

IMPLEMENTASI *PRIVATE DISTRIBUTED LEDGER* BERBASIS *HASH CHAINING* UNTUK TRANSPARANSI RETRIBUSI PARKIR

Grace Anggia Heilinar Manullang¹, Naikson Fandier Saragih², Asaziduhu Gea³
^{1,2,3}Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Methodist Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Received, 3 Agustus 2026
Revised, 23 Agustus 2026
Accepted, 15 September 2026

Keywords:

Permissioned Ledger, Hash Chaining, Tamper-Evident, Quorum, Audit Trail.

ABSTRAK

Pengelolaan parkir tepi jalan umum menghadapi risiko ketidaksesuaian pencatatan, manipulasi transaksi, dan lemahnya jejak audit. Penelitian ini mengembangkan purwarupa sistem pembayaran parkir menggunakan *permissioned distributed ledger* berbasis *hash chaining* dengan model validasi, audit, dan pemulihan transaksi. Kontribusi utama bukan pada SHA-256 atau replikasi database, melainkan pada integrasi *block sealing*, validasi lintas-node, deteksi *tamper-evident*, dan *quorum* persetujuan tingkat aplikasi untuk pemulihan. VPS 1 membentuk blok, VPS 2 memvalidasi *current hash* dan *previous hash*, sedangkan laptop hanya digunakan untuk monitoring. Pada kondisi konflik, ketidaksesuaian *hash* menghasilkan status *TAMPERED* dan koreksi hanya dapat disahkan setelah *node_primary* dan *node_backup* memenuhi *quorum* aplikasi. Hasil pengujian menunjukkan blok normal dapat divalidasi dan direplikasi, sedangkan manipulasi langsung terhadap data dapat dideteksi. Penelitian tidak mengklaim penggunaan PBFT, PoA, atau *distributed consensus formal*; karena itu, arsitektur diposisikan sebagai *ledger terdistribusi* berizin berbasis *hash chaining* yang mengadopsi konsep *blockchain* dan menyediakan mekanisme audit serta pemulihan. Keterbatasan utama adalah jumlah validator yang masih dua dan belum adanya toleransi terhadap *Byzantine fault*.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Penulis Koresponden:

Grace Anggia Heilinar Manullang,
Fakultas Ilmu Komputer,
Universitas Methodist Indonesia, Medan,
Jl. Hang Tuah No.8, Medan - Sumatera Utara.
Email: anggiagrace60@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan parkir tepi jalan umum merupakan salah satu sumber penerimaan daerah yang termasuk dalam kategori retribusi daerah. Pada Kota Binjai, pencatatan transaksi yang masih bergantung pada proses manual dan belum terintegrasi sepenuhnya dengan mekanisme audit digital dapat menimbulkan ketidaksesuaian antara transaksi lapangan, data operasional, dan pelaporan pendapatan. Kondisi tersebut membuat transparansi dan akuntabilitas transaksi parkir menjadi persoalan penting yang perlu ditangani melalui sistem pencatatan yang dapat diverifikasi.[1], [2]

Selain itu, pengelolaan data parkir pada instansi pemerintah daerah masih banyak menggunakan model penyimpanan data terpusat (*centralized system*). Model ini memiliki risiko *single point of failure*, yaitu kondisi ketika kerusakan sistem, gangguan teknis, ataupun penyalahgunaan akses administratif dapat menyebabkan hilangnya atau berubahnya data transaksi tanpa mudah terdeteksi. Kondisi tersebut dapat menyulitkan proses audit dan menurunkan tingkat keandalan pengawasan terhadap pengelolaan sektor perparkiran [3]

Seiring dengan perkembangan teknologi informasi, berbagai pendekatan inovatif mulai dikembangkan untuk meningkatkan transparansi serta keamanan dalam pengelolaan data transaksi. Salah satu teknologi yang dinilai memiliki potensi besar adalah teknologi blockchain. Blockchain merupakan sistem pencatatan data *digital* yang bersifat terdesentralisasi dan transparan, di mana setiap transaksi disimpan dalam blok yang saling terhubung secara kriptografis sehingga perubahan data dapat terdeteksi oleh jaringan. Teknologi ini juga memungkinkan penerapan mekanisme verifikasi transaksi secara otomatis sebelum data dicatat ke dalam rantai blok digital [4].

