



# Analisis Performa Orbital Angular Momentum-Index Modulation Komunikasi Jarak Dekat 6G Waveform

Teguh Yoga Putra<sup>1</sup>, Yudi Sutanto<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Informatika Universitas AMIKOM Yogyakarta, Jl. Ringroad Utara, Condongcatur, Depok, Sleman, Yogyakarta, Kode Pos 55283, Indonesia.

**Abstrak**– Saat ini, komunikasi nirkabel sedang bermigrasi dari 5G ke 6G. Hal ini berlangsung dikarenakan penerapan baru dari teknologi *Sensory Transmission*, *Intelligent Transportation System (ITS)*, dan *Digital Twin*. Masalah yang muncul dari penerapan migrasi ini adalah batasan pita yang diacu pada peraturan diatas, *reliable link range* atau berapa jarak bahwa komunikasi berhasil dilakukan, dan peningkatan jumlah pengguna yang akan dilayani. Penelitian ini menggunakan hasil performa *Orbital Angular Momentum-Index Modulation (OAM-IM)* yang dibandingkan dengan *Orthogonal Frequency Division (OFDM)* untuk komunikasi jarak dekat untuk tiap *Bit Error Rate (BER)* pada jarak yang telah disebutkan pada gambaran umum. Metode *OAM-IM* dapat menghasilkan nilai *BER* yang lebih rendah dibanding dengan metode *OFDM* melalui analisis statistik deskriptif. Hasil simulasi dijabarkan dalam bentuk tabel dan bagan dan dibandingkan *BER* dari kedua metode tersebut yang lebih rendah. Rata-rata *BER OFDM* adalah 0.486818 sedangkan *BER* yang lebih rendah tercatat pada metode *OAM-IM* sebesar 0.314013 untuk simulasi yang diajukan.

**Kata Kunci:** Orbital Angular Momentum-Index Modulation; OAM-IM; Orthogonal Frequency Division; OFDM; Bit Error Rate; BER; Sensory Transmission; Intelligent Transportation System; ITS; Digital Twin; 5G; 6G

**Abstract**–Currently, wireless communication is migrating from 5G to 6G. This is happening due to the new application of Sensory Transmission technology, Intelligent Transportation System (ITS), and Digital Twin. The problems that arise from the implementation of this migration are the band limits referred to in the regulations above, the reliable link range or the distance that communication is successful, and the increase in the number of users to be served. This study uses the performance results of Orbital Angular Momentum-Index Modulation (OAM-IM) compared to Orthogonal Frequency Division (OFDM) for short distance communication for each Bit Error Rate (BER) at the distances mentioned in the general description. The OAM-IM method can produce lower BER values than the OFDM method through descriptive statistical analysis, The simulation results are described in the form of tables and charts and compared to the lower BER of the two methods. The average BER of OFDM is 0.486818 while a lower BER is recorded in the OAM-IM method of 0.314013 for the proposed simulation.

**Keywords:** Orbital Angular Momentum-Index Modulation; OAM-IM; Orthogonal Frequency Division; OFDM; Bit Error Rate; BER; Sensory Transmission; Intelligent Transportation System; ITS; Digital Twin; 5G; 6G

## 1. PENDAHULUAN

Saat ini, komunikasi nirkabel sedang bermigrasi dari 5G ke 6G [1]-[4]. Hal ini berlangsung dikarenakan penerapan baru dari teknologi *Sensory Transmission*, *Intelligent Transportation System (ITS)*, dan *Digital Twin* [5]-[7]. Dalam konteks *ITS*, penggunaan komunikasi jarak dekat telah diatur dalam Peraturan Menteri Komunikasi Dan Informatika Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2019 Tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio Berdasarkan Izin Kelas menyatakan bahwa Pasal 1 Ayat 12 Alat dan/atau perangkat Telekomunikasi *Dedicated Short Range Communication* yang selanjutnya disebut dengan Alat dan/atau Perangkat Telekomunikasi *DSRC* adalah alat dan perangkat sistem transportasi cerdas (*intelligent transport system*) mengacu pada standar *IEEE 802.11* dan bertujuan untuk meningkatkan *traffic management*, keselamatan transportasi, dan meningkatkan sistem komunikasi cerdas antar Kendaraan (*vehicle to vehicle - V2V*) dan Kendaraan ke Infrastruktur Lalulintas (*Vehicle to Infrastructure - V2I*) [8].

Masalah yang muncul dari penerapan migrasi ini adalah batasan pita yang diacu pada peraturan diatas, *reliable link range* atau berapa jarak bahwa komunikasi berhasil dilakukan [9], dan peningkatan jumlah pengguna yang akan dilayani [10]. Jumlah pengguna jaringan jika dilihat dalam konteks *ITS* akan bersamaan berkembang dan besar jumlah setara pengguna kendaraan di jalan raya. Sebelum memecahkan masalah diatas,

perlu diketahui analisis performa dari komunikasi sinyal ini sehingga dapat diketahui batasan teknologi untuk penerapan komunikasi jarak dekat.

Komunikasi jarak dekat 5G memiliki metode pengolahan *Orbital Angular Momentum (OAM)*. Dibanding dengan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, metode *OAM* yang lebih efisien secara penggunaan daya dan banyaknya data yang dapat ditransfer [11], untuk fungsi tahan interferensi yang sama. Namun, kelemahan dari metode *OAM* adalah besarnya antena dan ruang yang digunakan yang mana menyebabkan konsumsi tenaga *RF* lebih boros, hal ini menjadi masalah ketika diterapkan pada *ITS* yang memiliki daya listrik yang terbatas. Maka dari itu, *Index Modulation (IM)* digabungkan dengan *OAM* untuk mengurangi konsumsi tenaga tersebut [12]-[14]. Penelitian ini mencoba untuk menganalisis performa *OAM-IM* tersebut dibandingkan dengan *OFDM* untuk komunikasi jarak dekat, tujuannya yaitu menunjukkan keuntungan dan kerugian *OAM-IM* dalam berbagai ukuran sel dalam batasan *single user* melalui simulasi *SCILAB*.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Willner, A. E., Pang, K., Song, H., Zou, K., dan Zhou, H (2021) pada *Applied Physics Reviews* Vol. 8 No. 4 dengan judul publikasi, “*Orbital Angular Momentum of Light for Communications*”. Studi tersebut membahas bagaimana penerapan metode *OAM* dalam komunikasi berperantara photon dapat digunakan. Studi tersebut menyebutkan optimasi penggunaan *OAM* dapat dibagi menjadi dua yaitu *multiplexing* dan *encoding*. *Multiplexing*, yaitu kapasitas total data yang dikirim dapat ditingkatkan dengan cara penggabungan lebih dari satu sinyal pesan menjadi satu, sedangkan *encoding* adalah efisiensi *photon* dapat ditingkatkan jika sebuah *photon* ditransmisikan menggunakan berbagai informasi yang dapat dikirim pada medium. Studi tersebut menjelaskan bahwa *beam* yang digunakan pada *OAM* dapat merujuk pada gelombang yang berbentuk *heliks* yang terlepas dari distribusi *radial*, akan tetapi, sebuah modal dua dimensi yang komplit dapat dikarakteristikan pada dua buah modal *LG Beams*. Secara teori, *LG Beams* dengan perbedaan *index* untuk tiap pasang arah *azimuth* dan intensitas gelombang didefinisikan secara *orthogonal* untuk setiap lebar beam dan jarak propagasi. Ortogonalitas tersebut memiliki potensi penerapan *2D LG Modal* di dalam sistem komunikasi. Perlu diketahui bahwa setiap koefisien kompleks memiliki *amplitudo* dan *phase* information, yang mana dapat disetel pada struktur *beam* tertentu dibangkitkan menggunakan sebuah superposisi yang koheren menggunakan komponen *LG* pada fungsi yang diinginkan. Permasalahan yang mungkin terjadi pada penerapan *OAM* menggunakan modal *LG* adalah divergensi dimana ukuran *beam* yang dikirim tidak dapat diterima sepenuhnya, yang mana dapat mengakibatkan *power loss* pada komunikasi ordo tinggi dan rendah, penyimpangan yang terjadi saat *LOS* penerima dan pengirim tidak sama secara arah *azimuth*, dan turbulensi yang mungkin terjadi hingga mengakibatkan kebocoran daya [15].

