

ANALISIS PERBANDINGAN VPN TUNNELING PADA MULTI-CLOUD UNTUK OPTIMALISASI PERFORMA DAN SKALABILITAS

Muhammad Jundy Rabbani¹, Reza Maulana²

Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer

Sekolah Tinggi Teknologi Terpadu Nurul Fikri

Jl. Setu Indah No.116, Tugu, Kec. Cimanggis, Kota Depok, Jawa Barat 16451

muha22233si@student.nurulfikri.ac.id¹, reza.maulana@nurulfikri.ac.id²

Abstrak

Infrastruktur *multi-cloud* semakin banyak digunakan dalam penyediaan layanan jaringan karena kemampuannya meningkatkan ketersediaan dan mengurangi ketergantungan pada satu penyedia. Namun, performa layanan *tunneling* VPN pada lingkungan *multi-cloud* dapat bervariasi secara signifikan antar penyedia akibat perbedaan karakteristik infrastruktur, lokasi pusat data, dan kapasitas jaringan. Penelitian ini bertujuan membandingkan performa SSH *Tunneling* dan Xray VMess Non-TLS pada lima penyedia *cloud* yang mencakup DigitalOcean, UCloud Global, Biznet GioCloud, PT Media Antar Nusa, dan CV Atha Media Prima. Metode yang digunakan adalah eksperimen komparatif dengan analisis deskriptif kuantitatif, mengukur empat metrik utama yaitu *latency*, *jitter*, *throughput* unduh, dan *throughput* unggah, dengan masing-masing skenario diulang sebanyak tiga kali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Xray VMess Non-TLS unggul pada dimensi *latency* dan *throughput* unggah, dengan Biznet GioCloud mencatatkan *latency* terendah sebesar 31,30 ms dan *jitter* paling stabil sebesar 7,00 ms, sedangkan PT Media Antar Nusa mencatatkan *throughput* unggah tertinggi sebesar 62,60 Mbps. Sebaliknya, SSH *Tunneling* menunjukkan keunggulan pada beberapa skenario *throughput* unduh, dengan PT Media Antar Nusa mencatatkan nilai tertinggi sebesar 45,20 Mbps. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan protokol dan penyedia *cloud* perlu disesuaikan dengan kebutuhan beban kerja spesifik, dan pendekatan *multi-cloud* memberikan fleksibilitas yang signifikan dalam optimalisasi performa *tunneling* VPN.

Kata Kunci: *multi-cloud, VPN tunneling, SSH tunneling, Xray VMess, performa jaringan*

Abstract

Multi-cloud infrastructure is increasingly being used in network service provisioning due to its ability to improve availability and reduce reliance on a single provider. However, the performance of VPN tunneling services in multi-cloud environments can vary significantly across providers due to differences in infrastructure characteristics, data centre locations, and network capacity. This study aims to compare the performance of SSH Tunneling and Xray VMess Non-TLS across five cloud providers, including DigitalOcean, UCloud Global, Biznet GioCloud, PT Media Antar Nusa, and CV Atha Media Prima. The method used was a comparative experiment with quantitative descriptive analysis, measuring four key metrics: latency, jitter, download throughput, and upload throughput, with each scenario repeated three times. The results show that Xray VMess Non-TLS outperforms in latency and upload throughput, with Biznet GioCloud recording the lowest latency at 31.30 ms and the most stable jitter at 7.00 ms, while PT Media Antar Nusa recorded the highest upload throughput at 62.60 Mbps. Conversely, SSH Tunneling demonstrated superiority in several download throughput scenarios, with PT Media Antar Nusa recording the highest value of 45.20 Mbps. These findings indicate that the selection of protocols and cloud providers should be tailored to the specific needs of the workload, and a multi-cloud approach offers significant flexibility in optimising VPN tunneling performance.

