

## Kinerja *Multi-user MIMO OFDM* dengan *Block-Diagonalization Precoding*

<sup>1\*</sup>**Puji Handayani, <sup>2</sup>Beny Burhanusshomad**

<sup>1,2</sup> Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

<sup>1</sup> puji@ee.its.ac.id, <sup>2</sup> benyburhan@gmail.com

---

### Article Info

#### Article history:

Received January 9<sup>th</sup>, 2023

Revised January 21<sup>th</sup>, 2023

Accepted February 4<sup>th</sup>, 2023

---

#### Keyword:

Multi-user MIMO  
BD Precoding,  
Zero Forcing  
MMSE

---

### ABSTRACT

Multiple-input multiple-output (MIMO) is a transmission technology that uses more than one antenna both on the transmitter side and on the receiver side. In the communication services, the system will involve more than one active user who uses one base station (BS) together so that it is called multi-user MIMO (MU-MIMO). This paper discusses the performances of MU-MIMO when it uses block diagonalization (BD) precoding and applies minimum mean squared error (MMSE) detector. As a comparison we also apply zero-forcing (ZF) detector. From the simulations that have been done, it is found that the MMSE had better performances than the ZF detector in terms of BER. We also consider the performance when users are moving. The simulation results show that BER performances are decrease slowly when users are moving.

Copyright © 2023 Jurnal JEETech.  
All rights reserved.

---

#### Corresponding Author:

Puji Handayani,

Electrical Engineering Department, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Email: puji@ee.its.ac.id

**Abstrak**— Multiple-input multiple-output (MIMO) adalah teknologi transmisi yang menerapkan lebih dari satu antena di sisi pemancar dan penerima. Dalam proses telekomunikasi, setiap *base station* (BS) memberikan layanan kepada lebih dari satu pengguna secara bersama-sama, karena itu sistem ini dinamakan *multi-user MIMO* (MU-MIMO). Makalah ini membahas kinerja sistem MU-MIMO pada kondisi sistem menerapkan proses *block diagonalization* (BD) *precoding* di BS dan teknik deteksi *minimum mean squared error* (MMSE) serta teknik deteksi *zero forcing* (ZF) di pengguna. Dari simulasi yang telah dilakukan didapatkan bahwa kinerja *bit error rate* (BER) sistem dengan teknik BD *precoding* dan deteksi MMSE mempunyai kinerja sedikit lebih baik dibandingkan dengan sistem dengan teknik BD *precoding* yang sama dan teknik deteksi ZF. Pengamatan pada kondisi pengguna yang sedang bergerak menunjukkan bahwa terjadi penurunan kinerja kedua sistem tersebut.

### I. Pendahuluan

Teknologi komunikasi *wireless* selalu mengalami perkembangan. Pada awal mulanya, teknologi *wireless* berupa analog sehingga hanya mampu melayani komunikasi suara saja. Hingga selanjutnya berkembang menjadi teknologi *wireless* digital yang mampu melayani komunikasi suara dan juga data yang berupa teks sederhana (SMS). Perkembangan selanjutnya yaitu 3G menjadikan layanan yang disediakan bertambah yaitu suara, teks, dan data. 3G dapat melayani komunikasi data melalui internet dikarenakan memiliki *bandwidth* yang besar. Karena penggunaan data melalui internet menjadi lebih tinggi, maka muncul teknologi 4G dimana sistem komunikasi ini berbasis pada *internet protocol* (IP). 4G memiliki bandwidth yang sangat besar [1]. Teknologi 4G memanfaatkan antena dengan

jumlah yang banyak pada *transmiter* dan *receiver* yang kemudian disebut dengan MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) [2].

