

Toleransi Kesalahan (*Fault Tolerance*) pada Algoritma Perutean Terdistribusi untuk Keandalan Navigasi

Rafif Akbar Setiawan^{1*}, Muhamad Hafidhin Zakaria², Muhammad Amir Yahya³, Ilham Syauqi Hizbullah⁴

¹Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

^{1*}240103145@udb.ac.id

²Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

²240103137@udb.ac.id

³Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

³240103258@udb.ac.id

⁴Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

⁴240103133@udb.ac.id

Abstrak— Algoritma perutean terdistribusi banyak digunakan pada sistem navigasi digital, tetapi rentan terhadap gangguan seperti kegagalan node dan putusnya jalur komunikasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran *fault tolerance* dalam meningkatkan keandalan navigasi pada sistem terdistribusi. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengkaji berbagai penelitian terkait sistem terdistribusi, algoritma perutean, dan toleransi kesalahan. Hasil kajian menunjukkan bahwa mekanisme *fault detection*, *fault diagnosis*, *fault recovery*, serta penerapan redundansi dan *fault-tolerant routing* mampu menjaga ketersediaan layanan dan meningkatkan keandalan sistem. Dengan demikian, *fault tolerance* menjadi pendekatan yang efektif untuk mempertahankan kinerja algoritma perutean terdistribusi saat terjadi gangguan pada jaringan.

Kata Kunci: *fault tolerance*, algoritma perutean terdistribusi, navigasi digital, sistem terdistribusi, keandalan sistem

Abstract— Distributed routing algorithms are widely used in digital navigation systems but are vulnerable to disruptions such as node failures and communication link failures. This study aims to analyze the role of fault tolerance in improving navigation reliability in distributed systems. The research uses a Systematic Literature Review (SLR) method by reviewing studies related to distributed systems, routing algorithms, and fault tolerance. The results show that fault detection, fault diagnosis, fault recovery, redundancy, and fault-tolerant routing mechanisms can maintain service availability and improve system reliability. Therefore, fault tolerance is an effective approach to maintaining the performance of distributed routing algorithms during network failures.

Keywords: *fault tolerance*, distributed routing algorithm, digital navigation, distributed system, system reliability.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem terdistribusi saat ini dapat mendorong penerapan algoritma perutean (*routing algorithm*) pada berbagai aplikasi navigasi modern. Algoritma perutean terdistribusi memungkinkan setiap *node* dalam jaringan berpartisipasi dalam proses penentuan jalur secara mandiri sehingga mampu meningkatkan efisiensi dan skalabilitas sistem [2]. Namun, sifat terdistribusi tersebut juga menyebabkan sistem rentan terhadap berbagai gangguan, seperti kegagalan *node*, putusnya jalur komunikasi, dan inkonsistensi informasi rute yang dapat menurunkan keandalan navigasi [1].

Seiring meningkatnya penggunaan aplikasi navigasi digital seperti sistem transportasi pintar, navigasi kendaraan, hingga layanan logistik berbasis lokasi, kebutuhan terhadap sistem yang

andal menjadi semakin penting. Pengguna mengharapkan informasi rute yang selalu tersedia dan dapat diperbarui secara cepat meskipun terjadi perubahan kondisi jaringan. Oleh karena itu, algoritma perutean tidak hanya dituntut mampu menemukan jalur terbaik, tetapi juga harus mampu mempertahankan layanan ketika terjadi gangguan pada salah satu komponen sistem. Kemampuan tersebut menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas layanan dan pengalaman pengguna pada lingkungan sistem terdistribusi [2], [4].

