

■ ELECTRICITY

■ COMMUNICATION

■ TECHNOLOGY

ELKOMIKA:

JURNAL

TEKNIK ENERGI ELEKTRIK, TEKNIK TELEKOMUNIKASI, & TEKNIK ELEKTRONIKA

TERAKREDITASI RISTEKDIKTI PERINGKAT 2 SESUAI DENGAN SK NO. 30/E/KPT/2019

■ Vol. 10
No . 3

■ Hlm.
500 - 741

■ Bandung
Juli 2022

■ ISSN (p) : 2338-8323
ISSN (e) : 2459-9638

SUSUNAN PENGELOLA JURNAL ELKOMIKA

Volume 10 Nomor 3 Tahun 2022

Penerbit:

Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Bandung

Penanggung Jawab:

Ketua Program Studi Teknik Elektro
Institut Teknologi Nasional Bandung

Pemimpin Redaksi:

Arsyad Ramadhan Darlis

Redaksi Pelaksana :

Dwi Aryanta (Institut Teknologi Nasional Bandung)
Castaka Agus Sugianto (Politeknik TEDC Bandung)
Ratna Susana (Institut Teknologi Nasional Bandung)
Nur Ibrahim (Universitas Telkom)
Ulil Surtia Zulpratita (Universitas Widyatama)
Lita Lidyawati (Institut Teknologi Nasional Bandung)
Irma Amelia Dewi (Institut Teknologi Nasional Bandung)
Muhammad Azis Mahardika (Institut Teknologi Nasional Bandung)
Susetyo Bagas Bhaskoro (Politeknik Manufaktur Bandung)
Lucia Jambola (Institut Teknologi Nasional Bandung)
Vibianti Dwi Pratiwi (Institut Teknologi Nasional Bandung)

Administrator:

Nanang Ruswandi, Yugo Senddy dan Ita Nursita

ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika telah **Terakreditasi Kementerian RistekDikti Peringkat 2 sesuai dengan SK No. 36/E/KPT/2019**. Jurnal ini diterbitkan 4 (empat) kali dalam satu tahun pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober. Jurnal ini berisi tulisan yang diangkat dari hasil penelitian dan kajian analisis di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya pada Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, dan Teknik Elektronika. Artikel Jurnal Elkomika dalam versi cetak telah *online*-kan menggunakan *Open Journal System (OJS)* pada <http://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/elkomika>.

Alamat redaksi dan tata usaha :

Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Bandung Gedung 20
Jl. PHH. Mustofa 23 Bandung 40124
Tel. 7272215 Fax. 7202892; e-mail: jte.itenas@itenas.ac.id

ELKOMIKA:

JURNAL

TEKNIK ENERGI ELEKTRIK, TEKNIK TELEKOMUNIKASI, & TEKNIK ELEKTRONIKA

DAFTAR ISI

Volume 10 Nomor 3 Tahun 2022

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Analisis Kinerja <i>Single User Throughput</i> 5G NR pada Sel <i>Indoor</i> dengan Antena MIMO Dwi Aryanta | 500 - 513 |
| Implementasi Wireless Sensor Network pada Sistem Manajemen Gedung menggunakan Protokol Komunikasi Modbus TCP Sarosa Castrena Abadi, Nur Wisma Nugraha, Siti Aminah | 514 - 528 |
| Rancang Bangun Instalasi Uji Akurasi Meter Air untuk Studi Pengaruh Tekanan Air Dudi Adi Firmansyah, Sayyid Al Habbib Ahmad, Endang Priyatna, Vera Firmansyah, Suprijanto | 529 - 543 |
| Prediksi <i>Channel Gain Threshold</i> untuk Modulasi Adaptif V2V menggunakan Algoritma <i>Random Forest Regression</i> Nazmia Kurniawati, Aisyah Novfitri, Yuli Kurnia Ningsih | 544 - 554 |
| Antena Mikrostrip Double E-Shaped dengan Frekuensi 3,3 GHz untuk Aplikasi WiMax Mutmainnah, Choirina Rachma Nur Octavina, Lutfi Rohman, Rohim Aminullah Firdaus | 555 - 567 |
| Sistem <i>Monitoring</i> Kelembaban Tanaman Cabai Rawit menggunakan Irigasi Tetes Gravitasi berbasis <i>Internet Of Things (IoT)</i> Armanda Suryaningrat, Danny Kurnianto, Raditya Artha Rochmanto | 568 - 580 |
| Perangkat Budidaya <i>Microgreen</i> berbasis <i>Internet of Things</i> Mas Aly Afandi, Fathurrozaq Fadhlan, Raditya Artha Rochmanto, Helmy Widyantara | 581 - 595 |
| Pengenalan Pola Dasar Angka berdasarkan Gerakan Tangan menggunakan <i>Machine Learning</i> Syafriyadi Nor, Muhammad Aziz Muslim, Muhammad Aswin | 596 - 608 |
| Model Proses Pengolahan Air Laut Metode <i>Reverse Osmosis</i> memanfaatkan Sumber Energi Sinar Surya Perluhutan Siahaan, Nazaruddin Sinaga, Jaka Windarta | 609 - 623 |

ELKOMIKA:

JURNAL

TEKNIK ENERGI ELEKTRIK, TEKNIK TELEKOMUNIKASI, & TEKNIK ELEKTRONIKA

DAFTAR ISI

Volume 10 Nomor 3 Tahun 2022

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Simulator Pelatihan <i>Caesio-pulmonary Resuscitation</i> (CPR) menggunakan MMA dan FSR | 624 - 638 |
| Erwani Merry Sartika, Novie Theresia Br. Pasaribu, Audyati Gany, Dimitri Jeremy, Che-Wei Lin, Febrian Setiawan | |
| Pembersihan Artefak EOG dari Sinyal EEG menggunakan <i>Denoising Autoencoder</i> | 639 - 651 |
| Hasbian Fauzy Perdhana, Hasballah Zakaria | |
| Sistem Pendinginan Panel Surya dengan Metode Penyemprotan Air dan Pengontrolan Suhu Air menggunakan Peltier | 652 - 663 |
| Eka Purwa Laksana, Oktiviyanto Sanjaya, Sujono, Suwasti Broto, Nifty Fath | |
| Optimasi Penempatan dan Kapasitas DG untuk Memaksimalkan Loadability pada Penyulang Watu Ulo Jember | 664 - 676 |
| Fitriana, Darma Arif Wicaksono, Sofia Ariyani, Herry Setyawan | |
| <i>Multi-Abnormal ECG Signal Classification using Dispersion Entropy and Statistic Feature</i> | 677 - 688 |
| Ervin Masita Dewi, Suci Aulia, Sugondo Hadiyoso | |
| <i>Clustering Fenomena Corona Discharge</i> berdasarkan Suara menggunakan Metode LPC dan <i>Euclidean Distance</i> | 689 - 701 |
| Miftahul Fikri, Christiono, Iwa Garniwa Mulyana K. | |
| Estimasi Utilisasi Prosesor pada Jaringan Interkoneksi Optik menggunakan <i>Regresi Gaussian</i> | 702 - 711 |
| Hilal Hudan Nuha, Aulia Arif Wardana | |
| Sistem Pembangkit Laju-Aliran-Rendah Fluida Cair Presisi Tinggi menggunakan Kendali PID | 712 - 727 |
| Heri Sutanto, Muhammad Sabila Haqqi, Aries Subiantoro, Benyamin Kusumoputro | |
| Optimasi <i>Convolutional Neural Network</i> dan <i>K-Fold Cross Validation</i> pada Sistem Klasifikasi Glaukoma | 728 - 741 |
| Yunendah Nur Fuadah, Ibnu Dawan Ubaidullah, Nur Ibrahim, Fauzi Frahma Taliningsing, Nidaan Khofiya Sy, Muhammad Adnan Pramuditho | |



ELKOMIKA: JURNAL TEKNIK ENERGI ELEKTRIK, TEKNIK TELEKOMUNIKASI, & TEKNIK ELEKTRONIKA

TEKNIK ELEKTRO INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL BANDUNG

P-ISSN : 24599638 <> E-ISSN : 24599638 Subject Area : Engineering

0.939394
Impact Factor

1702
Google Citations

Sinta 2
Current Accreditation

[Google Scholar](#) [Garuda](#) [Website](#) [Editor URL](#)

History Accreditation



Garuda [Google Scholar](#)

Deteksi Suara Corona Discharge berdasarkan Noise menggunakan Metode LPC dan Euclidean Distance

Institut Teknologi Nasional, Bandung [ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika Vol 11, No 1 \(2023\):](#)

[ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektr 72](#)

2023 [DOI: 10.26760/elkomika.v11i1.72](#) [Accred : Sinta 2](#)

Indeks Subjeks dan Indeks Pengarang

Institut Teknologi Nasional, Bandung [ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika Vol 11, No 1 \(2023\):](#)

[ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektr](#)

2023 [DOI: 10.26760/elkomika.v11i1.p](#) [Accred : Sinta 2](#)

Klasifikasi Sinyal EKG menggunakan Ciri Statistik dan Parameter Hjorth dengan SVM dan k-NN

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 1 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 132](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i1.132](#) [Accred : Sinta 2](#)

Sistem Multi Agen untuk Pelayanan Drone pada Groundbase Docking Station

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 4 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 859](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i4.859](#) [Accred : Sinta 2](#)