Selanjutnya teknologi 4G dikembangkan lagi menjadi 5G dikarenakan kebutuhan akan penggunaan komunikasi data yang semakin meningkat pesat. Dalam penerapannya, sebuah *base station* akan melayani lebih dari satu pengguna, baik pengguna dengan *single antenna* maupun pengguna dengan *multiple antenna*. Hal ini disebut dengan *multiuser MIMO (MU-MIMO)*. Sistem *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) digunakan untuk memungkinkan penggunaan beberapa frekuensi subcarrier yang saling *orthogonal* sehingga dapat mengurangi interferensi antara simbol-simbol yang dikirimkan. Pada sistem OFDM ditambahkan *guard interval* yang berguna untuk memberikan jarak antara satu simbol dengan simbol lainnya. Pada proses transmisi, penggunaan *block diagonalization* diperlukan untuk menghilangkan interferensi antara *user* satu dengan lainnya. *Block diagonalization* menggunakan kanal dari *user* lain yang kemudian dilakukan dekomposisi terhadap kanal tersebut sehingga akan didapatkan nilai yang *orthogonal*. Nilai yang *orthogonal* inilah yang akan dimanfaatkan untuk menghilangkan interferensi dari *user* lainnya. Dengan menggabungkan sistem OFDM dan *block diagonalization* maka diharapkan data yang dikirimkan hanya akan terpengaruh oleh kanal dan noise saja tanpa ada interferensi antara simbol maupun antara *user*.

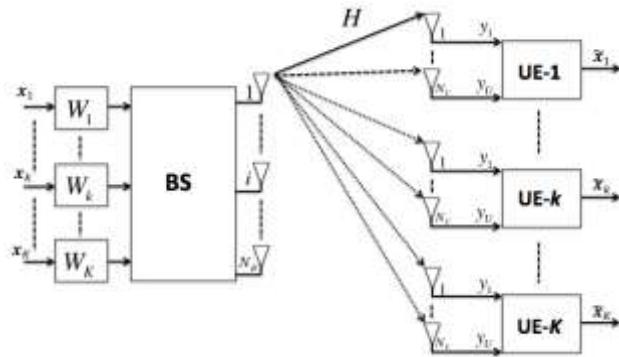
Skema deteksi *zero-forcing* dan MMSE dapat digunakan pada receiver untuk mendekripsi simbol yang telah terkirim. *Zero-forcing* adalah skema paling sederhana yang sering digunakan. Metode ini memanfaatkan informasi kanal yang dimiliki untuk menghilangkan pengaruh kanal. Metode MMSE adalah pengembangan dari metode *zero-forcing*, dimana metode ini akan memperhitungkan adanya varian noise. Pada makalah ini dibahas perbandingan penggunaan kedua metode ini. Performansi sistem MU-MIMO dengan penerapan detektor *zero-forcing* dan MMSE akan dibandingkan dengan mengamati nilai BER sebagai fungsi SNR (*signal to noise power ratio*).

Kontribusi khusus dari penelitian ini adalah dengan adanya pengamatan terhadap penerima yang melakukan pergerakan. Dengan menambahkan kondisi dimana penerima melakukan pergerakan dengan kecepatan tertentu maka analisa perbandingan dapat dilakukan terhadap kondisi dimana penerima diam dan bergerak.

## II. Model Sistem

### A. Konsep Sistem MU-MIMO

Proses komunikasi secara umum akan melibatkan lebih dari satu *user*. Pada model sistem yang dibahas di makalah ini, jumlah *user* total adalah  $K$ ,  $K$  *user* ini menggunakan *base station* (BS) yang sama. Pada setiap *user equipment* (UE) digunakan lebih dari satu antena penerima sehingga disebut sebagai *multi-user MIMO (MU-MIMO)*. Pada Gambar 1 ditunjukkan skema MU-MIMO dengan  $K$ -*user* dan satu BS.



Gambar 1. Skema MU-MIMO [3]