Selain itu, kompleksitas jaringan yang terus berkembang menyebabkan kemungkinan terjadinya kegagalan sistem semakin besar. Dalam lingkungan yang terdiri dari banyak *node* dan jalur komunikasi, kegagalan pada satu komponen dapat memengaruhi kinerja

keseluruhan sistem apabila tidak ditangani dengan baik. Oleh karena itu, penerapan mekanisme *fault tolerance* menjadi salah satu pendekatan yang banyak diteliti untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap berbagai bentuk gangguan dan memastikan proses navigasi tetap berjalan secara optimal [1], [5].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan mekanisme *fault tolerance* yang berfungsi agar sistem tetap beroperasi meskipun terjadi kegagalan pada sebagian komponen. *Fault tolerance* merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan layanan dan memberikan hasil yang dapat diterima ketika terjadi gangguan pada perangkat keras, perangkat lunak, maupun jaringan komunikasi [3]. Dalam sistem terdistribusi, cara ini berperan penting dalam menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) layanan [4].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *fault tolerance* dapat diterapkan untuk proses deteksi kesalahan (*error detection*), diagnosis kesalahan (*error diagnosis*), dan pemulihan kesalahan (*error recovery*) untuk mengurangi dampak kegagalan terhadap kinerja sistem [1]. Selain itu, penerapan redundansi dan mekanisme pemulihan jalur terbukti mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam mempertahankan layanan ketika terjadi gangguan pada jaringan terdistribusi [5].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengkaji penerapan mekanisme *fault tolerance* pada algoritma perutean terdistribusi melalui kajian literatur sistematis, guna memperoleh pemahaman komprehensif mengenai strategi penanganan kegagalan yang efektif serta mengidentifikasi celah penelitian (*research gap*) yang dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem navigasi yang lebih andal pada studi selanjutnya.

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengkaji, dan menganalisis berbagai mekanisme *fault tolerance* yang diterapkan pada algoritma perutean terdistribusi guna meningkatkan keandalan navigasi. Metode SLR dipilih karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian, pendekatan yang digunakan, serta efektivitas berbagai teknik toleransi kesalahan yang telah diterapkan pada sistem terdistribusi. Proses penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan terkait kegagalan *node*, gangguan komunikasi, dan inkonsistensi informasi rute yang dapat menurunkan kualitas layanan navigasi pada lingkungan jaringan terdistribusi [1], [2].

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal nasional, jurnal internasional, prosiding konferensi, dan artikel penelitian yang membahas sistem terdistribusi, algoritma perutean, serta mekanisme *fault tolerance*. Literatur yang digunakan diperoleh dari basis data ilmiah seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, Google Scholar, dan sumber akademik lainnya. Selanjutnya dilakukan proses seleksi terhadap literatur yang relevan dengan topik penelitian berdasarkan kesesuaian pembahasan, tahun publikasi, serta kontribusinya terhadap pengembangan teknik toleransi kesalahan pada sistem perutean terdistribusi [3], [4].

Dalam proses pencarian literatur, digunakan beberapa kata kunci utama seperti *fault tolerance*, *distributed routing*, *distributed system*, *fault recovery*, *routing reliability*, dan *digital navigation*. Kata kunci tersebut digunakan secara individual maupun kombinasi untuk memperoleh artikel yang relevan dengan topik penelitian. Literatur yang diperoleh kemudian disaring berdasarkan kesesuaian topik, kualitas publikasi, serta keterkaitannya dengan penerapan toleransi kesalahan pada sistem perutean terdistribusi [1], [7].

II. METODOLOGI PENELITIAN

Literatur yang telah terseleksi kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi berbagai metode *fault tolerance* yang digunakan. Analisis difokuskan pada mekanisme deteksi kesalahan (*fault detection*), diagnosis kesalahan (*fault diagnosis*), dan pemulihan kesalahan (*fault recovery*) yang diterapkan dalam sistem terdistribusi [5]. Selain itu, penelitian juga mengkaji penggunaan teknik redundansi perangkat keras dan perangkat lunak, replikasi data, algoritma konsensus, serta *fault-tolerant routing* yang dirancang untuk mempertahankan ketersediaan layanan ketika terjadi kegagalan *node* atau gangguan jaringan [1], [6]. Penelitian mengenai perbandingan toleransi kesalahan pada arsitektur *cloud computing* dan *fog computing* juga dianalisis untuk memahami pengaruh distribusi proses terhadap kemampuan sistem dalam mempertahankan layanan ketika terjadi gangguan pada jaringan terdistribusi [11].