Keywords: *multi-cloud, VPN tunneling, SSH tunneling, Xray VMess, network performance*

PENDAHULUAN

Perkembangan *Cloud Computing* telah menjadikannya infrastruktur utama dalam penyediaan layanan jaringan karena kemampuannya menyediakan sumber daya komputasi secara *on-demand* dengan fleksibilitas dan *scalability* yang tinggi (Li et al., 2025; Narendra Kandregula, 2022). Dalam praktiknya, performa layanan jaringan dapat berbeda antar penyedia *cloud* akibat perbedaan karakteristik infrastruktur, seperti lokasi pusat data, kapasitas jaringan, *bandwidth*, dan teknologi virtualisasi (Amrullah et al., 2023; Islam et al., 2025). Perbedaan ini semakin krusial pada skenario

multi-cloud, karena keputusan pemilihan penyedia *cloud* berpotensi mempengaruhi kualitas layanan yang diterima pengguna secara langsung (Henning & Hasselbring, 2022; Narendra Kandregula, 2022).

Pendekatan *multi-cloud* digunakan untuk meningkatkan ketersediaan layanan dan mengurangi ketergantungan pada satu penyedia (Narendra Kandregula, 2022). Namun, penerapan *multi-cloud* juga meningkatkan kompleksitas karena performa jaringan antar penyedia dapat bervariasi, sehingga diperlukan evaluasi metrik performa dan strategi optimisasi yang tepat agar kualitas layanan tetap konsisten (Narendra Kandregula, 2022; Islam et al., 2025; Amrullah et al., 2023).

PENELITIAN RELEVAN

Beberapa penelitian telah mengkaji performa *tunneling* VPN dari berbagai sudut pandang, namun belum ada yang secara spesifik menempatkan perbedaan penyedia *cloud* sebagai variabel utama dalam skenario *multi-cloud* dengan konfigurasi pengujian yang diseragamkan. Kajian berikut memetakan posisi penelitian ini terhadap studi-studi terdahulu yang relevan.

Penelitian yang berfokus pada perbandingan protokol VPN telah banyak dilakukan. Budiyanto & Gunawan (2023) membandingkan beberapa protokol *tunneling* VPN pada layer 2 berdasarkan parameter *Quality of Service* (QoS) meliputi *delay*, *jitter*, *throughput*, dan *packet loss* menggunakan layanan VoIP sebagai beban uji, dengan hasil menunjukkan bahwa setiap protokol memiliki keunggulan pada parameter tertentu. Anyam et al (2025) melakukan perbandingan empiris antara WireGuard dan OpenVPN pada lingkungan *cloud* Azure dan VMware dengan mensimulasikan kondisi jaringan seperti *high latency* dan *packet loss*, menemukan bahwa performa protokol sangat bergantung pada konteks lingkungan pengujian. Antoniuk & Plechawska-Wójcik (2023) menganalisis protokol VPN dari aspek keamanan dan performa, dan menyimpulkan bahwa tidak ada protokol yang unggul secara universal di semua skenario. (Aker et al., 2022) mengevaluasi performa protokol *tunneling* VPN berdasarkan kebutuhan layanan aplikasi, menegaskan bahwa pemilihan protokol harus mempertimbangkan karakteristik beban kerja.

Penelitian lain mengkaji VPN dalam konteks infrastruktur *cloud* dan jaringan hibrida. Hermawan & Saputra (2025) membandingkan metode *tunneling cloud* VPN dan WireGuard VPN pada implementasi infrastruktur *hybrid cloud*, dengan parameter uji *latency* dan *throughput*, dan menemukan perbedaan performa yang signifikan antara kedua metode tersebut. Kjorveziroski et al (2024) mengevaluasi performa *full-mesh* VPN untuk skenario *edge-cloud continuum*, menunjukkan bahwa implementasi VPN berbasis *kernel* memberikan *throughput* yang lebih tinggi dibandingkan implementasi di *user-space*. Praveen (2025) mengevaluasi *jitter* pada *multi-hop* VPN dan menemukan bahwa penambahan *hop* pada jalur VPN secara signifikan mempengaruhi stabilitas koneksi. Gentile et al (2022) menganalisis performa VPN pada perangkat keras terbatas di lingkungan IoT, memperkuat temuan bahwa karakteristik infrastruktur berpengaruh langsung terhadap kualitas *tunneling*.