Wang, J., Liu, J., Li, S., Zhao, Y., Du, J., dan Zhu, L (2021) pada *Nanophotonics*, vol. 11 no. 4 dengan judul publikasi, “*Orbital Angular Momentum and Beyond in Free-Space Optical Communications*”. Studi tersebut mengangkat performa *OAM* pada penerapan di dunia nyata menggunakan *free space* sebagai reflektor pada pemancar *OAM* hingga jarak 120 - 260 m. Penerapan tersebut agar tercapai transmisi dengan kapasitas tinggi akan digunakan parameter *multiplex 400-Gbit/s OAM*, empat *beam OAM*, untuk tiap-tiapnya membawa 100 *Gbit Quadrature Phase-Shift Keying* telah dimultiplekskan dan ditransmisikan. Hasil dari studi eksperimental tersebut adalah perlunya adaptasi model *channel* untuk mensimulasikan efek turbulensi *atmosfer* yang disetel pada mode dengan struktur yang tinggi sebagai media propagasi jarak yang jauh. Mitigasi *vortex splitting*, melalui teknik pre-koreksi dapat menyelesaikan masalah turbulensi tersebut. Studi ini menyinggung adanya turbulensi yang terjadi saat menggunakan metode *OAM* yang dikarenakan *phase shift* yang terjadi saat pemancaran [16].

Chen, R., Zhou, H., Moretti, M., Wang, X., dan Li, J (2019) pada *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22 no. 2 dengan judul publikasi “*Orbital Angular Momentum Waves: Generation, Detection, and Emerging Applications*”. Studi yang dilakukan untuk meninjau kapabilitas *OAM* sebagai metode skema komunikasi *radio* telah dilakukan, pada penerapan komunikasi *radio OAM* digunakan pada antena yagi dan parabolik *spiral* untuk mengirimkan 4 *GBps video* yang belum dikompresi dalam jarak 442 meter melalui frekuensi 60 *GHz*. Teknologi yang digunakan pada penelitian tersebut adalah *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*. Seperti yang terjadi pada *OAM* optik, komunikasi *radio OAM system* dipengaruhi oleh *beam divergence* dan penyimpangan antara pemancar dan penerima. Hal ini terjadi karena panjang gelombang pada frekuensi *radio* jauh lebih besar daripada frekuensi cahaya, efek turbulensi *atmosfer* pada *radio OAM* berkurang dan biasanya dapat diabaikan. Sayangnya, untuk alasan yang sama masalah divergensi pancaran menjadi lebih penting dan merupakan tantangan yang lebih besar dalam sistem komunikasi nirkabel, karena hal ini dapat membatasi jarak yang dapat dicapai dari komunikasi *radio OAM*. Namun komunikasi menggunakan skema tersebut akan menggunakan ruang dan daya listrik yang relatif besar, hal ini perlu diteliti lagi bagaimana memanfaatkan skema *OAM* ke mode yang lebih hemat energi [17].

Alkhwatrah, M., Alamayreh, A., & Qasem, N (2022) pada *Computer Systems Science & Engineering* vol 44 no. 3 dengan judul publikasi, "Cooperative Relay Networks Based on the OAM Technique for 5G Applications". Studi yang dilakukan untuk meninjau performa jaringan *relay* untuk penerapan 5G menggunakan modulasi OAM telah dilakukan, studi tersebut mengangkat masalah yaitu terbatasnya penerapan OAM dikarenakan biaya pengadaannya yang tinggi, hal ini menjadi pembatas seberapa panjang komunikasi dapat dilakukan. Jaringan yang menggunakan *relay*, dapat mengurangi jarak antara penerima dan pengirim di jaringan tersebut. Penelitian ini akan menguji performa *single-user case* dengan komunikasi dua arah, jika ditelisik lebih lanjut jaringan *relay* terdiri dari stasiun penerima dan pengirim, sehingga penelitian ini dapat mengungkap fenomena transmisi data yang terjadi antara sepasang *relay* yang mungkin dapat menjadi referensi penelitian selanjutnya [18].

Yang, Z., Hu, Y., Zhang, Z., Xu, W., Zhong, C., & Wong, K. K (2021) pada *IEEE Wireless Communications*, Vol. 28 no. 6 dengan judul publikasi, "Reconfigurable Intelligent Surface Based Orbital Angular Momentum: Architecture, Opportunities, and Challenges". Studi yang dilakukan untuk meninjau penerapan *Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)* telah dilakukan menggunakan modulasi OAM, RIS dapat digunakan menyetel fase sinyal agar komunikasi tanpa kabel dapat dimulai. Penelitian ini hendak mengeksplorasi fenomena komunikasi sel *single-user case* skenario ini dapat pula menjawab fenomena yang terjadi pada komunikasi antar pengirim dan RIS, sehingga komunikasi ini dapat diketahui performanya sebagai bahan pertimbangan jika ada pula penerapan teknologi tersebut kedepannya [19].

Pada studi terdahulu pertama, penerapan komunikasi lebih ke arah jalur transmisi ruang terbuka, hal ini hendak dilakukan oleh peneliti pada penelitian yang diajukan. Pada studi tersebut diangkat masalah penggunaan daya listrik sehingga adanya potensi kebocoran daya sangat mungkin terjadi, sehingga konsekuensi yang dapat ditangani oleh komunikasi *single-cell* adalah membatasi penggunaan daya. Skema IM dapat memanfaatkan variasi *phase shift* sehingga dapat dimungkinkan penggunaan OAM dengan penggunaan daya yang rendah. Penelitian ini akan menguji performa OAM-IM dibandingkan dengan OFDM untuk jaringan 5G-NR dengan harapan dapat menjelaskan fenomena penggunaan daya.

Pada studi terdahulu kedua, eksperimen dilakukan pada reflektor *smart surface* untuk penerapan komunikasi radio, namun penggunaan jarak dekat tidak disinggung secara langsung. Maka dari itu, peneliti mengusulkan skema OAM pada jarak dekat sehingga dapat diketahui apa batasan performa yang timbul saat dijalankan dengan *constraint* jarak komunikasi. Pada studi terdahulu ketiga, masih menyinggung penggunaan komunikasi jarak jauh pada penerapan teknologi OAM, MIMO yang menjadi dasar atas komunikasi *radio* ini tidak dapat diterapkan pada komunikasi jarak dekat mengingat ada batasan besar dimensi dan daya listrik yang digunakan. Pada penelitian ini, peneliti mencoba mengungkap fenomena dibalik komunikasi tanpa MIMO dan hanya mengandalkan satu antena penerima dan pengirim dengan harapan dapat menyesuaikan kondisi yang telah menjadi batasan pada komunikasi jarak dekat.

Di dalam OFDM, modulasi yang digunakan seperti M-PSK dan atau M-QAM diterapkan untuk meningkatkan *spectral efficiency* atau berapa banyak bit yang dapat ditransmisi untuk sebuah satuan unit frekuensi (*bps/hz*). Modulasi sinyal dilewatkan pada fungsi *Inverse of Fast Fourier Transform (IFFT)* yang mengubah sinyal ke sebuah sinus ortogonal yang saling bertumbukan pada wilayah *time domain*. Persamaan (1) dijabarkan untuk mengekspresikan fenomena ini [20].

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} S_n \exp\left(j2\pi \frac{nt}{N}\right) \quad (1)$$

Dimana  $s$  adalah modulasi sinyal,  $N$  adalah jumlah *subcarrier* yang didefinisikan dan ditempatkan pada *band* yang berbeda,  $n$  adalah index dari larik *subcarrier*,  $t$  adalah satuan waktu dalam detik, dan  $j$  adalah simbol representasi yang memberitahu peneliti bahwa model ini mengandung nilai imajiner karena pada dasarnya tiap *subcarrier* dapat membawa informasi *amplitude* dan *phase information*.