Pada tahap berikutnya dilakukan perbandingan terhadap metode-metode yang ditemukan berdasarkan beberapa parameter, antara lain kemampuan mendeteksi kesalahan, kemampuan pemulihan sistem, keandalan layanan, ketersediaan jaringan, latensi komunikasi, serta kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi jaringan. Analisis komparatif ini bertujuan untuk mengetahui pendekatan yang paling efektif dalam menjaga kontinuitas proses perutean dan mempertahankan keandalan navigasi pada sistem terdistribusi [7], [8], [11].

Hasil analisis kemudian disintesis untuk memperoleh gambaran mengenai hubungan antara penerapan mekanisme *fault tolerance* dengan peningkatan keandalan algoritma perutean terdistribusi. Sintesis juga mempertimbangkan penerapan *fault tolerance* pada jaringan kendaraan, sistem basis data terdistribusi, dan sistem komunikasi *real-time* sebagai bahan perbandingan untuk menentukan karakteristik solusi yang sesuai pada lingkungan navigasi terdistribusi [9], [10]. Berdasarkan hasil sintesis tersebut, disusun kesimpulan dan rekomendasi mengenai teknik toleransi kesalahan yang paling sesuai untuk diterapkan

pada sistem navigasi berbasis jaringan terdistribusi sehingga mampu mempertahankan layanan secara optimal meskipun terjadi kegagalan pada sebagian komponen sistem.

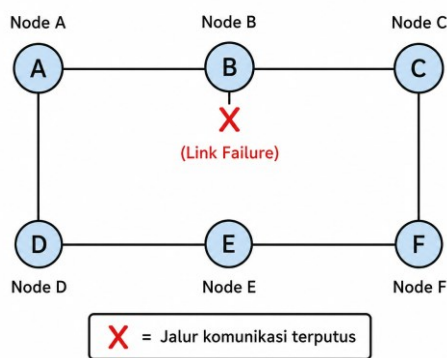
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, penerapan *fault tolerance* pada algoritma perutean terdistribusi berperan penting dalam menjaga keandalan sistem navigasi ketika terjadi gangguan pada jaringan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa mekanisme seperti deteksi kesalahan, pemulihan jalur, dan redundansi dapat membantu sistem tetap beroperasi meskipun terjadi kegagalan pada *node* atau jalur komunikasi. Hasil analisis selanjutnya dibahas berdasarkan jenis kegagalan yang terjadi, mekanisme *fault tolerance* yang digunakan, serta dampaknya terhadap keandalan navigasi.

A. Jenis Kegagalan pada Algoritma Perutean Terdistribusi

Berdasarkan hasil kajian literatur, terdapat beberapa jenis kegagalan yang sering terjadi pada sistem perutean terdistribusi, yaitu kegagalan *node* (*node failure*), kegagalan jalur komunikasi (*link failure*), serta keterlambatan penyebaran informasi rute. Kegagalan *node* menyebabkan suatu perangkat tidak dapat mengirim atau menerima informasi rute, sedangkan kegagalan jalur komunikasi dapat menghambat pertukaran data antar *node* dalam jaringan. Selain itu, keterlambatan pembaruan informasi rute dapat menyebabkan sistem mengambil keputusan perutean yang kurang optimal sehingga menurunkan kualitas layanan navigasi.

Pada aplikasi navigasi digital, kegagalan tersebut dapat mengakibatkan meningkatnya waktu pencarian rute, berkurangnya akurasi rekomendasi jalur, bahkan kegagalan sistem dalam menemukan jalur menuju tujuan ketika sebagian jaringan mengalami gangguan.