Selain itu, penerapan algoritma hashing dan mekanisme konsensus dalam *blockchain* memungkinkan setiap transaksi diverifikasi sebelum dimasukkan ke dalam blok baru. Setiap blok yang terbentuk akan saling terhubung melalui nilai hash sehingga integritas data dapat terjaga dan potensi manipulasi data dapat diminimalkan. Dengan mekanisme tersebut, sistem blockchain dapat mendukung pencatatan transaksi yang lebih aman, transparan, serta mudah diaudit [5].

Konsep *distributed ledger* dalam teknologi blockchain juga memungkinkan data transaksi direplikasi pada beberapa *node* yang saling terhubung dalam jaringan. Mekanisme ini dapat meningkatkan ketersediaan data serta menjaga konsistensi informasi antar *server*. Dengan demikian, apabila terjadi gangguan pada salah satu *node* sistem, data transaksi tetap dapat diakses melalui node lainnya sehingga meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan [6].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem pembayaran parkir berbasis blockchain dengan menerapkan konsep *distributed ledger* melalui mekanisme replikasi data antar server. Sistem dikembangkan menggunakan pendekatan *private blockchain* dengan memanfaatkan *framework Laravel* sebagai *platform* pengembangan aplikasi. Melalui simulasi sistem yang dibangun, diharapkan penelitian ini dapat memberikan gambaran teknis mengenai penerapan teknologi blockchain dalam sistem pengelolaan parkir serta menjadi bahan pertimbangan bagi Dinas Perhubungan Kota Binjai dalam meningkatkan transparansi, keamanan, dan akuntabilitas pengelolaan parkir.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Blockchain/Private Distributed Ledger

Blockchain pada dasarnya merupakan mekanisme pencatatan data secara terdistribusi yang menyimpan transaksi dalam struktur blok yang saling terhubung menggunakan fungsi *hash*. Setiap blok memiliki informasi transaksi dan nilai *hash* yang mengacu pada blok sebelumnya sehingga membentuk suatu rantai data. Mekanisme tersebut memungkinkan integritas data diperiksa karena perubahan terhadap isi suatu blok akan menghasilkan nilai hash yang berbeda dari nilai *hash* yang telah tersimpan.

Pada penelitian ini, konsep *blockchain* diterapkan dalam lingkungan *permissioned/private* karena seluruh *node* yang terlibat berada dalam lingkungan yang dikendalikan oleh sistem. Arsitektur penelitian terdiri atas VPS 1 sebagai *node* utama, VPS 2 sebagai *node* validasi/cadangan, dan laptop sebagai perangkat monitoring. VPS 1 bertugas membentuk dan mencatat blok transaksi, sedangkan VPS 2 menerima data blok untuk melakukan validasi terhadap integritasnya. Laptop tidak berperan sebagai validator, tetapi digunakan untuk memantau proses dan hasil transaksi. Data transaksi pada setiap blok disimpan bersama *previous_hash* dan *current_hash*. *previous_hash* digunakan untuk menghubungkan suatu blok dengan blok sebelumnya, sedangkan *current_hash* merupakan nilai *hash* yang merepresentasikan data pada blok tersebut. Dengan demikian, perubahan terhadap data transaksi dapat diketahui melalui proses perhitungan ulang *hash* dan perbandingan dengan nilai *hash* yang tersimpan.



Gambar 1. Mekanisme Pembentukan Blok dan Hash Chaining pada Transaksi Parkir

Validasi blok dilakukan melalui pemeriksaan hubungan *hash* dan kesesuaian data. VPS 2 melakukan perhitungan ulang terhadap nilai hash berdasarkan data transaksi dan *previous_hash*, kemudian membandingkannya dengan *current_hash* yang diterima. Apabila nilai hash sesuai dan hubungan dengan

blok sebelumnya tidak mengalami perubahan, blok dinyatakan valid. Sebaliknya, apabila terdapat perbedaan nilai hash, sistem mengidentifikasinya sebagai indikasi perubahan data dan memberikan status *TAMPERED*. Mekanisme ini digunakan sebagai dasar deteksi manipulasi dan pemeriksaan integritas transaksi.