Dalam pemodelan simulasi ini, peneliti memerlukan model untuk mengerti estimasi sinyal yang diterima ditambah dengan interferensi yang terjadi pada penerima. Sebuah teknik yaitu *Cyclic Prefix* yang lazim digunakan pada skema OFDM untuk memitigasi *Intersymbol Interference (ISI)* yang dikarenakan *multipath fading* pada komunikasi nirkabel. Hal ini dapat diekspresikan pada persamaan (2-1), untuk memahami fenomena ini [21].

$$y = HF + n \quad (2)$$

Dimana  $y$  adalah sinyal yang diterima,  $H$  adalah frekuensi respon dari *channel* yang diterima,  $F$  adalah jumlah *subcarrier* yang membawa *data symbol*, dan  $n$  adalah *noise* yang diterima oleh penerima. Ekspresi (2) dapat dijabarkan sebagai, sinyal yang diterima akan sama dengan jumlah sinyal yang ditransmisikan dikalikan

dengan frekuensi respon ditambah *noise*. Variabel  $H$  ditentukan oleh berapa *subcarrier* yang terganggu oleh *noise*, sehingga jika jumlah *subcarrier* adalah 64 maka  $H$  memiliki vektor elemen sebesar 64 untuk setiap *subcarrier*. Tiap elemen vektor memiliki kekuatan *channel* per *subcarrier* yang dapat ditentukan menggunakan angka acak *Complex Gaussian* dengan rata-rata nol dan standar deviasi  $\eta^2$  dimana  $\eta$  adalah rata-rata kekuatan *channel* untuk mengkuantifikasi *attenuation* dan distorsi pada sinyal.

Di dalam OAM ada teknik untuk memanfaatkan *spatial multiplexing* pada karakteristik orbital gelombang elektromagnetik, yang menggunakan derajat kebebasan *multiplexing* dan *demultiplexing radial* dan *azimuth*. Semua sinyal akan digunakan semua antena yang digunakan dengan *phase shift*. Setelah siklus tersebut selesai, semua *phase* akan dinaikkan sebesar  $2\pi$ . OAM dapat diekspresikan menggunakan *Discrete Fourier Transform* (DFT) untuk *multiplexing* dan *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT). Proses *multiplexing* dapat diekspresikan pada persamaan (3) untuk memahami fenomena ini [22].

$$Y_r = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{t=1}^{N-1} Y_t \exp\left(j2\pi \frac{P_r}{N}\right) \quad (3)$$

Dimana  $Y_t$  adalah baris elemen t-ke pada sinyal yang ditransmisikan melalui *fading channel* dan  $Y_r$  adalah baris elemen r-ke pada sinyal yang diterima, dan  $P_r$  adalah baris elemen r-ke pada alokasi daya untuk sinyal yang ditransmisikan. Dalam OAM sebagai studi yang diajukan oleh peneliti untuk meningkatkan *spectral efficiency*, IM ditambahkan pada skema tersebut. Mode OAM yang aktif difungsikan untuk mentransmisikan bit tambahan. Total jumlah mode OAM yang aktif akan sama dengan jumlah antena pemancar sebagai  $N$ . Ekspresi *spectral efficiency* OAM-IM tersebut akan dijabarkan pada persamaan (2-3), dimana  $M$  adalah urutan modulasi dan  $N_a$  jumlah mode OAM yang aktif [23].

$$\beta = N_a \log_2 M \left[ \log_2 \left( \frac{N}{N_a} \right) \right] \quad (4)$$

OFDM yang mana merupakan teknik modulasi yang digunakan pada sistem komunikasi *digital*. Cara kerja OFDM umumnya membagi arus data berkecepatan tinggi menjadi banyak arus data berkecepatan rendah, yang mana tiap bagiannya memiliki modulasi frekuensi yang berbeda. Frekuensi yang digunakan dipilih secara seksama secara orthogonal, artinya tiap frekuensi terpisah independen sehingga tidak menginterferensi satu sama lain. Hal ini memungkinkan arus data yang dibagi dapat ditransmisikan secara bersamaan. OFDM umumnya digunakan pada komunikasi nirkabel seperti, Wi-Fi, jaringan selular 5G/6G, dan *broadcast* televisi digital. Teknik ini dapat diandalkan pada transmisi data kecepatan tinggi melalui kanal nirkabel karena dapat memitigasi efek *fading* dan sumber interferensi lainnya [24].

*Substream* biasanya dihasilkan menggunakan teknik yang disebut *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), yang mengubah sinyal *time-domain* menjadi sinyal *frequency-domain*. Di penerima, proses pembalikan dilakukan, menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah sinyal *frequency-domain* yang diterima kembali menjadi sinyal *time-domain*. Penerima kemudian mendekodekan setiap *substream* untuk memulihkan data asli. Karena *subcarrier* OFDM dipisahkan jaraknya, setiap *subcarrier* mengalami efek *fading* yang berbeda, yang dapat dikompensasikan dengan menggunakan teknik pemrosesan sinyal digital. Keuntungan lain dari OFDM adalah kemampuannya untuk menggunakan modulasi dan pengkodean adaptif. Hal ini berarti bahwa skema modulasi dan pengkodean dapat disesuaikan untuk setiap *subcarrier* berdasarkan kondisi saluran, seperti rasio *signal-to-noise*. Hal ini memungkinkan OFDM mencapai efisiensi spektral yang tinggi, yaitu jumlah data yang dapat ditransmisikan per unit *bandwidth* [25].

*Orbital Angular Momentum* (OAM) adalah karakteristik properti gelombang elektromagnetik yang menggambarkan rotasi gelombang di sekitar sumbu utamanya. Dengan kata lain, hal ini merujuk pada puntiran sinar di sekitar poros tengahnya. Dalam sinar cahaya biasa, seperti sinar laser, muka gelombang datar dan tidak memiliki puntiran. Namun, dalam modulasi dengan OAM, muka gelombang membentuk *heliks* di sekitar sumbu pusat. Jumlah OAM dalam sinar terkuantisasi dan dapat diambil nilai bilangan bulat. Misalnya, sistem dengan OAM +1 memiliki satu satuan momentum sudut, dan muka gelombangnya berputar sekali di sekitar sumbu pusat dalam satu putaran penuh maka sistem memiliki OAM -1 dengan putaran yang berlawanan [26].

OAM dapat digunakan untuk menyandikan informasi dalam *spatial-domain* sinar cahaya, mirip dengan bagaimana amplitudo dan *phase* dapat digunakan untuk menyandikan informasi dalam *time-domain* dan *frequency-domain*. Ini memiliki terapan potensial dalam sistem komunikasi berkapasitas tinggi, seperti komunikasi optik, di mana OAM dapat digunakan untuk mengirimkan beberapa arus data secara bersamaan.

Selain aplikasi komunikasi, OAM telah dipelajari di berbagai bidang, antara lain termasuk optik kuantum, mikroskop, dan astronomi [27].

*Index Modulation (IM)* adalah teknik yang digunakan dalam sistem komunikasi yang melibatkan manipulasi indeks skema modulasi untuk menyampaikan informasi. Dalam skema modulasi tradisional, seperti *Amplitude Modulation (AM)* atau *Phase Modulation (PM)*, informasi dikodekan dengan bervariasinya *amplitudo* atau *phase* sinyal *carrier*. Namun, dalam *IM*, informasi dikodekan dengan mengaktifkan atau menonaktifkan *subcarrier* dari skema modulasi *multicarrier*, seperti *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, dengan menetapkan indeksnya menjadi 1 atau 0 [28].

Teknik untuk memanipulasi indeks *subcarrier*, teknik *IM* memungkinkan transmisi data tambahan, di luar apa yang dapat ditransmisikan menggunakan skema modulasi tradisional saja. Data tambahan ini dapat digunakan untuk berbagai tujuan, seperti meningkatkan keandalan dan ketangguhan tautan komunikasi, meningkatkan laju data, atau mengurangi konsumsi daya [29].

Sebagai contoh, dalam sistem komunikasi yang menggunakan *OFDM* dengan indeks modulasi, indeks *subcarrier* dapat diaktifkan atau dinonaktifkan secara selektif berdasarkan informasi yang akan ditransmisikan. Hal ini dapat dilakukan dengan berbagai teknik, seperti *Index Selective Mapping (ISM)*, di mana beberapa *subcarrier* dipilih untuk transmisi data dan yang lainnya tidak digunakan. Teknik lainnya adalah *Subcarrier Index Modulation (SIM)*, di mana indeks dari suatu *subcarrier* digunakan untuk menyampaikan informasi tambahan.

