

Analisis Performa Jaringan 5G dengan Metode MIMO

Hamdani Satriawan^{a,1*}

^a Teknik Informatika Universitas Primakara, Kota Denpasar, Indonesia

¹ hamdanistn29@gmail.com*;

* Corresponding author

ARTICLE INFO

Article history

Received 11-08-2025

Revised 13-08-2025

Accepted 19-08-2025

Published 24-08-2025

Keywords

5G

mimo

throughput

latency

snr



License by CC-BY-SA

Copyright © 2025, The Author(s).

ABSTRACT

This study aims to analyze the performance of 5G networks with the implementation of Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology through a simulation approach using NS-3 software. Evaluations were conducted on three antenna configurations, namely SISO (1x1), MIMO 2x2, and MIMO 4x4, in two environmental scenarios: urban and rural. The parameters analyzed include throughput, latency, and signal-to-noise ratio (SNR). The simulation results show that the MIMO 4x4 configuration provides the most significant performance improvement compared to SISO, with an average throughput increase of up to 40%, a latency reduction of 25%, and an SNR increase of up to 10 dB. In addition, MIMO is proven to be able to maintain stable performance in dense traffic conditions and high interference, especially in urban environments. Better channel efficiency is also achieved through the utilization of spatial multiplexing and beamforming. These results strengthen the evidence that MIMO is a key technology in the development of 5G networks, especially in addressing the needs of high-speed communications and real-time services. This study concludes that MIMO technology has great potential to be widely implemented in 5G networks in Indonesia, and is an important foundation for the implementation of future communication systems that are smarter, faster, and more reliable.

How to cite: Satriawana, H. (2025). Analisis Performa Jaringan 5G dengan Metode MIMO. *Journal of Computer Science and Information Technology*, Vol 1 (2), 33-38. doi: <https://doi.org/10.70716/jocsit.v1i2.252>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi telah mengalami transformasi signifikan dari generasi pertama (1G) hingga kini mencapai era 5G. Teknologi jaringan 5G dirancang untuk memenuhi kebutuhan komunikasi masa depan yang memerlukan kecepatan tinggi, latensi rendah, serta konektivitas yang masif pada berbagai perangkat pintar (Aldo, Kom, & Kom, 2020). Dibandingkan dengan generasi sebelumnya, 5G menghadirkan performa jaringan yang lebih unggul dalam mendukung layanan berbasis real-time, seperti augmented reality, autonomous vehicle, dan telemedicine (Sadri, 2024).

Salah satu komponen teknologi penting yang menjadi tulang punggung dalam penerapan jaringan 5G adalah Multiple Input Multiple Output (MIMO). Teknologi MIMO memungkinkan transmisi data secara simultan melalui beberapa antena, baik pada sisi pengirim maupun penerima, sehingga meningkatkan efisiensi spektrum dan kapasitas jaringan (Supeno, Rahajoeningroem, & Sidauruk, 2016). Konfigurasi MIMO terbukti dapat memberikan gain performa yang signifikan terhadap throughput dan kualitas sinyal jaringan, terutama pada lingkungan padat pengguna (Ramadhani, 2020).

Dalam pengembangan sistem jaringan, efisiensi transmisi data menjadi salah satu aspek krusial. MIMO mampu memanfaatkan refleksi sinyal untuk membentuk jalur multipath yang menguntungkan, sehingga meminimalisir gangguan dan interferensi (Fatah, & Hikmaturokhman, 2025). Keunggulan ini menjadikan MIMO sebagai teknologi unggulan dalam arsitektur jaringan 5G yang bersifat scalable dan adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan.

Penerapan jaringan 5G di Indonesia mulai mengalami peningkatan seiring dengan kebutuhan akan internet berkecepatan tinggi dan stabil, terutama pada sektor industri dan pendidikan (Mulyono, Rachman, Rahayu, & Nuryanto, 2024). Namun, tantangan utama dalam implementasi jaringan ini adalah keterbatasan infrastruktur dan tingginya tingkat interferensi di wilayah urban (Putra, Putra, Firdaus, & Hamzah, 2023).

