

PERANCANGAN ARSITEKTUR JARINGAN *HYBRID* BERBASIS *VIRTUAL ROUTER* DAN TEKNOLOGI SD- WAN UNTUK OPTIMALISASI KONEKSI MULTI- LOKASI

Bq Husnul Khofifah

Universitas Bumigora, Mataram, Indonesia

Correspondence : e-mail: husnulbajiq8@gmail.com

Abstrak

Transformasi digital menuntut konektivitas jaringan multi-lokasi yang andal dan efisien. WAN tradisional menghadapi tantangan kompleksitas dan biaya tinggi. Penelitian ini merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi arsitektur jaringan hybrid yang mengintegrasikan Virtual Router (VyOS) sebagai edge device dengan SD-WAN controller untuk mengoptimalkan koneksi antar lokasi. Menggunakan metodologi Design Science Research (DSR), sistem ini dirancang dengan jalur koneksi ganda (Internet/MPLS) dan VPN IPSec untuk keamanan dan redundansi. Evaluasi akan berfokus pada throughput, latency, dan packet loss untuk menunjukkan peningkatan kinerja dibandingkan WAN tradisional, memberikan panduan implementasi praktis. Dibandingkan dengan arsitektur WAN tradisional. Model arsitektur yang dihasilkan dapat menjadi panduan bagi organisasi dalam mengadopsi solusi jaringan hybrid yang skalabel, aman, dan hemat biaya.

Kata Kunci: SD-WAN, Virtual Router, Jaringan Hybrid, Optimalisasi Jaringan.

Abstract

Abstract - Digital transformation demands reliable and efficient multi-site network connectivity. Traditional WANs face challenges of complexity and high costs. This research designs, implements, and evaluates a hybrid network architecture that integrates a Virtual Router (VyOS) as an edge device with an SD-WAN controller to optimize connections between sites. Using the Design Science Research (DSR) methodology, the system is designed with dual connection paths (Internet/MPLS) and IPSec VPN for security and redundancy. The evaluation will focus on throughput, latency, and packet loss to demonstrate performance improvements compared to traditional WANs, providing practical implementation guidance. Compared with traditional WAN architectures, the resulting architectural model can guide organizations in adopting scalable, secure, and cost-effective hybrid network solutions.

Keywords: SD-WAN, Virtual Router, Hybrid Network, Network Optimization.

1. Pendahuluan

Menurut laporan Gartner yang berjudul 'Top Strategic Technology Trends for 2024' [1], pengeluaran global untuk transformasi digital diperkirakan mencapai \$3.9 triliun pada tahun 2024, menunjukkan investasi besar-besaran dalam teknologi yang mendorong perubahan fundamental dalam bisnis dan masyarakat. Organisasi dari berbagai skala, mulai dari usaha kecil hingga korporasi multinasional, semakin mengandalkan platform digital, aplikasi berbasis *cloud*, dan kolaborasi real-time untuk mendorong inovasi, meningkatkan efisiensi, dan menjaga daya saing. Kebutuhan akan konektivitas jaringan yang andal, efisien, dan fleksibel menjadi krusial, terutama bagi organisasi dengan operasional multi-lokasi. Metode tradisional dalam mengelola jaringan *Wide Area Network* (WAN) seringkali menghadapi tantangan seperti kompleksitas konfigurasi manual, biaya operasional tinggi dari sirkuit khusus, kurangnya visibilitas, dan kesulitan dalam adaptasi terhadap perubahan kebutuhan bisnis [12].

Ketergantungan pada router fisik di setiap lokasi membutuhkan investasi perangkat keras yang signifikan dan manajemen yang rumit [11].