MPPT Fuzzy Logic dengan Pengendali PI pada Generator Sinkron Magnet Permanen untuk Aplikasi Pembangkit Listrik PikoHidro

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 1 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 146](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i1.146](#) [Accred : Sinta 2](#)

Analisis Stabilitas Transien pada Onshore Windfarm Terhubung VSC-HVDC Sistem Jawa Bali

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 4 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 873](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i4.873](#) [Accred : Sinta 2](#)

Steganography Based on Data Mapping and LSB Substitution With RSS Key Generation

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 1 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 1](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i1.1](#) [Accred : Sinta 2](#)

Pengendalian Simulator Water Supply System menggunakan PID Berdasarkan Identifikasi

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 1 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 213](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i1.213](#) [Accred : Sinta 2](#)

Perbandingan Deteksi Letak Polip pada Citra Colonoscopy menggunakan CNN dengan Arsitektur RetinaNet

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 4 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 946](#)

2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i4.946](#) [Accred : Sinta 2](#)

Perancangan MPPT Modified Incremental Conductance menggunakan Interleaved Boost Converter untuk Reduksi Osilasi

Institut Teknologi Nasional, Bandung [Jurnal Elkomika Vol 10, No 1 \(2022\): ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik](#)

[Elektr 76](#)

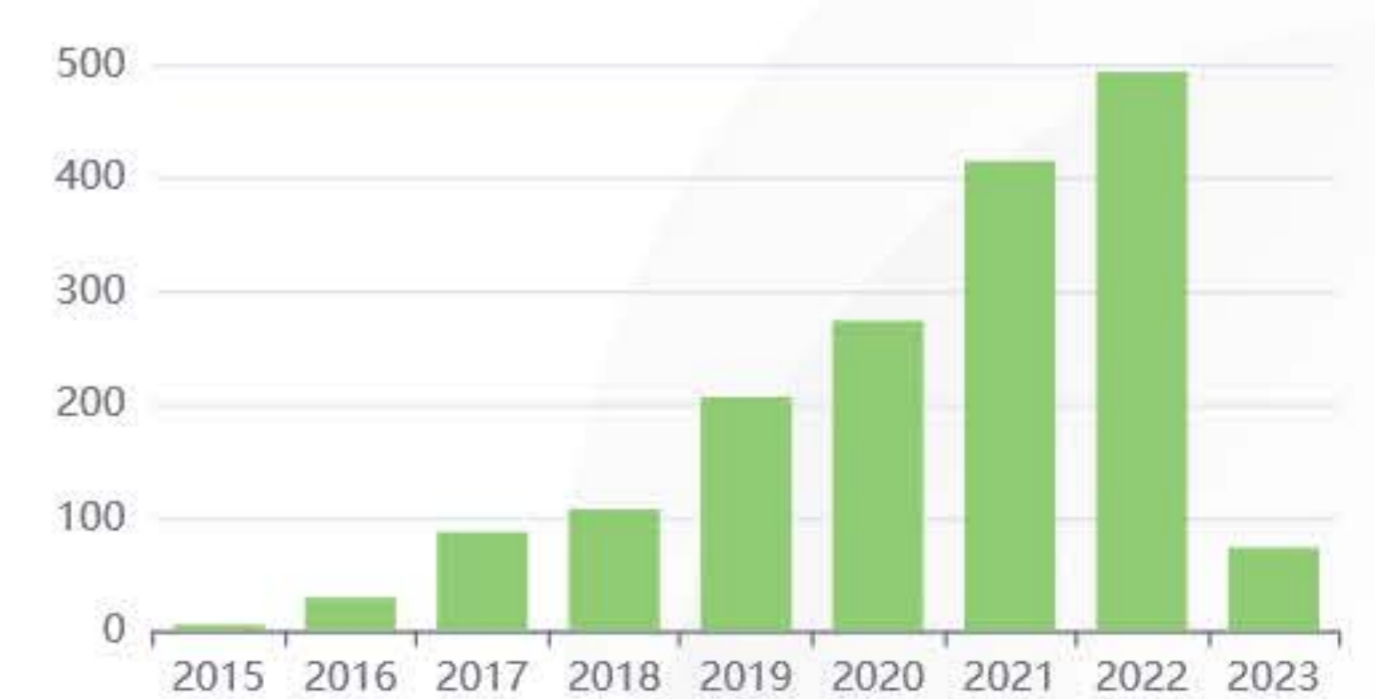
2022 [DOI: 10.26760/elkomika.v10i1.76](#) [Accred : Sinta 2](#)

[View more](#)

Get More with SINTA Insight

[Go to Insight](#)

Citation Per Year By Google Scholar



Journal By Google Scholar

| | All | Since 2018 |
|-----------|------|------------|
| Citation | 1702 | 1571 |
| h-index | 18 | 18 |
| i10-index | 46 | 45 |

Analisis Kinerja *Single User Throughput* 5G NR pada Sel *Indoor* dengan Antena MIMO

DWI ARYANTA

Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email: dwiaryanta@itenas.ac.id

Received 5 Mei 2022 | Revised 25 Mei 2022 | Accepted 13 Juni 2022

ABSTRAK

Teknologi seluler 5G New Radio (NR) melalui penggunaan mmWave dengan bandwidth dan MIMO yang besar dapat memberikan layanan berkecepatan tinggi. Pada penelitian ini, dilakukan analisis Single User Throughput (SUT) layanan teknologi 5G pada sel indoor melalui penerapan konfigurasi bandwidth hingga 100 MHz dan MIMO hingga 16x16. Perhitungan menerapkan formula ETSI dan OFCOM pada numerology 1, 64-QAM, serta target data rate mengacu pada layanan MBB live video 300 MBps, Cloud VR 150 Mbps, Video streaming 4K 50 Mbps, dan industrial control 10 Mbps. Hasil analisis menunjukkan layanan MBB Live Video dapat dipenuhi pada bandwidth 10 MHz MIMO 16x16, bandwidth 40 MHz MIMO $\geq 4x4$, serta seluruh variasi MIMO pada bandwidth 80 MHz dan 100 MHz. Layanan industrial control dapat dipenuhi oleh seluruh kombinasi bandwidth dan MIMO. Pada penggunaan SINR sampai dengan 25 dB, SUT mencapai nilai maksimum konstan pada nilai SINR ≥ 23 dB dengan kondisi nilai efisiensi 4,46 bps/Hz.

Kata kunci: SUT, 5G, new radio, sel indoor, MIMO, bandwidth.

ABSTRACT

5G New Radio (NR) cellular technology through the use of mmWave with large bandwidth and MIMO can provide high-speed services. In this study, a Single User Throughput (SUT) analysis of 5G technology services was carried out on indoor cells through the application of bandwidth configurations up to 100 MHz and MIMO up to 16x16. The calculation applies the ETSI and OFCOM formulas on numerology 1, 64-QAM, and the target data rate refers to the 300 MBps live video MBB service, 150 Mbps Cloud VR, 4K 50 Mbps video streaming, and 10 Mbps industrial control. The results of the analysis show that the MBB Live Video service can be fulfilled at a bandwidth of 10 MHz MIMO 16x16, a bandwidth of 40 MHz MIMO $\geq 4x4$, and all variations of MIMO on a bandwidth of 80 MHz and 100 MHz. Industrial control services can be fulfilled by all combinations of bandwidth and MIMO. In the use of SINR up to 25 dB, SUT reaches a constant maximum value at a SINR value of ≥ 23 dB with an efficiency value of 4.46 bps / Hz.

Keywords: SUT, 5G, new radio, indoor cell, MIMO, bandwidth.

1. PENDAHULUAN

Teknologi seluler 5G *New Radio* (NR) pada implementasinya memerlukan tiga spektrum frekuensi yaitu pada pita frekuensi rendah, pita frekuensi menengah dan pita frekuensi tinggi. Pita frekuensi rendah pada frekuensi kurang dari 1 GHz digunakan untuk perbaikan cakupan layanan khususnya untuk layanan MMTC (*massive IoT* dan *mobile broadband*). Pita frekuensi menengah pada frekuensi 1 – 6 GHz digunakan untuk layanan *mission-critical* dan *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), dan untuk pita frekuensi tinggi menggunakan frekuensi di atas 24 GHz (*mmWave*) untuk dapat memberikan layanan dengan kecepatan yang sangat tinggi **(Puslitbang SDPPI, 2018)**.

Milimeter Wave (*mmWave*) adalah frekuensi dengan panjang gelombang pendek dengan nilai antara 10 sampai 1 milimeter. *Milimeter wave* menempati alokasi pita frekuensi 30 sampai 300 GHz dan umum disebut *Extremely High Frequency* (EHF). Tingginya frekuensi *mmWave* memiliki keuntungan untuk digunakan memberikan layanan transmisi data dengan *throughput* yang tinggi pada *wireless network*. *mmWave* yang menggunakan *bandwidth* dengan lebar kanal yang besar, dapat memberikan layanan kecepatan data setara dengan penggunaan media serat optik untuk melakukan transmisi digital **(Rappaport, dkk, 2013)**.