*Waveform 5G* mengacu pada jenis sinyal yang digunakan untuk mengirimkan informasi melalui teknologi nirkabel generasi kelima. *Waveform* yang digunakan dalam *5G* berbeda dengan bentuk gelombang yang digunakan pada teknologi nirkabel generasi sebelumnya seperti *4G*, *3G*, dan *2G*. *Waveform 5G* dirancang agar lebih efisien dan mampu mendukung kecepatan data yang lebih tinggi, latensi yang lebih rendah, dan lebih banyak perangkat daripada generasi sebelumnya.

Ada dua bentuk gelombang utama yang digunakan dalam teknologi *5G*, yaitu bentuk gelombang *sub-6 GHz* dan gelombang *milimeter (mmWave)*. Kedua bentuk gelombang memiliki karakteristik unik yang membuatnya cocok untuk aplikasi yang berbeda. Pertama, yaitu *Waveform sub-6 GHz*, *Waveform sub-6 GHz* adalah bentuk gelombang yang paling umum digunakan dalam jaringan *5G*. Ini beroperasi pada frekuensi di bawah *6 GHz* dan biasanya digunakan untuk jangkauan luar dan dalam ruangan. *Waveform sub-6 GHz* dirancang untuk mendukung area jangkauan yang lebih luas dan penetrasi yang lebih baik melalui rintangan seperti dinding, bangunan, dan pepohonan. Ini membuatnya ideal untuk menyediakan cakupan yang andal di daerah perkotaan. *Waveform sub-6 GHz* didasarkan pada teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, yang menggunakan beberapa *subcarrier* untuk mengirimkan data secara bersamaan. Hal ini memungkinkan bentuk gelombang *sub-6 GHz* untuk mendukung kecepatan data yang tinggi dan memberikan efisiensi spektral yang lebih baik [30].

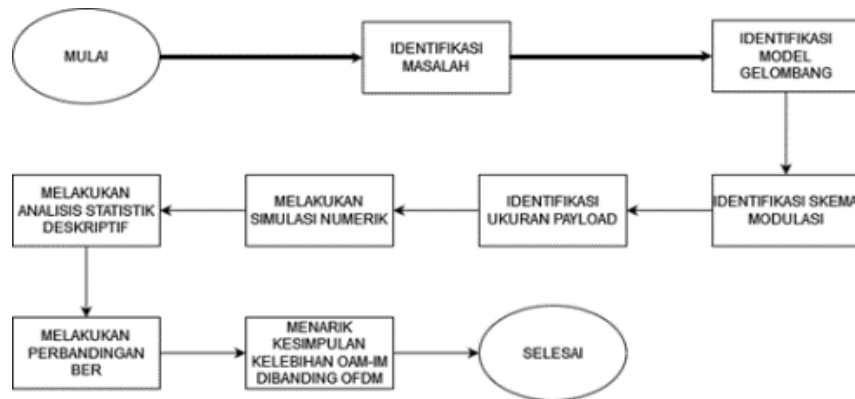
Kedua yaitu, *Waveform gelombang milimeter (mmWave)*. *Waveform gelombang milimeter (mmWave)* digunakan dalam jaringan *5G* untuk menyediakan koneksi berkecepatan tinggi dan latensi rendah di area padat penduduk seperti stadion, pusat perbelanjaan, dan ruang publik lainnya. Ini beroperasi pada frekuensi di atas *24 GHz* dan memiliki *bandwidth* yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk gelombang *sub-6 GHz*. *Waveform mmWave* menggunakan teknologi yang disebut *beamforming* gelombang milimeter, yang menggunakan banyak antena untuk mengarahkan sinyal ke arah tertentu. Hal ini memungkinkan *waveform mmWave* untuk memberikan kecepatan data yang lebih tinggi dan latensi yang lebih rendah dibandingkan dengan bentuk gelombang *sub-6 GHz*. Namun, bentuk gelombang *mmWave* memiliki jangkauan yang lebih pendek dan rentan terhadap gangguan dari penghalang seperti bangunan dan pepohonan [31].

Secara keseluruhan, bentuk gelombang *5G* dirancang untuk menyediakan konektivitas nirkabel yang lebih cepat dan andal dibandingkan dengan teknologi nirkabel generasi sebelumnya. Itu mampu mendukung kecepatan data yang lebih tinggi, latensi yang lebih rendah, dan lebih banyak perangkat daripada generasi sebelumnya, menjadikannya ideal untuk aplikasi seperti *virtual reality*, *augmented reality*, *Intelligent Transportation System*, dan teknologi baru lainnya.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Pelaksanaan Proses Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode kuantitatif dan pendekatan model eksperimental yang terdiri dari beberapa tahapan seperti dalam Gambar 1. Dimulai dari tahap identifikasi masalah dan studi pustaka, meliputi kajian regulasi dan aturan terkait implementasi teknologi *ITS* di Indonesia dan spesifikasi modulasi sinyal *5G*. Kemudian mengidentifikasi batasan simulasi yang nantinya akan disesuaikan dengan penerapan *OAM-IM*.



**Gambar 1.** Alur penelitian

Setelah itu ditentukan metrik model gelombang yang akan disimulasikan yaitu *5G-NR*. Tahapan identifikasi sinyal selesai dilanjutkan dengan melakukan identifikasi skema modulasi yang akan digunakan, dalam konteks penelitian ini adalah *OFDM* dan *OAM-IM*. Langkah selanjutnya adalah simulasi yang memerlukan pesan komunikasi dan model *IFFT* maupun *FFT* yang dibutuhkan dan tahapan terakhir adalah melakukan analisis pada hasil simulasi.

Hasil tahapan dalam identifikasi masalah adalah menunjukkan keuntungan dari *OAM-IM* dibanding *OFDM* dalam batasan *single user* relatif pada *Bit Error Rate (BER)* dari hasil analisis. Hasil dalam identifikasi batasan adalah memberikan *constraint* dan pertimbangan dalam menjalankan simulasi numerik yang didasarkan dalam jarak komunikasi dan konteks komunikasi yang dilakukan.

Hasil dari tahapan identifikasi gelombang adalah model *carrier* yang akan digunakan. Dalam penelitian menggunakan *5G-NR* sebagai desain *6G*. Hasil dari tahapan identifikasi modulasi adalah modulasi komunikasi yang akan digunakan yaitu menggunakan *OFDM* dan *OAM-IM*.

Hasil dari tahapan identifikasi ukuran *payload* adalah ukuran paket yang akan dikirimkan dari simulasi komunikasi yang dilakukan, nilai ukuran paket tersebut didapat dari penggunaan parameter studi terdahulu dengan justifikasi nilai ukuran yang umum digunakan untuk pesan *CAM* pada komunikasi. Hasil dari tahap melakukan simulasi numerik adalah membangkitkan data numerik yang diiterasikan menggunakan model yang telah diajukan dan parameter yang sama pada model komunikasi *OAM-IM* dan *OFDM*.

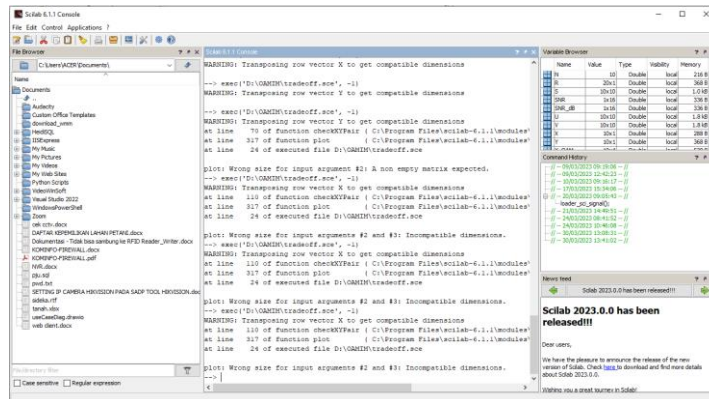
Hasil dari tahapan analisis statistik deskriptif, analisis ini berfungsi untuk menjabarkan hasil simulasi dari data numerik ke dalam tabel dan diagram. Hasil perbandingan *BER* dan kelebihan *OAM-IM* dan *OFDM* adalah penarikan kesimpulan dimana keunggulan *OAM-IM* terletak dari hasil simulasi yang dilakukan.