Dalam penelitian ini, istilah *private distributed ledger* digunakan untuk menekankan bahwa pencatatan transaksi dilakukan pada lebih dari satu node dalam lingkungan yang memiliki otoritas terbatas. Sistem tidak mengklaim menerapkan blockchain publik maupun protokol konsensus formal seperti PBFT, *Proof of Authority (PoA)*, atau *Proof of Stake (PoS)*. Mekanisme persetujuan yang digunakan merupakan *application-level node agreement*, yaitu persetujuan antara *node_primary* dan *node_backup* sebelum suatu transaksi hasil validasi dapat disahkan melalui mekanisme *approveConsensus()*.



Gambar 2. Kode Program Eksekusi Protokol Konsensus

2.2 Algoritma Hash

Algoritma hash digunakan untuk menjaga integritas data pada setiap blok transaksi. Penelitian ini menggunakan SHA-256 (Secure Hash Algorithm 256-bit) yang menghasilkan nilai hash sepanjang 256 bit atau 64 karakter heksadesimal. Nilai tersebut berfungsi sebagai representasi digital dari data transaksi. Perubahan pada data akan menghasilkan nilai hash yang berbeda sehingga dapat dideteksi pada proses verifikasi. SHA-256 diterapkan dalam mekanisme hash chaining, yaitu setiap blok menyimpan *previous_hash* yang mengacu pada *current_hash* blok sebelumnya. Data transaksi kemudian digabungkan dengan *previous_hash* untuk menghasilkan *current_hash*. Proses tersebut dapat direpresentasikan sebagai:

$$H_i = \text{SHA-256}(D_i \parallel H_{i-1})$$

dengan H_i sebagai *current_hash* blok ke- i , D_i sebagai data transaksi, dan H_{i-1} sebagai hash blok sebelumnya. Pada blok pertama, rantai dimulai dari genesis block sebagai acuan awal. Dalam implementasinya, data transaksi parkir yang mencakup informasi transaksi, kendaraan, waktu, tarif, dan petugas disusun secara konsisten sebelum diproses dengan SHA-256. Nilai *current_hash* kemudian disimpan bersama data transaksi sehingga setiap blok memiliki keterkaitan dengan blok sebelumnya.

Pada proses validasi, VPS 2 melakukan perhitungan ulang hash berdasarkan data transaksi dan *previous_hash*, kemudian membandingkannya dengan *current_hash* yang tersimpan. Jika nilainya sesuai, blok dinyatakan valid. Sebaliknya, perubahan data secara langsung pada basis data akan menghasilkan hash mismatch dan ditandai sebagai *TAMPERED*, yang selanjutnya dapat diproses melalui mekanisme audit dan pemulihan. Penerapan SHA-256 dalam penelitian ini bukan merupakan pengembangan algoritma kriptografi baru, melainkan sebagai dasar pembentukan hash chaining untuk mendukung validasi lintas-node, deteksi manipulasi, audit, dan pemulihan transaksi pada sistem pembayaran parkir digital.

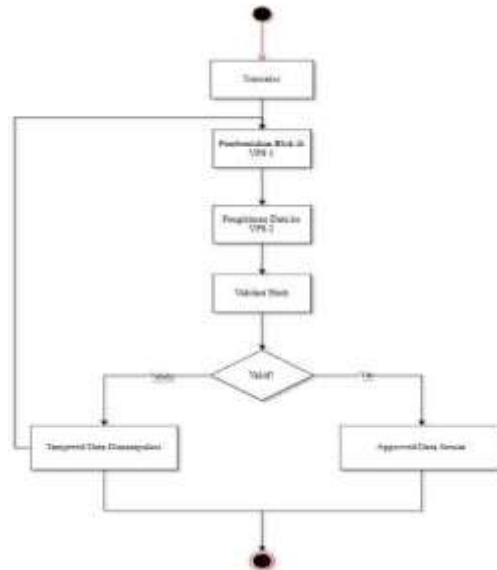
2.3 Model Validasi dan Integritas Transaksi

Model validasi dan integritas transaksi dirancang untuk memastikan bahwa data transaksi parkir yang tersimpan pada *private distributed ledger* tetap sesuai dengan data yang dibentuk pada saat transaksi. Model ini memanfaatkan *hash chaining* dan validasi lintas-node untuk memeriksa keutuhan data sebelum transaksi dinyatakan valid.