Solusi untuk menanggulangi keterbatasan frekuensi dalam penerapan teknologi 5G adalah dengan menggunakan frekuensi pada domain tinggi yang disebut dengan *Milimeter Wave* (*mmWave*). Penggunaan frekuensi *mmWave* disimulasikan pada model *indoor office environment*, dimana dengan penempatan *Indoor Hotspot* (InH) pada setiap ruangan dengan ukuran dinding beton 5x5 meter, akan lebih efektif jika menggunakan frekuensi 60 GHz, dibandingkan dengan frekuensi 38 GHz, 28 GHz, dan 5 GHz maupun frekuensi *unlicensed* 2,4 GHz. Rata-rata SIR terbaik sebesar 33,97 dB diperoleh pada frekuensi di 60 GHz, dan rata-rata *received signals* adalah -73,87 dBm. Penggunaan frekuensi rendah 5 GHz dan 2,4 GHz pada sel *indoor* berdampak pada rendahnya nilai rata-rata SIR sebesar 5 dB **(Nugraha, dkk, 2017)**.

Gelombang milimeter radio baru 5G (5G NR *mmWave*) adalah teknologi dengan antarmuka baru yang dikembangkan untuk menjadi perpanjangan dari teknologi 4G yang ada. Target utama 5G adalah memiliki berbagai layanan dengan kecepatan data tinggi, cakupan tinggi, pengurangan penundaan, pengurangan biaya, kapasitas sistem tinggi, dan banyak konektivitas untuk pengguna dimana saja. Ide utama dari 5G adalah untuk memberikan kinerja tinggi mengenai *throughput* dan efisiensi spektral di daerah perkotaan yang padat yang tidak mungkin disediakan oleh jaringan Wi-Fi. Berdasarkan modulasi OFDM, sel 5G dibagi menjadi tiga zona virtual untuk mempelajari kinerja 5G di zona dalam dibandingkan dengan zona luar untuk spektrum berlisensi dan tidak berlisensi. Indikator kinerja yang berbeda dipertimbangkan dalam analisis seperti; probabilitas kerugian, penundaan, *throughput*, serta *bit rate* rata-rata agregat di zona berbeda. Hasil numerik yang diberikan menunjukkan bahwa kinerja 5G selalu lebih baik di zona paling dalam (yaitu *pico*) dibandingkan dengan zona luar (yaitu mikro dan makro), akibatnya, kinerja sel secara keseluruhan juga meningkat. Selain itu, performa 5G dibandingkan dengan performa LTE dengan parameter simulasi yang sama menunjukkan bahwa 5G selalu memberikan kinerja yang lebih baik, terutama di zona paling dalam **(Zreikat, 2019)**.

Penelitian dan pengembangan sistem nirkabel generasi berikutnya, yaitu 5G, telah mengalami pertumbuhan yang luar biasa dalam beberapa tahun terakhir. Pada lapisan fisik (PHY), teknik masif beberapa *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) dan penggunaan pita frekuensi GHz tinggi adalah dua tren yang menjanjikan untuk diadopsi. Pita gelombang milimeter (*mmWave*) seperti 28 GHz, 38 GHz, 64 GHz, dan 71 GHz, yang sebelumnya

dianggap tidak sesuai untuk jaringan seluler komersial, akan memainkan peran penting dalam 5G. Saat ini, sebagian besar penelitian 5G berkaitan dengan algoritma dan implementasi skema modulasi dan pengkodean, teknologi pemrosesan sinyal spasial baru, peluang spektrum baru, pemodelan saluran, *Proof of Concept* (PoC) 5G, dan teknologi pendukung tingkat sistem lainnya. Dalam makalah ini, pertama-tama dilakukan kajian desain perangkat keras peralatan pengguna nirkabel (UE) kontemporer, dan menemukan kendala desain perangkat keras 5G UE yang kritis pada sirkuit dan sistem. Melalui investigasi dan analisis *trade-off* desain tersebut, arsitektur sistem baru yang dapat dikonfigurasi ulang untuk peralatan pengguna seluler 5G, yaitu MIMO berbasis *array* bertahap yang terdistribusi. Terakhir, penghitungan *link budget* dan hasil numerik *throughput* data disajikan untuk evaluasi arsitektur yang diusulkan **(Huo, dkk, 2017)**.

Pengukuran propagasi gelombang milimeter ultra-pita lebar (*mmWave*) dilakukan pada pita frekuensi 28 dan 73 GHz di lingkungan *indoor* pada kampus Universitas New York. Pengukuran tersebut memberikan *path loss* skala besar dan statistik temporal yang akan berguna untuk jaringan seluler *indoor* yang sangat padat dengan penggunaan *mmWave* dimasa mendatang. Hasilnya menunjukkan bahwa model *path loss* skala besar baru yang disediakan di sini lebih sederhana dibandingkan dengan model propagasi *indoor* dari 3GPP dan ITU sebelumnya yang membutuhkan lebih banyak parameter model dan menawarkan akurasi tambahan yang sangat sedikit dan tidak memiliki dasar fisik. Statistik dispersi waktu *multipath* dari sistem *mmWave* menggunakan antena *directional* disajikan menggunakan skenario variasi polarisasi menunjukkan bahwa penyebaran delay kuadrat rata-rata akar *multipath* dapat dikurangi ketika menggunakan sudut pengarah antena pemancar dan penerima yang menghasilkan penerimaan daya terima tertinggi **(Maccartney, dkk, 2015)**.

Saat merencanakan jaringan 5G di pita sub-6 GHz, teknik perencanaan sel yang mirip dengan LTE dapat diterapkan. Melihat lingkungan Australia, *band* n78 (3,3 - 3,8GHz TDD) kira-kira 1 GHz lebih tinggi daripada *band* 2,6 GHz yang digunakan di jaringan LTE yang ada. Hasilnya, jejak cakupan bisa serupa, dan oleh karena itu menempatkan 5G NR bersama pada *base station* LTE yang ada adalah strategi umum untuk peluncuran jaringan awal. Setiap perbedaan dalam cakupan dapat dikompensasikan dengan penguatan *beamforming*, *down tilt* antena yang lebih sedikit, atau peningkatan daya pancar *gNodeB*. Makalah ini menyajikan *link budget* awal untuk layanan data, memberikan prediksi cakupan, dan pengukuran untuk uji coba 5G NR *Non Stand Alone* (NSA) menggunakan frekuensi 3,5 GHz dengan *bandwidth* 60 MHz. Prediksi cakupan dihasilkan menggunakan alat perencanaan RF Atoll yang kemudian dibandingkan dengan pengukuran cakupan dari uji coba **(Curry, dkk, 2020)**.

Rappaport pada tahun 2017 melakukan kajian mengenai fitur sistem pada teknologi seluler 5G menggunakan gelombang milimeter (*mmWave*). Hasil awal menyajikan konsep utama jaringan 5G dan rancangan pemodelan propagasi *multipath* pada jaringan nirkabel untuk aplikasi berlisensi dan tidak berlisensi. Parameter propagasi dan model saluran pada penggunaan frekuensi pada rentang 0,5 – 100 GHz berhasil diperoleh untuk memahami propagasi *mmWave*, seperti *Line-of-Sight* (LOS) probabilitas, *large scale path loss*, dan kerugian penetrasi **(Rappaport, dkk, 2017)**.

Zahid pada tahun 2019 melakukan penelitian melalui simulasi sistem antena MIMO yang menggunakan enam elemen, beroperasi pada pita frekuensi 31,22 - 34,17 GHz dan 31,79 - 33,37 GHz untuk -6 dB dan -10 dB dengan frekuensi resonansi masing-masing 32,56 GHz. Penggunaan pita frekuensi juga mencakup pita 5G yang diusulkan, yaitu 31,8 - 33,4 GHz. Teknologi 5G sangat mementingkan kecepatan transmisi data yang tinggi, serta efisiensi spektrum yang lebih baik. Sistem antena MIMO dapat meningkatkan kapasitas dan kecepatan transmisi dalam sistem komunikasi. Hasil simulasi membantu dalam analisis

beberapa parameter seperti *return loss* dan isolasi antena, dimana didapatkan nilai isolasi antena sebesar 17 dB pada pita frekuensi 31,8 - 33,4 GHz (Zahid, dkk, 2019).

Spektrum frekuensi yang umum untuk teknologi 5G adalah pada 700 MHz, 3,5 GHz dan 26/28 GHz. Saat ini di Indonesia spektrum frekuensi 700 MHz masih digunakan untuk layanan *broadcast* analog. Pita 26/28 GHz di Indonesia sedang tidak alokasikan untuk pengguna, sehingga dapat menjadi alternatif kuat untuk implementasi teknologi 5G. Pita ini menyediakan *bandwidth* yang lebar hanya saja untuk biaya investasi menjadi besar sementara cakupan layanan menjadi sempit (Aryanta, 2021).

Teknologi seluler 5G memberikan layanan *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine-Type Communications* (mMTC) dan *Ultra-reliable Low Latency Communication* (URLLC) dengan *data rate* yang berbeda-beda. Tiga jenis layanan ini membutuhkan *data rate* yang paling rendah mulai dari 10 Mbps dan tertinggi dapat mencapai 20 Gbps. Mengingat kebutuhan layanan pada sel *indoor*, maka diperlukan pengaturan konfigurasi parameter sistem sel *indoor* agar *data rate* menyesuaikan dengan kebutuhan. Bilamana *throughput* yang diberikan lebih kecil dari *data rate* yang dibutuhkan, maka akan terjadi penumpukan pengguna dan menurunkan tingkat kepuasan terhadap layanan yang diberikan. Hal sebaliknya juga bila *throughput* yang diberikan terlalu besar dibandingkan terhadap kebutuhan *data rate* yang rendah, berdampak pada efisiensi yang rendah.