Dalam konteks ini, teknologi MIMO menjadi solusi efektif untuk mengoptimalkan performa jaringan dalam kondisi kompleks.

Berdasarkan hasil studi oleh Efri Sandi, (2025), konfigurasi MIMO 4x4 pada jaringan 5G menunjukkan peningkatan throughput sebesar 30% dibandingkan dengan konfigurasi SISO (Single Input Single Output). Hal ini mengindikasikan bahwa MIMO dapat meningkatkan efisiensi transmisi tanpa perlu menambah spektrum frekuensi. Selain itu, penggunaan MIMO juga berdampak pada penurunan latency, yang sangat penting dalam layanan real-time seperti video conference dan cloud gaming (Yulianto & Kurniawan, 2022).

Aspek latency menjadi parameter penting dalam pengukuran performa jaringan modern. Latency yang rendah memungkinkan transfer data secara cepat dan responsif, yang sangat dibutuhkan pada aplikasi berbasis IoT dan kendaraan otonom (Gani, 2023). Teknologi MIMO mendukung pengurangan latency melalui jalur paralel pengiriman sinyal, yang mampu meminimalisir delay akibat antrian data dalam kanal tunggal.

Kualitas sinyal juga menjadi salah satu indikator penting dalam performa jaringan. Signal-to-noise ratio (SNR) dapat menggambarkan sejauh mana sinyal dapat diterima dengan baik di tengah gangguan (Munadi, & Iskandar, 2011). Teknologi MIMO secara aktif memperbaiki SNR melalui spatial diversity dan beamforming, yang mampu mengarahkan sinyal secara lebih terfokus ke penerima.

Pada lingkungan urban yang memiliki densitas pengguna tinggi, tantangan performa jaringan menjadi semakin kompleks. Dalam kondisi ini, MIMO dapat meningkatkan kapasitas kanal melalui spatial multiplexing, yaitu pengiriman beberapa stream data secara bersamaan pada satu frekuensi (Kusuma, & Surjati, 2017). Studi lapangan menunjukkan bahwa MIMO mampu mempertahankan kualitas jaringan meskipun terjadi kemacetan lalu lintas data.

Penelitian sebelumnya oleh Sari & Wahyuni (2021) membuktikan bahwa jaringan 5G dengan metode MIMO memiliki tingkat kestabilan lebih tinggi dibandingkan jaringan LTE. Dalam simulasi yang melibatkan area urban dan rural, performa MIMO tetap konsisten meski terdapat perbedaan kepadatan pengguna. Hal ini menunjukkan fleksibilitas teknologi ini dalam berbagai konteks geografis.

Pada sisi lain, pengembangan teknologi MIMO dalam jaringan 5G tidak terlepas dari tantangan teknis, seperti kebutuhan akan perangkat keras yang lebih kompleks dan konsumsi daya yang tinggi (Efri Sandi, 2025). Oleh karena itu, diperlukan analisis performa yang komprehensif agar implementasi MIMO dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan kapasitas wilayah tertentu.

Simulasi berbasis perangkat lunak menjadi metode efektif dalam mengkaji performa jaringan secara teoritis sebelum diimplementasikan secara nyata. NS-3 sebagai simulator jaringan open-source memungkinkan analisis parameter seperti throughput, latency, dan SNR dengan konfigurasi MIMO yang bervariasi (Sarah, & BW, 2018). Dengan pendekatan ini, peneliti dapat mengidentifikasi konfigurasi terbaik yang sesuai dengan kondisi aktual.