Proses dimulai ketika transaksi parkir dibentuk pada VPS 1 sebagai node utama. Sistem mengambil *previous_hash* dari blok sebelumnya dan menggabungkannya dengan data transaksi untuk menghasilkan *current_hash* menggunakan SHA-256. Blok yang telah terbentuk kemudian dikirimkan ke VPS 2 melalui API untuk dilakukan pemeriksaan.

Pada tahap validasi, VPS 2 melakukan perhitungan ulang *hash* berdasarkan data transaksi dan *previous_hash* yang diterima. Hasil tersebut dibandingkan dengan *current_hash* pada blok. Sistem juga memeriksa keterhubungan *previous_hash* dengan blok sebelumnya. Apabila seluruh nilai sesuai, transaksi dinyatakan VALID. Sebaliknya, apabila ditemukan perbedaan nilai *hash*, sistem memberikan status TAMPERED sebagai indikasi adanya perubahan atau ketidaksesuaian data.

Hasil validasi selanjutnya menjadi dasar dalam menjaga integritas dan penelusuran transaksi. Transaksi yang berstatus VALID dapat dipertahankan pada ledger, sedangkan transaksi yang terindikasi mengalami perubahan dapat diarahkan ke proses pemeriksaan dan persetujuan lebih lanjut. Mekanisme persetujuan dilakukan melalui *node_primary* dan *node_backup* sebagai bentuk *application-level node agreement* sebelum tindakan terhadap transaksi dapat dilanjutkan. Secara umum, model validasi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3. Model Validasi dan Integritas Transaksi.

Model ini tidak menggunakan protokol konsensus formal seperti PBFT, PoA, atau PoS. Fokus penerapannya adalah memastikan integritas, keterlacakan, dan konsistensi transaksi melalui validasi *hash* dan pemeriksaan lintas-node pada *private distributed ledger*.

1.6 Arsitektur Sistem yang Akan Dirancang

Arsitektur sistem dirancang menggunakan konsep *distributed ledger* dengan dua VPS dan satu laptop sebagai media monitoring. Proses dimulai saat petugas menginput transaksi, kemudian data diolah di VPS 1 sebagai node utama untuk membentuk blok dan menghasilkan hash SHA-256. Selanjutnya, data dikirim ke VPS 2 melalui REST API untuk divalidasi dengan membandingkan hash sebelum disimpan sebagai ledger replika. Laptop digunakan untuk memantau proses sinkronisasi melalui log sistem, sehingga integritas data tetap terjaga karena setiap perubahan dapat terdeteksi.



Gambar 4. Arsitektur Sistem

2.4 Alur Penelitian

Alur penelitian diawali dengan studi literatur dan identifikasi masalah, kemudian dilanjutkan dengan analisis kebutuhan sistem. Tahap berikutnya adalah perancangan dan simulasi sistem, yang meliputi identifikasi pengguna, perancangan *Use Case*, *Activity*, dan *Sequence Diagram*, serta perancangan jaringan P2P dan *Node Blockchain*, antarmuka pengguna (*Front End*), dan *Backend & Database*. Selanjutnya dilakukan integrasi dan pengujian simulasi sistem untuk mengetahui kesesuaian sistem dengan kebutuhan yang telah ditentukan. Hasil simulasi kemudian dievaluasi. Apabila hasil belum sesuai, dilakukan perbaikan dan perancangan ulang. Jika hasil telah sesuai, penelitian dilanjutkan dengan penyajian hasil simulasi dan rekomendasi, kemudian penelitian dinyatakan selesai.



Gambar 5. Alur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem

Pada penelitian ini telah berhasil dikembangkan sistem pembayaran parkir digital berbasis blockchain menggunakan *framework Laravel*. Sistem ini dirancang untuk mencatat setiap transaksi parkir secara digital serta menyimpan data transaksi tersebut dalam bentuk blok yang saling terhubung menggunakan mekanisme *hashing*. Sistem yang dikembangkan memiliki beberapa fitur utama, yaitu pengelolaan data pengguna, pencatatan transaksi parkir, pembentukan blok, serta monitoring aktivitas transaksi. Sistem juga dilengkapi dengan mekanisme replikasi data antar server untuk menjaga konsistensi data pada lingkungan sistem terdistribusi.