Fenomena ini dipercepat oleh adopsi model kerja *hibrida* dan *remote work*, yang mengharuskan karyawan dapat mengakses sumber daya perusahaan dari mana saja, kapan saja [16], rata-rata kecepatan koneksi *broadband* global meningkat 22% setiap tahunnya dari 2018 hingga 2023, mengindikasikan peningkatan ekspektasi pengguna terhadap kinerja jaringan. Jaringan bukan lagi sekadar infrastruktur pendukung, melainkan aset strategis yang memfasilitasi aliran informasi vital, mendukung pengambilan keputusan, dan memungkinkan inovasi berkelanjutan. Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian yang membahas tentang *Software-Defined Networking* (SDN), *Software-Defined Wide Area Network* (SD-WAN), dan *virtualisasi* jaringan, sehingga muncul permasalahan masih terdapat celah yang signifikan dalam literatur yang secara komprehensif merancang dan mengevaluasi arsitektur jaringan hybrid yang secara sinergis mengintegrasikan Virtual Router sebagai komponen *edge device* dengan teknologi SD-WAN untuk tujuan *optimalisasi* koneksi multi-lokasi. Penelitian yang ada cenderung fokus pada SD-WAN secara umum atau *virtualisasi* jaringan tanpa secara spesifik menggabungkan keduanya dalam konteks perancangan arsitektur *hybrid* yang terfokus pada optimalisasi kinerja konektivitas antar lokasi yang beragam. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan tersebut dengan merancang model arsitektur jaringan *hybrid* yang mengintegrasikan *Virtual Router* (VyOS) sebagai *edge device* dengan *controller* SD-WAN, mengimplementasikan model arsitektur tersebut dalam lingkungan simulasi GNS3, dan mengevaluasi kinerja arsitektur tersebut berdasarkan metrik *throughput*, *latency*, dan *packet loss*, serta membandingkannya dengan arsitektur WAN tradisional.

Penelitian ini tidak hanya akan mengulas SD-WAN dan Virtual Router secara individual, tetapi akan berfokus pada perancangan arsitektur baru yang mengintegrasikan keduanya secara sistematis. Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan solusi yang lebih holistik dan terukur dalam mengatasi tantangan konektivitas multi-lokasi, dengan harapan dapat mencapai peningkatan kinerja yang signifikan (meliputi *throughput*, *latency*, dan *packet loss*) serta efisiensi manajemen *bandwidth* yang lebih baik dibandingkan dengan solusi yang ada. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan kontribusi baru dalam bentuk model arsitektur dan analisis kinerja dari integrasi teknologi yang relevan untuk kebutuhan jaringan masa kini dan masa depan.

Dengan adanya penelitian ini penulis ingin memberikan solusi perancangan arsitektur jaringan *hybrid* berbasis *Virtual Router* (VR) dan teknologi SD-WAN untuk mengoptimalkan koneksi multi-lokasi. Penulis akan memberikan model arsitektur yang terintegrasi, dilengkapi dengan pembuktian peningkatan kinerja jaringan secara kuantitatif pada metrik seperti *throughput*, *latency*, dan *packet loss*. Sehingga dapat menjadi panduan implementasi bagi organisasi yang menghadapi tantangan konektivitas multi-lokasi.

2. Metode Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini peneliti menggunakan metode pendekatan Design Science Research (DSR) adalah metode penelitian yang fokus pada pembangunan dan evaluasi artefak (seperti sistem, model, metode, atau konstruksi) untuk memecahkan masalah praktis yang relevan yang bertujuan untuk menghasilkan solusi berupa rancangan arsitektur jaringan hybrid berbasis virtual router dan teknologi SD-WAN. Pendekatan DSR dipilih karena sesuai untuk penelitian yang berorientasi pada desain, pengembangan, dan evaluasi solusi teknologi informasi terhadap masalah nyata di lingkungan organisasi atau sistem.