Jumlah total dari antena penerima adalah [3]

$$N_{total} = KN_u \quad (1)$$

Sinyal yang dikirimkan untuk *user* ke- $k$  adalah  $x_k \in \mathbb{C}^{N_u}$ . Matriks kanal antara BS dan  $K$  *user* adalah  $H \in \mathbb{C}^{N \times M}$  dan dapat dituliskan sebagai berikut [4] [5],

$$H = [H_1^T \dots H_k^T \dots H_K^T]^T \quad (2)$$

Dimana  $K$  adalah matriks kanal dari *user* ke- $k$ . Pada kanal *flat fading*, sinyal yang diterima oleh *user*  $k$  adalah

$$y_k = H_k x_k + H_k \sum_{j=1, j \neq k}^K x_j + z_k \quad (3)$$

Dimana  $x_k$  adalah sinyal yang ditransmisikan dan  $z_k$  adalah derau pada *user* ke- $k$ . Dari persamaan (3) diatas, suku ke dua adalah komponen *multi user interference* (MUI). Untuk mengatasi adanya efek dari MUI maka pada sisi BS dilakukan proses *precoding*. *Precoding* untuk *user* ke- $k$  dapat dituliskan sebagai  $W_k$ . Dari persamaan (3) maka sinyal yang diterima oleh *user* ke- $k$  menjadi

$$y_k = H_k W_k x_k + H_k \sum_{j=1, j \neq k}^K W_j x_j + z_k \quad (4)$$

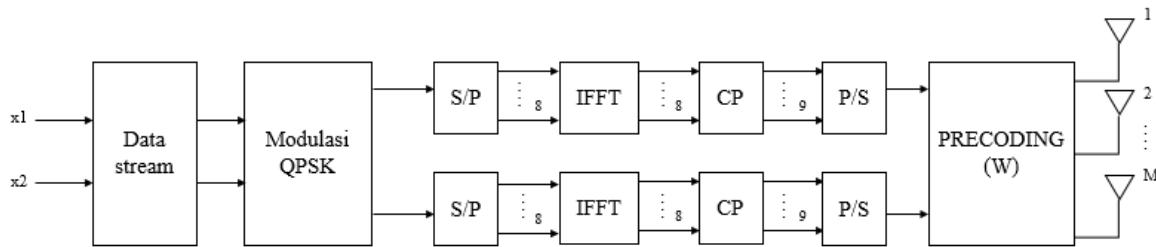
Tujuan dari precoding adalah untuk mengurangi efek dari MUI. Untuk itu maka dicari nilai dari  $H_k W_j = 0$  dimana  $k \neq j$ , sehingga pada kondisi ini sinyal yang diterima oleh *user* ke- $k$  adalah [6]

$$y_k = H_k W_k + z_k \quad (5)$$

Dengan menerapkan *precoding* pada sisi BS maka sinyal yang diterima oleh *user* yang dituju tidak akan terganggu dengan adanya sinyal lain yang dikirimkan untuk *user* lainnya.

### B. Pemancar MU-MIMO

Diagram kotak sistem pemancar dapat dilihat pada Gambar 2. Pada sisi pemancar, aliran data yang akan ditujukan kepada masing-masing *user* akan melalui beberapa tahap sebelum dikirimkan. Pertama-tama, aliran data tiap *user* akan dimodulasi dengan metode QPSK. Setelah dimodulasi, aliran data tiap *user* diubah menjadi aliran paralel dan kemudian dilakukan proses IFFT terhadap data dan proses penambahan *guard interval*. Dalam penelitian ini digunakan *cyclic prefix* (CP) sebagai *guard interval*. Proses IFFT dan penambahan CP merupakan proses OFDM. Setelah aliran data yang dikirimkan menjadi simbol-simbol OFDM, data diubah kembali menjadi aliran serial dan kemudian memasuki blok *precoding* (W). *Precoding* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *block diagonalization*.



Gambar 2. Blok Diagram Pemancar MU-MIMO

### C. Model Kanal

Proses transmisi yang dibahas pada makalah ini adalah transmisi *downlink* antara BS dengan penerima. Kanal radio  $H$  dimodelkan dengan bilangan acak kompleks berdistribusi Gaussian. Dimensi dari kanal antara BS dengan penerima adalah  $H \in \mathbb{C}^{N \times M}$ , dimana  $M$  adalah jumlah antena pemancar dan  $N$  adalah jumlah antena pada penerima. Dengan demikian, sinyal yang diterima pada penerima setelah melewati kanal dapat dituliskan sebagai berikut [5]:

$$y_k = H_k x + z_k \quad (6)$$

Dimana  $k = 1, \dots, K$  merupakan notasi penerima ke- $k$  sampai dengan  $K$  jumlah penerima. Sinyal yang dikirimkan disimbolkan dengan  $x$ , dimensi dari sinyal yang dikirimkan adalah  $x = 1 \times L$  untuk setiap penerima, dimana  $L$  adalah jumlah data yang dikirimkan.

