

# *Campus Emergency Network Reliability Using LEO Satellite Backup Link*

Evaluasi Keandalan Jaringan Darurat Kampus  
menggunakan Satelit LEO sebagai Tautan Cadangan

Michael Samuel Kader, Sumenge Tangkawarouw Godion Kaunang  
Master of Informatics Study Program, Postgraduate Program, Sam Ratulangi University Manado,  
Kampus Bahu St., 95115, Indonesia

e-mail: [michaelsemuel@unsrat.ac.id](mailto:michaelsemuel@unsrat.ac.id), [odikaunang@unsrat.ac.id](mailto:odikaunang@unsrat.ac.id)

Received: 19 January 2026; revised: 27 January 2026; accepted: 25 June 2026

**Abstract** — This paper evaluates Low Earth Orbit (LEO) satellite connectivity as an emergency backup to keep campus inter-site services available when fiber links fail. Using the UNSRAT-UB link as a case study, baseline fiber performance is compared with failover conditions that route traffic over LEO, including self-managed tunneling (SSTP and L2TP) and a provider-managed service. QoS was measured with ICMP ping for 3600 s at 1 Hz to obtain RTT, jitter, and packet loss, and throughput was measured with iPerf3 for 1800 s in bidirectional multi-stream mode. Robust statistics (p50/p90/p99 and median+IQR) plus CDF/boxplot visualizations were used to capture distribution shifts and tail behavior. Fiber shows stable service (RTT p50 31-35 ms, loss <1%, throughput p50 84-94 Mbps). Under failover, LEO preserves connectivity but increases latency and variability. In the self-managed case, SSTP exhibits extreme tail latency and potential throughput collapse, while L2TP yields more usable tail latency (RTT p99 median 192-209 ms) with much higher downlink throughput. Provider-managed LEO offers moderate latency but limited throughput (about 6-7 Mbps).

**Key words**— campus network; emergency network; failover; IQR; LEO satellite; p99; QoS; throughput.

**Abstrak** — Penelitian ini mengevaluasi satelit Low Earth Orbit (LEO) sebagai jalur cadangan/darurat untuk meningkatkan ketahanan jaringan kampus saat jalur terestrial mengalami gangguan. Studi kasus dilakukan pada interkoneksi antar-site Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT) dan Universitas Brawijaya (UB) dengan membandingkan performa baseline fiber optik (FO) terhadap kondisi failover ketika trafik dipaksa melewati LEO. Pengukuran dilakukan menggunakan ICMP ping (3600 detik, 1 Hz) untuk memperoleh RTT, jitter, dan packet loss, serta iPerf3 (1800 detik) mode bidirectional multi-stream untuk mengukur throughput uplink/downlink. Analisis menggunakan statistik robust: kuantil p50/p90/p99 untuk metrik QoS dan p50+IQR untuk throughput, disertai visualisasi CDF dan boxplot untuk menangkap pergeseran distribusi dan perilaku ekor (tail). Hasil menunjukkan FO memberikan baseline stabil (RTT p50  $\approx$  31–35 ms; loss < 1%; throughput p50  $\approx$  84–94 Mbps). Pada kondisi failover, LEO mampu mempertahankan konektivitas namun latensi dan variabilitas meningkat. Pada skenario self-managed (S-2), SSTP menimbulkan tail latency yang sangat ekstrem dan throughput dapat turun sangat rendah pada beberapa sesi, sedangkan L2TP menghasilkan tail yang lebih “usable” (RTT p99 median  $\approx$  192–209 ms) dengan throughput downlink jauh lebih tinggi. Pada skenario provider-managed (S-3), latensi LEO moderat namun throughput terbatas sekitar 6–7 Mbps.

**Kata kunci** — failover; IQR; jaringan darurat; jaringan kampus; p99; QoS; satelit LEO; throughput.

## I. PENDAHULUAN

Konektivitas jaringan kampus merupakan infrastruktur esensial untuk layanan akademik, riset, dan administrasi. Ketergantungan pada jalur terestrial seperti fiber optik (FO) membuat layanan rentan terhadap gangguan fisik maupun operasional, sehingga dibutuhkan jalur cadangan untuk menjaga ketersediaan layanan.

Satelit Low Earth Orbit (LEO) menawarkan jalur darurat yang relatif cepat diaktifkan. Namun demikian, LEO memiliki trade-off berupa latensi, jitter, packet loss, serta variabilitas throughput yang dapat memengaruhi kualitas layanan. Artikel ini mengevaluasi kelayakan LEO sebagai jalur cadangan jaringan kampus dengan studi kasus interkoneksi Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT) – Universitas Brawijaya (UB) dan membandingkan baseline FO dengan kondisi failover ke LEO [4].

Berbagai studi pengukuran telah mengevaluasi performa jaringan LEO (misalnya Starlink) dari sisi latensi, packet loss, dan throughput pada akses end-to-end serta karakteristik jaringan di sekitar edge router, yang menunjukkan bahwa LEO dapat memberikan latensi yang kompetitif namun dengan variabilitas yang perlu diperhitungkan [4]. Di sisi lain, kajian resiliensi/failover jaringan menempatkan LEO sebagai jalur alternatif untuk menjaga kontinuitas layanan ketika jalur utama terganggu, sekaligus menyoroti keterbatasan kapasitas pada kondisi tertentu [15]. Namun, evaluasi eksperimental untuk interkoneksi antar-site institusi (kampus) yang membandingkan pendekatan implementasi self-managed tunneling versus provider-managed, serta analisis berbasis tail latency (p99), masih terbatas. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengevaluasi skema failover FO–LEO pada interkoneksi UNSRAT–UB melalui pengukuran QoS dan throughput serta analisis statistik robust untuk menilai kelayakan LEO dalam menjaga layanan kritikal saat darurat.