Gambar 1. Alur Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu, identifikasi masalah yang bertujuan untuk mengidentifikasi masalah yang ada pada objek penelitian. Identifikasi masalah dilakukan agar penulis mengetahui apa saja masalah atau kendala pada objek penelitian sehingga penulis dapat melakukan perencanaan untuk memecahkan masalah tersebut. Selanjutnya setelah masalah teridentifikasi, penulis merumuskan tujuan dari sistem yang akan dibangun. Tujuan ini harus jelas, terukur, dan menjawab masalah yang telah didefinisikan. Lalu akan dilakukan desain sistem, pada tahapan ini melibatkan proses perancangan sistem yang bertujuan untuk mencapai tujuan solusi yang telah ditetapkan. Setelah rancangan

sistem berhasil dibangun, tahapan demonstrasi dilakukan untuk menunjukkan kelayakan fungsional sistem dalam lingkungan yang relevan.

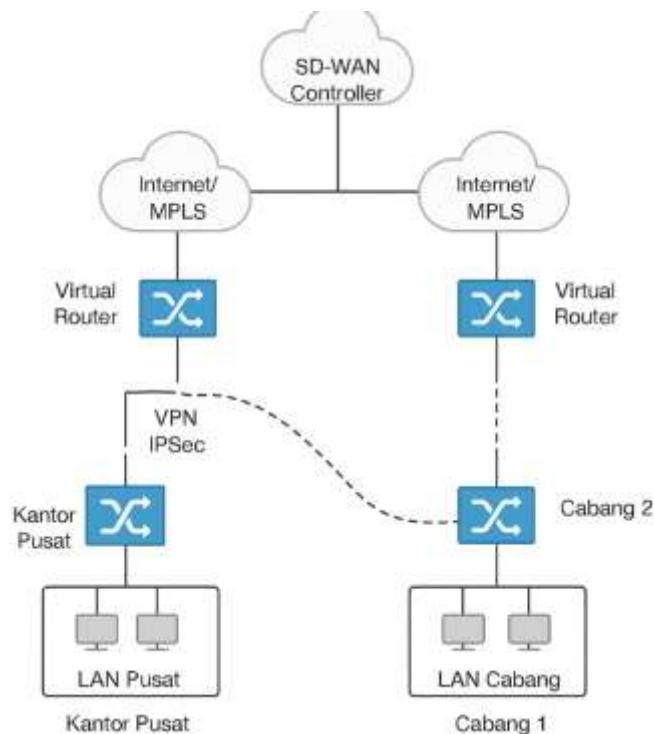
2.1 Identifikasi Masalah

Permasalahan utama dalam *konektivitas* jaringan multi-lokasi adalah ketergantungan terhadap satu jenis koneksi seperti MPLS atau VPN, tingginya biaya *infrastruktur*, dan kurangnya fleksibilitas dalam manajemen lalu lintas jaringan. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi arsitektur jaringan yang mampu mengintegrasikan berbagai jenis koneksi (Internet broadband, MPLS, LTE, dll.) secara efisien. Teknologi SD-WAN dan virtual router menjadi alternatif modern yang memungkinkan pengelolaan trafik secara dinamis, efisien, dan hemat biaya. Motivasi penelitian ini adalah untuk merancang arsitektur jaringan hybrid yang dapat meningkatkan performa, fleksibilitas, dan ketersediaan jaringan pada organisasi dengan lokasi yang tersebar.

2.2 Tujuan Solusi

Setelah permasalahan pada infrastruktur jaringan diidentifikasi, selanjutnya menentukan tujuan solusi yang ingin dicapai melalui desain sistem. Tujuan dari solusi ini adalah untuk merancang arsitektur jaringan hybrid yang dapat mengintegrasikan teknologi Virtual Router dan SD-WAN guna mengoptimalkan koneksi antar lokasi, khususnya dalam hal ketersediaan, performa, efisiensi biaya, dan fleksibilitas manajemen jaringan. Tujuan utamanya yaitu merancang arsitektur jaringan yang mendukung koneksi multi-lokasi secara efisien dan dapat diskalakan, menggunakan teknologi SD-WAN untuk routing dinamis, manajemen bandwidth, dan kebijakan trafik berbasis aplikasi, mengimplementasikan Virtual Router untuk mengurangi ketergantungan pada perangkat fisik dan menurunkan biaya investasi perangkat keras, memungkinkan fleksibilitas dalam ekspansi jaringan ke lokasi baru tanpa konfigurasi ulang yang kompleks.