Di sisi evaluasi *multi-cloud*, Narendra Kandregula (2022) mengkaji metrik kinerja dan strategi optimasi pada lingkungan *multi-cloud*, menekankan bahwa heterogenitas infrastruktur antar penyedia menghasilkan perbedaan performa yang tidak dapat diabaikan. (Islam et al., 2025) membandingkan AWS, Microsoft Azure, dan GCP berdasarkan *latency*, *throughput*, IAM, dan *firewall*, menemukan bahwa ketiga penyedia memiliki karakteristik performa jaringan yang berbeda pada konfigurasi yang sama. Amrullah et al (2023) membandingkan kinerja *web server* pada Azure dan AWS menggunakan metode *benchmarking* dan menunjukkan bahwa hasil pengujian dapat berbeda secara signifikan tergantung skenario yang digunakan. Henning & Hasselbring (2022) mengusulkan metode *benchmarking* yang dapat dikonfigurasi untuk aplikasi *cloud-native*, memberikan kerangka metodologis yang mendukung perancangan pengujian lintas penyedia.

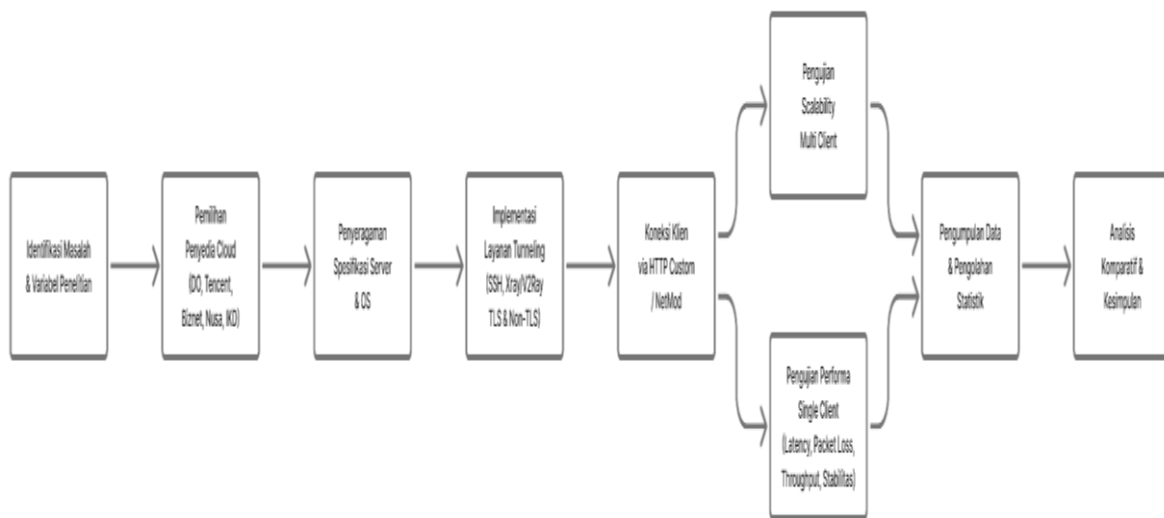
Berdasarkan kajian di atas, penelitian terdahulu umumnya membandingkan protokol VPN pada lingkungan tertentu, atau mengevaluasi performa *multi-cloud* secara umum tanpa menempatkan *tunneling* VPN sebagai workload uji lintas penyedia. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan melakukan pengujian *tunneling* VPN berbasis SSH Tunneling dan Xray VMess Non-TLS secara seragam pada lima penyedia *cloud*, yaitu DigitalOcean, UCloud Global, Biznet GioCloud, PT Media Antar Nusa, dan CV Atha Media Prima, untuk mengukur *latency*, *throughput*, *jitter*, dan stabilitas

koneksi secara komparatif (Narendra Kandregula, 2022; Kjorveziroski et al., 2024; Henning & Hasselbring, 2022).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen komparatif (*comparative experimental method*) untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan penyedia *cloud* terhadap performa layanan jaringan berbasis *tunneling* VPN. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengukuran yang adil dan terstruktur dengan menjaga konfigurasi pengujian tetap seragam pada seluruh penyedia, sehingga perbedaan hasil dapat dikaitkan langsung dengan karakteristik infrastruktur masing-masing penyedia *cloud* (Henning & Hasselbring, 2022).