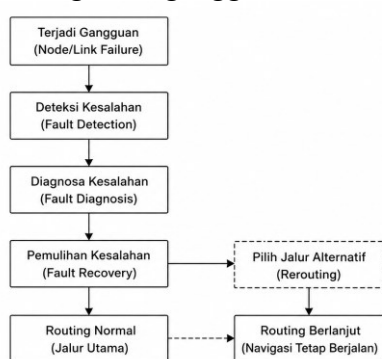


Gambar 1. Jenis Kegagalan pada Sistem Perutean Terdistribusi

B. Penerapan Mekanisme Fault Tolerance

Hasil kajian menunjukkan bahwa fault tolerance diterapkan melalui tiga tahapan utama, yaitu *fault detection*, *fault diagnosis*, dan *fault recovery*. Tahap *fault detection* digunakan untuk mendeteksi adanya kegagalan pada node maupun jaringan komunikasi. Selanjutnya sistem melakukan *fault diagnosis* untuk mengidentifikasi penyebab dan lokasi gangguan. Setelah sumber masalah diketahui, sistem menjalankan *fault recovery* guna mengembalikan layanan agar tetap dapat digunakan.

Pada algoritma perutean terdistribusi, proses pemulihan umumnya dilakukan dengan memilih jalur alternatif yang masih tersedia. Pendekatan ini memungkinkan layanan navigasi tetap berjalan meskipun sebagian node atau jalur komunikasi mengalami gangguan.



Gambar 2. Tahapan Fault Tolerance

Pada implementasinya, mekanisme fault tolerance dapat bekerja secara otomatis tanpa memerlukan intervensi pengguna. Ketika sistem mendeteksi adanya gangguan, proses pemulihan dilakukan dengan mengalihkan lalu lintas data ke jalur alternatif yang masih tersedia. Proses ini

berlangsung dalam waktu yang relatif singkat sehingga pengguna tidak merasakan dampak yang signifikan terhadap layanan navigasi yang digunakan.

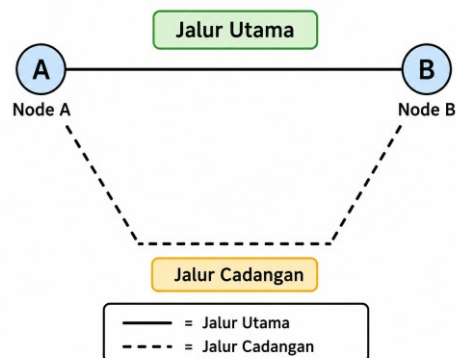
Kemampuan melakukan pemulihan secara otomatis menjadi salah satu keunggulan utama sistem fault tolerant. Semakin cepat sistem mendeteksi dan menangani kesalahan, semakin kecil pula kemungkinan terjadinya penurunan kualitas layanan. Oleh karena itu, efektivitas mekanisme fault detection dan fault recovery menjadi faktor penting dalam menentukan tingkat keandalan sistem perutean terdistribusi.

C. Peran Redundansi dalam Meningkatkan Keandalan

Salah satu teknik fault tolerance yang banyak diterapkan dalam sistem terdistribusi adalah redundansi. Teknik ini menyediakan jalur cadangan atau salinan data sehingga layanan dapat tetap beroperasi ketika terjadi kegagalan pada komponen utama.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa redundansi jalur mampu meningkatkan ketersediaan layanan karena sistem dapat langsung mengalihkan proses komunikasi ke jalur lain yang masih aktif. Selain itu, replikasi data membantu menjaga konsistensi informasi rute yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan.

Pada sistem navigasi digital, penerapan redundansi memungkinkan pengguna tetap memperoleh rekomendasi rute meskipun terjadi gangguan pada sebagian jaringan. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) layanan navigasi.