Kanal untuk setiap penerima dapat dituliskan dengan  $h_k = [h_{k,1}, \dots, h_{k,M}] \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ , dimana kanal dari setiap penerima merupakan elemen dari bilangan kompleks. Derau diantara pengirim dan penerima pada proses transmisi disimbolkan dengan  $z_k$ .

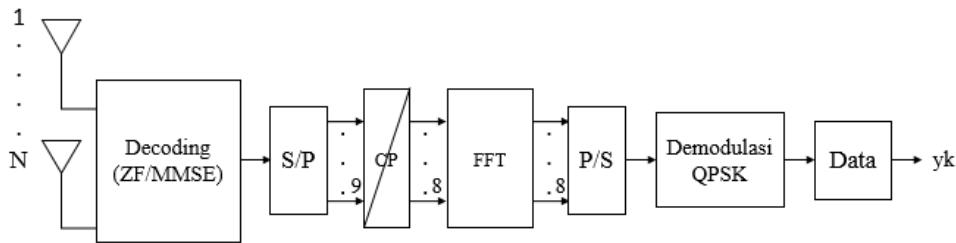
Matriks kanal dari semua penerima yang digunakan dimodelkan dengan *independent identically distributed* (i.i.d.) gaussian dengan variabel kompleks yang dibangkitkan secara acak. Kanal  $\mathbf{H}$  dapat dituliskan sebagai berikut,  $H = [H_1^T \dots H_2^T \dots H_K^T]^T$ . Pada BS diasumsikan mengetahui informasi mengenai kanal  $\mathbf{H}$ . Daya pancar untuk pemancar diasumsikan sebesar 1, sehingga besarnya daya pancar untuk setiap pemancar =  $1/M$ .

Dalam proses transmisi setiap sinyal yang ditransmisikan dapat tercampur sehingga diperlukan metode precoding (W). Precoding bertujuan agar sinyal yang ditujukan untuk suatu penerima tidak tercampur dengan sinyal untuk penerima lainnya. Dengan menerapkan precoding maka dapat dituliskan sebagai [6].

$$y_k = H_k W_k x_k + z_k \quad (7)$$

#### D. Penerima MU-MIMO

Diagram kotak penerima MU-MIMO untuk tiap user ditunjukkan pada Gambar 3. Proses pada penerima adalah proses kebalikan dari pemancar. Pertama-tama sinyal yang diterima mengalami proses *decoding*. Kemudian data serial keluaran proses *decoding* diubah menjadi aliran data parallel, dan dibuang CP-nya. Selanjutnya dilakukan proses FFT dan data diubah menjadi aliran serial kembali. Proses berikutnya adalah *demodulasi QPSK*. Keluaran proses ini adalah data yang diterima oleh *user* ke  $k$  tertentu.



Gambar 3. Diagram Kotak Penerima MU-MIMO

#### E. Precoding

Dalam proses transmisi diperlukan *precoding* untuk menekan interferensi antar *user* dan membagi sinyal yang akan dikirimkan kepada setiap antena pemancar. Pada sisi penerima diperlukan metode *decoding* untuk dapat mengubah simbol-simbol yang dikirimkan ke dalam bentuk bit yang dapat dibaca oleh penerima.