### 3.2 Metode Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang ditemukan pada saat studi pustaka dan perbandingan penelitian sejenis, penelitian ini mengungkap fenomena dibalik komunikasi tanpa *MIMO* dan hanya mengandalkan satu antena penerima dan pengirim dengan harapan dapat menyesuaikan kondisi yang menjadi batasan pada komunikasi jarak dekat melalui performa *OAM-IM* dibandingkan dengan *OFDM* untuk komunikasi jarak dekat. Model yang diajukan akan mengikuti perubahan modulasi yang digunakan seperti *M-PSK* dan atau *M-QAM* diterapkan untuk meningkatkan *spectral efficiency* atau berapa banyak bit yang dapat ditransmisi untuk sebuah satuan unit frekuensi (*bps/hz*). Modulasi sinyal dilewatkan pada fungsi *Inverse of Fast Fourier Transform (IFFT)* yang mengubah sinyal ke sebuah *sinus* ortogonal yang saling bertumbukan pada wilayah *time domain*. Tentunya dalam skenario *LOS Single User Cases* dibutuhkan variabel jarak dengan alasan parameter pembatas di penelitian ini adalah jarak komunikasi, jarak tersebut adalah 10 hingga 100 m untuk komunikasi jarak dekat. Objek penelitian ini adalah parameter *BER* hasil performa *OAM-IM* yang dibandingkan dengan *OFDM* untuk komunikasi jarak dekat. Penelitian ini akan menggunakan pendekatan kuantitatif. Metode ini menggunakan rancangan alur penelitian, pengumpulan data parameter dari studi terdahulu, ekspresi model matematika yang diusulkan yang akan disimpulkan secara statistik deskriptif. Penelitian ini menggunakan hasil performa *OAM-IM* yang dibandingkan dengan *OFDM* untuk komunikasi jarak dekat untuk tiap *BER* pada jarak yang telah disebutkan pada gambaran umum. Data yang digunakan adalah metrik untuk mensimulasikan model matematis yang telah diajukan metrik tersebut terdiri dari metrik pertama, besar pesan berkisar antara 50 B hingga 300 B jika kode kriptografi tidak digunakan. Metrik kedua, jarak komunikasi sebesar 10 m dan 5GRN sebesar 100 m. Alat



yang digunakan untuk menjalankan simulasi adalah *Scilab*, alat ini dapat membuat modul *node* jaringan secara logikal yang dibutuhkan dan mensimulasikan skenario secara diskret model matematika yang telah diajarkan.



Gambar 2. Scilab

*Scilab* adalah perangkat lunak komputasi numerik yang menyediakan fitur untuk perhitungan ilmiah. Produk ini merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk sebagai alternatif fungsi analisis numerik. *Scilab* tersedia secara gratis dan dapat digunakan untuk berbagai penerapan ilmiah dan teknik. Salah satu keunggulan utama *Scilab* adalah kemudahan penggunaannya. *Scilab* memiliki *interface* yang sederhana sehingga dapat diakses oleh pengguna dari berbagai tingkat keahlian. *Scilab* adalah perangkat lunak serbaguna yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi ilmiah dan teknik. Produk ini dapat digunakan untuk aplikasi pemrosesan sinyal seperti pemrosesan gambar, pemrosesan *audio*, dan sistem komunikasi. Produk ini juga dapat digunakan dalam desain dan simulasi sistem kontrol, yang sangat berguna untuk aplikasi teknik mekanik, listrik, dan ruang angkasa. Selain itu, *Scilab* dirancang agar dapat dikembangkan dengan mudah, memungkinkan pengguna untuk memasukkan fungsi dan modul khusus ke dalam proyek simulasi numerik. *Scilab* memiliki komunitas pengembang yang besar yang berkontribusi pada pengembangannya, yang berarti *Scilab* terus berkembang dan meningkat.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Kode Simulasi yang digunakan

Pada simulasi yang dilakukan di penelitian ini menggunakan *path loss* dan modulasi *Binary Phase Shift Keying (BPSK)* pada kedua metode komunikasi yang diajukan yaitu *OFDM* dan *OAM-IM* pada jarak kurang dari atau sama dengan 100 m. *BPSK* umum digunakan pada skema modulasi untuk sebuah *individual carrier*, hal ini cocok dengan skenario yang diajukan oleh penelitian yaitu *single user case*. Pada hasil pembahasan peneliti akan paparkan hasil simulasi numerik menggunakan *Scilab* pada bentuk komunikasi *5G-NR (6G Waveform Design)*.

```

1 // OFDM 5G throughput analysis menggunakan Friis path loss model
2 // Assumsi BPSK modulation dan 1/2 rate convolutional coding
3
4 // Parameters
5 distance = 100; // jarak pengirim-penerima
6 freq = 5e9; // frekuensi sinyal Hz
7 tx_power = 30; // daya kirim dBm
8 rx_sensitivity = -95; // sensitivitas penerima dBm
9 packet_size = 1000; // ukuran paket dalam bit
10 snr = 10; // SNR dalam dB
11 num_subcarriers = 64; // jumlah subcarrier
12 num_data_subcarriers = 48; // jumlah data per subcarrier
13 subcarrier_spacing = 15e3; // subcarrier spacing dalam Hz
14 coding_rate = 1/2; // 1/2 rate convolutional coding
15 overhead = 0.1; // 10% overhead untuk packet header
16
17 // Konstansta
18 light_speed = 3e8; // kecepatan cahaya dalam m/s
19 noise_power = 1e-12; // spectral density noise dalam W/Hz
20 modulation_order = 2; // Ordo Modulasi BPSK

```

Gambar 3. Parameter OFDM yang diajukan

Penelitian ini juga menggunakan parameter jarak, frekuensi komunikasi, daya pengirim, sensitivitas penerima, ukuran paket, rasio *SNR*, jumlah *subcarrier*, jumlah maksimum data yang dapat diemban per *subcarrier*, *subcarrier spacing*, laju pengkodean komunikasi, dan tambahan *overhead* untuk *header*.

Penelitian ini menekankan desain eksperimental untuk menggunakan *6G Waveform* dan *5G* pada *Intelligent Transportation System*, sehingga konteks ukuran paket data dan laju *coding* komunikasi disesuaikan dengan konteks penggunaan. Pada gambar 4.2 peneliti menggunakan model *path loss* untuk mengukur *decay* yang terjadi pada parameter jarak yang telah ditentukan. Peneliti juga menentukan laju data efektif menggunakan jumlah data yang diemban *subcarrier*, *subcarrier spacing*, *SNR*, *ordo* modulasi, dan laju *coding* komunikasi.

```

// Friis path loss model
lambda = light_speed/freq; ..... // wavelength dalam meters
path_loss = (lambda / (4 * pi * distance))^2; ..... // path loss dalam linear scale
channel_gain = 10^(tx_power/10) * path_loss; ..... // channel gain dalam linear scale
rx_power = channel_gain * 10^(rx_sensitivity/10); ..... // received power dalam linear scale

// Effective data rate
effective_data_rate = num_data_subcarriers * subcarrier_spacing * log2(1 + rx_power/noise_power) * modulation_order * coding_rate;

// Packet transmission time
packet_transmission_time = packet_size / effective_data_rate;

// Throughput and bit error rate
overhead_ratio = 1 + overhead;
throughput = packet_size / (packet_transmission_time * overhead_ratio);
ber = 0.5 * erfc(sqrt(2 * modulation_order / (modulation_order - 1) * 10^(snr/10) * channel_gain) / sqrt(2));

// Hasil output
printf("Effective data rate: %g bps\n", effective_data_rate);
printf("Packet transmission time: %g s\n", packet_transmission_time);
printf("Total data rate: %g bps\n", effective_data_rate * overhead_ratio);
printf("Throughput: %g bps\n", throughput);
printf("Bit error rate: %g\n", ber);