Tahapan penelitian secara keseluruhan digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian perbandingan performa *tunneling* VPN pada skenario *multi-cloud*

Objek penelitian adalah lima penyedia *cloud* yang dipilih secara *purposive* berdasarkan ketersediaan layanan IaaS (*Infrastructure as a Service*) dengan dukungan VPS/*virtual machine* publik yang dapat dikonfigurasi secara bebas. Kelima penyedia tersebut adalah DigitalOcean (layanan Droplet, region Singapura SGP1), UCloud Global (layanan ULightHost, region Singapura Zone A), Biznet GioCloud (layanan NEO Lite, region Jawa Barat), PT Media Antar Nusa (layanan Cloud VPS, region Medan), dan CV Atha Media Prima (layanan VPS, region Jakarta). Untuk memastikan perbandingan yang adil, spesifikasi server diseragamkan semaksimal mungkin pada seluruh penyedia, yaitu 1 vCPU, 1 GB RAM, penyimpanan 25 GB SSD, sistem operasi Debian 11 x64, dan koneksi jaringan dengan IP publik (*Public IPv4*).

Rincian spesifikasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Server pada Lima Penyedia *Cloud*

No	Atribut	DigitalOcean	UCloud Global	Biznet GioCloud	PT Media Antar Nusa	CV Atha Media Prima
1	Layanan	Droplet	ULightHost	NEO Lite	Cloud VPS	VPS
2	Lokasi	SGP1	Singapore Zone A	West Java	Medan	Jakarta
3	vCPU	1	1	1	1	1
4	RAM	1 GB	1 GB	1 GB	1 GB	1 GB
5	Storage	25 GB SSD	25 GB SSD	20 GB SSD	60 GB SSD	25 GB SSD
6	OS	Debian 11 x64	Debian 11 x64	Debian 11 x64	Debian 11 x64	Debian 11 x64
7	Jaringan	Public IPv4	Public IPv4	Public IPv4	Public IPv4	Public IPv4

Layanan *tunneling* yang diimplementasikan pada masing-masing server terdiri dari dua jenis, yaitu *Secure Shell* (SSH) *tunneling* dan Xray VMess dengan mode koneksi Non-TLS. Kedua konfigurasi ini diimplementasikan dengan pengaturan yang identik pada seluruh penyedia *cloud* untuk memastikan konsistensi pengujian. Koneksi klien ke server dilakukan menggunakan aplikasi HTTP Custom dan NetMod yang dikonfigurasi dengan parameter akun *tunneling* yang sama (Aker et al., 2022; Hermawan & Saputra, 2025).

Pengujian performa dilakukan dalam dua skenario. Pertama, pengujian performa dasar (*single client*) untuk mengukur *latency* dan *jitterthroughput* menggunakan aplikasi Speedtest dengan beberapa kali pengulangan pada setiap penyedia. Selama pengujian, kejadian putus-sambung (*disconnect*) dan fluktuasi hasil dicatat sebagai indikator stabilitas koneksi. Pengulangan pengukuran sebanyak tiga kali dilakukan untuk mereduksi bias sesaat dan meningkatkan keandalan hasil (Praveen, 2025).