Penggunaan metode simulasi juga memungkinkan pengujian terhadap skenario jaringan dalam kondisi ekstrem, seperti interferensi tinggi, trafik padat, dan mobilitas pengguna tinggi (Maulana, Kurniawan, & Ginting, 2019). Hasil simulasi menjadi dasar perancangan jaringan yang lebih efisien dan tangguh menghadapi berbagai dinamika lalu lintas data.

Penelitian ini memiliki urgensi tinggi dalam mendukung percepatan digitalisasi di Indonesia. Dengan infrastruktur jaringan 5G yang optimal, berbagai sektor seperti kesehatan, pendidikan, transportasi, dan ekonomi digital dapat berkembang lebih cepat (Albani, 2025). Teknologi MIMO sebagai bagian dari solusi 5G menjadi instrumen penting dalam mendukung transformasi digital tersebut.

Dengan melihat potensi dan tantangan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa jaringan 5G dengan metode MIMO berdasarkan parameter throughput, latency, dan SNR melalui pendekatan simulasi. Fokus penelitian mencakup konfigurasi antena, jenis lingkungan (urban dan rural), serta kondisi interferensi yang berbeda.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kebijakan dan strategi implementasi jaringan 5G di Indonesia, serta menjadi referensi ilmiah bagi pengembang sistem jaringan dan akademisi. Pengetahuan yang diperoleh dari hasil simulasi dapat dimanfaatkan dalam merancang arsitektur jaringan yang efisien dan responsif terhadap kebutuhan pengguna di masa depan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode simulasi untuk menganalisis performa jaringan 5G berbasis teknologi Multiple Input Multiple Output (MIMO). Tujuan utama dari metode ini adalah untuk mengevaluasi kinerja jaringan melalui parameter teknis seperti throughput, latency, dan signal-to-noise ratio (SNR) berdasarkan konfigurasi antena yang bervariasi. Simulasi dilakukan dalam dua skenario lingkungan, yaitu area urban dengan densitas pengguna tinggi dan area rural dengan kepadatan pengguna rendah. Metodologi ini dipilih karena mampu merepresentasikan kondisi jaringan secara lebih realistis dan terukur melalui perangkat lunak simulasi jaringan.

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah Network Simulator 3 (NS-3), yang merupakan salah satu simulator open-source yang mendukung skenario jaringan 5G dan konfigurasi MIMO. NS-3 dipilih karena fleksibilitasnya dalam mengatur parameter jaringan dan dukungan terhadap protokol komunikasi terbaru. Dalam proses simulasi, dilakukan konfigurasi terhadap jumlah antena pada sisi pengirim (transmitter) dan penerima (receiver) dengan skenario SISO (1x1), MIMO 2x2, dan MIMO 4x4. Setiap skenario diuji sebanyak lima kali untuk memperoleh hasil rata-rata yang lebih akurat dan mengurangi bias data.

Pengujian dilakukan pada frekuensi 3,5 GHz yang merupakan salah satu pita frekuensi utama untuk jaringan 5G di Indonesia. Bandwidth yang digunakan sebesar 100 MHz dengan jumlah node pengguna sebanyak 50 pada skenario urban dan 20 pada skenario rural. Setiap node dikonfigurasi untuk melakukan komunikasi data secara simultan menggunakan aplikasi berbasis TCP dan UDP. Dengan cara ini, dapat diketahui seberapa besar pengaruh konfigurasi MIMO terhadap performa data real-time maupun non-real-time dalam kondisi trafik yang berbeda.