```

**Gambar 4.** Model *OFDM* yang diajukan

Setelah menghitung laju data efektif dan model *path loss*, peneliti menghitung waktu transmisi paket, *throughput* jaringan dan *BER* sehingga dapat di *output* kan hasil ke *console*. Pada *5G-NR* peneliti menerapkan *filter* pada metode *OFDM* yang digunakan pada gambar 4 dan 5 pada baris parameter, peneliti menggunakan *filter pass* 30 kHz pada komunikasi.

```

10 subcarrier_spacing = 30e3; ..... // subcarrier spacing dalam Hz (filtered-OFDM)
11 coding_rate = 1/2; ..... // 1/2 rate convolutional coding
12 overhead = 0.1; ..... // 10% overhead untuk packet header

```

**Gambar 5.** *Filter Pass* *OFDM*

Parameter *nyquist frequency* dan *roll-off factor* sebesar *subcarrier spacing/2* dan 0.22. Frekuensi *nyquist* adalah frekuensi teoritik paling tinggi yang dapat direpresentasikan pada sistem pemrosesan sinyal *digital*. *Roll-off factor* untuk mengurangi komponen frekuensi tinggi yang dihasilkan *nyquist frequency* setelah melampaui tingkat *cutoff*.

```

25 // Filtered-OFDM specific parameters
26 cutoff_freq = subcarrier_spacing/2; ..... // Nyquist frequency (filtered-OFDM)
27 beta = 0.22; ..... // Roll-off factor (filtered-OFDM)

```

**Gambar 6.** Atenuasi Filter *OFDM*

```

32 // Packet transmission time
33 symbol_duration = 1/subcarrier_spacing; ..... // Symbol duration (filtered-OFDM)
34 num_symbols = ceil(packet_size/(num_data_subcarriers*log2(modulation_order*coding_rate)));
35 packet_transmission_time = num_symbols*symbol_duration;

```

**Gambar 7.** Durasi simbol pada *Filtered OFDM* untuk *5G-NR*

Di dalam penelitian ini juga perlu menghitung durasi simbol komunikasi yang terjadi untuk menghitung durasi transmisi paket. Filter *OFDM* digunakan pada *5G-NR* dimana sinyal yang ditransmisikan di filter pada wilayah waktu menggunakan *pulse-shaping filter*, untuk mensimulasikan hal tersebut menggunakan pengukuran *symbol\_duration*.



```

37 //Throughput-and-bit-error-rate
38 overhead_ratio = 1 + overhead;
39 throughput = packet_size / (packet_transmission_time * overhead_ratio);
40 ber = 0.5 * erfc(sqrt(2 * modulation_order / (modulation_order - 1) * 10^(snr/10) * channel_gain) / sqrt(2));
41
42 //Hasil-output
43 printf("Effective data rate: %g bps\n", effective_data_rate);
44 printf("Packet transmission time: %g s\n", packet_transmission_time);
45 printf("Total data rate: %g bps\n", effective_data_rate * overhead_ratio);
46 printf("Throughput: %g bps\n", throughput);
47 printf("Bit error rate: %g\n", ber);

```

**Gambar 8.** Kode *Throughput* dan *BER* pada *F-OFDM*

Setelah mendapatkan nilai *symbol\_duration* dan *packet\_transmission\_time* kemudian dihitung nilai *throughput* dan *BER* dari kedua parameter tersebut. Setelah itu keluarkan nilai model matematika ke *console*. Penjabaran *coding OFDM* dan *F-OFDM* yang digunakan pada simulasi. Selanjutnya penjabaran *coding OAM-IM* yang digunakan pada simulasi penelitian ini.

```

1 //Set-the-system-parameters
2 f_c = 5e9; //Frekuensi Carrier./Frekuensi sistem
3 N_t = 1; //Jumlah antena pengirim
4 N_r = 1; //Jumlah antena penerima
5 d = 100; //Jarak penerima dan mengirim (m)
6 BW = 5e6; //Lebar pita sistem (hz)
7 M = 2; //Ordo modulasi
8 C_target = 5e6; //Kapasitas target
9 noise_figure_dB = 5; //Noise penerima
10 alpha = 0.2; //OAM mode crosstalk coefficient
11 beta = 0.1; //OAM mode misalignment coefficient
12 theta = 0.1; //OAM mode offset coefficient
13 packet_size = 1000; //Ukuran paket (bits)
14 data_rate = 5e6; //Laju data (bps)

```

**Gambar 9.** Parameter untuk *OAM-IM*

Pada gambar 9 untuk metode *OAM-IM*, penelitian ini menggunakan parameter frekuensi sistem, jumlah antena pengirim dan penerima, jarak pengirim dan penerima, lebar pita sistem, *ordo* modulasi, kapasitas target untuk komunikasi, *noise* yang pada sisi penerima, penyimpangan yang biasa terjadi pada *OAM crosstalk*, *misalignment*, dan *offset*, ukuran paket, dan laju data pada sistem komunikasi.

```

16 //Hitung durasi transmisi
17 T_packet = packet_size / data_rate; //Waktu untuk mengirim sebuah paket (s)
18
19 //Hitung daya yang diterima
20 G_t = -20; //Transmit antenna gain (dBi)
21 G_r = -20; //Receive antenna gain (dBi)
22 lambda = 3e8 / f_c; //Wavelength (m)
23 P_t = -30; //Transmit power (dBm)
24 L = (lambda / (4 * 3.14 * d))^2; //Path loss
25 P_r = P_t + G_t + G_r - 10 * log10(L); //Received power (dBm)
26
27 //Hitung daya gangguan
28 k_B = 1.38e-23; //Boltzmann constant (J/K)
29 T = 300; //Temperature (K)
30 B = BW; //Noise bandwidth (Hz)
31 N_0 = k_B * T * 10^(noise_figure_dB/10); //Noise power (W/Hz)
32 N = N_0 * B; //Total noise power (W)

```

**Gambar 10.** Transmisi yang Terjadi pada *OAM-IM*

Dari gambar 10 tersebut di atas setelah mendapat daya yang terima pada sisi penerima, selanjutnya adalah menentukan berapa gangguan yang diterima, degradasi yang ditentukan oleh *noise\_figure\_dB* menjadi variabel penentu jika sistem memiliki *noise* yang tinggi atau tidak.

Pada simulasi numerik ini, peneliti perlu menghitung berapa rasio *SNR* (*Signal to Noise Ratio*) sebagai

perbandingan kekuatan daya pengirim dan daya *noise*, kapasitas jaringan ditentukan oleh variabel *C*. *BER* (*Bit Error Rate*) dan *PER* (*Packet Error Rate*) diperlukan untuk menghitung berapa *throughput* yang lewat pada sistem komunikasi ini. Peneliti tambahkan gambar 11 untuk menjelaskan hal tersebut.

```

33 // Hitung SNR
34 gamma = (2^(C_target/BW) - 1)/N;
35
36 // Hitung kapasitas jaringan
37 C = BW * log2(1 + gamma);
38
39 // Hitung BER
40 BER = 1/2 * erfc(sqrt(gamma/(2*(1+gamma)))) + 1/2 * erfc(sqrt(gamma/(2*M*(1+gamma)))) * (1-alpha) * (1-beta) * (1-theta);
41
42 // Hitung laju kesalahan paket
43 PER = 1 - (1 - BER)^(packet_size/data_rate);
44
45 // Hitung throughput
46 throughput = (1 - PER) * packet_size / T_packet;
47
48 // Cetak hasilnya
49 disp(["Received power (dBm): ", string(P_r)]);
50 disp(["SNR (linear scale): ", string(gamma*N)]);
51 disp(["Capacity (bits/s): ", string(C)]);
52 disp(["Bit Error Rate: ", string(BER)]);
53 disp(["Packet Error Rate: ", string(PER)]);
54 disp(["Throughput (bits/s): ", string(throughput)]);

```

**Gambar 11.** *BER dan Throughput Jaringan*

Setelah peneliti paparkan hasil kode simulasi yang akan digunakan pada penelitian ini, selanjutnya adalah paparan mengenai hasil simulasi menggunakan kode tersebut pada *Scilab*. Paparan hasil yang akan diberikan adalah *OFDM* dan *OAM-IM*. Pada tabel-tabel berikut dijabarkan *OFDM* pada jarak 10 m sampai dengan 100 m.