### *A. Konteks IdREN dan dasar teori metrik kinerja*

Penelitian ini berada pada konteks Indonesia Research and Education Network (IdREN), yaitu backbone akademik

nasional yang menghubungkan perguruan tinggi/lembaga riset dan menyediakan jalur kolaborasi riset, akses sumber daya komputasi, serta pertukaran data pendidikan. IdREN juga terintegrasi dengan jejaring riset internasional (mis. TEIN, APAN, dan GEANT) sehingga gangguan pada konektivitas kampus tidak hanya berdampak pada akses internet umum, tetapi juga pada layanan REN/riset global. Karena sebagian besar transport masih bertumpu pada serat optik, resiliensi IdREN tetap rentan terhadap gangguan fisik pada jalur backbone; integrasi jalur satelit LEO dapat menjadi opsi penguat resiliensi ketika jalur utama terganggu [16], [15].

Pada studi kasus ini, Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT) dan Universitas Brawijaya (UB) terhubung melalui link metro fiber IdREN berkapasitas 100 Mbps sebagai baseline pengujian. UB diperlakukan sebagai titik gateway layanan IdREN, sehingga lintasan UNSRAT-UB merepresentasikan akses kampus ke ekosistem IdREN dalam kondisi normal maupun saat failover.

Evaluasi kinerja jalur dilakukan menggunakan indikator QoS yang umum dipakai pada studi jaringan: latensi (RTT), throughput, jitter/packet delay variation, dan packet loss. Untuk menangkap perilaku ekor (tail/worst-case) yang lebih relevan bagi aplikasi real-time, analisis menggunakan kuantil p50/p90/p99 serta ukuran sebaran berbasis boxplot (IQR) [8]. Definisi delay variation (jitter/PDV) dan loss mengacu pada IP Performance Metrics (IPPM) [17], [18], sedangkan metodologi pengujian throughput mengikuti prinsip pengujian TCP throughput dan implementasi iPerf3 [19], [2].

## II. METODE

### A. Lingkungan uji dan konektivitas IdREN (UNSRAT-UB)

Lingkungan uji terdiri dari dua site kampus: UNSRAT (Manado) sebagai sumber pengukuran dan UB (Malang) sebagai tujuan/rujukan layanan IdREN. Host pengukuran dijalankan pada VM Host (client) di sisi UNSRAT/UB, sedangkan host tujuan berada pada layanan cloud UB (cloud.ub.ac.id) atau server kampus yang terhubung ke gateway IdREN di UB. Dua jalur yang dibandingkan adalah (1) jalur terestrial melalui metro fiber IdREN (baseline) dan (2) jalur satelit LEO Starlink sebagai jalur cadangan melalui mekanisme tunnel/failover sesuai skenario.

Failover disimulasikan secara terkendali melalui pemutusan jalur utama (cut-off fiber atau shutdown sesi routing sesuai kontrol yang tersedia) dan diverifikasi menggunakan traceroute sebelum dan sesudah perpindahan jalur. Verifikasi ini diperlukan untuk memastikan bahwa dataset ICMP dan iPerf3 merepresentasikan kondisi jalur yang sama pada tiap sesi (terestrial aktif vs LEO aktif) [6].

### B. Desain eksperimen dan skenario

Pengujian dilakukan pada dua kelompok skenario: (i) S-2 (self-managed) yang membandingkan FO (baseline) terhadap failover LEO menggunakan tunneling (SSTP/L2TP), dan (ii) S-3 (provider-managed) yang membandingkan FO terhadap layanan LEO yang dikelola penyedia. Ringkasan parameter pengujian ditunjukkan pada Tabel I [7], [1].

TABEL I  
PARAMETER DAN DESAIN EKSPERIMEN (DURASI, TOOL, KONFIGURASI IPERF3, KONDISI FO VS LEO, DAN ARAH UJI).

Parameter	Nilai
Media/jalur	FO (IdREN/metro fiber 100 Mbps) vs LEO Starlink (failover)
Skenario	S-2: LEO-SSTP & LEO-L2TP; S-3: provider-managed
ICMP ping	interval 1 s; durasi 3600 s; output JSON (timestamp, latency_ms)
Throughput	iPerf3 1800 s; --bidir; -P 4; output JSON (berkas bertimestamp)
Validasi jalur	traceroute sebelum & sesudah failover
Ringkasan statistik	RTT/jitter/loss: p50/p90/p99; throughput: p50 + IQR; CDF & boxplot

### C. Pengambilan data

QoS diukur menggunakan ICMP ping selama 3600 s pada interval 1 s ( $\approx 1$  Hz). Throughput diukur menggunakan iPerf3 selama 1800 s (di dalam rentang pengukuran ICMP) dengan mode bidirectional dan parallel stream (mis. -P 4) untuk memperoleh uplink dan downlink dalam satu sesi. Pengambilan data diotomasi menggunakan skrip shell; hasil ping diekspor sebagai JSON yang memuat timestamp (Unix epoch) dan latency\_ms, sedangkan hasil iPerf3 disimpan sebagai log JSON dengan penamaan berkas bertimestamp untuk keterlacakan sesi.