Metode *block diagonalization* digunakan sebagai *precoding* pada pemancar yang bertujuan untuk menghilangkan interferensi dari sinyal atau data yang ditujukan untuk *user* lainnya. *Block diagonalization* menggunakan dekomposisi kanal dari *user* lainnya yang kemudian akan digunakan sebagai *precoding* untuk *user* yang dituju [3]. Metode ini menjadikan MU-MIMO menjadi parallel single *user* MIMO (SU-MIMO). Diasumsikan jumlah antena pada pemancar sama dengan jumlah antena total pada penerima, sehingga untuk  $K$  *user*  $M=N_{\text{total}}=K \times N$ . Dengan menggunakan *singular value decomposition* (SVD), kanal untuk *user* ke- $k$  dapat diruliskan sebagai berikut [6]

$$H_k = U_k \Lambda_k V_k^H \quad (8)$$

Dimana  $U_k$  adalah matriks berukuran  $N \times N$  dan  $V_k$  adalah matriks berukuran  $M \times M$ .  $U_k$  dan  $V_k$  adalah *unitary*, sehingga  $U_k U_k^H = I_N$  dan  $V_k^H V_k = I_M$  menghasilkan matriks identitas. Kolom pada  $U_k$  dan  $V_k$  adalah *left singular vector* dan *right singular vector* dari  $H_k$ . Sedangkan matriks  $\Lambda_k$  berukuran  $N \times M$  adalah matriks diagonal yang hanya memiliki nilai yang tidak nol pada diagonalnya. Matriks  $V_k$  dapat dituliskan sebagai  $\begin{bmatrix} V_k^{(1)} & V_k^{(0)} \end{bmatrix}$ , dimana  $V_k^{(1)}$  adalah *non-zero singular vector* dan  $V_k^{(0)}$  adalah *zero singular vector*. Persamaan (8) diatas dapat dituliskan sebagai [6]

$$H_k = U_k \Lambda_k V_k^H = U_k \Lambda_k \begin{bmatrix} V_k^{(1)} & V_k^{(0)} \end{bmatrix}^H \quad (9)$$

Matriks  $V_k^{(0)}$  orthogonal terhadap *null space* dari  $H_k$ , sehingga precoding *block diagonalization* dapat dituliskan sebagai [6]

$$W_j = V_k^{(0)}, \forall k \neq j \quad (10)$$

#### F. Detector

Pada penerima, detektor dibutuhkan untuk mendeteksi simbol-simbol OFDM yang telah diterima oleh penerima. Simbol OFDM yang diterima akan dideteksi menjadi bentuk biner sehingga dapat dibaca oleh penerima. Dua metode deteksi akan digunakan pada penelitian ini yaitu *zero-forcing* (ZF) dan *minimum mean square error* (MMSE). Teknik *zero forcing* dapat menghilangkan interferensi antar antena, persamaan dari detektor *zero forcing* adalah sebagai berikut [3][7],

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (11)$$

Dengan mengaplikasikan precoding BD, maka detector *zero forcing* dapat dituliskan dengan persamaan berikut

$$W_{ZF} = (WH^H WH)^{-1} WH^H \quad (12)$$

Teknik deteksi *minimum mean square error* (MMSE) adalah teknik lanjutan dari *zero forcing*. Pada teknik MMSE, pengaruh derau diperhatikan sehingga dapat meminimalisir kesalahan deteksi akibat adanya derau. Persamaan detector MMSE dapat dituliskan sebagai berikut [8]

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma_z^2 I)^{-1} H^H \quad (13)$$

Dimana  $\sigma$  adalah nilai variasi dari derau. Dengan menerapkan precoding BD maka persamaan untuk detector MMSE dapat dituliskan sebagai berikut

$$W_{MMSE} = (WH^H WH + \sigma_z^2 I)^{-1} WH^H \quad (14)$$

### III. Hasil dan Pembahasan

Pada sub bab ini dibahas hasil simulasi yang telah dilakukan. Hasil simulasi yang ditampilkan berupa grafik BER (*Bit Error Rate*) terhadap SNR dari sistem MU-MIMO OFDM dengan *precoding block diagonalization* pada pemancar dan menggunakan detektor *zero-forcing* dan MMSE pada penerima. Dengan penambahan kondisi dimana penerima melakukan pergerakan dengan kecepatan 3 km/jam maka dapat dilakukan perbandingan performansi dari sistem MU-MIMO dalam kondisi penerima yang diam dan penerima yang bergerak.

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan kondisi user diam dan user bergerak. Pada kondisi user bergerak, kanal berubah setelah durasi tertentu yang ditentukan berdasarkan *delay spread* kanal.