Agar teknologi 5G dapat memberikan *throughput* yang optimum sesuai dengan *data rate* minimal masing-masing layanan, diperlukan pengaturan konfigurasi parameter sehingga menghasilkan nilai SUT yang sesuai. Konfigurasi parameter ini meliputi penggunaan jenis modulasi, *numerology*, *bandwidth*, dan penggunaan MIMO. Pada penggunaan suatu jenis modulasi tertentu dan pilihan *numerology*, *throughput* yang diberikan dapat ditingkatkan dengan melakukan sejumlah modifikasi pada beberapa parameter, seperti *bandwidth* dan penggunaan MIMO. Perencanaan kebutuhan *bandwidth* dan MIMO diperlukan sehingga dapat diketahui bagaimana konfigurasi parameter sistem yang layak dari teknologi 5G yang dapat memberikan layanan yang ditargetkan akan diberikan kepada pengguna.

2. METODE

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan *single throughput* yang mengacu pada standar 3GPP untuk teknologi 5G NR baik pada arah *downlink* (DL). Perhitungan *throughput* dikondisikan pada layanan sel *indoor* yang menerapkan teknologi MIMO. Analisis perhitungan dilakukan dengan menghitung nilai *Single User Throughput* (SUT) maksimum khususnya pada arah DL yang dapat diberikan oleh teknologi 5G menggunakan skema *numerology* $\mu = 1$ dan modulasi 64-QAM, dimana perhitungan *throughput* dikondisikan hanya untuk satu *User Equipment* (UE) yang terhubung ke jaringan 5G. Nilai SUT dihitung untuk arah *downlink* pada nilai *Signal to Interference Noise Ratio* (SINR) di rentang -15 dB sampai 25 dB. Sejumlah skenario dilakukan dengan variasi beberapa parameter yaitu penggunaan jumlah *bandwidth* transmisi dan MIMO. Hasil perhitungan kemudian dilakukan analisis terhadap kesesuaian *Key Performance Indikator* (KPI) beberapa jenis layanan yang disediakan melalui teknologi 5G.

Perhitungan SUT pada sel *indoor* yang dilakukan pada penelitian ini menerapkan beberapa skenario penggunaan sejumlah parameter yaitu penggunaan modulasi 64-QAM, *numerology*, *bandwidth* dan penggunaan MIMO. Jenis layanan teknologi 5G yang menjadi acuan pada perhitungan ini adalah *Mobile Broadband* (MBB) dengan standar kecepatan data 300 MBps, *Cloud Video Reality* (VR) 2K dengan kecepatan standar 150 Mbps, *Video streaming* 4K 3D dengan standar kecepatan data 50 Mbps, dan Layanan *industrial control*

dengan kecepatan 10 Mbps (**HKT-GSA-Huawei, 2019**). Luaran penelitian adalah nilai SUT pada suatu nilai SINR tertentu yang dilakukan melalui kajian bagaimana mengombinasikan parameter *bandwidth* dan penggunaan MIMO.

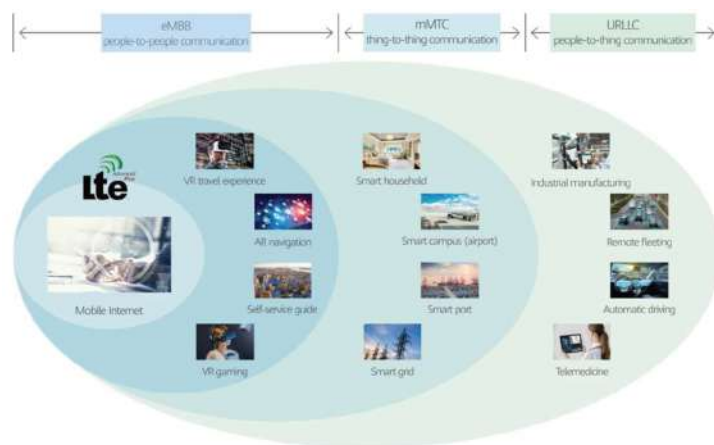
Layanan teknologi 5G memerlukan tiga *layer* yang terdiri dari pita atas (*upper band*) pada frekuensi 26 GHz, pita tengah (*middle band*) pada frekuensi 2,6 GHz, dan pita bawah (*lower band*) pada rentang frekuensi 700 MHz - 800 MHz (**Pertiwi, 2021**). Penelitian ini menggunakan frekuensi kerja pada 2,6 GHz, dengan tujuan untuk memberikan peningkatan kapasitas *throughput*. Mengacu pada ketentuan pengelompokan rentang frekuensi pada teknologi 5G, maka frekuensi 2,6 GHz yang berada pada rentang frekuensi 410 MHz – 7125 MHz terdefinisi pada pita FR1 (**ETSI TS 38.101-1., 2019**). Pita frekuensi tengah berfungsi untuk memberikan *bandwidth* yang lebih lebar untuk kebutuhan eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) dan *mission-critical* (**Puslitbang SDPPI, 2018**).

2.1 Teknologi Seluler 5G

Teknologi 5G mendukung penggunaan *mmWave* yang memungkinkan sinyal dapat dikirimkan pada frekuensi antara 3 GHz hingga 300 GHz (**Nugraha, dkk, 2017**). Teknologi 5G menerapkan penggunaan sejumlah antena pada pengirim dan penerima yang dikenal sebagai MIMO sehingga meningkatkan efisiensi dan kecepatan transmisi. Teknologi seluler 5G memiliki cakupan yang luas dengan menggunakan jaringan heterogen yang mengombinasikan sejumlah sel mikro dalam suatu sel makro (**Admaja, 2015**).

2.2 Layanan Teknologi Seluler 5G

Teknologi seluler 5G memberikan sejumlah peningkatan kinerja dibandingkan dengan teknologi 4G LTE. Teknologi 5G pada intinya memberikan tiga jenis layanan, yaitu *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine-Type Communications* (mMTC) dan *Ultra-reliable Low Latency Communication* (URLLC) (**HKT-GSA-Huawei, 2019**). Gambar 1 memberikan ilustrasi sejumlah ragam layanan teknologi berdasarkan tiga jenis layanan teknologi 5G ini.



Gambar 1. Berbagai Jenis Layanan yang diberikan Melalui Teknologi 5G (HKT-GSA-Huawei, 2019)

eMBB merupakan jenis pengembangan layanan *Mobile Broadband* (MBB) untuk memberikan kinerja yang lebih baik dan pengalaman pengguna dalam skenario seperti *live HD video*, *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR) (**HKT-GSA-Huawei, 2019**). Layanan eMBB memberikan beberapa parameter layanan antara lain (**Javier Campos, 2017**) :

1. Laju data minimum 100 Mbps dan laju data mencapai 10 hingga 20 Gbps.
2. Ukuran sel makro dan sel mikro.

3. Peningkatan kapasitas sampai dengan 10000 kali.
4. Mobilitas *user* hingga kecepatan 500 km/jam.
5. Efisiensi kebutuhan daya jaringan hingga 100 kali.

mMTC umumnya banyak digunakan pada *Internet of Things* (IoT) untuk memperbaiki konektivitas manusia-mesin atau mesin-mesin dan khususnya meningkatkan kapasitas jaringan dan kepadatan koneksi (**HKT-GSA-Huawei, 2019**). Layanan mMTC memberikan beberapa parameter layanan antara lain (**Javier Campos, 2017**) :

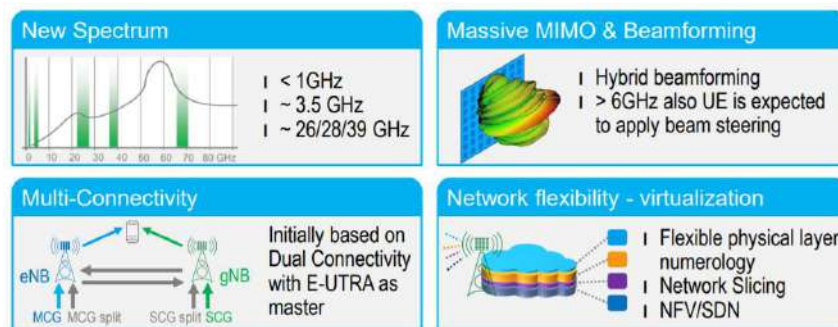
1. Kepadatan perangkat UE yang tinggi, mencapai 2.10^5 hingga 2.10^6 perangkat per Km^2 .
2. Jangkauan yang jauh.
3. Laju data rendah, 1 – 100 kbps.
4. *Machine to Machine* (M2M) dengan biaya yang rendah (*ultra low cost*).
5. Daya tahan *battery* hingga 10 tahun.
6. *Asynchronous Access*.