### D. Validasi jalur

Sebelum pengukuran, lintasan diverifikasi menggunakan traceroute untuk memastikan baseline berada pada FO dan saat failover benar-benar melewati LEO (lihat Gambar 2). [6]

### E. Teknik analisis

Analisis menggunakan statistik robust: p50/p90/p99 untuk RTT, jitter, dan loss; serta p50+IQR untuk throughput UL/DL. Nilai p99 digunakan untuk mengevaluasi tail latency sebagai risiko performa terburuk. Distribusi RTT dibandingkan menggunakan CDF (lihat Gambar 3), Ringkasan variabilitas RTT dan jitter disajikan dengan boxplot untuk S-2 dan S-3 (lihat Gambar 4 dan Gambar 5), sedangkan ringkasan throughput ditampilkan pada Gambar 6. [8]

Secara operasional, packet loss dihitung dari rasio paket hilang terhadap paket terkirim pada satu sesi pengukuran ( $\text{Loss}\% = (1 - N_{\text{rcv}}/N_{\text{exp}}) \times 100\%$ ). Jitter/PDV dihitung dari variasi antar-sampel (mis.  $|RTT_i - RTT_{i-1}|$ ) dan diringkas menggunakan median/kuantil untuk melihat stabilitas. Untuk throughput iPerf3, laporan interval digunakan sebagai deret waktu; nilai ringkasan (mis. median dan p10/p90) membantu membedakan kondisi stabil vs fluktuatif selama sesi, terutama saat terjadi perubahan rute/failover [17]–[19].

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Traceroute mengonfirmasi perubahan lintasan dari FO ke LEO pada kondisi failover sehingga perbandingan metrik dapat dilakukan secara valid (lihat Gambar 2). Pada baseline FO, performa stabil (RTT p50  $\approx 31$ – $35$  ms; loss  $< 1\%$ ; throughput p50  $\approx 84$ – $94$  Mbps). Pada kondisi failover, LEO mempertahankan konektivitas namun latensi dan variabilitas meningkat, bergantung pada pendekatan implementasi (lihat Tabel II).

### A. Validasi jalur dan kontrol eksperimen (Gambar 2)

Gambar 1 merangkum topologi pengujian dan posisi komponen failover FO-LEO pada dua site (UNSRAT dan UB), termasuk peran endpoint VPN dan arah trafik uji. Penyajian topologi ini penting untuk menunjukkan bahwa pengukuran bersifat end-to-end antar-site (bukan hanya akses last-mile), sehingga hasil pada Tabel II merepresentasikan performa jalur darurat untuk interkoneksi institusi.

Validasi lintasan menggunakan traceroute (Gambar 2) menjadi kontrol penting agar perbandingan kinerja benar-benar merefleksikan perubahan jalur (FO vs LEO), bukan dipengaruhi perubahan rute dinamis di sisi terestrial. Pada kondisi baseline, lintasan mengikuti jalur FO/REN, sedangkan pada kondisi failover lintasan berubah dan konsisten melewati gateway/jalur LEO. Dengan kontrol ini, perbedaan metrik RTT, jitter, loss, dan throughput pada Tabel II dapat diatribusikan pada karakteristik media dan mekanisme enkapsulasi di jalur LEO.

### B. Kinerja baseline FO: stabilitas latensi dan headroom kapasitas (Tabel II)

Pada baseline FO, kedua site menunjukkan latensi median yang rendah dan stabil (RTT p50 sekitar 31-35 ms), dengan tail latency yang relatif terkendali (RTT p99 median sekitar 180-190 ms) serta loss median <1% (Tabel II). Konsistensi ini juga terlihat dari variabilitas throughput downlink yang kecil pada UNSRAT (DL IQR ~0,35-0,37 Mbps), yang mengindikasikan link FO memiliki kapasitas dan antrian yang lebih stabil. Secara praktis, baseline FO menyediakan headroom yang cukup untuk trafik campuran (aplikasi interaktif dan bulk), sehingga cocok sebagai jalur utama.

### C. Dampak failover ke LEO: pergeseran distribusi RTT dan risiko tail (Gambar 3)

Peralihan ke jalur LEO menaikkan RTT median (p50) menjadi kisaran ~86-170 ms pada S-2 dan ~95-101 ms pada S-3 (Tabel II). Namun, yang paling kritis adalah perilaku ekor distribusi (tail latency) yang ditunjukkan oleh p99 dan bentuk CDF RTT pada Gambar 3. Pada beberapa konfigurasi, CDF memperlihatkan ekor yang jauh lebih panjang dibanding FO, yang berarti terdapat persentase kecil paket dengan RTT sangat tinggi (stall). Dalam konteks layanan kampus, kondisi tail ini dapat lebih mengganggu dibanding kenaikan median, karena sesi interaktif cenderung sensitif terhadap lonjakan latensi sesaat (spike) dan bukan hanya rata-rata.

Untuk merangkum perbedaan performa tipikal dan variabilitas antar kondisi, distribusi RTT dan jitter juga disajikan dalam bentuk boxplot untuk S-2 (Gambar 4) dan S-3 (Gambar 5). Visualisasi ini menonjolkan median dan rentang kuartil (IQR) serta outlier, sehingga efek spike/tail pada jalur LEO dapat dilihat secara lebih ringkas dibandingkan hanya nilai rata-rata. [8]

### D. S-2 self-managed: SSTP vs L2TP dan implikasinya (Tabel II, Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 6)

Pada S-2, perbedaan performa antara LEO-SSTP dan LEO-L2TP sangat menonjol. Di UNSRAT, RTT p99 median pada LEO-SSTP mencapai 5373,1 ms (maksimum 15214,5 ms),

sedangkan LEO-L2TP hanya 208,6 ms (Tabel II). Di UB, p99 median LEO-SSTP 2535,1 ms turun menjadi 192,0 ms pada LEO-L2TP. Artinya, L2TP menekan tail latency sekitar orde 13x-26x dibanding SSTP pada data lapangan ini. Selain itu, loss median pada LEO-SSTP meningkat (6,37-9,16%) dibanding LEO-L2TP (1,76-2,48%) sehingga reliabilitas paket lebih baik pada L2TP (Tabel II).

