

Layanan web dengan *Byzantine fault tolerance* (BFT) menjamin konsistensi dan ketahanan terhadap manipulasi, tetapi umumnya mengalami latensi tinggi akibat proses konsensus antar *node*. Semakin banyak *node*, semakin lambat respons sistem, sehingga BFT sulit diterapkan pada aplikasi *real-time*. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini merancang arsitektur layanan web dua *layer* berbasis *State Machine Replication* (SMR) yang menjembatani *trade-off* antara ketanggapan dan jaminan BFT. *Layer 2* (L2) menyediakan *buffer* transaksi yang responsif melalui simulasi konsensus, sedangkan *Layer 1* (L1) melakukan komitmen akhir dengan konsensus BFT terhadap *state* yang direplikasi.

Untuk mengevaluasi arsitektur yang diusulkan, penelitian ini menggunakan alur kerja *supply chain* sebagai skenario *proof-of-concept*. Skenario *supply chain* membutuhkan kombinasi respons yang cepat dan integritas data yang tinggi, seperti pada proses pemindaian, validasi, inspeksi, dan pengiriman. Arsitektur dua *layer* yang dirancang memungkinkan langkah-langkah tersebut dijalankan secara interaktif di L2, lalu difinalisasi ke L1 melalui konsensus BFT untuk menjamin keutuhan dan auditabilitas. Dengan sesi sebagai satuan logis, sistem menjaga urutan proses, sinkronisasi *state*, dan verifikasi hasil tanpa terganggu latensi di setiap langkah.

Sebuah prototipe dikembangkan menggunakan CometBFT untuk mengimplementasikan SMR, dengan rancangan API yang terstruktur, pelacakan sesi, serta mekanisme replikasi transaksi deterministik untuk menjaga konsistensi status dan auditabilitas. Pengujian pada berbagai konfigurasi menunjukkan bahwa operasi pada L2 memiliki latensi hingga empat kali lebih rendah dibandingkan dengan proses konsensus di L1, sambil tetap mempertahankan waktu respons di bawah satu detik bahkan dalam kluster BFT dengan 16 *node*. Arsitektur ini relevan untuk sistem seperti *supply chain management*, platform kolaboratif berbasis web, dan aplikasi pemerintahan digital (*e-government*) yang membutuhkan interaksi instan serta jaminan keabsahan melalui konsensus terdistribusi yang akuntabel.

**Kata Kunci:** layanan web, *Byzantine fault tolerance*, sesi, interaktivitas, ketanggapan, arsitektur berlapis, *state machine replication*

## ABSTRACT

*Byzantine fault-tolerant (BFT) web services ensure consistency and resilience against manipulation, but typically suffer from high latency due to the consensus process among distributed nodes. As the number of nodes increases, system responsiveness decreases, limiting BFT applicability in real-time applications. To address this, this study proposes a two-layer web service architecture based on State Machine Replication (SMR) to balance the trade-off between responsiveness and BFT guarantees. Layer 2 (L2) acts as a responsive transaction buffer through consensus simulation, while Layer 1 (L1) finalizes transaction batches using BFT consensus over replicated state.*

*To evaluate the proposed architecture, a supply chain workflow is used as a proof-of-concept scenario. This domain demands both fast response and strong data integrity across processes such as scanning, validation, inspection, and delivery. The dual-layer architecture enables these steps to run interactively in L2 and be finalized in L1 for auditability and data consistency. Session-based grouping preserves logical ordering, state synchronization, and verifiable execution without the latency of consensus after every step.*

*A prototype was developed using CometBFT to implement the SMR engine, supported by structured API design, session tracking, and deterministic transaction replay for state consistency and auditability. Benchmarking across multiple node configurations demonstrates that L2 operations achieve up to 4 times lower latency compared to L1 consensus, maintaining sub-second responsiveness even under 16-node BFT clusters. This architecture is suitable for supply chain systems, collaborative web platforms, and e-government applications where immediate interaction must coexist with verifiable distributed agreement.*

**Keywords** : *web services, Byzantine fault tolerance, sessioning, interactivity, responsiveness, layered architecture, state machine replication*