URLLC umumnya digunakan pada skenario yang memerlukan *ultra-low latency* dan *ultra-high reliability* seperti pada *Internet of Vehicles* (IoV) dan *smart factories* (**HKT-GSA-Huawei, 2019**). Layanan URLLC memberikan beberapa parameter layanan antara lain (**Javier Campos, 2017**) :

1. *Air interface latency* kurang dari 1 ms.
2. *End to end Latency* sebesar 5 ms.
3. *Ultra reliable* dan nilai availabilitas sebesar 99,9999%.
4. Laju data sebesar 50 kbps hingga 10 Mbps.
5. *High speed mobility*.

2.3 Teknologi 5G New Radio (NR)

Konsep 5G NR utamanya didukung oleh empat buah pilar teknologi yaitu *New Spectrum*, *Massive MIMO & Beamforming*, *Multi-Connectivity* dan *Network flexibility-Virtualization* (**Stuhlfauth, 2019**). Adanya empat teknologi pendukung ini memungkinkan teknologi memberikan tiga jenis layanan eMBB, mMTC dan URLLC.



Gambar 2. Empat Pilar Teknologi yang Mendukung Konsep 5G NR (Stuhlfauth, 2019)

5G NR mengimplementasikan teknologi NR Numerology dengan penggunaan sejumlah pilihan jarak *subcarrier* (*Subcarrier Spacing*). Penerapan masing-masing pilihan numerology tidak merata untuk semua kanal fisik. Numerology hanya dapat digunakan pada lapisan fisik tertentu saja, meskipun kebanyakan pilihan numerology dapat diimplementasikan pada hampir ke banyak jenis lapisan fisik. Tabel 1 menampilkan spesifikasi lengkap dari NR Numerology 0 - 5. Nilai numerology berkaitan dengan lebar *Subcarrier Spacing* (SCS)

dengan relasi besarnya SCS bernilai ($2\mu \times 15$) kHz.

Tabel 1. Numerology pada 5G NR (Ranplan Wireless, 2019)

| OFDM Parameter | NR Numerology [μ] | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|------|------------------------|-------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>Subcarrier spacing (SCS)</i> [kHz] | 15 | 30 | 60 | 120 | 240 | 480 |
| <i>Symbol duration</i> [μ s] | 66,7 | 33,3 | 16,6 | 8,33 | 4,17 | 2,08 |
| <i>Nominal CP</i> [μ s] | 4,7 | 2,41 | 1,205 | 0,60 | 0,30 | 0,15 |
| <i>Nominal Max BW</i> [Hz] | 49,5 | 99 | 198 | 396 | 397,4 | 397,4 |
| <i>Max FFT size</i> | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 2048 | 1024 |
| <i>Min scheduling interval</i> [ms] | 1,0 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,0625 | 0,0312 |
| <i>Symbols per slot</i> | 14 | 14 | 14 12 (extended CP) | 14 | 14 | 14 |
| <i>Slots per subframe</i> | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 |
| <i>Slots per frame</i> | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 320 |

2.4 Resource Block

Jumlah *Resource Block* (NRB) untuk sejumlah *numerology* (*Subcarrier Spacing*) sangat bergantung kepada besarnya *bandwidth* transmisi yang digunakan. Tabel 2 berisi detail yang terkait dengan *Subcarrier Spacing* (SCS) dan konfigurasi NRB transmisi maksimum untuk setiap *bandwidth* kanal dari UE (ETSI TS 38.101-1, 2019).

Tabel 2. Konfigurasi NRB terhadap Bandwidth Transmisi Maksimum terhadap SCS

| SCS (kHz) | Jumlah Resource Block (NRB) Sesuai Bandwidth | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz | 25 MHz | 30 MHz | 40 MHz | 50 MHz | 60 MHz | 80 MHz | 90 MHz | 100 MHz |
| 15 | 25 | 52 | 79 | 106 | 133 | 160 | 216 | 270 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 30 | 11 | 24 | 38 | 51 | 65 | 78 | 106 | 133 | 162 | 217 | 245 | 273 |
| 60 | N/A | 11 | 18 | 24 | 31 | 38 | 51 | 65 | 79 | 107 | 121 | 135 |

Antar UE memerlukan adanya nilai minimum *guardband* terhadap frekuensi bersebelahan, dimana nilai *guardband* minimum dan konfigurasi *bandwidth* transmisi yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3 (ETSI TS 38.101-1, 2019).

Tabel 3. Nilai Guardband Minimum antar Kanal Bandwidth UE dan SCS

| SCS (kHz) | Guardband Minimum (kHz) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz | 25 MHz | 30 MHz | 40 MHz | 50 MHz | 60 MHz | 80 MHz | 90 MHz | 100 MHz |
| 15 | 242,5 | 312,5 | 382,5 | 452,5 | 522,5 | 552,5 | 592,5 | 552,5 | 692,5 | N/A | N/A | N/A |
| 30 | 505 | 665 | 645 | 805 | 785 | 945 | 905 | 1045 | 825 | 925 | 885 | 845 |
| 60 | N/A | 1010 | 990 | 1330 | 1310 | 1290 | 1610 | 1570 | 1530 | 1450 | 1410 | 1370 |

Bit rate maksimum yang dapat diberikan pada teknologi 5G dinyatakan dengan Persamaan (1) (ETSI TS 38.306, 2020):

$$R_B = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left[v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right] [MHz] \quad (1)$$

Dimana :

J adalah jumlah *aggregated Component Carriers* (CC).

$v_{Layers}^{(j)}$ adalah jumlah *layer* maksimum.

$Q_m^{(j)}$ adalah derajat modulasi tertinggi.

- $f^{(j)}$ adalah faktor skala (opsi = 1; 0,8; 0,75; dan 0,4).
- R_{max} adalah bilangan bernilai 948/1024.
- μ adalah *Numerology* (0 – 5). **(ETSI TS 38.211, 2020)**.
- T_S^μ adalah rata-rata periode simbol OFDM ($T_S^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$).
- $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ adalah alokasi jumlah *Resource Block* (RB).
- $OH^{(j)}$ adalah *overhead* dengan nilai:
 - 0,14 untuk rentang frekuensi FR1 arah DL
 - 0,18 untuk rentang frekuensi FR2 arah DL
 - 0,08 untuk rentang frekuensi FR1 arah UL
 - 0,10 untuk rentang frekuensi FR2 arah UL

Jumlah maksimum *Component Carriers* (CC) yang dapat digunakan adalah sebanyak enam belas dengan *bandwidth* maksimum sebesar 400 MHz. Setiap *Resource Block* (RB) terdiri atas dua belas *subcarrier*, dan jumlah *subcarrier* keseluruhan yang dapat digunakan adalah maksimum sebanyak 3300 **(Javier Campos, 2017)**. Persyaratan di seluruh spesifikasi RF dalam banyak kasus ditentukan secara terpisah untuk rentang frekuensi (FR) yang berbeda. Rentang frekuensi dimana NR dapat beroperasi menurut versi spesifikasi ini diidentifikasi sebagai FR1 (410 – 7125 MHz) dan FR2 (24250 – 52600 MHz) **(ETSI TS 38.101-1, 2019)**.

Kinerja suatu BS yang memberikan layanan data kepada *user* dinyatakan dengan *Single User Throughput* (SUT). Besarnya SUT dapat dihitung menggunakan Persamaan (2) **(Ofcom.org, 2019)**. Pada Persamaan (2) ini, nilai SUT sudah memperhitungkan penggunaan jumlah MIMO pada sistem.

$$SUT = S_{eff} \times SCS \times NRB \times subcarrier \times v_{layers} \times DL_{ratio} \tag{2}$$

Dimana:

- S_{eff} = efisiensi spektral per layer, $S_{eff} = \alpha^2 \text{Log}(1 + SINR)$
- α = alpha shannon parameter
- SINR = *Signal to Interference Noise Ratio* (linier)
- SCS = *Subcarrier spacing*
- NRB = Jumlah *Resource Block*
- v_{layers} = jumlah *layer* yang digunakan
- DL_{ratio} = rasio *bit rate* arah DL terhadap UL

Nilai S_{eff} pada Persamaan (2) dibatasi oleh batas maksimum efisiensi spektral per *bandwidth* transmisi pada kondisi puncak (100%) yang ditentukan menurut Persamaan (3) **(Ofcom, 2019)**. Nilai SE pada Persamaan (3) menjadi pembatas bilamana nilai S_{eff} mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan nilai SINR.

$$SE = \frac{R_B}{(SCS \times NRB \times 12 \times v_{layers} \times DL_{ratio})} \tag{3}$$

Dimana:

- R_B = *Bit rate* hasil perhitungan melalui Persamaan (1)

Tabel 4. Bit Rate per Layer dan Efisiensi Spektral (Stuhlfauth, 2019)

| Rentang Frekuensi | SCS (Khz) | Bandwidth (MHz) | Bit Rate per Layer (Mbps) | | Efisiensi Spektral (bps/Hz) | |
|-------------------|-----------|-----------------|---------------------------|-------|-----------------------------|------|
| | | | DL | UL | DL | UL |
| FR1 | 15 | 50 | 288,9 | 309,1 | 5,78 | 6,18 |
| FR1 | 30 | 100 | 584,3 | 625 | 5,84 | 6,25 |

| | | | | | | |
|------------|-----|-----|-------|-------|------|------|
| FR1 | 60 | 100 | 577,8 | 618,1 | 5,78 | 6,18 |
| FR2 | 60 | 200 | 1080 | 1180 | 5,40 | 5,90 |
| FR2 | 120 | 400 | 2150 | 2370 | 5,38 | 5,93 |