Data yang dikumpulkan meliputi nilai *latency* (rata-rata dalam satuan ms), *jitter* (ms), *throughput* unduh dan unggah (Mbps), serta indikator stabilitas berupa variasi hasil dan kejadian *disconnect* selama pengujian. Pengolahan data dilakukan melalui perhitungan statistik deskriptif (rata-rata), tabulasi perbandingan antar penyedia, serta analisis komparatif untuk menjawab seluruh rumusan masalah berdasarkan setiap parameter yang diukur (Henning & Hasselbring, 2022; Kjorveziroski et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian performa *tunneling* VPN dilakukan terhadap dua protokol, yaitu SSH *Tunneling* dan Xray VMess Non-TLS, pada lima penyedia *cloud* yang mencakup dua lokasi di Singapura dan tiga lokasi di Indonesia. Seluruh pengujian dilaksanakan menggunakan perangkat Android dengan koneksi jaringan seluler 4G+ yang konsisten, serta memanfaatkan *custom speedtest server* milik peneliti untuk memastikan konsistensi *endpoint* pengujian pada seluruh skenario. Metrik yang diukur meliputi *latency*, *jitter*, *throughput* unduh, dan *throughput* unggah, dengan masing-masing skenario diulang sebanyak tiga kali untuk mendapatkan nilai rata-rata yang representatif.

Tabel 2. Hasil Pengujian SSH Tunneling

Penyedia Cloud	Latency Rata-rata (ms)	Throughput Unduh (Mbps)	Throughput Unggah (Mbps)	Jitter (ms)
DigitalOcean (SGP)	150,70	37,20	9,20	94,00
UCloud Global (SGP)	47,30	13,40	12,10	21,70
Biznet GioCloud (WJV)	61,30	39,30	11,10	32,30
PT Media Antar Nusa (MDN)	116,00	45,20	10,80	34,30
CV Atha Media Prima (JKT)	103,00	25,40	13,00	32,00

Hasil pengujian SSH *Tunneling* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2 menunjukkan variasi performa yang signifikan antar penyedia *cloud*. UCloud Global mencatatkan latency terendah sebesar 47,30 ms, diikuti Biznet GioCloud sebesar 61,30 ms. Sementara itu, DigitalOcean mencatatkan latency tertinggi sebesar 150,70 ms meskipun memiliki nilai *throughput* unduh yang kompetitif di angka 37,20 Mbps. Pada dimensi *throughput* unduh, PT Media Antar Nusa mencatatkan nilai tertinggi sebesar 45,20 Mbps, diikuti Biznet GioCloud sebesar 39,30 Mbps. Namun demikian, dari sisi *throughput* unggah, seluruh penyedia menunjukkan rentang yang relatif sempit antara 9,20 Mbps hingga 13,00 Mbps, dengan CV Atha Media Prima mencatatkan nilai tertinggi sebesar 13,00 Mbps. Kondisi ini mengindikasikan bahwa protokol SSH *Tunneling* memiliki karakteristik asimetris antara kapasitas unduh dan unggah, yang selaras dengan temuan (Hermawan & Saputra, 2025) bahwa mekanisme enkripsi SSH memberikan overhead lebih besar pada jalur unggah dibandingkan unduh.

Tabel 3. Hasil Pengujian Xray Vmess Tunneling

Penyedia Cloud	Latency Rata-rata (ms)	Throughput Unduh (Mbps)	Throughput Unggah (Mbps)	Jitter (ms)
DigitalOcean (SGP)	46,00	28,00	49,40	17,00
UCloud Global (SGP)	45,00	15,60	26,30	14,00
Biznet GioCloud (WJV)	31,30	46,40	21,50	7,00
PT Media Antar Nusa (MDN)	78,70	35,60	62,60	8,70
CV Atha Media Prima (JKT)	109,30	30,80	20,00	42,30

Berbeda dengan SSH *Tunneling*, hasil pengujian Xray VMess Non-TLS pada Tabel 3 memperlihatkan pola performa yang lebih menonjol pada dimensi *throughput* unggah. PT Media Antar Nusa mencatatkan *throughput* unggah tertinggi sebesar 62,60 Mbps, jauh melampaui nilai yang dicapai protokol SSH pada penyedia yang sama sebesar 10,80 Mbps. DigitalOcean juga mencatatkan *throughput* unggah yang tinggi pada VMess sebesar 49,40 Mbps. Pada dimensi latency, Biznet GioCloud mencatatkan nilai terendah sebesar 31,30 ms dengan *jitter* paling stabil di angka 7,00 ms, menunjukkan konsistensi koneksi yang unggul dibandingkan penyedia lainnya. Keunggulan Xray VMess pada *throughput* unggah ini sejalan dengan karakteristik protokol berbasis WebSocket yang dirancang untuk mengoptimalkan transmisi data dua arah secara efisien (Li et al., 2025).

