

# Studi Komparatif GFDM dan OFDM untuk Sistem Komunikasi Perkeretaapian

Dara Aulia Feryando\*, Arief Darmawan, Santi Triwijaya

Teknologi Elektro Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun, Kota Madiun

\*dara@ppi.ac.id

**Abstrak**— Kenaikan permintaan terhadap moda kereta api yang signifikan telah mendorong perkembangan riset teknologi kereta pintar untuk meningkatkan kualitas pelayanan moda ini. Perkembangan teknologi tersebut pada akhirnya menuntut suatu sistem komunikasi yang memiliki kemampuan transmisi tinggi hingga pada level data *gigabyte* per detik. Sementara itu, teknologi komunikasi pada perkeretaapian saat ini memiliki puncak kecepatan data sebesar 172 Kbps untuk GSM-R dan 20 Mbps untuk LTE-R. Di samping itu, teknik *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) pada LTE-R diketahui memiliki PAPR yang tinggi yang dapat menyebabkan degradasi pada performansi sinyal. Di sisi lain, riset terkait *non-orthogonal waveform* telah banyak diusulkan untuk memenuhi permintaan komunikasi kecepatan data tinggi pada skema sistem komunikasi 5G. Penelitian ini membahas mengenai analisis perbandingan salah satu *waveform* yang menjadi kandidat *waveform* 5G, yaitu *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM), dengan OFDM. Analisis perbandingan dilakukan dengan melihat performansi sistem berdasarkan parameter BER, PAPR, dan OOB. Dari hasil yang didapatkan, sistem dengan GFDM memiliki performansi BER yang sama dengan sistem yang menerapkan OFDM. Namun, dari segi parameter PAPR dan OOB, sistem dengan GFDM memiliki nilai lebih baik. Nilai PAPR sistem GFDM memiliki selisih -1 dB dari sistem yang menggunakan OFDM. Sedangkan nilai OOB antara sistem GFDM dan OFDM memiliki nilai perbandingan rata-rata 4,38 dBW untuk penggunaan skema *mapper* QAM dan 2,07 untuk penggunaan skema *mapper* OQAM.

**Kata Kunci**— BER, GFDM, OFDM, OOB, PAPR

DOI: 10.22441/jte.2022.v13i2.003

## I. PENDAHULUAN

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, permintaan terhadap jasa transportasi kereta api mengalami kenaikan yang signifikan dengan rata-rata kenaikan penumpang kereta api dari tahun 2006 sampai dengan 2019 adalah sekitar 2.330.000 orang per tahun [1]. Diambil dari beberapa sumber informasi, kenaikan jumlah penumpang kereta api disebabkan oleh beberapa faktor yang diantaranya adalah pergeseran pandangan masyarakat, dimana yang sebelumnya menganggap kereta api sebagai transportasi alternatif menjadi transportasi angkutan massal, kecepatannya menempuh jarak yang jauh, jaminan keselamatan yang lebih tinggi, serta kualitas kenyamanan yang lebih baik dibandingkan dengan moda lainnya. Dari sisi keramahan lingkungan, moda kereta api sebagai angkutan massal menghasilkan emisi gas buang lebih sedikit dibandingkan

dengan moda lainnya [2], sehingga kereta api juga disebut sebagai *green transportation*.

Banyaknya kelebihan dari moda kereta api seperti yang telah disebutkan di atas, telah mendorong perkembangan riset teknologi kereta pintar. Beberapa riset yang dikembangkan terkait dengan teknologi kereta pintar, diantaranya adalah riset terkait operasi kereta otomatis, sistem pemantauan *real time*, peringatan dini terkait kerusakan atau penurunan performansi di sarana maupun prasarana, informasi penumpang yang memiliki akurasi tinggi, dan rencana perawatan yang bersifat prediktif. Pada akhirnya, perkembangan teknologi-teknologi kereta pintar tersebut akan menuntut suatu sistem komunikasi yang memiliki kemampuan transmisi tinggi hingga pada level data *gigabyte* per detik [3]. Sementara itu, teknologi komunikasi pada perkeretaapian saat ini memiliki puncak *data rate* sebesar 172 Kbps untuk GSM-R dan 20 Mbps untuk LTE-R.

*Long Term Evolution for Railways* (LTE-R) adalah teknologi nirkabel generasi keempat yang khusus digunakan untuk sistem komunikasi perkeretaapian. LTE-R mengikuti standar *Long Term Evolution* (LTE) dan *System Architecture Evolution* (SAE). Karena LTE-R merupakan sistem yang mengikuti standar LTE, maka teknologi yang menjadi kunci pada LTE-R adalah *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) [4].