Perbedaan stabilitas pada S-2 juga terlihat jelas pada boxplot (Gambar 4). Konfigurasi SSTP menunjukkan sebaran (IQR) dan outlier RTT/jitter yang jauh lebih lebar, sedangkan L2TP cenderung menghasilkan sebaran yang lebih terkendali pada data pengukuran ini.

Dari sisi kapasitas, Gambar 6 (berbasis p50+IQR) menegaskan perbedaan utilisasi yang signifikan. Pada UNSRAT, DL p50 LEO-L2TP (58,02 Mbps) jauh lebih tinggi dibanding LEO-SSTP (8,45 Mbps), dan pada UB DL p50 LEO-L2TP (69,94 Mbps) kontras dengan LEO-SSTP yang mendekati nol (0,44 Mbps) (Tabel II). Namun demikian, variabilitas DL pada LEO-L2TP juga besar (IQR 25,96-34,02 Mbps), menunjukkan kapasitas LEO yang fluktuatif antar interval. Pola ini konsisten dengan karakteristik akses LEO yang dipengaruhi kondisi radio/konstelasi, manajemen antrian, dan kebijakan alokasi sumber daya.

Secara teknis, gap SSTP vs L2TP dapat dijelaskan dari sifat protokol: SSTP berjalan di atas TCP, sehingga saat trafik pengujian juga berbasis TCP, terbentuk pola 'TCP-over-TCP' yang rentan head-of-line blocking dan retransmisi berantai ketika terjadi loss atau jitter tinggi. Dampaknya adalah tail latency ekstrem dan throughput yang dapat kolaps pada sebagian sesi. Sebaliknya, L2TP umumnya menggunakan UDP untuk transport tunnel, sehingga lebih menghindari efek TCP-over-TCP dan memberikan perilaku ekor yang lebih terkendali pada jalur variatif seperti LEO.

### E. S-3 provider-managed: latensi moderat namun throughput dibatasi (Tabel II, Gambar 5 dan Gambar 6)

Pada S-3 (provider-managed), RTT median (p50) meningkat menjadi ~94,6-101,0 ms, sementara p99 median berada pada 151,5-192,4 ms (Tabel II), yang menunjukkan tail latency lebih terkendali dibanding LEO-SSTP pada S-2. Dari sisi reliabilitas, loss median berada pada kisaran 2,09-3,96% dengan loss maksimum sekitar 4,43-4,44% (Tabel II). Namun, throughput UL/DL p50 hanya sekitar 6-7 Mbps (Gambar 4), jauh di bawah baseline FO. Pola ini mengindikasikan adanya pembatasan kapasitas (shaping/policy) atau profil layanan tertentu dari penyedia, sehingga jalur ini lebih tepat diposisikan untuk menjaga konektivitas layanan dasar dan kontrol (misalnya akses sistem, komunikasi ringan), bukan sebagai jalur pengganti penuh untuk beban data besar.

### F. Implikasi layanan kampus dan rekomendasi operasional (berdasarkan p99, loss, dan IQR)

Keunikan temuan artikel ini adalah penekanan pada indikator robust (p99 dan IQR) untuk menilai kelayakan jalur darurat. Mengandalkan nilai p50 saja dapat menutupi risiko stall sesaat yang berdampak besar pada pengalaman pengguna. Oleh karena itu, untuk operasional failover FO-LEO, rekomendasi

berbasis hasil pengukuran adalah:

- Gunakan tunneling berbasis UDP (mis. L2TP) untuk jalur LEO pada skema self-managed, karena menekan tail latency dan meningkatkan throughput efektif dibanding SSTP pada dataset ini (lihat Tabel II).

- Terapkan kebijakan prioritas trafik saat failover (QoS) untuk melindungi layanan kritis dari lonjakan latency dan loss; lakukan pembatasan trafik bulk non-kritis pada jalur LEO.

- Lakukan tuning MTU/MSS (mis. MSS clamping) untuk mengurangi fragmentasi dan retransmisi pada jalur LEO yang variatif, serta monitor p99 dan loss maksimum sebagai indikator degradasi.

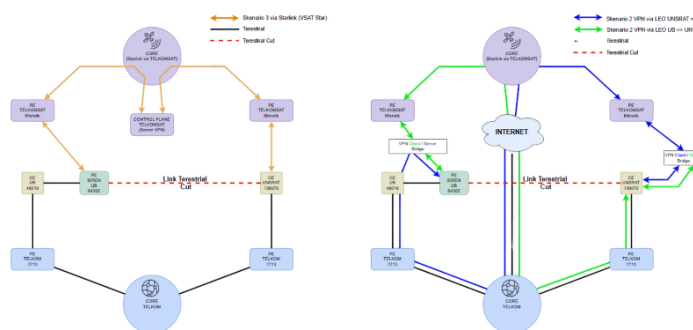
- Gunakan indikator variabilitas (IQR) untuk memutuskan apakah layanan real-time/interactive perlu fallback ke mode adaptif (bitrate rendah) ketika kapasitas LEO berfluktuasi (lihat Gambar 6).