## 4.2 Hasil Simulasi untuk Metode *OFDM*

Hasil simulasi untuk metode *OFDM* adalah sebagai berikut:

1. Pada jarak 10 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 7461,55 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 620274 bps, 512623 bps, dan 0,46192. Pada untuk jarak 20 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 172127 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 189340 bps, 156479 bps, dan 0,48095.
2. Pada jarak 30 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 80040,1 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 88044,1 bps, 72763,7 bps, dan 0,487303. Pada untuk jarak 40 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 45778,8 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 50356,7 bps, 41617,1 bps, dan 0,490477.
3. Pada jarak 50 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 29529,9 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 32482,9 bps, 26845,4 bps, dan 0,492381. Pada untuk jarak 60 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 20595,6 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 22655,2 bps, 18723,3 bps, dan 0,493651.
4. Pada jarak 70 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 15171,1 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 16688,3 bps, 13792 bps, dan 0,494558. Pada untuk jarak 80 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 11635,2 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 12798,8 bps, 10577,5 bps, dan 0,495238.
5. Pada jarak 90 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 9204,06 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 10124,5 bps, 8367,32 bps, dan 0,495767. Pada untuk jarak 100 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 7461,55 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 8207,7 bps, 6783,23 bps, dan 0,49619.

*Effective data rate* merupakan nilai laju data yang realistis terhadap keadaan dunia nyata, pada umumnya nilai tersebut lebih rendah dari pada *total data rate* yang merupakan laju data teoritis untuk sebuah jaringan. Laju data dipengaruhi *throughput* yang merupakan besar arus per detik nya dihitung dengan satuan *bit*, dan *Bit Error Rate* merupakan laju kesalahan *bit*. Semakin tinggi nilai maka semakin banyak koreksi *bit* yang dilakukan. Semakin banyak koreksi *bit* yang dilakukan maka semakin banyak *bit* yang perlu dikirim ulang, sehingga semakin banyak data yang perlu ditransmisikan untuk sebuah paket sehingga mengurangi *throughput* kecepatan jaringan.

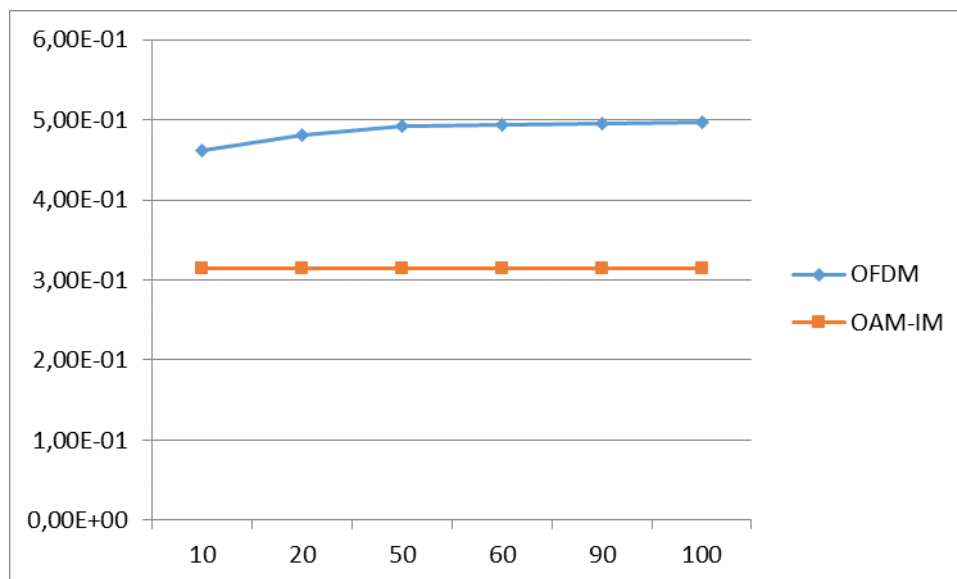
### 4.3 Hasil Simulasi untuk Metode OAM-IM

Hasil simulasi untuk metode *OAM-IM* adalah sebagai berikut:

1. Pada jarak 10 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 7461,55 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 620274 bps, 512623 bps, dan 0,3140133. Pada untuk jarak 20 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 172127 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 189340 bps, 156479 bps, dan 0,3140133.
2. Pada jarak 30 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 80040,1 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 88044,1 bps, 72763,7 bps, dan 0,3140133. Pada untuk jarak 40 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 45778,8 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 50356,7 bps, 41617,1 bps, dan 0,3140133.
3. Pada jarak 50 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 29529,9 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 32482,9 bps, 26845,4 bps, dan 0,3140133. Pada untuk jarak 60 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 20595,6 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 22655,2 bps, 18723,3 bps, dan 0,3140133.
4. Pada jarak 70 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 15171,1 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 16688,3 bps, 13792 bps, dan 0,3140133. Pada untuk jarak 80 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 11635,2 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 12798,8 bps, 10577,5 bps, dan 0,3140133.
5. Pada jarak 90 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 9204,06 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 10124,5 bps, 8367,32 bps, dan 0,3140133. Pada untuk jarak 100 m, *packet size* 400, 800, 1200, 1600, 2000, 2400 bit dengan hasil simulasi yang konstan untuk *effective data rate* sebesar 7461,55 bps, *total data rate*, *throughput*, *bit error rate* sebesar 8207,7 bps, 6783,23 bps, dan 0,3140133.

### 4.4 Perbandingan Performa BER OAM-IM dan OFDM

Pada gambar 12 menunjukkan diagram perbandingan antara performa *BER OFDM* dan *BER OAM-IM* sehingga dapat dilihat perbedaan rata-rata *BER* untuk *OFDM* dan *OAM-IM*.



Gambar 12. Rata-Rata BER OFDM dan OAM-IM untuk Jarak 10 - 100 m

Pada gambar 12, peneliti telah memperlihatkan jumlah *BER* yang rendah untuk metode *OAM-IM* dibanding dengan metode *OFDM*, hal ini dapat terjadi dengan penggunaan parameter *crossstalk* dan *offset* pada *OAM-IM* yang dapat terjaga untuk keseluruhan jarak komunikasi yang disimulasikan. Rata-rata *BER OFDM* adalah

0.486818 sedangkan *BER* yang lebih rendah tercatat pada metode *OAM-IM* sebesar 0.314013. Hasil *OAM-IM* terlihat lebih rendah dibandingkan dengan *OFDM*, dari hasil tersebut maka diketahui *OAM-IM* tidak terpengaruh jarak untuk komunikasi jarak pendek. *OFDM* mengalami peningkatan *BER* pada jarak 20 m dan stabil hingga jarak 100 m.

## 5. KESIMPULAN

Analisis hasil simulasi yang dilakukan peneliti metode *OAM-IM* dapat menghasilkan nilai *BER* yang lebih rendah dibanding dengan metode *OFDM* melalui analisis statistik deskriptif, hasil simulasi yaitu semakin jauh jarak semakin tinggi nilai *BER*.

Hasil analisis *BER* yang rendah untuk metode *OAM-IM* dibanding dengan metode *OFDM* ditarik dari perbandingan *BER* pada kedua metode. Rata-rata *BER OFDM* adalah 0.486818 sedangkan *BER* yang lebih rendah tercatat pada metode *OAM-IM* sebesar 0.314013 untuk simulasi yang diajukan. Pengaruh tinggi *BER* pada kedua komunikasi adalah tingginya jumlah *delay* yang akan dilakukan jika *BER* semakin tinggi, hal ini akan mempengaruhi kecepatan transfer data yang lebih lambat untuk *BER* yang lebih tinggi seperti *OFDM*.