Pada tahun 2019, ROHDE & SCHWARZ menyampaikan hasil pengujian teknologi 5G NR terkait dengan *bit rate* 5G per *layer* yang dipaparkan melalui "*5G New Radio Fundamentals, procedures, testing aspects*". Pengujian *bit rate* dan efisiensi spektral maksimum untuk arah DL dan UL menggunakan modulasi 256-QAM tanpa MIMO dimana hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan simulasi perhitungan nilai SUT mengacu pada variasi pada beberapa parameter sistem. Perhitungan nilai SUT dilakukan hanya pada arah DL mengingat arah *downlink* memiliki peran yang sangat penting dalam memberikan layanan pengiriman data dengan kapasitas yang besar. Pada penelitian ini *numerology* yang dipilih adalah $\mu = 1$, dipilih beberapa parameter yang bersifat konstan antara lain :

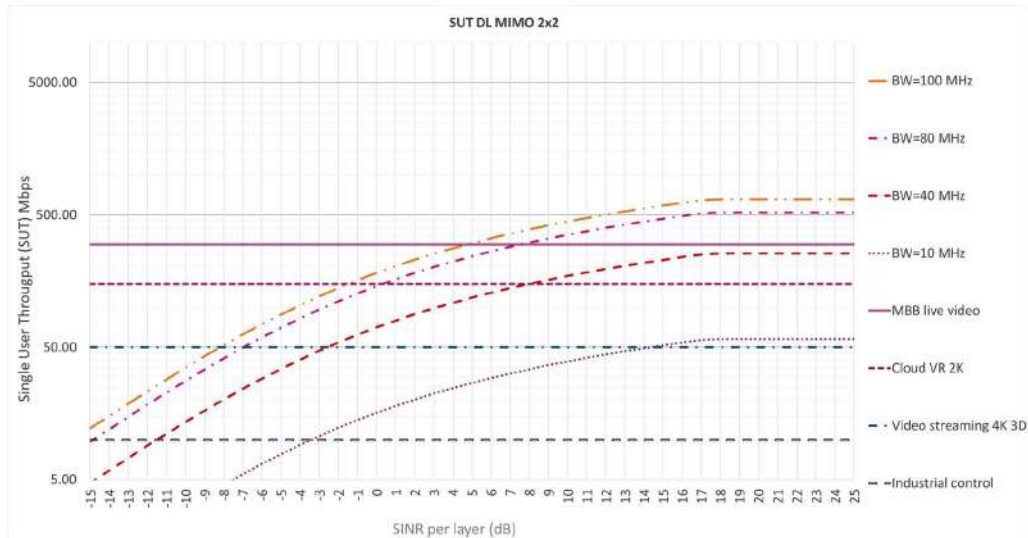
1. SCS = 30 kHz (FR1)
2. Modulasi QAM
3. SINR rentang -25 dB hingga 40 dB
4. Faktor skala ($f^{(j)}$) = 1
5. *Downlink Ratio* (DL_{ratio}) = 75%
6. *Overhead* sebesar 0,14

Untuk melakukan analisis kinerja SUT 5G NR pada *numerology* $\mu = 1$ ini, dilakukan melalui variasi MIMO dan variasi *bandwidth*. Pada perhitungan ini menggunakan modulasi 64 QAM, empat variasi MIMO yaitu 2x2; 4x4; 8x8; dan 16x16, dan empat variasi *bandwidth* 10 MHz; 40 MHz; 80 MHz dan 100 MHz.

3.1 Perhitungan SUT

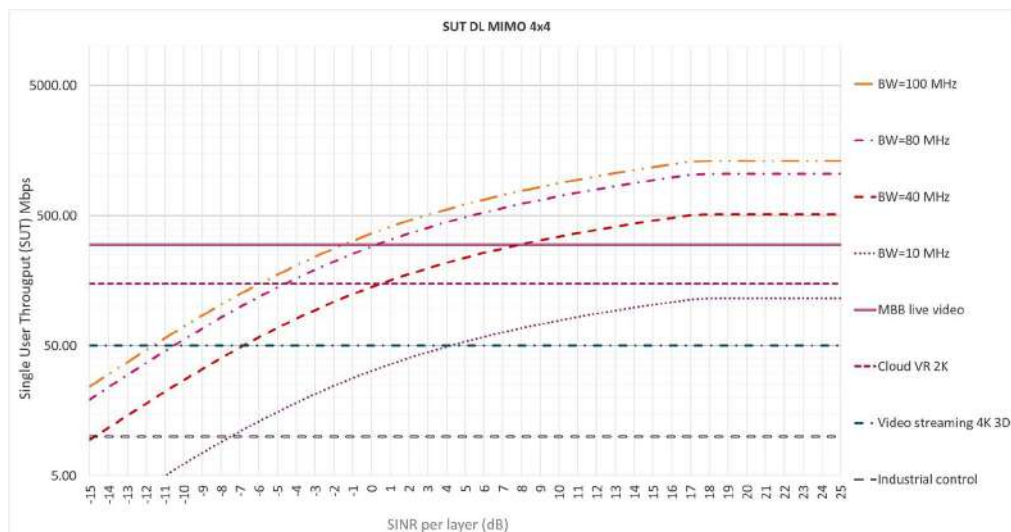
Perhitungan SUT pada penelitian ini akan melakukan perbandingan terhadap sejumlah layanan teknologi 5G yang mewakili sejumlah batasan *data rate* minimum yang distandarkan. Adapun layanan yang akan dijadikan acuan antara lain :

1. *Mobile Broadband* (MBB) *live video* = 300 Mbps.
2. *Cloud Video Reality* (VR) (kualitas 2K@90fps) = 150 Mbps.
3. *Video Streaming* 4K 3D (kualitas 1080p@60fps) = 50 Mbps.
4. *Industrial Control* (kualitas 720p@30fps) = 10 Mbps.

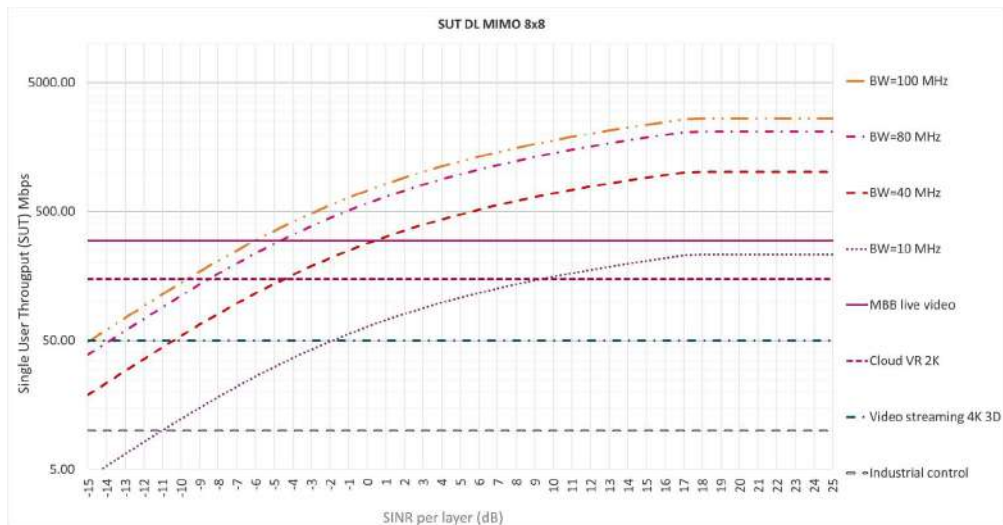


Gambar 3. SUT Arah *Downlink* pada MIMO 2x2

Pada penggunaan MIMO 2x2 dengan *bandwidth* 10 MHz, layanan *Industrial Control* dan layanan *Video Streaming 4K 3D* sudah dapat dilayani, namun belum mampu memberikan layanan *Cloud VR* dan MBB seperti yang terlihat pada Gambar 3. Penggunaan *bandwidth* 40 MHz dapat meningkatkan kecepatan transmisi data hingga dapat memberikan layanan *Cloud VR*, namun masih belum dapat memberikan layanan MBB. Penggunaan MIMO 2x2 dengan *bandwidth* 80 MHz dan 100 MHz memiliki kualitas yang lebih baik sehingga mampu memberikan seluruh layanan hingga MBB *live video* dengan laju data minimum 300 Mbps. Pada hasil ini terlihat juga untuk penggunaan *bandwidth* yang lebih tinggi memerlukan SINR yang lebih rendah untuk dapat memberikan suatu layanan yang sama.

