperti *bridge* dan mekanisme *withdrawal* perlu menjadi perhatian utama, mengingat komponen tersebut sering menjadi titik kritis risiko bagi pengguna. Ketiga, penelitian lanjutan dapat mengarah pada penyusunan kerangka evaluasi standar untuk membandingkan *rollups* secara lebih objektif dan kemudahan integrasi aplikasi,

REFERENSI

- [1] T. Schaffner, "Scaling Public Blockchains A comprehensive analysis of optimistic and zero-knowledge rollups," Basel, Jan. 2021. Accessed: Mar. 04, 2026. [Online]. Available: https://www.unibas.ch/fileadmin/user_upload/wwz/00_Professuren/Schaffner_DLTFinTech/Lehre/Tobias_Schaffner_Masterthesis.pdf
- [2] H. Y. Adarbah, M. S. Kiraz, S. Kardas, A. H. Al-Bayatti, and H. M. Y. Albayatti, "A New Framework for Enhancing VANETs through Layer 2 DLT Architectures with Multi-Party Threshold Key Management and PETs," Mar. 18, 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4093268/v1.
- [3] M. Bin Saif, S. Migliorini, and F. Spoto, "A Survey on Data Availability in Layer 2 Blockchain Rollups: Open Challenges and Future Improvements," Sep. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/fi16090315.
- [4] H. Song, Z. Qu, and Y. Wei, "Advancing Blockchain Scalability: An Introduction to Layer 1 and Layer 2 Solutions," Jun. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.13855>
- [5] L. Kuhlane, "An Overview of Ethereum Layer 2 Scaling Solutions," Oct. 2021. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: https://www.academia.edu/61517401/An_Overview_of_Ethereum_Layer_2_Optimum_Scaling_Solutions
- [6] S. Wanotayapitak, "Architecture for the Academic Certificate System on the Ethereum Layer 2 Solution," *CommIT Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 29–43, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.21512/commit.v19i1.11539>.
- [7] O. Patel, "Blockchain Layer 2 Rollups, Optimistic vs zero knowledge," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, vol. 14, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.34218/ijaret.14.2.002.
- [8] M. Vilà Brualla, "Blockchain Layer 2 scalability solutions: a framework for comparison," May 2023. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/2117/388220>
- [9] S. Sarkar, "Ethereum Layer 2 Scaling Solutions: A Comprehensive Security Analysis of Contemporary Approaches," SSRN, Aug. 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5395177>.
- [10] A. Jain, Y. Punjabi, and R. Mathur, "EXPLORING THE EFFICACY OF ROLLUPS' A COMPARATIVE STUDY OF OPTIMISTIC AND ZK-ROLLUPS AND THEIR POPULAR IMPLEMENTATIONS," *Journal of Analysis and Computation (JAC)*, vol. 18, no. 1, pp. 297–315, Jun. 2024, doi: 10.30696/JAC.XVIII.1.2024.297-315.
- [11] M. Stipsits, "Scalable Integration of Ethereum in a Microservice based Application through Layer 2 Rollups," University of Applied Sciences FH Campus Wien, 2023. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: <https://pub.hcw.ac.at/obvfwhsacc/content/titleinfo/8874847/full.pdf>
- [12] L. Liang, F. Qi, and S. Gong, "NETWORK ANALYSIS OF ETHEREUM LAYER 2," *Acta Electronica Malaysia*, vol. 8, no. 1, pp. 27–30, Jan. 2024, doi: 10.26480/aem.01.2024.27.30.
- [13] T. Nakai, A. Sakurai, S. Hironaka, and K. Shudo, "A Formulation of the Trilemma in Proof of Work Blockchain," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 80559–80578, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3410025.
- [14] K. Md Shafin and S. Reno, "Breaking the Blockchain Trilemma: A Comprehensive Consensus Mechanism for Ensuring Security, Scalability, and Decentralization," *IET Software*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1049/2024/6874055.
- [15] J. Werth, M. H. Berenjestanaki, H. R. Barzegar, N. El Ioini, and C. Pahl, "A Review of Blockchain Platforms Based on the Scalability, Security and Decentralization Trilemma," in *International Conference on Enterprise Information Systems, ICEIS - Proceedings, Science and Technology Publications, Lda, 2023*, pp. 146–155. doi: 10.5220/0011837200003467.
- [16] G. Iuliano and D. Di Nucci, "Smart Contract Vulnerabilities, Tools, and Benchmarks: an Updated Systematic Literature Review," Jan. 2026, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2412.01719>
- [17] K. Kumari and M. M., "Enhancing DeFi Consensus: Scaling Ethereum for Performance," Aug. 23, 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4832980/v1.
- [18] R. Asif and S. R. Hassan, "Shaping the future of Ethereum: exploring energy consumption in Proof-of-Work and Proof-of-Stake consensus," 2023, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fbloc.2023.1151724.