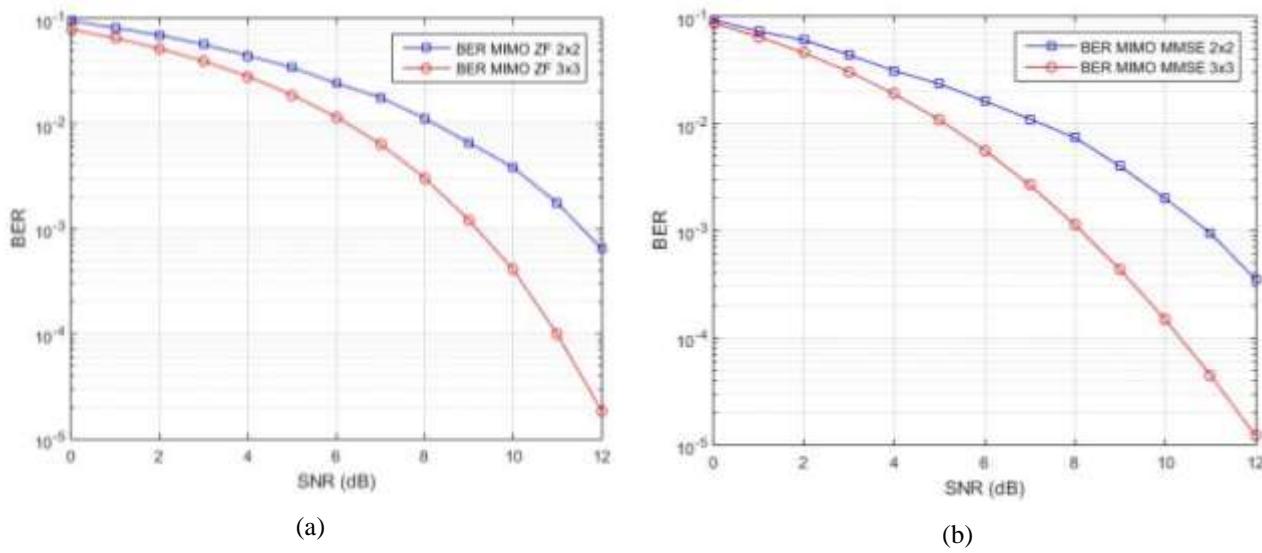
#### A. MU-MIMO dengan kondisi user diam

Kinerja sistem dengan user diam yang telah disimulasikan dengan jumlah antena pemancar 4 dan 6 ditunjukkan pada Gambar 4. Untuk mendapatkan data perbandingan kinerja yang lebih jelas, bisa diperhatikan hasil yang dideskripsikan pada Tabel 1.

Perbandingan kinerja dari MIMO  $2 \times 2$  dan MIMO  $3 \times 3$  dengan detektor ZF pada Tabel 1 menunjukkan bahwa pada saat SNR 12 perbedaan BER pada kedua skema terpaut jauh yaitu 0.00065 untuk MIMO  $2 \times 2$  dan 1.85E-05 untuk MIMO  $3 \times 3$ . Perbedaan ini disebabkan oleh jumlah *diversity* yang lebih banyak pada MIMO  $3 \times 3$  sehingga kinerja yang didapatkan semakin baik. Pada sistem yang menggunakan detector MMSE, pada saat SNR 12 perbedaan BER pada kedua skema terpaut jauh yaitu 0.00035 untuk MIMO  $2 \times 2$  dan 1.21E-05 untuk MIMO  $3 \times 3$ . Sebagaimana pada sistem yang menggunakan detector ZF, perbedaan ini disebabkan oleh jumlah diversity yang lebih banyak pada MIMO  $3 \times 3$  sehingga kinerja yang didapatkan semakin baik.