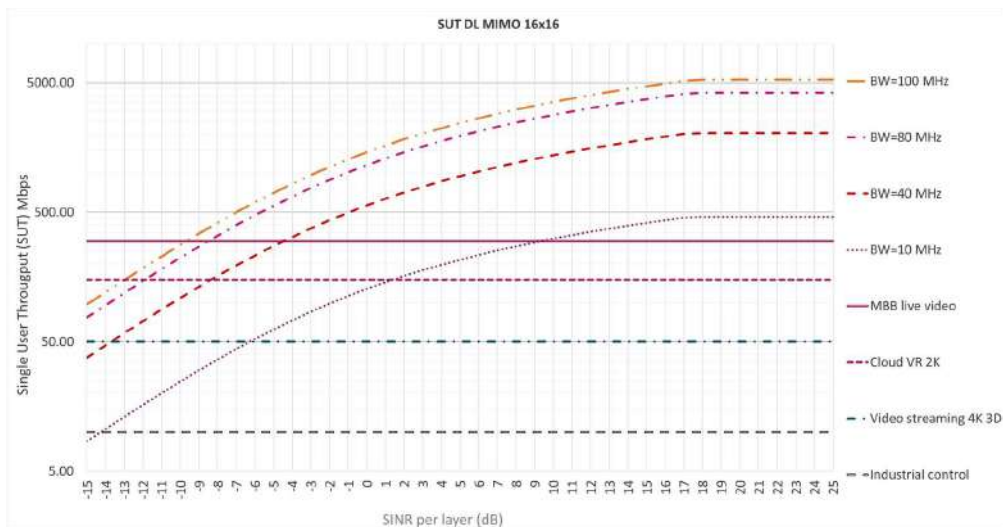


Gambar 4. SUT Arah *Downlink* pada MIMO 4x4



Gambar 5. SUT Arah *Downlink* pada MIMO 8x8

Penggunaan MIMO berikutnya adalah berukuran 4x4, *bandwidth* 10 MHz masih melayani dua jenis layanan seperti pada MIMO 2x2 sebelumnya seperti yang dapat diamati pada Gambar 4. Penggunaan MIMO 4x4 dengan *bandwidth* ≥ 40 MHz baru dapat memberikan seluruh layanan yang diujikan. Jenis layanan tertinggi MBB dengan kebutuhan laju data minimum 300 Mbps baru dapat diberikan pada penggunaan *bandwidth* 10 MHz pada saat digunakan MIMO 16x16 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. SUT Arah *Downlink* pada MIMO 16x16

Untuk seluruh variasi *bandwidth* yang digunakan, SUT mencapai nilai maksimum konstan pada nilai SINR ≥ 23 dB karena pada kondisi telah mencapai nilai efisiensi maksimum (100%) pada nilai 4,46 bps/Hz. Tabel 5 menampilkan nilai SUT maksimum pada SINR ≥ 23 dB untuk setiap *bandwidth* dan penggunaan MIMO. Pada skenario pertama ini dapat disimpulkan bahwa SUT arah DL ditentukan oleh konfigurasi penggunaan MIMO dan *bandwidth* yang nilainya berbanding lurus. SUT akan meningkat bilamana digunakan MIMO yang besar atau *bandwidth* yang lebar. Selain berdampak kepada SUT, peningkatan nilai

MIMO dan *bandwidth* akan menekan kebutuhan nilai SINR pada suatu kondisi tertentu pada hubungan UE dengan *base station* yang memberikan layanan.

Tabel 5. Nilai SUT Tertinggi untuk Setiap Penggunaan *Bandwidth* dan MIMO

| <i>Bandwidth</i> (MHz) | Nilai SUT Tertinggi (MHz) | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | MIMO 2x2 | MIMO 4x4 | MIMO 8x8 | MIMO 16x16 |
| 10 | 57,78 | 115,57 | 231,13 | 462,26 |
| 40 | 255,21 | 510,42 | 1020,83 | 2041,66 |
| 80 | 522,45 | 1044,91 | 2089,82 | 4179,63 |
| 100 | 657,28 | 1314,56 | 2629,13 | 5258,25 |

Untuk rentang SINR yang digunakan pada pengujian (maksimum sampai dengan 25 dB), layanan *Industrial Control* (10 Mbps) dan *Video Streaming* 4K 3D (50 Mbps) dapat dilayani dengan seluruh variasi *bandwidth* dan MIMO, mengingat SUT terkecil sesuai pada Tabel 5 adalah sebesar 57,78 Mbps. Layanan *Cloud VR* (150 Mbps) baru mulai dapat dilayani melalui penggunaan *bandwidth* 10 Mhz melalui MIMO 8x8. Untuk Layanan dengan *data rate* tertinggi 300 Mbps pada layanan MBB *Live Video* dapat dilayani melalui penggunaan *bandwidth* 10 MHz dengan MIMO 16x16, *bandwidth* 40 MHz dengan MIMO $\geq 4x4$, serta seluruh variasi MIMO pada *bandwidth* 80 MHz dan 100 MHz.

4. KESIMPULAN

Nilai SUT sangat bergantung dari kombinasi parameter penggunaan *bandwidth* transmisi dan MIMO, dimana penggunaan *bandwidth* dan MIMO berbanding lurus dengan nilai SUT. Pada penggunaan modulasi 64-QAM SUT mencapai nilai maksimum konstan pada nilai SINR ≥ 23 dB dengan kondisi nilai efisiensi maksimum 4,46 bps/Hz. Layanan *Industrial Control* (10 Mbps) dan *Video Streaming* 4K 3D (50 Mbps) dapat dipenuhi melalui seluruh variasi *bandwidth* dan MIMO yang digunakan. Layanan *Cloud VR* (150 Mbps) dapat diberikan melalui seluruh kombinasi *bandwidth* ≥ 40 MHz pada semua kombinasi MIMO, sedangkan untuk *bandwidth* 10 MHz baru dapat dipenuhi pada penggunaan MIMO 8x8. Untuk Layanan dengan *data rate* tertinggi 300 Mbps pada layanan MBB *Live Video* dapat dilayani melalui penggunaan *bandwidth* 10 MHz dengan MIMO 16x16, *bandwidth* 40 MHz dengan MIMO $\geq 4x4$, serta seluruh variasi MIMO pada *bandwidth* 80 MHz dan 100 MHz.

DAFTAR RUJUKAN

- Admaja, A. F. S. (2015). Kajian Awal 5G Indonesia. *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, 13(2), 97-114. <http://dx.doi.org/10.17933/bpostel.2015.130201>.
- Aryanta, Dwi. (2021). Analisis Prediksi Path Loss Teknologi Seluler 5G Pada Sel Micro Urban Wilayah Kota Bandung. *ELKOMIKA*, 9(3).
- Curry, dkk. (2020). 5G Coverage, Prediction, and Trial Measurements. *ArXiv*, *abs/2003.09574*.
- ETSI TS 38.306. (2020). 5G NR User Equipment (UE) Radio Access Capabilities. *3GPP*, *Technical Specification 38.306 version 16.1.0 Release 16*.

- ETSI TS 38.211. (2020). 5G NR Physical channels and modulation. *3GPP, Technical Specification 38.211 version 16.2.0 Release 16*.
- ETSI TS 38.101-1. (2019). 5G NR User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone. *3GPP, Technical Specification 38.101-1 version 15.5.0 Release 15*.
- ETSI TS 38.101-2. (2020). NR User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone. *3GPP, Technical Specification 38.101-2 version 17.0.0 Release 17*.
- HKT-GSA-Huawei. (2019). Indoor 5G Scenario Oriented White Paper. *Hong Kong's premier telecommunications - Global mobile Suppliers Association – Huawei*.
- Huo, Y., Dong, X. and Xu, W.. (2017). 5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design. *IEEE Access*, 5, (pp. 13992-14010).
- Javier Campos. (2017). Understanding the 5G NR Physical Layer. *Keysight Technologies*.
- Maccartney, dkk. (2015). Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks. *IEEE Access*, 3, (pp. 2388-2424).
- Nugraha, dkk. (2017). Simulasi Penggunaan Frekuensi Milimeter Wave Untuk Akses Komunikasi Jaringan 5G Indoor. *INFOTEL*, 9(1), 24-30.
- Ofcom. (2019). Single User Throughput in 5G NR. Retrieved from https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/file/0033/195549/sut-model-700mhz-3.6-3.8ghz-spectrum.
- Pertiwi. (2021). Kominfo Sebut Frekuensi 2,3 GHz Bukan untuk 5G, Lantas Mana yang Ideal?. Retrieved from <https://tekno.kompas.com/read/2021/02/03/14120067/kominfo-sebut-frekuensi-23-ghz-bukan-untuk-5g-lantas-mana-yang-ideal?page=all>.
- Puslitbang SDPPI. (2018). Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Layanan 5G Indonesia. *Puslitbang Sumber Daya, Perangkat, dan Penyelenggaraan Pos dan Informatika, Badan Penelitian dan Pengembangan SDM, Kementerian Komunikasi dan Informatika*.
- Ranplan Wireless. (2019). 5G New Radio Network Planning, Whitepaper. *Ranplan Wireless Network Design Ltd*.
- Rappaport, dkk. (2013). Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!. *IEEE Access*, 1, (pp. 335-349).
- Rappaport, dkk. (2017). Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on*

- Antennas and Propagation*, 65(12), (pp. 6213-6230).
- Stuhlfauth, Reiner. (2019). 5G New Radio Fundamentals, procedures, testing aspects. ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co.
- Zahid, M., Shoaib, S. and Rizwan, M.. (2019). Design of MIMO Antenna System for 5G Indoor Wireless Terminals. *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, (pp. 1-4).
- Zreikat A.I., Mercan S. (2019). Performance Study of 5G Downlink Cell. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 11660. Springer, Cham.