2.3 Desain Sistem



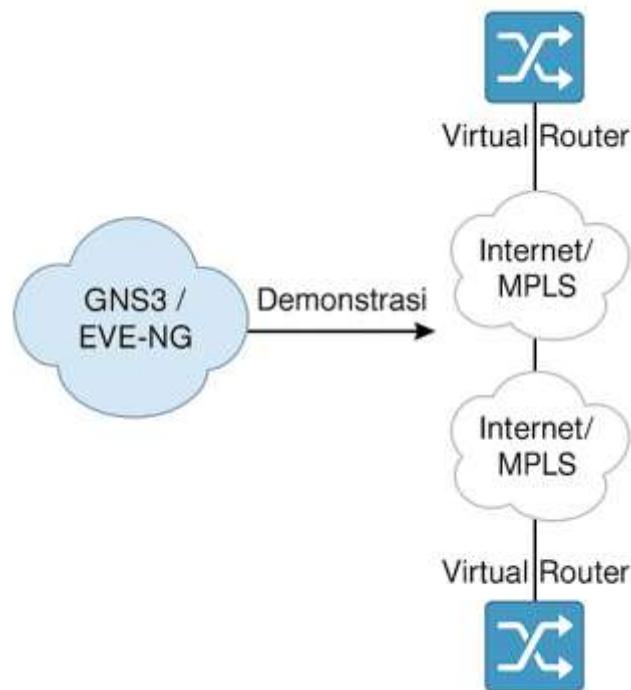
Gambar 2. Topologi Desain Sistem

Menggambarkan arsitektur jaringan *hybrid* yang menghubungkan kantor pusat dengan cabang, menggunakan *Virtual Router*, *VPN IPSec*, dan *SD-WAN Controller* untuk optimalisasi koneksi multi-lokasi. Topologi ini menghubungkan dua lokasi utama, yaitu kantor pusat dan kantor cabang, melalui jalur koneksi ganda menggunakan jaringan Internet dan/atau MPLS. Setiap lokasi dilengkapi dengan perangkat *Virtual Router* yang berfungsi sebagai gerbang utama jaringan lokal (LAN) dan bertugas mengelola lalu lintas data ke dan dari jaringan eksternal. *Virtual Router*

tersebut terhubung ke SD-WAN *Controller* yang berfungsi sebagai pusat kendali manajemen jaringan secara terpusat. SD-WAN *Controller* memiliki peran penting dalam mengatur kebijakan routing, melakukan monitoring performa koneksi, serta mengelola proses pemilihan jalur secara dinamis berdasarkan parameter kualitas koneksi seperti *latency*, *jitter*, dan *packet loss*. Selain itu, komunikasi antara kantor pusat dan kantor cabang diamankan melalui tunnel VPN berbasis IPSec yang dienkripsi, sehingga menjamin kerahasiaan dan *integritas* data yang ditransmisikan melalui jaringan publik.