Saran untuk penelitian berikutnya adalah perlu diadakan penelitian yang menguji variabel keterkaitan *crosstalk* dan *offset* yang dinamis untuk metode *OAM-IM*, menguji posisi komunikasi *NLOS single user case* untuk skenario ITS dan menggunakan studi yang menjelaskan efek *wave-decay* pada *OAM-IM* dan *OFDM*

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih disampaikan kepada Rektor, Dekan Fakultas Ilmu Komputer, Kepala Program Studi Informatika, Dosen Program Studi Informatika Universitas AMIKO Yogyakarta.

## REFERENCES

- [1]. Dogra, Anutusha, Rakesh Kumar Jha, and Shubha Jain, "A survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Architecture and emerging technologies," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67512-67547, October 2020.
- [2]. Corici, Marius, Eric Troutd, Pousali Chakraborty, and Thomas Magedanz, "An ultra-flexible software architecture concept for 6g core networks," 2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF), pp. 400-405, November 2021.
- [3]. Theoharis, P.I., Raad, R., Tubbal, F., Khan, M.U.A. and Jamalipour, A., "Wideband reflectarrays for 5G/6G: A survey," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 3, pp.871-901, August 2022.
- [4]. Gundall, M., Stegmann, J., Huber, C. and Schotten, H.D., "Towards Organic 6G Networks: Virtualization and Live Migration of Core Network Functions," *Mobile Communication-Technologies and Applications; 25th ITG-Symposium*, pp. 1-6, November 2021.
- [5]. Zhang, S., Zhang, H. and Song, L., "Beyond D2D: Full dimension UAV-to-everything communications in 6G," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 69, pp.6592-6602, April 2020.
- [6]. Gohar, A. and Nencioni, G., "The role of 5G technologies in a smart city: The case for intelligent transportation system," *Sustainability*, Vol 13, p. 5188, April 2021.
- [7]. Nguyen, H.X., Trestian, R., To, D. and Tatipamula, M., "Digital twin for 5G and beyond," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, pp.10-15, February 2021.
- [8]. PERATURAN MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA REPUBLIK INDONESIA NOMOR 1 TAHUN 2019 TENTANG PENGGUNAAN SPEKTRUM FREKUENSI RADIO BERDASARKAN IZIN KELAS." Diakses pada tanggal: Januari 26, 2022, [https://jdih.kominfo.go.id/produk\\_hukum/676](https://jdih.kominfo.go.id/produk_hukum/676)
- [9]. Tahir, M.N. and Katz, M., "ITS performance evaluation in direct short-range communication (IEEE 802.11 p) and cellular network (5G)(TCP vs UDP)," *Towards Connected and Autonomous Vehicle Highways: Technical, Security and Social Challenges*, pp. 257-279, June 2021.
- [10]. Bjornson, E., Van der Perre, L., Buzzi, S. and Larsson, E.G., "Massive MIMO in sub-6 GHz and mmWave: Physical, practical, and use-case differences," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, pp.100-108, January 2019.
- [11]. Chen, R., Zhou, H., Long, W.X. and Moretti, M., "Spectral and energy efficiency of line-of-sight OAM-MIMO communication systems," *China Communications*, vol. 17, pp.119-127, September 2020.
- [12]. Huang, T., Shlezinger, N., Xu, X., Liu, Y. and Eldar, Y.C., "MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 68, pp.3423-3438, May 2020.
- [13]. Basar, E., "Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, pp.3187-3196, February 2020.
- [14]. Basar, E., "Media-based modulation for future wireless systems: A tutorial. *IEEE Wireless Communications*," vol. 26, pp.160-166, July 2019.
- [15]. Willner, A. E., Pang, K., Song, H., Zou, K., & Zhou, H., "Orbital angular momentum of light for communications," *Applied Physics Reviews*, vol. 8 no. 4, October 2021. Jurnal Publikasi: AIP Publishing.

- [16]. Wang, J., Liu, J., Li, S., Zhao, Y., Du, J., & Zhu, L., "Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications," *Nanophotonics*, vol. 11 no.4, pp. 645-680, December 2021. Jurnal Publikasi: .SPIE Publishing.
- [17]. Chen, R., Zhou, H., Moretti, M., Wang, X., & Li, J., "Orbital angular momentum waves: generation, detection, and emerging applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22 no. 2, pp. 840-868, November 2019. Jurnal Publikasi: IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- [18]. Alkhawatrah, M., Alamayreh, A., & Qasem, N., "Cooperative Relay Networks Based on the OAM Technique for 5G Applications," *Computer Systems Science & Engineering*, vol. 44 no. 3, pp. 1911-1919, March 2022. Jurnal Publikasi: Computer Systems Science and Engineering.
- [19]. Yang, Z., Hu, Y., Zhang, Z., Xu, W., Zhong, C., & Wong, K. K., "Reconfigurable intelligent surface based orbital angular momentum: Architecture, opportunities, and challenges," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28 no. 6, pp. 132-137, December 2021. Jurnal Publikasi: IEEE Wireless Communications.
- [20]. Sivadas, N. A., "PAPR reduction of OFDM systems using H-SLM method with a multiplierless IFFT/FFT technique," *ETRI Journal*, vol. 44 no. 3, pp. 379-388, March 2022. Jurnal Publikasi: Electronics and Telecommunications Research Institute dalam Republik Korea.
- [21]. Zhang, H., Song, L., Han, Z., & Poor, H. V., "Spatial equalization before reception: Reconfigurable intelligent surfaces for multi-path mitigation," *ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 8062-8066, June 2021. Prosiding Publikasi: IEEE Conference 2021.
- [22]. Almutairi, A., & Krishna, A., "Filtered-orthogonal wavelet division multiplexing (F-OWDM) technique for 5G and beyond communication systems," *Scientific Reports*, vol. 12 vol. 1, pp. 1-15, December 2022. Jurnal Publikasi: Springer Nature Publishing.
- [23]. Asif, H. M., Affan, A., Tarhuni, N., & Raahemifar, K., "Deep Learning-Based Next-Generation Waveform for Multiuser VLC Systems," *Sensors*, vol. 22 no. 7, p. 2771, April 2022. Jurnal Pulikasi: MDPI Publishing.
- [24]. Chen, C., Nie, Y., Liu, M., Du, Y., Liu, R., Wei, Z., ... & Zhu, B., "Digital pre-equalization for OFDM-based VLC systems: Centralized or distributed?," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33 no. 19, pp. 1081-1084, August 2021. Jurnal Publikasi: IEEE Photonics Society.
- [25]. Liyanaarachchi, S. D., Riihonen, T., Barneto, C. B., & Valkama, M., "Optimized waveforms for 5G-6G communication with sensing: Theory, simulations and experiments," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20 no. 12, pp. 8301-8315, June 2021. Jurnal Publikasi: IEEE Transactions on Wireless Communications.
- [26]. Shu, J., Deng, L., Li, S., & Feng, B., "Use OFDM in OAM communication to reduce multi-path effects," *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, pp. 54-56, November 2020. Prosiding Publikasi: IEEE International Conference.
- [27]. S. Hussein, H., Hagag, M., & Farrag, M., "Extended spatial-index LED modulation for optical MIMO-OFDM wireless communication," *Electronics*, vol. 9 no. 1, pp. 168, January 2020. Jurnal Publikasi: JMECS Universitas Telkom.
- [28]. Basar, E., "Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68 no. 5, 3187-3196, February 2020.
- [29]. Althunibat, S., Mesleh, R., & Qaraqe, K., "Quadrature index modulation based multiple access scheme for 5G and beyond," *IEEE Communications Letters*, vol. 23 no. 12, 2257-2261, August 2019. Jurnal Publikasi: IEEE Transactions on Communications.
- [30]. Lingadevaru, P., Pardhasaradhi, B., Srihari, P., & Sharma, G. V. K., "Analysis of 5G new radio waveform as an illuminator of opportunity for passive bistatic radar," *2021 national conference on communications (NCC)*, pp. 1-6, July 2021. Prosiding Publikasi: National Conference on Communication (NCC).
- [31]. Ren, Y., Yang, W., Zhou, X., Chen, H., & Liu, B., "A survey on TCP over mmWave," *Computer Communications*, vol. 171, pp. 80-88, April 2021. Jurnal Publikasi: Computer Communications.