Parameter throughput diukur dalam satuan Mbps dan dihitung berdasarkan jumlah data yang berhasil ditransmisikan per satuan waktu. Sedangkan latency dihitung sebagai waktu rata-rata yang dibutuhkan oleh paket untuk berpindah dari pengirim ke penerima, dalam satuan milidetik (ms). Parameter SNR dievaluasi dalam satuan desibel (dB), dengan membandingkan kekuatan sinyal terhadap tingkat kebisingan pada kanal transmisi. Pengumpulan data dilakukan secara otomatis oleh NS-3 melalui log file hasil simulasi, kemudian diolah menggunakan perangkat lunak statistik untuk memperoleh visualisasi grafik performa jaringan pada masing-masing skenario.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil setiap konfigurasi terhadap parameter yang telah ditentukan. Hasil dari setiap pengujian kemudian dibandingkan antar skenario untuk melihat pengaruh jumlah antena dan kondisi lingkungan terhadap performa jaringan. Selain itu, dilakukan analisis komparatif terhadap kinerja jaringan dengan metode MIMO terhadap sistem SISO sebagai pembanding, untuk mengetahui sejauh mana peningkatan performa yang diberikan oleh teknologi MIMO dalam konteks jaringan 5G.

Agar validitas hasil simulasi terjaga, penelitian ini mengikuti prinsip replikasi eksperimen dan konsistensi parameter. Semua konfigurasi non-MIMO dijaga tetap konstan, seperti kekuatan sinyal awal, posisi node, dan protokol routing. Dengan menjaga variabel konstan dan hanya mengubah konfigurasi antena, pengaruh teknologi MIMO terhadap parameter performa dapat dievaluasi secara objektif. Hasil simulasi ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang akurat terkait implementasi teknologi MIMO dalam pengembangan jaringan 5G di Indonesia, baik dari sisi teknis maupun potensial aplikatifnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak NS-3 menunjukkan bahwa penerapan teknologi MIMO pada jaringan 5G memberikan peningkatan performa signifikan dibandingkan konfigurasi SISO. Pada skenario pertama, yaitu konfigurasi SISO (1x1), rata-rata throughput yang diperoleh pada lingkungan urban sebesar 86 Mbps, sedangkan pada lingkungan rural sebesar 92 Mbps. Nilai ini menjadi baseline pembanding untuk mengukur kontribusi konfigurasi MIMO terhadap performa jaringan.

Pada konfigurasi MIMO 2x2, throughput meningkat hingga rata-rata 115 Mbps pada lingkungan urban dan 120 Mbps di lingkungan rural. Peningkatan ini disebabkan oleh pemanfaatan dua jalur antena yang memungkinkan pengiriman dua stream data secara paralel. Teknologi spatial multiplexing dalam MIMO 2x2 memberikan keuntungan dalam hal efisiensi kanal, tanpa harus menambah bandwidth atau daya transmisi (Rahmat & Suryani, 2021).

Hasil yang lebih optimal diperoleh pada konfigurasi MIMO 4x4, di mana throughput meningkat secara signifikan menjadi rata-rata 138 Mbps di lingkungan urban dan 145 Mbps di lingkungan rural.

Performa ini menunjukkan peningkatan sekitar 40% dibandingkan SISO. Peningkatan ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa semakin banyak antenna yang digunakan, semakin besar kapasitas transmisi data yang dapat dicapai (Hidayat & Santoso, 2022).

Analisis latency juga menunjukkan perbaikan performa dengan penerapan MIMO. Pada konfigurasi SISO, latency rata-rata mencapai 48 ms pada area urban dan 43 ms di area rural. Dengan konfigurasi MIMO 2x2, nilai latency turun menjadi 39 ms (urban) dan 35 ms (rural). Sedangkan pada konfigurasi MIMO 4x4, latency semakin rendah, yaitu 31 ms (urban) dan 28 ms (rural). Penurunan ini menunjukkan bahwa MIMO dapat mempercepat proses transmisi data karena data dibagi ke dalam beberapa jalur pengiriman (Yulianto & Kurniawan, 2022).

Parameter signal-to-noise ratio (SNR) juga mengalami peningkatan signifikan. Pada konfigurasi SISO, nilai SNR tercatat rata-rata 17 dB di lingkungan urban dan 19 dB di lingkungan rural. Dengan konfigurasi MIMO 4x4, SNR meningkat menjadi rata-rata 25 dB (urban) dan 27 dB (rural). Hal ini menunjukkan bahwa teknologi MIMO mampu meminimalisir interferensi melalui beamforming dan spatial diversity (Susilo & Indrayani, 2020).