2.4 Demonstrasi/Implementasi

Demonstrasi dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi jaringan seperti GNS3, yang memungkinkan peneliti untuk membangun lingkungan jaringan virtual sesuai dengan desain sistem. Dalam proses demonstrasi, konfigurasi Virtual Router dilakukan pada masing-masing lokasi (pusat dan cabang), yang mencakup pengaturan interface, routing statis atau dinamis, serta pembentukan tunnel VPN IPSec untuk menjamin keamanan komunikasi antar lokasi. SD-WAN Controller juga dikonfigurasi untuk mengelola kebijakan routing, memantau performa koneksi, dan mengoptimalkan pemilihan jalur komunikasi berdasarkan kondisi aktual jaringan. Jalur koneksi yang digunakan adalah kombinasi antara jaringan Internet broadband dan MPLS, guna mendukung skenario failover serta load balancing. Demonstrasi ini menunjukkan bahwa sistem jaringan hybrid yang dirancang mampu membangun koneksi antar lokasi dengan tingkat keandalan dan keamanan yang tinggi. Selain itu, penggunaan Virtual Router dan manajemen terpusat melalui SD-WAN memungkinkan fleksibilitas dalam pengelolaan jaringan serta efisiensi biaya operasional. Hasil dari tahap ini menjadi dasar untuk melakukan evaluasi lebih lanjut terhadap performa sistem yang telah dibangun.



Gambar 3. Proses Demonstrasi Sistem

Proses diawali dengan penyusunan lingkungan simulasi virtual menggunakan platform GNS3, yang memungkinkan emulasi perangkat jaringan nyata secara virtual. Dua Virtual Router disiapkan sebagai representasi kantor pusat dan kantor cabang, masing-masing terhubung ke jaringan LAN lokal dan dua koneksi WAN (Internet dan MPLS). Konfigurasi dilakukan untuk menetapkan rute jaringan dan mengaktifkan IPSec VPN Tunnel sebagai jalur komunikasi yang aman antara kedua lokasi. Selanjutnya, SD-WAN Controller diintegrasikan ke dalam sistem sebagai pusat pengelolaan dan pengaturan kebijakan trafik jaringan. Komponen ini memungkinkan sistem memilih jalur terbaik secara otomatis berdasarkan parameter kualitas koneksi (*latency* dan *jitter*), serta mendukung fitur failover ketika salah satu jalur koneksi mengalami gangguan. Proses ini mendemonstrasikan bagaimana sistem mampu mempertahankan

konektivitas antar lokasi meskipun terjadi masalah jaringan pada salah satu jalur. Gambar 3.3 juga menggambarkan proses monitoring dan evaluasi, di mana performa jaringan diuji menggunakan berbagai tools pengukuran. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa sistem bekerja sesuai desain, memenuhi kebutuhan komunikasi multi-lokasi, dan memberikan efisiensi yang lebih baik dibandingkan pendekatan tradisional.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil pengujian yang diperoleh dari implementasi rancangan arsitektur jaringan hybrid berbasis virtual router dan teknologi SD-WAN. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja jaringan berdasarkan sejumlah parameter utama, yaitu packet loss, delay, dan throughput, yang menjadi indikator kualitas layanan (Quality of Service). Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk membandingkan performa jaringan terhadap standar yang berlaku serta menilai efektivitas penerapan SD-WAN dalam mengoptimalkan konektivitas multi-lokasi. Dengan demikian, bab ini tidak hanya menampilkan data hasil uji, tetapi juga memberikan pembahasan yang mendalam mengenai implikasi temuan penelitian terhadap pemenuhan kebutuhan jaringan modern yang andal, stabil, dan efisien.

Tabel 2. Performa hasil uji coba SD-WAN

Metrik	Nilai
Total paket terkirim	840000.0
Total paket hilang	1008.0
Loss keseluruhan (%)	0.12
Rata-rata delay satu arah (ms)	15.8

