

Analisis Kinerja *Precoding Block Diagonalization* (BD) pada *Multi-User MIMO* untuk *Downlink 5G*

Nilla Rachmaningrum, S.T., M.T.¹, Risdillah Mimma Untsa, S.T., M.T.², Tamara Raafina Hadiani³

¹ nilla.rachmaningrum@ittelkom-sby.ac.id

² risdilah.untsa@ittelkom-sby.ac.id

* Correspondence: tamara.raafina@student.ittelkom-sby.ac.id;

Abstrak: Teknologi komunikasi *wireless* terus mengalami perkembangan dan *user* menuntut untuk disediakan layanan data berkecepatan tinggi (*high data rate*) dan 5G dapat memenuhi kebutuhan tersebut, didukung dengan spektrum frekuensi tinggi yang dimilikinya. Untuk menunjang penerapan sistem 5G, dibutuhkan fitur lain yang dapat meningkatkan *data rate* khusus untuk beberapa *user* yaitu teknologi *smart antenna Multi-User MIMO*. Keunggulan dari penggunaan MU-MIMO adalah peningkatan data, peningkatan kehandalan dan peningkatan efisiensi energi. Dalam penelitian ini digunakan dua skema antena MU-MIMO yaitu 2x2 dengan 2 *user* dan 4x4 dengan 4 *user*. Namun, karena penggunaan antena berjumlah lebih dari satu, interferensi yang dihasilkan pun semakin besar dan perlu untuk di atasi. Maka digunakanlah teknik *precoding Block Diagonalization* (BD) pada sistem MU-MIMO untuk memisahkan sinyal informasi yang akan dikirimkan untuk masing-masing *user* dari sinyal interferensi. Dengan penggunaan parameter *bit error rate* (BER) dan *Energy per Bit to Noise Ratio* (Eb/No) sebagai cara untuk menganalisis kinerja, nilai yang ingin didapatkan adalah nilai BER yang kecil dan Eb/No yang besar sebagai tanda bahwa sistem bekerja dengan baik. Hasil dari penelitian ini adalah penggunaan antena dengan skema 4x4 dengan 4 *user* memiliki nilai BER 0.0001102 lebih baik dari pada penggunaan antena dengan skema 2x2 dengan 2 *user*.

Kata Kunci: *multi-user MIMO, precoding, block diagonalization* (BD)

Performance Analysis of Block Diagonalization (BD) Precoding in Multi-User MIMO for Downlink 5G

Abstract: *Wireless communication technology continues to develop and users demand to be provided with high data rate services and 5G can meet these needs, supported by its high frequency spectrum. To support the implementation of the 5G system, another feature is needed that can increase the data rate specifically for some users, namely the Multi-User MIMO smart antenna technology. The advantages of using MU-MIMO are increased data, increased reliability and increased energy efficiency. In this study, two MU-MIMO antenna schemes were used, namely 2x2 with 2 users and 4x4 with 4 users. However, due to the use of more than one antenna, the resulting interference is even greater and needs to be overcome. Then the Block Diagonalization (BD) precoding technique is used in the MU-MIMO system to separate the information signal that will be sent to each user from the interference signal. By using the bit error rate (BER) and Energy per Bit to Noise Ratio (Eb/No) parameters as a way to analyze performance, the values to get are small BER and large Eb/No values as a sign that the system is working properly. The results of this study are the use of*

an antenna with a 4x4 scheme with 4 users has a BER value of 0.0001102 which is better than the use of an antenna with a 2x2 scheme with 2 users.

Keywords: multi-user MIMO, precoding, block diagonalization (BD)

1. Pendahuluan

Teknologi komunikasi *wireless* terus mengalami perkembangan dan hal ini berbanding lurus dengan gaya hidup digital yang semakin meningkat, sehingga *user* mulai bergantung pada teknologi tersebut. *User* akan menuntut untuk mendapatkan layanan akses informasi yang tak terbatas, kemampuan berbagi data yang fleksibel dan berkecepatan tinggi (*high data rate*) [1]. Hadirnya generasi 5G dalam standar telekomunikasi dapat memenuhi kebutuhan tersebut, didukung dengan spektrum frekuensi tinggi yang dimilikinya.