OFDM yang saat ini digunakan sebagai teknik *multiplexing* pada teknologi LTE-R dapat mengatasi masalah transmisi sinyal pada kanal *multipath* dengan baik [5]. Namun, OFDM memiliki kekurangan dari sisi *peak to average power ratio* (PAPR) [6][7]. Tingginya PAPR pada OFDM menyebabkan degradasi performansi cukup serius ketika sinyal melewati *non linier high power amplifier* (HPA). *Nonlinier* HPA dapat memengaruhi peningkatan BER dan radiasi *out-of-band* (OOB) yang kemudian menyebabkan terjadinya *adjacent channel interference* [7]. Di sisi lain, riset terkait *non-orthogonal waveform* telah banyak diusulkan sebagai kandidat *waveform* pada skema sistem komunikasi 5G [8]. Salah satu dari *non-orthogonal waveform* tersebut diketahui mampu memenuhi permintaan komunikasi *data rate* tinggi serta menghasilkan nilai PAPR yang lebih rendah dibandingkan dengan OFDM [9].

*Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM) merupakan salah satu *non-orthogonal waveform* yang dapat dianggap sebagai generalisasi dari OFDM [10]. Secara umum, beberapa kelebihan GFDM dibandingkan dengan OFDM diantaranya adalah fleksibilitas dalam pengaturan pembentukan

simbol-simbolnya, lebih efisien dalam penggunaan *bandwidth*, mendukung teknik *fragmented spectrum*, dan kompatibel dengan teknik *multiple input multiple output* (MIMO). Karena GFDM merupakan generalisasi dari OFDM, implementasi MIMO pada GFDM sesederhana seperti implementasi MIMO pada OFDM. Secara khusus, kelebihan GFDM dibandingkan dengan OFDM adalah dari PAPR yang dihasilkan [9]. GFDM memiliki performansi PAPR yang lebih baik dibandingkan dengan OFDM.

Pada teknologi 4G, teknik *multicarrier* OFDM digunakan pada skema *downlink* dan SC-FDM untuk skema *uplink* [11]. Pengaturan yang berbeda tersebut bertujuan untuk mengatur daya yang akan digunakan. Di sisi user, penggunaan daya harus diatur seefisien mungkin. Oleh karena itu, teknik *singlecarrier* dipilih dibandingkan teknik *multicarrier* karena membutuhkan daya lebih rendah. Sebaliknya, di sisi *base station*, teknik *multicarrier* dapat digunakan untuk transmisi data lebih cepat dan penggunaan daya lebih besar akibat kecepatan data yang tinggi tersebut dapat dipenuhi. Karena GFDM juga merupakan skema *multicarrier* maka pada penelitian ini, baik OFDM maupun GFDM yang dibangkitkan diaplikasikan ke dalam skema kanal *downlink*.

Di dalam penelitian ini, performansi sistem komunikasi yang menggunakan OFDM dianalisis secara komparatif dengan sistem komunikasi yang menggunakan GFDM. Kinerja sistem akan dibandingkan berdasarkan parameter *Bit Error Rate* (BER), *Peak to Average Power Ratio* (PAPR), dan *Out-of-Band Ratio* (OOB). Kedua sistem dibangkitkan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab. Pada sistem GFDM yang dibangkitkan, *root raised cosine pulse shaping* diterapkan untuk mereduksi efek OOB. *Mapper* yang digunakan pada penelitian ini adalah 16-QAM dan 16-OQAM. Tujuan penggunaan *mapper* QAM dan OQAM dalam penelitian ini adalah karena pada penelitian sebelumnya [12] telah dibuktikan bahwa penggunaan OQAM dapat meningkatkan kinerja dari teknik GFDM. Teknik penggunaan banyak antena atau MIMO juga diaplikasikan di dalam penelitian ini. Sistem yang dibuat diasumsikan berada pada lingkungan dengan banyak pengguna. Karena sistem yang dibangkitkan adalah sistem pada lingkungan banyak pengguna, maka teknik *precoding* yang bertujuan untuk mengatasi *inter user interference* (IUI) diterapkan. Adapun teknik *precoding* yang dipilih adalah *regularized channel inversion* (RCI). RCI diketahui merupakan teknik *precoding* sederhana yang dapat mengatasi *inter user interference* (IUI) pada lingkungan *multiuser* tanpa menimbulkan *noise enhancement* [13].

## II. PENELITIAN TERKAIT

Pada penelitian yang dilakukan oleh Ke Guan dkk [4], performansi BER dan *power spectral density* (PSD) dari OFDM pada LTE-R dengan skema *mapper* berbeda diuji pada model kanal kereta cepat. Berdasarkan hasil penelitian yang didapatkan, OFDM dapat mengatasi interferensi akibat *multipath* pada model kanal yang dibangkitkan sehingga OFDM dinilai potensial untuk diterapkan pada lingkungan kereta cepat.