Pada S-2, konfigurasi LEO–SSTP memperlihatkan tail latency ekstrem (p99 hingga orde detik) dan throughput yang dapat turun sangat rendah pada beberapa sesi. Sebaliknya, LEO–L2TP menghasilkan p99 ratusan milidetik dan downlink throughput jauh lebih tinggi, meskipun uplink tetap terbatas dan variabilitas DL besar. Pada S-3, latensi moderat namun throughput terbatas ~6–7 Mbps, sehingga cocok untuk menjaga layanan dasar saat darurat.

TABEL II

REKAP KPI (MEDIAN ANTAR-SESI) S-2 DAN S-3 PADA UNSRAT DAN UB: FO (BASELINE) VS LEO (FAILOVER), TERMASUK INDIKATOR WORST-CASE (p99 MAKS DAN LOSS MAKS).

Skenario	Site	Jalur	RTT p50 median (ms)	RTT p99 median (ms)	RTT p99 maks (ms)	Loss median (%)	Loss maks (%)	UL p50+IQR (Mbps)	DL p50+IQR (Mbps)
S-2	UNSRAT	FO	35,4	182	196,4	0,69	0,83	83,89 + 11,10	94,28 + 0,37
S-2	UNSRAT	LEO-SSTP	136	5373,1	15215	6,37	22	0,49 + 0,91	8,45 + 5,96
S-2	UNSRAT	LEO-L2TP	104	208,6	223	2,48	3,8	3,87 + 2,21	58,02 + 34,02
S-2	UB	FO	35,2	190,1	197,1	0,58	0,61	94,37 + 13,85	86,13 + 12,93
S-2	UB	LEO-SSTP	170,5	2535,1	4837,2	9,16	9,58	0,00 + 9,40	0,44 + 0,80
S-2	UB	LEO-L2TP	86	192	196	1,76	3,02	4,29 + 2,25	69,94 + 25,96
S-3	UNSRAT	FO	31,4	180,1	184,1	0,55	0,66	83,90 + 12,64	94,37 + 0,35
S-3	UNSRAT	LEO	101	192,4	234	3,96	4,9	6,78 + 3,13	6,06 + 1,98
S-3	UB	FO	37,4	183	208,1	0,5	0,55	94,37 + 12,51	86,09 + 13,02
S-3	UB	LEO	94,6	151,5	157	2,09	2,49	6,26 + 2,87	6,40 + 1,98



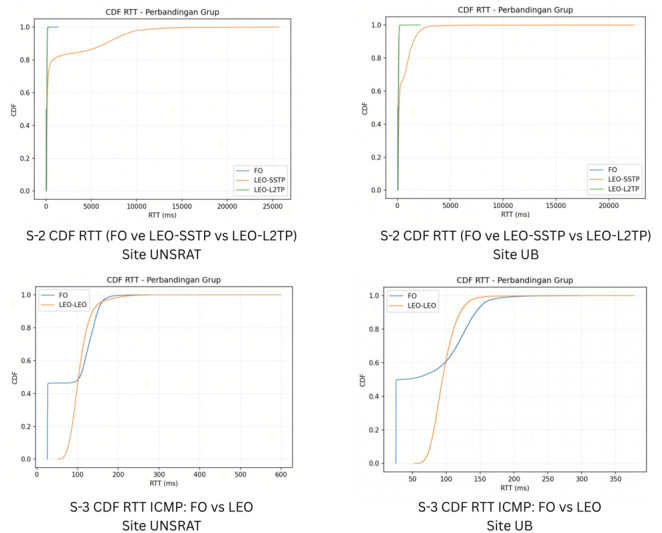
Gambar 1. Topologi pengujian dan skema failover FO–LEO Skenario 2 dan Skenario 3 untuk interkoneksi antar-site UNSRAT–UB.

```

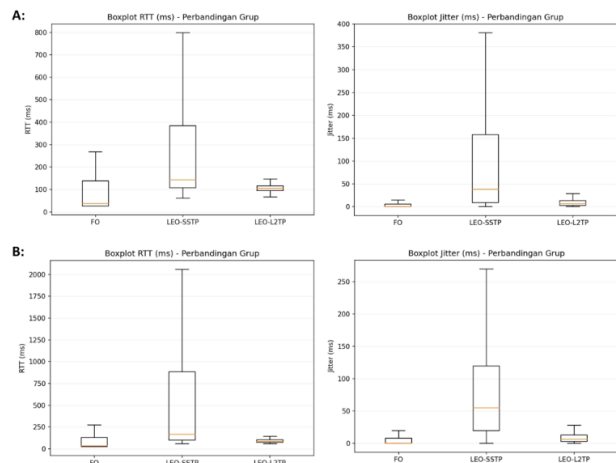
A: [mkel@noc icmp]$ date
Sun Jan 12 07:49:34 WITA 2025
[mkel@noc icmp]$ sudo ./tracer_t_to_file.sh cloud.ub.ac.id
Running traceroute to cloud.ub.ac.id...
Traceroute completed successfully. Results saved to traceroute_results/hasil_traceroute_20250112_074040.txt
[mkel@noc icmp]$ cat traceroute_results/hasil_traceroute_20250112_074040.txt
traceroute to cloud.ub.ac.id (175.45.186.22), 30 hops max, 60 byte packets
 1 * * *
 2 usr00.unsrat.ac.id (103.84.116.254) 1.306 ms 1.414 ms 1.917 ms
 3 172.17.0.33 (172.17.0.33) 25.584 ms 25.549 ms 25.562 ms
 4 172.17.0.21 (172.17.0.21) 26.142 ms 26.123 ms 26.080 ms
 5 ve100-gw-internal-4.ub.ac.id (175.45.189.236) 26.189 ms 26.404 ms 26.954 ms
 6 sfp-sfpplun1-140-gw-tik.ub.ac.id (175.45.189.177) 25.743 ms 25.479 ms 25.439 ms
 7 cloud.ub.ac.id (175.45.186.22) 25.760 ms 25.546 ms 25.558 ms
[mkel@noc icmp]$

B: [mkel@noc icmp]$ sudo ./tracer_t_to_file.sh cloud.ub.ac.id
Running traceroute to cloud.ub.ac.id...
Traceroute completed successfully. Results saved to traceroute_results/hasil_traceroute_20250112_095655.txt
[mkel@noc icmp]$ cat traceroute_results/hasil_traceroute_20250112_095655.txt
traceroute to cloud.ub.ac.id (175.45.186.22), 30 hops max, 60 byte packets
 1 * * *
 2 usr00.unsrat.ac.id (103.84.116.254) 0.959 ms 1.385 ms 1.776 ms
 3 172.17.0.37 (172.17.0.37) 116.031 ms 238.758 ms 238.775 ms
 4 172.17.0.21 (172.17.0.21) 238.853 ms 238.828 ms 238.810 ms
 5 ve100-gw-internal-4.ub.ac.id (175.45.189.236) 238.795 ms 238.879 ms 238.942 ms
 6 sfp-sfpplun1-140-gw-tik.ub.ac.id (175.45.189.177) 249.214 ms 248.292 ms 247.925 ms
 7 cloud.ub.ac.id (175.45.186.22) 247.537 ms 250.260 ms 250.541 ms
[mkel@noc icmp]$
    
```