Perbandingan langsung antara kedua protokol pada masing-masing penyedia *cloud* mengungkapkan pola yang konsisten. Secara umum, Xray VMess Non-TLS unggul pada dimensi latency dan

throughput unggah di hampir seluruh penyedia, sementara SSH *Tunneling* menunjukkan keunggulan pada beberapa skenario *throughput* unduh. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui perbedaan arsitektur protokol, di mana SSH *Tunneling* menggunakan enkripsi simetris berbasis AES-256 yang lebih intensif secara komputasi, sedangkan VMess memanfaatkan mekanisme multiplexing berbasis WebSocket yang lebih ringan dalam pengelolaan sesi koneksi (Sheffer et al., 2022). Temuan ini memperkuat argumen (Heryanto et al., 2025) bahwa pemilihan protokol *tunneling* perlu disesuaikan dengan karakteristik beban kerja, di mana VMess lebih cocok untuk skenario yang mengutamakan responsivitas dan kapasitas unggah, sedangkan SSH lebih stabil untuk skenario unduh bervolume tinggi.

Dari perspektif perbandingan antar penyedia *cloud*, hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi dan infrastruktur penyedia berpengaruh signifikan terhadap performa *tunneling*. Penyedia berbasis Singapura, yaitu DigitalOcean dan UCloud Global, menunjukkan karakteristik latency yang berbeda meskipun berada di region yang sama, dengan UCloud Global mencatatkan latency SSH sebesar 47,30 ms sedangkan DigitalOcean mencatatkan 150,70 ms.

Perbedaan ini mengindikasikan pengaruh arsitektur jaringan internal dan kapasitas peering masing-masing penyedia, sebagaimana dikemukakan oleh Islam et al (2025) bahwa perbedaan konfigurasi jaringan antar penyedia *cloud* dapat menghasilkan variasi performa yang signifikan meskipun berada di wilayah geografis yang sama. Di sisi lain, penyedia berbasis Indonesia, yaitu Biznet GioCloud, PT Media Antar Nusa, dan CV Atha Media Prima, menunjukkan latency yang lebih tinggi pada protokol SSH namun memberikan *throughput* unduh yang kompetitif. Fenomena ini relevan dengan temuan (Narendra Kandregula, 2022) bahwa strategi *multi-cloud* perlu mempertimbangkan trade-off antara latency dan kapasitas *throughput* berdasarkan kebutuhan spesifik pengguna.

Nilai *jitter* yang diperoleh juga menjadi indikator penting dalam menilai stabilitas koneksi *tunneling*. Biznet GioCloud mencatatkan *jitter* terendah pada VMess sebesar 7,00 ms, yang mengindikasikan koneksi paling stabil di antara seluruh penyedia yang diuji. Sebaliknya, CV Atha Media Prima mencatatkan *jitter* VMess tertinggi sebesar 42,30 ms dengan variasi antar ulangan yang cukup besar, menunjukkan karakteristik koneksi yang kurang konsisten. Tingginya nilai *jitter* pada beberapa penyedia mengindikasikan adanya variasi beban jaringan pada infrastruktur penyedia tersebut, yang berpotensi mempengaruhi kualitas layanan pada aplikasi *real-time* seperti *video conference* dan VoIP (Antoniuk & Plechawska-Wójcik, 2023).