Untuk menunjang penerapan sistem 5G, dibutuhkan fitur lain yang secara khusus dapat meningkatkan *data rate* untuk beberapa *user* yaitu teknologi *smart antenna* MIMO. Teknologi ini sangat memungkinkan untuk digunakan dalam berkomunikasi, karena memiliki beberapa antena untuk mentransmisikan beberapa aliran data secara simultan. Dalam sistem seluler, keuntungan umum yang akan diperoleh dalam penggunaan MU-MIMO, meliputi: peningkatan data, peningkatan kehandalan dan peningkatan efisiensi energi [1]. Namun karena jumlah antena yang digunakan banyak, maka interferensi yang dihasilkan pun semakin besar.

Sejak diperkenalkannya MU-MIMO sebagai teknologi penunjang sistem 5G, berbagai penelitian dilakukan salah satunya membahas mengenai penerapan teknik *precoding*. *Precoding* dapat mengurangi efek yang diciptakan oleh *path loss* dan interferensi, serta dapat memaksimalkan *throughput*.

Maka, dalam hal ini digunakan teknik *precoding* *Block Diagonalization* (BD) untuk memisahkan sinyal informasi yang dikirimkan untuk masing-masing *user* dan sinyal penginterferensi. *Block Diagonalization* merupakan metode *precoding* yang dapat mengatasi interferensi antar-*user* dalam MU-MIMO. Berdasarkan pada alasan tersebut, penggunaan *precoding* BD pada MU-MIMO, diharapkan mampu mengurangi interferensi pada MU-MIMO.

Berkaitan dengan 5G, terdapat *waveform* yang telah menjadi kandidat yaitu *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM). Penggunaan GFDM dapat dikombinasikan dengan teknik modulasi. Modulasi yang cocok untuk mengurangi interferensi adalah *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Hasil akhir yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah mendapatkan nilai *Bit Error Rate* (BER) dan *Energy per Bit to Noise Ratio* (Eb/No) yang baik sebagai tanda bahwa kualitas layanan data pada *downlink* akan meningkat.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Perkembangan Jaringan 5G

Teknologi baru akan selalu ada dalam bidang sistem komunikasi nirkabel melihat canggihnya perangkat dan setiap pengguna menuntut layanan *data rate* yang tinggi. Terdapat syarat mutlak dalam peluncuran desain sistem komunikasi, yaitu penggunaan *bandwidth* yang lebih efisien. Generasi selanjutnya dari 4G adalah 5G, dimana akan memerlukan sejumlah pergeseran dari generasi sebelumnya yang kaku, menuju jaringan yang lebih fleksibel dan mudah beradaptasi agar berbagai tuntutan persyaratan dapat dipenuhi [1]. Dengan keunggulan utama yang ditawarkan berupa kecepatan data yang lebih signifikan, keunggulan lain telah tersaji dalam Tabel 1. dibawah ini.

Tabel 1. Perbandingan 4G dan 5G

Parameter	4G	5G
Teknologi	Nirkabel, menara radio	Banyak antena, pita radio frekuensi tinggi
Kecepatan	Maksimum 100Mbps	Maksimum 10Gbps
Latency	Cukup rendah, yaitu 10ms	Hampir 0, yaitu 1ms
Kapasitas	Kualitas jaringan menurun saat banyak perangkat terhubung	Kualitas jaringan tidak menurun meskipun banyak perangkat, karena kapasitas 10x lebih besar
Ketersediaan	Dimana saja, kecuali daerah terpencil dan daerah dengan akses terbatas	Hanya di kota besar
Kepadatan koneksi	100 ribu koneksi per km ²	1 juta koneksi per km ²
Pita frekuensi	Di bawah 6Ghz	Di atas 24.25Ghz

2.2 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

MIMO adalah teknik penggunaan antena pada pengirim dan penerima dengan jumlah lebih dari satu antena. Performansi MIMO sendiri dipengaruhi oleh kombinasi jumlah antena pada pengirim dan penerima serta metode atau algoritma deteksi pada antena MIMO [1]. Manfaat yang dapat diperoleh dari penggunaan MIMO, yaitu membantu meningkatkan kecepatan transmisi data dengan bantuan teknik *spatial multiplexing*, dapat membantu menurunkan jumlah *error rate* dengan bantuan teknik *spatial diversity* dan dapat membantu meningkatkan SNR dengan bantuan teknik *beamforming* [2].