Gambar 6. Dashboard Role Administrator



Gambar 7. Dashboard Role Masyarakat



Gambar 8. Dashboard Role Petugas Parkir

3.2 Implementasi *Blockchain* Pada Transaksi Parkir

Pada sistem yang dikembangkan, setiap transaksi parkir yang dilakukan oleh petugas akan diproses oleh sistem dan dicatat dalam database sebelum dibentuk menjadi blok baru pada blockchain. Setiap blok memiliki nilai hash yang dihasilkan menggunakan algoritma hashing untuk menjamin integritas data transaksi. Nilai hash tersebut digunakan sebagai identitas unik setiap blok serta menghubungkan blok tersebut dengan blok sebelumnya. Dengan mekanisme ini, setiap perubahan data pada salah satu blok akan mempengaruhi nilai hash pada blok berikutnya sehingga manipulasi data dapat dideteksi dengan mudah.



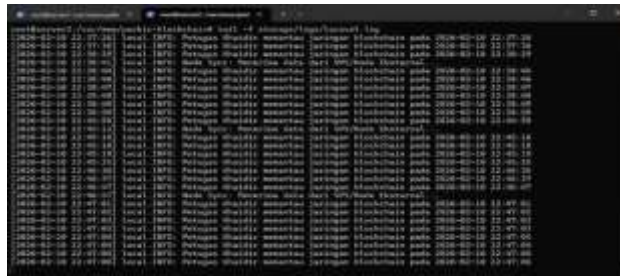
Gambar 9. Tampilan Rantai Blok Transaksi Parkir Pada Sistem

3.3 Pengujian *Distributed Ledger*

Implementasi *distributed ledger* menggunakan dua unit *Virtual Private Server (VPS)* sebagai *node* utama dan *node* replikasi. Server utama memproses transaksi dan membentuk blok, sedangkan server replikasi menyimpan salinan data transaksi. *Laptop* digunakan untuk memonitor proses transaksi dan sinkronisasi antar-*node*.



Gambar 10. Monitoring Distributed Ledger Pada VPS 1



Gambar 11. Monitoring Distributed Ledger Pada VPS 2

3.4 Audit Data Transaksi Melalui Log Blockchain

Tahap ini dilakukan untuk memastikan transparansi serta integritas data transaksi parkir yang tercatat pada sistem. Proses audit dilakukan dengan mengekstraksi data transaksi dari basis data sistem dan membandingkannya dengan catatan yang tersimpan pada *log blockchain*. Proses dimulai dengan mengakses server melalui terminal menggunakan protokol *Secure Shell* (SSH) untuk memperoleh akses langsung ke sistem basis data. Melalui akses tersebut, administrator dapat menjalankan perintah untuk menampilkan data transaksi parkir serta *log blockchain* yang tersimpan pada database sistem. Selanjutnya, data yang diperoleh diekspor dan dianalisis menggunakan aplikasi *excel* untuk memudahkan proses pemeriksaan. Data transaksi operasional kemudian dibandingkan dengan catatan *log blockchain* untuk memastikan bahwa setiap transaksi yang tercatat pada sistem memiliki rekam jejak yang sama pada rantai blok. Hasil analisis menunjukkan bahwa data transaksi parkir yang tersimpan pada sistem operasional memiliki kesesuaian dengan data yang tercatat pada *log blockchain*. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pencatatan berbasis *blockchain* mampu menjaga transparansi serta integritas data transaksi parkir sehingga potensi manipulasi data dapat diminimalkan.



Gambar 12. Output Excel Data Transaksi Parkir



Gambar 13. Output Excel Data Log Blockchain

3.5 Pengujian Sistem

3.5.1 Pengujian Keberhasilan Transaksi

Pengujian keberhasilan transaksi dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam memproses dan mencatat transaksi parkir hingga berhasil tersimpan pada *ledger*. Pengujian dilakukan dengan mengamati status setiap transaksi setelah proses pembayaran dan pencatatan *blockchain* selesai. Parameter yang diamati meliputi jumlah transaksi yang diuji, transaksi berhasil, transaksi gagal, serta persentase keberhasilan transaksi.