INDEKS SUBJEKS

5G, 500
air bersih, 609
Akuisisi Kedalaman, 624
akurasi, 529
akurasi, 581
AlexNet, 728
Algoritma PSO, 664
Antena Mikrostrip, 555
Artefak EOG, 639
bandwidth, 500
Building, 514
citra fundus, 728
CO₂, 609
convolutional neural network (CNN), 728
corona discharge, 689
Denoising Autoencoder, 639
Dispersion Entropy, 677
Double E-shaped, 555
EEG, 639
EKG, 677
Energi Terbarukan, 664
Euclidean distance, 689
Firebase, 568
Frekuensi 3,3 GHz, 555
FSR 406, 624
glaukoma, 728
hand gesture recognition, 596
HCI, 596
instalasi uji, 529
interkoneksi optik, 702
Internet of Things, 581
Irigasi Tetes, 568
IoT, 568
kalibrasi, 712
kegagalan isolasi, 689
Kelembaban, 568
kelembapan media, 581
kendali PID, 712
ketidakpastian pengukuran, 712
klasifikasi, 677
laju aliran rendah, 712
linear predictive coding, 689
Loadability, 664
machine learning, 596
membrane, 609
microgreen, 581
MIMO, 500
MMA7361, 624
Modbus TCP, 514
Modulasi Adaptif, 544
MPU-6050, 596
new radio, 500
Node-RED, 514
panel surya, 652
peltier, 652
Pembangkit Tersebar (DG), 664
pendingin, 652
peralatan infus medis, 712
Pergeseran Doppler, 544
perhitungan otomatis, 529
Pelatihan CPR, 624
pola, 596
Random Forest Regression, 544
Raspberry Pi, 514
regresi Gaussian, 702
Return Loss, 555
reverse osmosis, 609
sayuran, 581
sel indoor, 500
sel surya, 609
semprotan air, 652
Spreadsheet, 568
statistik, 677
SUT, 500
tegangan tinggi, 689
tekanan, 529
Utilisasi prosesor, 702
Voltage Stability, 664
WiMax, 555
WSN, 514

INDEKS PENGARANG

- Aisyah Novfitri, 544
Aries Subiantoro, 712
Armanda Suryaningrat, 568
Audyati Gany, 624
Aulia Arif Wardana, 702
Benyamin Kusumoputro, 712
Che-Wei Lin, 624
Choirina Rachma Nur Octavina, 555
Christiono, 689
Danny Kurnianto, 568
Darma Arif Wicaksono, 664
Dimitri Jeremy, 624
Dudi Adi Firmansyah, 529
Dwi Aryanta, 500
Eka Purwa Laksana, 652
Endang Priyatna, 529
Ervin Masita Dewi, 677
Erwani Merry Sartika, 624
Fathurrozaq Fadhlhan, 581
Fauzi Frahma Taliningsing, 728
Febrian Setiawan, 624
Fitriana, 664
Hasballah Zakaria, 639
Hasbian Fauzy Perdhana, 639
Helmy Widyantara, 581
Heri Sutanto, 712
Herry Setyawan, 664
Hilal Hudan Nuha, 702
Ibnu Dawan Ubaidullah, 728
Iwa Garniwa Mulyana K., 689
Jaka Windarta, 609
Lutfi Rohman, 555
Mas Aly Afandi, 581
Miftahul Fikri, 689
Muhammad Adnan Pramuditho, 728
Muhammad Aswin, 596
Muhammad Aziz Muslim, 596
Muhammad Sabila Haqqi, 712
Mutmainnah, 555
Nazaruddin Sinaga, 609
Nazmia Kurniawati, 544
Nidaan Khofiya Sy, 728
Nifty Fath, 652
Novie Theresia Br. Pasaribu, 624
Nur Ibrahim, 728
Nur Wisma Nugraha, 514
Oktiviyanto Sanjaya, 652
Perluhutan Siahaan, 609
Raditya Artha Rochmanto, 568
Raditya Artha Rochmanto, 581
Rohim Aminullah Firdaus, 555
Sarosa Castrena Abadi, 514
Sayyid Al Habbib Ahmad, 529
Siti Aminah, 514
Sofia Ariyani, 664
Suci Aulia, 677
Sugondo Hadiyoso, 677
Sujono, 652
Suprijanto, 529
Suwasti Broto, 652
Syafriyadi Nor, 596
Vera Firmansyah, 529
Yuli Kurnia Ningsih, 544
Yunendah Nur Fuadah, 728

PETUNJUK PENULISAN NASKAH

Jurnal Ilmiah ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika telah **Terakreditasi Peringkat 2 sesuai dengan SK No. 30/E/KPT/2018** pada tanggal 24 Oktober 2018, dan **Peringkat 2 sesuai dengan SK No. 36/E/KPT/2019**. Jurnal ini sepenuhnya diperiksa oleh Redaksi Ahli yang berkompeten di bidangnya masing – masing. Redaksi menerima artikel ilmiah berupa hasil penelitian, gagasan, dan konsepsi dalam ilmu pengetahuan dan teknologi. Artikel Jurnal ELKOMIKA dalam versi cetak telah di-online-kan menggunakan *Open Journal System* (OJS) pada <http://ejournal.itenas.ac.id/index.php/elkomika>.

Pemasukan Naskah

1. Penulis dapat mengunduh *template* jurnal di menu *template* pada *Open Journal System* (OJS) <http://ejournal.itenas.ac.id/index.php/elkomika>.
2. Naskah yang telah disesuaikan dengan *template* jurnal berupa *softcopy* dapat diunggah melalui OJS setelah melakukan registrasi terlebih dahulu.
3. Naskah tulisan harus asli, belum pernah dimuat di media lain, atau tidak sedang dalam proses untuk dimuat di media lain.
4. Naskah pertama kali akan diperiksa berdasarkan kesesuaian *template* oleh Pemimpin Redaksi, dan juga akan dicek tingkat Plagiasi dengan *software iThenticate*.
5. Seluruh naskah yang masuk ke redaksi akan diperiksa oleh Redaksi Ahli sesuai dengan bidang kajian naskah. Aspek yang diperiksa menyangkut kesahihan informasi, kontribusi substantif terhadap bidang kajian, serta kejelasan dan kualitas presentasi naskah.
6. Naskah yang disajikan tidak sesuai dengan ketentuan jurnal akan dikembalikan.

Ketentuan Naskah

1. Naskah diketik dengan menggunakan komputer dalam format MS Word, dengan kertas berukuran A4, dan berjarak 1 spasi. Font yang digunakan adalah Tahoma untuk semua *style* dengan ukuran 11. Jumlah halaman penulisan adalah antara 10 – 15 halaman, disertai abstrak (maksimum 160 kata) dan kata kunci (5 - 6 kata) dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia dengan menggunakan huruf miring. Naskah diberi nomor halaman.
2. Naskah tulisan dapat ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris. Bila menggunakan bahasa Indonesia diharapkan memperhatikan pedoman dan istilah yang telah dibakukan. Bila terpaksa menggunakan istilah asing, hendaknya digunakan huruf miring pada kata tersebut.
3. Naskah disusun dengan urutan: Judul, nama penulis (tanpa gelar), instansi tempat bekerja, dan alamat email, abstrak dan kata kunci (Indonesia dan Inggris), pendahuluan, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, kesimpulan dan saran, dan daftar rujukan. Jika penulis lebih dari satu orang, nama penulis dicantumkan berurutan ke samping, dengan nama penulis utama dicantumkan paling awal.
4. Naskah dapat dilengkapi dengan tabel, grafik, gambar, dan foto dalam format hitam-putih dengan ukuran 10. Tabel, grafik, gambar, dan foto harus diberi judul yang singkat dan jelas, dan masing-masing diberi nomor urut yang sesuai pada isi naskah. Penulisan daftar rujukan **wajib** menggunakan **reference tool**, seperti Mendeley, EndNote, Reference in MS Word, dan lainnya, serta **diurutkan sesuai abjad** dari A sampai Z.
5. Redaksi berhak memperbaiki tata bahasa dari naskah yang akan dimuat tanpa mengubah maksud isinya.
6. Daftar rujukan minimal 15 buah yang berisi hanya yang dirujuk dalam tulisan saja dengan tata cara penulisan:
Atzori, L. & Andreas (2002). Performance Analysis of Fractal Modulation Transmission over Fast-Fading Wireless Channels. *Journal IEEE Transactions on Broadcasting*. 48(2), 103-110.
Bohmer, M. (2012). *Beginning Android ADK with Arduino*. New York: Apress.
Meier, R. (2012). *Professional Android™ 4 Application Development*. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc.
Zeng, G., & Qiu, Z. (2008). Audio Watermarking in DCT. *International Conference on Signal Processing*, (pp. 2193-2196).
Mac, D. (1992). *Post-Modernism and Urban Planning*. Dipetik pada 25 Juni 2010 dari <http://www3.sympatico.ca/david.macleod/POMO.HTM>
7. Contoh penulisan rujukan pada artikel adalah ".....Pada tahun 2012, penelitian yang dilakukan oleh Meier (**Meier, 2012**) dan (**Atzori, dkk, 2002**) timnya, mengirimkan data dengan kecepatan tinggi....."



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Institut Teknologi Nasional

•
Gedung 20 Jl. P.H.H. Mustofa 23
Bandung 40124
Telp. (022) 7272215 (ext. 206)
Fax. (022) 7202892
Email: jte.itenas@itenas.ac.id