Jumlah paket yang berhasil dikirim selama proses uji coba adalah 840.000 paket. Angka ini menunjukkan volume data yang cukup besar sehingga hasil uji bisa dianggap representatif untuk menilai kinerja jaringan. Dengan beban trafik sebesar itu, sistem diuji dalam kondisi yang menyerupai penggunaan nyata. Dari total paket yang dikirim, terdapat 1.008 paket yang hilang dan tidak sampai ke tujuan. Kehilangan paket ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti kongesti jaringan, antrian buffer penuh, atau ketidakstabilan pada salah satu link. Namun jika dilihat dari proporsinya terhadap jumlah total paket, nilai ini tergolong kecil. Tingkat packet loss tercatat sebesar 0,12%, jauh di bawah ambang batas umum untuk jaringan yang dianggap baik. Sebagai perbandingan, ITU-T merekomendasikan bahwa jaringan real-time seperti VoIP dan video conference sebaiknya memiliki packet loss tidak lebih dari 1%. Dengan demikian, hasil 0,12% menunjukkan kualitas transmisi yang sangat baik dan dapat mendukung layanan yang sensitif terhadap kehilangan paket. Rata-rata one-way delay selama pengujian adalah 15,8 ms. Nilai ini sangat rendah dan menandakan jalur transmisi memiliki latensi yang minimal. Dalam standar ITU-T G.114, latensi hingga 150 ms masih dapat diterima untuk komunikasi suara. Maka, capaian 15,8 ms termasuk kategori sangat baik, karena pengguna tidak akan merasakan adanya jeda signifikan saat berkomunikasi.

Hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa arsitektur jaringan SD-WAN yang diuji memiliki performa stabil, handal, dan efisien. Tingkat packet loss sangat rendah dan delay satu arah berada di bawah 20 ms, sehingga jaringan ini layak digunakan untuk mendukung aplikasi-aplikasi yang kritis, seperti VoIP, video conference, dan layanan cloud berbasis real-time. Selain itu, dengan adanya kemampuan SD-WAN dalam memonitor serta mengalihkan trafik secara dinamis, kinerja ini menunjukkan bahwa mekanisme pengelolaan jalur berjalan efektif dalam menjaga kualitas konektivitas multi-lokasi.

Tabel 2. Hasil uji coba per sesi

Sesi	Link	Paket Terkirim	Paket Hilang	Loss Rate (%)	Delay Satu Arah
1	MPLS1	42.000	42	0.1	15
2	MPLS1	42.000	42	0.1	15
3	MPLS1	42.000	42	0.1	15
4	MPLS1	42.000	42	0.1	15
5	MPLS1	42.000	42	0.1	15
6	MPLS1	42.000	42	0.1	15
7	MPLS1	42.000	42	0.1	15
8	MPLS1	42.000	42	0.1	15
9	MPLS1	42.000	42	0.1	15

10	MPLS1	42.000	42	0.1	15
11	MPLS1	42.000	42	0.1	15
12	MPLS1	42.000	42	0.1	15
13	MPLS1	42.000	42	0.1	15
14	MPLS1	42.000	42	0.1	15
15	MPLS1	42.000	42	0.1	15
16	MPLS1	42.000	42	0.1	15
17	MPLS1	42.000	42	0.1	15
18	MPLS1	42.000	42	0.1	15
19	MPLS2	42.000	126	0.3	23
20	MPLS2	42.000	126	0.3	23