Tabel 1. Hasil Pengujian Keberhasilan Transaksi

No.	Plat Kendaraan	Status Pembayaran	Status Blockchain	Hasil
1	BK 12346 RBQ	Dibayar	Validated	Berhasil
2	BK 1234 RBE	Dibayar	Validated	Berhasil
3	BK 1860 FE	Dibayar	Validated	Berhasil
4	BK 1 MDN	Dibayar	Validated	Berhasil
5	BK 1989 OL	Dibayar	Validated	Berhasil

3.5.2 Pengujian Waktu Transaksi dan Sinkronisasi Data

Pengujian waktu transaksi dilakukan untuk mengetahui waktu pencatatan transaksi pada Server 1 dan waktu penerimaan data pada Server 2. Pengujian ini juga digunakan untuk mengukur kecepatan serta konsistensi proses sinkronisasi data antar-*node* pada sistem *distributed ledger*. Hasil pengujian terhadap 10 transaksi ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Waktu Pencatatan dan Sinkronisasi Data Transaksi Parkir Antar-VPS

No.	Plat Kendaraan	Waktu Pencatatan & Pengiriman Server 1	Waktu Penerimaan Server 2	Lama Sinkronisasi	Lokasi
1	BK 1989 OL	16:27:03	16:27:03	< 1 detik	Area A
2	BK 1234 RBE	16:35:37	16:35:37	< 1 detik	Area A
3	BK 1 MDN	16:43:24	16:43:24	< 1 detik	Area A
4	BK 5681 AMW	16:46:09	16:46:09	< 1 detik	Area A
5	BK 12346 RBQ	16:58:43	16:58:43	< 1 detik	Area A
6	BK 1234 RBE	20:42:25	20:42:25	< 1 detik	Area A
7	BK 1860 FE	20:58:51	20:58:51	< 1 detik	Area C
8	BK 1989 OL	21:09:38	21:09:38	< 1 detik	Area C
9	BK 5681 AMW	21:15:12	21:15:12	< 1 detik	Area B
10	BK 1234 RBE	21:17:34	21:17:34	< 1 detik	Area B

Berdasarkan hasil pengujian, selisih waktu pencatatan dan penerimaan data dihitung menggunakan:

$$\Delta t = T_{server2} - T_{server1}$$

Sebagai contoh pada transaksi pertama:

$$\Delta t = 16:27:03 - 16:27:03 = 0 \text{ detik}$$

Seluruh transaksi memiliki waktu yang tercatat sama hingga satuan detik, sehingga selisih waktu yang tercatat adalah 0 detik, sedangkan waktu sinkronisasi aktual berada pada rentang < 1 detik.

Rata-rata waktu sinkronisasi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_1 + \dots + t_{10}}{10}$$

Karena seluruh waktu sinkronisasi tercatat < 1 detik, maka rata-rata waktu sinkronisasi juga berada pada:

$$\bar{t} < 1 \text{ detik}$$

Tingkat keberhasilan sinkronisasi dihitung dengan:

$$\text{Keberhasilan Sinkronisasi} = \frac{10}{10} \times 100\% = 100\%$$

Dengan demikian, 10 dari 10 transaksi berhasil disinkronkan, sehingga tingkat keberhasilan sinkronisasi mencapai 100% dan tidak terdapat transaksi yang gagal disinkronkan.

3.5.3 Pengujian Integritas Data *Blockchain*

Persentase integritas data dihitung berdasarkan jumlah data yang sesuai dengan catatan blockchain dibandingkan dengan seluruh data yang diperiksa.

$$\begin{aligned}\text{Persentase Integritas Data} &= \frac{\text{Jumlah Data Valid}}{\text{Jumlah Data yang Diperiksa}} \times 100\% \\ &= \frac{10}{10} \times 100\% = 100\%\end{aligned}$$

3.5.4 Pengujian Deteksi Manipulasi Data

Untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi manipulasi, digunakan persentase keberhasilan deteksi:

$$\text{Persentase Deteksi} = \frac{\text{Manipulasi Terdeteksi}}{\text{Total Skenario Manipulasi}} \times 100\%$$

Jika dilakukan **1 skenario manipulasi** dan berhasil terdeteksi:

$$= \frac{1}{1} \times 100\% = 100\%$$

3.5.5 Pengujian Waktu Manipulasi dan Konsensus

1. Waktu manipulasi ke pengajuan konsensus

Data: 1, 1, 1, 1, dan 2 menit.

$$\bar{t} = \frac{1 + 1 + 1 + 1 + 2}{5} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ menit}$$