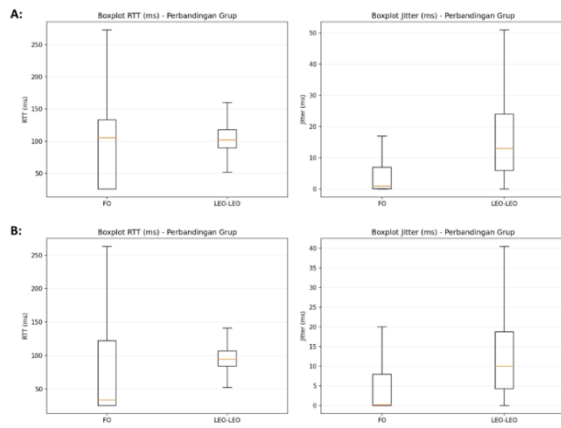
Gambar 2. Contoh traceroute validasi jalur: (a) baseline FO dan (b) kondisi failover LEO.



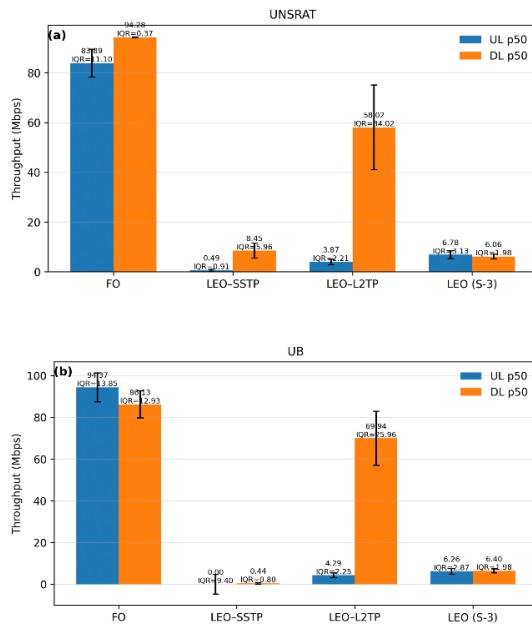
Gambar 3. CDF RTT FO vs LEO. (a) S-2 UNSRAT (FO vs LEO–SSTP vs LEO–L2TP); (b) S-2 UB; (c) S-3 UNSRAT (FO vs LEO); (d) S-3 UB. Kurva CDF menonjolkan pergeseran distribusi serta tail latency (ekor) pada kondisi failover.



Gambar 4. Boxplot RTT dan jitter ICMP pada S-2 (LEO-SSTP vs LEO-L2TP) (panel a: UNSRAT, panel b: UB) untuk merangkum median, IQR, dan outlier.



Gambar 5. Boxplot RTT dan jitter ICMP baseline FO vs LEO pada S-3 (provider-managed) (panel a: UNSRAT, panel b: UB) untuk merangkum median, IQR, dan outlier.



Gambar 6. Perbandingan throughput UL/DL pada FO dan LEO berbasis p50 (median) dan variabilitas (IQR): (a) UNSRAT dan (b) UB.

**G. Konteks layanan IdREN dan prioritas trafik saat kondisi darurat**

Implikasi hasil pengujian perlu dibaca dalam konteks layanan IdREN/REN yang umumnya sensitif terhadap ketersediaan end-to-end, namun memiliki profil trafik yang beragam. Temuan bahwa jalur LEO cenderung memiliki tail latency yang lebih besar serta throughput yang bisa dibatasi mengindikasikan bahwa jalur ini lebih tepat diprioritaskan untuk layanan kritikal berbandwidth kecil–menengah (mis. DNS, SSO, email, LMS, monitoring, dan akses administrasi), sedangkan trafik besar seperti replikasi storage atau backup dataset tetap diarahkan ke FO saat tersedia. Pendekatan prioritas layanan dan SOP pemulihan multi-homing menjadi penting agar resiliensi kampus tidak bergantung pada satu jalur tunggal [15].