Pada penelitian [3], teknologi-teknologi generasi kelima untuk kereta pintar akan membutuhkan sistem komunikasi

yang mampu mendukung transmisi data hingga pada level Gbps. Sementara itu, teknologi komunikasi nirkabel untuk perkeretaapian dengan puncak *data rate* tertinggi, yaitu LTE-R, masih memiliki puncak *data rate* pada tingkat Mbps. Disamping itu, penelitian [6] dan [7] menjelaskan tentang tingginya PAPR pada OFDM beserta cara mitigasi efek dari PAPR tersebut. Namun, pada teknik-teknik mitigasi PAPR yang telah ada, semakin besar efek PAPR yang dapat direduksi semakin tinggi kompleksitas sistem yang dibutuhkan [6].

Di sisi lain, penelitian [8] dan [9] mengusulkan skema penggunaan *non orthogonal waveform*, yaitu GFDM, yang merupakan turunan dari OFDM, untuk skema sistem komunikasi dengan *data rate* sampai dengan tingkat Gbps tanpa menghasilkan PAPR yang berarti. Perbandingan performansi antara GFDM dan OFDM juga dijelaskan di dalam penelitian [13]. Pada penelitian [13], GFDM dan OFDM dianalisis pada lingkungan *multiuser* MIMO sehingga teknik *precoding* diterapkan untuk mengatasi *inter user interference*. Namun, pada penelitian tersebut tidak menyajikan perbandingan performansi antara GFDM dan OFDM berdasarkan parameter *out-of-band ratio* (OOB). Oleh karena itu, penelitian ini menyajikan hasil studi komparatif antara GFDM dan OFDM untuk melihat performansi sistem berdasarkan tiga parameter, yaitu parameter BER, PAPR, dan OOB.

## III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini membahas tentang perbandingan sistem komunikasi nirkabel yang menggunakan teknik OFDM dengan sistem komunikasi yang menggunakan teknik GFDM. Sehingga, pada simulasi yang dibuat, terdapat dua sistem yang dibangkitkan, yaitu sistem *multiuser* MIMO dengan OFDM dan sistem *multiuser* MIMO dengan GFDM. Kedua sistem menerapkan skema *mapper quadrature amplitude modulation* (QAM). Khusus pada sistem *multiuser* MIMO GFDM, sistem juga dibangkitkan untuk skema *mapper* kedua, yaitu *orthogonal quadrature amplitude modulation* (OQAM). Perbandingan dilakukan dengan membandingkan sistem komunikasi nirkabel *multiuser* MIMO-OFDM-QAM dengan *multiuser* MIMO-GFDM-QAM dan *multiuser* MIMO-GFDM-OQAM.

### A. Parameter Simulasi

Parameter sistem *multiuser* MIMO-OFDM dan *multiuser* MIMO-GFDM yang dibangkitkan diuraikan di dalam Tabel 1 di bawah ini.

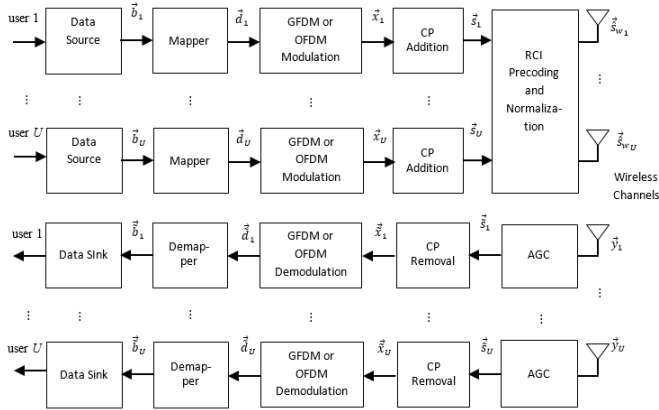
Tabel 1. Parameter-Parameter Sistem pada Simulasi

Jenis Parameter	<i>Multiuser</i> MIMO-GFDM	<i>Multiuser</i> MIMO-OFDM
Total bit yang dibangkitkan	1.240 Kbit/ <i>user</i>	1.240 Kbit/ <i>user</i>
<i>Mapper</i>	QAM dan OQAM	QAM
<i>Pulse shaping</i>	<i>Root Raised Cosine</i> (RRC)	<i>Rectangular</i>
<i>Roll of factor</i>	0 dan 1	-
Jumlah <i>point</i> IFFT	512	512

Jenis Parameter	Multiuser MIMO-GFDM	Multiuser MIMO-OFDM
Jumlah data yang dibawa per simbol	310 data	310 data
Jumlah subcarrier (K)	16	512
Jumlah subsimbol (M)	32	-
Teknik precoding	RCI	RCI