Dalam kanal *downlink*, dengan sejumlah antena pada sisi *transmitter* akan mengirimkan sinyal secara simultan ke sejumlah *user*. Penggunaan MU-MIMO akan membuat *base station* menggandakan satu aliran data per-*user* di *downlink* dan menerima satu aliran per-*user* di *uplink*. Dengan kata lain, *base station* menggunakan antenanya untuk mengarahkan setiap sinyal ke penerima yang diinginkan di *downlink*, dan untuk memisahkan beberapa sinyal yang diterima di *uplink* [3].

2.3 Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM)

Pada teknologi 4G menggunakan *waveform Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, dimana *subcarrier* dibuat saling *orthogonal* sehingga akan saling tumpang tindih. Kelebihan OFDM adalah sinyal yang dihasilkan akan memiliki *bandwidth* yang lebih efisien dan tahan terhadap efek pemfilteran pada kanal saat proses pengiriman sinyal dengan *data rate* yang tinggi. OFDM memiliki keterbatasan untuk ikut serta dalam penerapan tuntutan dari 5G karena tingginya PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) dan emisi OOB (*Out-of-Band*). PAPR merupakan perbandingan dari daya puncak (maksimum) dengan daya rata-rata suatu sinyal. Jika nilai PAPR tinggi, akan terjadi gangguan berupa distorsi pada sinyal. Sedangkan emisi OOB berasal dari sebuah proses penjumlahan *subcarrier* sinyal di domain frekuensi. Jika nilai emisi OOB tinggi, dapat menimbulkan terjadinya interferensi antar sinyal *carrier* yang posisinya berdekatan dan pada sisi penerima, akan memerlukan proses sinkronisasi yang lama dan handal agar pada saat pengambilan simbol dapat diminimalkan kesalahannya [4].

GFDM sendiri adalah modulasi *multi-carrier* yang berkaitan dengan *pulse shaping* yang fleksibel. Hal ini menyebabkan GFDM memiliki bentuk gelombang *multicarrier non-ortogonal* dimana *subcarrier* berbentuk pulsa dengan tujuan untuk mengurangi emisi OOB. Dengan mengadopsi prinsip OFDM pada 4G, GFDM akan mengkonstruksi sinyal dari penjumlahan beberapa sinyal yang membawa simbol data tertentu pada *timeslot* dan *subcarrier* tertentu [5]. GFDM akan menutupi kekurangan dari OFDM terutama dalam menghasilkan PAPR dan OOB yang rendah.

2.4 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Pada proses modulasi, gelombang sinyal informasi (gelombang yang memodulasi) akan dicampurkan atau ditumpangkan pada gelombang pembawa (gelombang yang dimodulasi). Akibatnya, gelombang pembawa mengalami perubahan karakteristik sesuai dengan nilai sesaat dari gelombang sinyal informasi. Tujuan dari proses ini adalah untuk menghindari pengaruh gangguan pada kanal saat proses transmisi sinyal informasi [6].

Modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) merupakan kombinasi dari teknik modulasi *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan *Phase Shift Keying* (PSK). Keuntungan menggunakan QAM adalah bentuk modulasi yang lebih tinggi sehingga hasilnya akan membawa lebih banyak bit informasi per simbol. Hal ini berkaitan dengan pengaruh interferensi terhadap sistem. Jika terdapat tambahan *noise* pada sinyal di dalam kanal, maka modulasi QAM menjadi solusi untuk mengurangi [6].

2.5 Transformasi Fourier

Transformasi *fourier* merupakan sebuah transformasi dalam bentuk integral yang menyatakan kembali sebuah fungsi menjadi fungsi basis sinusoidal, dimana akan dijumlahkan atau integral dikalikan dengan beberapa koefisien [7]. Salah satu bentuk dari transformasi *fourier* adalah *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Invers Fast Fourier Transform* (IFFT). *Fast Fourier Transform* (FFT) merupakan sebuah algoritma yang digunakan dalam pengolahan sinyal dengan tujuan untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu diskrit dan frekuensi yang sebelumnya masih berbentuk vektor.

Pada umumnya, sebuah sinyal akan menggambarkan berbagai fenomena fisik, seperti suara, suhu bahkan sinyal biomedis [8]. Dalam hal ini sinyal adalah sebuah masukan dari suatu sistem dan menjadi keluaran yang direpresentasikan sebagai perubahan tegangan terhadap waktu. Salah satu contoh sinyal adalah sinyal real, dimana sinyal akan memiliki sifat real untuk semua variabel. Dan sinyal juga memiliki nilai kompleks, dimana didalamnya akan memuat faktor imajiner.