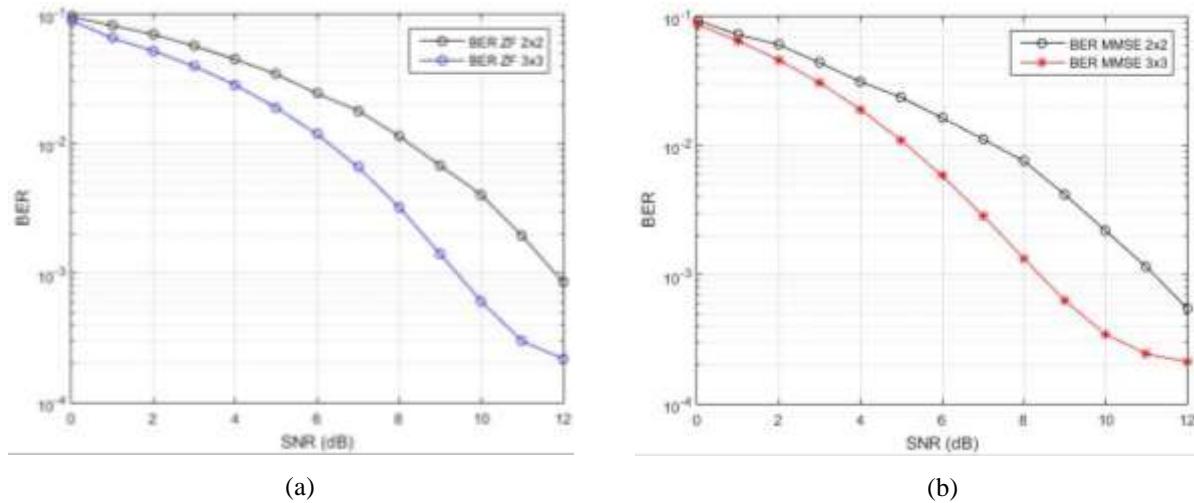
Tabel 1. Perbandingan Kinerja Saat User Diam, Sistem Menggunakan Detector ZF dan MMSE

SNR	BER ZF		BER MMSE	
	Skema 2x2	Skema 3x3	Skema 2x2	Skema 3x3
0	0.09595	0.089346	0.09355	0.08719
4	0.04465	0.028289	0.0312	0.01893
8	0.01125	0.003037	0.0074	0.00114
12	0.00065	1.85E-05	0.00035	1.21E-05

Gambar 4. Kinerja Sistem Saat *User* Diam dengan *Detector*: (a) ZF, (b) MMSE

#### B. MU-MIMO dengan kondisi *user* bergerak

Hasil simulasi pada kondisi bergerak dan perbandingannya diberikan pada Gambar 5 dan Tabel 2.

Gambar 5. Kinerja Sistem Saat *User* Bergerak dengan *Detector*: (a) ZF, (b) MMSETabel 2. Perbandingan Kinerja Saat *User* Bergerak, Sistem Menggunakan *Detector* ZF dan MMSE

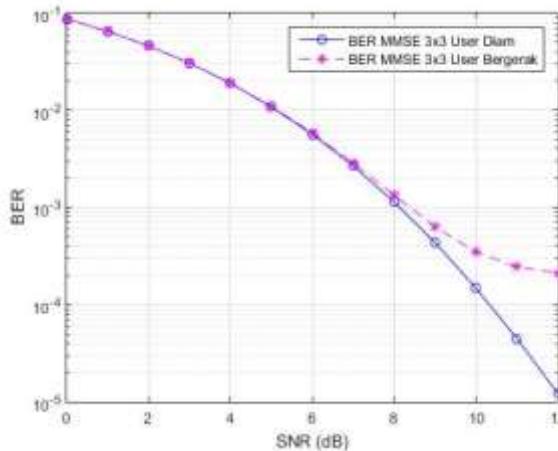
SNR	BER ZF		BER MMSE	
	Skema 2x2	Skema 3x3	Skema 2x2	Skema 3x3
0	0.09615	0.089546	0.09375	0.0872917
4	0.04485	0.028489	0.0314	0.0190223
8	0.01145	0.003237	0.0076	0.001308
12	0.00085	0.0002185	0.00055	0.0002121

Dari hasil simulasi di Gambar 5 dan Tabel 2, tampak bahwa saat sistem menggunakan detektor ZF, pada sistem  $3 \times 3$  kinerja dari detektor ZF lebih baik dibandingkan dengan sistem  $2 \times 2$ . Hal ini disebabkan oleh penggunaan antena

pemancar dengan jumlah lebih banyak. Pada saat SNR 12 dB perbedaan BER cukup besar yaitu 0.00085 dan 0.000218. Begitu pula saat sistem menggunakan detektor MMSE, tampak bahwa sistem  $3 \times 3$  mempunyai kinerja yang lebih baik yang ditunjukkan dengan nilai BER yang kecil.