### B. Model Sistem yang Diusulkan

Pada sub bab ini, sistem *multiuser* MIMO-GFDM pada skema *downlink* akan diuraikan. Blok diagram *transceiver* ditunjukkan pada Gambar 2. *Base station* (BS) mengaplikasikan sejumlah  $NT$  antenna transmit dan berkomunikasi dengan sejumlah  $U$  pengguna. Pengguna ke- $u$  ( $u = 1, 2, 3, \dots, U$ ) mengaplikasikan antenna penerima tunggal. Jika  $NR$  didefinisikan sebagai total antenna dari semua pengguna, maka  $NR$  adalah  $\sum_{u=1}^U 1$ . Pada skema yang diusulkan, masing-masing pengguna sebenarnya dapat mengaplikasikan banyak antenna. Namun, meskipun pengguna mengaplikasikan banyak antenna, algoritma yang diusulkan ini tetap akan memroses data pengguna dengan mengasumsikan bahwa masing-masing antenna adalah pengguna dengan antenna tunggal. Oleh karena itu, pada penelitian ini, diasumsikan bahwa masing-masing pengguna di lingkungan *multiuser* mengaplikasikan antenna tunggal.



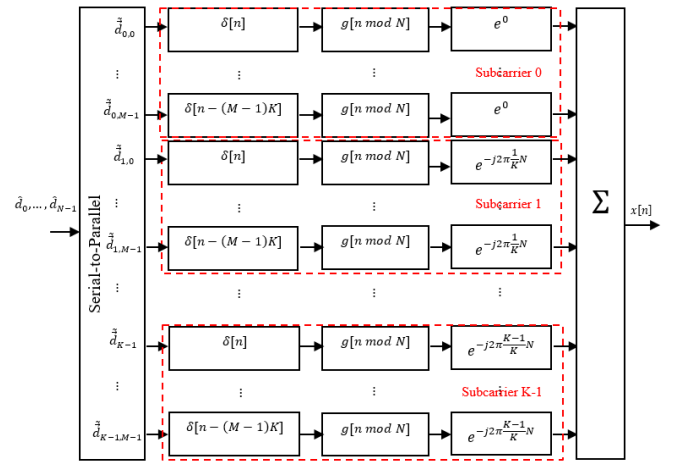
Gambar 1. Blok Diagram *Transceiver* Sistem yang Diusulkan

Jumlah data yang dibangkitkan di masing-masing pengguna sama dan mengikuti simulasi Monte Carlo. Skema *mapper* yang digunakan di dalam penelitian ini untuk sistem yang diusulkan adalah QAM dan OQAM dengan 16-ary. Pada sistem *multiuser* MIMO-GFDM yang menggunakan *mapper* 16-OQAM, komponen *quadrature* digeser sebanyak  $M/2$ . Penggeseran komponen *quadrature* dari simbol GFDM bertujuan untuk mencegah penyebaran energi simbol ke semua titik-titik konstelasi simbol lainnya. Di samping itu, dengan melakukan penggeseran komponen *quadrature* dari simbol GFDM menghasilkan transisi yang tidak simultan antara komponen *inphase* dan *quadrature*. Dengan tujuan tersebut, OQAM diharapkan dapat mencegah *inter carrier interferensi* (ICI). Kemudian, aliran simbol yang berasal dari sistem dengan

*mapper* QAM atau sistem dengan OQAM akan diproses di modulator GFDM.

Di dalam penelitian [10], GFDM dapat dilihat sebagai turunan dari OFDM. Baik GFDM dan OFDM, keduanya menggunakan teknik transmisi *multicarrier* dan penambahan *cyclic prefix* untuk mendapatkan ketahanan sinyal pada kanal *fading*. Sama seperti pada OFDM, pada GFDM, algoritma IFFT juga diterapkan untuk menyederhanakan kompleksitas sistem. Perbedaan diantara keduanya terletak pada penyusunan simbol-simbolnya. Satu simbol OFDM terdiri dari  $N_{OFDM}$  sampel data. Sementara itu, GFDM menerapkan skema blok, dimana di dalam skema blok diperkenalkan istilah subsimbol. Satu simbol GFDM terdiri dari beberapa *subcarrier* dan subsimbol. Jumlah dari *subcarrier* dan subsimbol di masing-masing blok GFDM atau simbol GFDM dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan. Karena fleksibilitas pengaturan blok pada GFDM ini membuat GFDM disebut sebagai turunan dari OFDM. Simbol OFDM dapat dibentuk dari GFDM ketika subsimbol dari blok GFDM diatur bernilai satu.

Pada modulator GFDM, aliran simbol serial QAM,  $\vec{d}$ , dikonversi ke dalam data paralel. Data paralel didekomposisi ke dalam beberapa blok data dengan ukuran per blok sebesar  $K \times M$ .  $K$  menotasikan jumlah *subcarrier* dan  $M$  menotasikan jumlah subsimbol. Elemen total pada blok GFDM dinotasikan sebagai  $N_{GFDM}$  yang mengandung beberapa simbol-simbol pengguna,  $N_D$ , dan nilai nol. Hasil dekomposisi dapat dituliskan di dalam matriks dengan ukuran  $K \times 1$ , sehingga  $\vec{d}_M = (d_{0,0} \mathbf{0} d_{1,0} \mathbf{0} \dots \mathbf{0} d_{k-1,0} \mathbf{0})$ , dimana  $\mathbf{0}$  adalah sebuah baris nol berukuran  $M \times 1$ .