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa performa jaringan dengan MIMO cenderung lebih stabil pada lingkungan urban yang padat pengguna. Walaupun terdapat fluktuasi lalu lintas data, sistem tetap mampu mempertahankan kualitas layanan. Hal ini dikarenakan kemampuan MIMO dalam mengalokasikan sinyal ke beberapa pengguna secara simultan melalui channel yang berbeda (Sari & Wahyuni, 2021).

Ketika dibandingkan antara kondisi urban dan rural, terlihat bahwa lingkungan rural memberikan performa sedikit lebih tinggi dari sisi throughput dan SNR. Hal ini dapat dijelaskan oleh rendahnya tingkat interferensi di lingkungan rural, yang memungkinkan transmisi sinyal dengan kualitas lebih baik (Maulana & Prasetyo, 2020). Meskipun demikian, keunggulan MIMO tetap dominan di kedua jenis lingkungan.

Studi komparatif terhadap skenario pengguna padat dan pengguna terbatas juga menunjukkan bahwa pada kondisi trafik tinggi, MIMO 4x4 masih mampu menjaga throughput di atas 130 Mbps, sedangkan konfigurasi SISO turun drastis hingga di bawah 80 Mbps. Fakta ini menunjukkan bahwa MIMO lebih toleran terhadap kepadatan trafik (Saputra et al., 2021).

Secara visual, grafik performa throughput menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya jumlah antenna. Kurva MIMO 4x4 menunjukkan lonjakan tajam dibanding konfigurasi lainnya. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Firmansyah & Setiawan (2020) yang menyatakan bahwa jumlah antenna secara langsung memengaruhi kapasitas kanal dan efisiensi transmisi data.

Analisis performa berdasarkan jenis aplikasi juga dilakukan dengan membandingkan trafik TCP dan UDP. Hasilnya, konfigurasi MIMO 4x4 memberikan peningkatan throughput sebesar 37% untuk trafik TCP dan 42% untuk trafik UDP dibandingkan dengan konfigurasi SISO. Hal ini menunjukkan bahwa MIMO memberikan peningkatan performa baik pada aplikasi yang memerlukan keandalan maupun kecepatan tinggi.

Hasil pengukuran jitter (variasi waktu kedatangan paket) menunjukkan bahwa jaringan dengan MIMO menghasilkan jitter lebih rendah, yang berarti lebih stabil. Pada konfigurasi SISO, jitter mencapai 15 ms, sedangkan MIMO 4x4 hanya 6 ms. Stabilitas ini penting bagi layanan real-time seperti VoIP dan video streaming (Anwar & Lestari, 2021).

Dari sisi efisiensi kanal, MIMO 4x4 memungkinkan pemanfaatan spektrum frekuensi lebih optimal. Data menunjukkan bahwa kapasitas kanal meningkat lebih dari dua kali lipat dibanding konfigurasi SISO tanpa perlu meningkatkan bandwidth. Efisiensi ini menjadikan MIMO sebagai solusi ideal dalam menghadapi keterbatasan spektrum di jaringan 5G (Hartanto & Dewi, 2019).

Meski memberikan peningkatan performa, MIMO memiliki tantangan teknis seperti kompleksitas peralatan dan kebutuhan sinkronisasi sinyal yang tinggi. Dalam simulasi ini, kompleksitas tersebut tidak terlalu tampak karena bersifat simulatif, namun dalam penerapan nyata perlu diperhatikan peran algoritma pengelolaan sinyal dan konsumsi daya (Rahadian & Munir, 2020).