### C. Perbandingan kinerja saat user diam dan bergerak

Pada bagian ini dibahas perbandingan kinerja sistem saat *user* diam dan bergerak. Sistem menggunakan detektor MMSE, dengan pertimbangan bahwa kinerja MMSE lebih baik dari pada ZF berdasarkan hasil simulasi yang telah dibahas sebelum ini. Kinerja sistem ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Kinerja Sistem Saat User Diam dan Bergerak dengan *Detector* MMSE

Dari Gambar 6 tampak bahwa kinerja sistem saat *user* diam terus meningkat dengan naiknya SNR. Tetapi saat *user* bergerak tampak kinerja sistem tidak semakin naik dengan naiknya SNR untuk SNR lebih besar dari 10 dB. BER terkecil diperoleh saat SNR 10 dB tersebut, yaitu  $2 \times 10^{-4}$ . BER tidak bisa menjadi lebih kecil meskipun SNR diperbesar. Hasil ini menunjukkan bahwa pada saat *user* bergerak, terdapat keterbatasan dari jenis transmisi yang bisa dilakukan terkait jenis data yang akan ditransmisikan. Untuk transmisi data yang memerlukan kinerja BER sangat baik diperlukan teknik tambahan untuk mengatasinya.

## IV. Kesimpulan

Dari pembahasan yang sudah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kinerja dari detektor *Zero-forcing* dan MMSE dipengaruhi oleh banyaknya jumlah antena yang digunakan. Pada skema  $2 \times 2$  BER terkecil yang didapatkan adalah 0.00035 sedangkan pada skema  $3 \times 3$  BER terkecil yang didapatkan adalah 1.213E-05.
2. Metode deteksi MMSE memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *Zero-forcing* ditunjukkan dengan nilai BER dari ZF pada skema  $3 \times 3$  adalah 1.85E-05 sedangkan nilai BER dari MMSE adalah 1.213E-05. Hal ini dikarenakan pada metode MMSE nilai dari variasi derau diperhitungkan.
3. Nilai BER terkecil didapatkan pada saat sistem menggunakan metode deteksi MMSE dengan skema  $3 \times 3$  yaitu 1.213E-05 dengan SNR sebesar 12 dB pada saat kondisi *user* diam.
4. Pergerakan *user* menyebabkan adanya perubahan kanal dalam setiap proses transmisi, hal ini mengakibatkan kinerja sistem tidak semakin baik meskipun SNR semakin tinggi saat BER mencapai  $2 \times 10^{-4}$ .
5. Pada saat *user* bergerak, untuk transmisi data yang memerlukan kinerja BER sangat baik diperlukan teknik tambahan untuk mengatasi penurunan kinerja akibat pergerakan *user*.

## V. Daftar Pustaka

- [1]. Qualcomm, “The Evolution of Mobile Technologies”, Juni 2014
- [2]. <https://id.wikipedia.org/wiki/4G>

- [3]. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chun G. Kang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB," WILEY, 2010.
- [4]. Rohde & Schwarz, "Introduction to MIMO-1MA142\_0e", 2009.
- [5]. K. Zu, "Novel efficient precoding techniques for multiuser MIMO systems," Ph.D. thesis, Department of Electronics, University of York, York, UK, 2013.
- [6]. K. Zu, R. de Lamare and M. Haardt, "Generalized design of low-complexity block diagonalization type precoding algorithms for multiuser MIMO systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 10, pp. 4232-4242, 2013.
- [7]. A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, "Introduction to Space-time Wireless Communications", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003.
- [8]. L. Bai and J. Choi, "Low Complexity MIMO Detection", Boston, MA, USA: Springer, 2012