Gambar 2. Modulator GFDM

Elemen tunggal dari blok data pengguna ke- $u$ ,  $\vec{d}_{k,m}$ , dimana data ditransmisikan pada *subcarrier* ke- $k$  dan di dalam subsimbol ke- $m$ , disampel oleh faktor  $N_{GFDM}$  untuk mengubahnya ke dalam deretan sinyal impuls. Kemudian sinyal yang dihasilkan digeser secara sirkular dan ditransmisikan oleh bentuk pulsa yang mengikuti persamaan di bawah ini [14].

$$g_{k,m}[n] = g[(n - mK) \bmod N] \exp\left(-j2\pi \frac{k}{K} n\right) \quad (1)$$

Dimana  $n$  menotasikan indeks sampel. Operasi modulo dan eksponensial kompleks di atas bertujuan untuk menggeser  $g_{k,m}[n]$  secara sirkular dari  $g_{k,0}[n]$  di dalam domain waktu dan

frekuensi. *Pulse shaping*,  $g[n]$ , yang digunakan di dalam penelitian ini adalah *root raised cosine* (RRC) dengan nilai *roll of factor* yang telah ditentukan. *Roll of factor* atau  $\alpha$  yang digunakan di dalam *multiuser* MIMO-GFDM dengan 16-QAM adalah nol. Sedangkan  $\alpha$  yang digunakan di dalam *multiuser* MIMO-GFDM dengan 16-OQAM adalah satu. Sinyal per blok GFDM didapatkan dengan menjumlahkan sinyal-sinyal individu yang telah difilter dengan menggunakan *pulse shaping*. Secara detail, proses yang terjadi di dalam pembentukan blok GFDM dapat dilihat pada Gambar 2 di atas. Persamaan dari sinyal per blok GFDM dituliskan secara matematis sebagai berikut.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{k,m}[n]d_{k,m} \quad (2)$$

Dimana  $n = 0, \dots, N_{GFDM} - 1$ . Proses pemfilteran dari simbol-simbol dengan *pulse shaping* terkait dapat dilihat pada persamaan (3) di bawah. Vektor  $\vec{x}$  menotasikan vector sinyal GFDM dan  $\mathbf{A}$  menotasikan matriks *pulse shaping*  $(g_{k,m}[n])^T$  dari  $KM \times KM$  semua filter dari blok GFDM. Kemudian *cyclic prefix* (CP) berukuran  $N_{CP}$  ditambahkan di masing-masing sinyal blok GFDM untuk menghasilkan  $\vec{s}$ . Seperti OFDM, CP merupakan Salinan dari simbol-simbol GFDM yang terletak di akhir simbol-simbol GFDM pada satu blok GFDM. Salinan simbol tersebut kemudian diletakkan di depan simbol-simbol GFDM. Keberadaan CP ini dapat meningkatkan ketahanan simbol-simbol selama proses transmisi. Superposisi dari sinyal blok GFDM dinamakan sinyal GFDM.

$$\vec{x} = \mathbf{A}\vec{d} \quad (3)$$

Ketika *channel state information* (CSI) diketahui pada *transmitter*, interferensi antara pengguna dapat diminimalisasi dan bahkan dihilangkan dengan dua metode yang disebut dengan metode dekomposisi dan *pre-equalizer*. Di dalam jurnal ini, metode yang diterapkan adalah *pre-equalizer* dengan metode berdasarkan kriteria MMSE untuk mendapatkan matriks *precoding*. Metode yang digunakan tersebut dikenal sebagai *precoding regularized channel inversion* (RCI) [15]. Matriks *precoding* tersebut bertujuan mengatasi interferensi antar kanal pengguna tanpa menyebabkan *noise enhancement*. Berikut ini formula untuk mendapatkan matriks *precoding*,  $\mathbf{W}$ .

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}_s^H (\mathbf{H}_s \mathbf{H}_s^H + \sigma_z^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (4)$$

Dari persamaan di atas, matriks *precoding* ditentukan sebagai  $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{NT \times NT}$ . Matriks  $\mathbf{H}_s$  menotasikan matriks kanal dari semua pengguna dengan ukuran  $NR \times NT$ . Varian *noise* dari kanal dinotasikan sebagai  $\sigma_z^2$ . Sementara  $\mathbf{I}$  adalah matriks identitas dengan ukuran  $NR \times NR$ .