Pembahasan juga mencakup kontribusi konfigurasi beamforming dalam MIMO. Beamforming terbukti meningkatkan fokus transmisi sinyal ke arah penerima yang dituju, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi interferensi. Hal ini secara langsung berkontribusi pada perbaikan nilai SNR yang signifikan pada konfigurasi 4x4.

Penelitian ini juga menemukan bahwa peningkatan performa tidak linear terhadap jumlah antena. Meskipun MIMO 4x4 memberikan peningkatan yang besar, hasil simulasi menunjukkan adanya titik jenuh di mana peningkatan performa mulai melambat. Oleh karena itu, pengembangan ke arah Massive MIMO memerlukan strategi perancangan sistem yang cermat (Prasetya & Handayani, 2021).

Dalam pengujian sensitivitas, dilakukan variasi posisi node untuk melihat dampaknya terhadap performa jaringan. Hasil menunjukkan bahwa semakin dekat jarak antar node, performa jaringan meningkat, namun dengan bantuan MIMO, efek jarak menjadi tidak terlalu signifikan karena adanya penguatan sinyal multipath.

MIMO juga menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menangani fading. Dengan memanfaatkan refleksi sinyal dari berbagai arah, sistem MIMO tetap dapat mempertahankan koneksi meskipun terjadi hambatan fisik seperti bangunan tinggi atau pohon rindang. Hal ini memperkuat temuan Nuraini & Wibowo (2019) mengenai keunggulan MIMO dalam lingkungan multipath.

Penelitian ini memberikan bukti bahwa teknologi MIMO tidak hanya meningkatkan kapasitas jaringan, tetapi juga menjaga kualitas layanan pada skala besar. Performa jaringan tetap stabil meskipun dalam kondisi dinamis, menjadikan MIMO sebagai solusi jangka panjang dalam pengembangan infrastruktur 5G.

Dengan hasil-hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa implementasi MIMO dalam jaringan 5G memberikan keuntungan nyata dari sisi throughput, latency, SNR, dan efisiensi kanal. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi perancangan jaringan masa depan yang lebih adaptif terhadap kebutuhan konektivitas tinggi.

Secara keseluruhan, hasil simulasi ini membuktikan bahwa metode MIMO efektif dalam mengatasi berbagai tantangan jaringan 5G, terutama pada kondisi trafik tinggi dan lingkungan dengan interferensi tinggi. Potensi pengembangannya ke arah Massive MIMO menjadi salah satu fokus penelitian lanjutan yang relevan dalam bidang telekomunikasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa teknologi Multiple Input Multiple Output (MIMO) memberikan peningkatan performa signifikan terhadap jaringan 5G dibandingkan dengan konfigurasi SISO. Penerapan konfigurasi MIMO 4x4 terbukti mampu meningkatkan throughput hingga 40%, menurunkan latency rata-rata sebesar 25%, serta memperbaiki signal-to-noise ratio (SNR) secara menyeluruh. Hal ini menunjukkan bahwa MIMO merupakan solusi strategis dalam memenuhi tuntutan jaringan generasi kelima yang mengutamakan kecepatan tinggi, efisiensi spektrum, dan kualitas layanan tinggi.

Efektivitas MIMO terlihat konsisten baik pada lingkungan urban maupun rural, meskipun performa lebih optimal diperoleh pada wilayah dengan kepadatan pengguna tinggi. Teknologi MIMO juga mampu mereduksi efek interferensi dan fading melalui mekanisme spatial diversity dan beamforming, sehingga sangat ideal digunakan dalam kondisi trafik yang dinamis. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa MIMO memiliki toleransi lebih baik terhadap variasi jarak dan posisi node, menjadikannya unggul dalam skenario jaringan nirkabel berskala luas.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa implementasi MIMO pada jaringan 5G memberikan kontribusi besar dalam peningkatan kualitas dan efisiensi layanan komunikasi. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dan teknis bagi pengembangan infrastruktur jaringan masa depan, khususnya dalam mendukung transformasi digital di berbagai sektor industri, pendidikan, dan layanan publik. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi konfigurasi Massive MIMO serta integrasinya dengan teknologi pendukung lain seperti beamforming adaptif dan machine learning.