Gambar 3. Konsep Redundansi Jalur

Redundansi tidak hanya diterapkan pada jalur komunikasi, tetapi juga dapat diterapkan pada penyimpanan data dan komponen pemrosesan. Dengan adanya salinan data pada beberapa node, sistem tetap dapat mengakses informasi yang dibutuhkan meskipun salah satu node mengalami kegagalan. Pendekatan ini banyak digunakan pada sistem terdistribusi modern karena mampu meningkatkan ketersediaan layanan secara signifikan.

Meskipun demikian, penerapan redundansi juga memiliki konsekuensi berupa meningkatnya kebutuhan sumber daya sistem. Semakin banyak komponen cadangan yang digunakan, semakin besar pula kebutuhan penyimpanan, bandwidth, dan biaya operasional yang diperlukan. Oleh karena itu, implementasi redundansi perlu disesuaikan dengan kebutuhan dan karakteristik sistem yang digunakan agar manfaat yang diperoleh tetap seimbang dengan biaya yang dikeluarkan.

D. Analisis Perbandingan Pendekatan Fault Tolerance

Berdasarkan hasil analisis literatur, terdapat beberapa pendekatan fault tolerance yang digunakan pada sistem terdistribusi. Setiap pendekatan memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda dalam menjaga keandalan layanan

Penerapan fault tolerance terbukti memberikan dampak positif terhadap keandalan sistem navigasi. Sistem menjadi lebih mampu mempertahankan ketersediaan layanan, mengurangi risiko kegagalan pencarian rute, serta meningkatkan kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi jaringan.

Selain itu, penggunaan jalur alternatif secara otomatis memungkinkan proses navigasi tetap berjalan tanpa gangguan yang signifikan bagi pengguna. Dengan demikian, fault tolerance berperan penting dalam meningkatkan *reliability*, *availability*, dan kualitas layanan pada sistem navigasi berbasis jaringan terdistribusi.

Dari berbagai penelitian yang dikaji, terlihat bahwa fault tolerance tidak hanya berpengaruh terhadap keandalan sistem, tetapi juga terhadap kualitas layanan secara keseluruhan. Sistem yang mampu bertahan terhadap gangguan cenderung memiliki tingkat kepuasan pengguna yang lebih baik karena layanan tetap dapat diakses meskipun terjadi permasalahan pada sebagian jaringan. Hal ini menunjukkan bahwa keandalan sistem dan pengalaman pengguna memiliki hubungan yang erat dalam implementasi sistem navigasi modern.

IV. Sintesis dan Identifikasi Research Gap

Apabila kesebelas literatur yang dikaji disandingkan, terlihat pola bahwa penelitian mengenai fault tolerance pada sistem terdistribusi secara umum berkembang pada dua arah yang relatif terpisah. Arah pertama berfokus pada mekanisme tingkat jaringan, seperti fault-tolerant routing dan pemulihan jalur pada arsitektur mesh maupun OSPF. Arah kedua berfokus pada mekanisme tingkat data dan layanan, seperti redundansi penyimpanan dan replikasi data pada sistem terdistribusi umum maupun basis data aplikasi. Kajian yang membahas navigasi digital secara khusus, seperti pada jaringan kendaraan, umumnya menekankan aspek komunikasi real-time namun belum banyak mengaitkannya secara eksplisit dengan mekanisme redundansi data maupun algoritma konsensus yang dibahas pada kelompok literatur lain. Dengan kata lain, belum ditemukan kajian yang menggabungkan ketiga lapisan tersebut, yaitu lapisan jaringan, lapisan

Tabel 1. Perbandingan Pendekatan Fault Tolerance

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Redundansi Jalur	Pemulihan cepat	Membutuhkan sumber daya lebih banyak
Replikasi Data	Menjaga konsistensi data	Menambah beban penyimpanan
Algoritma Konsensus	Akurasi keputusan tinggi	Latensi lebih besar
Fault-Tolerant Routing	Adaptif terhadap perubahan jaringan	Implementasi lebih kompleks

E. Dampak Fault Tolerance terhadap Keandalan Navigasi

data, dan lapisan aplikasi navigasi, ke dalam satu kerangka fault tolerance yang utuh.