Matriks *precoding* di atas dikalikan dengan matriks vektor data per pengguna,  $\vec{s}_u$ , untuk mendapatkan vector simbol yang telah di-*precoding*,  $\vec{s}_{w_s}$ , seperti yang ditunjukkan pada persamaan (5) di bawah. Kumpulan matriks vector data per pengguna dapat disusun sebagai  $\vec{s}_s = [\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_U]^T$ .

$$\vec{s}_{w_s} = \mathbf{W}\vec{s}_s \quad (5)$$

Sebelum matriks *precoding* ditransmisikan melalui kanal nirkabel, masing-masing matriks tersebut dikalikan dengan

gain normalisasi  $\gamma$  untuk mendapatkan vector matriks  $\vec{\hat{s}}_w$ , dimana  $\vec{\hat{s}}_{w_s} = [\vec{\hat{s}}_{w_1}, \vec{\hat{s}}_{w_2}, \dots, \vec{\hat{s}}_{w_U}]^T$ .

$$\gamma = \sqrt{\frac{NT}{\text{tr}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H)}} \quad (6)$$

$$\vec{\hat{s}}_{w_s} = \gamma \vec{s}_{w_s} \quad (7)$$

Model kanal dari BS ke pengguna ke- $u$  adalah bernilai kompleks random yang dinotasikan dengan matriks  $\mathbf{H}$  dengan ukuran  $1 \times NT$ . Matriks kanal  $\mathbf{H}_u$  mengikuti distribusi normal  $\mathcal{N}(0,1)$ .  $\mathbf{H}_s$  menotasikan model kanal dari BS ke semua antenna pengguna yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_U \end{bmatrix} \quad (8)$$

Proses transmisi melalui kanal nirkabel dapat dimodelkan secara matematis pada persamaan (9). Vektor  $\vec{y}_s$  dinotasikan sebagai sinyal yang diterima untuk semua pengguna dimana  $\vec{y}_s = [\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_U]^T$ . Sedangkan  $\vec{z}_s \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_z^2)$  yang merepresentasikan vector *noise* AWGN yang ditambahkan ke semua pengguna.

$$\vec{y}_s = \mathbf{H}_s \vec{\hat{s}}_{w_s} + \vec{z}_s \quad (9)$$

Pada masing-masing *receiver* di sisi pengguna, sinyal yang diterima oleh pengguna ke- $u$  akan diproses di dalam *automatic gain control* (AGC) untuk didenormalisasi dari efek normalisasi *gain*  $\gamma$ . Proses denormalisasi ditunjukkan oleh persamaan (10) di bawah ini.

$$\vec{\hat{s}}_s = \frac{\vec{y}_s}{\gamma} \quad (10)$$

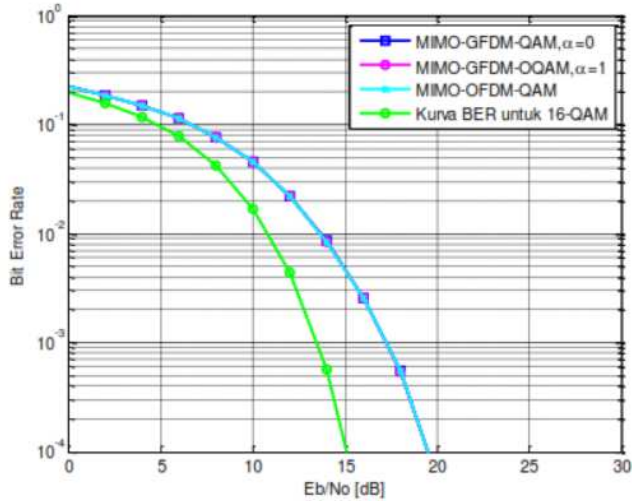
Setelah didenormalisasi, sinyal yang diterima didemodulasi dan di-*demapper* oleh masing-masing pengguna untuk mendapatkan data informasi. *Mean square error* (MSE) antara sinyal yang ditransmisikan dan yang diterima dikalkulasi sebagai parameter *bit error rate*.

#### IV. HASIL DAN ANALISA

Pada penelitian ini, terdapat tiga skenario pengujian yang dilakukan, yaitu membandingkan performansi sistem *multiuser* MIMO-GFDM, baik dengan *mapper* QAM maupun OQAM, dengan *multiuser* MIMO-OFDM berdasarkan parameter BER, PAPR, dan OOB. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM menerapkan *pulse shaping* dengan  $\alpha$  bernilai nol, sedangkan sistem *multiuser* MIMO-GFDM-OQAM menerapkan *pulse shaping* dengan  $\alpha$  bernilai satu.