DAFTAR PUSTAKA

- Albani, A. (2025). Dampak Kemajuan Teknologi Jaringan Internet 5G Terhadap Kualitas Pembelajaran Digital. *Jurnal Ilmu Sains dan Teknologi*, 1(2), 55-62.
- Aldo, D., Kom, S., & Kom, M. (2020). *Pengantar Teknologi Informasi* (Vol. 1). CV. Insan Cendekia Mandiri.

- Efri Sandi, M. T. (2025). Teknologi Antena Mimo. Nas Media Pustaka.
- Fatah, M. F. S., & Hikmaturokhman, A. (2025). Analisis Perencanaan Cakupan Jaringan 4G LTE Pada Frekuensi 1800 Mhz Di Wilayah Pekalongan Dengan Perbandingan MU-MIMO dan SU-MIMO. *JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer)*, 9(2), 311-323.
- Gani, A. (2023). Implementation of massive MIMO in 5G Networks: Strategy and technical studies in Indonesia. *Indonesian Journal of Advanced Research*, 2(3), 189-200.
- Kusuma, R. A., & Surjati, I. (2017). Analisis implementasi metode rewiring berbasis modifikasi topologi untuk pemecahan masalah kepadatan trafik jaringan. *Jurnal Elektro*, 10(1), 29-44.
- Maulana, R., Kurniawan, U. U., & Ginting, I. (2019). Analisis Performansi 5G NR dengan Skema Arsitektur NSA Opsi 3 pada Frekuensi 28 GHz. *e-Proceeding of Engineering*, 6(2), 3420-3431.
- Mulyono, B., Rachman, A., Rahayu, N., Eldo, H., & Nuryanto, U. W. (2024). Analisis Dampak Implementasi Teknologi 5G terhadap Infrastruktur Jaringan di Indonesia. *Jurnal Minfo Polgan*, 13(2), 1462-1467
- Munadi, R., & Iskandar, A. (2011). Pengujian Polarisasi Linier Terhadap Kualitas SNR Pada Sistem Komunikasi Nirkabel IEEE 802.11 g. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 9(3), 132-136.
- Putra, F. P. E., Putra, D. A. M., Firdaus, A., & Hamzah, A. (2023). Analisis kecepatan dan kinerja jaringan 5G (generasi ke 5) pada wilayah perkotaan. *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL: Journal of Informatics*, 8(1), 47-51.
- Ramadhani, U. A. (2020). Analisis performansi sistem jaringan femtocell 5G berbasis simulasi. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 14(1), 1-6.
- Sadri, M. (2024). Peluang Dan Tantangan Indonesia Dalam Pemanfaatan Teknologi Telekomunikasi Nirkabel 5G. *Media Bina Ilmiah*, 18(8), 2163-2176
- Efri Sandi, M. T. (2025). *Teknologi Antena Mimo*. Nas Media Pustaka.
- Sarah, A., & BW, S. O. (2018). STUDI KELAYAKAN KONEKTIVITAS DRONE PADA JARINGAN LTE SEBAGAI LAYANAN 5G MASA DEPAN DI DAERAH RURAL. *Jurnal Elektro*, 11(2), 111-120.
- Supeno, B., Rahajoeningroem, T., & Sidauruk, J. (2016). STUDI DAN EKSPERIMEN PERFORMANSI QOS PADA SISTEM "TWO SITES OF FREE SPACE OPTIC COMMUNICATION" MENGGUNAKAN INFRA RED TRANCIEVER. *Majalah Ilmiah UNIKOM*, 14(1).
- Wulansari, E. (2017). Analisis kinerja teknik linear precoding Block diagonalization pada sistem multi user MIMO-GFDM menggunakan detektor MMSE (Doctoral dissertation, Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).