2.6 Teknik Precoding

Generalisasi dari konsep teknik *beamforming* yang mendukung transmisi multi-aliran di sistem multi-antena akan membentuk sebuah *precoding*. Dalam sistem MIMO, *precoding* memegang kendali yang sangat penting karena dapat mengurangi efek yang diciptakan oleh *path loss* dan interferensi serta dapat memaksimalkan *throughput* [8]. Dengan melibatkan banyak aliran data dan penggunaan antena MU-MIMO, dibutuhkan sebuah skema transmisi dalam teknik *precoding*.

Pada *precoding Block Diagonalization* (BD), merupakan *precoding* untuk *downlink* sistem MU-MIMO. BD merupakan *precoding* yang diterapkan pada sisi *receiver* dan memiliki skema

orthogonal yang mampu mencapai *sum capacity* dan kompleksitas komputansi yang rendah [9]. Interferensi dari *user* lain secara efisien dibuat nol.

2.7 Kanal Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Kanal *wireless* merupakan salah satu faktor yang dapat membatasi kinerja sistem komunikasi *wireless* karena sifatnya yang tidak bisa dianalisis dengan mudah. Penggunaan kanal AWGN pada saat proses transmisi berlangsung merupakan pilihan yang tepat, karena kanal ini memiliki kondisi yang membuat gangguan lain dari luar dapat diabaikan [10].

2.8 Bit Error Rate (BER)

Salah satu cara untuk mengukur kinerja dari sebuah sistem adalah menggunakan *Bit Error Rate* (BER). BER merupakan bit digital yang bernilai tinggi pada sebuah jaringan transmisi yang akan diartikan sebagai keadaan rendah, begitu pula sebaliknya. Bit yang diterima akan berubah bentuknya karena telah mengalami kesalahan dalam bit sinkronisasi, gangguan distorsi atau terkena *noise* sehingga bit tersebut dapat dikategorikan sebagai jumlah kesalahan bit [10]. Perhitungan dari BER dapat direpresentasikan melalui persamaan berikut:

$$BER = \frac{\text{jumlah bit yang error}}{\text{jumlah bit yang diterima}} \quad (1)$$

2.9 Energy per Bit to Noise ratio (E_b/N_0)

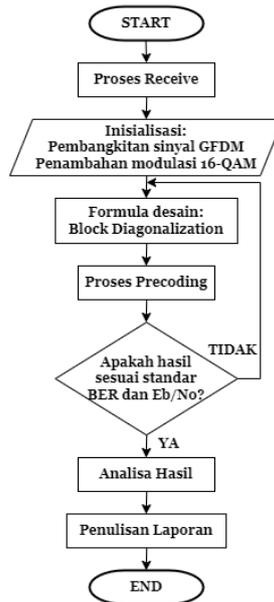
Dalam sistem komunikasi, terdapat sebuah parameter untuk mengukur kekuatan sebuah sinyal yang diinginkan terhadap sinyal yang tidak diinginkan yaitu adalah *Signal to Noise Ratio* (SNR). Jika nilai SNR yang di dapatkan mencapai lebih dari 0 dB, artinya level sinyal informasi yang diinginkan lebih besar daripada level sinyal *noise*-nya. Selain SNR, perhitungan dari nilai *Bit Error Rate* sebuah sistem akan dipengaruhi oleh nilai *Energy per Bit to Noise Ratio* (E_b/N_0), hal ini terjadi karena penggunaan jenis modulasi dalam suatu sistem [10]. E_b/N_0 sendiri adalah sebuah parameter yang berhubungan dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR) karena menjadi tolak ukur performansi dari suatu sistem dan dapat di hitung melalui persamaan berikut:

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR + 10 \log \left(\frac{B}{R} \right) \quad (2)$$

Dimana B adalah *bandwidth* dan R adalah laju data total. Sehingga jika nilai E_b/N_0 yang dihasilkan semakin besar, maka akan menghasilkan nilai BER yang rendah

3. Metode dan Pemodelan

Penelitian akan dilakukan melalui simulasi pada *software* Matlab R2017a. Secara singkat, skema tahapan penelitian telah disajikan pada Gambar 1. dibawah ini.