Secara keseluruhan, tidak ada satu penyedia maupun protokol yang unggul secara absolut di seluruh dimensi pengujian, melainkan setiap kombinasi penyedia dan protokol memiliki keunggulan komparatif pada metrik tertentu. Temuan ini konsisten dengan perspektif (Kjorveziroski et al., 2024) bahwa evaluasi performa *multi-cloud* harus bersifat multidimensional dan mempertimbangkan konteks penggunaan secara spesifik. Untuk kasus penggunaan yang mengutamakan latency rendah dan stabilitas, Biznet GioCloud dengan protokol VMess menjadi pilihan yang paling optimal berdasarkan data pengujian ini, sementara untuk kebutuhan *throughput* unduh yang tinggi, PT Media Antar Nusa dengan protokol SSH menunjukkan performa terbaik.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil membandingkan performa *tunneling* VPN berbasis SSH *Tunneling* dan Xray VMess Non-TLS pada infrastruktur *multi-cloud* yang mencakup lima penyedia, yaitu DigitalOcean, UCloud Global, Biznet GioCloud, PT Media Antar Nusa, dan CV Atha Media Prima. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak ada satu protokol maupun penyedia *cloud* yang secara konsisten unggul di seluruh dimensi performa, melainkan setiap kombinasi memiliki keunggulan komparatif pada metrik tertentu sesuai dengan karakteristik infrastruktur masing-masing penyedia.

Pada protokol SSH *Tunneling*, PT Media Antar Nusa mencatatkan *throughput* unduh tertinggi sebesar 45,20 Mbps, sementara UCloud Global unggul pada dimensi latency dengan nilai terendah sebesar 47,30 ms. Secara keseluruhan, protokol SSH *Tunneling* menunjukkan karakteristik asimetris di mana kapasitas unduh jauh lebih tinggi dibandingkan unggah, dengan rentang *throughput* unggah yang sempit di antara 9,20 Mbps hingga 13,00 Mbps pada seluruh penyedia.

Pada protokol Xray VMess Non-TLS, Biznet GioCloud mencatatkan performa terbaik secara keseluruhan dengan latency terendah sebesar 31,30 ms dan *jitter* paling stabil sebesar 7,00 ms. PT Media Antar Nusa mencatatkan *throughput* unggah tertinggi sebesar 62,60 Mbps pada protokol VMess, menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan protokol SSH pada penyedia yang sama. Secara umum, Xray VMess Non-TLS unggul pada dimensi latency dan *throughput* unggah di hampir seluruh penyedia, yang disebabkan oleh mekanisme multiplexing berbasis WebSocket yang lebih efisien dibandingkan enkripsi AES-256 pada SSH.

Berdasarkan temuan tersebut, pemilihan protokol dan penyedia *cloud* sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan spesifik pengguna. Untuk skenario yang mengutamakan latency rendah dan stabilitas koneksi, kombinasi Biznet GioCloud dengan protokol Xray VMess Non-TLS merupakan pilihan yang paling optimal. Sementara itu, untuk kebutuhan *throughput* unduh yang tinggi, PT Media Antar Nusa dengan protokol SSH *Tunneling* menunjukkan performa terbaik. Pendekatan *multi-cloud* terbukti memberikan fleksibilitas dalam optimalisasi performa *tunneling* VPN sesuai dengan kebutuhan beban kerja yang beragam.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan untuk penelitian lanjutan. Pertama, pengujian dilakukan pada kondisi jaringan seluler 4G+ yang dapat bervariasi sesuai kondisi sinyal dan beban jaringan operator. Kedua, spesifikasi server antar penyedia tidak sepenuhnya seragam, khususnya pada kapasitas penyimpanan yang berbeda akibat keterbatasan paket yang tersedia. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan pengujian pada jaringan *fixed broadband* yang lebih stabil, memperluas cakupan protokol *tunneling* dengan menambahkan skenario TLS, serta mempertimbangkan pengujian skalabilitas dengan jumlah klien yang lebih bervariasi untuk mendapatkan gambaran performa yang lebih komprehensif pada skenario *multi-client*.