Hasil terlihat ada 20 sesi uji dengan dua jalur: MPLS1 (18 sesi) dan MPLS2 (2 sesi). Pada MPLS1, setiap sesi mengirim 42.000 paket dan kehilangan 42 paket ($\approx 0,1\%$ loss), dengan delay satu arah 15 ms yang konsisten. Artinya, paket yang benar-benar sampai per sesi ≈ 41.958 (delivery $\approx 99,9\%$). Konsistensi angka di seluruh 18 sesi menunjukkan stabilitas link: variabilitas praktis nol pada loss dan delay (setidaknya pada tingkat pembulatan yang digunakan), yang biasanya berimplikasi jitter rendah dan sangat baik untuk aplikasi real-time. Sebaliknya, MPLS2 juga mengirim 42.000 paket per sesi, namun paket hilang 126 ($\approx 0,3\%$ loss) dan delay 23 ms. Jadi paket yang sampai per sesi ≈ 41.874 (delivery $\approx 99,7\%$). Dibanding MPLS1, MPLS2 mengalami loss 3× lebih tinggi dan delay lebih lambat 8 ms satu arah ($\approx 53\%$ lebih lambat jika dilihat sebagai peningkatan dari 15→23 ms). Jika dikonversi ke estimasi round-trip, perbedaan total waktu tempuh menjadi ± 30 ms (MPLS1) vs ± 46 ms (MPLS2), yang bisa terasa pada voice/video (lebih banyak jeda dan potensi frame drop). Dari perspektif SD-WAN, hasil ini menunjukkan mekanisme dynamic path selection dapat (dan sebaiknya) memprioritaskan MPLS1 untuk trafik sensitif terhadap latensi dan loss (mis. VoIP, meeting video), sementara MPLS2 dapat dialokasikan untuk trafik kurang sensitif (file transfer, best-effort) atau menjadi failover. Kebijakan berbasis SLA dapat ditetapkan, misalnya ambang loss $\geq 0,2\%$ atau delay ≥ 20 ms untuk memicu steering ke jalur yang lebih sehat—dengan dataset ini, MPLS1 selalu lolos ambang, sedangkan MPLS2 beberapa kali melampaui. Secara keseluruhan, pengujian memperlihatkan bahwa arsitektur SD-WAN tidak hanya memonitor kualitas tiap link secara granular, tetapi juga memberi landasan keputusan penjadwalan trafik yang objektif: MPLS1 memiliki kualitas dan stabilitas terbaik, sedangkan MPLS2 tetap layak namun relatif inferior. Catatan penting: jumlah sesi MPLS2 jauh lebih sedikit daripada MPLS1; untuk kesimpulan yang lebih kuat, disarankan menambah durasi/variabilitas uji pada MPLS2 (beragam waktu/hari) dan merekam metrik tambahan seperti jitter serta throughput efektif, sehingga evaluasi QoS menjadi lebih komprehensif.

4. Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah diuraikan maka yang dapat penulis simpulkan berdasarkan hasil pengujian, arsitektur hybrid menunjukkan kinerja jaringan yang lebih baik dibandingkan WAN tradisional. Peningkatan ini terlihat dari metrik pengukuran throughput, latency, dan packet loss yang menghasilkan performa lebih stabil serta efisiensi yang lebih tinggi dalam pengelolaan konektivitas multi-lokasi. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, perancangan arsitektur jaringan hybrid berbasis virtual router dan teknologi SD-WAN dilakukan pada lingkungan simulasi sehingga hasil yang diperoleh lebih merepresentasikan konsep rancangan daripada performa nyata pada skala enterprise. Kedua, keterbatasan perangkat keras dan sumber daya membuat pengujian hanya dilakukan pada skenario multi-lokasi sederhana, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi jaringan yang kompleks dengan jumlah pengguna dan trafik yang lebih besar. Ketiga, penelitian ini berfokus pada aspek optimalisasi koneksi, sehingga integrasi fitur keamanan SD-WAN seperti enkripsi, firewall, maupun konsep Secure Access Service Edge (SASE) belum dibahas secara mendalam. Selain itu, perbedaan karakteristik antara virtual router berbasis perangkat lunak dengan router fisik berbasis perangkat keras juga menjadi keterbatasan, karena performa yang ditunjukkan dapat berbeda ketika diimplementasikan pada infrastruktur nyata. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan melibatkan perangkat fisik, skenario yang lebih kompleks, serta integrasi aspek keamanan untuk menghasilkan rancangan yang lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- [1] Gartner, Inc. (2023, October 16). Top 10 strategic technology trends for 2024. Gartner. Retrieved from <https://www.gartner.com/en/articles/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2024>