Gambar 1. Skema Tahapan Penelitian

Pada Gambar 1., penelitian ini akan dimulai pertama kali dengan dilakukan inisialisasi, yang meliputi pembangkitan sinyal GFDM dan penambahan modulasi 16-QAM. Setelah sinyal sudah melalui inisialisasi, selanjutnya memasukkan persamaan *precoding block diagonalization* sehingga proses *precoding* dapat dilakukan. Sinyal yang sudah melalui proses *precoding*, dapat dianalisis kinerja *precoding* tersebut melalui nilai BER dan Eb/No. Jika nilai BER dan Eb/No yang didapatkan baik atau sesuai dengan standar, maka bisa dilanjutkan pada penulisan laporan. Jika tidak, maka dapat diulang kembali proses *precodingnya*.

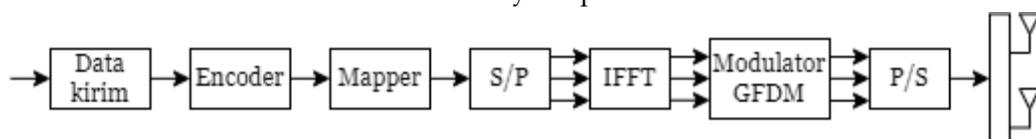
Nilai BER yang diinginkan adalah nilai yang sekecil mungkin, dengan arti bahwa sistem tersebut dapat dikatakan baik. Begitu pula dengan nilai Eb/No yang diinginkan adalah nilai yang paling besar dengan BER yang sekecil mungkin. Jika nilai Eb/No yang dihasilkan besar, dapat diartikan bahwa sinyal informasi akan sampai kepada penerima dengan kondisi yang baik dan tidak mendapatkan interferensi terlalu banyak.

Untuk mencapai keberhasilan dari kinerja *precoding Block Diagonalization* pada sistem MU-MIMO, terdapat parameter sistem lain yang akan digunakan. Parameter sistem tersebut akan diuraikan melalui Tabel 2. dibawah ini

Tabel 2. Parameter Sistem

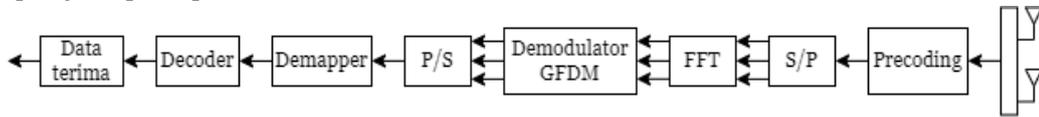
Parameter	Keterangan
Skema antena	2 x 2 , 4 x 4
Bit yang dibangkitkan	512.000 kbit/user
Mapper	16-QAM
Kanal	AWGN
Teknik <i>precoding</i>	<i>Block diagonalization</i>

Dengan menganalisis kinerja sebuah teknik *precoding* pada kanal *downlink*, maka perlu disajikan sebuah model sistem untuk kedua sisi yaitu pada sisi *transmitter* dan sisi *receiver*.



Gambar 2. Model Sistem MU-MIMO GFDM pada Transmitter

Pada Gambar 2. diasumsikan bit telah tersedia karena berhasil dibangkitkan untuk segera melalui proses *encoder* untuk dikodekan. Selanjutnya, bit yang sudah dikodekan akan dibagi menjadi beberapa simbol melalui proses *mapper* dengan modulasi 16-QAM. Deretan bit kemudian akan diubah dari bentuk *serial* menjadi paralel melalui proses S/P. Bit yang berbentuk paralel akan ditumpangkkan pada proses modulator GFDM.