Pada skenario self-managed, praktik operasional yang disarankan meliputi tuning MTU/MRU dan TCP MSS clamping untuk mengurangi risiko fragmentasi pada tunnel bertingkat, serta penerapan kebijakan QoS berbasis prioritas

layanan agar trafik kritikal tetap stabil ketika jalur berubah. Pada skenario provider-managed, fokus operasional bergeser ke kebijakan routing, monitoring QoS, dan koordinasi SLA dengan penyedia layanan. Kedua pendekatan perlu mempertimbangkan keamanan end-to-end karena jalur LEO dapat melibatkan NAT/transport publik; enkripsi dan segmentasi tetap diperlukan untuk melindungi trafik riset dan administrasi.

**H. Keterbatasan dan ancaman validitas**

Interpretasi hasil pengukuran perlu mempertimbangkan beberapa keterbatasan. Pertama, performa LEO bersifat dinamis karena dipengaruhi pergantian satelit (handover), kondisi radio, beban jaringan, serta kebijakan manajemen kapasitas di sisi penyedia; faktor-faktor ini dapat menyebabkan variabilitas throughput (IQR) dan lonjakan RTT (tail) yang berbeda antar waktu pengukuran. Kedua, jumlah sesi pengujian per kondisi terbatas (lihat Tabel I), sehingga hasil ini merepresentasikan kondisi lapangan pada rentang waktu uji dan belum tentu mencakup seluruh variasi harian/musiman.

Ketiga, konfigurasi tunneling dan parameter jaringan (mis. MTU/MSS, kebijakan retransmisi, dan prioritas trafik) dapat memengaruhi hasil, terutama pada jalur LEO yang fluktuatif. Perbandingan SSTP vs L2TP pada S-2 menunjukkan indikasi kuat efek overhead protokol (mis. potensi TCP-over-TCP pada SSTP), namun artikel ini tidak mengisolasi seluruh parameter (seperti variasi ukuran paket, variasi jumlah stream, atau profil aplikasi) sehingga mekanisme penyebab detail perlu dikaji lebih lanjut. Keempat, pada skenario provider-managed (S-3), detail kebijakan shaping/profil layanan tidak sepenuhnya terobservasi, sehingga penarikan kesimpulan mengenai pembatasan throughput didasarkan pada inferensi dari pola hasil (lihat Tabel II dan Gambar 6).

Sebagai tindak lanjut, penelitian berikutnya dapat menambah jumlah sesi dan variasi waktu pengukuran, menguji beragam profil beban aplikasi (mis. web meeting, akses LMS, transfer dataset), serta memasukkan metrik ketersediaan (availability) dan waktu failover. Evaluasi ini akan memperkuat generalisasi rekomendasi operasional untuk penerapan LEO sebagai jalur darurat pada jaringan kampus.

Keempat, pengujian throughput pada artikel ini menggunakan skenario TCP yang sensitif terhadap RTT dan loss, sehingga nilai yang diperoleh tidak hanya merefleksikan kapasitas fisik jalur, tetapi juga dinamika kontrol kemacetan dan konfigurasi endpoint. Uji tambahan berbasis UDP terkontrol (misalnya dengan batas laju tertentu) dapat membantu membedakan keterbatasan kapasitas murni dari efek protokol transport [19], [2].

Kelima, artikel ini memfokuskan evaluasi pada metrik jaringan (RTT, jitter, loss, dan throughput). Untuk memperkuat implikasi layanan kampus, studi lanjutan dapat menambahkan metrik tingkat aplikasi, seperti waktu respons layanan web, kualitas konferensi video (MOS/score), atau performa akses repositori riset, sehingga hubungan QoS–QoE lebih terlihat. [3]

Keenam, kondisi failover nyata sering melibatkan waktu deteksi gangguan, waktu konvergensi routing, dan waktu pemulihan tunnel. Komponen “recovery time” ini belum diukur

secara eksplisit pada artikel, padahal penting untuk layanan kritikal seperti otentikasi, DNS, dan akses sistem akademik. Perekaman log failover dan pengukuran RTO/MTR dapat melengkapi analisis reliabilitas yang dibahas pada bagian implikasi SLA. [3]

Terakhir, hasil pada jaringan berbagi (shared medium) seperti LEO dapat dipengaruhi oleh kepadatan pengguna, kebijakan alokasi sumber daya operator, serta kondisi radio setempat. Oleh karena itu, generalisasi hasil sebaiknya dibatasi pada kondisi pengujian yang sejenis, dan pengulangan pada lokasi/waktu berbeda diperlukan untuk memperoleh rentang performa yang lebih representatif (confidence band) bagi perencanaan jaringan darurat kampus.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Satelit LEO layak digunakan sebagai jalur cadangan/darurat untuk mempertahankan konektivitas antar-site kampus ketika jalur FO terganggu. Namun, evaluasi berbasis metrik robust menunjukkan bahwa risiko utama pada jalur LEO bukan hanya kenaikan RTT median, melainkan tail latency (p99) dan variabilitas throughput (IQR) yang dapat mengganggu layanan interaktif. Pada skema self-managed (S-2), L2TP memberikan performa yang lebih usable dibanding SSTP karena menurunkan tail latency secara signifikan dan menjaga throughput downlink lebih tinggi, sedangkan SSTP berpotensi mengalami degradasi ekstrem pada sebagian sesi. Pada skema provider-managed (S-3), latensi cenderung moderat tetapi throughput dapat terbatas sesuai profil layanan, sehingga lebih cocok untuk menjaga layanan dasar saat kondisi darurat.