Pada skenario yang pertama, dilakukan perbandingan performansi sistem berdasarkan parameter BER. Jumlah pengguna yang diterapkan pada skenario ini adalah empat pengguna. Hasil yang diperoleh dari simulasi yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah. Berdasarkan grafik tersebut, performansi ketiga sistem yang dibandingkan menunjukkan hasil yang sama. Kurva BER QAM digunakan untuk memvalidasi hasil performansi BER dari ketiga sistem

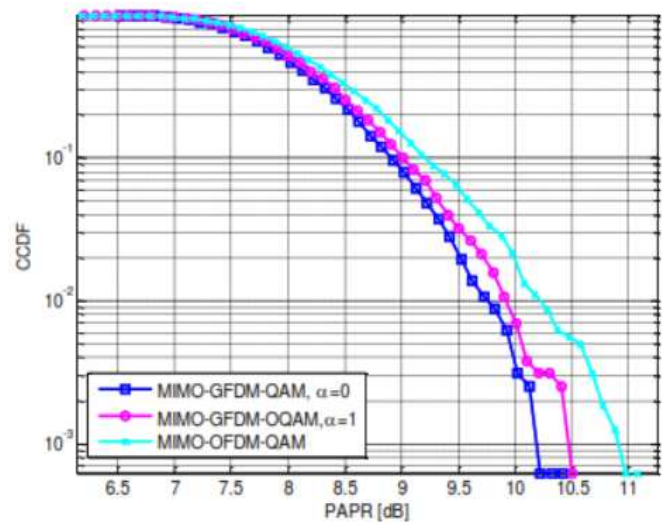
yang dibangkitkan. Adapun pembangkitan kurva BER mengikuti persamaan (11). Perbedaan performansi BER dari ketiga sistem dengan QAM sebagai validator memiliki perbedaan 0.0132 atau -18 dB. Perbedaan -18 dB ini menyebabkan sistem *multiuser* MIMO-GFDM membutuhkan daya 4dB lebih besar dibandingkan dengan daya sistem yang seharusnya dicapai.



Gambar 3. Perbandingan Performansi BER dari sistem *multiuser* MIMO-GFDM dan MIMO-OFDM

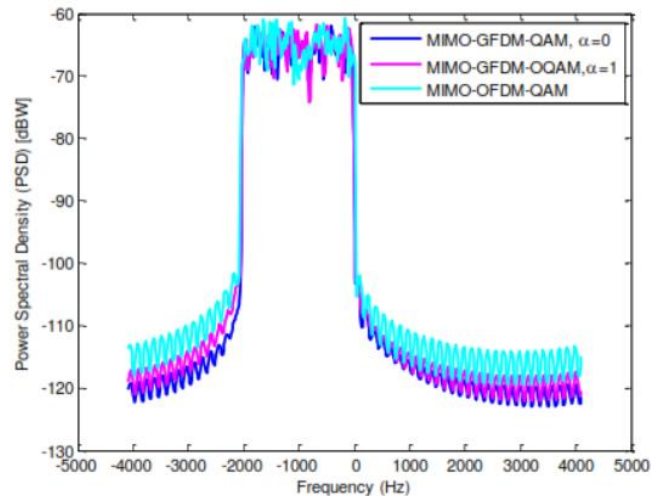
$$BER_{16-QAM} = \frac{3}{4} \frac{\text{erfc}(\sqrt{2E_b/10})}{2} \quad (11)$$

Pada skenario kedua, performansi ketiga sistem memiliki hasil PAPR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah. Berdasarkan hasil tersebut, sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM memiliki nilai PAPR paling baik, dengan rata-rata selisih sebesar 0.794 atau -1 dB dari PAPR yang dihasilkan pada *multiuser* MIMO-OFDM-QAM. Sedangkan sistem *multiuser* MIMO-GFDM-OQAM memiliki nilai rata-rata selisih 0.806 atau -0.9 dB dari sistem *multiuser* MIMO-OFDM-QAM. Lebih rendahnya nilai PAPR yang dimiliki sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM disebabkan karena penggunaan *subcarrier* yang lebih sedikit dibandingkan dengan sistem OFDM. Pada sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM jumlah *subcarrier* yang digunakan adalah 16 sedangkan pada sistem *multiuser* MIMO-OFDM adalah 512. Semakin banyak *subcarrier* yang digunakan, semakin banyak sinyal-sinyal yang dijumlahkan sehingga menghasilkan PAPR yang tinggi meskipun dari sisi BER memiliki performansi yang hampir sama.



Gambar 4. Perbandingan Performansi PAPR dari sistem *multiuser* MIMO-GFDM dan MIMO-OFDM

Pada skenario pengujian yang terakhir, perbandingan performansi dari ketiga sistem yang dibangkitkan dilihat berdasarkan parameter *out-of-band* (OOB). Hasil dari pengujian sistem diperlihatkan pada Gambar 5. Berdasarkan hasil yang diperoleh, sistem *multiuser* MIMO-GFDM, baik dengan *mapper* QAM maupun OQAM memiliki nilai OOB lebih rendah dibandingkan dengan sistem *multiuser* MIMO-OFDM. Adapun perbandingan rata-rata nilai OOB antara sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM dengan *multiuser* MIMO-OFDM-QAM adalah 4.38 dBW atau 2.78 W. Sedangkan perbandingan rata-rata nilai OOB antara sistem *multiuser* MIMO-GFDM-OQAM dengan *multiuser* MIMO-OFDM-QAM adalah 3.18 dBW atau 2.07 W. Lebih rendahnya nilai OOB dari sistem *multiuser* MIMO-GFDM dibandingkan dengan sistem *multiuser* MIMO-OFDM disebabkan karena adanya penggunaan filter *root raised cosine*.