Gambar 3. Model Sistem MU-MIMO GFDM pada Receiver

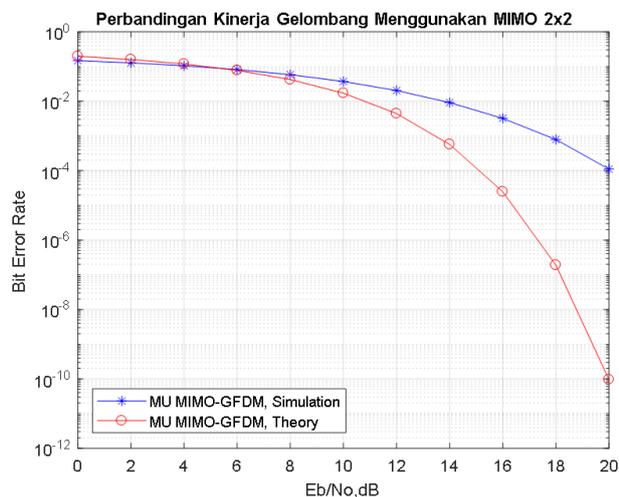
Pada Gambar 3. diasumsikan antenna *user* telah menerima sebuah sinyal informasi yang sudah melewati kanal AWGN dan dikalikan dengan matriks *precoding*. Selanjutnya, sinyal informasi yang berbentuk serial diubah menjadi paralel melalui proses S/P. Bit data yang berbentuk paralel akan diproses dalam demodulator GFDM. Bit yang telah selesai didemodulasi akan diubah kembali bentuknya menjadi *serial* dan akan melalui proses *demapper*. Dalam proses *demapper*, bit informasi akan diubah menjadi data biner dengan demodulasi dari 16-QAM.

4. Hasil dan Analisa

Pada bab ini akan dituliskan mengenai analisa dari hasil simulasi yang dilakukan berupa gambar kurva nilai BER terhadap E_b/N_0 , yaitu penggunaan *precoding block diagonalization* pada MU-MIMO untuk kanal *downlink*.

4.1 Hasil pada Skema Antena MIMO 2x2

Percobaan pertama adalah penggunaan *precoding block diagonalization* pada skema MU-MIMO dengan $N_t = 2$, $N_R = 2$ dan $N_{user} = 2$. Sehingga dihasilkan $N_{Total} = 4$, dimana N_{Total} didapatkan melalui perkalian antara N_R dan N_{user} .



Gambar 4. Perbandingan Kinerja Gelombang Menggunakan MIMO 2x2

Pada Gambar 4. merupakan hasil yang keluar saat dilakukan proses simulasi dimana hasil percobaan dipetakan sebanyak 11 titik data, mulai dari nilai BER 10^0 hingga 10^{-12} dan nilai E_b/N_0 mulai dari 0 hingga 20. Berdasarkan simulasi antenna 2x2, perbandingan hasil simulasi dan teori dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel 3. Perbandingan untuk MIMO 2x2

E_b/N_0	BER Simulasi	BER Teori
0	$1,478 \times 10^{-1}$	$1,977 \times 10^{-1}$
2	1.276×10^{-1}	$1,597 \times 10^{-1}$

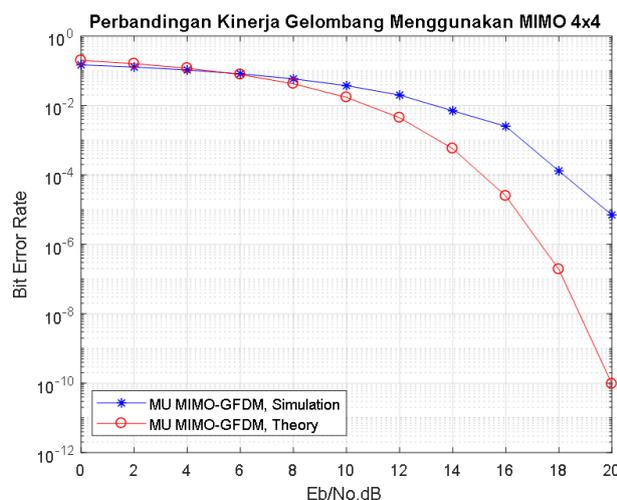
4	$1,052 \times 10^{-1}$	$1,186 \times 10^{-1}$
6	$8,172 \times 10^{-2}$	$7,762 \times 10^{-2}$
8	$5,835 \times 10^{-2}$	$4,205 \times 10^{-2}$
10	$3,717 \times 10^{-2}$	$1,706 \times 10^{-2}$
12	$2,036 \times 10^{-2}$	$4,428 \times 10^{-3}$
14	$9,164 \times 10^{-3}$	$5,721 \times 10^{-4}$
16	$3,216 \times 10^{-3}$	$2,472 \times 10^{-5}$
18	$7,901 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-7}$
20	$1,109 \times 10^{-4}$	$9,524 \times 10^{-11}$

Untuk Tabel 3. dapat diperhatikan bahwa nilai yang didapatkan pada saat simulasi mulai dari Eb/No bernilai 0 hingga 10 dB, BER yang didapatkan tidak berbanding jauh. Selebihnya saat Eb/No bernilai di atas 10, perbedaan BER antara simulasi dan teori sangat jauh.