Perbandingan lebih lanjut menunjukkan adanya trade-off yang konsisten di seluruh pendekatan yang dikaji: mekanisme dengan waktu pemulihan yang cepat, seperti redundansi jalur, cenderung memiliki kebutuhan sumber daya yang lebih besar, sedangkan mekanisme dengan akurasi keputusan yang tinggi, seperti algoritma konsensus, cenderung menimbulkan latensi tambahan. Pola trade-off ini konsisten muncul baik pada konteks jaringan sensor nirkabel, cloud/fog computing, maupun jaringan kendaraan, yang mengindikasikan bahwa trade-off tersebut bersifat mendasar pada mekanisme fault tolerance itu sendiri, bukan sekadar karakteristik satu domain aplikasi. Bagi konteks navigasi digital yang menuntut respons real-time sekaligus akurasi rute, temuan ini mengarah pada kebutuhan pendekatan hibrida yang mengombinasikan mekanisme pemulihan cepat untuk gangguan ringan dengan mekanisme berbasis konsensus untuk kondisi yang memerlukan akurasi lebih tinggi.

Berdasarkan sintesis tersebut, teridentifikasi tiga celah penelitian (research gap) yang relevan untuk pengembangan lebih lanjut. Pertama, minimnya kajian yang mengintegrasikan mekanisme fault tolerance pada lapisan jaringan, data, dan aplikasi navigasi secara bersamaan dalam satu kerangka evaluasi. Kedua, terbatasnya studi yang mengukur trade-off antara kecepatan pemulihan dan akurasi keputusan secara kuantitatif pada konteks navigasi digital secara spesifik, karena sebagian besar literatur yang ada masih berfokus pada domain jaringan sensor, cloud/fog computing, atau basis data secara umum. Ketiga, belum banyak ditemukan kajian yang mengusulkan kriteria pemilihan mekanisme fault tolerance yang disesuaikan dengan karakteristik beban kerja navigasi, seperti frekuensi permintaan rute dan toleransi pengguna terhadap keterlambatan pembaruan. Ketiga celah ini menjadi dasar arah pengembangan penelitian lanjutan pada bidang fault tolerance untuk sistem navigasi berbasis jaringan terdistribusi.

Tabel 2. Ringkasan Literatur yang Dikaji

Peneliti	Tahun	Metode	Temuan Utama
Adday dkk. [1]	2022	Fault Tolerance pada WSN	Meningkatkan keandalan jaringan melalui redundansi
Ginting dkk. [8]	2024	OSPF Fault Tolerance	Mempercepat pemulihan rute setelah gangguan
Kurokawa & Fukushi [7]	2025	Fault-Tolerant Routing	Adaptif terhadap kegagalan jalur komunikasi
Singh dkk. [9]	2026	Vehicular Network	Menjaga komunikasi pada jaringan kendaraan
Achmad dkk. [11]	2026	Cloud vs Fog Computing	Fog Computing lebih responsif terhadap gangguan lokal

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, mekanisme *fault tolerance* berperan penting dalam menjaga keandalan algoritma perutean terdistribusi pada sistem navigasi. Penerapan *fault detection*, *fault diagnosis*, *fault recovery*, serta penggunaan redundansi dan *fault-tolerant routing* mampu membantu sistem tetap beroperasi meskipun terjadi gangguan pada node maupun jalur komunikasi. Oleh karena itu, *fault tolerance* dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan *reliability* dan *availability* layanan navigasi pada lingkungan sistem terdistribusi [1], [6], [7].