Gambar 5. Perbandingan Performansi OOB dari sistem *multiuser* MIMO-GFDM dan MIMO-OFDM

## V. KESIMPULAN

Tiga sistem yang dibangkitkan, yaitu sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM, MIMO-GFDM-OQAM, MIMO-OFDM-QAM, memiliki peformansi BER yang sama dimana ketiga sistem memiliki beda 0.0132 atau -18 dB dari kurva QAM yang digunakan sebagai validator. Dari sisi PAPR, sistem *multiuser* MIMO-GFDM-QAM memiliki performansi paling baik dengan rata-rata selisih sebesar 0.794 atau -1 dB. Dari sisi parameter OOB, sistem *multiuser* MIMO-GFDM memiliki performansi lebih baik dibandingkan dengan sistem *multiuser* MIMO-OFDM karena pengaruh penggunaan *pulse shaping root raised cosine*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Program Studi Teknologi Elektro Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun, atas bantuan materil dan moril dalam pengerjaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada tim Jurnal Teknologi Elektro atas dipublikasikannya penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. P. Statistik, "Jumlah Penumpang Kereta Api (Ribu Orang), 2020," [www.bps.go.id](http://www.bps.go.id). <https://www.bps.go.id/indicator/17/72/2/jumlah-penumpang-kereta-api.html> (accessed Mar. 01, 2021).
- [2] Hari Maghfiroh, "Dunia Kereta - Membangun Industri Kereta Api dalam Negeri," [www.keretalistrik.com/](http://www.keretalistrik.com/), 2016. <http://www.keretalistrik.com/2016/02/membangun-industri-kereta-api-dalam.html> (accessed Mar. 01, 2021).
- [3] B. Ai, A. F. Molisch, M. Rupp, and Z. D. Zhong, "5G key technologies for smart railways," *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 6, pp. 856–893, 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.2988595.
- [4] K. Guan, Z. Zhong, and B. Ai, "Assessment of LTE-R using High Speed Railway Channel Model," no. May, 2011, doi: 10.1109/CMC.2011.34.
- [5] K. Mahender, T. A. Kumar, and K. S. Ramesh, "Performance study of OFDM over multipath fading channels for next wireless communications," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, no. 20, pp. 10205–10210, 2017.
- [6] A. Gangwar and M. Bhardwaj, "An Overview: Peak to Average Power Ratio in OFDM system & its Effect," *Int. J. Commun. Comput. Technol.*, vol. 01, no. 2, pp. 22–25, 2012, [Online]. Available: [www.ijccts.org](http://www.ijccts.org).
- [7] M. C. P. Paredes and M. J. F.-G. García, "The Problem of Peak-to-Average Power Ratio in OFDM Systems," pp. 1–8, 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1503.08271>.
- [8] E. V. Forschung *et al.*, "5G Waveform Candidate Selection," *5Gnow*, p. 100, 2014.
- [9] N. Michailow and G. Fettweis, "Low peak-to-average power ratio for next generation cellular systems with generalized frequency division multiplexing," *ISAPCS 2013 - 2013 Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst.*, pp. 651–655, 2013, doi: 10.1109/ISAPCS.2013.6704629.
- [10] B. Farhang-Boroujeny and H. Moradi, "Derivation of GFDM based on OFDM principles," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2015-Septe, pp. 2680–2685, 2015, doi: 10.1109/ICC.2015.7248730.
- [11] F. Khan, "LTE for 4G Mobile Broadband," *LTE 4G Mob. Broadband*, 2009, doi: 10.1017/cbo9780511810336.
- [12] F. H. Ramadiansyah, "Perbaikan Kinerja Sistem Generalized Frequency Division Multiplexing dengan menggunakan Offset Quadrature Amplitude Modulation," 2017.
- [13] D. A. Feryando, "Performance analysis of regularized channel inversion precoding in multiuser MIMO-GFDM downlink systems," in *2017 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 2017, pp. 101–105, doi: 10.1109/APWiMob.2017.8283989.
- [14] N. Michailow *et al.*, "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, 2014.
- [15] C. B. Peel, B. M. Hochwald, and A. L. Swindlehurst, "A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multiantenna Multiuser Communication — Part I: Channel Inversion and Regularization," vol. 53, no. 1, pp. 195–202, 2005.