Saat Eb/No bernilai 0, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $4,99 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 2, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $3,21 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 4, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $1,34 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 6, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $4,1 \times 10^{-3}$. Saat Eb/No bernilai 8, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $1,63 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 10, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $2,011 \times 10^{-2}$. Berdasarkan Tabel 3. diatas dapat diketahui pula jika nilai Eb/No semakin besar maka BER yang akan dihasilkan akan semakin besar pula

4.2 Hasil pada Skema Antena MIMO 4x4

Percobaan pertama adalah penggunaan *precoding block diagonalization* pada skema MU-MIMO dengan $N_t = 4$, $N_R = 4$ dan $N_{user} = 4$. Pada simulasi ini, bit yang dibangkitkan secara acak dan dikirimkan ke setiap antenna *user* dengan jumlah yang sama, yaitu 512000 bit/user. Gambar 5. merupakan hasil dari perbandingan nilai BER yang diperoleh untuk skema antenna 4x4 pada saat menggunakan simulasi dan teori.



Gambar 5. Perbandingan Kinerja Gelombang Menggunakan MIMO 4x4

Pada Gambar 5. merupakan hasil yang keluar saat dilakukan proses simulasi dimana hasil percobaan dipetakan sebanyak 11 titik data mulai dari nilai BER 10^0 hingga 10^{-12} dan nilai Eb/No mulai dari 0 hingga 20. Dibawah ini akan dijelaskan masing-masing data yang diperoleh dalam satu percobaan dengan skema antenna 4x4 ini. Berdasarkan

simulasi antenna 4x4, perbandingan hasil simulasi dan teori dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel 4. Perbandingan untuk MIMO 4x4

Eb/No	BER Simulasi	BER Teori
0	$1,478 \times 10^{-1}$	$1,977 \times 10^{-1}$
2	$1,276 \times 10^{-1}$	$1,597 \times 10^{-1}$
4	$1,052 \times 10^{-1}$	$1,186 \times 10^{-1}$
6	$8,178 \times 10^{-1}$	$7,762 \times 10^{-2}$
8	$5,841 \times 10^{-2}$	$4,205 \times 10^{-2}$
10	$3,72 \times 10^{-2}$	$1,706 \times 10^{-2}$
12	$1,99 \times 10^{-2}$	$4,428 \times 10^{-3}$
14	$7,02 \times 10^{-3}$	$5,721 \times 10^{-4}$
16	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,472 \times 10^{-5}$
18	$1,303 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-7}$
20	7×10^{-6}	$9,524 \times 10^{-11}$

Untuk Tabel 4. dapat diperhatikan bahwa nilai yang didapatkan pada saat simulasi mulai dari Eb/No bernilai 0 hingga 10 dB, BER yang didapatkan tidak berbanding jauh. Sebaliknya saat Eb/No bernilai di atas 10, perbedaan BER antara simulasi dan teori sangat jauh.

Saat Eb/No bernilai 0, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $4,99 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 2, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $3,21 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 4, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $1,34 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 6, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $4,1 \times 10^{-3}$. Saat Eb/No bernilai 8, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $1,636 \times 10^{-2}$. Saat Eb/No bernilai 10, perbandingan BER simulasi dan teori berbeda sebesar $2,014 \times 10^{-2}$. Sama seperti pada hasil simulasi antenna 2x2, jika nilai Eb/No semakin besar maka BER yang akan dihasilkan akan semakin besar pula.