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa kombinasi beberapa teknik fault tolerance cenderung memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan satu teknik secara terpisah. Integrasi antara mekanisme deteksi kesalahan, redundansi, dan pemulihan jalur memungkinkan sistem mempertahankan layanan secara lebih stabil ketika menghadapi berbagai jenis gangguan. Oleh karena itu, pengembangan sistem navigasi di masa mendatang perlu mempertimbangkan penerapan beberapa mekanisme toleransi kesalahan secara terpadu untuk memperoleh tingkat keandalan yang lebih tinggi [1], [7], [11]. Kajian ini juga mengidentifikasi celah penelitian berupa minimnya integrasi fault tolerance lintas lapisan jaringan, data, dan aplikasi navigasi, serta

terbatasnya pengukuran trade-off antara kecepatan pemulihan dan akurasi keputusan pada konteks navigasi digital, sehingga penelitian lanjutan berupa implementasi dan pengujian empiris pada kedua aspek tersebut sangat disarankan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pengampu mata kuliah Sistem Terdistribusi yang telah memberikan arahan dan masukan selama proses penyusunan artikel ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam pencarian referensi, pengumpulan data literatur, serta penyelesaian penelitian yang berjudul "*Toleransi Kesalahan (Fault Tolerance) pada Algoritma Perutean Terdistribusi untuk Keandalan Navigasi*" sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] G. H. Adday, S. K. Subramaniam, Z. A. Zukarnain, and N. Samian, "Fault Tolerance Structures in Wireless Sensor Networks (WSNs): Survey, Classification, and Future Directions," *Sensors*, vol. 22, no. 16, 2022.
- [2] S. Aisyah, Z. O. Wibowo, L. A. Aufa, and N. L. D. M. Sari, "Systematic Literature Review: Pengembangan Strategi Manajemen Sumber Daya Data Terdistribusi sebagai Upaya Peningkatan Efisiensi Operasional," *SENS* 9, 2024.
- [3] S. A. Sudiro and A. Hakim, "Penanganan Toleransi Kesalahan (Fault Tolerance) pada Sistem Pembayaran Elektronik dalam Lingkup Sistem Terdistribusi," *Jurnal Ilmiah Teknologi dan Rekayasa*, vol. 23, no. 3, 2018.
- [4] H. Ferdinando, "Membangun Sistem Fault Tolerant pada Fieldbus untuk Aplikasi Sistem Terdistribusi."
- [5] A. Kumar, R. S. Yadav, Ranvijay, and A. Jain, "Fault Tolerance in Real Time Distributed System," *International Journal on Computer Science and Engineering*, vol. 3, no. 2, 2011.
- [6] B. Balasubramanian and V. K. Garg, "Fault Tolerance in Distributed Systems using Fused Data Structures."
- [7] Y. Kurokawa and M. Fukushi, "Adaptive and Passage-Based Fault-Tolerant Routing Methods for Three-Dimensional Mesh NoCs," *Chips*, vol. 4, no. 14, 2025.
- [8] P. A. Br. Ginting, G. A. K. Diafari, N. I. E. R., and D. M. Wiharta, "Analisis Perbandingan Toleransi Kesalahan Routing Static dan OSPF pada Jaringan Hybrid UNUD," *Jurnal Spektrum*, vol. 11, no. 1, 2024.
- [9] A. Singh *et al.*, "Antenna and Channel-Aware Fault-Tolerant Communication Architecture for Safety-Critical Vehicular Ad Hoc Networks," *National Journal of Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 1, 2026.
- [10] C. A. Hamka, T. B. Adji, and S. Sulisty, "Evaluasi Metode Load Balancing dan Fault Tolerance pada Sistem Database Server Aplikasi Chat," *Edu Komputika*, vol. 5, no. 1, 2018.
- [11] R. R. Achmad, M. Abil, M. R. Fadhilah, and Sandi, "Komparasi Kinerja dan Toleransi Kesalahan antara Cloud dan Fog Computing dalam Aplikasi IoT Terdistribusi," *Jurnal Minfo Polgan*, vol. 14, no. 2, 2026.