Disarankan: (1) menggunakan tunneling berbasis UDP (mis. L2TP) pada jalur LEO self-managed; (2) penerapan QoS berbasis prioritas layanan, pembatasan trafik berat saat failover, tuning MTU/MSS, serta otomasi failover dan monitoring p99/loss sebagai indikator degradasi. [9]; (3) melakukan tuning MTU/MSS (mis. MSS clamping) dan monitoring p99/loss sebagai indikator degradasi; dan (4) menambah jumlah sesi serta variasi waktu/beban aplikasi pada penelitian berikutnya untuk memperkuat generalisasi hasil.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pembimbing dan penguji Tesis, serta tim pengelola jaringan di UNSRAT Manado dan UB Malang yang mendukung akses infrastruktur pengujian (IdREN/metro FO, server/VM, dan perangkat routing). Penulis juga berterima kasih kepada pihak penyedia layanan yang memfasilitasi jalur LEO untuk skenario failover.

#### KUTIPAN

- [1] W. Townsley et al., "Layer Two Tunneling Protocol (L2TP)," RFC 2661, Aug. 1999. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2661>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [2] ESnet, "iperf3 Documentation," iperf3 Project. [Online]. Available: <https://software.es.net/iperf/>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [3] ITU-T, "E.800: Definitions of terms related to quality of service," ITU-T Recommendation E.800, Sep. 2008. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800/en>. [Diakses: 16 Desember 2025].
- [4] F. Michel, M. Trevisan, D. Giordano, and O. Bonaventure, "A First Look at Starlink Performance," in Proc. ACM Internet Measurement Conference (IMC), 2022.
- [5] J. Postel, "Internet Control Message Protocol," RFC 792, Sep. 1981. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc792>. [Diakses: 16 Desember 2025].
- [6] G. Malkin, "Traceroute Using an IP Option," RFC 1393, Jan. 1993. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1393>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [7] MikroTik, "SSTP," MikroTik RouterOS Documentation. [Online]. Available: <https://help.mikrotik.com/docs/spaces/ROS/pages/2031645/SSTP>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [8] NIST/SEMATECH, "Box Plot," NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/boxplot.htm>. [Diakses: 16 Desember 2025].
- [9] J. Mogul and S. Deering, "Path MTU Discovery," RFC 1191, Nov. 1990. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1191>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [10] Q. Wang, W. Li, Z. Yu, Q. Abbasi, M. Imran, S. Ansari, Y. Sambo, L. Wu, Q. Li, and T. Zhu, "An overview of emergency communication networks," Remote Sens., vol. 15, no. 6, p. 1595, Mar. 2023, doi: 10.3390/rs15061595.
- [11] A. Carreras-Coch, J. Navarro, C. Sans, and A. Zaballos, "Communication technology in emergency situation," Electronics, vol. 11, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/electronics11071155.
- [12] B. Haq, M. A. Jamshed, and A. Nauman, "Integrated terrestrial and non-terrestrial networks: An overview," in Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks. Cham, Switzerland: Springer, 2025, pp. 1-25, doi: 10.1007/978-3-031-63705-6\_1.
- [13] W. Jiang, Y. Zhan, X. Xiao, and G. Sha, "Network simulators for satellite-terrestrial integrated networks: A survey," IEEE Access, vol. 11, pp. 98269-98292, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3313229.
- [14] B. Hu, X. Zhang, Q. Zhang, N. Varyani, Z. M. Mao, F. Qian, and Z.-L. Zhang, "LEO satellite vs. cellular networks: Exploring the potential for synergistic integration," in Proc. 19th Int. Conf. Emerging Netw. Exp. Technol. (CoNEXT Companion), 2023, pp. 1-7, doi: 10.1145/3624354.3630588.
- [15] W. Zhang, J. Liu, and X. Chen, "Resilient network architectures for education and research backbones," IEEE Netw., vol. 37, no. 4, pp. 52-59, Jul./Aug. 2023.
- [16] ARENA-PAC, "Agreement to Enhance Japan-Indonesia Research and Education Network Collaboration Signed" (konteks/glosarium IdREN). [Online]. Available: <https://www.arena-pac.net/2022/09/01/arenapac-ub-idren-collaborate-100gbps-network/>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [17] C. Demichelis and P. Chimento, "IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)," RFC 3393, Nov. 2002. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3393>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [18] G. Almes, S. Kalidindi, and M. Zekauskas, "A One-Way Loss Metric for IP Performance Metrics (IPPM)," RFC 7680, Jan. 2016. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7680>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [19] B. Constantine, G. Forget, R. Geib, and R. Schrage, "Framework for TCP Throughput Testing," RFC 6349, Aug. 2011. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6349>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [20] MikroTik, "EoIP," MikroTik RouterOS Documentation. [Online]. Available: <https://help.mikrotik.com/docs/spaces/ROS/pages/24805521/EoIP>. [Diakses: 13 Desember 2025].
- [21] Y. Rekhter, T. Li, and S. Hares, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)," RFC 4271, Jan. 2006. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4271>. [Diakses: 13 Desember 2025].