Jika hasil simulasi dari antenna MIMO 2x2 dan antenna MIMO 4x4 dibandingkan, seperti pada Tabel 5. berikut:

Tabel 5. Perbandingan untuk MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

Eb/No	BER Simulasi MIMO 2x2	BER Simulasi MIMO 4x4
0	$1,478 \times 10^{-1}$	$1,478 \times 10^{-1}$
2	$1,276 \times 10^{-1}$	$1,276 \times 10^{-1}$
4	$1,052 \times 10^{-1}$	$1,052 \times 10^{-1}$
6	$8,172 \times 10^{-2}$	$8,178 \times 10^{-1}$
8	$5,835 \times 10^{-2}$	$5,841 \times 10^{-2}$
10	$3,717 \times 10^{-2}$	$3,72 \times 10^{-2}$
12	$2,036 \times 10^{-2}$	$1,99 \times 10^{-2}$
14	$9,164 \times 10^{-3}$	$7,02 \times 10^{-3}$
16	$3,216 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$
18	$7,901 \times 10^{-4}$	$1,303 \times 10^{-4}$
20	$1,109 \times 10^{-4}$	7×10^{-6}

Maka berdasarkan Tabel 5., saat nilai Eb/No mulai dari 0 hingga 10 memiliki BER yang tidak berbeda jauh antara penggunaan MIMO 2x2 dan 4x4. Tetapi jika dilanjutkan meninjau dari Eb/No yang bernilai 12 hingga 20, terlihat jelas perbedaan nilai BER-nya. Penggunaan MIMO 4x4 terlihat jauh lebih memiliki nilai paling kecil daripada penggunaan MIMO 2x2. Sehingga penggunaan antena MIMO 4x4 lebih baik daripada penggunaan antena MIMO 2x2 karena nilai BER yang dihasilkan rendah.

5. Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil simulasi yang diperoleh dan telah dianalisa pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan berupa:

1. Penggunaan antena MU-MIMO 4x4 lebih baik karena nilai BER yang dihasilkan lebih rendah daripada penggunaan MU-MIMO 2x2. Terbukti dalam hasil simulasi, BER MU-MIMO 4x4 lebih baik sekitar 0.0001102 daripada MU-MIMO 2x2.
2. Perbandingan hasil yang diperoleh pada saat dilakukan simulasi dan berdasarkan pada teori tidak berbanding jauh pada saat Eb/No bernilai 0 hingga 10.
3. Hasil BER untuk MU-MIMO 4x4 lebih mendekati pada teori daripada MU-MIMO 2x2, terbukti pada saat nilai Eb/No 12 hingga 20.

Referensi

- [1] D. A. Feryando, "Analisis Performansi Precoding Regularized Channel Inversion (RCI) pada Sistem Multiuser MIMO-GFDM Untuk Kanal Downlink 5G," *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2017.
- [2] E. Wulansari, C. B. Kristiningtyas, dan Y. Moegiharto, "Kinerja Detektor Zero Forcing (ZF) dan Minimum Mean-Squared Error (MMSE) pada Sistem Multi User MIMO dengan Teknik Linear Precoding Block Diagonalization (BD)," *Prosiding SENTIA - Politeknik Negeri Malang*, vol. 8, pp. 48-53, 2016.
- [3] S. Pramono, "Kinerja Precoding pada Downlink MU-MIMO". *J. Teknik Elektro - Politeknik Negeri Semarang*, vol. 2, no. 3, pp. 203-207, 2013, [Online]. Available: <http://www.profheath.org/mimo->
- [4] M. Korde and R. M. Bodade, "BER and Capacity Improvement for Multiuser MIMO System by MRT Precoding Technique," *Wireless Personal Communications*, vol. 1, no. 108, pp. 581-590, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06419-6>.
- [5] Y. Li, F. Li, Q. Guo, X. Guo, L. Ma, B. Wang, and S. Qiu, "Improved Multiuser MIMO Block Diagonalization," *Atlantis Highlights in Engineering*, vol. 3, pp. 38-41, 2019.
- [6] A. Taneja and N. Saluja, "Linear Precoding with User and Transmit Antenna Selection," *Wireless Personal Communications*, vol. 3, no. 109, pp. 1631-1644. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06642-1>.
- [7] Y. Zhang, J. Gao, and Y. Liu, "MRT precoding in downlink multi-user MIMO systems," *Eurasip J. on Wireless Communications and Networking*, 2016, <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0738-6>.
- [8] M. A. Albreem *et al.*, "Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO," *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*, vol. 9, pp. 60764-60801, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073325>.
- [9] A. Ijaz *et al.*, "Analysis of Candidate Waveforms for 5G Cellular Systems," *Intech*, 2016, <http://dx.doi.org/10.5772/66051>.
- [10] S. Pramono and E. Triyono, "Comparative Performance Analysis of Linear Precoding in Downlink Multi-User MIMO," *Proceeding of EECSI*, 2018.