DAFTAR PUSTAKA

- Akter, H., Jahan, S., Saha, S., Faisal, R. H., & Islam, S. (2022). Evaluating Performances of VPN Tunneling Protocols Based on Application Service Requirements. In M. S. Kaiser, K. Ray, A. Bandyopadhyay, K. Jacob, & K. S. Long (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Trends in Computational and Cognitive Engineering* (Vol. 348, pp. 433–444). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7597-3_36
- Amrullah, A., Nugroho, A., & Ramadhan, Z. (2023). Perbandingan Kinerja Web Server Pada Penyedia Layanan Cloud Microsoft Azure Dan Amazon Web Services. *Jurnal Informatika Teknologi Dan Sains*, 5(1), 92–97. <https://doi.org/10.51401/jinteks.v5i1.2487>
- Antoniuk, J., & Plechawska-Wójcik, M. (2023). Comparative analysis of VPN protocols. *Journal of Computer Sciences Institute*, 27, 138–144. <https://doi.org/10.35784/jcsi.3315>
- Anyam, J., Singh, R. R., Larijani, H., & Philip, A. (2025). Empirical Performance Analysis of WireGuard vs. OpenVPN in Cloud and Virtualised Environments Under Simulated Network Conditions. *Computers*, 14(8), 326. <https://doi.org/10.3390/computers14080326>
- Budiyanto, S., & Gunawan, D. (2023). Comparative Analysis of VPN Protocols at Layer 2 Focusing on Voice Over Internet Protocol. *IEEE Access*, 11, 60853–60865. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3286032>
- Gentile, A. F., Macri, D., De Rango, F., Tropea, M., & Greco, E. (2022). A VPN Performances Analysis of Constrained Hardware Open Source Infrastructure Deploy in IoT Environment. *Future Internet*, 14(9), 264. <https://doi.org/10.3390/fi14090264>
- Henning, S., & Hasselbring, W. (2022). A configurable method for benchmarking scalability of cloud-native applications. *Empirical Software Engineering*, 27(6), 143. <https://doi.org/10.1007/s10664-022-10162-1>
- Hermawan, R., & Saputra, Y. M. (2025). Analisis Perbandingan Penggunaan Metode Tunneling Cloud Virtual Private Network dan Wireguard Virtual Private Network pada Implementasi Infrastruktur Hybrid Cloud. *Journal of Internet and Software Engineering*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.22146/jise.v6i1.14450>
- Heryanto, A., Setiawan, D., Audrey, B. F., Hermansyah, A., Afifah, N., Azhar, I. S. B., Idris, M. Y. B., & Budiarto, R. (2025). Security and Performance Evaluation of PPTP-Based VPN with AES Encryption in Enterprise Network Environments. *Jurnal Teknik Informatika (Jutif)*, 6(4), 2171–2186. <https://doi.org/10.52436/1.jutif.2025.6.4.4818>

- Islam, I., Setiawan, A., Jaenul, A., Mulyono, S., Hertin, R., Wibowo, A., Nisa, K., & Wibisono, S. (2025). Analisis AWS, Microsoft Azure, dan GCP terhadap Latency, Throughput, IAM, dan Firewall. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Teknologi*, 6(2), 93–97. <https://doi.org/10.35960/ikomti.v6i2.1795>
- Kjorveziroski, V., Bernad, C., Gilly, K., & Filiposka, S. (2024). Full-mesh VPN performance evaluation for a secure edge-cloud continuum. *Software: Practice and Experience*, 54(8), 1543–1564. <https://doi.org/10.1002/spe.3329>
- Li, J., Feng, B., & Zheng, H. (2025). A survey on VPN: Taxonomy, roles, trends and future directions. *Computer Networks*, 257, 110964. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110964>
- Narendra Kandregula. (2022). Evaluating performance and scalability of multi-cloud environments: Key metrics and optimization strategies. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 15(1), 842–857. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.15.1.0560>
- Praveen, K. N. R. (2025). Evaluation of Internet Jitter in Multi-Hop Virtual Private Networks. *Journal of Internet Services and Information Security*, 15(4), 604–617. <https://doi.org/10.58346/JISIS.2025.I4.044>
- Sheffer, Y., Saint-Andre, P., & Fossati, T. (2022). *Recommendations for Secure Use of Transport Layer Security (TLS) and Datagram Transport Layer Security (DTLS)* (No. RFC9325; p. RFC9325). RFC Editor. <https://doi.org/10.17487/RFC9325>.