- [19] M. Cortes-Goicoechea, L. Franceschini, and L. Bautista-Gomez, "Resource Analysis of Ethereum 2.0 Clients," Dec. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2012.14718>
- [20] M. M. Al Barat, S. Li, C. Du, Y. T. Hou, and W. Lou, "SoK: Public Blockchain Sharding," May 2024, doi: 10.1109/ICBC59979.2024.10634422.
- [21] M. Hassan Nasir, J. Arshad, M. Mubashir Khan, M. Fatima, K. Salah, and R. Jayaraman, "Scalable Blockchains - A Systematic Review," Science Direct, vol. 126, pp. 136–162, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.07.035>.
- [22] K. Venkatesan and S. B. Rahayu, "Blockchain security enhancement: an approach towards hybrid consensus algorithms and machine learning techniques," Sci. Rep., vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-51578-7.
- [23] C. Sguanci, R. Spatafora, and A. M. Vergani, "Layer 2 Blockchain Scaling: a Survey," ArXiv, pp. 1–51, Jul. 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2107.10881>
- [24] O. Belz, "Layer 2 Ecosystem of the Ethereum Blockchain," ЕКОНОМІКА І РЕГІОН Науковий вісник, no. 2 (93), pp. 129–133, Jun. 2024, doi: 10.26906/eir.2024.2(93).3396.
- [25] L. Li, "Mitigating Challenges in Ethereum's Proof-of-Stake Consensus: Evaluating the Impact of EigenLayer and Lido," Dec. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2410.23422>
- [26] Y. Yi, "The Investigation of Layer 2 Blockchain Technologies for Decentralized Applications," INSTICC, Aug. 2024, pp. 326–333. doi: 10.5220/0012837400004547.
- [27] R. Neiheiser, G. Inacio, L. Rech, C. Montez, M. Matos, and L. Rodrigues, "Practical Limitations of Ethereum's Layer-2," 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3237897.
- [28] L. M. De Rossi, M. Avital, R. Gleasure, and R. Solcia, "The impact of layer 2 technologies on blockchain The Impact of Layer 2 Technologies on the Adoption and Security of Blockchain," ICIS 2022, p. 1051, Dec. 2022, Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: <https://aisel.aisnet.org/icis2022/blockchain/blockchain/6>
- [29] J. Emmanuel and J. Mayor, "Role of Layer 2 Solutions in Enhancing DeFi Scalability," INTERNATIONAL JOURNAL OF NOVEL RESEARCH AND DEVELOPMENT, vol. 9, no. 10, pp. 1–7, Oct. 2024, [Online]. Available: www.ijnrd.org
- [30] A. Basu, "Scalable Layer 2 & Sharding Architectures," Journal of Blockchain Systems and Smart Contracts, vol. 1, no. 3, pp. 159–169, 2025, Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: <https://admin.mantechpublications.com/index.php/JoBSSC/article/view/2609>