2. Waktu pengajuan ke persetujuan konsensus

Data: 2, 1, 1, 3, dan 1 menit.

$$\bar{t} = \frac{2 + 1 + 1 + 3 + 1}{5} = \frac{8}{5} = 1,6 \text{ menit}$$

3. Total waktu manipulasi ke persetujuan

$$\bar{t}_{total} = 1,2 + 1,6 = 2,8 \text{ menit}$$

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pembayaran parkir berbasis *private blockchain* mampu mencatat dan memvalidasi transaksi menggunakan mekanisme *hash chaining* serta melakukan sinkronisasi data antar-*node*. Penerapan mekanisme tersebut memungkinkan data transaksi pada *ledger* dibandingkan dengan data pada database sehingga perubahan data dapat diketahui.

Hasil pengujian integritas menunjukkan bahwa 11 transaksi dinyatakan Blockchain Match, sedangkan 1 transaksi berhasil terdeteksi sebagai manipulasi dengan status TAMPERED. Manipulasi dilakukan dengan mengubah data transaksi secara langsung pada database tanpa memperbarui hash pada blockchain, sehingga terjadi ketidaksesuaian antara data dan hash yang tersimpan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme hash dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan data transaksi.

Pada pengujian manipulasi dan konsensus, rata-rata waktu dari manipulasi hingga pengajuan konsensus adalah 1,2 menit, sedangkan waktu dari pengajuan hingga persetujuan admin adalah 1,6 menit. Dengan demikian, rata-rata keseluruhan proses dari manipulasi hingga konsensus disetujui adalah 2,8 menit.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu mendukung pencatatan transaksi, sinkronisasi data, validasi, serta deteksi manipulasi transaksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan *private blockchain* dapat meningkatkan mekanisme pengawasan dan integritas data pada sistem pembayaran parkir.

REFERENSI

- [1] Badan Pusat Statistik, "Kota Binjai Dalam Angka 2025," 2025.
- [2] "PERATURAN DAERAH KOTA BINJAI NOMOR 1 TAHUN 2024 TENTANG PAJAK DAERAH DAN RETRIBUSI DAERAH," 2024, Accessed: Aug. 23, 2025. [Online]. Available: <https://jdih.binjaikota.go.id/Peraturan/detail/1034/1>

-
- [3] “Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2022 Tentang Hubungan Keuangan Antara Pemerintah Pusat dan Pemerintahan Daerah,” 2022. Accessed: Aug. 20, 2025. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/195696/uu-no-1-tahun-2022>
 - [4] J. Bauvars, “Applicability of Blockchain Technology in Securities Settlement,” *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, vol. 2021, no. 28, pp. 34–58, 2021, doi: 10.7250/csimq.2021-28.03.
 - [5] C. Di Ciccio, “Blockchain and Distributed Ledger Technologies,” in *The Role of Distributed Ledger Technology in Banking: From Theory to Practice*, Cambridge University Press, 2023, pp. 11–34. doi: 10.1017/9781009411783.003.
 - [6] M. Kim and Y. Kim, “Multi-blockchain structure for a crowdsensing-based smart parking system,” *Future Internet*, vol. 12, no. 5, May 2020, doi: 10.3390/FI12050090.
 - [7] S. Kim and D. Kim, “Data-Tracking in Blockchain Utilizing Hash Chain: A Study of Structured and Adaptive Process,” *Symmetry (Basel)*, vol. 16, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/sym16010062.
 - [8] L. O. S. Luhung, Misbahuddin, and W. W. Giri, “Implementasi Private Blockchain Menggunakan Multichain Sebagai Sistem Keamanan Data IoT,” vol. 11, no. 2, p. 55, 2025.
 - [9] Y. A. Agustian and A. Tedyyana, “IMPLEMENTASI ALGORITMA SHA-256 PADA APLIKASI PENCATATAN TRANSAKSI DAN KEHADIRAN BERBASIS WEB DI KEDAI KOPI KAMBOJDA,” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. Vol. 10 No. 1, 2026.
 - [10] “Peraturan Wali Kota Binjai Nomor 27 Tahun 2018 Tentang Perubahan Tarif Retribusi Pelayanan Parkir di Tepi Jalan Umum Terhadap Peraturan Daerah Kota Binjai Nomor 4 Tahun 2011 tentang Retribusi Jasa Umum,” 2018.