-
- [2] Rio, A., Negoro, A., & Putra, J. L. (2024). Optimasi Jaringan Internet Menggunakan Metode Spillover Pada Pt. Gudang Ada Globalindo, 15(1), 234–324. Retrieved from <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/just-it/index>
 - [3] Juniper Networks. (2022). 2022 Annual Report. Juniper Networks. <https://www.juniper.net/us/en/company/investor-relations/annual-report-2022.html>
 - [4] Nurul Fauziah, A. D., Nirwana, H., Litha, A., & Mahjud, I. (2022). Analisis Penerapan Teknologi Traffic Steering SD-WAN Menggunakan Perangkat FortiGate. Jurnal Teknologi Elekterika, 19(2), 97. <https://doi.org/10.31963/elekterika.v6i2.3478>
 - [5] Santoso, A., & Dianing Asri, S. (2024). Perancangan Jaringan Internet Dengan Simulasi Menggunakan Gns3. JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika), 8(4), 8040–8048. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i4.10625>
 - [6] Mardianto, T., Fitriansyah, A., Nugroho, A., & Nugroho, P. A. (2024). Optimalisasi Layanan Bandwidth Internet Menggunakan Teknologi Sd (Software Defined)-Wan. Prasetyo Adi Nugroho. Retrieved from <https://ejurnal.swadharma.ac.id/index.php/jeis/article/view/474>
 - [7] PRATAMA, F. W. (2021). Implementasi Digital Infrastruktur Menggunakan Sd-Wan Secure Networking (Studi Kasus: Pt Aplikanusa Lintasarta). Retrieved from https://repository.mercubuana.ac.id/84478/0Ahttps://repository.mercubuana.ac.id/84478/1/01_COVER - FEBRIYANTO WAHYU PRATAMA.pdf
 - [8] Choirullah, M. Y., Anif, M., & Rochadi, A. (2016). Analisis Kualitas Layanan Virtual Router Redundancy Protocol Menggunakan Mikrotik pada Jaringan VLAN, 5(4), 278–285.
 - [9] Musyaffa, N., & Sastra, R. (2019). Analisa Kinerja Kualitas Layanan (QoS) Virtual Router Redudancy Protocol (VRRP) Menggunakan Mikrotik Routerboard, V(1), 1–5.
 - [10] Fikri, M., & Rifqi, M. (2023). IMPLEMENTASI VPN ANTAR CABANG MENGGUNAKAN TEKNOLOGI SDWAN DENGAN METODE LOAD BALANCE (STUDI KASUS : PT . MITRA SOLUSI INFOKOM) IMPLEMENTATION OF INTER-BRANCH VPN USING SDWAN TECHNOLOGY WITH LOAD BALANCE METHOD (CASE STUDY : PT . MITRA SOLUSI INFOKOM), 10(1), 105–113. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2023105236>
 - [11] Palo Alto Networks. (2025). Prisma SD-WAN instant-on network (ION) device specifications. Palo Alto Networks. <https://www.paloaltonetworks.com/resources/datasheets/prisma-sd-wan-instant-on-network-ion-device-specifications>
 - [12] SPTel. (2025, Juli 15). Future development of IoT in Singapore – 2025 & beyond. SPTel. Diakses dari <https://www.sptel.com/resource-category/articles/>
 - [13] Aryaka. (2021, March 23). Fifth annual 2021 State of the WAN report: Network insights from 1,350 global enterprises. Aryaka. Retrieved from <https://www.aryaka.com/resources/state-of-wan-2021/>
 - [14] Silver Peak. (2020). Silver Peak EdgeConnect SD-WAN edge platform. LightRiver Companies. <https://lightriver.com/item/silver-peak-edge-connect-sd-wan-edge-platform/>
 - [15] Tahenni, A., & Merazka, F. (2023, October 23). SD-WAN over MPLS: A comprehensive performance analysis and security with insights into the future of SD-WAN
 - [16] Cisco Systems. (2023). Cisco Annual Internet Report (2018–2023) white paper (Doc. No. C11-741490-01). Cisco. Retrieved from <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>